

Невенка Андоновска

Мимоза Ристова

Мирјана Јоноска

Зора Митреска

Оливер Зајков

Доне Гершановски

ФИЗИКА

**ЗА IV ГОДИНА СРЕДНО СТРУЧНО
ОБРАЗОВАНИЕ**

Скопје, 2010

Рецензенти:

д-р Благој ВЕЉАНОСКИ
Зеќирија ЗЕЌИРИ
Михаил ТРЕНОВСКИ

Автори:

д-р Невенка АНДОНОВСКА, редовен професор на ПМФ, Скопје
д-р Мимоза РИСТОВА, редовен професор на ПМФ, Скопје
д-р Мирјана ЈОНОСКА, редовен професор на ПМФ, Скопје
д-р Зора МИТРЕСКА, редовен професор на ПМФ, Скопје
д-р Оливер ЗАЈКОВ, вонреден професор на ПМФ, Скопје
д-р Доне ГЕРШАНОВСКИ, редовен професор на ПМФ, Скопје

ФИЗИКА

за IV година средно стручно образование

Лектура:

Наталија Глинска - Ристова

Илустрации:

авторите

Издавач:

Министерство за образование и наука за Република Македонија

Печати:

Графички центар дооел, Скопје

Тираж:

1.000

Со решение на Министерот за образование и наука на Република Македонија
бр. 22-4478/1 од 09.08.2010 година се одобрува употребата на овој учебник

CIP – Каталогизација во публикација

Национална и универзитетска библиотека “Св.Климент Охридски”, Скопје

53(075.3)

ФИЗИКА за IV година средно стручно образование / Невенка Андоновска ... [и др.]. - Скопје :

Министерство за образование и наука на Република Македонија, 2010. - 513 стр. : илустр. ; 30 см

Автори: Невенка Андоновска, Мимоза Ристова, Мирјана Јоноска, Зора Митреска, Оливер Зајков,

Доне Гершановски

ISBN 978-608-226-093-8

1. Андоновска, Невенка [автор]

COBISS.MK-ID 84257290

ПРЕДГОВОР

Овој учебник по ФИЗИКА е наменет за сите струки од IV година средно стручно образование. Учебникот е избран за сите струки /Изборна настава за мајура/. Овој учебник одговара за таа намена. Тој ги покрива следниве 6 различни програми:

- програма по физика за *електротехничката струка*;
- програма по физика за *машинската струка*
- програма по физика за *графичка струка* и *градежно-геодетската струка*
- програма по физика за *сообраќајна струка*
- програма по физика за *производствено-процесна струка*
- програма по физика за *здравствена и земјоделско-ветеринарна струка* и *лични услуги*

Во сите наведени струки, физиката како општообразовен предмет е застапена со два часа седмично (72 часа годишно). Секоја од програмите содржи по 6 до 9 теми кои делумно се прекриваат, а делумно се различни, па затоа овој учебник нужно опфати материјал од вкупно 23 теми.

Задача на наставникот е да се раководи од програмата за соодветната струка и да ги издвои само бараните содржини за обработка.

Од дидактичка гледна точка, учебникот дозволува и мисловно активирање на учениците. Затоа, онаму каде што е потребно појасно и со поголема длабочина разбирање на материјата, посочени се примери од експерименти или примери на решени задачи. Речиси секоја наставна единица завршува со соодветни прашања, задачи и активности, често поврзани и со користењето на компјутер или активност поврзана со експеримент кој ученикот може сам да го направи.

Иако при пишувањето на учебников авторите беа во перманентна соработка, сепак, секој автор е главен носител на одредена тема или наставна единица. Во таа смисла:

- **д-р Невенка Андоновска** е автор на: поглавјата: 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, 2.6, 2.7, поглавјата: 3.1, 3.2, 3.3, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, цела глава 5, поглавјата: 7.1, 7.2, поглавјето 9.9, цела глава 11, поглавјата: 12.1, 12.2, 12.3, 12.4, 12.6, 12.7, 12.9, 12.10, 12.18, 12.19, цела глава 13, цела глава 14, поглавјата: 15.2, 15.5, 15.6, 15.7, 15.8, 15.9, 15.10, цела глава 16, поглавјата 17.1, 17.2, 17.3, 17.4, (заедно со М. Јоноска) 17.5, 17.6, 17.7, 17.8, поглавјата 17.9(заедно со М. Јоноска), 17.10 (заедно со М. Јоноска), 17.11, 17.13, 17.14, поглавјата 19.2, 19.3, 19.4, 19.5, 19.6 , 19. 7 (заедно со Д. Гершановски)

- **д-р Мимоза Рисићова** е автор на: цела глава 6, поглавјата 8.1, 8.2, и 8.3 (заедно со М. Јоноска), поглавјата: 10.11, 10.12, цела глава 20, цела глава 21;
- **д-р Мирјана Јоноска** е автор на: поглавјето 2.4, поглавјата: 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, цела глава 4, поглавјата: 7.3, 7.4, поглавјата 8.1, 8.2, и 8.3 (заедно со М. Ристова), поглавјата: 9.5, 9.6, 9.7, 9.8, поглавјата: 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 10.8, 10.9, 10.10, 10.13, 10.14, 10.15, поглавјата 12.5, 12.8, 12.11, 12.12, 12.13, 12.14, 12.15, 12.16, 12.17, поглавјата: 15.1, 15.3, 15.4, поглавјата 17.4 (заедно со Н. Андоновска), поглавјата 17.9 (заедно со Н. Андоновска), 17.10 (заедно со Н. Андоновска), 17.12.
- **д-р Оливер Зајков** е автор на поглавјата: 9.1, 9.2, 9.3, 9.4, цела глава 22;
- **д-р Зора Мишреска** е автор на целата глава 1;
- **д-р Доне Гершановски** е автор на поглавјата: цела глава 18, поглавјата 19.1, 19.7 (заедно со Н. Андоновска), 19.8, цела глава 23.

Авторите ќе им бидат благодарани на сите идни корисници на овој учебник ако со свои сугестии, предлози или укажувања им ги посочат местата на недоволна прецизност или евентуален пропуст од кој и да било вид; стручен, дидактички или технички.

Јуни, 2010

Од авторите

СОДРЖИНА

1.1 Кинематика на тврдо тело во ротација.....	1
1.2. Динамика на ротационото движење. Момент на силата по однос на оскатата на ротација	4
1.3. Основен закон на Динамиката на ротационото движење. Момент на инерција	8
1.4. Момент на импулсот по однос на оската на ротација.....	12
1.5. Закон за запазување на моментот на импулсот на тело по однос на оската на ротација.....	14
1.6. Кинетичка енергија на ротационото движење	15
1.7. Аналогија помеѓу величините и законите при транслаторно и ротационо движење.....	18
2.1. Периодично движење.	
Основни поими и елементи на осцилаторното движење	19
2.1.1. Хармониски осцилации. Елементи на осцилаторното движење	20
2.2. Карактеристични величини на хармониските осцилации	21
2.3. Равенка за брзината и забрзувањето на хармониско осцилаторно движење	22
2.4. Математичко нишало. Период на осцилирање на нишалото	25
Физичко нишало	27
2.5. Енергија на хармониски осцилатор	28
2.6. Придушени осцилации.....	30
2.7. Присилени осцилации. Механичка резонанција	31
3.1. Бранови појави	
3.1. Бранови појави	34
3.2. Брзина на бранови	36
3.3. Равенка на рамен бран.....	37

3.4. Суперпозиција на бранови. Бранова интерференција.....	39
3.5. Хајгенс-Френелов принцип.....	41
3.6. Стојни бранови.....	43
3.7. Равенка на стоен бран.....	46
3.8. Дифракција на бранови.....	47
3.9. Звучни бранови.....	49
3.10. Закони при поминување на звукот низ две средини.....	52
3.11. Звучна резонанција.....	52
3.12. Акустички методи. Аускултација и перкусија.....	53
3.13. Локација на звучниот извор. Бинаурален ефект.....	54
3.14. Доплеров ефект.....	55
4.1. Електрично поле. Електрични силиви линии	
Јачина на електричното поле.....	57
Хомогено електрично поле.....	58
4.2. Работа и енергија во електростатичко поле.....	61
Потенцијал на поле создадено од точкест полнеж.....	63
Врска помеѓу јачината на полето и потенцијалот.....	64
Еквипотенцијални површини.....	64
4.3. Спроводници во електростатичко поле.....	66
Услов за рамнотежа на полнежите кај спроводниците	
Електростатичка заштита.....	66
Мерење на напонот. Потенцијал на површината на спроводникот.....	67
4.4. Диелектрици во електростатичко поле.....	68
Релативна диелектрична константа.....	69
5.1. Електрична струја.....	71
5.2. Омов закон.....	72
Зависност на отпорот од температурата.....	73
Суперспроводливост.....	74
5.2.3. Омов закон за цело струјно коло.....	75
5.3. Кирхофови правила.....	77

5.4. Сериско и паралелно поврзување на отпори.....	78
5.5. Примена на Кирхофовите правила при шунтирање.....	80
5.6. Работа и моќност на електричната струја	
Цул-Ленцов закон.....	81
6.1. Полупроводнички материјали.....	83
6.2. P-N контакт.....	86
6.3. Диоди, фотодиоди, Лед-диоди.....	91
6.4. Транзистор.....	94
6.5. Биполарен транзистор како засилувач.....	97
6.6. Други полупроводнички електронски компоненти.....	99
6.8. Интегрални кола.....	101
7.1. Електролити. Електролитна дисоцијација.....	104
7.2. Фарадееви закони за елктролиза.....	105
7.3. Електрохемиски потенцијал. Галвански елементи.....	107
7.4. Поларизација на електродите. Деполаризација.	
Акумулатор.....	110
8.1. Електрична струја низ гасови.....	114
8.2. Самостојно празнење.....	117
8.3. Некои видови самостојно празнење.....	120
9.1. Заемнодејство помеѓу спроводник низ кој тече струја и магнетно поле.....	122
9.2. Заемнодејство помеѓу електричен полнеж во движење и магнетно поле.....	126
9.3. Магнетно поле на спроводник низ кој тече струја.....	128
9.4. Магнетни својства на супстанциите.....	131
9.5. Вектор на јачина на магнетното поле и врска со магнетната индукција.....	135
9.6. Електромагнетна индукција.....	137
9.7. Ленцово правило за индуцирана струја.....	140

9.8. Самоиндукција. Индуктивност	142
9.9. Електромагнетско мерење проток на крв	146
10. 1. Наизменична струја	
Принцип на работа на генератор за наизменичната струја	147
10.2 . Трифазни струи.....	150
10.3. Омски, капацитативен и индуктивен отпор	153
Индуктивен отпор	153
Фазорно претставување	154
Капацитативен отпор	155
10.4. Сериска (и паралелна) врска на омски, индуктивен и капацитативен отпор. Омов закон за наизменична струја	156
Сериска врска на сите три вида отпори. Омов закон	156
Резонанција на напонот.....	157
Резонанција на струјата	157
10.5. Работа и моќност на наизменичната струја	159
Коло со омски отпор.....	160
Коло со реактивни отпори.....	160
Средна, максимална и реактивна моќност на наизменичната струја	161
10.6. Трансформатори.....	162
10.7. Електрично осцилаторно коло. Електромагнетни осцилации	
Сопствени електромагнетни осцилации.....	165
Томсонова релација.....	166
Придушени осцилации.....	167
10.8. Добивање на непридушени електрични осцилации.	
Отворено осцилаторно коло лампов генератор	168
Резонанција кај електричните осцилаторни кола	169
Отворени осцилаторни кола. Антена	170
10.9. Електромагнетни бранови.....	170
Како се создава и простира електромагнетен бран ?	171

10.10. Својства на електромагнетните бранови. Херцови експерименти.....	173
10.11. Радиотрансмисија	177
10.12. Телевизија-подвижни слики	180
10.13. Спектар на радиобранови	185
10.14. Микробранови. Примена	186
10.15. Комуникациски систем. Комуникациски сигнал	189
Физички основи на електофизиологијата.	190
11.1. Појави на местото на допир електрода-ткиво.....	190
11.2. Елиминирање на влијанието на контактната потенцијална разлика.....	191
11.3. Поларизација на електродите.....	192
11.4. Неполаризациони електроди кои се користат во електрофизиологијата.....	192
11.5. Поларизациони појави во биолошките системи	194
11.6. Електроди за мерење на биоелектрични потенцијали и терапија	196
11.7. Електрична стимулација	197
11.8. Протекување на наизменична струја низ биолошки систем	199
11.9. Џулов закон за хетероген волуменски спроводник Електроперија со права струја	201
11.10. Електротерапија	202
12.1. Корпускуларно-бранова природа на светлината	206
12.2. Инфрацрвено и ултравиолетово зрачење	208
12.3. Основни закони на геометриската оптика	211
12.4. Тотална рефлексција. Ендоскоп.....	212
12.5. Рамно огледало	214
12.6. Сферни огледала	216
12.7. Оптички леќи	220
12.8. Дисперзија на светлината.....	223
12.9. Оптички инструменти.....	226

12.10. Оптички микроскоп	227
12.11. Интерференција на светлина	229
12.12. Локализирана интерференција.....	233
12.13. Примена на интерференцијата. Интерферометри.....	235
12.14. Дифракција на светлината. Френелови зони. Френелова дифракција на кружен отвор	238
12.15. Дифракциона решетка	241
12.16. Дифракција на кружен отвор Разделна моќ на оптичките инструменти.....	242
12.17. Поларизација на светлината	245
12.18. Спектрални апарати	249
12.19. Видови спектри и спектрална анализа	251
13.1. Специјални оптички микроскопи.....	254
13.2. Окулари и објективи	256
13.3. Електронски микроскоп	257
13.4. Разделна моќ на микроскопот	260
13.5. Оптички систем на окото.....	263
13.6. Оптички недостатоци на леќите и окото	264
13.7. Бер-Ламбертов закон за апсорпција на светлината	267
13.8. Колориметрија. Колориметри.....	268
14.1. Спектрална осетливост на окото	270
14.2. Радиометриски и фотометриски величини и нивни единици	271
14.3. Мерење на фотометриските величини. Фотометри	273
15.1. Закони за топлинско зрачење. Кванти	276
15.2. Планков закон за зрачење.....	279
15.3. Фотоелектричен ефект	282
15.4. Примена на фотоелектрот. Фотоелементи.....	286

15.5. Својства на фотоните	290
15.6. Светлински притисок.....	292
15.7. Дуална природа на честичите	394
15.8. Експериментална потврда на брановите својства на материјата.....	296
15.9. Хајзенбергов принцип	298
15.10. Термографија и нејзината примена	301
16.1. Модели на атомот.....	303
16.2. Боров модел на атомот.....	305
16.3. Бранов модел на атомот.....	306
16.4. Боров модел на атомот и објаснување на спектрите	307
16.5. Франк - Херцов опит.....	310
16.6. Зомерфелдова модификација на Боровата теорија.....	312
16.7. Квантно-механички модел на атомот	314
16.8. Определување на состојбата на атомот со помош на квантните броеви.....	316
16.9. Спин на електронот	319
16.10. Состојба на електроните определена со Паулиевиот принцип.....	321
16.11. Објаснување на Менделеевиот периоден систем систем на елементите со помош на квантните броеви	324
16.12. Луминисценција.....	326
16.13. Рендгенски зраци	329
16.14. Карактеристични рендгенски зраци.....	331
16.15. Примена на рендгенските зраци.....	333
17. 1. Структура на атомското јадро	336
17.2. Јадрени сили.....	338
17.3. Енергија на сврзување на атомското јадро	339
17.4. Природна радиоактивност	341
17.5. Закон за радиоактивното распаѓање.....	344

17.6. Јадрени реакции	346
17.7. Вештачка радиоактивност. Позитрон	348
17.8. Откривање на неутронот	350
17.9. Нуклеарна фисија	352
17.10. Нуклеарни реактори	356
17.11. Јадрена фузија. Термојадрени реакции.....	360
17.12. Детектори на јонизирачко зрачење.....	363
17.13. Дозиметрија на јонизирачко зрачење	367
17.14. Масен спектрограф	369
18.1. Фундаментални честици.....	371
18.2. Античестици и антиматерија	374
18.3. Видови заемнодејства меѓу елементарни честици.....	376
18.4. Поим за кваркови. Кварк-лептонска симетрија	378
19.1. Некои примери на информации за заштита на здравата животна средина при изучување на физиката	381
19.2. Глобални климатски промени.....	384
19.3. Ефект на стаклена бавча	389
19.4. Озонската обвивка се менува.....	392
19.5. Влијанието на бучавата врз живите организми	396
19.6. Влијанието на јонизирачките зрачења врз живите организми	399
19.8. Алтернативни извори на енергијата.....	403
20.1. Кристална структура на цврсти тела.....	407
20.2. Природа на хемиските врски во кристалите.....	410
20.3. Симетрија на кристалите	412
20.4. Кристалографски системи.....	416
20.5. Модели на густо пакување.....	419
20.6. Топлински капацитет и енергетски зони.....	421

20.7. Методи за истражување на структурата на тврдите тела	424
21.1. Структура на материјата.....	429
21.2. Атомски и молекулски врски.....	432
21.3. Кристални и аморфни материјали	436
21.4. Течни кристали	441
21.5. Метални структури	445
21.6. Полимери	449
21.7. Стакло и керамика	454
21.8. Градежни материјали.....	458
21.9. Синтерувани материјали.....	462
21.10. Нанотехнологии и наноматеријали	464
22.1. Аналогно дигитална конверзија.....	466
22.2. Комуникациски системи.....	469
22.3. Компакт диск – плеер	474
22.4. Фибер оптички комуникации.....	480
22.5. Засилувачи	484
23.1. Хиерархиска организација на вселената: од елементарните честици до гигантски галаксии	488
23.2. Зрачење во вселената	492
23.3. Стеларна еволуција	495
23.4. Одредување на карактеристични величини на наебеските објекти.....	502
23.5. Интерстеларен простор. Меѓусвездена материја	508
23.6. Во светот на галаксиите	509

1. Ротационо движење на тврдо тело

1.1. КИНЕМАТИКА НА ТВРДО ТЕЛО ВО РОТАЦИЈА

Постојат два вида на механичко движење на тврдо тело: *транслаторно движење на телото и ротација на тврдото тело*. Посебен вид на ротација на тврдо тело е *ротацијата околу неподвижна оска*. Ние овде ќе се задржиме само на таквиот вид ротационо движење.

Транслаторното движење на тело е она движење при кое сите негови материјални точки се движат по еден и ист начин. Затоа при овој вид на движење телото може да се замени со една материјална точка. (Овој вид на движење го имате детално изучено во градивото од физика во претходните години)

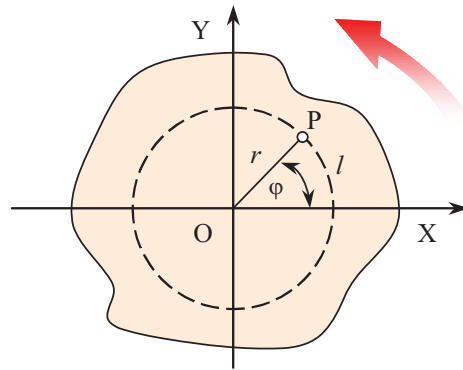
При изучувањето на ротацијата на тврдо тело околу неподвижна оска овој вид на движење не може да се анализира третирајќи го телото како материјална точка, бидејќи различни делови од телото изминуваат различни патишта, имаат различни линиски брзини и линиски забрзувања. Телото се состои од голем број честици секоја со своја линиска брзина и линиско забрзување. Анализата на ротационото движење на тврдо тело може многу да се поедностави ако се претпостави дека телото што ротира е апсолутно тврдо.

Апсолутно тврдото тело се дефинира како тело со определена форма која не се менува, односно тело кај кое растојанието меѓу кои било честици од кои е составено телото не се менува. Реално во природата апсолутно тврди тела не постојат, бидејќи секое тело под дејство на надворешни сили трпи деформации, но ако во одредени услови тие деформации се занемарливо мали, тогаш тоа тело може да се разгледува како апсолутно тврдо тело.

Овде ќе ја разгледаме ротацијата на апсолутно тврдо тело околу неподвижна оска која уште се нарекува *идеално ротационо движење*. Идеалното ротационо движење е такво движење при кое сите точки од телото опишуваат кружници кои лежат во паралелни рамнини, а центрите на тие кружници лежат на една иста права која се вика оска на ротација.

Нека издвоиме една од тие паралелни рамнини (сл. 1) која ротира околу неподвижна оска што поминува низ точката О и е нормал-

на на рамнината, односно се совпаѓа со Z – оската.



Сл. 1.

Една честица од телото која лежи во оваа рамнина се наоѓа во точката Р на растојание r од точката О која е центар на кружницата со радиус r . Местооложбата на точката Р ќе ја одредиме со растојанието r и аголот φ . Во овој случај се менува само аголот φ , а растојанието r останува константно. Честицата движејќи се по кружницата од положба ОХ ($\varphi=0$), ако претпоставиме дека била таму во почетниот момент $t=0$, до точката Р, опишува лак l кој е поврзан со r и φ со релацијата

$$l = r\varphi \quad (1)$$

или

$$\varphi = \frac{l}{r} \quad (2)$$

Аголот φ се изразува во радијани (rad). Еден радијан е агол на кој му соодветствува лак со должина еднаква на радиусот ($l=r$). Бидејќи на периметарот на кругот му соодветствува полн агол од 360° , тогаш согласно (2) $360^\circ = \frac{2\pi r}{r}$, односно на 360° одговараат 2π rad.

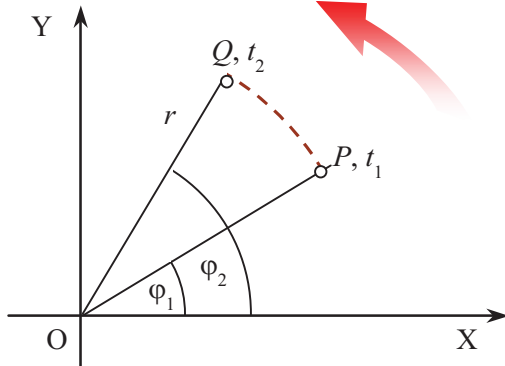
Следи дека еден радијан е $1 \text{ rad} = \frac{360^\circ}{2\pi} = 57,3^\circ$.

Ако честицата од тврдото тело (сл. 2) дојде од точката Р во точката Q за временски интервал Δt , радиусот ќе опише агол

1. Ротационо движење на тврдо тело

$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ еднаков на **аголното поместување**. Дефинираме средна аголна брзина ω_{sr} како однос на ова аголно поместување $\Delta\varphi$ со временскиот интервал Δt за кое настанало

$$\omega_{sr} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (3)$$



Сл. 2.

Моментната аголна брзина ω се дефинира како гранична вредност на односот (3) кога $\Delta t \rightarrow 0$, поточно кога тој временски интервал е многу, многу мал.

Аголната брзина се мери во радијани во секунда (rad/s). Аголната брзина е позитивна ако аголот φ расте (движење во спротивна насока од стрелката на часовникот) и е негативна ако аголот φ се намалува (движење во насока на стрелката на часовникот). Аголната брзина на сите точки од тело кое ротира е иста бидејќи сите точки од телото за еднакви временски интервали опишуваат еднакви агли.

Ако моментната аголна брзина на телото се менува од ω_1 на ω_2 за временски интервал Δt телото добива аголно забрзување. Средното аголно забрзување на телото ε_{sr} се дефинира како однос на промената на аголната брзина $\Delta\omega$ и временскиот интервал Δt

$$\varepsilon_{sr} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \quad (4)$$

Моментното аголно забрзување ε се дефинира како гранична вредност на односот (4) кога $\Delta t \rightarrow 0$, т.е кога тој временски интервал е многу, многу мал.

Аголното забрзување се мери во радијани во секунда на квадрат (rad/s²). Бидејќи аголната брзина за сите точки од телото што ротира е иста, од (4) следи дека и аголното забрзување за сите точки од телото е исто.

Значи аголната брзина ω и аголното забрзување ε ќе го карактеризираат ротационото движење на апсолутно тврдото тело, така што со нив може многу едноставно да се анализира овој вид на движење.

Ако аголното забрзување е константно тогаш ротационото движење на тврдото тело се вика *рамномерно променливо ротационо движење*. Ако во (4) се внесат почетните услови, односно во момент на време $t_1 = t_0 = 0$ нека аголната брзина имала вредност $\omega_1 = \omega_0$, а за време $t_2 = t$, $\omega_2 = \omega$, тогаш аголното забрзување ќе се запише како

$$\varepsilon = \frac{\omega - \omega_0}{t} \quad (5)$$

од каде што за аголната брзина во момент на време t се добива

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t \quad (6)$$

така што за средната аголна брзина се добива

$$\omega_{sr} = \frac{\omega_0 + \omega}{2}$$

или

$$\omega_{sr} = \frac{\omega_0 + \omega_0 + \varepsilon t}{2} = \omega_0 + \frac{\varepsilon t}{2}. \quad (7)$$

Аголот на завртување на тврдото тело ќе го одредиме како

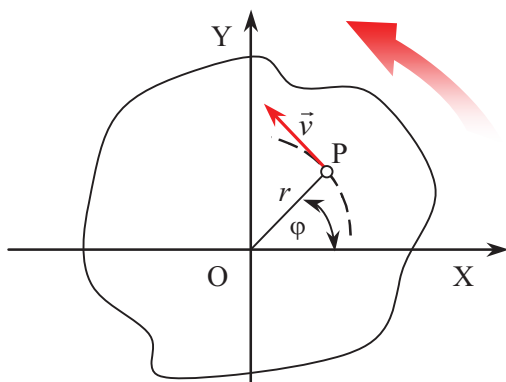
$$\varphi = \omega_{sr} t = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}. \quad (8)$$

Секогаш треба да се има предвид дека кога апсолутното тврдо тело ротира околу неподвижна оска тогаш секоја честица од телото се движи по кружница чиј центар лежи на оската на ротација и има линиска брзина v и линиско забрзување a . Овие линиски величини можат да се поврзат со аголните величини на следниов начин:

Бидејќи точката P се движи по кружница со радиус r (сл. 3), векторот на линиската брзина \vec{v} е насочен долж тангентата на кружната траекторија. Интензитетот на векторот

1. Ротационо движење на тврдо тело

на линиската брзина во точката P по дефиниција е еднаков на односот помеѓу патот (лакот l) и временскиот интервал



Сл. 3.

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (9)$$

или

$$v = r \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$$

или

$$v = r\omega \quad (9)$$

Равенката (9) покажува дека иако аголната брзина за сите точки од телото е иста, линиската брзина е различна и се зголемува ако растојанието од оската на ротацијата се зголемува.

Аголното забрзување на тврдото тело кое ротира е поврзано со линиското забрзување, односно со тангенцијалната компонента на линиското забрзување. Од дефиницијата на тангенцијалното забрзување следи

$$a_\tau = \frac{\Delta v}{\Delta t} = r \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

или

$$a_\tau = r\varepsilon. \quad (10)$$

Бидејќи секоја точка од тврдото тело кое ротира се движи по кружница, таа ќе има и нормално забрзување

$$a_n = \frac{v^2}{r} = r\omega^2. \quad (11)$$

Така вкупното линиско забрзување има

интензитет

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} = \sqrt{r^2\varepsilon^2 + r^2\omega^4}. \quad (12)$$

ПРИМЕР 1. Тркало ротира со константно аголно забрзување $3,50 \text{ rad/s}^2$. Ако аголната брзина на тркалото во моментот $t_0=0$ била $2,00 \text{ rad/s}$; а) за колкав агол ќе се заврти тркалото за време од 2 s ? б) колку ќе изнесува аголната брзина на тркалото во момент на време $t=2 \text{ s}$?

Решение: а) аголот на завртување ќе го одредиме согласно релацијата

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$$

ако се внесат бројните вредности се добива $\varphi=11,0 \text{ rad}$.

б) аголната брзина ќе ја одредиме со

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t$$

така што внесувањето на бројните вредности дава $\omega=9,00 \text{ rad/s}$.

Прашања , задачи, активности

1. Кога апсолутно тврдо тело во вид на диск ротира околу неподвижна оска, дали сите точки од дискот имаат иста аголна брзина?

2. Кои физички величини се користат за опишување на ротацијата на тврдо тело околу неподвижна оска?

3. Дали постои врска меѓу аголните величини и линиските величини на движење на материјалните точки на тврдото тело?

4. Да се најде линиската брзина на периферните точки на тркало кое ротира со фреквенција $n=33 \text{ min}^{-1}$ ако дијаметарот на тркалото е $d=30 \text{ cm}$.

(Одговор: $v = 0,52 \text{ m/s}$)

5. Роторот на центрифуга од состојба на мирување почнува да ротира со некое забрзување така што за време од $5,0 \text{ min}$ достигнува фреквенција од 20.000 min^{-1} . Да се определи средното аголно забрзување на роторот.

(Одговор: $\varepsilon = 7,0 \text{ rad/s}^2$)

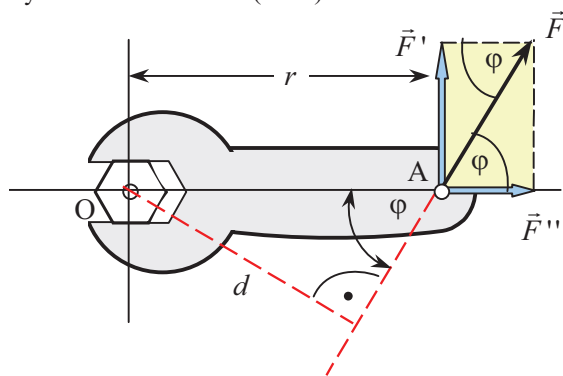
Повеќе информации за ротационите движења побарајте на Интернет адресата: <http://pen.physik.uni-kl.de/cgi-bin/ps/search.pl>

1.2. ДИНАМИКА НА РОТАЦИОНОТО ДВИЖЕЊЕ. МОМЕНТ НА СИЛАТА ПО ОДНОС НА ОСКАТА НА РОТАЦИЈА

Се поставува прашање која е причината едно тврдо тело да почне да ротира околу неподвижна оска, односно телото да добие аголно забрзување. Како што постои аналогија во кинематиката меѓу равенките на движење за транслаторното и ротационото движење на тврдо тело, исто така може да се воспостави и аналогија меѓу динамиката на транслаторното и динамиката на ротационото движење.

На пример, првиот Њутнов закон за ротационото движење може да се искаже на следниов начин: тврдото тело ќе ротира со константна аголна брзина сè дотогаш додека на него не дејствува некоја надворешна сила која ќе му го промени движењето. Но, да се даде еквивалентен закон на вториот Њутнов закон за ротационото движење на тврдо тело, односно да се даде одговор на прашањето, кој му соопштува на тврдото тело аголно забрзување, е малку посложено. Имено, за да почне едно тело да ротира околу некоја оска треба да дејствува сила. Но, каков правец треба да има таа сила и каде треба да биде приложена?

Нека го разгледаме ротационото движење на француски клуч околу оска која поминува низ точката О (сл. 1).



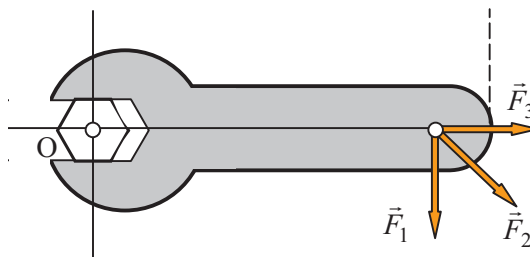
Сл. 1.

Францускиот клуч ротира околу неподвижната оска бидејќи на него во точка А дејствуваме со сила \vec{F} , која зафаќа агол φ со оската на клучот. Но, не е единствена причина

за ротацијата на телото само силата, туку физичката величина наречена момент на силата по однос на оската на ротација M . Моментот на силата по однос на оската на ротација е дефиниран со изразот

$$M = rF \sin \varphi = Fd \quad (1)$$

каде што r е растојание од оската на ротација до точката во која е приложена силата \vec{F} , а d е нормалното растојание од оската на ротација до правецот на дејството на силата \vec{F} . Од правоаголниот триаголник на сл. 4 се гледа дека $d = r \sin \varphi$. d се вика **крак на силата**. Значи **моментот на сила по однос на оската на ротација е производ од силата и кракот на силата**. Од сл. 4 се гледа дека силата \vec{F} може да се разложи на две компоненти: \vec{F}' - нормална на r и \vec{F}'' - хоризонтална во правец на r . Од релацијата (1) се гледа дека ротација ќе предизвика само компонентата \vec{F}' чиј интензитет е $F \sin \varphi$. Компонентата \vec{F}'' нема да предизвика ротација бидејќи поминува низ точката О.

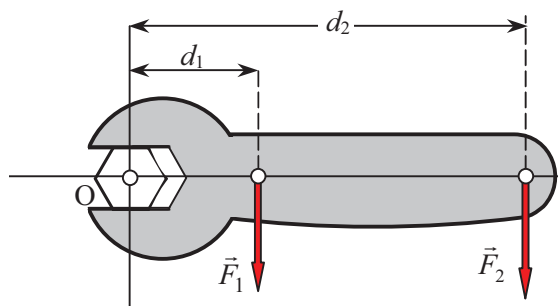


Сл. 2.

Така, на пример, ако дејствуваме со три сили еднакви по интензитет, но кои зафаќаат различни агли со хоризонталата (сл. 2), најголем момент на сила ќе предизвика силата \vec{F}_1 која зафаќа прав агол со хоризонталата, помал момент на силата \vec{F}_2 која зафаќа некој агол, а момент на сила еднаков на нула ќе предизвика сила \vec{F}_3 бидејќи зафаќа агол 0° со хоризонталата, а $\sin 0^\circ = 0$. Исто така, може да се покаже дека не предизвикува ротација на тврдо тело околу

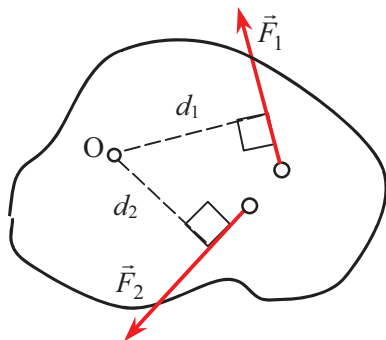
1. Ротационо движење на тврдо тело

неподвижна оска силата чиј правец на дејство е паралелен со правецот на неподвижната оска на ротација. Силите кои предизвикуваат ротација на тврдо тело околу неподвижна оска лежат во рамнини нормални на оската на ротација и се поставени тангенцијално на кружницата што се добива со ротација на нападната точка на силата.



Сл. 3.

Согласно релацијата (1) моментот на сила по однос на оската на ротација зависи и од кракот на силата d . Така ако на францускиот клуч се дејствува со сила \vec{F}_1 на растојание d_1 од оската на ротација (сл. 3), а со сила \vec{F}_2 која има ист интензитет со \vec{F}_1 , $F_1=F_2$, на растојание $d_2=3d_1$, тогаш силата \vec{F}_2 ќе предизвика поголем момент на сила по однос на оската на ротација O отколку силата \vec{F}_1 . Ако на телото дејствуваат две или повеќе сили (сл. 4) тогаш секоја од нив ќе предизвика



Сл. 4.

ротација околу оската која поминува низ O . Во

овој пример на сл. 4. \vec{F}_1 ќе го заротира телото во насока спротивна на насоката на движење на стрелката на часовникот, а \vec{F}_2 ќе го заротира во насока на движење на стрелката на часовникот. Знакот на моментот на силата во однос на оската на ротација по договор се зема за позитивен ако силата предизвикува ротација во насока спротивна на стрелката на часовникот, а се зема за негативен ако силата предизвикува ротација во насока на стрелката на часовникот. Така од сл. 4 се гледа дека \vec{F}_1 предизвикува $+F_1d_1$ момент на сила, додека силата \vec{F}_2 , $-F_2d_2$, така што вкупниот момент на сила по однос на оска која поминува низ O е

$$M = M_1 + M_2 = F_1d_1 - F_2d_2. \quad (2)$$

Единицата за момент на сила по однос на оската на ротација во SI е $N \cdot m$ (Њутн по метар). Треба да се одбележи дека оваа единица ($N \cdot m$) е димензионално аналогна на единицата за енергија $1 J = 1 N \cdot m$, но овие две единици се сосема различни бидејќи карактеризираат две различни физички величини.

ПРИМЕР 1. На цилиндар со два жлеба на растојание R_1 и R_2 од оската на ротација се навиткани конци на кои се приложени сили: \vec{F}_1 која го заротира цилиндарот во насока на стрелката на часовникот и \vec{F}_2 која го заротира цилиндарот во насока спротивна на насоката на движење на стрелката на часовникот (сл. 5). Ако е $F_1 = 5,0 N$; $R_1 = 1,0 m$; $F_2 = 6,0 N$ и $R_2 = 0,50 m$ да се најде моментот на сила по однос на оската на ротација.

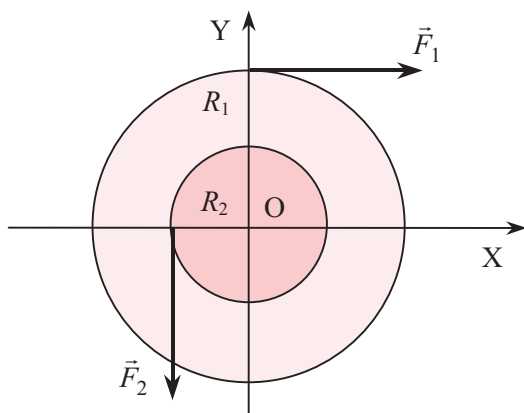
Решение: Вкупниот момент на сила по однос на оската на ротација е

$$M = M_1 + M_2 = R_2F_2 - R_1F_1$$

$$M = -2,0 N \cdot m.$$

Знакот минус покажува дека цилиндарот ќе ротира во насока на стрелката на часовникот.

1. Ротационо движење на тврдо тело

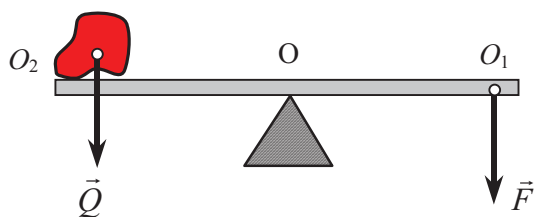


Сл. 5.

ЛОСТОВИ. МАКАРИ

Моментот на сила по однос на оската на ротација наоѓа примена кај лостовите. Лост се нарекува секое тврдо тело кое може да ротира околу некоја оска или точка која се вика потпорна точка на лостот. Лостовите се прости машини со кои може да се пренесе дејството на силата така да се смени насоката на силата или да се смени големината на силата.

Според заемната положба на нападните точки на приложената сила \vec{F} и товарот \vec{Q} во однос на потпорната точка на лостот O , лостовите се делат на:

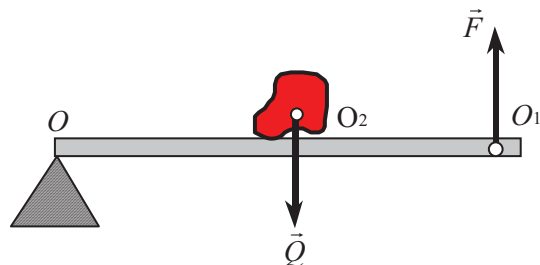


Сл. 6.

1. Лостови од прв вид кај кои потпорната точка O се наоѓа меѓу нападните точки на силата O_1 и товарот O_2 (сл. 6). Како примери за лостови од прв вид се: рамнокракиот двокрак лост кај вагите, ножиците, моторцанглиите и др.

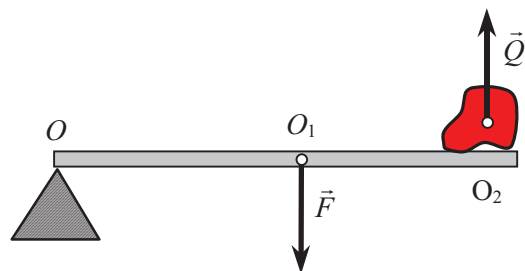
2. Лостови од втор вид кај кои потпорната точка O е поблиску до нападната точка на

товарот O_2 отколку до нападната точка на силата O_1 (сл. 7). Како примери за лостови од втор вид се: рачната количка, клешти за ореви и др.



Сл. 7.

3. Лостови од трет вид кај кои потпорната точка O е поблиску до нападната точка на товарот O_2 (сл. 8). Како примери за лост од трет вид се: подлактицата на човекот, долната вилица на човекот, педала на машина за шиене и др.



Сл. 8.

Лостот е во рамнотежа ако се задоволени два услови:

а) резултантата од сите надворешни сили што дејствуваат на лостот да биде еднаква на нула

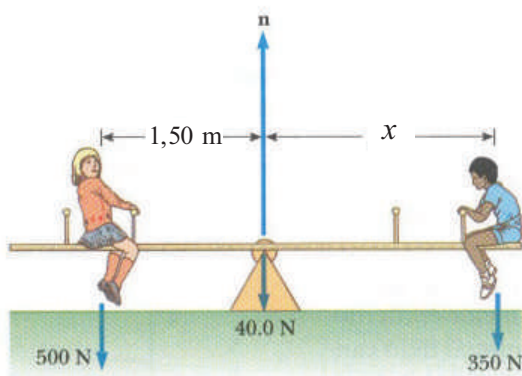
$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0, \quad (3)$$

б) резултантниот момент на силите по однос на оската на ротација да е еднаков на нула

$$\sum_{i=1}^n M_{iz} = 0. \quad (4)$$

ПРИМЕР 2. Хомогена штица е потпрена во точка O која е центар на масата на штицата.

1. Ротационо движење на тврдо тело



Сл. 9.

На спротивните краеве на штицата (сл. 9) седат деца. Детето од лево тежи 500 N, а детето од десно тежи 350 N. Ако детето од лево, кое тежи 500 N, се наоѓа на растојание 1,50 m од точката O, да се одреди растојанието x , на детето со тежина 350 N, од точката O.

Решение: За да биде двокракиот лост во рамнотежа, алгебарскиот збир на моментите на силите треба да биде еднаков на нула. Согласно равенката (4) следи

$$F_1 d_1 - F_2 x = 0$$

$$x = \frac{F_1}{F_2} d_1$$

или $x = 2,14 \text{ m}$.

Друг вид прости машини се **макарите** кои се, всушност, видоизменети лостови. Тие можат да бидат неподвижни, подвижни и сложени.

Неподвижната макара е диск со радиус R , на кој е направен жлеб на периферијата, (сл.9) кој ротира околу неподвижна оска O. Преку жлебот е префрлен конец на чиј еден крај се обесува товарот \vec{Q} и чија нападна точка се наоѓа во точката O_2 , а на другиот крај се приложува сила \vec{F} со нападна точка во точката O_1 .

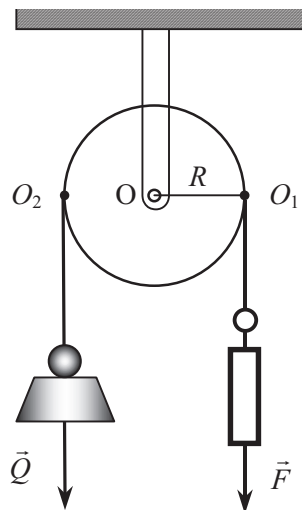
Ако се запише условот за рамнотежа (4)

се добива

$$QR - FR = 0$$

или $F = Q$ (5)

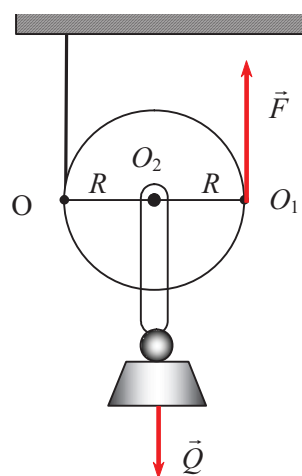
што значи дека се менува само насоката на силата.



Сл. 10.

Подвижната макара е диск со радиус R и со жлеб на кој е намотан конец, а оската на макарата може да се поместува во просторот (сл. 11). Условот за рамнотежа (4) за подвижната макара е

$$F 2R - QR = 0$$



Сл. 11.

1. Ротационо движење на тврдо тело

или
$$F = \frac{Q}{2} \quad (6)$$

што значи дека со подвижната макара се добива во сила, но при тоа, за разлика од неподвижната макара, јажето треба да се влече двапати подалеку додека се подигне товарот. На тој начин се исполнува златното правило на механиката: *ако се добива во сила се губи во пат.*

Сложените макари претставуваат комбинација од подвижни и неподвижни макари со цел да се подигне поголем товар со помала сила.

Прашања , задачи, активности

1. Кои сили можат да предизвикаат ротација на тврдо тело околу неподвижна оска?

2. Дали може да се заротира едно тело околу неподвижна оска за ист агол, а при тоа да се приложат одделно паралелни сили со различен интензитет?

3. На краевите на една греда, со должина $l=10$ m, која ротира околу оска што поминува низ нејзината средина дејствуваат две сили со ист интензитет $F_1=F_2=100$ N, а спротивни насоки. Да се најде вкупниот момент на сила.

(Одговор: $M=1000$ N·m)

4. На едниот крај на линијар, чија маса може да се занемари, со должина $l=1,25$ m виси топче со маса $m=0,17$ kg. Да се најде интензитетот на моментот на сила по однос на обесишната точка, којашто е на другиот крај на линијарот, ако тој е отклонет за агол $\varphi=10^0$ од вертикалата. ($g=9,8$ m/s²)

(Одговор: $M=lmg \sin\varphi = 0,36$ N·m)

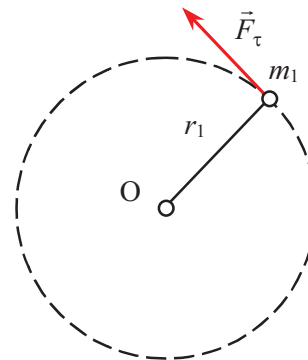
Повеќе информации за динамика на ротационо движење побарајте на Интернет адресата:

<http://pen.physik.uni-kl.de/cgi-bin/ps/search.pl>

1.3. ОСНОВЕН ЗАКОН НА ДИНАМИКАТА НА РОТАЦИОНОТО ДВИЖЕЊЕ. МОМЕНТ НА ИНЕРЦИЈА

Ротација околу неподвижна оска може да предизвикаат само сили кои лежат во рамнини кои се нормални на оската на ротација и се поставени тангенцијално на кружницата што ја опишуваат точките во кои дејствуваат. За да се добие основниот закон на динамика на ротационото движење на тврдо тело околу неподвижна оска, доволно е да се разгледа движењето на една честица од тврдото тело со маса m_1 којашто лежи во рамнината нормална на оската на ротација и се движи по кружница со радиус r_1 под дејство на тангенцијалната компонента на силата \vec{F}_τ (сл. 1). Тангенцијалната сила ѝ дава на честицата тангенцијално забрзување \vec{a}_τ така што

$$F_\tau = m_\tau a_\tau \quad (1)$$



Сл. 1

Ако двете страни на (1) се помножат со r_1 се добива

$$F_\tau r_1 = m_1 a_\tau r_1. \quad (2)$$

Левата страна на (2) е момент на сила по однос на оската на ротација која минува низ точката O, додека во десната страна на (2) ќе го

1. Ротационо движење на тврдо тело

внесеме тангенцијалното забрзување $a_\tau = r_1 \varepsilon$ и ќе добиеме

$$M_1 = m_1 r_1 \varepsilon r_1 = m_1 r_1^2 \varepsilon. \quad (3)$$

Производот на масата на честицата по растојанието на квадрат ($m_1 r_1^2$) се вика **момент на инерција** I_1 на честицата по однос на оската на ротација кој се јавува како мерка за инертност на честицата која учествува во ротационото движење. Така моментот на сила по однос на оската на ротација

$$M_1 = I_1 \varepsilon \quad (4)$$

е пропорционален на аголното забрзување, а како константа на пропорционалност е моментот на инерција. Како што се гледа (4) е аналог на вториот Њутнов закон $F=ma$. Слични равенки можат да се напишат и за другите честици од тврдото тело кои се наоѓаат на различни растојанија од оската на ротација. Така вкупниот момент на сила по однос на оската на ротација на тврдото тело е

$$M = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \varepsilon \quad (5)$$

каде што ε е надвор од сумата бидејќи е исто за сите честици,

додека $\sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots + m_n r_n^2$, го

дава **моментот на инерција на тврдото тело**

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2. \quad (6)$$

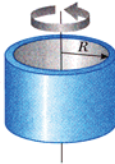
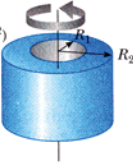
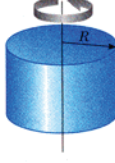
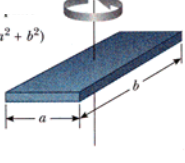
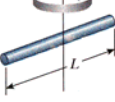
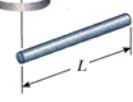
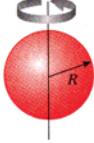

Единицата за момент на инерција во SI е kg m^2 (килограм по метар на квадрат). Моментот на инерција кај ротационото движење игра иста улога како масата кај транслаторното движење. Како што се гледа од (6) моментот на инерција не зависи само од масата на тврдото тело, туку и од тоа како е распоредена масата во однос на оската на ротација. Така, на пример, цилиндар со поголем дијаметар ќе има поголем момент на инерција од цилиндар со иста маса, но со помал дијаметар.

Ако релацијата (6) се внесе во релаци-

јата (5), за вкупниот момент на сила по однос на оската на ротација на тврдо тело се добива релацијата

$$M = I \varepsilon \quad (7)$$

Табела 2.1

Шуплив цилиндар $I_{\text{CM}} = MR^2$		Дебел шуплив цилиндар $I_{\text{CM}} = \frac{1}{2} M(R_1^2 + R_2^2)$	
Полн цилиндар или диск $I_{\text{CM}} = \frac{1}{2} MR^2$		Паралелопипед $I_{\text{CM}} = \frac{1}{12} M(a^2 + b^2)$	
Тенка прачка со оска на ротација низ центарот $I_{\text{CM}} = \frac{1}{12} ML^2$		Тенка прачка со оска на ротација на едниот крај $I = \frac{1}{3} ML^2$	
Хомогена топка $I_{\text{CM}} = \frac{2}{5} MR^2$		Шуплива топка $I_{\text{CM}} = \frac{2}{3} MR^2$	

којашто го претставува **основниот закон на ротационото движење на тврдо тело околу неподвижна оска.**

Моментот на инерција на хомогени тврди тела со правилна геометриска форма може точно математички да се пресмета во однос на оска на ротација која е и оска на симетрија, со помош на виша математика додека моментот на инерција на нехомогени тврди тела и на тела со неправилна геометриска форма се определува експериментално во однос на определена оска преку мерење на вкупниот момент на сила и аголното забрзување на телото. Во табела 2.1 се дадени моментите на инерција за некои хомогени тела со правилна геометриска форма кај кои оската на ротација се совпаѓа со оската на симетрија на телото.

Пресметувањето на моментот на инерција околу произволна оска понекогаш може

1. Ротационо движење на тврдо тело

да биде тешко дури и за тврдо тело со извонредна симетрија. Во таков случај пресметувањата можат да се поедностават ако се примени **теоремата на паралелни оски** наречена уште и Штајнерова теорема. Оваа теорема гласи: Моментот на инерција I во однос на произволна оска е еднаков на збирот на моментот на инерција I_{CM} во однос на оска којашто поминува низ центарот на масата на телото и е паралелна со дадената оска, и производот на масата на телото M со квадратот на растојанието h меѓу оските

$$I = I_{CM} + Mh^2. \quad (8)$$

Значи, ако е познат моментот на инерција во однос на оската која поминува низ центарот на масата не е тешко да се определи моментот на инерција околу која било друга оска паралелна на неа.

Докажување на Штајнеровата теорема

Теоремата на паралелни оски ќе ја докажеме на следниов начин:

Нека избереме координатен систем со координатен почеток во центарот на маса и нека I_{CM} е моментот на инерција во однос на Z оската од избраниот координатен систем, која-што поминува низ центарот на маса (сл. 2).

Рамнината XY го дава напречниот пресек на тврдото тело. За да се најде моментот на инерција на тврдото тело во однос на оска паралелна на Z – оската, која поминува низ точка A со координати x_A и y_A , нека избереме произволна материјална точка од телото со маса m_i со координати x_i и y_i , чиј момент на инерција во однос на оската која поминува низ точката A е $I_i = m_i r_i^2$, каде r_i е растојание од точката A до материјалната точка со маса m_i дадено со

$$r_i^2 = (x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2,$$

така што за I_i се добива

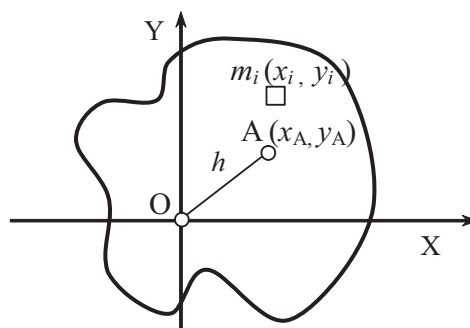
$$I_i = m_i [(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2]. \quad (9)$$

Ако се сумираат сите моменти на инерција на одделните честичи од тврдото тело ќе се добие моментот на инерција на тврдото тело во однос на оска која поминува низ точката A

$$I = \sum_{i=1}^n m_i [(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2]$$

или

$$I = \sum_i m_i (x_i^2 + y_i^2) - 2x_A \sum_i m_i x_i - 2y_A \sum_i m_i y_i + \sum_i m_i (x_A^2 + y_A^2). \quad (10)$$



Сл. 2.

Првиот член на десната страна на релацијата (10) го дава моментот на инерција на телото во однос на центарот на масата $I_{CM} = \sum_i m_i (x_i^2 + y_i^2)$ бидејќи центарот на масата

се совпаѓа со координатниот почеток. Вториот и третиот член се еднакви на нула бидејќи ги даваат координатите на центарот на масата

$$x_{CM} = \frac{\sum_i m_i x_i}{M} \quad \text{и} \quad y_{CM} = \frac{\sum_i m_i y_i}{M},$$

додека согласно сл. 2. координатите на центарот на масата се еднакви на нула $x_{CM} = y_{CM} = 0$, бидејќи зедовме центарот на маса да се совпаѓа со координатниот почеток. Последниот член во (10) е еднаков на Mh^2 бидејќи вкупната маса на телото е $M = \sum_i m_i$, додека растојанието h на точката A од

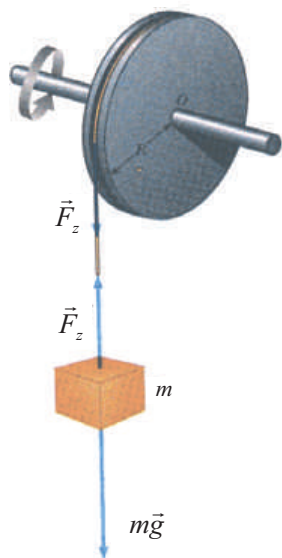
координатниот почеток O е $h^2 = x_A^2 + y_A^2$. Со тоа релацијата (8) е добиена и теоремата за паралелни оски е докажана.

ПРИМЕР 1. Тркало со радиус $R = 30,0$ cm и момент на инерција $I = 0,0900$ kgm², ротира околу хоризонтална оска без триење (сл. 3). На

1. Ротационо движење на тврдо тело

тркалото е намотан конец на чиј слободен крај виси тег со маса $m = 0,500 \text{ kg}$.

Колкава е силата на затегнување на крајот и аголното забрзување на тркалото?



Сл. 3.

Решение: Моментот на сила околу оската на тркалото е $M = RF_z$, каде F_z е силата на затегнување на крајот. Од друга страна $M = I\varepsilon$, I - момент на инерција на тркалото, ε - аголно забрзување. Од овие две равенки $I\varepsilon = RF_z$, од каде што

$$\varepsilon = \frac{RF_z}{I}. \quad (1)$$

Ако го примениме вториот Њутнов закон за тегот земајќи ги проекциите на силите на Y - оската насочена вертикално нагоре следи $\sum F_y = F_z - mg = -ma$, така што за линиското забрзување на тегот се добива

$$a = \frac{mg - F_z}{m}. \quad (2)$$

Користејќи ја врската меѓу линиското и аголното забрзување $a = R\varepsilon$ каде ја внесуваме

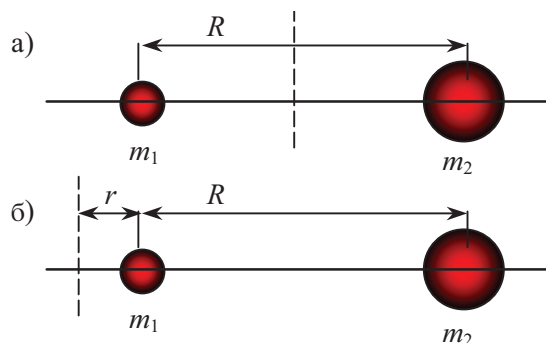
равенката (1) се добива $a = \frac{R^2 F_z}{I}$. Во оваа равенка ја земаме предвид равенката (2) така што имаме $\frac{mg - F_z}{m} = \frac{R^2 F_z}{I}$ од каде за силата на затегнување се добива

$$F_z = \frac{mg}{1 + \frac{mR^2}{I}} = 3,27 \text{ N}.$$

Аголното забрзување ќе го одредиме од $\varepsilon = \frac{a}{R}$ каде што ќе ја внесеме (2) за линиското забрзување при што добиваме

$$\varepsilon = \frac{g}{R + \frac{I}{mR}} = 10,9 \text{ rad/s}^2.$$

ПРИМЕР 2. Две топки со маси $m_1 = 5,0 \text{ kg}$ и $m_2 = 7,0 \text{ kg}$ се прицврстени на лесна прачка, чија маса може да се занемари, на меѓусебно растојание $R = 4,0 \text{ m}$ (сл. 4). Да се пресмета моментот на инерција на системот кога тој ротира: а) околу оска која поминува на средината на растојанието меѓу телата; и б) околу оска која поминува на растојание $r = 0,50 \text{ m}$ лево од топката со маса m_1 .



Сл. 4.

Решение: а) Двете топки се на исто растојание од оската на ротација и моментот на инерција е

$$I_1 = m_1 \left(\frac{R}{2} \right)^2 + m_2 \left(\frac{R}{2} \right)^2 = 48 \text{ kg m}^2.$$

1. Ротационо движење на тврдо тело

б) Моментот на инерција во овој случај е

$$I_2 = m_1 r^2 + m_2 (r + R)^2 = 143 \text{ kg m}^2.$$

Прашања , задачи, активности

1. Дали може едно тело со иста маса да има различен момент на инерција?

2. Дали може да се промени моментот на сила по однос на оската на ротација на едно тврдо тело иако аголното забрзување на телото не се менува?

3. Колкаво аголно забрзување ќе добие тркало со радиус $R = 33,0 \text{ cm}$ на кое е намотан конец на чиј крај дејствува сила $F_z = 15,0 \text{ N}$, ако моментот на силата на триење меѓу конечот и тркалото е $M_{tr} = 1,10 \text{ Nm}$? Моментот на инерција на тркалото е $I = 0,36 \text{ kg m}^2$.

$$\text{(Одговор: } \varepsilon = 10,7 \text{ rad/s}^2 \text{)}$$

4. Молекулот на кислородот O_2 , којшто се состои од два атоми на кислород на меѓусебно растојание $d = 1,21 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, ротира околу оската која поминува низ средината на растојанието d . Да се определи моментот на инерција на молекулот ако масата на секој кислороден атом е $m = 2,66 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$.

$$\text{(Одговор: } I = 1,95 \cdot 10^{-46} \text{ kgm}^2 \text{)}$$

5. Да се најде моментот на инерција на цилиндар со многу мала висина со радиус R_o и маса M во однос на оската која поминува низ една периферна точка на цилиндарот, а е паралелна со неговата оската на симетрија?

$$\text{(Одговор: } I = \frac{3}{2} MR_o^2 \text{)}$$

Повеќе информации побарајте на Интернет адресата:

<http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl>

<http://www.schulphysik.de/>

1.4. МОМЕНТ НА ИМПУЛСОТ ПО ОДНОС НА ОСКАТА НА РОТАЦИЈА

Основниот закон на ротационото движење на тврдо тело околу неподвижна оската е даден со релацијата

$$M = I\varepsilon \quad (1)$$

каде што моментот на сила M по однос на оската е пропорционален на моментот на инерција и аголното забрзување. Оваа релација се јавува како аналог на вториот Њутнов закон за транслаторното движење на тело $F = ma$, којшто можеше да се запише и во видот

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}, \text{ каде што } p = mv \text{ е импулсот}$$

на телото. Аналогна равенка може да се напише и за ротационото движење на тврдо тело. Ако во (1) се земе предвид дека аголното

забрзување е $\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ се добива

$$M = I \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

или
$$M = \frac{\Delta(I\omega)}{\Delta t}. \quad (2)$$

Величината $I\omega$ се вика **момент на импулсот по однос на оската на ротација** и се бележи со L

$$L = I\omega. \quad (3)$$

Така релацијата (2) може да се запише како

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (4)$$

што значи моментот на силата по однос на оската на ротација е еднаков на промената на моментот на импулсот која настанува во единица временски интервал и се пресметува како количник помеѓу промената ΔL и интервалот за кој таа настанала Δt . Оваа равенка е позната и под името *равенка на моментите*.

Равенката (3) може да се изведе и на друг начин: Нека тврдото тело ротира околу неподвижна оската која се совпаѓа со Z -оската (сл.1). Нека избереме една честица со маса m_1 која

1. Ротационо движење на тврдо тело

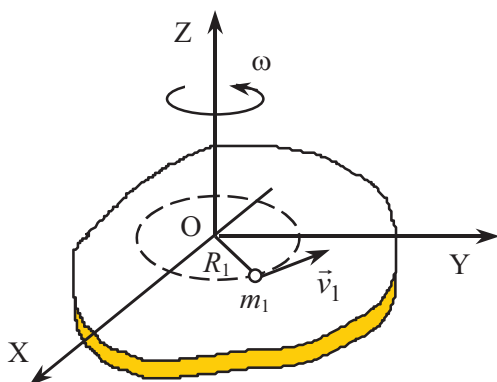
опишува кружница во XY –рамнината со радиус R_1 еднаков на растојанието од оската на ротација на честицата. Честицата има линиска брзина v_1 , но ротира со аголна брзина ω . Линиската брзина, пак, е дадена со релацијата

$$v_1 = R_1 \omega.$$

Ако оваа равенка се помножи лево и десно со m_1 –масата на честицата се добива

$$m_1 v_1 = m_1 R_1 \omega. \quad (5)$$

Производот од левата страна на (5) е импулсот на честицата, така што се добива



Сл. 1

$$p_1 = m_1 R_1 \omega.$$

Оваа равенка ја множиме лево и десно со R_1 и се добива

$$p_1 R_1 = m_1 R_1^2 \omega. \quad (6)$$

Производот од левата страна на (6) е физичката величина *момент на импулсот на честицата по однос на оска* L_1 којшто претставува производ на импулсот на честицата по растојанието на честицата до оската на ротација

$$L_1 = p_1 R_1, \quad (7)$$

додека производот $m_1 R_1^2$ од десната страна на (6) е моментот на инерција на честицата I_1 . Така што (6) може да се запише во обликот

$$L_1 = I_1 \omega. \quad (8)$$

Моментот на импулсот на телото по

однос на оската на ротација ќе го добиеме ако ги сумираме моментите на импулсите на сите n - честици од телото

$$L = \sum_{i=1}^n L_i = \sum_{i=1}^n I_i \omega$$

$$\text{или} \quad L = I \omega, \quad (9)$$

каде што $I = \sum_i I_i$ е моментот на инерција на телото околу Z – оската која се совпаѓа со оската на ротација.

Единицата за моментот на импулсот на тело по однос на оска во SI е килограм по метар на квадрат врз секунда ($\text{kg m}^2/\text{s}$).

Знакот на моментот на импулсот е позитивен (+) ако телото ротира во насока обратна од насоката на движење на стрелката на часовникот, а знакот на моментот на импулсот е негативен (-) ако телото ротира во насока на движење на стрелката на часовникот.

ПРИМЕР 1. Електронот во водородниот атом се движи околу јадрото по кружна орбита со радиус $r = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ и линиска брзина $v = 5,00 \cdot 10^3 \text{ m/s}$. Да се пресмета моментот на импулсот на електронот ако неговата маса е $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Решение: Моментот на импулсот на електронот ќе го одредиме од релацијата $L = pr = mvr$. Ако се внесат бројните вредности се добива

$$L = 24,05 \cdot 10^{-38} \text{ kg m}^2/\text{s}.$$

Прашања , задачи, активности

1. Дали ќе се промени моментот на импулсот по однос на оската на ротација ако се промени моментот на инерција на тело или систем од тела?

2. Исажи ја со зборови равенката на моментите.

Повеќе информации побарајте на Интернет адресата:

<http://www.schulphysik.de/>

1. Ротационо движење на тврдо тело

1.5. ЗАКОН ЗА ЗАПАЗУВАЊЕ НА МОМЕНТОТ НА ИМПУЛСОТ НА ТЕЛО ПО ОДНОС НА ОСКАТА НА РОТАЦИЈА

Моментот на импулсот на тело по однос на оската на ротација е важен поим во физиката. Во одредени услови моментот на импулсот, како и енергијата и импулсот, за изолиран систем се запазува. За да видиме кои се тие услови при кои моментот на импулсот се запазува, ќе тргнеме од формулата за вкупниот момент на сила по однос на оската на ротација

$M = \frac{\Delta L}{\Delta t}$, при услов тој да е еднаков на нула

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t} = 0, \quad (1)$$

или

$$L = I\omega = \text{const}. \quad (2)$$

Имено, промената на дадена физичка величина за некој временски интервал е еднаква на нула, таа величина е значи константна.

Релацијата (1) го дава законот за запазување на моментот на импулсот на тело по однос на оската на ротација кој гласи: **Вкупниот момент на импулсот на тело што ротира околу неподвижна оската останува константен ако резултантниот момент на сили кој дејствува на телото е еднаков на нула.** Овој закон важи за изолиран систем.

Законот за запазување на моментот на импулсот може да се запише и во следниов облик

$$I\omega = I_0\omega_0 = \text{const}, \quad (3)$$

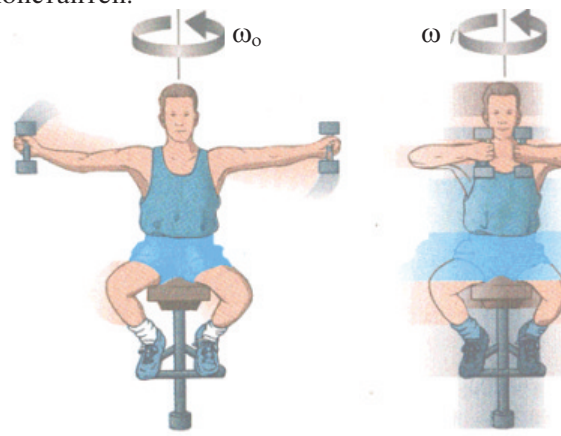
каде што I_0 и ω_0 се моментот на инерција и аголната брзина во некој почетен момент на време $t=0$, а I и ω се истите величини во конечен момент на време $t=t$. Тоа значи дека заемната положба на различни делови од телото може да се менува, при што ќе се менува и моментот на инерција, но при тоа ќе се менува и аголната брзина ω така што производот $I\omega$ ќе остане константен.

Постојат повеќе примери кај кои важи законот за запазување на моментот на импулсот:

ОПИТ 1. Ако еден ученик седи на столче кое може да ротира околу вертикална оската и во двете раширени раце држи по еден тег од по 1 kg, системот (ученик + тегови + столче) што ротира ќе има момент на импулс $I_0\omega_0$. Ако ученикот ги доближи рацете до своето тело (сл. 1) при што столчето не престанува да ротира, тогаш моментот на инерција ќе се намали, но аголната брзина ќе се зголеми така што ќе важи равенството

$$I_0\omega_0 = I\omega.$$

Значи моментот на импулсот останува константен.



Сл. 1.

ОПИТ 2. Ученичка седи на ротационен стол и во рацете држи тркало од велосипед (сл. 2).



Сл. 2.

Во почетниот момент системот (ученик + стол + тркало од велосипед) мирува така што моментот на импулсот е еднаков на нула. Ако ученикот го доведе во ротација тркалото во насока на стрелката на часовникот, тогаш и столот со ученикот ќе почне да ротира, но во насока обратна од насоката на движење на стрелката на часовникот за да

1. Ротационо движење на тврдо тело

остане моментот на импулсот и после промената еднаков на нула. Имено, ако моментот на импулсот на тркалото е $+L_0 = +I_0\omega_0$, а моментот на импулсот на ученикот + столот е $-L = -I\omega$, нивниот збир треба да биде еднаков на нула $+I_0\omega_0 + (-I\omega) = 0$, како што беше моментот на импулсот во почетниот момент.

ПРИМЕР 1. Хоризонтална платформа во форма на диск ротира во хоризонтална рамнина околу вертикална оска. Масата на платформата е $m_1 = 100 \text{ kg}$, а радиусот $R = 2,0 \text{ m}$. Човек со маса $m_2 = 60 \text{ kg}$, кој во почетниот момент се наоѓа на ивицата на платформата, полека се движи кон центарот на платформата. Кога човекот е на ивицата на платформата аголната брзина на системот е $2,0 \text{ rad/s}$.

Да се пресмета аголната брзина на системот кога човекот ќе дојде на растојание $0,50 \text{ m}$ од центарот на платформата. Моментот на

инерција на дискот е $I_1 = \frac{m_1 R^2}{2}$.

Решение: Моментот на инерција на системот кога човекот е на ивицата на платформата е

$$I_0 = I_1 + I_2 = \frac{m_1 R^2}{2} + m_2 R^2, \text{ а кога ќе дојде на}$$

$$\text{растојание } r \text{ е } I = I_1 + I_2' = \frac{m_1 R^2}{2} + m_2 r^2.$$

Бидејќи не дејствуваат надворешни моменти на сили на системот (човек + платформа) важи законот за запазување на моментот на импулсот по однос на оската

$$I_0 \omega_0 = I \omega$$

$$\text{или } \left(\frac{1}{2} m_1 R^2 + m_2 R^2 \right) \omega_0 = \left(\frac{1}{2} m_1 R^2 + m_2 r^2 \right) \omega$$

од каде се добива

$$\omega = \frac{\frac{1}{2} m_1 R^2 + m_2 R^2}{\frac{1}{2} m_1 R^2 + m_2 r^2} \omega_0$$

$$\text{или } \omega = 4,1 \text{ rad/s}.$$

Прашања, задачи, активности

1. Човек стои во центарот на столче кое ротира околу вертикална оска и заедно со столчето ротира со фреквенција $n_1 = 0,5 \text{ min}^{-1}$. Моментот на инерција на телото на човекот во однос на оската на ротација е $I_0 = 1,6 \text{ kg m}^2$. Во раширените раце тој држи два тега секој со маса 2 kg , а растојанието меѓу теговите е $1,6 \text{ m}$. Колку завртувања во минута ќе врши системот човек + тегови ако тој ги спушти рацете така што растојанието меѓу теговите да биде $0,4 \text{ m}$? Моментот на инерција на столчето да се занемари. (Одговор: $n_2 = 1,18 \text{ min}^{-1}$)

2. Платформа во форма на диск со радиус $1,5 \text{ m}$ и маса 180 kg се врти околу вертикална оска со фреквенција 10 min^{-1} . Во центарот на платформата стои човек со маса 60 kg и во тој момент не се зема предвид неговиот момент на инерција. Колкава линиска брзина ќе има човекот ако тој премине на ивицата на платформата? Моментот на инер-

ција на дискот е $I = \frac{1}{2} m R^2$. (Одг: $v = 0,942 \text{ m/s}$)

Повеќе информации побарајте на Интернет адресата:

<http://pen.physik.uni-kl.de/cgi-bin/ps/search.pl>

1.6. КИНЕТИЧКА ЕНЕРГИЈА НА РОТАЦИОНОТО ДВИЖЕЊЕ

Ротационото движење на тврдо тело околу неподвижна оска нема да биде комплетно опишано ако не се даде и изразот за кинетичка енергија на тврдото тело кое ротира. За таа цел ќе се навратиме на сликата 1 од лекцијата 1.4 на која е прикажано движењето на една честица од телото со маса m_1 и линиска брзина v_1 . Кинетичката енергија на оваа честица е

$$E_{k1} = \frac{m_1 v_1^2}{2}. \quad (1)$$

Во оваа релација ќе ја внесеме познатата релација за линиската брзина $v_1 = R_1 \omega$, каде што ω

1. Ротационо движење на тврдо тело

е аголната брзина на телото, а R_1 е радиусот на кружницата што го опишува честицата

$$E_{k1} = \frac{m_1 R_1^2 \omega^2}{2} \quad (2)$$

Кинетичката енергија на тврдото тело кое ротира околу неподвижна оска ќе се добие ако се сумираат кинетичките енергии на сите n честици од телото кои се движат во паралелни рамнини нормални на оската на ротација и на различни растојанија од оската на ротација R_n . Така се добива

$$E_k = \sum_{i=1}^n E_{ki} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (m_i R_i^2) \omega^2$$

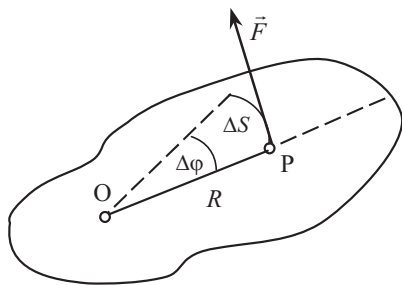
или

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (3)$$

каде што $I = \sum_{i=1}^n m_i R_i^2$ е моментот на инерција

на тврдото тело во однос на оската на ротација. Значи кинетичката енергија на тврдото тело кое ротира околу неподвижна оска е еднаква на полузбирот од моментот на инерција и квадратот на аголната брзина на телото.

Веќе видовме дека тврдото тело може да ротира околу неподвижна оска ако на него дејствува момент на сила. При тоа се врши некоја работа. Таа работа ќе ја определеме на следниов начин: Нека надворешна сила \vec{F} дејствува во точка P којашто се наоѓа на растојание R од оската на ротација (сл. 1).



Сл. 1.

При тоа се врши елементарна работа δA , бидејќи материјалната точка се движи по кружница, опишува лак ΔS и се завртува за мал агол $\Delta \phi$. Оваа работа ќе ја одредиме од општата формула

$$\delta A = F \Delta S \quad (4)$$

во којашто ќе внесеме за $\Delta S = R \Delta \phi$, па имаме

$$\delta A = F R \Delta \phi \quad (5)$$

Бидејќи моментот на сила е $M = F R$ следи дека елементарната работа е

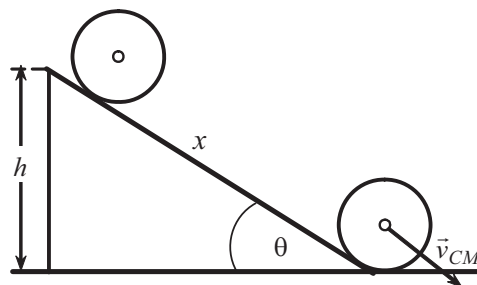
$$\delta A = M \Delta \phi \quad (6)$$

Ако ги сумираме сите елементарни работи кои се вршат при завртување на сите точки од тврдото тело за мал агол $\Delta \phi$, ќе ја добиеме вкупната работа на моментот на силата на тело кое ротира околу неподвижна оска M опишувајќи конечен агол ϕ

$$A = M \phi \quad (7)$$

ПРИМЕР 1. Полна хомогена сфера се тркала низ наклонета рамнина под агол на наклон $\theta = 30^\circ$ во однос на хоризонталата. Наклонетата рамнина има должина $x = 1$ m и висина h (сл. 2).

Да се пресмета линиската брзина на центарот на маса на сферата на дното на наклонетата рамнина. Моментот на инерција на полна хомогена сфера е $I_{CM} = \frac{2}{5} m R^2$, каде што m е масата, а R – радиусот на сферата. Триењето да се занемари. ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)



Сл. 2.

Решение: Хомогената топка тркалајќи се по наклонетата рамнина врши ротационо движење околу оска која поминува низ центарот на маса и транслаторно движење, долж наклонетата рамнина. Затоа таа ќе има и кинетичка енергија на ротација и кинетичка енергија на транслација

$$E_k = \frac{1}{2} I_{CM} \omega^2 + \frac{1}{2} m v_{CM}^2$$

1. Ротационо движење на тврдо тело

каде што $v_{CM} = R\omega$ е линиската брзина на центарот на маса. Внесувањето на $\omega = \frac{v_{CM}}{R}$ во претходната релација дава

$$E_k = \frac{1}{2} \left(\frac{I_{CM}}{R^2} + m \right) v_{CM}^2.$$

Бидејќи топката поаѓа од состојба на мирување од висина h во однос на подлогата, на таа висина поседува потенцијална енергија $U = mgh$. Од законот за запазување на механичката енергија следи дека кинетичката енергија е еднаква на потенцијалната енергија

$$\frac{1}{2} \left(\frac{I_{CM}}{R^2} + m \right) v_{CM}^2 = mgh$$

од каде што се добива

$$v_{CM} = \left(\frac{2gh}{1 + \frac{I_{CM}}{mR^2}} \right)^{1/2}.$$

Ако овде се внесе релацијата за $I_{CM} = \frac{2}{5} mR^2$ и се преуреди се добива

$$v_{CM} = \left(\frac{10}{7} gh \right)^{1/2}.$$

Висината $h = x \sin \theta$, така што внесувањето на оваа равенка во претходната дава

$$v_{CM} = \left(\frac{10}{7} gx \sin \theta \right)^{1/2}.$$

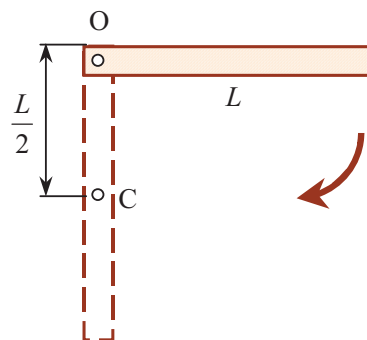
Ако се внесат бројните вредности се добива

$$v_{CM} = 7 \text{ m/s}.$$

ПРИМЕР 2. Хомогена прачка со должина $L=1\text{m}$ и маса m ротира околу оска која поминува низ едниот крај на прачката. Во почетниот момент прачката се наоѓа во хоризонтална положба (сл. 3). Да се најде аголната брзина на прачката во најниската положба. ($g=9,81\text{m/s}^2$; $I=mL^2/3$)

Решение: Ако се примени законот за запазување на енергијата следи дека потенцијалната енергија, што ја има прачката во однос на

најниската положба на центарот на маса C , се претвора во кинетичка енергија на ротација во таа положба



Сл. 3.

$$mg \frac{L}{2} = \frac{1}{2} I \omega^2.$$

Ако овде се внесе моментот на инерција на прачката $I=mL^2/3$ се добива

$$mg \frac{L}{2} = \frac{1}{2} \frac{1}{3} mL^2 \omega^2$$

од каде што аголната брзина е $\omega = \sqrt{\frac{3g}{L}}$.

Внесувањето на бројните вредности дава $\omega=5,42 \text{ rad/s}$.

Прашања, задачи, активности

1. Обрч со маса 2 kg и надворешен радиус 5 cm се тркала по наклонета рамнина со должина 2 m и агол на наклон 30° . Да се определи бројната вредност на моментот на инерција на обрчот ако неговата линиска брзина на крајот на наклонетата рамнина е $3,3\text{m/s}$. ($g=9,81 \text{ m/s}^2$) (Одговор: $I=4 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$)

2. Топка се тркала по хоризонтален пат со брзина $7,2 \text{ km/h}$. На какво растојание може да се искачи топката по наклонетата рамнина за сметка на нејзината кинетичка енергија, ако наклонетата рамнина има наклон 10 m на секои 100 m ? ($g=9,81 \text{ m/s}^2$, $I=2mR^2/5$)

(Одговор: $l=2,86 \text{ m}$)

Повеќе за кинетичка енергија на ротационото движење побарајте на Интернет адресата:

<http://www.wug.physics.uiuc.edu/Lect15/sld005.htm>

1.7. АНАЛОГИЈА ПОМЕЃУ ВЕЛИ ЧИНИТЕ И ЗАКОНИТЕ ПРИ ТРАНСЛАТОРНО И РОТАЦИОНО ДВИЖЕЊЕ

При кинематичкото и динамичкото опишување на ротационото движење на тврдо тело околу неподвижна оска, често пати се навраќавме на основните равенки на трансляторното движење на материјална точка.

Имено, ние правевме аналогија меѓу основните равенки на трансляторното движење

на материјална точка и основните равенки на ротационо движење на тврдо тело околу неподвижна оска, бидејќи тврдото тело може да се разгледува како множество од n – материјални точки. За да се сфатат полесно различните равенки кај ротационото движење на тврдо тело околу неподвижна оска, нив ќе ги дадеме заедно со аналогните изрази за трансляторното движење на тело или материјална точка, кои веќе одамна ги имате изучено, во табела 2.2.

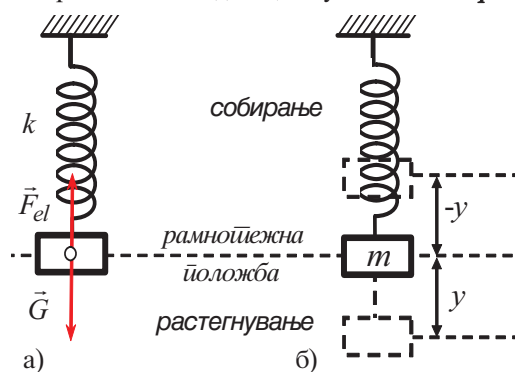
Табела 2.2.

Ротационо движење на тврдо тело околу неподвижна оска		Транслаторно движење на тело	
Агол на завртување	φ	Изминат пат	s
Аголна брзина	$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$	Линиска брзина	$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$
Аголно забрзување	$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$	Линиско забрзување	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$
Момент на инерција	I	Маса	m
Момент на сила	$M = I\varepsilon$	Сила	$F = ma$
Ако е рамномерно променливо ротационо движење $\varepsilon = \text{const} \begin{cases} \omega = \omega_0 + \varepsilon t \\ \varphi - \varphi_0 = \omega_0 t + \frac{1}{2} \varepsilon t^2 \end{cases}$		Ако е рамномерно забрзано праволиниско движење $a = \text{const} \begin{cases} v = v_0 + at \\ s - s_0 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \end{cases}$	
Момент на импулсот по однос на оска	$L = I\omega$	Импулс на тело	$p = mv$
Основна равенка на ротационото движење на тврдо тело	$M = I\varepsilon = \frac{\Delta L}{\Delta t}$	Основна равенка на динамиката на трансляторното движење	$F = ma = \frac{\Delta p}{\Delta t}$
Кинетичка енергија на ротационото движење	$E_k = \frac{1}{2} I\omega^2$	Кинетичка енергија на трансляторното движење	$E_k = \frac{1}{2} mv^2$
Работа при ротација	$A = M\varphi$	Работа при translација	$A = Fs$

2.1. ПЕРИОДИЧНО ДВИЖЕЊЕ

Основни поими и елементи на осцилаторното движење

Под поимот *периодично* движење се подразбира повторување на движењето или положбата на телото по една иста траекторија. Со други зборови, движењето е периодично, кога тоа се повторува во еднакви временски интервали. Кај ваквите движења времетраењето на еден циклус се вика *период*.



Сл. 1. Осцилирање на пружина

Многу појави во природата се периодични, на пример: движењето на нишалото на часовникот, тег прицврстен на пружина, треперењето на жиците од музичките инструменти, потоа работата на срцето, осцилациите на честите од материјалната средина низ која се шири звукот, движењето на планетите околу Сонцето, осцилациите на атомите и молекулите околу своите рамнотежни состојби во кристалната решетка на тврдо тело, кај наизменичната струја има периодична промена на електричниот напон и струја и др.

Во зависност од физичката природа на осцилациите и начинот на нивно добивање, разликуваме: *механички осцилации* и *електромагнетни осцилации* (осцилација на векторот на јачината на електричното поле и магнетната индукција).

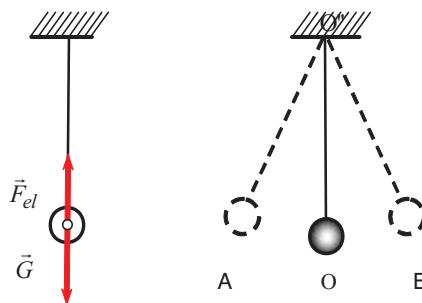
Осцилаторните движења преставуваат посебен вид периодични движења кои доста често се сретнуваат. *Периодичното движење при кое телото се отклонува ту на едната ту на другата страна од најстабилната рамнотежна положба се вика осцилаторно движење*. Услов за настанување на осцилаторно движење е да

постои сила која постојано ќе го враќа телото во рамнотежната положба. Таа може да биде *надворешна или внатрешна*.

Да разгледаме една спирала и на нејзиниот крај да закачимо тег (сл.1). Притоа спиралата се истегнува сè додека нејзината внатрешна еластична сила \vec{F}_{el} не се урамнотежи со тежината на тегот \vec{G} , тегот е во рамнотежа. Оваа положба е наречена **рамнотежна положба** (сл. 1.а).

Ако под дејство на надворешна сила тегот се извади од рамнотежната положба, се зголемува и еластичната сила \vec{F}_{el} во спиралата. Оваа сила настојува да го врати тегот во рамнотежната положба поради што е наречена и *повратна сила*. (сл. 1.б). Повратната сила кај осцилаторните движења е насочена кон рамнотежната положба. Односно системот тег-пружина започнува да осцилира околу рамнотежната положба. За време време на осцилирањето телото постојано го менува своето растојание од рамнотежната положба.

Моменталниот отклон од неговата рамнотежна положба се бика елонгација. Најголемата вредност на елонгацијата е наречена **амплитуда**. Системот што го образуваат еластичната пружина и тегот се нарекува *осцилаторен систем* или *осцилатор*.



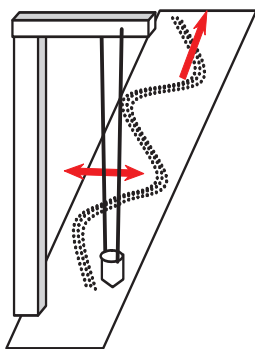
Сл. 2. Осцилирање на тело закачено на конец

Телото може да осцилираа и кога тоа се закачи на конец. Ако телото го изведеме од рамнотежната положба, под влијание компонента на силата на Земјината тежа, тоа одново се враќа во оваа положба. Овие сили по својот карактер се аналогни на силите на еластичност (сл. 2).

2.1.1. ХАРМОНИСКИ ОСЦИЛАЦИИ

Елементи на осцилаторното движење

Меѓу различните видови осцилации, во најпроста форма се **хармониските осцилации** при кои осцилаторната величина во текот на времето се менува по синусен или косинусен закон. Меѓутоа, многу облици на осцилаторни движења може да се сведат на осцилации од овој облик. Дека тоа е така, може лесно да се покаже со следниов експеримент.



Сл. 1.

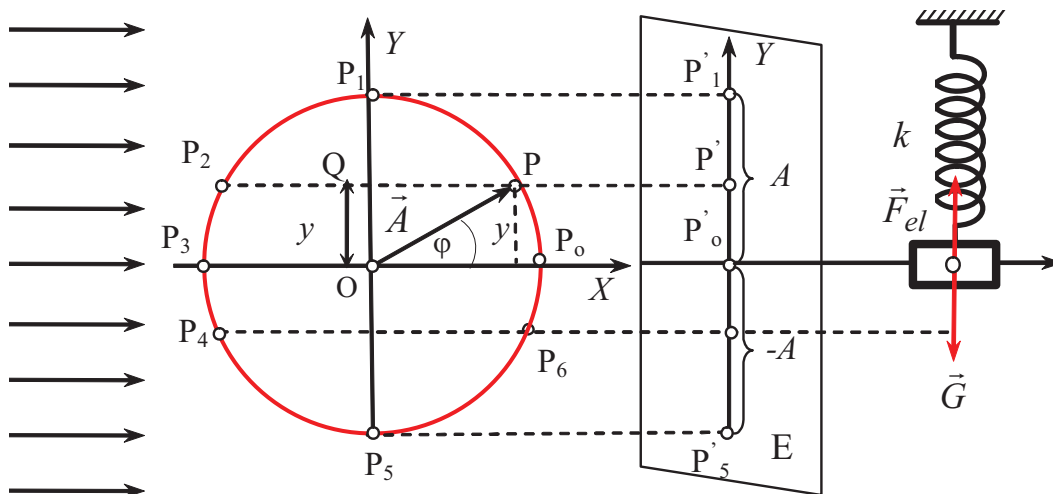
Конусен сад со тесен отвор на врвот се полни со ситен песок и со помош на конци се закачува на статив за да претставува нишалото. Под

нишалото е поставена долга темна лента (сл.1). Го изведуваме нишалото од рамнотежната положба и го пуштаме да осцилира. Во моментот кога го пуштаме нишалото да осцилира, почнуваме рамномерно да ја движиме лентата во правец нормален на осцилирањето на нишалото. Ситниот песок кој тече од отворот на конусниот сад паѓа на лентата и опишува крива линија, позната како *синусоида*.

Хармониските осцилации, математички лесно се опишуваат преку следење на проекцијата на материјална точка P што ротира рамномерно. За таа цел погодно е да се набљудува сенката на точката P на екранот E , поставен нормално на рамнината на ротација. Сенката на точката P врши хармониско осцилаторно движење (сл.2).

Во координатниот систем XOY се нанесува кружница со радиус A еднаков на големината на амплитудната вредност на хармониското осцилаторно движење и точка P која ротира рамномерно со брзина v и аголна брзина ω во насока спротивна од движењето на стрелката на часовникот. Почетната фаза, при $t=0$ нека е нула. Проекцијата на точката P на Y -оската се менува меѓу $+A$ и $-A$.

Центарот на ротација е во координатниот почеток на системот XOY , а проекцијата (сенката) на материјалната точка P се разгледува врз Y -оската. Да ја означиме почетната



Сл. 2.

2. Механички осцилации

положба на точката со P_0 . Додека точката P изведува рамномерно кружно движење поминувајќи низ положбите P_1, P_2, P_3, P_4 итн., проекцијата (сенката) на точката P поминува низ положбите P'_1, P'_2, P'_3 , итн. Според тоа, положбата P'_0 е рамнотежната положба на осцилаторното движење.

Оддалеченоста на проекцијата на точката P од координатниот почеток врз Y -оската во произволен момент е *елонгацијата* y . Максималната елонгација или најголемото растојание од рамнотежната положба е *амплитуда*, и е означена со A .

Притоа, елонгацијата прави хармониско осцилаторно движење, осцилирајќи меѓу вредностите $+A$ до нула преку $-A$ до нула и одново до максималната елонгација $+A$. Времето за кое материјалната точка ќе направи една полна осцилација е *период на осцилирање* T .

Бројот на полните осцилации изведени во единица време е *фреквенција* f . Единицата за фреквенција е 1 Hz (херц)

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{1 \text{ s}} = \text{s}^{-1}. \quad (1)$$

Фреквенцијата е поврзана со периодот така што важи:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2)$$

Во моментот t отсечката $OP_1=A$ со X -оската на правоаголниот координатен систем зафаќа агол φ , кој одговара на *фазата на осцилирање*.

За време од еден период радиусвекторот \vec{A} ќе опише околу точката O полн агол од 2π радијани. Бидејќи движењето е рамномерно, аголот φ се менува пропорционално со времето. Затоа може да се напише пропорцијата:

$$\varphi : 2\pi = t : T \quad (3)$$

Притоа фазата на осцилирање φ , времето t , периодот на осцилирање T и аголната брзина (кружната фреквенција) ω се поврзани со :

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} t = 2\pi f t = \omega t. \quad (4)$$

Од последната равенка се гледа дека аголот

φ зависи од времето. Односно фазата и времето се карактеристики на осцилаторното движење. Кружната фреквенција ω е зададена со равенката:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (5)$$

Кружната фреквенција е број на осцилации во 2π секунди .

2.2. КАРАКТЕРИСТИЧНИ ВЕЛИЧИНИ НА ХАРМОНИСКИТЕ ОСЦИЛАЦИИ

Карактеристични величини кои се менуваат со текот на хармониското осцилирање се: *елонгација, брзина, сила и забрзување*. Од сл. 2 (2.2) се гледа дека

$$\frac{OQ}{OP} = \frac{y}{A} = \sin \varphi.$$

Според тоа, положбата на проекцијата на материјалната точката на Y -оската, со текот на времето се менува според законот:

$$y = A \sin \varphi = A \sin 2\pi f t = A \sin \omega t \quad (1)$$

Равенката (1) графички е прикажана во (2.4. сл.2). Доколку почетниот агол има некоја вредност φ_0 , тогаш равенката (1) го добива обликот:

$$y = A \sin (\omega t + \varphi_0). \quad (2)$$

Функциите $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$ се периодични функции кои примаат вредности помеѓу ± 1 и може да имаат еднакви вредности за различни вредности на t . На пример, $\sin \omega t = +1$ за $t = \pi/2\omega, 5\pi/2\omega$ итн. Според тоа, равенката (1) математички може да се изрази и на следниов начин:

$$y = A \sin \omega t = A \sin \omega (t + kT), \quad (3)$$

каде што $k=1, 2, 3, \dots$ е цел број, што значи за

2. Механички осцилации

точно определени временски интервали: $t = T, 2T, 3T, \dots$ функцијата добива еднакви вредности. За две нишала со еднаков период на осцилирање, се движат во иста насока и за одреден временски интервал минуваат едновременно низ рамнотежната положба се вели дека се во *фаза*. Еднаквоста во фазите непрекинато ќе биде запазена и понатаму, ако периодите на нишалата на се промени. Ако, пак, движењето на нишалата е спротивно едно на друго, тогаш нишалата се со *спротивни фази*

Од друга страна ако се разгледува проекцијата на материјалната точка Р врз X -оската исто така и таа прави хармониско осцилаторно движење зададено со равенката

$$x = A \cos \varphi = A \cos 2\pi f t = A \cos \omega t. \quad (4)$$

односно фазно се разликува од хармониско осцилаторно движење по оската y за $\pi/2$.

$$\cos \omega t = \sin (\omega t + \pi/2). \quad (5)$$

Од равенките (1) и (5) може да се заклучи дека рамнотетното движење по кружница е еквивалентно на две меѓусебно нормални хармониски осцилаторни движења со еднакви фреквенции, а фзите им се разликуваат за $\pi/2$. Точка која едновременно учествува во тие две движења се најдува на кружницата. Равенката на таа кружница се довива со квадрирање и собирање на равенките (1) и (5):

$$x^2 + y^2 = A^2 (\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t) = A^2$$

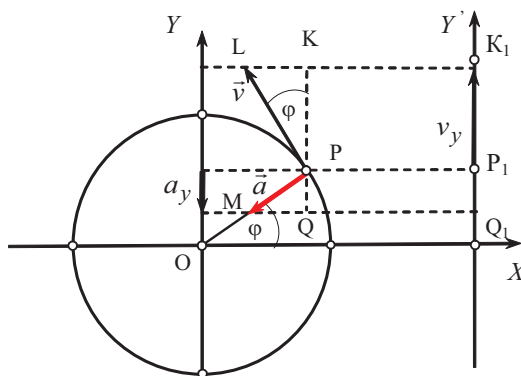
Прашања и задачи

1. Кои движења се периодични?
2. Што е амплитуда, а што елонгација?
3. Што е фреквенција и која е нејзината SI единица и која е врскаста меѓу периодот и фреквенцијата?
4. Изведете ја равенката за елонгацијата во y насоката.
5. Ако функциите $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$ се периодични функции како ќе ја запишете елонгацијата по kT периоди?
6. Запиши ја проекцијата на материјалната

точка Р кој исто така прави хармониско осцилаторно движење врз X -оската.

2.3. РАВЕНКА ЗА БРЗИНАТА И ЗАБРЗУВАЊТО НА ХАРМОНИСКО ОСЦИЛАТОРНО ДВИЖЕЊЕ

Величини кои се менуваат со текот на времето кај хармониското осцилаторно движење, освен елонгацијата се и брзината и забрзувањето. Брзината \vec{v} на точката Р има насока по тангентата повлечена од точката Р. Брзината v_y кај хармониските осцилаторни движења се менува како по својот модул, така и по својата насока. До законот за брзината на хармониското осцилаторно движење може да се дојде ако се следи постапката што веќе ја користевме за законот за елонгација, т.е. брзината ја бараме како проекција од векторот на линиската брзина \vec{v} на кружното движење во правец на осцилаторното движење (сл. 1).



Сл. 1.

На сл.1 се гледа дека од триаголникот PKL следи:

$$\frac{PK}{PL} = \frac{P_1K_1}{P_1L} = \frac{v_y}{v} = \cos \varphi, \quad (1)$$

Ако амплитудата или максималната вредност на брзината е $v = \omega A$; $\varphi = \omega t$, A е радиусот на кружното движење еднаков со амплитудата на осцилаторното движење. Споед равенката (1) брзината v_y на хармониското осцилаторно движење е дадена со:

2. Механички осцилации

$$v_y = \omega A \cos \omega t, \quad (2)$$

Во равенката (2) ω е кружната фреквенција. Брзината на хармониското осцилаторно движење е дадена како косинусна функција од времето. Нејзината вредност осцилаторно се менува во границите $v_y = \pm v = \pm \omega A$. Тоа значи брзината на точката Р врши хармониско осцилаторно движење, односно периодично се менува. Знакот (+) или (-) само ја покажува ориентацијата на брзината како векторска величина во однос на Y -оската.

Забрзувањето на хармониското осцилаторно движење може да се определи како проекција од центрипеталното забрзување \vec{a} (сл.1). Од триаголникот РМQ следи:

$$P_1Q_1 = PQ = PM \sin \varphi, \quad (3)$$

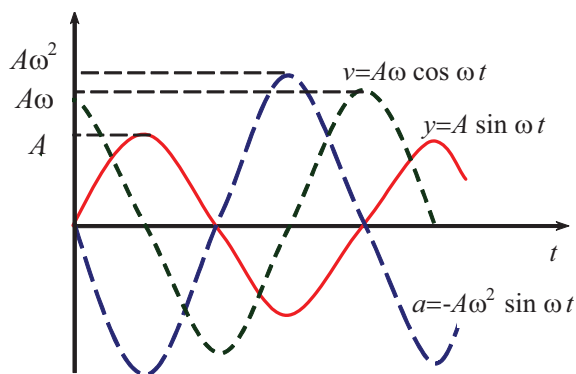
Бидејќи РМ е модулот на центрипеталното забрзување на рамномерното кружно движење, може да се запише $a = \omega^2 A$ и $\varphi = \omega t$. Забрзувањето во Y -насоката е:

$$a_y = -\omega^2 A \sin \omega t. \quad (4)$$

Забрзувањето е пропорционално со елонгацијата и секогаш е во обратна насока од елонгацијата:

$$a_y = -\omega^2 y. \quad (5)$$

На сл. 2 е прикажана графичката зависност на елонгацијата, брзината и забрзувањето на хармониски осцилатор во текот на времето.



Сл. 2. Елонгацијата, брзината и забрзувањето се фазно поместени.

Бидејќи максималните вредности кои може да ги прими функцијата синус или косинус, се ± 1 . Максималните вредности на брзината ќе бидат $\pm \omega A$. Брзината е најголема кога телото минува низ рамнотежната положба т.е. за $t = 0$ и $t = T/2$. Брзината, пак, е еднаква на нула во точките каде елонгацијата е максимална т.е. за $t = T/4, 3T/4, 5T/4, \dots$

Забрзувањето на материјалната точка при хармониско осцилаторно движење има максимална вредност $a_0 = \omega^2 A$ што одговара за максимална елонгација. Забрзувањето е еднакво на нула кога телото минува низ рамнотежната положба (елонгацијата $y=0$).

Повторно како најпрост пример за хармониско осцилаторно движење да го разгледаме осцилирањето на тег со маса m обесен на крајот на една еластична пружина.

Нека системот тег-пружина под дејство на надворешна сила F се изведе од рамнотежната состојба. Надворешната сила е пропорционална со промената на должината на пружината, $F = ky$, каде што k е *коэффициент на пропорционалност*. Доколку пружината е покрута коэффициентот k е поголем. Или за каков било хармониски осцилатор, константата k е позната и како константа на пропорционалност на повратна сила на хармоничкиот осцилатор.

Ако пружината се растегне за некоја должина $y = A$ и се пушти, како резултат на тоа како *повратна сила* на пружината дејствува силата

$$F_{el} = -ky \quad (6)$$

која се стреми да го врати тегот во рамнотежната состојба (состојба $y=0$), односно системот тег-пружина започнува да осцилира околу рамнотежната положба. Знакот минус покажува дека силата и поместувањето y секогаш имаат спротивни насоки, односно силата ја променува насоката секогаш кога телото поминува низ рамнотежната положба. Силата кај осцилаторното движење има најголема вредност кога телото најмногу се оддалечи од рамнотежната положба. Осцилаторното движење е нерамномерно променливо, во едни фази тоа е забрзано (кога

2. Механички осцилации

телото се движи кон рамнотежната положба), а во други забавено (кога телото ќе се оддалечи од рамнотежната положба).

Според вториот Њутнов закон големината на силата може да се напише:

$$F = ma_y = -ky, \quad (7)$$

па забрзувањето е:

$$a_y = -\frac{k}{m}y. \quad (8)$$

Со споредување на равенките (5) и (8) се добива $-\omega^2 y = -ky/m$, односно:

$$\omega = \sqrt{k/m}. \quad (9)$$

Овде почетното поместување од рамнотежна состојба е амплитудата A .

Според напред изнесеното за фреквенцијата на осцилирање f_0 , наречена **сопствена фреквенција** на хармонискиот осцилатор, се добива:

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi};$$

односно
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad (10)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (11)$$

Од последните две равенки се гледа дека **фреквенцијата и периодот не зависат од амплитудата, но зависат од масата на хармонискиот осцилатор и коефициентот k .**

ПРИМЕР 1. Топче со маса $m=200$ g, прицврстено на пружина со коефициент на еластичност $0,2$ kN/m, врши осцилаторно движење. Колкав е модулот на забрзувањето кога топчето има поместување 2 cm од рамнотежната положба?

Дадено: $m=200$ g= $0,2$ kg; $k=0,2 \cdot 10^3$ N/m; $k=200$ N/m; $y=2$ cm = $0,002$ m.

Решение. со замена дадените вредности во равенката $a_y = -\frac{k}{m}y$ на која го испуштаме знакот минус се добива:

$$a = \frac{k}{m}y = \frac{200 \text{ N/m}}{0,2 \text{ kg}} 0,002 \text{ m} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

ПРИМЕР 2. Да се запише равенката на хармонискиот осцилаторно движење ако модулот на амплитудата $A=0,4$ m, кружната фреквенција е $\omega=4$ Hz и почетна фаза $\phi_0=\pi/2$

Дадено: $A=0,4$ m, $\omega=4$ Hz; $\phi_0=\pi/2$

Решение. Со замена на дадените вредности во равенката $y = A \sin(\omega t + \phi_0)$ се добива:

$$y = 0,4 \sin(4t + \pi/2).$$

Прашања и задачи

1. Од што зависи константа на повратна сила на хармонискиот осцилатор кога хармонискиот осцилатор е тег-пружина.
2. Запишете ја равенката за брзината на проекцијата-точката што осцилира во Y -насоката.
3. Запишете ја равенката за забрзувањето на точка што осцилира во Y -насока.

РЕЗИМЕ

Фазата на осцилирање ϕ , времето t , периодот на осцилирање T и кружната фреквенција ω се поврзани со:

$$\phi = \frac{2\pi}{T}t = 2\pi f t = \omega t.$$

- Фреквенцијата е поврзана со периодот така што важи:

$$f = \frac{1}{T}$$

- Единица за фреквенција е $1 \text{ Hz} = \frac{1}{1 \text{ s}} = \text{s}^{-1}$.

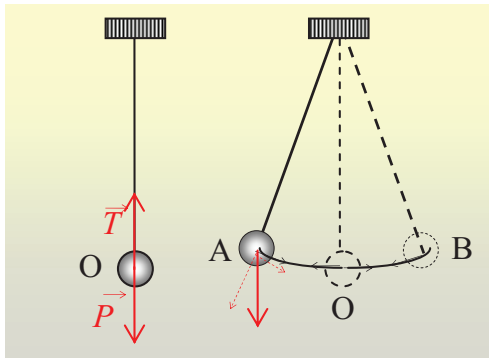
- Доколку почетна фаза има некоја вредност ϕ_0 , елонгацијата е

$$y = A \sin(\omega t + \phi_0).$$

- Сопствена фреквенција на хармонискиот осцилатор и периодот на осцилирање се

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

2.4. МАТЕМАТИЧКО НИШАЛО



Сл. 1

Топче кое е обесено на крајот со занемарлива маса може да го сметаме за **математичко нишалото** (сл.1). Всушност, математичкото нишалото е идеализиран поим и претставува материјална точка со маса m што е обесена на нерастеглив крај (без маса) со должина l . Во рамнотежна положба, дадена на сликата 1 лево, се урамнотежени Земјината тежа и силата на затегнувањето на крајотот T . Ако топчето се измести од рамнотежната положба (сликата десно), под влијание на една од компонентите на Земјината тежа, топчето почнува да осцилира правејќи цела осцилација ОАОВО. Се покажува дека ова осцилирање, во услови кога аголот на врвот е мал, е хармониско.

Период на осцилирање на нишалото

Со следниве експерименти се покажуваат некои важни факти поврзани со периодот на нишалото.

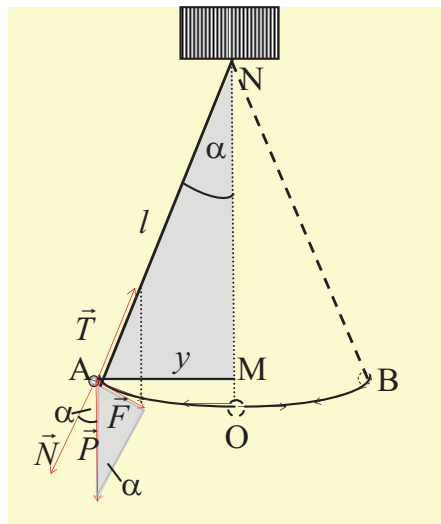
Измерете со стоперка време за кое ќе се направат 10 осцилации. Периодата ќе ја добиете кога ова време ќе го поделите со 10. Внимавајте при експериментирањето, математичкото нишалото е хармониски осцилатор само кога осцилирањето се прави при мали агли на врвот, помали од 5° .

Потоа проветере го следново. Паралелно со нишалото, поставете друго, така да имаат еднакви должини, но различни маси. Измерете со штоперка време за кое ќе се направат 10 осцилации на двете нишала. Што уочувате?

Периодите не зависат од масите.

Измерете време на 10 осцилации за друга амплитуда на осцилирање. Што заклучувате? *Периодот на осцилирањето не зависи од амплитудите.*

Споредете го периодот на осцилирањето на ова нишалото со периодот на нишалото со 4 пати поголема должина. *Периодот е 2 пати поголем.* Значи, *периодот зависи од должината.* Со овие експерименти се покажува дека периодот на математичкото нишалото не зависи ниту од масата на топчето, ниту од амплитудата на нишањето, туку само од неговата должина. Тоа ќе го покажеме и теориски. За таа цел ќе се послужиме со сликата 2



Сл.2.

Го разгледуваме топчето во положба А. На него дејствуваат две сили Земјината тежа $\vec{P} = m\vec{g}$ и силата на затегнувањето \vec{T} .

Резултанта на тие две сили е силата \vec{F} која се стреми да го врати топчето во рамнотежна положба, па значи ја игра улогата на *повратната сила* кај хармонискиот осцилатор. Ако се погледаат двата триаголника означени со сиво, се гледа дека се тоа два слични триаголници, како триаголници со еднакви агли. Од сличноста на овие триаголници следува:

2. Механички осцилации

$$\frac{|\vec{F}|}{|\vec{P}|} = \frac{AM}{AN} \quad \text{или} \quad \frac{F}{P} = \frac{y}{l} \quad (1)$$

Имајќи предвид дека $P = mg$, и дека y , за мали агли α , е приближно еднакво со должината на лакот AO , што значи поместување од рамнотежната положба, односно елонгација, за повратната сила се добива:

$$F = -\frac{mg}{l} y \quad (2)$$

Знакот минус го ставивме бидејќи повратната сила \vec{F} е насочена секогаш кон рамнотежната положба, значи спротивно на елонгацијата.

Знаеме дека секоја повратна сила кај хармониските осцилаторни движења е дадена со општата релација:

$$F = -ky \quad (3)$$

а бидејќи овде, според (2) за дадено нишалото константата на пропорционалноста е дадена со:

$$k = \frac{mg}{l} \quad (4)$$

каде што од десна страна имаме константни величини, следува заклучокот дека *математичкото нишалото за мали агли е хармониски осцилатор*.

Периодот на хармонискиот осцилатор (види релација од лекцијата) се определува

според $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. Ако овде се внесе (4) се добива:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{mg/l}}; \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}; \quad (5)$$

Значи, се покажува и теориски дека периодот на нишањето T кај математичкото нишалото, ако тоа осцилира со мали агли, *зависи само од неговата должина l* , и е дадена со равенката (5)

Во оваа релација g е земјиното забрзување. Се разбира ако земјиното забрзување се промени ќе дојде и до промена на периодот на математичкото нишалото.

Нишалото, чиј период на една осцилација изнесува една секунда, е наречено *секундно нишалото*.

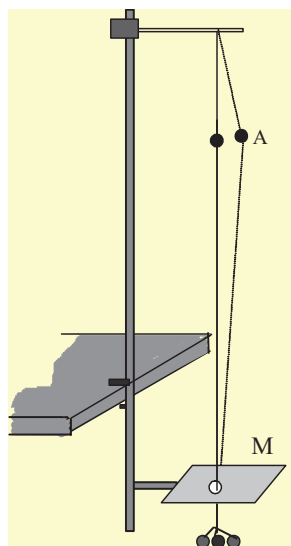
Ако на географска широчина од 45° земјиното забрзување изнесува $g = 9,806 \text{ m/s}^2$, од релацијата произлегува дека должината на секундното нишалото изнесува:

$$l_s = \frac{gT^2}{4\pi^2} = \frac{g}{4\pi^2} = 0,248 \text{ m}.$$

Ние покажавме експериментално дека периодот на математичкото нишалото за едно исто место зависи само од неговата должина. Меѓутоа, како што може да се види, периодот на нишалото се менува ако се промени земјиното забрзување. Со нишалото познато како *Пицарелово*, може да се покаже експериментално и оваа зависност.

Пицареловото нишалото е обично математичко нишалото - топче A , со кука од долната страна (види слика 3). Нишалото се монтира на висок статив и се мери неговиот период на осцилирање. Потоа, на куката на нишалото се закачува еден доста долг конец кој е проврвен низ дупче на една хоризонтално поставена плоча M , а на другиот крај од плочата се поставуваат уште три топчиња со маса еднаква на масата на горе поставеното топче.

При ваква поставеност на системот, се отклонува од рамнотежната положба горното нишалото и повторно се мери периодот на осцилирање. Се покажува дека осцилирањето сега



Сл. 3.

положба дејствува вертикално надолу.

е со два пати помал период. *Објаснение:* долните нишала не нишаат, тие, само, поради дејството на Земјината тежа, го зголемуваат забрзувањето кое е сега околу 4 пати поголемо. Должината на конецот меѓу горното нишалото и долните топчиња треба да е што поголема, за да може со доволна уверливост да се претпостави, дека силата со која нишалото се враќа во рамнотежната

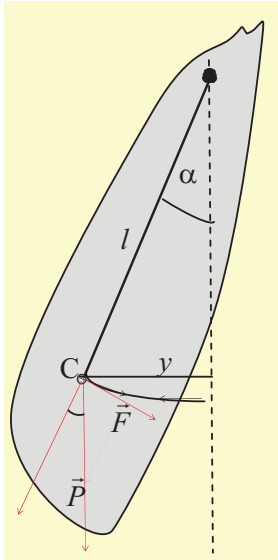
2. Механички осцилации

Зависноста на периодот на математичкото нишало од земјиното забрзување дава можност со мерење на периодот на нишалото со позната должина да се определува земјиното забрзување за кое според (6) се добива:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} . \quad (7)$$

Физичко нишало

Секое тврдо тело кое под дејство на Земјината тежа осцилира околу неподвижна хоризонтална оска која не поминува низ неговиот центар на маса, претставува **физичко нишало** (сл. 4).



Сл.4

При отклонувањето од рамнотежната положба, за мал агол α , на телото во неговиот центар на маса дејствува повратна сила која е дадена со:

$$F = -mg \sin \alpha = -mg \frac{y}{l}$$

што е релација еднаква со таа на математичкото нишало (2). Периодот на осцилирањето на физичкото нишало сепак е различен од периодот на осцилирањето на центарот на маса на телото, кога тој би се

издвоил како засебно математичко нишало. Затоа не може да се користи претходната релација. Тоа лесно се разбира ако физичкото тело го замислиме расчленето на одделни материјални точки. Секоја од нив изолирана од телото би претставувала посебно математичко нишало чии периоди би се определувале според релацијата (6). Меѓутоа, поради нивната поврзаност во цврсто тело, тие не може одделно да осцилираат, туку осцилираат како целина со период кој го викаме *период на физичко нишало*. Но, сепак постои барем едно математичко нишало кое осцилира со периодот на физичкото нишало. Па, во практиката се одбира такво математичко нишало на кое должината му ја одбираме така што неговиот

период да биде еднаков на периодот на физичкото нишало. Должината на она математичко нишало чиј период е еднаков со периодот на нишање е еднаква со периодот на физичкото нишало и се вика **редуцирана должина на физичкото нишало**. На тој начин формулата (6) може да се користи и за физичкото нишало, ако наместо l се земе редуцираната должина (l_r).

Практична примена на нишалата

1. Физичкото нишало се применува кај сидните часовници. Таму периодот може да се менува со придвижување на тег по прачката на нишалото.
2. Метромот, исто така, претставува физичко нишало. Тој служи за одмерување на точни временски интервали. И таму може да се дотерува периодот со поместување на масивна плочка.
3. Сеизмографот е исто така физичко нишало со кој се мерат вибрациите на кората на Земјата, кои настануваат при земјотресите.
4. Со релацијата (7) во геофизиката се определува земјино забрзување на разни места на Земјината површина.

Прашања, задачи, активности

1. Колкав е периодот на осцилирање на математичкото нишало на Земјата, а колкав на Месечината, ако забрзувањето на Земјината тежа е $9,81 \text{ m/s}^2$, а тежата на Месечината е $1,62 \text{ m/s}^2$. (Одговор: $T_z = 1,79 \text{ s}$; $T_M = 4,41 \text{ s}$)
2. За кој процент се променила сопствената фреквенција на нишалото со носење на Месечината? (Одговор: 33%)

Кратко резиме

Математичкото нишало за мали агли на отклонување е хармониски осцилатор, со период на осцилирање: $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$.

Секое тврдо тело кое под дејство на Земјината тежа, осцилира околу неподвижна хоризонтална оска која не поминува низ неговиот центар на маса претставува **физичко нишало**. Тоа има свој период на осцилирање. Должината на математичкото нишало, чиј период е еднаков со периодот на физичкото нишало, се вика **редуцирана должина на физичкото нишало**.

2.5. ЕНЕРГИЈА НА ХАРМОНИСКИ ОСЦИЛАТОР

Секој хармониски осцилатор, поседува енергија. Вкупната механичка енергија при осцилаторно движење е збир од кинетичката и потенцијалната енергија. Тие во процесот на осцилирањето периодично се претвораат една во друга (сл.2).

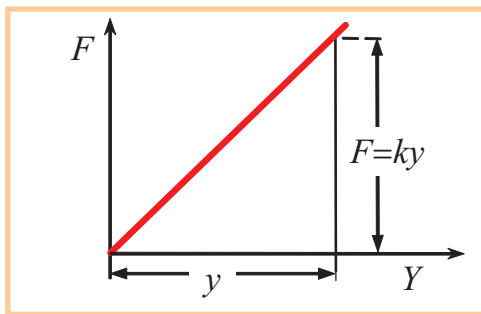
Да разгледаме, на пример, тело со маса m кое осцилира обесено на пружина. Телото на почетокот се повлекува надолу под дејство на некоја сила која е еднаква и спротивна со повратната сила која тежи телото да го врати во рамнотежната состојба.

Кинетичката енергија на материјалната точка со маса m која учествува во хармониското осцилирање и чија брзина v_y е определена во (2.3 равенка (2)), изнесува:

$$E_k = \frac{1}{2} m v_y^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2(\omega t) \quad (3)$$

$$E_k = \frac{1}{2} k A^2 \cos^2(\omega t) \quad (4)$$

Кинетичката енергија има максимална вредност за $y=0$, а вредност нула за $y=A$. Очигледно е дека во сите други положби системот истовремено ќе има и потенцијална и кинетичка енергија.



Сл. 1.

Материјалната точка ја добива потенцијалната енергија на сметка на работата што ја вршат силите на еластичните деформации при нејзиното поместување од рамнотежната положба. Силата не е константна, туку со помес-

тувањето се менува линеарно $F = -ky$. На сл. 1 е прикажана силата со која се деформира пружината која според Хуковиот закон е $F = ky$. Ако пружината се издолжи за y работата е еднаква со плоштината на триаголникот зафатен со правата $F=ky$ и Y -оската, почнувајќи од нула до y (сл.1),

Бидејќи работата се врши на сметка на потенцијалната енергија на телото во поле на еластични сили, следува дека потенцијалната енергија изнесува $E_p = -A$, или:

$$A = -\frac{ky^2}{2} \quad (1)$$

$$E_p = \frac{1}{2} ky^2 = \frac{1}{2} k A^2 \sin^2(\omega t) \quad (2)$$

Како што се гледа од равенката (2) потенцијалната енергија во зависност од времето, се менува според законот на една периодична функција. Притоа, потенцијалната енергија за $y = 0$ има вредност нула, $E_p(\min) = 0$, а за $y = A$ има максимална вредност $E_p(\max) = kA^2/2$. Вкупната механичка енергија на системот кој осцилира е збир од кинетичка E_k и потенцијална енергија E_p .

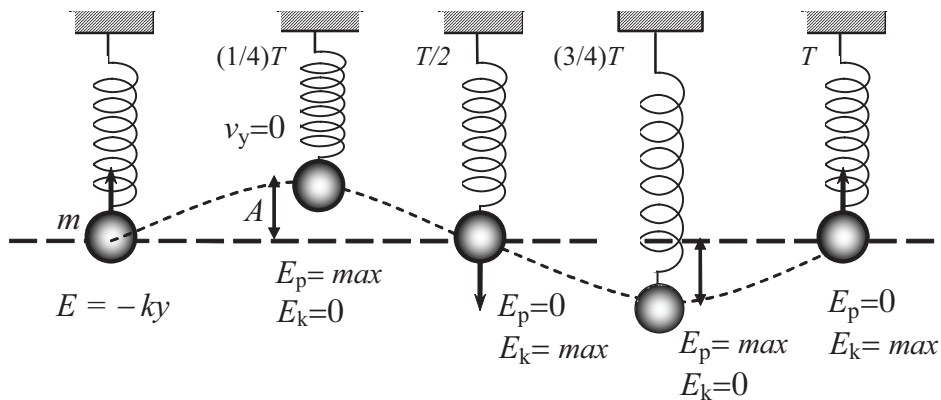
$$E = E_k + E_p = \frac{kA^2}{2} [\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t)] = \frac{k}{2} A^2$$

$$E = E_k + E_p = \frac{k}{2} A^2 \quad (5)$$

Според тоа, во системот каде што силите на триење и отпорот на средината може да се занемарат, вкупната механичка енергија е константна величина. Таа со текот на времето не се менува и зависи само од константата на пружината k и квадратот на амплитудата.

Кога пружината ќе се растегне, сл. 2, во најниската точка $y=A$, сета механичка енергија е потенцијална. Кога телото ќе се пушти слободно да осцилира, неговата брзина расте, а со тоа и кинетичката енергија расте. Притоа телото добива толку кинетичка енергија за колку што ќе се намали потенцијалната енергија.

2. Механички осцилации



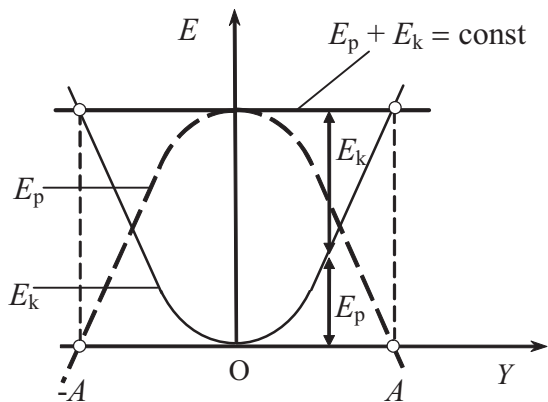
Сл. 2.

Во рамнотежната положба ($y=0$) целата потенцијална енергија се претвора во кинетичка. Во таа точка телото има максимална брзина. Притоа движејќи се телото ја поминува рамнотежната состојба. Пружината се собира и силата од страна на пружината ќе го успорува телото, така тоа ја губи кинетичката енергија, а пружината добива потенцијална енергија. Телото конечно ќе застане во највиската точка $y=-A$, и повторно механичката енергија е само потенцијална. Тогаш повратната сила на пружината го забрзува телото во обратна насока, па потенцијалната енергија се претвора во кинетичка и така целиот процес се повторува.

(E_p, y) се совпаѓа со рамнотежната состојба околу која се одвиваат хармониски осцилации. Тука $E_p = 0$. Движењето е ограничено за вредности на y во граници меѓу A и $-A$ кои одговараат на најголемите можни поместувања од рамнотежната положба. Со полна линија е прикажана кривата на потенцијалната енергија $E_p = ky^2/2$. Растојанието од хоризонталната линија до кривата е еднакво на кинетичката енергија. Хоризонталната линија одговара на вкупната енергија

$$E = E_p + E_k = \text{const.}$$

До истите заклучоци за вкупната енергија би дошле и кај математичкото нишали, или кој и да било систем што изведува осцилаторно движење



Сл. 3.

На сл. 3. графички е прикажано како се менува потенцијалната, кинетичката и вкупната енергија на системот што осцилира. Координатниот почеток од координатниот систем

ПРАШАЊА И ЗАДАЧИ

1. Колкава е вкупната енергија на осцилаторен систем.
2. Како зависи енергијата на осцилаторниот систем од амплитудата?
3. Тег закачен на пружина е изведен од рамнотежната положба и отпуштен. По колку време (делови од периодот) максималната потенцијална енергија ќе премине во максимална кинетичка енергија?

(Одговор : $T/4$)

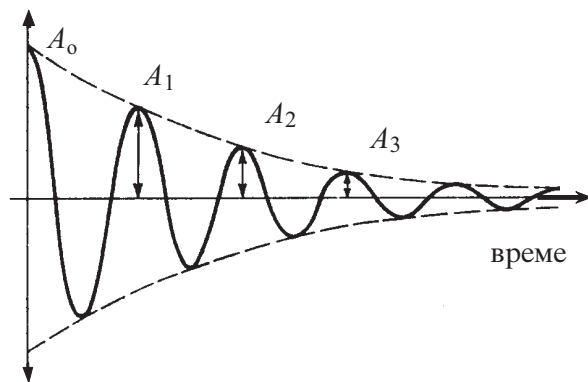
4. Тег на пружина со коефициент на пропорционалност $k=10^3 \text{ N/m}$ осцилира со амплитуда 20 cm. Најди ја неговата вкупна енергија.

(Одговор $4 \cdot 10^{-6} \text{ J}$)

2.6. ПРИДУШЕНИ ОСЦИЛАЦИИ

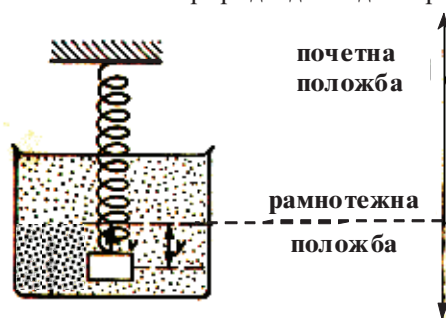
Во досегашните изведувања се претпоставуваше дека системот кој осцилира нема загуби на механичката енергија, па осцилирањето се одвива со константна амплитуда A . Во реални услови, покрај еластичните или квазиеластичните сили дејствуваат и силите на триење или силите на отпорот на средината во која осцилаторот се движи, па амплитудата на осцилаторниот систем со текот на времето опаѓа. Времетраењето на слободните осцилации зависи како од големината на загубите на енергијата така и од големината на почетната внесена енергија.

Графичкиот приказ на опаѓањето на амплитудата со текот на времето е даден на сл. 1.



Сл. 1. Опаѓање на амплитудата при придушените осцилации

Кај механичките осцилации енергијата постепено поминува во внатрешна. Кај осцилаторите од немеханичка природа дел од енер-



Сл. 2.

гијата поминува во внатрешна, а дел се зрачи во околината.

Во практиката, наместо со коефициентот на придушување, брзината на придушувањето се карактеризира со **логаритамскиот декремент на придушувањето** ϕ . Тој се дефинира со природен логаритам од количникот на две последователни амплитуди на осцилирање. Ако со A_n ја означиме амплитудата на n -тата осцилација, а амплитуда на следната $(n+1)$ A_{n+1} тогаш:

$$\phi = \ln \frac{A_0}{A} = \ln \frac{A_1}{A_2} \dots = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}, \quad (1)$$

$$\phi = \ln e^{\delta T} = \delta T$$

Логаритамскиот декремент ϕ е производ од коефициентот на придушување δ и периодот на осцилирање T .

Коефициентот на придушување зависи од средината во која системот врши осцилирање и од потрошената енергија поради еластичноста на пружината. На пример, придушувањето на системот тело-пружина многу е поголемо кога тој систем осцилира во вода или масло отколку кога осцилира во воздух (сл. 2).

На сл. 3 е прикажано осцилаторно движење на систем со различни вредности на коефициентот на придушување. На кривата (1) системот околу својата рамнотежна состојба осцилира придушено. Ако вредноста на коефициентот на придушување е многу голема, движењето станува аperiодично.

Кога коефициентот на придушувањето расте и достигнува некоја критична вредност, кривата (2), телото постепено се приближува до својата рамнотежна состојба, но не осцили-



Сл. 3.

ра. Систем во кој коефициентот на придушувањето достигнува вредност поголема од критичната, кривата (3), бавно се приближува кон својата рамнотежна состојба.

Критичното придушување се користи кај многу мерни инструменти кои имаат стрелка, на пример, волтметри, амперметри, брзинометри, ваги и слично. Стрелката која осцилира придушено, ќе осцилира околу својата конечна положба, додека, пак, кај системот каде придушувањето е поголемо од критичното, ќе осцилира така бавно, што мерената величина може да се промени пред таа да се прочита.

За непридушени осцилации силата е како што веќе кажавме е дадена со:

$$F = ma = -ky \quad (2)$$

каде што k константата на пропорционалноста меѓу силата и елонгацијата y .

Во случај на придушени осцилации, равенката (2) ја добива следната форма:

$$F = -ky + R \quad (3)$$

каде што со R е означена силата на триење и влијанието на отпорот на средината. Оваа сила најчесто е пропорционална со брзината v , односно $R = -rv$, па според тоа се добива:

$$F = -ky - rv \quad (4)$$

Во оваа равенка е внесена константата r која е константата на отпорот. Тоа е основниот закон на динамиката на придушените осцилации.

Прашања и задачи

1. Кога настануваат придушени осцилации и како опаѓа амплитудата со текот на времето?

2. Од што зависи дали ќе има периодично придушено осцилирање

3. Кога едно движење е аperiодично?

4. Графички прикажи го опаѓањето на амплитудата со текот на времето кај едно придушено осцилаторно движење

5. Дали и кога придушените осцилации се корисни?

2.7. ПРИСИЛЕНИ ОСЦИЛАЦИИ. МЕХАНИЧКА РЕЗОНАНЦИЈА

Секој осцилаторен систем во реални услови, поради совладување на силите на триење и надворешните отпори, врши придушени осцилации. Осцилаторниот систем, за да изведува непридушени осцилации, треба континуирано да прима енергија. Односно, системот може да изведува осцилаторно движење и кога врз него дејствува некоја надворешна сила која периодично се менува со времето. Нека надворешната хармониска сила со амплитуда F_0 и фреквенција f што побудува на осцилирање е зададена со равенката:

$$F = F_0 \sin 2\pi f t. \quad (1)$$

Кога надворешна хармониска сила наизменично ја продолжува и собира пружината, системот изведува *присилени хармониски осцилации*.

Системи кои не подлежат на надворешни периодични сили, изведуваат *слободни осцилации*. Фреквенцијата на системот што слободно осцилира е наречена *сопствена фреквенција* f_0 . Таа зависи од механичките својства на системот.

На пример, кога надворешна хармониска сила наизменично ја продолжува и собира пружината, системот изведува. Со примена таква сила системот се присилува да осцилира со фреквенцијата на зададената сила. Амплитудата, а со тоа и енергијата на присилените осцилации зависи од разликата меѓу фреквенцијата f на надворешната периодична сила и сопствената фреквенција f_0 на самиот осцилатор. Колку разликата меѓу овие две фреквенции е поголема, толку амплитудата на присилените осцилации е помала.

$$A = \frac{F_0}{k} \sqrt{1 - (f / f_0)^2}$$

каде што $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ е сопствената фреквенција на системот тело-пружина, k е константа на пропорционалност.

Кога фреквенцијата на надворешната

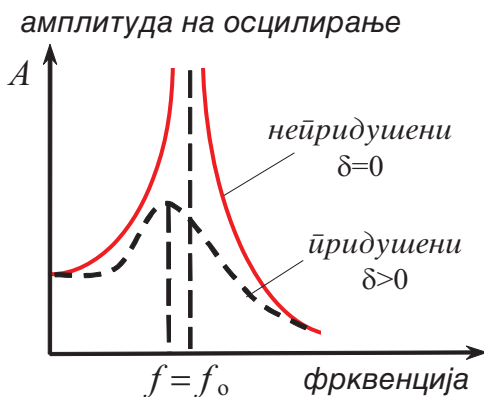
2. Механички осцилации

хармониска сила f се приближува до сопствената фреквенција на системот f_0 , амплитудата на осцилирање расте, наедно расте и енергијата. Кога ќе се постигне $f - f_0 = 0$, односно за:

$$f = f_0,$$

амплитудата на присилените осцилации достигнува максимална вредност. Оваа појава е наречена **механичка резонанција**. $f = f_0$ е **резонантна** фреквенција. Колкава ќе биде амплитудата на присилените осцилации завиди од коефициентот на придушување δ . Кога коефициентот на придушување е $\delta \approx 0$ при $f = f_0$ амплитудата станува бесконечно голема.

На сл. 1 е прикажана графичката зависност на амплитудата A од фреквенцијата за различен коефициент на придушување δ . Од сликата се гледа дека амплитудата на присилените осцилации достигнува максимум за определена фреквенција на надворешната хармониска сила, $f = f_0$. Оваа појава се вика **механичка резонанција**, а кривите - резонантни криви.

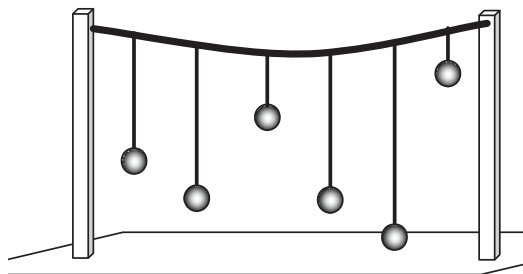


Сл. 1.

Обично, телото или системот што се јавува како причина некој осцилаторен систем да врши присилени осцилации, се вика **осцилатор**. Осцилаторот кој ја прифаќа фреквенцијата на надворешната периодична сила во овој случај е **резонатор**.

Ако масата на осцилаторот m_0 во споредба со масата на резонаторот m_r е многу поголема ($m_0 \gg m_r$), повратното дејство на резонаторот кон осцилаторот е толку слабо

што може да се занемари. Меѓутоа, ако тие имаат приближно еднакви маси ($m_0 \approx m_r$) доаѓа до израз повратното дејство на резонаторот. При вакви околности има појава на наизменично пренесување на осцилаторната енергија од осцилаторот кон резонаторот и обратно.



Сл. 2.

Појавата резонанција најдобро може да се демонстрира на следниов начин: на тенко и еластично гумено црево, прицврстено на краевите, се закачени еднакви нишалата со различна должина, а само две се со еднаква должина (сл.2).

Ако кое било од нив се извади од рамнотежната состојба осцилациите ги прифаќаат само нишалата кои се со еднаква должина (второто и четвртото). За овие две нишалата ќе бидат во резонанција. Имено, нишалата ќе бидат во резонанција само ако им се совпаѓаат сопствените фреквенции.



Сл. 3. Класичен пример за резонанција. Рушење на мостот преку реката Токама во 1940 год.

2. Механички осцилации

На сл.3 е прикажана фотографија на мостот преку реката Токама кој се урнал од резонантни бранови на периодични ветрови кои минувале низ него.

Резонанцијата е карактеристична и за сите видови бранови. Освен механичка резонанција, има и акустична, електромагнетна, нуклеарно магнетна, оптичка резонанција (кај квантните генератори-ласерите). За да се добие одреден глас гласните жици и усната празнина се однесуваат како резонатори итн.

Присилените осцилации и резонанцијата наоѓаат широка примена во акустиката - за засилување на звук, во радиоелектрониката - за засилување на електрични осцилации итн.

Освен позитивни ефекти, резонанцијата може да има и штетни последици. Затоа, при конструкцијата на градежни објекти, мостови, машини и нивни делови *се води сметка нивната сопствена фреквенција да не се совпаѓа со фреквенцијата на надворешните периодични сили*. Резонанцијата се користи и за конструкција на инструменти за мерење на фреквенцијата на наизменичната струја – *фреквенцетри*.

Човечкото тело, како целина, може да се смета за сложен осцилаторен систем. Доколку се познати масата, коефициент на еластичност и коефициент на придушување на различните органи, може да се проучи реакцијата на тело кај човекот на разни вибрации. За таа цел се користи биомеханички модел на човекот.

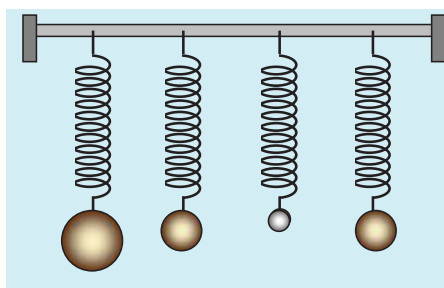
Секој елемент од биолошкиот систем, како механички систем, има своја карактеристична сопствена фреквенција. Побудувањето на тие фреквенции обично настанува во превозните средства, преку осцилаторните машини со кои работи, или преку подлогата на која стои. На пример, резонантна фреквенција за стомачната маса е 4-8 Hz, за долната вилица е 100-200 Hz.

Осцилациите со мали амплитуди и фреквенции од 3 до 30 Hz се познати како *вибрации* или потреси. Вибрациите штетно дејствуваат на човекот. Се покажало дека коските се добар спроводник и резонатор на вибрации. Сепак, резонантните појави при умерени надворешни влијанија, бидејќи *коефициентот на придушување за биолошкиот систем е многу*

голем, многу тешко се остваруваат.

ПРАШЊА И ЗАДАЧИ

1. Кога настануваат присилени осцилации?
2. Кога настанува механичка резонанција?
3. Освен механичка резонанција дали постои резонанција и кај други видови бранови?
4. Што треба да се направи за да се спречи штетната резонанција?
5. Четири еднакви пружини се поставени на ист хоризонтален гумен држач (сл. 4). Ако првата се измести од рамнотежа, и имајќи ја предвид, равенката за периодот на осцилирање на пружините, одговорете која од пружините ќе ги прифати осцилациите со максимални амплитуди. Топките се направени од ист материјал. Зошто?



Сл. 4.

За да го набљудувате резонантното рушење на мостот Tosana Narrows погледајте го видеоклипот

<http://www.youtube.com/watch?v=POFiVcbpAl>

РЕЗИМЕ

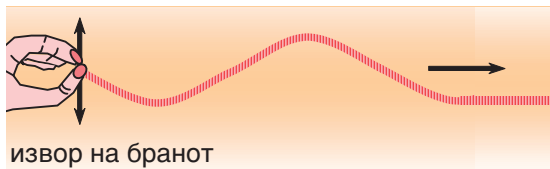
- Придушените осцилации може да бидат периодични (коефициентот на придушување помал од критичниот) и аperiodични (поголем од критичната вредност).
- Фреквенцијата на системот што слободно осцилира е наречена *сопствена фреквенција* f_0 . Резонанција настанува ако сопствената фреквенција f_0 на осцилаторот се совпадне со фреквенцијата на надворешната хармониска сила.
- Освен позитивни ефекти, резонанцијата може да има и штетни последици.

3.1. БРАНОВИ ПОЈАВИ

Примери за браново движење има насекаде околу нас. Ако во мирна вода фрлиме камен, областа која непосредно е допрена од каменот почнува да осцилира, а потоа осцилирањето се шири создавајќи бранови по површината на водата. Звукот, исто така, е еден вид браново движење. Приемот на звукот и сликата во радиото и телевизиските приемници се остварува со електромагнетните бранови. Електромагнетни бранови се и светлинските, рендгенските зраци и γ зраците.

Во зависност од природата на брановиот процес и средината низ која се пренесува постојат: *механички, електромагнетни и квантно-механички бранови.*

Што е тоа бран? Како се создава брановото движење? Одговорите се различни за разни видови бранови.



Сл. 1.

Наједноставен пример за да покажеме браново движење е ако земеме едно долго јаже или гумено прево и со рака го придвижуваме горе - долу (сл. 1).

Кога во една материјална средина (тврда, течна или гасовита) се најде извор на осцилации (тоа е и *извор на бранот*) меѓу изворот и честиците на материјалната средина се јавуваат еластични сили на заемнодејство. Под нивно влијание честиците од средината се присилени да осцилираат со фреквенција еднаква на фреквенцијата на изворот на бранот. Се разбира, најнапред ќе почнат да осцилираат оние честици од средината кои се во непосреден контакт со изворот на бранот, а подалечните честици доцнат по фаза од претходните и од изворот на бранот.

Процесот на ширење на осцилациите во просторот со текот на времето се вика *бранов*

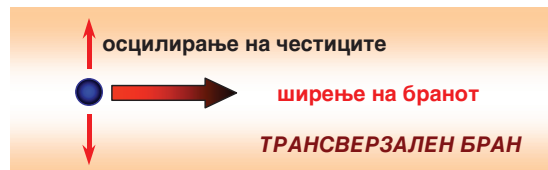
процес, браново движење или бран.

При брановиот процес честиците на еластичната средина осцилираат околу рамнотежната положба, а од една на друга честица во просторот *се пренесува само деформацијата, а со тоа и енергијата од изворот.* Во тоа може да се уверите ако на мирна вода каде има една топка или друг лесен предмет фрлите камен. Притоа топката осцилира горе - долу, останувајќи скоро на истото место, без разлика што бранот видно се проширил.

Какви бранови разликуваме и како тие се шират во околината?

Во зависност од тоа како осцилираат честиците на еластичната средина брановите може да бидат:

- **трансверзални** - тоа се бранови каде честиците од материјалната средина осцилираат нормално на насоката на ширење на бранот. Такви бранови се прикажани на сл. 2;



Сл. 2.

- **лонгитудинални** - честиците на средината осцилираат во правец во кој се шири бранот (сл. 3).



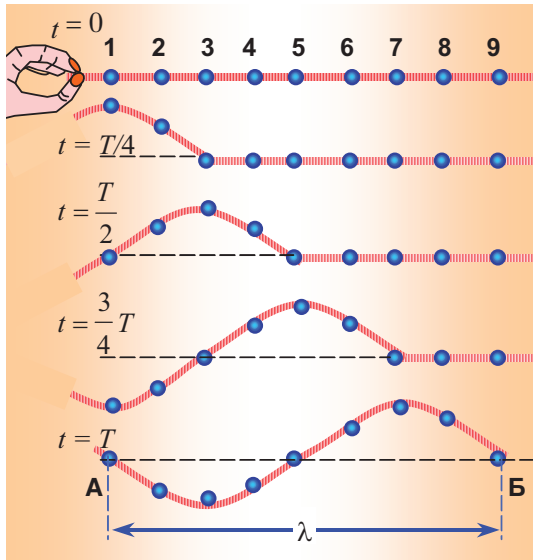
Сл. 3.

Како пример за лонгитудинален бран е ширењето звучен бран во воздухот.

Ширењето на лонгитудиналните бранови е условено од волуменска деформација на еластичната средина, па тие се шират во тврди, течни и гасовити средини. Бидејќи ширењето на трансферзалните бранови е последица на посебен вид деформација својствена само за

3. Механички бранови и звук

тврдите тела тие се шират само во тврдите средини. Ширење на трансверзален бран во еднодимензионална материјална средина графички е илустрирано со низа честици (молекули, атоми) на сл. 4.

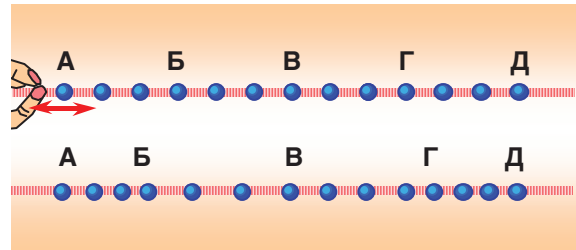


Сл. 4. Ширење на трансверзален бран.

Нека во моментот $t=0$, бранот што се шири од лево на десно дошол до честицата 1. Таа почнува транслаторно осцилаторно движење повлекувајќи ја и честицата 2. Кога честицата 1 ја достигнува максималната оддалеченост од рамнотежната положба ($t=T/4$), бранот се проширил до честицата 3. За време $t=T/2$, честицата 1 повторно е во рамнотежната положба, додека честицата 3 повлекувајќи ја и честицата 4 ја достигнува максималната елонгација. За тоа време бранот се проширил до честицата 5 која сè уште е во рамнотежната положба. Овој процес продолжува, така што за време $t=3T/4$ првата честица е во максимална оддалеченост од рамнотежната но во спротивна насока од првата, а бранот се проширил до седмата честица. За $t=T$ првата честица ќе направи една полна осцилација, а за тоа време осцилирањето на честиците се проширило сè до честицата 9. Таа го започнува осцилирањето во исто време кога и честицата 1 го започнува вториот период, т.е. честицата 9

осцилира со временско задоцнување од $t=T$. Тие две честици осцилираат во **фаза** т.е. **синхроно** (меѓу нив постои фазна разлика 2π).

Патот што го изминува деформацијата во еластичната средина за време од еден период на осцилирање на изворот (првата честица) е **бранова должина**. Обично таа се бележи со λ .



Сл. 5. Ширење на лонгитудуален бран.

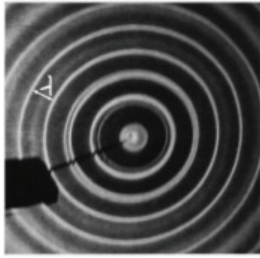
Постепено формирање на лонгитудуален бран од повеќе честици (сл.5) може да се објасни аналогно како и формирањето на трансверзален бран. И во овој случај осцилирањето на првата честица се пренесува на втората, а преку неа на третата итн. При осцилирањето се менуваат само меѓусебните растојанија. Таквиот бран во средината предизвикува периодични промени на густината (згуснувања и разредувања), кои се движат во насока на ширење на бранот.

Дел од просторот во кој сите честици се вклучени во осцилаторниот процес се вика **браново поле**. Границата која ги одделува честиците кои осцилираат од оние што сеуште не почнале да осцилираат, се вика **фронт на бранот** (латински *frontis* - чело).

Бранова површина е геометриско место на точки кои во текот на брановиот процес осцилираат со еднакви фази.

Брановата површина може да има произволна форма, но во најпрост случај таа може да биде рамна, сферна или цилиндрична. Според тоа, во неограничена хомогена и изотропна средина, каде брзината на ширење во сите насоки е иста, бранот се шири по концентрични површини чиј центар е во изворот на бранот. Таквите бранови се **сферни бранови**, а фронтот на бранот е сферна површина. Димензиите на изворот на таков бран се мали па може да се смета дека изворот на ваков

бран е точкест (сл. 6).



Сл. 6. Сферен бран.

Ако брановите површини се рамнини нормални на насоката на ширење на бранот, тоа е **рамен бран**. Рамен бран на површината на водата може да се добие при треперење на линијка со димензии значително поголеми од брановата должина на бранот.

Брановите може да бидат *просторни, површински и еднодимензионални (линиски)*. Ако осцилациите на изворот се пренесуваат по еден однапред утврден правец, во тој случај станува збор за простирање на линиски бранови. Такви бранови се шират, на пример, по должината на една права (жица, прачка, јаже).

За поедноставно прикажување и опишување на брановите се воведува поимот **зрак**. Зрак е линија чија тангента во секоја точка се поклопува со насоката на ширење на бранот. Во хомогена средина зраците се прави нормални на фронтот на бранот. Насоката на зраците е определена од насоката на ширење на бранот.

Прашања и задачи

1. Какви бранови се разликуваат според тоа како осцилираат честиците и објасни го механизмот на нивно создавање.
2. Дали кајче, кое ќе се најде на бранот на морската шир плива заедно со бранот? Зошто?
3. При брановиот процес честиците на еластичната средина осцилираат околу рамнотежната положба, а од една на друга честица во просторот се пренесува само што?
4. Зошто не може да се добијат механички бранови во вакуум. Знаете ли кои бранови се шират во вакуум?

5. Наведи некои појави кои имаат бранов карактер.
7. Какви брановите се шират во: а) гасовта, б) течна и в) цврста средина.

3.2. БРЗИНА НА БРАНОВИ

Нека во хомогена еластична средина изворот на бранот изведува хармониски осцилации. Секоја честица, до која стигнал бранот, изведува присилени осцилации со фреквенција на изворот. Од тие причини карактеристиките на изворот: **фреквенцијата f , периодот T и амплитудата A** се карактеристики и на бранот што се создава.

Ако *брзина на ширење на бранот* е v , за временски интервал додека изворот направи една полна осцилација (една периода T) бранот ќе го помине патот vT , односно тој поминал растојание λ еднакво на:

$$\lambda = vT \quad (1)$$

λ е **бранова должина** на бранот. Тоа е најмалото растојание во насока на ширење на бранот меѓу две честици од еластичната средина кои осцилираат во фаза.

Од формулата за бранова должина (1) се добива и брзината на бранот:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad (2)$$

Покрај овој општ израз за брзината, постојат и посебни формули за брзината на трансверзални и лонгитудинални бранови. Со нив непосредно се изразуваат својствата на средината низ која поминува. Уште Њутн покажал дека брзината на ширење на бранови во цврсти и течни средини зависи од својствата на средината. Брзината на ширење на лонгитудиналните бранови е зададена со формулата:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \text{ или } v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}, \quad (3)$$

каде што ρ е густина на средината, E е Јунгов модул на еластичност кој е карактерична

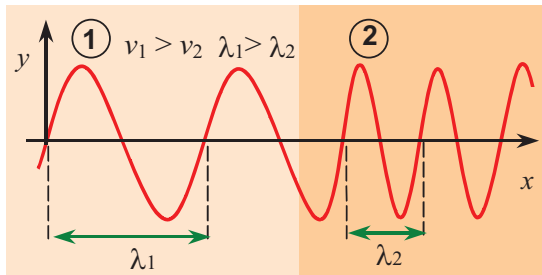
3. Механички бранови и звук

величина за својствата на цврстите тела, додека B е коефициент на волуменско ширење на течните средини. E и B се изразени во N/m^2 .

Брзината на ширење на *трансверзалните* механички бранови (бранови низ жица или конец затегнати на двата краја) зависи од силата на затегнување F и од својствата на средината низ која се шири бранот:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (4)$$

Имено, брзината зависи од силата на затегнување на материјалот и линиската густина μ ($\mu = m/l$ – маса на единица должина).

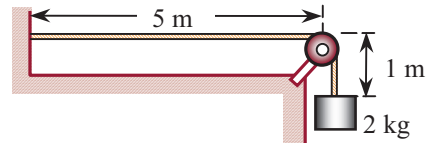


Сл. 1. Брзината на ширење на бранот во дадена хомогена средина е константна величина.

Кога бранот преминува од една во друга средина, тој ја променува својата брзина, а со тоа и брановата должина, но неговата фреквенција останува непроменета (сл.1).

Ако брзината на ширење на бранот во првата средина е поголема, ќе биде поголема и неговата бранова должина.

ПРИМЕР 1. Хомогено јаже има маса од $0,300 \text{ kg}$ и должина $6,00 \text{ m}$. Јажето е затегнато со тег кој има маса 2 kg . Да се определи брзината на ширење на трансверзален бран низ јажето.



Решение. Силата F со која е оптегнато јажето изнесува:

$$F = mg = (2,00 \text{ kg})(9,80 \text{ m/s}^2) = 19,6 \text{ N}$$

Масата на единица должина на јажето изнесува:

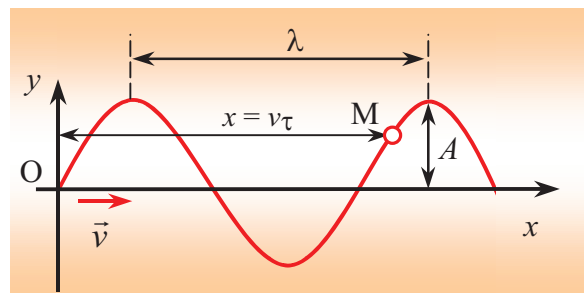
$$\mu = \frac{m}{l} = \frac{0,300 \text{ kg}}{6,00 \text{ m}} = 0,0500 \text{ kg/m}$$

Сега може да се определи брзината на трансверзалниот бран, таа изнесува:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{19,6 \text{ N}}{0,0500 \text{ kg/m}}}; v = 19,8 \text{ m/s}.$$

3. 3. РАВЕНКА НА РАМЕН БРАН

За да ја изведеме равенката на рамен бран да претпоставиме дека изворот на бранот се наоѓа во координатниот почеток O на правоаголниот координатен систем и изведува хармониски осцилации. Бранот се шири во насока на x -оската, а честичите на средината осцилираат во насока на y -оската (сл. 1). Нека со A е означена амплитудата, со T период, а со $f=1/T$ фреквенцијата на бранот.



Сл. 1.

3. Механички бранови и звук

Равенката на изворот на бранот може да се прикаже со:

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T} t . \quad (1)$$

Честиците кои се подалеку од изворот ќе почнат да осцилираат со некое задоцнување во однос на изворот, значи фазно заостануваат. За да се прошири бранот до честицата М која е на растојание x од изворот на бранот, треба да помине време τ . Според тоа равенката на таа честица е зададена со:

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T} (t - \tau) . \quad (2)$$

Ако брзината на ширење на бранот во дадената материјална средина е v , а времето τ еднакво на $\tau = x/v$, се добива:

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right) \text{ или}$$

$$y = A \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{vT} x \right) .$$

Имајќи предвид дека $vT = \lambda$ се добива:

$$y = A \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\lambda} x \right) .$$

Воведувајќи ја величината $k = 2\pi/\lambda$, која се вика **бранов број** и $\omega = 2\pi/T$ - **кружната фреквенција**, равенката на рамен бран може да се напише и во следниов облик:

$$y = A \sin (\omega t - kx) \quad (3)$$

Со kx се изразува фазната разлика помеѓу осцилациите што ги изведува точката оддалечена за x од изворот на бранот и осцилациите на изворот на бранот.

Прашања и задачи

1. Наведи некои појави кои имаат бранов карактер.
2. Што е браново движење, а што е бран?

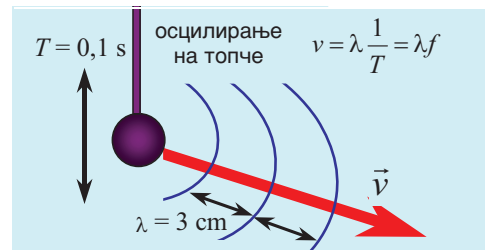
3. Нацртајте крива за зависност на елонгациите на бранови движења чии периоди се однесуваат како 1: 2.

4. Зошто во средини со поголеми еластични сили брзината на брановите е поголема.

5. Со кои основни величини се карактеризира бранот и каква е врската меѓу нив?

6. Според податоците од сликата 1. определете ја брзината на ширење на брановите.

(Одговор: 0,3 m/s)



Сл.1

7. При премин на бранот од една во друга средина се менува и брановата должина, а фреквенцијата не се менува. Како се објаснува тоа?

8. Колкава е брзината на ширење на лонгитудинален бран низ челикот, кој има Јунгов модул на еластичност $2,05 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$, и густината $7,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

(Одговор: $v = 5193 \text{ m/s}$)

9. Колкава е брзината на ширење на лонгитудинален бран низ вода, каде коефициентот на волуменско ширење е $2,1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ и густината 10^3 kg/m^3 .

(Одговор: $v = 1449 \text{ m/s}$)

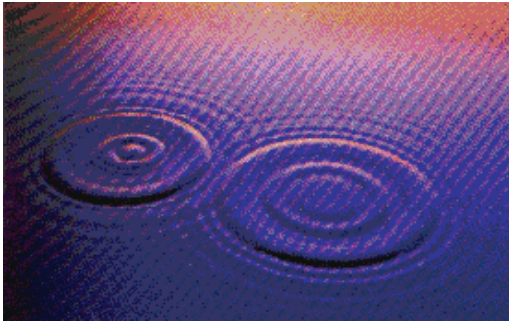
10. Равенката на бранот е зададена со $y = 0,1 \cos \left(\frac{\pi}{8} t + \frac{\pi}{4} x \right)$. Да се определи: а) периодот T , б) кружната фреквенција ω и в) брановата должина λ .

(Одговор: $T = 16 \text{ s}$, $\omega = \frac{\pi \text{ rad}}{8 \text{ s}}$)

3. 4. СУПЕРПОЗИЦИЈА НА БРАНОВИ. БРАНОВА ИНТЕРФЕРЕНЦИЈА

Суперпозиција на бранови

Ако со две стапчиња истовремено ја допреме површината на водата, од секој од нив ќе се создаде кружен бран кој ќе “поминува” низ другиот, како овој другиот воопшто да не постои (сл.1).



Сл. 1

Слично се простираат звучните бранови, радио брановите или светлинските бранови. Да се потсетиме дека ако два музички инструмента звучат, ние двата ги слушаме независно еден од друг. Значи, искуството и експериментите ни покажуваат дека брановите од различните извори се шират во просторот независно.

Бидејќи брановите не заемнодејствуваат тогаш секој дел од просторот, во кој се шират два или повеќе брана ќе земе учество во осцилирањата, предизвикани од секој од брановите одделно. За да се најде резултатната деформација, треба да се најде деформацијата предизвикана од секој од брановите, а потоа таа да се собере најчесто векторски бидејќи тие настануваат во различни правци и насоки, или скаларно (алгебарски) ако бранувањата се насочени во ист правец. Велиме дека во просторот дошло до **суперпозиција на бранови**.

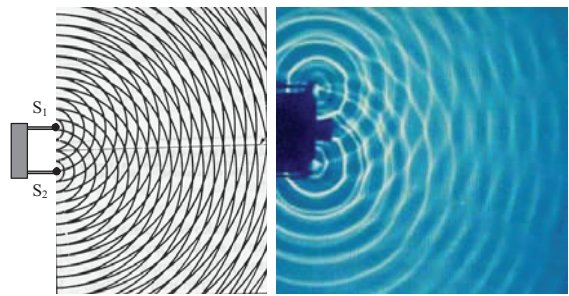
Треба да се напомене дека овој принцип важи само за бранови со мали интензитети.

Интерференција на бранови

Ако доаѓа до суперпозиција на два брана со еднаква фреквенција, кои имаат еднаква

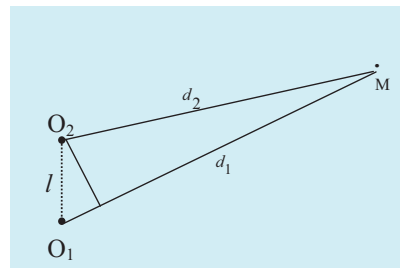
бранова должина, тогаш при суперпозиција на брановите може да настане една многу важна појава со која поопширо ќе се позанимаваме.

Да поставиме на ист држач две еднакви стапчиња и држачот да го поставиме врз направа која ќе предизвикува едновремени осцилации на двете стапчиња кои удираат врз површината на водата. Сме добиле два еднакви кружни брана со еднаква бранова должина кои се шират од изворите. Како резултат на сложувањето на ваквите два брана врз површината на водата ќе ја добиеме сликата дадена со цртежот и фотографијата од сл. 2. Како што се гледа не доаѓа до едноставно засилување на бранувањето на водата, туку сликата е значително посложена. На некои места бранувањето е многу засилено, додека постојат и места каде што водата мирува.



Сл. 2 . Цртеж и фотографија на бранови на вода

Појавата на сложувањето на две (или повеќе) бранувања при којашто се образуваат бранувања со временски постојана амплитуда во секоја точка од просторот во кој бранувањата се распространуваат, се вика **интерференција на бранови**.



Сл. 3. Двата извора се наоѓаат на растојание l еден од друг кое е многу помало од растојанијата d_1 и d_2

3. Механички бранови и звук

Ќе објасниме подетално во кои услови може да настане интерференција на брановите.

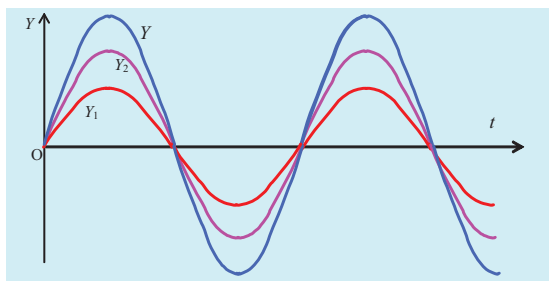
За таа цел ќе се послужи́ме со цртежот од сл. 3. Се прашуваме каква ќе биде амплитудата на бранувањето во точката М која од изворите O_1 и O_2 се наоѓа на соодветни растојанија d_1 и d_2 .

Резултатот на сложувањето на брановите во точката М ќе зависи од разликата во фазата која е предизвикана со разликата во патиштата Δd . Во услови кога растојанието меѓу изворите е многу помало од растојанијата до точката М, $\Delta d = d_2 - d_1$. Ако ова растојание е λ , или 2, 3, 4 пати поголемо од λ , тогаш во точката М во исто време се постигнува максимална или минимална амплитуда на бранувањето

$$\Delta d = k\lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

тогаш велиме дека *бранувањата се во фаза*. На тие места ќе биде исполнет условот за максимални амплитуде на бранување.

Амплитудата на осцилирањето во дадена точка ќе биде максимална, ако разликата на одот на зраците на двата брана кои го предизвикуваат осцилирањето во таа точка е еднаква на цел број пати по брановата должина. На сликата 4 е дадена зависноста на елонгациите Y_1 и Y_2 предизвикани од бранови за кои е исполнет условот (1), како и резултантната елонгација, која, како што се гледа е резултат на собирање на елонгациите Y_1 и Y_2 . Затоа, равенката (1) ја дава математичката формулација за **условот на максимум**.

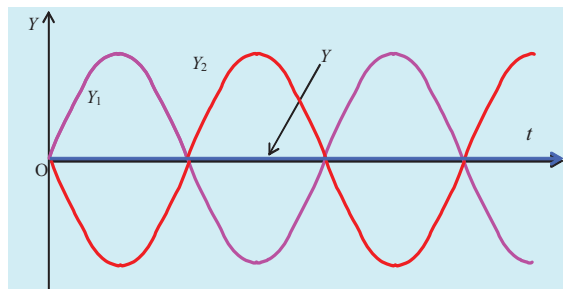


Сл. 4. Y_1 (црвена линија) и Y_2 (виолетова линија) се поместувањата (елонгациите) предизвикани од два брана помеѓу кои постои разлика $\Delta d = \lambda$. Тогаш не постои разлика во фазите и резултантното поместување Y (сина линија) е еднакво на збирот. Доаѓа до засилување на осцилирањето.

Ако растојанието помеѓу Y_1 и Y_2 е една $\lambda/2$, или непарен број $\lambda/2$, тогаш помеѓу елонгациите во кој и да било момент постои фазна разлика π . Осцилирањето во точките каде што е тоа исполнето е со елонгација 0, поточно, таму осцилирање нема (сл. 5). Тоа е **услов за минимум**:

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Амплитудата на осцилирањето во дадена точка ќе биде минимална, ако разликата на одот на зраците од двата брана кои ги возбудаат осцилациите во дадената точка е еднаква на непарен број половинки од брановата должина.



Сл. 5. Разликата на одот на зраците $\Delta d = \lambda/2$ или непарен број пати поголема. Резултантното поместување Y е нула. Осцилациите се противфазни

Се разбира постојат и точки во кои не е исполнет ниту условот (1) ниту условот(2). Таму амплитудата на резултантното осцилирање има некоја вредност која се наоѓа помеѓу овие две вредности. Но најважно е тоа, дека амплитудата на осцилирањето и во тие точки не се менува со времето. Затоа на површината на водата се појавува одредена распределба на амплитудата на осцилирање, која се вика **интерференциона слика** (слика2а)

Интерференција како појава се јавува кај сите видови бранови: механичките, звучните, радиобрановите или светлинските.

3.5. ХАЈГЕНС-ФРЕНЕЛОВ ПРИНЦИП

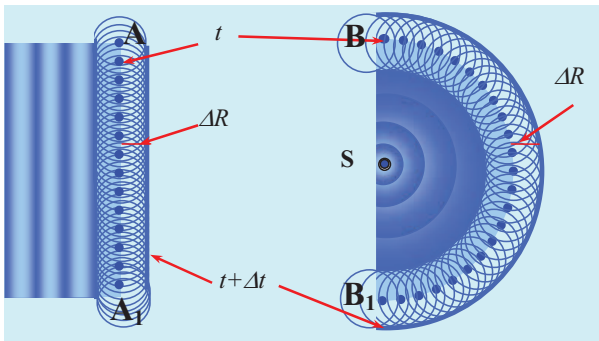
Хајгенсов принцип

Низа појави поврзани со ширењето на брановите, нивната рефлексија, прекршувањето и сл. може едноставно да се објаснат ако се познава брановиот фронт.

Во 1690 година холандскиот физичар Хајнрих Хајгенс предложил еден едноставен начин како да се определи брановиот фронт во моментот $(t+\Delta t)$ ако ни е позната положбата на фронтот во моментот t .

Хајгенс претпоставил дека секоја точка од брановиот фронт во моментот t претставува **секундарен извор** на елементарен сферен бран. Брановиот фронт во моментот $(t+\Delta t)$ ќе биде заедничката анVELOпа на овие секундарни бранови.

Ќе ја илустрираме Хајгенсовата идеја преку ширење на бранот во хомогена средина.



Сл. 1 Проекција на рамен и сферен бран во рамнина (рамнината на изворот на сферниот бран)

На сликата 1 лево е даден бранов фронт на рамен бран AA_1 . Во моментот t , тој претставува рамнина. Секоја точка од таа рамнина е извор на елементарен сферен бран, а заедничката анVELOпа на овие бранови повторно е рамнина.

Тоа значи брановиот фронт во моментот $(t+\Delta t)$ се добива на растојание ΔR :

$$\Delta R = v\Delta t \quad (1)$$

На истата слика десно е прикажано ширење на сферен бран во рамнината на изворот S .

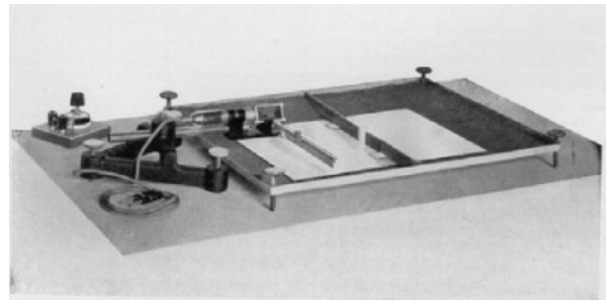
Таму брановиот фронт во моментот t е сфера BB_1 , а како секоја негова точка претставува извор на елементарен сферен бран, нивната заедничка анVELOпа повторно е сфера -бранов фронт во моментот $(t+\Delta t)$.

Секундарните извори се кохерентни

Хајгенс е голем поборник за брановата природа на светлината, но неговата идеја не била општо прифатена сè до појавата на францускиот физичар Френел кој Хајгенсовиот принцип го надополнува и дообјаснува. Имено, Френел тврди, што со низа експерименти е и потврдено, дека секундарните елементарни бранови кои лежат на брановиот фронт се кохерентни. Затоа брановиот фронт во било која точка во моментот по извесно време Δt се добива како резултат на интерференција на секундарните бранови.

Според тоа, **Хајгенс-Френеловиот принцип** гласи:

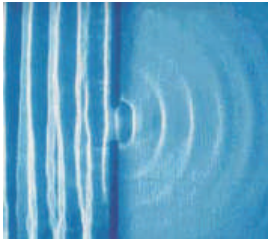
секоја точка во просторот до којашто допрело бранувањето (секоја точка на брановиот фронт) е извор на елементарен секундарен сферен бран, а интерференцијата на секундарните бранови го определува бранувањето во која и да било точка во која бранот стапува во следниот момент.



Сл. 2 Апаратура за бранови на вода

Со експеримент изведен на бранови на вода може да се потврди Хајгенс - Френеловиот принцип. Во плиток сад со вода, на едниот крај се монтира праволиниска прачка која со помош на моторче осцилира горе-долу, допирајќи ја површината на водата (сл. 2). Така на површината на водата се добива рамен бран, чии бранови фронтони овде се паралелни прави.

3. Механички бранови и звук

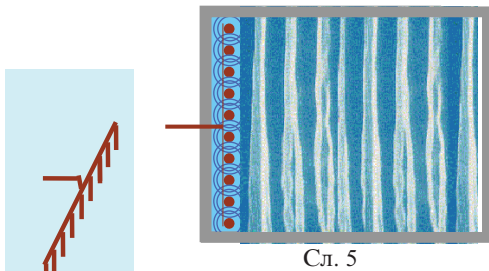


Сл. 3.

На патот на тој рамен бран, паралелно со брановиот фронт е поставена препрека со мал отвор. Се покажува дека тој мал дел (кој може да го сметаме за точка) станува извор на елементарен сферен (овде кружен) бран. Зад

препреката се шири кружен бран. На фотографијата од сл. 3 се гледа така добиениот сферен бран.

Вториот дел од Хајгенс-Френеловиот принцип ќе го покажеме повторно со помош на бранови на вода.



Сл. 5

Сл.4

Во истиот сад со вода се поставува да осцилира држач со повеќе стапчиња (види слика 4), така што тие да ја допираат истовремено водата. Секое стапче претставува извор на сферен бран, а бидејќи тие извори се кохерентни, нивните бранувања интерферираат. Како резултат на интерференцијата на извесно растојание се добива рамен (овде праволиниски) бран (сл.5).

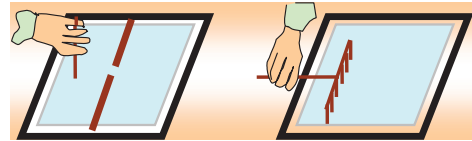
Објаснете ги следниве поими:

- секундарни бранови
- Хајгенс-Френелов принцип

Прашања, задачи и активности

1. Направете ваков експеримент во домашни услови. Во поширок плиток сад сипајте вода. За таа намена може да послужи и обично широко тавче. На рабовите од садот

поставете платно за да се одбегне, барем делумно, рефлексивата на брановите од ѕидовите на садот. Во средината на садот поставете две препреки (сл.6). На едната



Сл. 6.

Сл. 7

страна со кусо стапче допирајте ја водата ритмично. Што забележувате зад препреката? Нацртајте како изгледа бранот зад отворот на препреките.

2. Во истиот сад направете експеримент сличен на тој даден на сл.5 (сл.7). Ако ритмично ја движите раката ќе добиете рамен бран.

3. Што мислите, дали ако како извор што ритмично ја допира водата, употребите предмет со некаква закривена форма брановиот фронт зад препреката во опитот од сликата 6, ќе се промени?

Побарајте ги на интернет веб страните :
Huygens' principle



1. The Physics of Light: Huygens' Principle library.thinkquest.org/27356/p_huygens.htm - 14k -
2. Huygens' principle farside.ph.utexas.edu/~rfitzp/teaching/302/lectures/node135.html

и простудирајте го формирањето на брановиот фронт со помош на Хајгенс-Френеловиот принцип



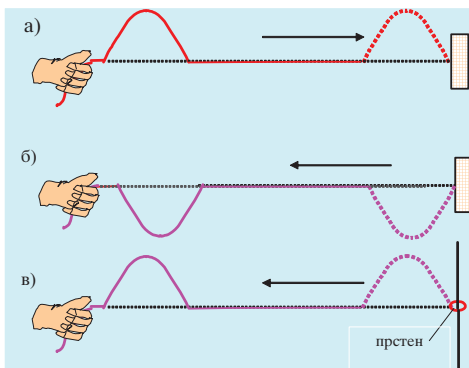
Christiaan Huygens (1629-1695) е виден холандски физичар и математичар, создавач на првата бранова теорија за светлината во 1690 год. Тој прв ја дал формулата за период на нишалото и конструирал часовник со нишало.

Неговите математички работи се однесуваат на конусните пресеци, циклоидата и теоријата на веројатноста. Со совршување на телескопот тој го открил сателитот на Сатурн Титан и покажал дека Сатурновиот прстен не ја допира неговата површина.

3.6. СТОЈНИ БРАНОВИ

Бранов пулс при рефлексija

Нека земеме гумено црево и нека со рака произведеме само еден бранов пулс (сл. 1). Крајот на цревето нека биде прицврстено за некој сид (средина со поголема густина) (сл.1а). Кога брановиот пулс ќе стаса до сидот, тој од него се рефлектира. При оваа рефлексija сидот дејствува врз гуменото црево, така што одбиениот пулс ќе ја промени насоката на деформацијата (сл.1б). Велиме: *при рефлексija на бран од погуста средина дошло до промена на фазата на бранот за $\varphi = \pi$.*



Сл.1. Рефлексija на бранов пулс: а) пулсот пристигнува до зацврстена средина; б) рефлектираниот пулсот од зацврстен крај се движи наназад, но при рефлексijата дошло до губење во фаза за π ; в) рефлексija на пулсот во случај на слободен крај на цревето- не се менува фазата на рефлектираниот бран.

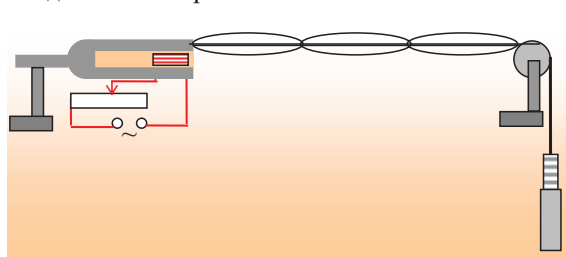
Како последица на оваа промена на фазата ако даден бран се рефлектира од погуста средина секоја точка од цревето е принудена да осцилира под влијание на двата брана: на упадниот и на рефлектираниот.

Овие два брана се кохерентни и тие интерферираат. Тие се спротивно насочени и фазно одместени.

Стоен бран на жица

Карактеристиките на добиената интерфе-

ренција при рефлексija од погуста средина можат убаво да бидат воочени ако се направи следниот експеримент.

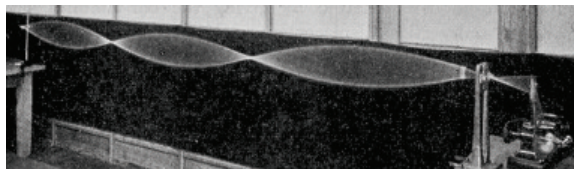


Сл.2.

На едниот крај на затегнат конец поставуваме звучна вилушка која присилено осцилира под влијание на електромагнет (сл.2). Другиот крај на конецот се префрла преку неподвижна макара и се затегнува со тег или динамометар. Фреквенцијата на вака добиената електромагнетна вилушка изнесува 100 Hz.

Бидејќи конецот од двете страни е цврсто поврзан тука настанува рефлексija на бранот и како резултат на интерференција на рефлектираниот и првобитниот бран се создава **стоен бран**. Стојниот бран има јасно изразени **мевови** -места каде што конецот осцилира со максимални амплитуди, и **јазли** – места каде што нема никакво осцилирање. *Местоположбата на мевовите и јазлите не се менува со текот на времето, тие не се движат долж конецот, затоа ваквите бранови ги викаме **стојни бранови**.*

Фотографија на вака добиените стојни бранови е дадена на сликата 3.



Сл. 3. Мевови и јазли кај осцилирање на жица

Експериментот покажува дека бројот на јазлите и мевовите зависи од фреквенцијата f на осцилирањето, но и од масата на конецот на единица должина μ како и од модулот на силата на затегнувањето F . Таа зависност е дадена со следнава равенка :

3. Механички бранови и звук

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (1)$$

Овде l претставува растојание помеѓу два јазла, или два мева. Ќе покажеме дека тоа растојание одговара на една половина од брановата должина, па оваа равенка може да се напише и во поинаква форма:

$$v = f\lambda = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (1a)$$

каде што v е брзината на ширењето на бранот. Оваа равенка ви е позната (види поглавје 1.2)

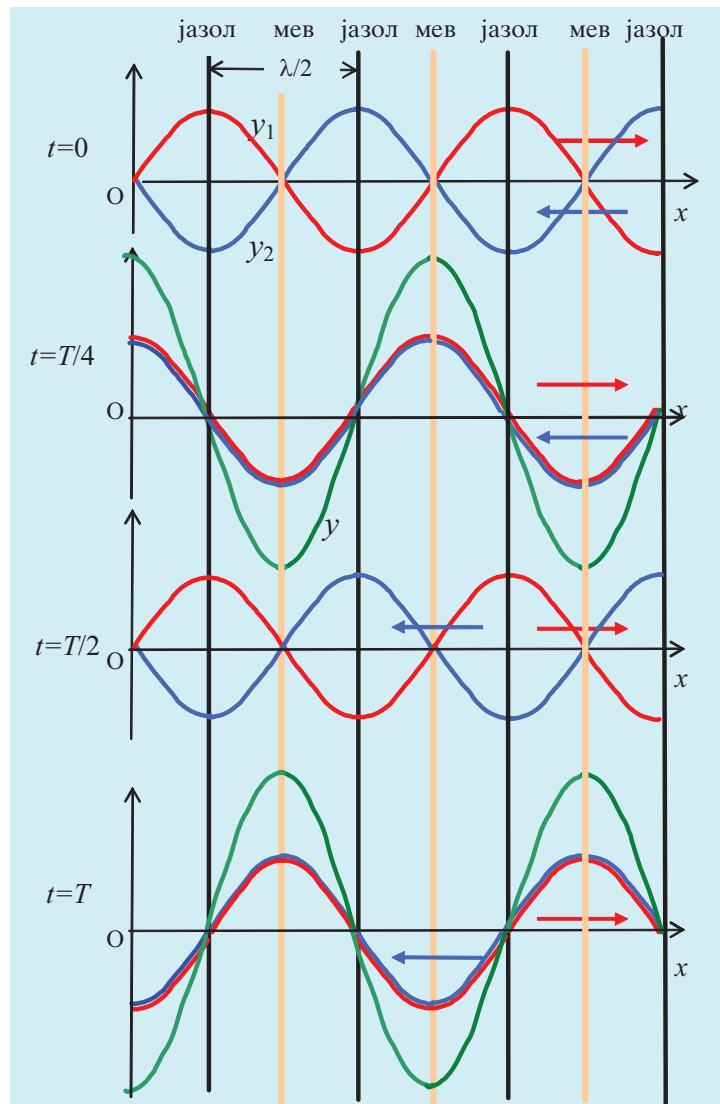
Својства на стојните бранови

Веќе видовме дека местоположбите на јазлите и мевовите не се менуваат во текот на времето. Тоа е така бидејќи разликата во фазите на осцилациите на местата на мевовите и јазлите (но и во која и да било друга точка) не се менува во текот на времето. Таа зависи само од местоположбата на точката на конечот.

За да го разбереме ова ќе се послужиме со сликата 4 на којашто се покажани елонгациите на упадниот (исцртан со црвена линија) и на рефлектираниот бран (исцртан со сина линија) во различни моменти на осцилирање. Тие два брана интерферираат и создаваат стоен бран (зелено означен).

Од сликата се гледа дека растојанието помеѓу два јазла, или два мева изнесува $\lambda/2$.

Од оваа слика исто така се гледа дека **сите точки помеѓу два јазла осцилираат во фаза**, тие истовремено добиваат максимални вредности во една или друга насока. Исто така **сите точки лево и десно од јазолот осцилираат со спротивни фази**. Велиме тие се фазно

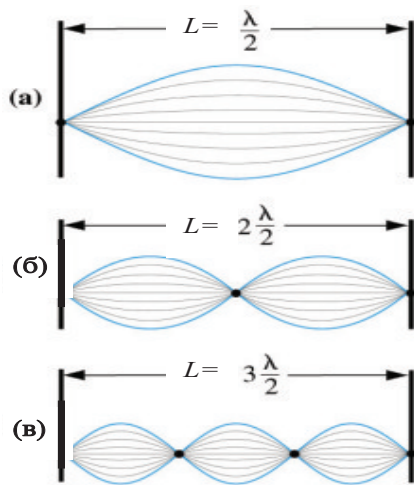


Сл. 4. Осцилирање на различни места на жицата во различно време. Се гледа дека на местата на јазлите упадниот и рефлектираниот бран се секогаш со спротивна фаза. Таму осцилирање нема. Мевовите се места со максимални амплитуди.

одместени за π .

Треба да се напомене дека стојните бранови во дадена жица не можат да се создадат при која било фреквенција, туку само при некои определени фреквенции.

3. Механички бранови и звук



Сл. 5

Ако го имаме случајот на осцилирање на жица која е од двете страни прицврстена, тогаш на двата краја задолжително ќе се создадат јазли, а помеѓу нив еден или неколку мева (сл. 5). Растојанието помеѓу два јазла е $\lambda/2$. Значи на должината на жицата L можат да се создадат само цел број половинки од брановата должина:

$$L = m\lambda/2 \text{ каде што } m = 1, 2, 3, \dots$$

Да ја изразиме брановата должина преку брзината v и фреквенцијата f : $\lambda = \frac{v}{f}$ ќе се добие:

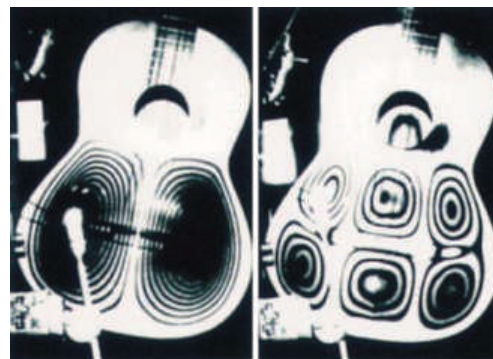
$$f = m \frac{v}{2L} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

Така ја добиваме релацијата за т.н. **сопствени фреквенции**, основната (за $m=1$) и повисоките фреквенции - **хармоници**.

Кај стојните бранови, за разлика од движечките, не доаѓа до пренос на енергијата. Двата брана што се движат во спротивни насоки носат еднакви износи на енергија, така што заедно со нивното движење доаѓа до пренос на енергија во спротивни насоки. Енергијата на осцилирањето на сите точки

помеѓу два јазла останува непроменета. Кај идеален стоен бран доаѓа само до претворба на кинетичка енергија во потенцијална и обратно.

Стојните бранови може да се создадат кај сите видови бранови: кај брановите на вода, кај звучните бранови, изворите на радиобрановите - антените и сл. Кај светлинските бранови како резултат на стојните бранови се добиваат т.н. **дебелослојни холограми** (тродимензионални слики на предмети кои може да бидат видени и со извори на обична бела светлина).



Сл. 6 Стојни бранови на дрвената кутија на гитарата.

Осцилациите на жиците кај жичените инструменти имаат форма на стојни бранови. При тоа покрај основната фреквенција чија што големина е определена со релацијата (1) при осцилирањето жицата произведува и фреквенции кои се цел број пати повисоки и кои се викаат **хармоници - обертонови**. Така вибрациите на даден инструмент не се синусоидални криви, туку обично многу сложени осцилаторни криви. Меѓутоа, се покажува дека тие криви можат да се претстават како резултат на сложување на осцилации кои имаат синусоидална форма.

Треба да се напомене дека кај добивањето на звучните бранови на инструментите важна улога има и резонантната кутија во која се создаваат **воздушни стојни бранови**, но и дрвената кутија во која што исто така се создава стоен бран (сл. 6)

3.7. РАВЕНКА НА СТОЕН БРАН

Ако во насоката на ширењето на бранот ја поставиме апсисната оска x а со y ги означиме елонгациите на бранот, тогаш упадниот (y_1) и рефлектираниот бран (y_2) може да се прикажат со следниве равенки:

$$y_1 = A \sin(\omega t - kx) \quad (3)$$

и
$$y_2 = A \sin(\omega t + kx + \varphi) \quad (4)$$

Ова се осцилациите на растојание x од изворот на осцилирањето чија што кружна фреквенција е $\omega=2\pi f$, а $k=2\pi/\lambda$ е брановиот број. Равенката (4) се однесува на рефлектираниот бран, чие што простирање е во спротивна насока па затоа пред x во равенката (3) треба да стои знакот “-“. Исто така, бидејќи станува збор за рефлексија тука доаѓа до создавање на додатна фазна разлика φ . Ако претпоставиме дека бранот се рефлектира од погуста средина, како што покажавме $\varphi = \pi$, па за равенката на резултатниот бран се добива како:

$$y = y_1 + y_2 = A \sin(\omega t - kx) + A \sin(\omega t + kx + \pi).$$

Ако се примени основната тригонометриска релација за збир на синуси од два агла :

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

за **равенка на стојниот бран** се добива:

$$y = 2A \cos\left(kx + \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = 2A \sin kx \cos \omega t \quad (5)$$

што може да биде запишано како:

$$y = B \cos \omega t$$

каде што $B = 2A \sin kx \quad (6)$

е амплитудата на стојниот бран. Како што се гледа таа зависи од координата x .

Местата на јазлите ги наоѓаме кога е $B=0$. Од равенката (6) тоа се местата за кои: $kx = m\pi$, каде што $m= 0,1,2,\dots$. Имајќи предвид дека $k=2\pi/\lambda$, за координатите на јазлите се добива:

$$x_{\text{jazol}} = m \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{4} \quad m = 0,1,2,\dots \quad (7)$$

Местата на мевовите се добиваат таму каде што $B = \pm 2A$; негативниот знак кај амплитудата означува дека при премин низ јазол фазата на стојниот бран се менува во противфаза. Па бидејќи, според (6)

$$\sin kx = \pm 1, \text{ следува } kx = (2m + 1) \frac{\pi}{2} \text{ односно:}$$

$$x_{\text{mev}} = (2m + 1) \frac{\lambda}{4} \quad m = 0,1,2,\dots \quad (8)$$

Од релациите (7) и (8) се гледа дека растојанието помеѓу два јазла или два мева изнесува точно $\lambda/2$.

Прашања, задачи и активности

1. Колкава треба да биде силата на затегнувањето на жица од двете страни прицврстена, ако таа е возбудена со електромагнетна вилушка (100 Hz) за да се добие само еден мев? Жицата е направена од материјал со густина 7 g/cm^3 , со напречен пресек од 1 mm^2 и должина од 1 m. (Одг : 280 N)

2. Колкава е брановата должина и брзината на ширењето на бранот во жицата од претходната задача? (Одг: $\lambda = 2 \text{ m}$; $v = 200 \text{ m/s}$)

3. Растојанието помеѓу јазлите на стоен бран создаден од звучна вилушка во воздух изнесува 40 cm. Колкава е фреквенцијата на вилушката ако се знае дека брзината на звукот е $v = 340 \text{ m/s}$? (Одговор : 425 Hz)

4. Дали сте забележиле како виолините ги штимуваат своите виолини? Објаснете!

5. Ако гитара се донесе во средина со друга температура, таа треба да се штимува, зошто?

**Побарајте на интернет веб страни :
Standing Waves**

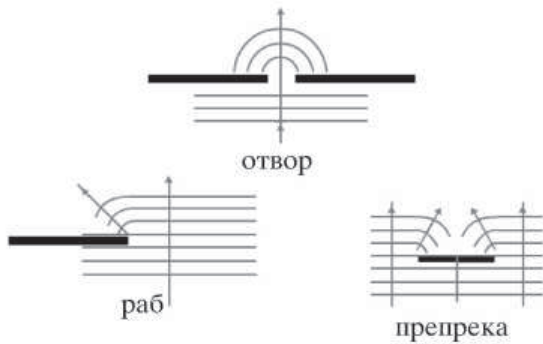
1. Formation of Standing Waves

www.glenbrook.k12.il.us/gbssci/phys/Class/waves/u10i4b.html и

www.cord.edu/dept/physics/p128/lecture99_35.html - 16k - 17 Mar 2003

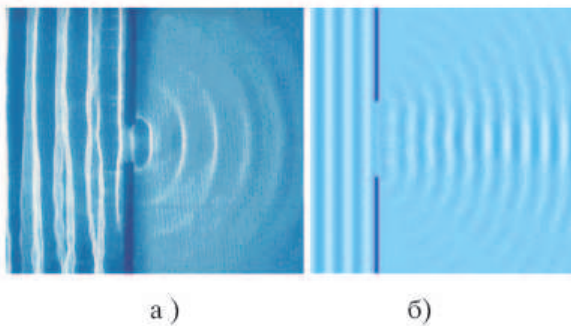
и набљудувајте ја симулацијата на стојните бранови.

3.8. ДИФРАКЦИЈА НА БРАНОВИ



Сл.1. Дифракција на рамен бран

Појавата дифракција настанува кога бранот поминува на граница на една препрека, некој отвор или објект. Ниту една особина не се менува при појавата дифракција освен правецот на ширењето на бранот (сл.1). Брановата должина, фреквенцијата, периодот и брзината се исти пред и по појавата дифракција. Тоа може да се потврди и експериментално.

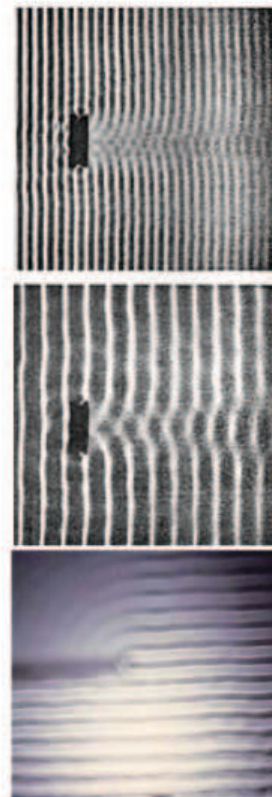


Сл. 2.

Со помош на праволиниска плочка и електро-мотор да предизвикаме создавање на рамни бранови на вода (како и на сл. 2) и на нивниот пат да поставиме препрека со отвор чишшто димензии ќе ги менуваме (слика 2). Ако е отворот со димензии помали или од ред на големина на брановата должина на упадниот бран, зад препреката ќе се добие кружен бран (сл 2а).

Но ако отворот на препреката го зголемиме (сл. 2б) ќе забележиме дека до искривување на брановиот фронт ќе дојде само на краевите на отворот, додека во најголемиот дел брановиот фронт ќе биде права линија.

И кај препреките се набљудува појава на свивање на брановиот фронт. Ако на патот на брановите на вода се постави мала препрека, чии димензии се споредливи со брановата должина на бранот, брановиот фронт ќе се деформира (сл.3 горе и на средина) но не многу, Ако е препреката со големи димензии, бранување зад препреката нема да има, а само на рабовите ќе дојде до искривување на брановиот фронт (сл. 3 долу).

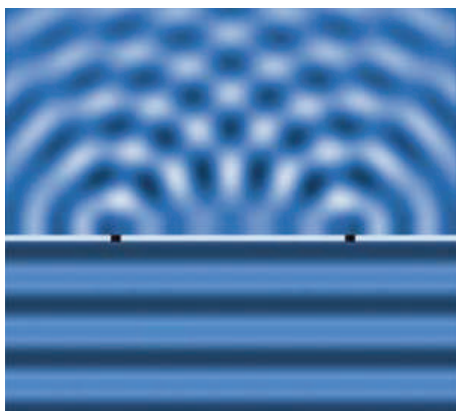


Сл. 3.

Појавата на искривување на брановиот фронт при премин низ отвори со мали димензии, споредливи со брановата должина

3. Механички бранови и звук

на бранот, или кај рабовите, се вика **дифракција на бранот**. Појавата дифракција на брановите се објаснува со Хајгенс–Френеловиот принцип. Секундарните бранови на тесниот отвор од сликата 2а, интерферираат, нивниот број е мал, така што резултатот на интерференцијата е создавање на бран сличен на сферен.



Сл. 4.

На сликата 4 е дадена фотографија на дифракција на два отвора поставени на патот на рамен бран во вода. Се гледа дека брановите зад отворите интерферираат, слично како што интерферираат два независни извора.

Дифракција на брановите зад препреките се јавува и кај звукот. Секој знае дека може да ја слушне музиката од радиото од соседната соба иако не го гледа радиото.

Дифракција на брановите, исто како и интерференцијата, е својствена за сите видови бранови. Но, *основен услов за да се набљудува овој феномен е дека отворот, или препреката на кој наидува бранот треба да бидат со големина споредлива, или помала од брановата должина на бранот што упаѓа.*

Прашања, задачи, активности

1. Што е дифракција на бранови?
2. При какви услови настанува дифракција на бранови?

3. Зошто може да се чуе музика од соседната просторија со отворена врата?

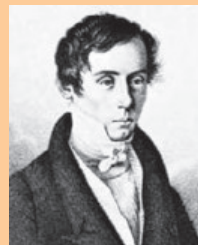
4. Направете ваков експеримент: во плиток сад сипете вода. На рабовите од садот поставете платнени ленти. Бранувањето ќе го предизвикате со ритмично движење на еден линијар. На патот на праволиниските бранови поставете препреки така што зад нив да се набљудува појавата дифракција на отвори. Експериментирајте така што ќе набљудувате појава на дифракција не една, две и повеќе отвори. Нацртајте ги добиените дифракциони слики и споредете ги со фотографиите од учебникот.

5. Со апаратурата од предходниот опит направете експеримент на дифракција на препреки, а не на отвори.

4. На веб страницата

<http://www.smeter.net/propagation/images/wave-diffraction-2.gif>

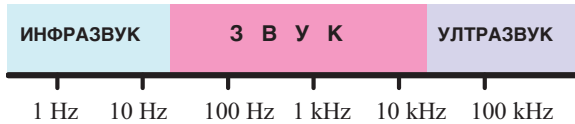
набљудувајте ја симулацијата на појавата дифракција на светлината и проучете ја.



О. Frenel (Augustin Fresnel - 1788-1827) е виден француски физичар. Френел ги поставил темелите на современата бранова оптика. Дополнувајќи го Хајгенсовиот принцип со идејата дека секундарните бранови интерферираат тој ја дал и математичката теорија за дифракција на светлината. И трансверзалноста на светлинските бранови прво била докажана од него. Френелови формули за амплитуда и фаза на рефлектирана и прекршена светлина не го изгубија своето значење и денес.

3.9. ЗВУЧНИ БРАНОВИ

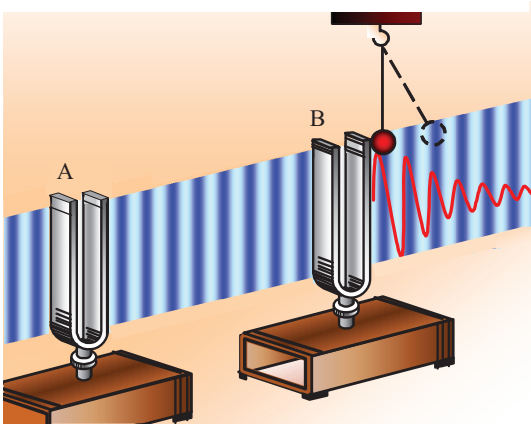
Звучното поле, односно создавањето, ширењето и начинот според кој се прима звукот се изучува во посебна област од физиката - **акустика**.



Звучните бранови се механички бранови со фреквенции од 16 до 20000 Hz. Физиолошката конструкција на увото кај човекот е таква што тоа не е способно да ги регистрира звуците со фреквенција $f < 16$ Hz т.е. **инфразвукот** и звуците со $f > 20000$ Hz - **ултразвукот**. Меѓутоа, постојат животни кои го слушаат ултразвукот и инфразвукот.

Во општ случај, секое тело кое е способно да осцилира во наведениот фреквентен интервал, може да биде извор на звук.

Постоењето на звучни бранови најлесно може да се утврди со нашето уво. Тоа е најлесно кога постои резонанција на звучните бранови. За таа цел направете го следниов опит:



Сл. 1.

Земете две звучни виљушки А и В кои осцилираат со еднакви фреквенции (сл.1). Нивните резонантни кутии поставете ги една спроти друга, а растојанието меѓу нив нека е околу половина метар. Мало топче поставете така што лесно да го допира едниот крај на виљушка В. Со гумено чеканче побудете ја (удрете ја) виљушката А.

Забележувате: топчето на нишалото почнува видно да отскокнува.

Иако виљушката В не сме ја побудиле, таа сепак почнува да осцилира. Звучните осцилации на виљушката А создаваат периодична промена на притисокот и густината на воздухот што стигнува до виљушката В и ја присилува да осцилира. Велиме, меѓу двете виљушки настапила **звучна резонанција**. Меѓутоа, ако на едниот крак на една од виљушките се додаде парче метал, со што ќе се промени фреквенцијата, условите за резонанција нема да се исполнети. Осцилациите на втората виљушка се слаби, па практично и не се слуша тон.

Овие осцилаторни промени на притисокот и густината во материјалната средина настануваат по правилата што важат за механичките бранови.

Во течностите и гасовите звукот се шири само како лонгитудинален бран. Во тврдите еластични средини звукот може да се шири и како лонгитудинален и како трансферзален бран. **Во вакуум не постојат услови за ширење на акустичките бранови.**

Основни карактеристики на звучните бранови

Звуците кои секојдневно ги слушаме се разновидни. Меѓу нив доволно јасно се разликуваат **музичките тонови** од **шумовите**.

По што се разликуваат музичките тонови од шумовите и што е тоа што ја предизвикува различноста што постои меѓу разните музички тонови?

Звукот што го произведува извор кој изведува хармониски осцилации се вика чист тон или само тон. Основни физички карактеристики на звучните бранови кои се регистрираат со органот за слух се: **висина, боја и ниво на гласност**

Висината на тонот е определена со фреквенцијата. Поттикнати на осцилирање виљушки со различни фреквенции, даваат различни по висина тонови. Колку фреквенцијата е поголема, поголема е и висината. На секој од тоновите од музичката скала одговара точно определена фреквенција. Така, на пример, тонот А (ла) има фреквенција од 440 Hz. Фреквенцијата на тонот што е за октава повисок, е двојно поголема од фреквенцијата на првиот и

3. Механички бранови и звук

изнесува 880 Hz. Акустичкиот опсег на тоновите според висината на тонот се делат на 10 интервали. Интервалот на висина на тоновите чиј основ на крајните фреквенции се двапати поголем се вика октава (прва:16:32; втора: 32:64 итн.).

Музичките инструменти или гласните жици создаваат сложени тонови кои може да се прикажат како збир од хармониски осцилации чии фреквенции се целобројни вредности од најниската фреквенција. Звукот на таа најниска фреквенција (најголема бранова должина) е познат како **основен** (прост) или **прв хармониски тон**, а сите останати се **повисоки хармониски тонови (обертони)**.

Бојата на тонот е специфична карактеристика според која се разликуваат изворите на тонови. Бојата на тонот зависи од видот и бројот на повисоките хармониски тонови.

Музичките тонови од различни инструменти не звучат еднакво, иако имаат исти висини. На пример, исти по висина тонови од виолина и клавир се разликуваат. Сопствените фреквенции на жиците зависат од повеќе фактори: масата, должината и силата на затегнување (види сопствена фреквенција).

Шумовите се резултат од многу сложени, непериодични осцилации и по амплитуда и по фреквенција. Шумовите не може да се разложат на прости хармониски компоненти.

Силниот и краткотраен шум е познат како **тресок**. Такви се, на пример, разни експлозии, кршење на стакло и др.

Интензитет и гласност на звукот

Покрај фреквенцијата, објективната јачина (интензитетот) е еден од параметрите со кои се карактеризира звукот.

Интензитет или **јачина** I на звучниот бран се дефинира на ист начин како интензитетот на секој бран. Тоа е енергијата E на звучниот бран што се пренесува во единица време t , низ единица плоштина S на површина поставена нормално на правецот на ширење на бранот, т.е.

$$I = \frac{E}{St} = \frac{P_{\text{ср}}}{S}, \quad (1)$$

каде што $P_{\text{ср}} = \frac{E}{t}$ е средната моќност. Интен-

зитетот I на звучниот бран се изразува со единицата:

$$\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{ s}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}.$$

Интензитетот на звукот како енергетска карактеристика е пропорционален со квадратот на амплитудата на притисокот што се создава.

Звукот чиј интензитет е земено дека е единица $I_{\text{max}} = 1 \text{ W/m}^2$ предизвикува болка во уво на човекот. На пример, таков звук слушаме од мотор на млазен авион на растојание од 5 m. Звукот со десет пати поголем интензитет (10 W/m^2) не го слушаме, имаме само осет за болка.

Максималниот интензитет на звукот што увото го регистрира со осет на болка се вика **граница на болка** или **горна граница на чујност**.

Минималната вредност на интензитетот на звучниот бран кој предизвикува осет за слух на дадена фреквенција е **праг на чујност**. Овој праг за различни фреквенции е различен. На пример, при фреквенција од $f=1000 \text{ Hz}$ изнесува $I_{\text{min}} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

При **субјективна** процена на интензитетот со органите за слух наместо интензитет се воведува **ниво на гласност на звукот** или само **гласност**. Така нивото на гласност L за произволен интензитет I се определува со равенката:

$$L = k \log \frac{I}{I_{\text{min}}}, \quad (2)$$

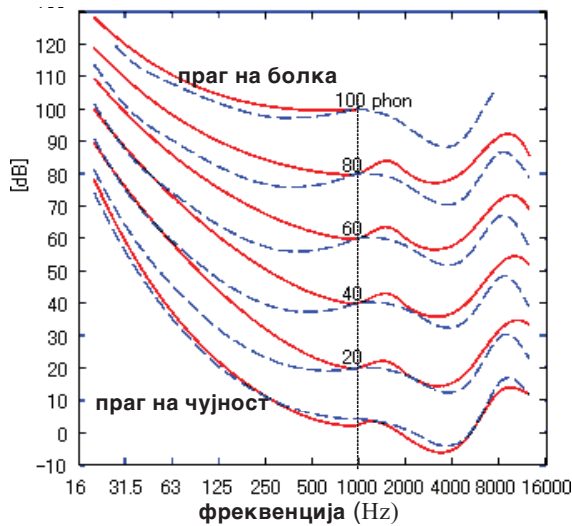
каде што k е константа; I е интензитет на звукот; $I_{\text{min}} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ е интензитетот на референтниот звук - праг на чујност за фреквенција $f=1000 \text{ Hz}$.

Кога ќе се земе $k=1$ нивото на гласност, се изразува со единицата бел (B), а кога $k=10$, ова ниво се изразува со десет пати помала единица - децибел (dB).

Во овие единици најтихиот звук, прагот на чујноста, има гласност 0 dB

За интензитет на звукот кој предизвикува осет на болка максималното ниво на гласност изнесува 120 dB.

3. Механички бранови и звук



Сл.2. Споредба на новите криви на еднаква гласност (ISO 226 од 2003 год.- полна линија) и Fletcher-Manson кривите (од 1923 год.-испрекината). Значајни разлики кај кривите постојат кај ниските фреквенции.

На сл. 2 се прикажани кривите на еднаква гласност кои покажуваат дека прагот на чујноста многу повеќе се менува со промена на фреквенцијата, а границата на болка послабо. Површината меѓу прагот на чујноста и границата на болката се вика *слушно поле*.

Од графикот на сл. 1 се гледа дека меѓу 2 и 4 kHz увото е најосетливо, додека при повисоките и пониските фреквенции осетливоста е помала. На пример, на 100 Hz прагот на чујност е околу 10^{-8} W/m^2 , што е 10^4 пати поголем интензитет од интензитетот за фреквенција од 1000 Hz.

Интензитетот на звукот и гласноста од разни предизвикувачи на бучавата се прикажани во табелата 1.

Сте се запрашале ли зошто сидовите во оперската сала се обложени со ткаенина, или каков е просторот над кој е поставена бината? Ако апсорпцијата на звукот не е голема рефлексивната на звукот во затворени простории може да биде повеќекратна. Таа појава се вика **реверберација**. Затоа при конструкција на концертни сали, театри, аудиториуми и др. треба да бидат исполнети условите за добивање оптимално време за реверберација – послезвучие.

Табела 1. Споредба на субјективни и објективни единици за звук

ИЗВОРИ НА ЗВУК	L (dB)	I (Wm^{-2})
праг на чујност (раст. 1 m)	0	10^{-12}
шепотење (растојание 1 m)	20	10^{-10}
обичен разговор	40	10^{-8}
просечно прометна улица	60	10^{-6}
гласно зборување, сообраќај	70	10^{-5}
прометна улица,	90	10^{-3}
автомобилска сирена	100	10^{-2}
млазен авион (раст. 10 m)	120	1

Брзината на звукот зависи како од својствата на средината низ која поминува така и од температурата.

И за звучните бранови важат формулите за брзина на трансверзални и лонгитудинални бранови.

Брзината на звукот при ширење во гасовита средина се зголемува со зголемување на температурата. Брзината на звукот во воздух на 0°C е 331,5 m/s, во вода на 20°C е 1493,2 m/s, а во гранит е 6000 m/s.

ПРИМЕР 1. Да се определи брзината на звукот низ алуминиумот ако Јунговиот модул на еластичност е $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$, а густината $\rho = 2.7 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$.

Решение. Брзината на звукот може да се определи од равенката: $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$,

таа изнесува: $v = \sqrt{\frac{7,0 \cdot 10^{10}}{2,7 \cdot 10^3}} \approx 5,1 \text{ km/s}$.

3.10. ЗАКОНИ ПРИ ПОМИНУВАЊЕ НА ЗВУКОТ НИЗ ДВЕ СРЕДИНИ

Кога звучните бранови наидат на граница од две средини или на препрека за нив како и за механичките бранови важат законите за рефлексивна, прекршување, дифракција, интерференција.

3. Механички бранови и звук

Кога рамен бран паѓа нормално на граничната рамнина на две средини, дел од бранот пминува во втората средина, а дел се рефлектира.

При простирањето на звучен бран, освен постојаниот притисок p_0 , што владее во средината во отсуство на звучен бран, настанува еден **дополнителен периодичен акустички притисок** зададен со:

$$\Delta \tilde{p} = A \omega \rho v \sin 2\pi f(t-x/v), \quad (1)$$

каде што со $p_{\max} = A\omega\rho v = A\omega R_a$ е амплитудата на акустичкиот притисок што зависи од карактеристиките на бранот (A -амплитуда, ω -кружна фреквенција) и од својствата на материјалната средина изразени преку **акустичкиот отпор-импеданс** на средината $R_a = \rho v$ (ρ -густина на средината и v -брзина на звукот).

Интензитетот I на звучниот бран, како енергетска карактеристика е пропорционален со квадратот на амплитудата на акустичкиот притисок и обратно пропорционален со акустичкиот отпор на средината. За рамен лонгитудинален бран, имајќи ја предвид дефиницијата за интензитет на звучниот бран се добива:

$$I = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho v = \frac{p_{\max}^2}{2\rho v}. \quad (2)$$

Значи, мерејќи ја амплитудата на акустичкиот притисок, лесно се определува интензитетот на звукот.

$$\frac{p_{1r}}{p_{1u}} = \frac{R-1}{R+1}, \quad \frac{p_{2u}}{p_{1u}} = \frac{2R}{R+1}$$

кадешто $R = \frac{\rho_2 v_2}{\rho_1 v_1}$ коефициент кој ги

карактеризира средините.

За средини за кои $R=1$, т.е. бранот ја поминува граничната средина без рефлексија и за $R \ll 1$ има целосна редлекција. За интензитетот на упадниот, рефлектираниот и трансмитираниот звучен бран имајќи ја предвид равенката (2) важи:

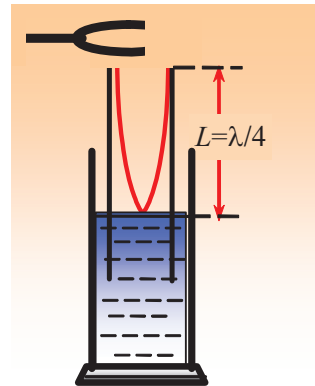
$$\frac{I_{1r}}{I_{1u}} = \left(\frac{R-1}{R+1} \right)^2, \quad \frac{I_{2u}}{I_{1u}} = \frac{4R}{(R+1)^2}$$

Кога звучниот бран поминува низ широка плоча паѓајќи нормално на неа преносот на енергија зависи од карактеристиките на средината и дебелината на плочата. Најголем пренос на енергија има кога дебелината на плочата е повеќекратен број од половинки брановата должина на звукот во плочата ($\lambda/2$) Во тој случај не значе не секогаш двапати подебела плоч е двапати подобар изолатор на звукот и бучавата.

3.11. ЗВУЧНА РЕЗОНАНЦИЈА

Звучните извори, како механички осцилатори, може да вршат присилени осцилации и да се доведат во состојба на резонанција.

Резонанција кај звучен извор, освен примерот прикажан со звучна виљушка поставена на резонантна кутија, може да се покаже со опитот прикажан на сл.1. Во поширок сад со вода е потопена стаклена цевка која е отворена на двата краја (тоа може да се направи и со една поголема мензура или цевка од стара неонка во која полека додавате вода).



Сл. 1. Експеримент за звучна резонанција.

Кога над отворот на цевката ќе се донесе звучната виљушка што осцилира, воздушниот столб во цевката ќе изведува присилени осцилации. Менувајќи ја должината на воздушниот столб (со издигање и спуштање на цевката) за одредена висина, звукот се слуша посилено. Звучна резонанција настанува кога воздушниот столб во цевката осцилира со сопствена фреквенција што се совпаѓа со

3. Механички бранови и звук

Фреквенција на звучната виљушка, или кога едната фреквенција е цел број пати поголема од другата. Во цевката се создава стоен бран (таква е и резонантната кутија на која е поставена звучната виљушка).

Сопствената фреквенција на воздушниот столб зависи од неговата должина L :

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{(2n+1)}{4L} v; \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

каде што n е кој И да било цел број, v е брзината на звукот во воздух. На сликата 1 е при должина на воздушниот столб $L=\lambda/4$. Освен тоа, резонанција може да настане за кој и да било непарен број четвртинки бранови должини на стојниот бран формиран во воздушниот столб затворен од едниот крај, т.е. ако должината е

$$L = (2n+1) \frac{\lambda}{4}.$$

Звучната резонанција се користи кај дувачките инструменти. Некои инструменти (гитара, виолина) за да дадат поголем интензитет користат тела со кои може да се предизвика резонанција. Таквите тела се *резонатори*. На пример, звучната виљушка е поставена на резонантна кутија.

Појавата резонанција се користи за мерење на брзината на звучните бранови. Обидете се да ја определите брзината на звукот според експериментот како на сл.1.

ПРИМЕР 1. Звучна виљушка со фреквенција $f=735$ Hz е поставена над воздушен столб затворен од едниот крај. Најсилен звук најпрво ќе чуete кога воздушниот столб има должина: а) 11,3 cm, а потоа и б) 33,5 cm. Да се определи брзината на звукот во воздух.

Решение. Имајќи ја предвид равенката:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{(2n+1)}{4L} v,$$

за брзината се добива

$$v = \frac{4Lf}{(2n+1)} \quad n=0,1,2,3,\dots$$

а) Со замена на бројните вредности во оваа ра-

венка при $n=0$, за воздушен столб чија должина е $L=11,3$ cm за брзината се добива:

$$v = 4Lf; \quad \text{односно } v_1 = 332 \text{ m/s}$$

б) За воздушен столб чија должина е $L=33,5$ cm, треба $n=1$, брзината сега изнесува:

$$v = \frac{4Lf}{3}; \quad \text{односно } v_2 = 328 \text{ m/s}.$$

Брзината на звукот ќе ја добиеме како средна вредност од v_1 и v_2 .

Прашања, задачи и активности

1. Автомобилска сирена дава звук со интензитет 10^{-3} W/m^2 или гласност од 90 dB; десет такви сирени даваат интензитет 10^{-2} W/m^2 или гласност од 100 dB; две сирени пак 93 dB. Зошто?

2. Метална цевка со должина 931 m по должината е удрена со чекан. На другиот крај во временска разлика од $t=2,5$ s ќе чуete два пати звук. Објасните на што се должи појавата. Да се определи брзината на звукот во металот, ако брзината на звукот во воздух е 340 m/s.

(Одговор: 3900 m/s)

3.12. АКУСТИЧКИ МЕТОДИ.

Аускултација и перкусија



Сл. 1. Стетоскопи.

Со звукот може да се добијат значајни информации и за состојбата на внатрешноста на телата. Звучниот метод, познат како **аускултација** (прослушување на звуците), е едн од најстарите акустички методи за дијагностика.

Бинауралниот стетоскоп (сл.2) се состои од резонантна капсула покриена со еластична мембрана (1) која се поставува на телото кое

3. Механички бранови и звук

се проучув, а од неа водат гумени цевки (2) кон двете уши. Мембраната е звучен детектор. Во празната капсула (ако нејзината големина е непарен број од $\lambda/4$) настанува резонанција на воздушниот столб, при што звукот се засилува и се подобрува аускултацијата (слушањето).



Сл. 2. Бинаурален стетоскоп (за двете уши).

Аускултацијата не се користи само во медицината таа наоѓа примена и во други гранки на техниката и животот.

При аускултацијата се слуша промената на тонот и според нив се суди за разни состојби. За едновремено слушање од повеќемина и за траен запис се користи систем во кој влегуваат: микрофон, засилувач, звучник, стем со фреквентни филтри и направа за регистрање на звукот.

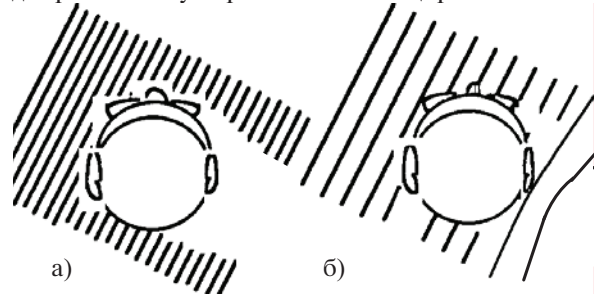
Принципиелно различен метод од претходниот е *перкусијата*. При овој метод субјективно се анализираат звуци од одредени делови на телото при нивно потчукнување со прст или меко чеканче.

Имено, шематски секое тело може да се прикаже како севкупност од волумени исполнети со гас, со течност или тврди супстанции. При удар по површината на телото се создаваат осцилации, со фреквенции кои имаат широк дијапазон. Притоа некои осцилации се гасат многу брзо, други, кои се совпаѓаат со сопствените осцилации на некоја празнина, се засилуваат и како резултат на резонанција се слушаат. Искусниот стручњак по тонот на перкусијата ја определува состојбата и топографијата на дадено тело.

3.13. ЛОКАЦИЈА НА ЗВУЧНИОТ ИЗВОР. БИНАУРАЛЕН ЕФЕКТ

Испитувањата покажуваат дека човекот, речиси, без грешка може да определи дали звукот му доаѓа од левата или од десната страна.

Меѓутоа, можни се грешки при определувањето на локација звучниот извор кога тој е пред него или зад него. Додека лоцирањето на звучниот извор во хоризонталната рамнина е по добро отколку вертикалното лоцирање.



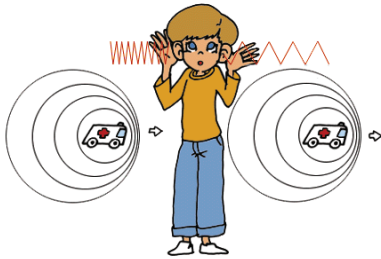
Сл. 1.

Објаснувањето на овие појави е различно за високите и ниските фреквенции. Човечката глава може да се земе дека е приближно сферна чиј дијаметар е $0,18\text{ m}$, на оваа должина во воздух одговара звучен бран со фреквенција од $1,8\text{ kHz}$. Според тоа, кога звучните бранови ќе најдат на главата како препрека, ако имаат бранова должина $\lambda \ll 0,18\text{ m}$ на спротивната страна оставаат звучна сенка без или со мало звучно поле, како што е прикажано на сл. 1а. Притоа едното уво го слуша звукот, а другото не. Оваа разлика во интензитетите придонесува положбата на звучниот извор лесно да се определи.

Од друга страна, кога $\lambda \gg 0,18\text{ m}$ ($f \ll 1,8\text{ kHz}$) доаѓа до дифракција на брановите, па тие се шират и во геометриската сенка, заобиколувајќи ја главата како препрека. Тоа е прикажано на сл. 1б. Бидејќи поминатиот пат од изворот до едното и до другото уво е различен, брановите не се во фаза, па во даден момент притисокот во едното уво е поголем отколку во другото уво. Нервните импулси кои доаѓаат од едното и од другото уво, притоа, содржат информација за различните притисоци кои мозокот ги користи за лоцирање на звучниот извор.

Значи може да се каже дека за фреквенции под 1 kHz , положбата на звучниот извор се определува врз основа на разликата во фазите на звуците кои достигнуваат до двете уши, а над 5 kHz - врз основа на разликите во интензитетите. Помеѓу 1 kHz и 5 kHz локацијата се одвива и на двата начина, меѓутоа способноста за локација на изворот е намалена.

3.14. ДОПЛЕРОВ ЕФЕКТ. Пробивање на звучната бариера



Сигурно сте забележале, кога чамец се движи наспроти разбранувана вода, фреквенцијата со која брановите удираат на чамецот ќе биде поголема отколку кога чамецот мирува или се движи во насока на простирање на бранот. Или, кога звучниот извор се движи кон набљудувачот, а околината мирува, набљудувачот слуша поголема висина на тонот од таа што ја дава изворот. Во спротивен случај, кога звучниот извор се оддалечува, набљудувачот слуша помала висина на тонот. Овој ефект се забележува кога автомобил или локомотива кои даваат звучни сигнали поминуваат брзо покрај набљудувачот.

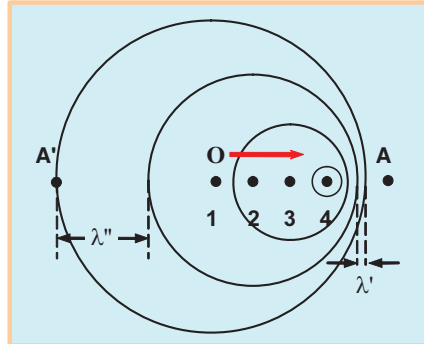
Доплеров ефект е промена на фреквенцијата на звукот при релативно движење на изворот во однос на приемникот.

Доплеровиот ефект е појава карактеристична за сите бранови движења - бранови на водата, звучни и ултразвучни бранови, а исто така и при простирање на светлински, радиобранови и други електромагнетни бранови.

За да го објасниме овој ефект ќе претпоставиме дека звучниот извор O (сл.1) се движи со брзина v кон набљудувачот кој стои во точката A , а точките 1, 2, 3, 4 ... ја покажуваат положбата на звучниот извор O за еднакви временски интервали.

Кога звучниот извор е во положбата 1, од него тргнува сферен бран и во даден момент во вид на сфера, чиј центар е точката 1, се проширил до точката A . Нешто подоцна, кога звучниот извор е во точката 2, тргнува друг бран кој до дадениот момент се проширил до A со помалата сфера чиј центар е точката 2. Потоа иде бранот од точката 3 итн. Притоа во

насоката OA брановата должина λ' на звучниот бран ќе биде помала од брановата должина λ на бранот кога звучниот извор не би се движел. Обратно, во насоката OA' брановата должина λ'' ќе биде поголема од λ' .



Сл. 1.

Притоа треба да се потсетиме дека брановата должина λ и фреквенцијата f се поврзани со равенката $f = v_z \lambda$, каде што v_z е брзината на звукот.

Ако со v се означи брзината со која се движи звучниот извор кој има фреквенција f , а со v_z брзината на звукот, фреквенцијата што притоа ќе се регистрира е:

$$f' = \frac{v_z}{v_z \mp v} f \quad (2)$$

Знакот "-" се однесува на состојбата кога звучниот извор се приближува, притоа приемникот ќе регистрира (набљудувачот слуша) звук со поголема фреквенција од фреквенцијата f што ја дава звучниот извор. Знакот "+" важи ако звучниот извор се оддалечува со брзина v и притоа се регистрира звук со помала фреквенција.

Во случај кога набљудувачот се движи со брзина v , а звучниот извор мирува, фреквенцијата што се регистрира е:

$$f' = \frac{v_z \pm v}{v_z} f \quad (2)$$

знакот "+" важи кога приемникот на звук (набљудувачот) се приближува кон изворот, а "-" кога приемникот се оддалечува.

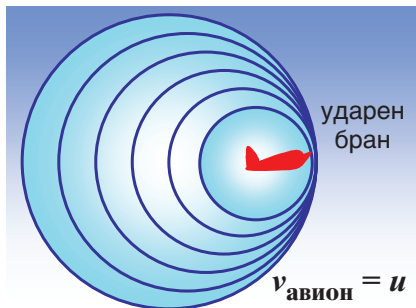
Исто така, кога брановите се одбиваат од подвижна препрека фреквенцијата на рефлектираниот бран, поради Доплеровиот ефект, се променува и се разликува од фреквенцијата

3. Механички бранови и звук

на упадниот бран. Кога упадниот и рефлектираниот бран ќе се доведат до интерференција, поради малата разлика во фреквенциите, се создава биене или звучни удари. Оваа појава може да се искористи за определување на брзината на подвижни препреки. Доплеровиот ефект е карактеристичен за сите видови бранови. На пример, ултразвучните бранови рефлектирани од крвните телца даваат информации за брзината на крвта во крвните садови, се регистрираат промени при дишењето.

Во астрономијата ефектот се искористи при определување на брзината на движење на некоја звезда или галаксија во однос на Земјата. Светлината што доаѓа од звезда која се оддалечува од Земјата има фреквенција пониска од светлината емитувана од атомите на истиот елемент кога тие мируваат. Се вели спектралните линии на светлината од таа звезда се поместени кон црвеното.

На принципот на Доплеров ефект полициските радар при контрола на сообраќајот ја определуваат брзината на возилата.

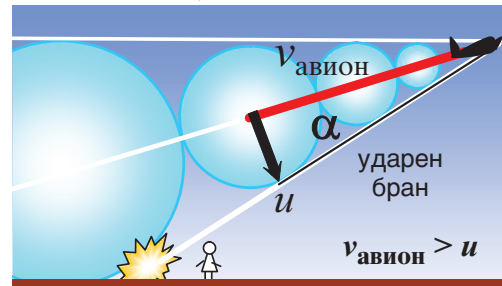


Сл. 3.

Специјален случај на доплеров ефект е "пробивањето на звучната бариера". За објаснување на овој ефект неопходно е да се претпостави дека од секоја точка, низ која поминува изворот на звук, се простира елементарен бран. Кога изворот на звук (на пример авионот) се движи со брзина еднаква на брзината на ширење на звукот, звучните бранови се трупаат пред него создавајќи рамен бран, кој се простира во насока нормална на движењето на изворот (сл.3).

Ако брзината на авионот v стане поголема од таа на звучните бранови u ($v > u$), пред челото на авионот тој бран секогаш е точкест. Зад

авионот радиусите на фронтот на елементарните бранови растат со брзината на звукот u . Фронтот на тие бранови е во вид на конус (сл.4). Односно, зад изворот се создава ударен бран во вид на конус.



Сл. 4.

Тој се простира кон површината на Земјата со брзината на авионот v . Ако авионот лета ниско, во моментот кога фронтот на бранот ќе ја достигне површината на Земјата, се слуша тресок познат како "пробивање на звучната бариера".

Аголот меѓу фронтот на бранот и оската на конусот (α) е познат како **агол на Мах** $\sin \alpha = u/v$. При ударните бранови се јавува дополнителен притисок од кој може да се скршат и прозорците на зградите. Ударниот бран се зголемува со зголемувањето на бројот на Мах, кој е зададен со $M = v/u$. Ако $M=1$ значи авионот се движи со брзина 330 ms^{-1} ; $M=2$ брзината на авионот е двапати поголема од брзината на звукот.

Прашња и задачи

1. На магистрален пат стои набљудувач. Автомобил, кој се движи со брзина 20 m/s , иде кон набљудувачот и го одминува со притисната сирена чија фреквенција е 540 Hz . Колкава фреквенција регистрира набљудувачот при приближување и при оддалечување на автомобилот? (Одговор: 574 Hz , 510 Hz)

2. Колкава брзина може да достигне суперсоничен авион за кој $M=6,15$? (2030 m/s)

Информации и симулации за Доплеровиот ефект побарајте на:

www.scholobservaory.org.uk/internal/doppler.htm

<http://webphysics.davidson.edu/Applets/Examples>

From_Others/doppler.html

4.1. ЕЛЕКТРИЧНО ПОЛЕ. ЕЛЕКТРИЧНИ СИЛОВИ ЛИНИИ

Јачина на електричното поле

Електричните сили се јавуваат помеѓу телата кои се во контакт едни со други, но исто така и помеѓу телата кои не се во контакт. Веќе ни е познато дека меѓу телата со маса така дејствуваат и гравитационите сили. Велиме дека околу тело со одредена маса се појавува гравитационо поле. Слично, во просторот околу било кое наелектризирано тело се создава **електрично поле**. Наелектризираното тело го викаме **извор на електричното поле**. Ако полнежите мируваат, велиме дека тие се извор на **електростатичко поле**. Засега ние ќе се задржиме токму на таквите полиња.

Со експериментите се покажува дека ако во близина на некој извор на електрично поле се донесе друго тело со полнеж $Q_{\text{пр}}$, изворот на полето ќе дејствува на внесеното тело со некоја сила. Се покажува дека силата со која што изворот дејствува врз внесениот полнеж зависи од тоа каде се наоѓа внесениот полнеж, каков е изворот на полето, но и од тоа колкава е големината на внесениот полнеж. За да се воведат физичка величина која ќе го опишува тоа поле во дадена точка, силата со која полето дејствува врз внесениот пробен полнеж се пишува:

$$\vec{F} = Q_{\text{пр}} \vec{E} \quad (1)$$

Во ова равенство ја воведовме векторската физичка величина \vec{E} - **јачина на електричното поле** (која често, пократко се вика “**електрично поле**”). Оваа величина не зависи од тоа колкав е пробниот полнеж $Q_{\text{пр}}$. Јачината на електричното поле зависи само од изворот на полето (колкав му е полнежот како и од тоа каква му е распределбата) и од местоположбата на точката во која нè интересира полето. Во различни точки јачината на електричното поле е различна. Ако формулата (1) ја запишеме во следнава форма:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_{\text{пр}}} \quad (2)$$

може да се даде следнава дефиниција на оваа физичка величина:

Јачината на електричното поле во дадена точка од полето е определена со силата со која полето дејствува врз позитивен единичен полнеж донесен во таа точка.

Напомнуваме дека насоката на векторот \vec{E} , како сила која дејствува врз позитивен полнеж е работа на конвенција. Одбран е позитивен, а не негативен полнеж од историски причини. Исто така, полнежот треба да биде мал и со мали димензии за неговото влијание да не го промени полето што постоело пред да биде тука донесен пробниот полнеж.

Од равенката (2) може да се воведат единиците за мерење на јачината на електричното поле. Ако електричното поле дејствува со сила од еден њутн (1 N) на точкест полнеж од еден позитивен кулон (+1C) поставен во дадена точка, тогаш во таа точка би постоело поле со големина еден **џутн на кулон** (1 N/C). Напомнуваме дека во SI оваа единица почесто се исказува како **волт на метар** (V/m),

Апроксимативни вредности на некои електрични полиња

Извор на полето и место	Големина на E во N/C
близу наелектризирана ебонитна прачка	$1 \cdot 10^3$
во телевизиска катодна цевка	$1 \cdot 10^5$
поле кое создава искра во воздухот при нормални услови	$3 \cdot 10^6$
во електронската орбита на водороден атом	$5 \cdot 10^{11}$

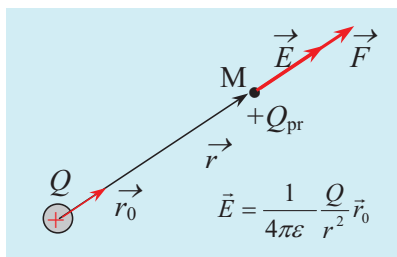
Силата со која си заемнодејствуваат два точкести полнежа е определена со Кулоновиот закон. Ако изворот на полето Q_1 го означиме со Q , а полнежот Q_2 го сметаме за пробен полнеж $Q_{\text{пр}}$, Кулоновиот закон може да се запише како:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_{\text{пр}}}{r^2} \vec{r}_0$$

па за **јачината на полето создадено од точкест полнеж** се добива

4. Електрично поле

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_{\text{пр}}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \vec{r}_0 \quad (3)$$

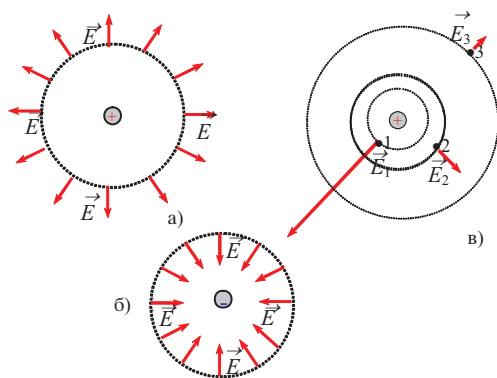


Сл.1 Електричното поле \vec{E} на позитивен точкест полнеж во која било точка М секогаш е насочено во насока на радиусвекторот \vec{r} исто како и силата \vec{F} со кое полнежот Q дејствува на пробниот полнеж $Q_{\text{пр}}$.

На сликата 1 се дадени употребените ознаки во релациите (3) за полето во точката М.

За сите точки со еднакво растојание, јачината на електричното поле има иста големина и е насочена радијално исто како и силата, Затоа тоа е **радијално поле**.

Насоката на јачината на полето е од изворот на полето, ако изворот е позитивен, а кон изворот, ако неговиот полнеж е негативен (сл. 2а и 2б)



Сл.2.а) Електрично поле на позитивен точкест полнеж на места со еднакво растојание б) Електрично поле на негативен точкест полнеж на места со еднакво растојание в) Електрично поле на позитивен точкест полнеж на места со различно растојание

Како што се гледа од релацијата (3) и сликата 2в, големината на електричното поле на точкест полнеж се намалува со квадратот на растојанието. Полето не е хомогено.

Се покажало дека рамномерно наелектризирана сфера во просторот околу неа создава поле исто како што создава точкест полнеж, еднаков на полнежот на сферата, поставен во нејзиниот центар.

Принцип на суперпозиција. Сложено поле

Често полето не е создадено од еден точкест полнеж, туку од повеќе (на пример n) токести полиња. Во таков случај на **сложено електрично поле**, ако во дадена точка јачините на полињата создадени од тие полнежи се $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3 \dots \vec{E}_n$, резултатното поле се добива како нивен векторски збир :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad (4)$$

(Ознаката $\sum_{i=1}^n \vec{E}_i$ (сигма) значи собирање)

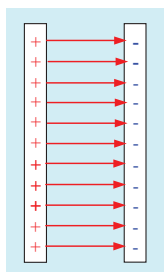
Ваквото собирање на полињата се вика **принцип на суперпозиција**. Тој принцип експериментално е потврден.

Меѓутоа, најчесто електричното поле е создадено од наелектризирано тело, кое може да има најразлична форма. Полнежот на телото обично го сметаме за збир од многу точки полнежи и потоа пак се користи релацијата (4). Таквото поле е сложено, и неговото пресметување е можно само за определен број случаи, кога станува збор за правилни геометриски тела.

Хомогено електрично поле

Експериментите и теоријата покажуваат дека во близина на многу голема (теориски бескрајна) рамнина, која е наелектризирана рамномерно, се создава **хомогено поле**. Тоа е поле чија големина, насока и правец во секоја точка се непроменливи. Големината на ова поле зависи од **површинската густина на полнежот** (σ), определена со односот помеѓу полнежот Q и плоштината S на дадената рамнина:

4. Електрично поле



Сл. 3

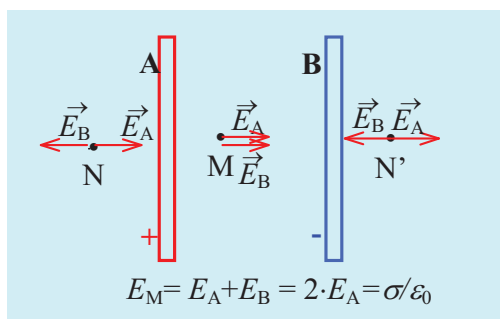
$$\sigma = \frac{Q}{S} \quad (5)$$

Електричното поле создадено во близина на доста голема рамномерно наелектризирана рамнина е хомогено, насочено во правец нормален на рамнината и по големина определено со:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{Q}{2\epsilon_0 S} \quad (6)$$

Векторот на полето \vec{E} е насочен нормално од рамнината, ако таа е позитивно наелектризирана, а кон неа, ако е негативно наелектризирана.

Две рамнини наелектризирани со еднакви површински густини, но спротивни по знак, исто така, создаваат хомогено поле чија големина е два пати поголема, што е јасно од сл. 4.



Сл. 4. Помеѓу разноимено наелектризираните плочи полињата се собираат, додека лево и десно од нив, во точките N и N', полињата се еднакви на нула.

Големината на електричното поле помеѓу две рамномерно наелектризирани разноимени плочи е дадена со релацијата:

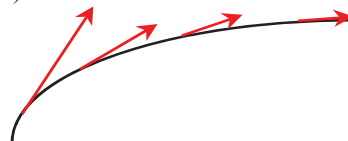
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 S} \quad (7)$$

каде што Q е полнежот, S плоштината на плочите, а ϵ_0 е диелектрична константа во вакуум.

Електрични силиви линии

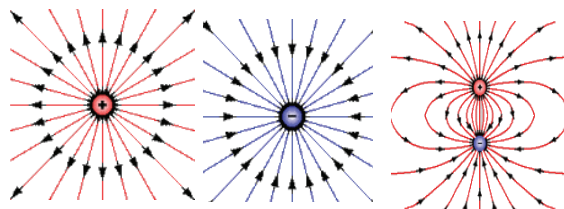
Електричното поле како вектор ние веќе

го прикажувавме на сликите 2 и 3. Многу понагледно електричното поле може да биде прикажано со помош на **електрични силиви линии** (сл. 5).



Сл. 5

Електрични силиви линии се замислени линии чија тангента во која било нејзина точка се поклопува со правецот и насоката на векторот на јачината на електричното поле, а по кои од состојба на мирување би се движел пробен позитивен електричен полнеж.



а) б) в)

Сл. 6. а) Електрични силиви линии околу позитивен точкест полнеж б) Електрични силиви линии околу негативен точкест полнеж в) Електрични силиви линии околу два разноимени полнежа. Сите линии се однесуваат на рамнината на цртањето

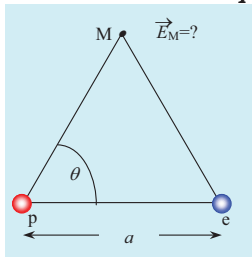
На сликата 6 се дадени цртежи на силиви линии на некои конфигурации на полиња.

Како што може да се види од оваа слика, електричните силиви линии започнуваат на местата каде што се наоѓаат позитивните полнежи, а завршуваат таму каде што полнежите се негативни. Уште нешто, таму каде што електричните силиви линии се погусты, полето е посилно. Во хомогено поле (сл.3) електричните силиви линии се прави, еднакво густы.

Бидејќи во секоја точка од полето, во кое $E \neq 0$, поминува силова линија, не е можно да се нацртаат сите, затоа, по договор силивите линии се цртаат така, што *нивната густина да биде поголема таму каде што јачината на полето е поголема*. Тоа значи дека **бројот на нацртаните силиви линии, кои поминуваат низ**

4. Елекџрично џоле

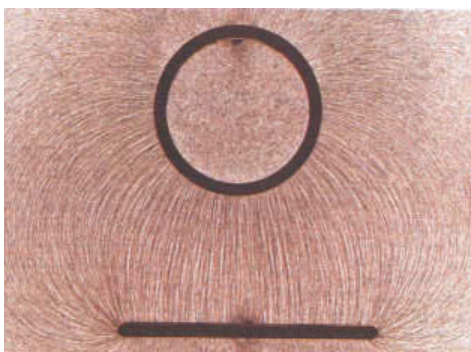
единица плоштина од површина поставена нормално на линиите, е пропорционален (или еднаков) на големината на векторот \vec{E} .



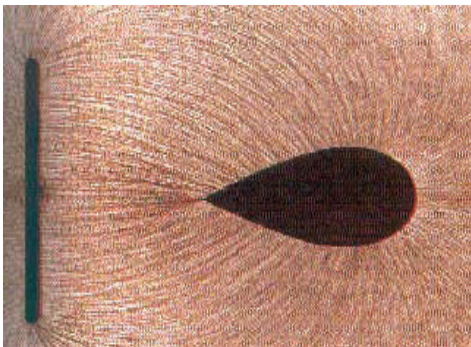
Сл. 7

Со поставување на ситни мали делови од влакна или други честици (гриз) во масло може да се направат фотографии на електричните силиви линии при различни конфигурации на поле.

На фотографиите од сликата 8 се дадени така добиените електрични силиви линии.



Разноимено наелектризиран прстен и рамнина. Во внатрешноста на прстенот нема силници.



Разноимено наелектризирана плоча и зашилен објект. Во близина на шилицот линиите се најгусти

Сл. 8

Прашања, задачи, активности

1. Во поле на точкест полнеж во некоја точка P се донесуваат различни пробни точкести полнежи: $Q_{pr} = +3 \text{ C}$; $Q_{pr} = -1 \text{ C}$; $Q_{pr} = +10 \text{ C}$.

Ќе се промени ли јачината на електричното поле во точката P? Ако е одговорот позитивен, како и зошто?

2. Позната е јачината на полето од даден точкест полнеж во точка оддалечена за одредено растојание од изворот.

Какво е полето во точка која се наоѓа на двојно растојание од изворот?

3. Дали е можно електричните силиви линии да се сечат?

4. Мора ли јачината на електричното поле да се промени ако прво разгледуваме точка M оддалечена за некое растојание r, а потоа некоја друга точка N која се наоѓа на растојание $MN = r/2$ во однос на точката M?

5. Ако во хомогено електрично поле се постави еден протон и еден електрон, која од овие честици ќе добие поголемо забрзување?

6. Пример задача

Протон и електрон се наоѓаат на две темиња од рамностран триаголник со страна $a = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Колкава е големината на полето во третото теме?

Решение

Дадено: Се бара:

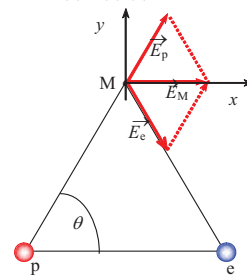
$$Q_1 = 1,6 \cdot 10^7 \text{ C} \quad E_M = ?$$

$$Q_2 = -1,6 \cdot 10^7 \text{ C}$$

$$a = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Во точката M замислуваме донесен $+1 \text{ C}$ и поставуваме координатен почеток.

Резултантното поле ќе биде дадено како векторски збир од полето создадено од протонот и полето создадено од електронот (слика 9)



Од цртежот се гледа дека резултантното поле има само x-компонента чија големина е $E = 2E_p \cos \theta$. Бидејќи $\theta = 60^\circ$, $\cos \theta = 1/2$ и

Сл. 9

4. Електрично поле

$$E_p = E_e = 9 \cdot 10^9 \frac{e}{a^2}, \text{ а } e \text{ е елементарен}$$

електричен полнеж, со замена на бројните вредности се добива $E_M = 1,6 \cdot 10^2 \text{ N/C}$.

7. Пресметајте ја големината и определете ја насоката и правецот на јачината на електричното поле во точката М поставена на растојание 0,5 m од точкестотиот полнеж $Q = -3,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ налево и надесно.

(Одговор: И во двата случаја полето е насочено кон полнежот, со големина $E = 1,08 \cdot 10^5 \text{ N/C}$.)

8. Дали може да објасните која појава доаѓа до израз кога кратки конци се поставуваат во насока на електричните силиви линии?

Со помош на компјутерската програма “Електромагнетно поле”, превод од “EM Field” од D. Trowbridge, Microsoft Corporation and Bruce Sherwood, CIL and Dept. Of Physics, Carnegie Mellon University, 1998 испитајте како изгледаат силивите линии на:

- 2 истоимени полнежа,
- 2 разноимени полнежа,
- 3 точкести полнежи со ист знак поставени на рабовите на рамностран триаголник,
- повеќе точкести полнежи, случајно распределени.
- подредете ги точкестите полнежи близу еден до друг, така ќе симулирате рамнина. Нацртајте ги силивите линии на ваквата “рамнина”.

За користење на програмата послужете се со деталното упатство издадено од Институтот за физика, ПМФ, Скопје, 2001

Дајте го значењето на следниве основни поими. Таму каде што е потребно посочете и примери

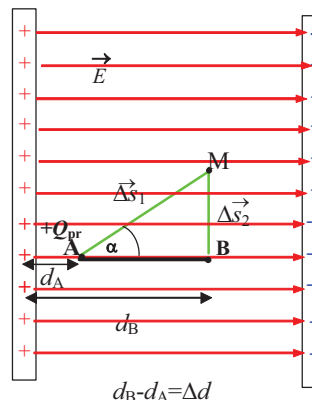
- електрично поле
- радијално поле
- јачина на електростатичко поле
- електрични силиви линии
- принцип на суперпозиција
- сложено поле
- хомогено поле

4.2. РАБОТА И ЕНЕРГИЈА ВО ЕЛЕКТРОСТАТИЧКО ПОЛЕ

Работа при движење на полнеж во хомогено електростатичкото поле. Енергија

Секое наелектризирано тело во електростатичкото поле под дејство на електростатичка сила се движи, значи врши работа. Да видиме од што зависи оваа работа?

Ќе претпоставиме дека на даден полнеж не дејствува ниту една друга сила освен електростатичката и дека полнежот се наоѓа во хомогено електростатичко поле (сл. 1). Да разгледаме две точки, А и В, чија местоположба, во однос на позитивната рамнина, е определена со растојанијата d_A и d_B .



Сл. 1 Пробниот полнеж врши иста работа ако се движи по должината на правата АВ, како и по должината на линиите АМ и МВ.

Работата што ја врши силата на полето при пренос на полнежот $+Q_{pr}$ од точката А во точката В по должината на правата $AB = \Delta d$ е дадена со:

$$A = F \Delta s = Q_{pr} E \Delta d = Q_{pr} E (d_B - d_A) \quad (1)$$

бидејќи поместувањето се врши во правец и насока на силата.

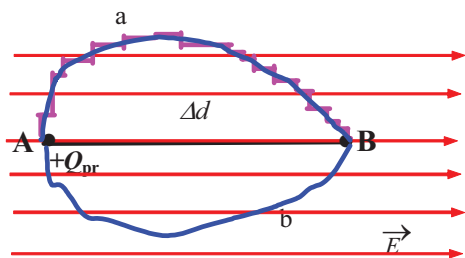
Ако полнежот се поместува по должината на линиите А-М и М-В, работата ќе биде дадена со :

$$A = A_1 + A_2 = Q_{pr} E \Delta s_1 \cos \alpha + Q_{pr} E \Delta s_2 \cos 90^\circ = Q_{pr} E d$$

(2)

4. Електрично поле

бидејќи $\Delta s_1 \cos \alpha = \Delta d$. Се гледа дека работата извршена по патната линија А-М-В е еднаква на работата што се врши при директно поместување. Оваа работа ја врши електростатичка сила на полето и таа е позитивна. Ако сакаме полнежот $+Q_{pr}$ да го поместиме во спротивна насока, поместувањето ќе биде со обратна насока во однос на силата, значи работата треба да се врши однадвор и таа тогаш ќе биде негативна.



Сл.2.

Сликата 2 може да ни појасни дека работата извршена по крива линија А-а-В исто така е еднаква на работата вршена при директно поместување. За таа цел, кривата А-а-В по која се поместува полнежот ја заменуваме со скалеста крива (виолетово нацртана) со голем број n мали скалички. При поместувањето по должината на една од таквите скали во насока нормална на \vec{E} , работа не се врши. На деловите пак паралелни со векторот \vec{E} се врши работа, па кога ќе се соберат сите работи, се добива резултат даден со релацијата (2). Според тоа, може да се заклучи:

Работата што се врши во електростатичкото поле не зависи од тоа каква е патната линија по која се поместува полнежот, таа зависи само од почетната и крајната положба на полнежот. Ако работата ја вршат силите на полето, таа е позитивна, додека ако работата се врши од надворешни сили, во насока спротивна од насоката на силата на полето, таа е негативна. Како последица на претходното, ако пробниот полнеж се поместува по затворена патна линија А-а-В-б-А, вкупната работа е еднаква на нула.

Во електростатичко поле вкупната работа по затворена крива линија е еднаква на нула.

Ова е многу важно својство на електростатичкото поле. Такво својство, прisetете се, има и гравитационото поле. Полето е, велиме, **потенцијално**, а силите што во ваквите полиња дејствуваат, се **конзервативни**.

Напоменуваме дека овој заклучок важи и за нехомогени полиња, на пример, за радијалното поле на точкест полнеж. Меѓутоа, за да се дојде до истиот заклучок, таму треба да се користат методите на вишата математика.

Ќе се вратиме повторно на сликата 1. Објаснивме дека пробниот полнеж $+Q_{pr}$ движејќи се по должината на полето врши работа. Размислете, ако некое тело врши работа, се менува ли неговата потенцијална енергија? Прisetете се што станува со потенцијалната енергија на тело кое под влијание на Земјината тежа паѓа од некоја височина. Тогаш телото паѓајќи си ја зголемува својата кинетичка енергија, но неговата потенцијална енергија станува сè помала. Имајќи го предвид претходното, што заклучувате за полнежот во точките А и В?

Одговорот е во согласност со важното својство на секое поле на конзервативни сили: *ако полето е конзервативно и работата не зависи од формата на траекторијата на телото, тогаш таа е еднаква на промената на потенцијалната енергија на телото, земена со спротивен знак.* (За ова поподробно сте учеле во механиката).

Следејќи го овој заклучок и релацијата (1) може да се запише:

$$\begin{aligned} A &= -Q_{pr} E(d_B - d_A) = Q_{pr} E(d_A - d_B) = \\ &= -(W_{pB} - W_{pA}) = -\Delta W_p \end{aligned} \quad (3)$$

Во оваа релација со W_{pA} и W_{pB} се означени потенцијалните енергии во точките А и В. Од овде следува дека потенцијалната енергија на полнежот $+Q_{pr}$ во хомогеното електрично поле \vec{E} е дадена со релацијата:

$$W_p = Q_{pr} E d \quad (4)$$

каде што d е растојанието до левата плоча. Ако полето врши позитивна работа, потенцијалната енергија се намалува $\Delta W_p < 0$. Во исто време, согласно со Законот за запазување на енергијата, неговата кинетичка енергија се зголемува. И обратно, ако позитивно наелектризираното тело го движиме наспроти поле-

4. Електрично поле

то (\vec{E}), се врши негативна работа и неговата потенцијална енергија се зголемува. При движење по затворена крива, телото не ја менува енергијата и, согласно со (3), извршената работа е еднаква на нула.

Или, да обопштиме:

Работата што се врши при движење на полнеж од положба 1 во положба 2, во кое и да било електростатичко поле (не само во хомогеното) не зависи од траекторијата, така што релацијата (3) :

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) \quad (5)$$

важи универзално за електростатичко поле создадено од каков било извор.

Електричен потенцијал. Напон

Потенцијалната енергија на наелектризирано тело во дадено поле зависи од неговиот полнеж. Меѓутоа, величината определена со односот помеѓу потенцијалната енергија на телото и пробниот полнеж донесен во дадена точка е величина која ќе зависи само од местоположбата на таа точка и од изворот на полето. Таа величина го опишува полето и се вика **електричен потенцијал** φ :

$$\varphi = \frac{W_p}{Q_{pr}} \quad (6)$$

Од оваа релација може да се даде следново физичко значење на величината електричен потенцијал. *Електричниот потенцијал во дадена точка од полето е определен со потенцијалната енергија што би ја имал единичен позитивен полнеж донесен во таа точка.*

Слично како и потенцијалната енергија и потенцијалот зависи од изборот на нултата референтна положба. Практично значење има не самиот потенцијал, туку промената на потенцијалот која не зависи од нултото ниво за пресметување на потенцијалот. Согласно релацијата (5) и (6), извршената работа може да се запише со:

$$A = -Q_{pr}(\varphi_2 - \varphi_1) = -Q_{pr}\Delta\varphi \quad (7)$$

Најчесто во физиката се користи величината **електричен напон** U која се дефинира како разлика на потенцијалот помеѓу почетната и крајната точка

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi \quad (8)$$

Имајќи ги предвид претходните две равенства, за напонот се добива:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{Q_{pr}} \quad (9)$$

Електричен напон помеѓу две точки од дадено електростатичко поле е мерка за работата што ја вршат електричните сили при движење на единичен позитивен полнеж од почетната до крајната точка.

Единица за мерење и на потенцијалот и на напонот во SI е **волт**. *Ако при поместување на позитивен единичен полнеж (+1 C) од една точка во друга се врши работа од еден џул, тогаш меѓу тие две точки постои напон од еден волт.*

Само напонот, односно разликата на потенцијалите помеѓу две точки, има одредена физичка смисла, бидејќи работата на полно е определена само ако се познава почетната и крајната точка на поместувањето на полнежот. Затоа, кога се зборува за напон, секогаш се имаат на ум две точки помеѓу кои постои тој напон. Најчесто се зема дека напонот на Земјата има потенцијал еднаков на нула.

Потенцијал на поле создадено од точкест полнеж

Изведувањето на релацијата за потенцијалот на точкест полнеж Q е доста сложено, па затоа ние релацијата ќе ја дадеме готова:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} \quad (10)$$

Во оваа равенка r е растојанието помеѓу точката во која што нè интересира потенцијалот и изворот. Како што се гледа, и потенцијалот, како и јачината на електричното поле, се еднакви за сите точки што лежат на сфери со еднаков радиус. Се гледа дека потенцијалот на поле создадено од позитивен полнеж е позитивен ($Q>0, \varphi>0$) и, обратно ($Q<0, \varphi<0$).

Формулата (10) е изведена во согласност со општата определба дека при определување на потенцијаната енергија (или потенцијалот) треба да се познава нултото ниво за овие величини. Се зема дека точка бесконечно одалечена од изворот на полето нема потенцијална енергија (нема потенцијал). Тоа

4. Електрично поле

следува и од релацијата (10). Ако $r \rightarrow \infty$, $\varphi \rightarrow 0$.

Имајќи ја предвид релацијата (9), ако се стави $\varphi_2=0$, за потенцијалот φ_1 се добива :

$$\varphi_1 = \frac{A}{Q_{\text{пр}}} \quad (11)$$

па следува: *потенцијал на електрично поле создадено од точкест полнеж во некоја точка е еднаков на работата што треба да се изврши за да се однесе во бесконечност позитивен единичен полнеж.*

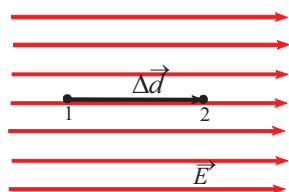
Ако полето е создадено од повеќе (1,2, ...n) точкести полнежи, потенцијалот во некоја точка од тоа поле се определува со релацијата:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n = \sum_1^n \varphi_i \quad (12)$$

што е во согласност со принципот на суперпозиција на полињата. Овде станува збор за алгебарска сума, бидејќи потенцијалот може да биде позитивен или негативен.

Кога станува збор за поле создадено од наелектризирано тело, тогаш замислуваме дека полнежот на телото се состои од голем број точкести полнежи и задачата пак се решава со помош на релацијата (12) и со сложени пресметки во кои ние нема да навлегуваме.

Врска помеѓу јачината на полето и потенцијалот



Сл. 3

Јачината на електричното поле и потенцијалот се физички величини кои го опишуваат електростатичкото поле. Јачината на полето е векторска карактеристика

(сетете се на нејзината дефиниција!), а електричниот потенцијал (напон) е енергетска (скаларна) карактеристика на полето. Очигледно, тие две величини се поврзани меѓусебно. Наједноставно врската ја наоѓаме во случај на хомогено поле (сл. 3)

Нека некој полнеж Q се поместува во насо-

ка на полето \vec{E} од точката 1 во точката 2. Работата што ја вршат силите на полето е дадена со:

$$A = QE\Delta d \quad (13)$$

каде што Δd е големината на поместувањето на полнежот. Согласно со (9) таа работа е:

$$A = Q(\varphi_1 - \varphi_2) = QU \quad (14)$$

бидејќи левите страни на овие две равенства се исти, следува дека :

$$QE\Delta d = QU ; E\Delta d = U ; E = \frac{U}{\Delta d} \quad (15)$$

Во оваа равенка U е разлика на потенцијалот помеѓу точките 1 и 2, а Δd е големината на поместувањето $\vec{\Delta d}$, кое по насока и правец се поклопува со \vec{E} . Бидејќи модулот на векторот \vec{E} е позитивен, следува $\varphi_1 > \varphi_2$. *Јачината на полето секогаш е насочена кон намалувањето на потенцијалот.*

Од релацијата (15) е, исто така, јасно зошто во Меѓународниот систем на мерни единици, како единица за мерење на јачината на полето се зема еден **волт на метар**.

Еквипотенцијални површини

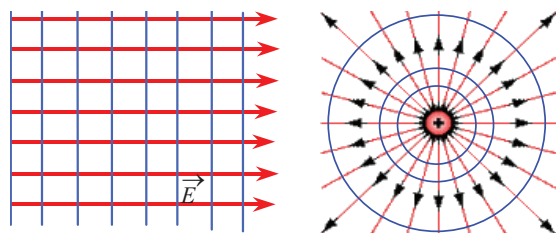
Кога полнеж Q се поместува нормално на силовите линии, тогаш не се врши работа. (Видете ја сликата 1). Тоа значи, ако во просторот се повлече површина која е нормална на електричните силиви линии, при движење на полнеж по неа нема да се врши работа. Сите точки на таквата површина имаат еднаков потенцијал.

Геометриско место на точки со ист потенцијал се викаат еквипотенцијални површини.

За хомогено поле еквипотенцијалните површини се рамнини, а во случај на точкест полнеж тоа се концентрични сфери во чиј центар е полнежот.

4. Електрично поле

Поле создадено од сферен спроводник, за точките што се наоѓаат надвор од него, е исто како и поле создадено од точкест полнеж



а) б)

Сл.5. Еквипотенцијални линии (пресеци на еквипотенцијални површини со рамнината на цртањето), означени со сино; а) за хомогено поле б) поле на точкест полнеж, односно рамномерно наелектризирана топка

поставен во центарот на таа сфера (сл.5)

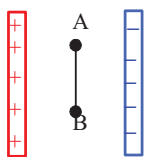
Слично како и електричните сили линии, и еквипотенцијалните површини квалитативно го опишуваат полето во просторот.

Како што може да се види од сликата 5, електричните сили линии секогаш се нормални на еквипотенцијалните површини.

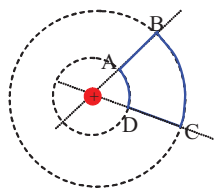
Тоа е така и во случај на поле од каков и да било извор, поле на наелектризирано тело или тела.

Прашања, задачи, активности

1. Колкава работа се врши ако полнеж од +1 C се движи по должината на правата АВ? (сл. 6)



Сл.6.



Сл.7

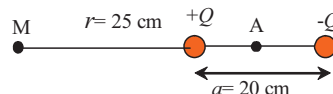
2. Позитивен електричен полнеж се движи по контурата ABCD (сл.7). На кои делови од контурата работата на полнежот била позитивна? На кои таа била негативна? Каде била еднаква на нула? Како се менувала

потенцијалната енергија на полнежот?

Пример задача

3. Два еднакви разноимени точкести полнежа со $Q = 10^{-6}$ C се поставени на растојание a еден од друг. Да се најде електричен потенцијал во точка оддалечена од позитивниот полнеж на растојание $r = 40$ cm. Колкав е потенцијалот во таа точка, како и во точката што се наоѓа во средината помеѓу двата полнежа?

Решение



Сл. 10

Потенцијалот во точката М е еднаков на збирот на потенцијалите добиени од изворите $+Q$ и $-Q$ (сл.10): $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$

Бидејќи е потенцијалот на точкест полнеж:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} \text{ ќе биде: } \varphi_1 = k \frac{Q}{r_1} \text{ и } \varphi_2 = k \frac{-Q}{r_2} \text{ па}$$

$$\varphi = kQ \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] = 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{25} - \frac{1}{45} \right] = 160 \text{ V}$$

Потенцијалот во точката А е еднаков на нула.

4. Со програмата користена во претходната лекција, нацртајте ги еквипотенцијалните линии за сите испитувани случаи на електрично поле.

Каков агол зафаќаат линиите кои претставуваат проекции на еквипотенцијалните површини и силините линии?

Дајте го значењето на следниве основни поими. Таму каде што е потребно посочете и примери

- Работа во електростатичко поле
- позитивна работа
- негативна работа
- потенцијално поле
- конзервативни сили
- енергија во електростатичко поле
- електричен потенцијал
- електричен напон
- волт
- еквипотенцијална површина
- волт на метар

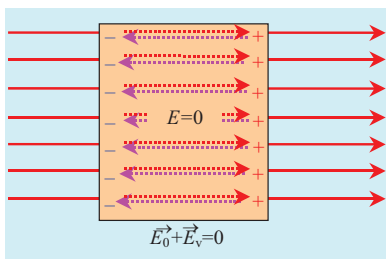
4.3. СПРОВОДНИЦИ ВО ЕЛЕКТРОСТАТИЧКО ПОЛЕ

Услов за рамнотежа на полнежите кај спроводниците

Само по себе се подразбира дека електро-статичко поле може да постои не само во вакуум туку и во материјални средини.

Во спроводниците постојат честици кои може слободно да се движат. Кај металите тоа се слободните електрони. И ние веќе покажавме дека електроните под влијание на надворешно поле предизвикуваат раздвојување на полнежите, појава на електростатичка инфлуенца. Сега нè интересира што станува со полето во спроводникот?

Во сите опити на електризирање, по краткотрајно движење полнежите ќе престанат да се движат, велиме ќе се најдат во **услови на рамнотежа**.



Сл. 1

Рамнотежата ќе се постигне тогаш кога полето создадено во внатрешноста \vec{E}_v ќе го компензира надворешното поле \vec{E}_0 и вкупното поле внатре ќе стане еднакво на нула, т.е. кога модулите на овие два спротивно насочени вектора ќе се изедначат:

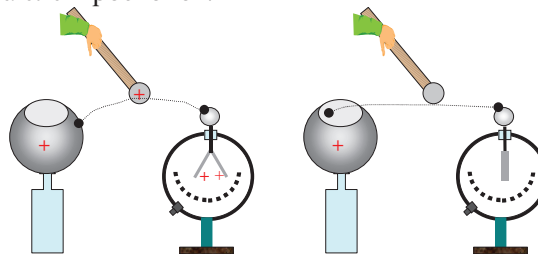
$$E_0 - E_v = 0 \quad ; \quad E_0 = E_v \quad E = 0. \quad (1)$$

При услови на рамнотежа на полнежите, во внатрешноста на спроводникот полето е еднакво на нула

Оваа определба важи и во случај кога некое тело е наелектризирано (сл.2). За да се убедите во следново, направете го следниов експеримент:

- наелектризирајте шуплива изолирана топка. Проверете со пробалка, допирајќи ја

топката однадвор дали е наелектризирана, со помош на електроскоп. Потоа, разелектризирајте го електроскопот и пробалката и шупливата топка допрете ја со пробалката од внатрешната страна. Проверете дали пробалката сега ќе предизвика отклонување на ливчињата на електроскопот.



Сл.2 При допирање на топката одвнатре нема отклон

Заклучуваме, во внатрешноста на шупливата топка не постојат полнежи, па ниту електрично поле. Истоимените полнежи максимално се одбиваат едни од други, па затоа нив ги има само на надворешната страна на површината на спроводникот.

Непостојењето на електрично поле во внатрешноста на спроводникот доведува до друг важен заклучок. Да се потсетиме на врската помеѓу јачината на полето E , поместувањето помеѓу две точки Δd и напонот меѓу нив U . Покажавме дека:

$$E = \frac{U}{\Delta d} \quad (2)$$

Па ако, според (1), полето е еднакво на нула, во услови кога полнежите се во рамнотежа, тогаш и напонот, кој претставува разлика на потенцијали помеѓу кои и да било две точки, е исто така еднаков на нула. Тоа значи **површината на спроводникот претставува екипотенцијална површина**.

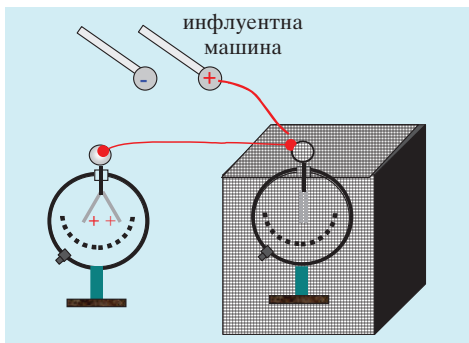
А бидејќи електричните сили линии се нормални на екипотенцијалните површини, тогаш: **Електричните сили линии секогаш се нормални на површината на спроводникот**.

Проанализирајте ги вашите компјутерски симулации и убедете се во тоа!

Електростатичка заштита
Електростатичката заштита базира на

4. Електрично поле

принципот на т. н. Фарадеев кафез (сл.3)



Сл. 3

На сликата се прикажани два еднакви електроскопа, од кои десниот е поставен во кафез така што неговата глава ја допира внатрешната страна на кафезот. Кафезот е поврзан со едниот пол на инфлуентната машина и со левиот електроскоп. Кога инфлуентната машина оперира, отклон покажува само надворешниот електроскоп. Внатрешниот нема да покаже отклон, дури и во случај на многу висок напон, така што помеѓу половите на машината ќе прескокне искра.

Низа апарати и уреди кои треба да бидат заштитени од надворешни електростатички полиња се поставуваат во спроводнички "кафези" кои, обично, се и заземјени.

Во поново време и заштитата од атмосферско празнење на домовите или другите објекти се прави на сличен начин.

Дека во внатрешноста на спроводникот не постои поле беше покажано и на сликата 8 од поглавјето 4.1.

Мерење на напонот. Потенцијал на површината на спроводникот

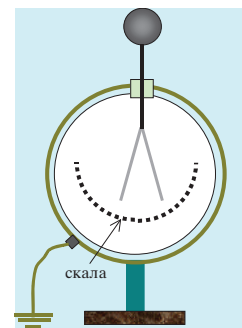
За мерење на напонот меѓу две тела се служиме со електрометарот. Притоа, првото тело го поврзуваме со главата, а второто со телото на електрометарот. Ако се сака да се измери потенцијалот на некое тело во однос на Земјата, телото на електрометарот се заземјува (сл. 4)

Отклонувањето на ливчињата на електрометарот зависи од силата што дејствува на нив, т.е. од јачината на полето помеѓу нив. Колку е поголема разликата на потенцијалот, толку е поголема јачината на полето на местата кадешто се поставени ливчињата, па и нивното

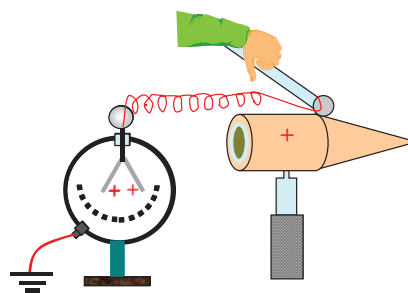
отклонување е поголемо. Заклучуваме дека *отклонот на ливчињата во ваквиот уред зависи од разликата на потенцијалите помеѓу ливчињата и телото на електрометарот*. Скалата на електрометарот овозможува таа разлика да се мери.

Површината на спроводникот секогаш е на ист потенцијал. Тоа ќе го покажеме со следниов опит:

- изолирано тело со форма на шуплив коноцилиндар е наелектризирано. Металниот дел од една пробалка со жица се поврзува со главата на електрометарот, како на сл. 5, и се води по површината на спроводникот. Каде и да биде поставена пробалката, на врвот на коничниот дел од коноцилиндарот, на неговиот рамен дел или од внатрешната страна, отклонот на електрометарот стално ќе биде ист. Што заклучувате од овој експеримент?



Сл 4



Сл.5.

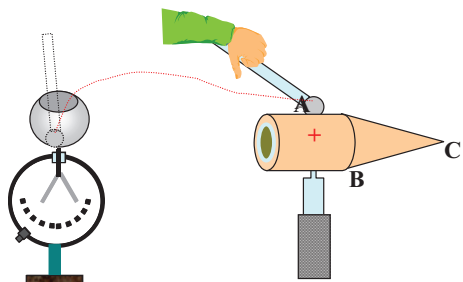
Во експериментот покажавме дека напонот во однос на Земјата кај телото е константен. Значи ли тоа дека и потенцијалот е константен?

Површинска густина на полнежи

Покажавме дека површината на кој било спроводник претставува еквипотенцијална површина. Но, тоа не значи дека и полнежите на таа површина секаде се еднакво распределени. Веќе укажавме дека во внатрешноста на шуплива сфера нема полнежи. Со експеримент

4. Електрично поле

може да се покаже дека најголема површинска густина на полнеж има во близината на зашиленiot дел од површината на коноцилиндарот. За таа цел ќе користиме и електроскоп на чија глава ќе ставиме шуплива топка и пробалка (сл. 6).



Сл.6

Зошто е погодно да се користи електроскоп со шуплива топка на главата? Таквата шуплива топка обично се вика “Фарадеев цилиндар”. Одговорот е едноставен, ако се сетите што станува со полнежите на шупливата топка. Тие ќе се распределат само по нејзината надворешна површина. Значи, ако со пробалка која носи некој полнеж ја допреме внатрешноста на шупливата топка, целиот полнеж од металниот дел на пробалката ќе биде пренесен на електроскопот.

Ако со пробалката ги допираме точките А, В, и С и притоа ги пренесуваме полнежите на електроскопот на веќе опишаниот начин, ќе видиме дека најголем отклон електроскопот има по допирањето во точката С, па В а најмал во точката А. Може да заклучиме **површинската густина на полнежите е најголема таму каде што искривеноста на површината на спроводникот е најголема**.

Колкав ќе биде отклонот на електроскопот кога со пробалката ќе ја допрете внатрешната страна? Што очекувате? Проверете!

Како последица на најголемата густина на полнежите на зашилените делови од предметите и полето во нивната близина е најсилно. Уште во 1771 година Бенџамин Франклин учил дека ако во близина на наелектризирано тело се донесе шилец, на шилецот прескокнува искра. Тоа го навело на идеја да го конструира првиот **громобран** со кој безопасно се одведува полнежот на молњата. Тоа е високо поставен метален шилец кој е со спроводничка

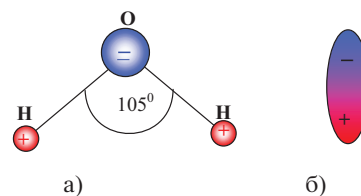
жица поврзан со метална плоча закопана длабоко во Земјината почва. Полнежот на молњата преку таквиот громобран се одведува директно во Земјината почва.

Дајте го значењето на следниве основни поими. Таму каде што е потребно посочете и примери

- Услов за рамнотежа на полежи во спроводник
- електростатичка заштита
- Фарадеев кафез
- громобран

4.4. ДИЕЛЕКТРИЦИ ВО ЕЛЕКТРОСТАТИЧКО ПОЛЕ

Во електростатичко поле се електризираат и диелектрици. Појавата се вика **поларизација на диелектрици**. Таа кај диелектриците настанува поради тоа што молекулите на таквите супстанции стануваат диполи кои се насочуваат по должината на силовите линии на надворешното поле. Оваа **индуцирана поларизација** настанува кај молекулите на диелектриците кои се неутрални надвор од полето.



Сл.1. Молекулот на водата има несиметрична градба (а), па поради тоа се однесува како дипол (б).

Механизмот на поларизацијата на диелектриците, чии молекули се веќе диполи, е поинаков. Молекулот на водата (видете ја сл. 1) е дипол. Кај овие диелектрици настанува ориентација на диполните молекули, така што нивниот позитивен дел се насочува во насока на полето, а негативниот во спротивна насока.

Супстанциите чии молекули се диполи, надвор од електрично поле се дезориентирани (сл.2), а кога ќе се најдат во полето доаѓа до нивна делумна ориентација, поради што и настанува поларизација на диелектриците.

Таа **ориентациона поларизација**, исто така,

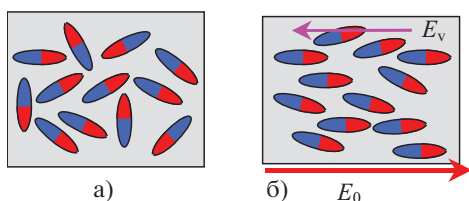
4. Електрично поле

предизвикува создавање на внатрешно поле, со насока спротивна на надворешното поле, поради што надворешното поле се намалува.

Кога диелектрикот ќе се најде во надворешно поле доаѓаат до израз и индуцираната и ориентационата поларизација (ако станува збор за диполни молекули) и полето во внатрешноста на диелектрикот се намалува. Така, големината на полето во диелектрикот \vec{E} , чија вредност секогаш е помала од полето во вакуум \vec{E}_0 , е дадена со :

$$E = E_0 - E_v \neq 0 \quad (1)$$

Во внатрешноста на диелектрикот постои поле чија големина секогаш е помала од полето во



Сл.2

вакуум.

Релативна диелектрична константа

Односот помеѓу големината на полето во вакуум и големината на полето во дадена диелектрична средина се вика **релативна диелектрична константа** (ϵ_r) за таа средина:

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E} \quad (2)$$

Тоа е бројка поголема од единица и нема димензии. За воздухот при нормални услови $\epsilon_r=1,0006$, што претставува бројка многу блиска до единица. Од овие причини Кулоновата сила помеѓу кои било два полнежа во вакуум не се разликува многу од силата во воздухот.

Но, кога станува збор за други диелектрици, тогаш силата за земнодејството помеѓу полнежите во дадената средина се намалува ϵ_r -пати.

Во оваа смисла Кулоновиот закон за сила помеѓу два точкести полнежа во диелектрична средина гласи:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (4)$$

од каде е јасно дека електростатичката сила во некоја средина може да се добие ако се познава електричната сила во воздухот (вакуум) и нејзината релативна диелектрична константа:

$$F_{\text{средина}} = \frac{F_{\text{воздух}}}{\epsilon_r} \quad (5)$$

Имајќи го ова предвид, и во другите релации за електрично поле и за електричен потенцијал, каде што во формулата се појавува диелектричната константа во вакуум ϵ_0 , во диелектричната средина формулите се менуваат така што наместо ϵ_0 треба да се заменат со константата:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (6)$$

која се исказува во истите единици како и ϵ_0 C/(Nm²) и понекогаш се вика **апсолутна диелектрична константа**.

Табела со вредности на релативна диелектрична константа на некои супстанции

супстанција	ϵ_r
воздух	1,00059
вода, 20 ⁰ C	80
трансформаторско масло, 20 ⁰ C	2,24
сулфур	4,0
порцелан	6,0-8,0

Дајте го значењето на следниве основни поими. Таму каде што е потребно посочете и примери

- поларизација на диелектрици
- ориентациона и индуцирана поларизација
- релативна диелектрична константа

Прашања, задачи, активности

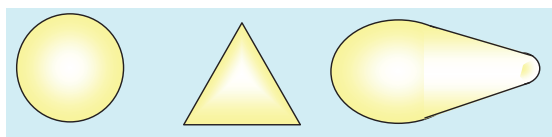
1. На фотографијата од сликата 3 е даден автомобил врз кој паѓа грандиозна искра. Како ќе го протолкувате фактот дека лицето во автомобилот сосема е безбедно.

4. Електрично поле

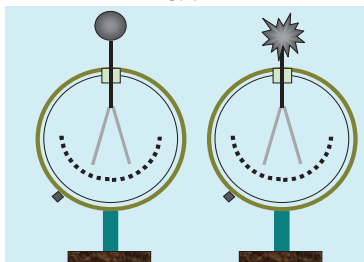


Сл.3

2. Како е распределен полнежот на позитивно наелектризираните тела од сликата 4?
(Нацртајте повеќе крвчиња каде што мислите дека полнежот е со поголема површинска густина).

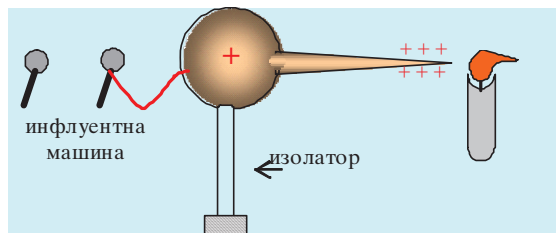


Сл.4



Сл. 5

3. Два еднакви електроскопа (им се разликуваат само главите, видете сл. 5) се наелектризирани со еднаков полнеж. Кој од нив побрзо ќе се разелектризира и зошто?
4. Ефектот на шилец многу често се демонстрира со ефектна демонстрација позната као “електростатички ветер”. Демонстрацијата се изведува така што шилецот поставен врз изолаторска држалка постојано се електризира бидејќи е поврзан со позитивниот пол на инфлуентната машина (сл. 6). Ако во близина на шилецот се донесе свеќа, таа се отклонува како на сл. 6.



Сл. 6.

Можете ли да го објасните опитот? Сетете се, на шилецот има многу натрупани полнежи. Какво поле тие ќе создадат? А, ако е полето многу силно, сетете се од она што го знаете од втори клас, што станува со воздухот? Откако ќе одговорите на овие прашања, лесно ќе објасните што станува овде.

5. Колкава е силата меѓу две топчиња со полнеж од по $6 \mu\text{S}$ кои се наоѓаат во диелектрик со релативна диелектрична константа $\epsilon_r=6$ на растојание од 1 m. (Одг. 0,054 N)

6. Во хомогено поле создадено од две рамнини, јачината на полето изнесува 5 V/m . Како и колку ќе се промени полето, ако рамнините се потопат во чиста дестилирана вода?

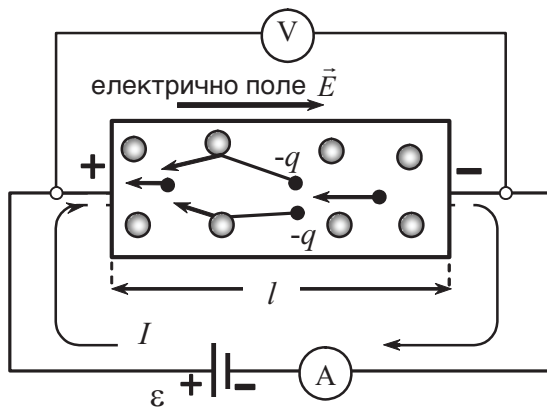
(Одг. Полето ќе се намали 80 пати)

Малку историја

Во 1752 година **Бенџамин Франклин** (Benjamin Franklin, 1706-1790), американски научник, писател и државник, го демонстрирал неговиот познат експеримент со змеј со кој покажал дека молњата претставува електрично празнење. Франклин сметал дека електрицитетот е “флуид” кој поминува од едно тело на друго. Мислел дека “флуидот” е позитивен, и ако телото има вишок од флуидот, тоа е позитивно наелектризирано, а недостаток, тогаш е негативно наелектризирано. Велел: ”со триџе полнежот не се создава, туку се раздвојува”. Тој прв ги вовел називите позитивен и негативен полнеж, а исто така потврдил дека разноимените се одбиваат, а истоимените се привлекуваат. Многу експериментирал со статичкиот електрицитет, Така користел 4 лајденски боци (види сл. 4) за да акумулира поголеми полнежи. Увидел дека ако во близина на наелектризирано тело се донесе тело со шилец, од шилецот прескокнува искра. Тоа му дало идеја да го измисли громобранот во 1771 година, што му донело светска слава.

5.1. ЕЛЕКТРИЧНА СТРУЈА

Познато е дека кај спроводниците постојат слободни електрични полнежи кои се движат хаотично низ нивната внатрешност. Кај металите овие полнежи се слободните електрони. При движењето на слободните електрони низ металите, голем број од нив се судруваат со атомите и јоните на металот кои се во јазлите на кристалната решетка. На таков начин доаѓа до чести промени на насоката и големината на нивната брзина. Ако меѓу краевите А и В (сл.1) на некој метален спроводник со должина l постои потенцијална разлика $U = V_2 - V_1$ во него ќе се создаде електрично поле $E = U / l$. Под дејство на ова поле слободните електрони ќе се движат од $-$ кон $+$, како што е прикажано на сл.1. Имено, електричното поле го насочува хаотичното движење на слободните електрони.



Сл. 1.

Насоченото движење на електричните полнежи под дејство на електричното поле, односно потенцијалната разлика што тоа ја создава изворот, се нарекува **електрична струја**. За да низ некое тело тече електрична струја, треба во него да се наоѓаат слободни наелектризирани честици. Овие честици се наречени носители на струја или носители на количество електричество. Тие може да бидат електрони, позитивни или негативни јони, а кај гасовите слободните електрони и јони. Притоа, честичите со позитивен полнеж се движат во насока на полето, од $+$ кон $-$, а негативните обратно. Кога во еден спроводник под дејство на елек-

трично поле \vec{E} се движат слободните електрони, тоа е **спроводник од прв ред** (на пример, такви се металите). Кога носители на количество електричество се позитивните и негативните јони, тогаш тоа е **спроводник од втор ред** (такви се, на пример, електролитите). Квантитативна карактеристика на електричната струја се: јачината на електричната струја I и густината на струјата \vec{J} .

Моменталната јачина на електричната струја се дефинира како количество електричество Δq кое поминува во единица време нормално низ даден напречен пресек на спроводникот

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (1)$$

Единица за јачина на електричната струја во SI е 1A (ампер). Таа е основна SI единица. Преку неа, а врз основа на равенката (1), може да се дефинира единицата за количество електричество 1C (кулон),

$$1C = 1A \cdot 1s.$$

Јачината на електричната струјата се мери со амперметар или со галванометар (осетлив амперметар). Амперметарот во струјно коло се поврзува сериски, додека волтметарот со кој се мери напон (на пример, потенцијална разлика на краевите од еден отпорник) се поврзува паралелно (сл.1).

Јачината на струјата е скаларна величина и целосно не го дефинира насоченото движење на полнежите во однос на даден напречен пресек на спроводникот. Затоа се користи векторската величина **густина на струјата**

За стационарна струја, каде густината на електричната струјата J е еднаква по целата површина S , може да се запише:

$$J = \frac{I}{S} \quad (2)$$

Единицата за густина на електричната струја во SI е $1A/m^2$.

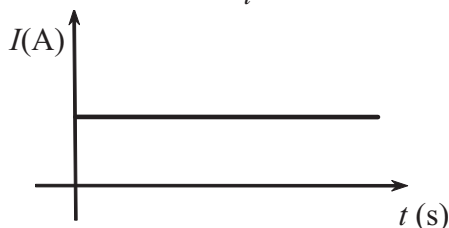
Последната равенка наоѓа примена во техниката и медицината (на пример, кај електрохируршките методи **фулгурација** и **десикација**).

Ако густината и јачината не се менуваат со времето станува збор за **постојана** (стацио-

5. Електрична струја

нарна) струја. Насоката на струјата по договор е земена да е од повисок кон понизок потенцијал, односно насоката на струјата во металните спроводници е спротивна од движењето на слободните електрони. Често ваквата струја се вика и "права" бидејќи нејзиниот графички приказ на зависноста на јачината на струјата од времето е права паралелна со апсисната оска на која е прикажано времето t

(сл.2). За неа важи $I = \frac{q}{t}$.



Сл. 2.

За да се овозможи низ даден спроводник постојано течење на електрична струја неопходно е меѓу неговите краеви да се одржува постојана потенцијална разлика. Одржувањето на потенцијалната разлика е сврзано со трошење на надворешн енергија. Според тоа, за одржување на потенцијалната разлика на краевите на сваден спроводник е потребно да се врши работа, што ќе ја дополнува енергијата на електричното поле што се троши при движење на слободните електрони низ спроводникот. Оваа работа се врши во специјални уреди (*извори на електрична струја*) и тоа на сметка на разни видови надворешна енергија: механичка (кај генераторите), хемиска (галански елементи и акумулатори), светлинска (фотоелементи).

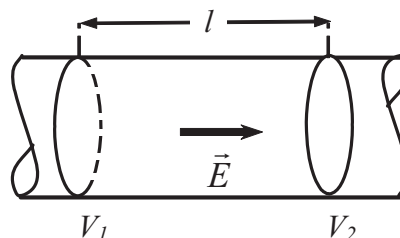
Физичката величина, определена со работата што се врши под дејство на надворешните сили за пренесување на единичен позитивен полнеж (+1C) внатре во изворот, во насока обратна од насоката на електричното поле, се вика *електромоторна сила* и се бележи со ЕМС или ϵ .

Прашања и задачи

1. Што се тоа спроводници од прв ред, а што од втор ред?
2. Како се дефинира густината на струјата и која е нејзината SI единица?

5.2. ОМОВ ЗАКОН

Во практиката најпознат е Омовиот закон за линиски (долги и тенки цилиндрични) спроводници од хомоген материјал.



Сл. 1.

Експерименталните резултати покажуваат дека за хомоген спроводник векторот на густината на струјата е пропорционален со јачината на електричното поле E и тие се поврзани со равенката:

$$J = \sigma E, \quad (1)$$

Коефициентот на пропорционалност σ , карактеристичен за средината, се вика *специфична електрична спроводливост*. Реципрочната вредност на специфичната електрична спроводливост $\rho = 1/\sigma$ е константа за даден материјал од кој е направен спроводникот и е позната како *специфичен електричен отпор* ρ . За добрите спроводници специфичниот електричен отпор ρ има мали вредности.

$$\rho_{Ag} = 1,53 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m.$$

Кога специфичната спроводливост σ не зависи од јачината на полето, во сила е Омовиот закон.

За да се добие Омовиот закон за линиски (долг и тенок цилиндричен) спроводник од хомоген материјал ќе разгледаме спроводникот со должина l чиј напречен пресек е S , а низ него протекува стационарна струја со јачина I (сл. 1).

Потенцијалната разлика $U = V_1 - V_2$ што постои на краевите на спроводникот, како што е познато е $U = El$. Кога од последната равенка ќе се изрази јачината на електричното поле E и заедно со равенката $J = I/S$ ќе се воведат во равенката (1), се добива:

5. Електрична струја

$$J = \frac{I}{S} = \sigma \frac{U}{l}, \quad (2)$$

односно:

$$U = \frac{l}{\sigma S} I = \frac{\rho l}{S} I. \quad (3)$$

или
$$U = IR. \quad (4)$$

Последната равенка покажува дека напонот на дел од електричното коло е еднаков на производот од јачината струјата што тече низ него и неговиот отпор. Константата на пропорционалност во (4),

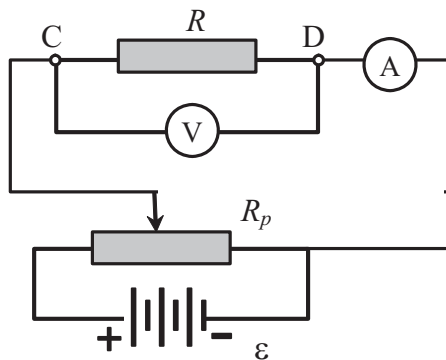
$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{S}, \quad (5)$$

која ги карактеризира особините на спроводникот е **електричниот отпор**.

Од равенката (4) се добива и јачината на струјата што тече во дел од струјното коло.

$$I = \frac{U}{R} \quad (6)$$

Јачината на струјата што тече во дел од струјното коло е правопрпорционална со напонот на краевите од спроводникот, а обратно пропорционална со отпорот на спроводникот. Тоа е **Омовиот закон за дел од струјното коло**.



Сл. 2.

Со користење на струјното коло, како на сл.2, може експериментално да се провери законот на Ом: $I = U / R$.

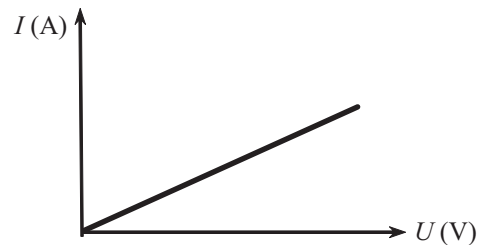
За да се испита зависноста на I од U , отпорот R се зема за постојан, на пример, $R=4\Omega$. Напонот на краевите од спроводникот (точките C и D) се менува со помош на изворот и отпорникот со лизгач R_p . Кога се постигнува $U=U_{CD}=2V; 4V, 6V$, тогаш јачината на струјата во спроводникот е $I= 0,5 A; 1A; 1,5A$. Јачината на струјата е поголема толку пати е поголем колку што и напонот на краевите на спроводникот.

Графикот на зависноста на јачината на струјата од напонот се вика **волтамперска карактеристика на спроводникот**. При постојана температура на металите таа е линеарна (сл.3). Тоа значи дека спроводливоста останува константна.

Равенката (6) дава можност да се определи единицата за електричен отпор. SI единицата за електричен отпор е 1Ω (ом).

$$1\Omega = 1 \frac{V}{A}.$$

Електричен отпор од 1Ω има спроводник во кој би течела струја од еден ампер кога напонот на неговите краеве изнесува еден волт.



Сл. 3.

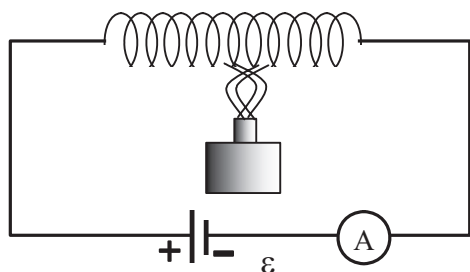
5.2.1. Зависност на отпорот од температурата

Како што видовме со равенката (5), отпорот на даден спроводник зависи од неговата материјална градба (ρ) и од димензиите на спроводникот: должината и наапречниот пресек. Меѓутоа, отпорот на спроводникот зависи и од некои надворешни фактори: температура, магнетно поле и др.

Зголемувањето на отпорот и спечифичниот електричен отпор со порастот на температура-

5. Електрична струја

та, врз основа на електронската теорија за спроводливоста на металите се должи на интензивирање на бројот на судирите при хаотичното движење, како на јоните на кристалната решетка така и на слободните електрони. Со зголемување на температурата се зголемува и брзината и амплитудата на осцилаторното движење на атомите и јоните во кристалната решетка што доведува до зголемен број судири.



Сл. 1.

Експерименталните мерења покажуваат дека специфичниот електричен отпор ρ , а со тоа и отпорот на спроводникот R расте линеарно со порастот на температурата е според законот:

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad (1)$$

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (2)$$

Во равенките (1) и (2) ρ_0 и R_0 соодветно се специфичниот електричен отпор и отпорот на спроводникот мерени на 0°C . ρ_t и R_t се вредности на истите величини на некоја температура на загревање од $t^\circ\text{C}$. α е **температурниот коефициент на отпорот** за даден температурен интервал.

Единицата за температурниот коефициент на отпорот е K^{-1} .

Од (1) и (2) за α се добива:

$$\alpha = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0 t}, \text{ односно } \alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t} \quad (3)$$

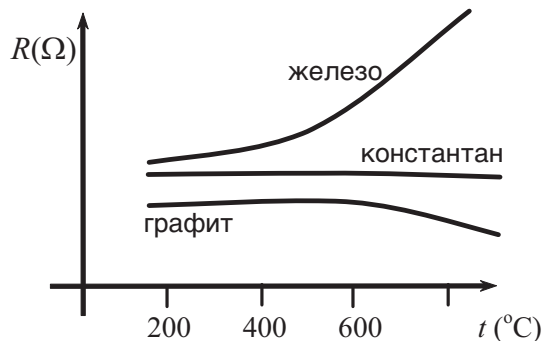
кој за даден спроводник може експериментално да се определи.

Температурниот коефициент на отпорот за металите е позитивен, што значи, со зголему-

вање на температурата нивниот отпор расте. Тоа миже да се види од опитот на сл.1. Со загревање на тенката челична жица намотана во вид на спирала, амперметарот A покажува дека јачината на струјата се намалува.

Постојат и такви спроводници, како што е, на пример, константанот и некои други легури, кај кои специфичниот електричен отпор не се менува со промена на температурата. Кај електролитите со зголемување на температурата, отпорот нелинеарно се намалува, за нив $\alpha < 0$. Кај полупроводниците $\alpha < 0$, само што кај нив со зголемување на температурата, намалувањето на отпорот е многу побрзо.

На сл. 2 графички е прикажана зависноста на отпорот од температурата на загревање кај железо, константан и графит.



Сл. 2. Зависност на електричниот отпор од температурата

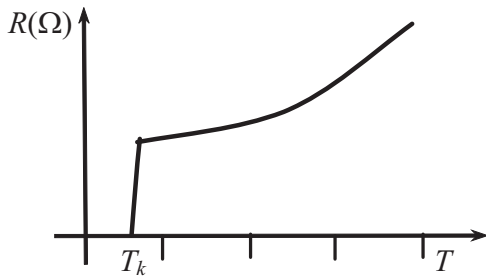
5. 2. 2. Суперспроводливост

Постојат мал број метали, легури и хемиски соединенија чиј специфичен отпор со намалување на температурата се намалува линеарно само до некоја температура наречена **критична температура**, на која отпорот нагло опаѓа (сл.3). Оваа појава е откриена во 1911 година од Кемерлин Онес. Појавата, позната како **суперспроводливост**, најпрво е откриена кај хемиски чистата жива.

Кај мал број материјали при температури блиски до апсолутна нула (-273°C), отпорот нагло опаѓа, односно добива занемарливо мали вредности. Температурата на која супстанци-

5. Електрична струја

јата преминува во суперспроводлива состојба се вика **критична температура на премин**.



Сл. 3.

На пример, легура од ниобиум, алуминиум и германиум има критична температура 20К. Секој суперспроводен материјал има своја критична температура што може да се види и од табелата 1

Табела 1.

титаниум	0.4 К	жива	4.1 К
ураниум	0.8 К	Олово	7.2 К
цинк	0.9 К	технециум	11.2К
алуминиум	1.2 К	ниобим-нитрат	15.2 К
ниобиум	9.2 К	галиум-ванадид	18.5 К

Битен услов за суперспроводливост е голема хемиска чистота на супстанцијата и мал број дефекти во кристалната решетка на примерокот. Постојењето на примеси и дефекти во решетката доведува до исчезнување на суперспроводните особини. Во струјно коло од суперспроводен материјал кој се наоѓа на температура пониска од критичната, полнежите поминуваат не наидувајќи на отпор па струјата може да тече многу долго. На пример, струја во суперспроводен прстен, предизвикана од краткотрајна електромагнетна индукција, ќе тече со години без електрично поле во него, односно без извор на струја, само под услов прстенот да се одржува на температура пониска од критичната.

Кога суперспроводникот е во состојба на суперспроводливост и се постави во магнетно поле, со постепено зголемување на полето спроводникот си ја зачувува состојбата на суперспроводливост сè до одредена вредност кога отпорот скоковито се зголемува и супер-

спроводливоста се нарушува. Тоа поле, се разбира може да потекнува и од струјата што протекува од суперспроводниот прстен, па нејзината јачина на некој начин мора да се ограничува. Јачината на магнетното поле кај кое се јавува скокот се вика **критична јачина на магнетното поле**.

Денес посебно значење имаат суперспроводниците со висока критична температура и кои се стабилни на магнетни полиња со голема моќ. Такви се, на пример, некои керамички материјали кои имаат критична температура блиска на собната - **високотемпературна суперспроводливост**. Суперспроводни легури добиени од ретки земји имаат критична температура 90 К. Суперспроводните материјали имаат широка примена во практиката. Со помош на супермагнетни калемии се создаваат магнетни полиња со ограмна моќност кои се користат при термојадрената синтеза (фузија), акцелераторите на елементарни честиици, нуклеарната магнетна резонанција, во железничкиот транспорт кај "магнетните душеци" и др.

ПРИМЕР 1. Во цилиндричен спроводник со дијаметар 1 mm^2 тече струја со јачина 2,5 А. Ако струјата тече само 1 мин, а) колакаво количество електричество поминало низ спроводникот? б) колкава била густината на струјата?

Решение. $\Delta t = 1 \cdot 60 = 60 \text{ s}$, $S = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

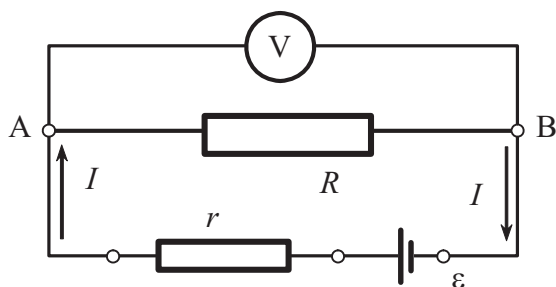
$$\Delta Q = I \Delta t = 2,5 \cdot 60 = 150 \text{ C}$$

$$J = I / S = 2,5 / 3,14 \cdot 10^{-6} = 0,8 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$$

5. 2.3. ОМОВ ЗАКОН ЗА ЦЕЛО СТРУЈНО КОЛО

Внатре во каков било извор постојат загуби на енергија кога низ него тече струја. Затоа на секој извор на електромоторна сила \mathcal{E} се припишува некој **внатрешен отпор** r . Низ изворот (сл. 1), кој претставува дел од струјното коло, тече истата струја, коко што тече низ потрошувачот и низ спроводниците. Затоа изворот на ЕМС може да се смета за спроводник, кој има свој отпор.

5. Електрична струја



Сл. 1.

Внатрешниот отпор на изворот зависи од карактеристиките на проводната средина во изворот. Отпорот на потрошувачот и спроводливите претставува *надворешен отпор* R . Внатрешниот отпор на изворот е прикажан со еден мал отпорник r , кој е вклучен заедно со изворот меѓу точките А и В. Бидејќи внатрешниот отпор на изворот произлегува од него, може да се смета дека сериски е поврзан со него. Падот на напонот во надворешниот дел од струјното коло ќе изнесува:

$$U_e = RI, \quad (1)$$

додека падот на напонот во изворот на електромоторна сила (од А до В преку r) ќе биде:

$$U_i = rI. \quad (2)$$

Падот на напонот во надворешниот дел на струјното коло и во изворот се врши на сметка на електромоторната сила на изворот, односно:

$$\varepsilon = U_e + U_i. \quad (3)$$

Со замена на $U_e = RI$ и $U_i = rI$ во равенката (3), се добива:

$$\varepsilon = RI + rI, \quad (4)$$

од каде:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (5)$$

Равенката (5) го претставува *Омовиот закон за цело струјно коло* и се добива врз основа на равенката (4). Внатрешниот отпор на изворот, како и неговата електромоторна сила, обично не зависат од јачината на струјата,

па за даден извор, нив може да ги сметаме за константни величини.

Ако се занемари отпорот на спроводниците разликата на потенцијалот на краевите на отпорникот R (IR) истовремено е и напон меѓу половите на изворот. Според тоа може да се напише:

$$U_e = \varepsilon - rI \quad (6)$$

Напонот на краевите од отпорникот толку повеќе ќе се разликува од електромоторната сила колку е поголема струјата во колото и колку е поголем внатрешниот отпор на изворот на струја.

Кога отпорот на спроводникот R е многу поголем во споредба со внатрешниот отпор на изворот, производот $I r$ практично е еднаков на нула, па $U_e \approx \varepsilon$.

Кај некои извори на струја приближната еднаквост на U и ε , речиси секогаш е исполнета не заради слабите струи во колото туку затоа што имаат мал внатрешен отпор $r \approx 0$. Таков пример има кај оловните акумулатори.

ПРИМЕР 1. Да се оредели внатрешниот отпор на изворот на струја во струјното коло прикажано на сл. 1.

Решение. Врз основа на равенката (4) ЕМС на изворот е: $\varepsilon = RI + rI$

Измерениот пад на напон на краевите на отпорникот R е:

$$U = IR$$

Со делење на овие две равенки се добива:

$$\frac{\varepsilon}{U} = 1 + \frac{r}{R}$$

Од каде се добива $r = R \left(\frac{\varepsilon}{U} - 1 \right)$

Прашања и задачи

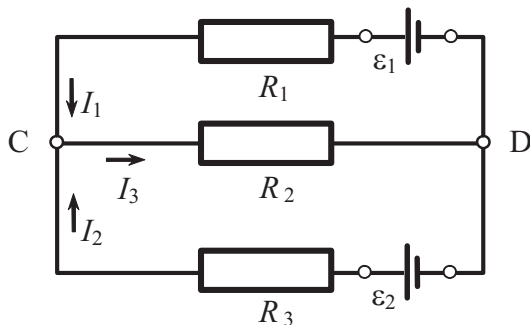
1. Кои величини ги поврзува Омовиот закон за цело струјно коло?
2. Кога настанува суперспроводливост?
3. Како зависи отпорот со температурата?
4. Каде се применуваат суперспроводниците?

5.3. КИРХОФОВИ ПРАВИЛА

Во затворено електрично коло тече струја. Покрај спроводниците и изворот на електромоторна сила ε , во колото може да се вклучени и други елементи што спроведуваат струја. На пример, тоа може да бидат мерни прибори, други спроводници, извори на струја итн.

Коло составено од елементи, така што секои два елемента од колотот меѓусебно сериски се поврзани, тогаш таквото електрично коло е *неразгрането*- просто. Низ сите елементи на неразгрането електрично коло тече струја со еднаква јачина.

Електричните кола што содржат јазли се викаат *разгранети* (сл. 1). Тие може да се разгледуваат како да се составени од повеќе прости кола. Делот од контурата ограничен меѓу два јазла се вика *гранка на разгранетото коло*. Точките во електричното коло, во кои се врзани најмалку три гранки се викаат *точки на гранење* или *јазли* на електричното коло.



Сл. 1. Разгрането струјно коло.

Нека разгледаме разгрането коло кое содржи три контури ($CR_1\varepsilon_1DR_2C$; $CR_2D\varepsilon_2R_3C$; и $CR_1\varepsilon_1D\varepsilon_2R_3C$), два јала (C и D) и три гранки ($CR_1\varepsilon_1D$; CR_2D ; и $CR_3\varepsilon_2D$) (сл. 1).

Во точката C струјата се разгранува на три дела: струја со јачина I_1 која тече низ спроводникот со отпор R_1 , струја со јачина I_3 која тече низ спроводникот R_2 и струја со јачина I_2 која тече низ спроводникот R_3 .

Договорено е струите што влегуваат во јазлите да носат позитивен знак (+), а струите

што излегуваат - да носат негативен знак (-). За јазолната точката C важи равенката

$$I_1 + I_2 = I_3 \text{ или } I_1 + I_2 - I_3 = 0, \quad (1)$$

односно

$$\sum_{i=1}^{i=n} I_i = 0 \quad (1a)$$

Првото правило на Кирхоф гласи: алгебарскиот збир на јачината на електричната струја во произволен јазол од едно разгрането коло е еднаков на нула. Овој закон е во согласност со законот за запазување на количеството електричество.

За разгрането струјно коло во чии гранки можат да се внесат произволен број извори на струја со точно определена електромоторна сила неопходно е да се примени **второто Кирхофово правило**. Тоа гласи: во затворено електрично коло, алгебарскиот збир на падовите на напоните во одделните гранки на затворената контура е еднаков на алгебарскиот збир од електромоторните сили на изворите вклучени во таа контура.

$$\sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i = \sum_{i=1}^{i=n} (UR)_i \quad (2)$$

За да ја објасниме суштината на овој закон ќе се послужи́ме со една од контурите, на пример, контурата $CR_2D\varepsilon_2R_3C$ од колото прикажано на сл. 2. Во наведената контура се вклучени еден извор на електромоторна сила ε_2 и два отпорника R_2 и R_3 низ кои течат струи со јачина I_2 и I_3 . Падот на напонот во гранката со отпор R_2 е R_2I_3 , а падот на напонот во гранката со отпор R_3 е R_3I_2 .

Ако за позитивна насока по контурата се земе насоката на часовниковите стрелки, тогаш струите I_2 и I_3 ќе имаат позитивна насока. Изворот ε_2 , исто така има позитивна насока. Применувајќи го Омовиот закон за гранките $CR_3\varepsilon_2D$ и CR_2D од контурата $CR_2D\varepsilon_2R_3C$, се добива:

$$R_2I_3 = V_C - V_D$$

$$R_3I_2 = \varepsilon_2 + V_D - V_C$$

5. Електрична струја

каде што V_C и V_D се потенцијалите во јазлените точки C и D. Со собирање на последните две равенки се добива

$$R_3 I_2 + R_2 I_3 = \varepsilon_2 . \quad (3)$$

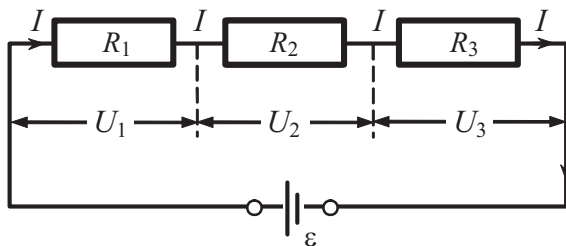
Последната равенка го прикажува второто Кирхофово правило применето на контурата $CR_2D\varepsilon_2R_3C$. Притоа да напомене дека строго треба да се води сметка за насоката на струите.

Ако избраната насока на обиколување се совпаѓа со насоката на струјата, тогаш падовите на напоните на гранките (IR) се земаат со позитивен знак, а ако не се совпаѓаат - со негативен.

Пред ε се става позитивен знак, ако при обиколувањето на електричното коло се оди од позитивниот кон негативниот пол на изворот. Во спротивно, на електромоторната сила на изворот ѝ се припишува негативен знак.

5.4. СЕРИСКО И ПАРАЛЕЛНО ПОВРЗУВАЊЕ НА ОТПОРИ

Кирхофовите правила наоѓаат примена при сериско или паралелно поврзување на отпори. Да разгледаме наједноставно електрично коло составено од отпори поврзани во серија. Нека отпорите R_1 , R_2 и R_3 се поврзани со извор на електричен напон U и низ секој од нив тече електрична струја со еднаква јачина I (сл. 1).



Сл. 1. Сериски поврзани отпори

Вкупната потенцијална разлика U во такво коло ќе биде еднаква на збирот од потенцијалните разлики на прикажаните отпори:

$$U = U_1 + U_2 + U_3, \quad (1)$$

каде што $U_1 = IR_1$, $U_2 = IR_2$, $U_3 = IR_3$,

односно

$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3). \quad (2)$$

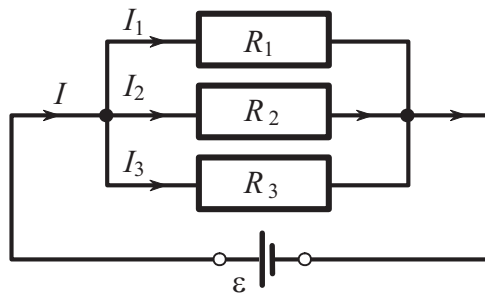
Според тоа, еквивалентниот отпор на сериски поврзаните отпори е еднаков на збирот од одделните отпори, т.е.

$$R = \frac{U}{I} = R_1 + R_2 + R_3. \quad (3)$$

Во општ случај, отпорот на еквивалентниот отпорник, со кој се заменуваат сите n сериски поврзани отпорници, ќе биде:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i . \quad (4)$$

За паралелно поврзани отпори, приложениот напон е еднаков на сите отпори, а јачината на струјата во одделните отпори е различна (сл.2).



Сл. 2. Паралелно поврзани отпорници

Со примена на првото Кирхофово правило јачината на електричната струја I што протекува низ неразгранетиот дел е еднаква на збирот од струите во одделните гранки:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Имено, јачината на електричната струја во одделните гранки е: $I_1 = U/R_1$; $I_2 = U/R_2$; $I_3 = U/R_3$... Според тоа:

5. Електрична струја

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}. \quad (5)$$

Вкупниот отпор, $R = U/I$, на паралелно поврзаните отпори изнесува:

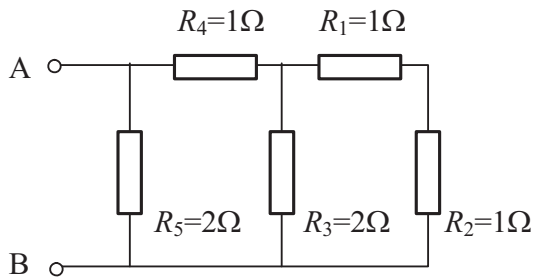
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}; \quad (6)$$

или во општ облик

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}. \quad (7)$$

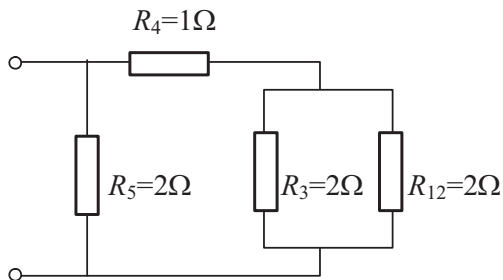
Од равенката (6) следува дека отпорот на паралелно поврзаните отпори е помал и од најмалиот од нив.

ПРИМЕР.1. Да се определи отпорот меѓу точките А и В на шемата прикажана сликата.



Решение.

Најпрво ја цртаме еквивалентната шема на струјното коло:



$$R_{12} = R_1 + R_2 = 2\Omega$$

$$\frac{1}{R_{123}} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_3}; \quad \frac{1}{R_{123}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1\Omega;$$

$$R_{123} = 1\Omega. \\ R_{1234} = R_{123} + R_4 = 2\Omega.$$

Вкупниот отпор во кругот изнесува:

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_{1234}} + \frac{1}{R_5};$$

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1\Omega \quad R_{AB} = 1\Omega$$

Прашања и задачи

1. Генератор на електрична струја со напон 220 V напојува мрежа за осветлување на една зграда која има паралелно поврзани светилки: 10 светилки со отпор $R_1=200\Omega$, 5 светилки со отпор $R_2=400\Omega$ и 10 светилки со отпор $R_3=500\Omega$. Отпорот на доводиот кабел од генераторот до зградата со светилките изнесува 0,5 Ω. Да се определи: Јачината на струјата која протекува низ кабелот што го спојува генераторот со зградата, напонот на влезот од зградата. (Одговор. Еквивалентниот отпор на сите 25 светилки изнесува:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R'} + \frac{1}{R''} + \frac{1}{R'''}; \quad R_e \approx 12\Omega$$

Вкупниот отпор во колото изнесува:

$$R = R_e + R_k = 12,5\Omega$$

а) Јачината на струјата низ кабелот изнесува:

$$I = \frac{U}{R} = 17,6\text{ A}. \text{ Оваа струја тече и низ еквива-}$$

лентниот отпор R_e

б) Напонот на влезот од зградата U_Z :

$$U_Z = U - U_k = U - IR_k = 211,2\text{ V}$$

2. За какви кола се однесува второто Кирхофово правило? Како гласи второто Кирхофово правило за дадена контура од разгрането струјно коло?

3. Дадени се отпори со еднаков отпор $R_1 + R_2 = 2\Omega$. При какво поповрзување ќе добиете помал отпор од 2Ω ?

5.5. ПРИМЕНА НА КИРХОФОВИТЕ ПРАВИЛА ПРИ ШУНТИРАЊЕ

Паралелното поврзување на отпори посебно е корисно кога од главното струјно коло треба да се одвои струја, што нејзината јачина во паралелно поврзаната гранка да изнесува само еден точно определем дел од јачината на струјата од главното струјно коло. Оваа споредна гранка се вика **шунт** (shunt). Отпрот на шунтот е однапред познат и тој изнесува $\frac{1}{9}$,

$\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ дел од внатрешниот отпор на амперметарот.

Така, на пример, ако со амперметарот треба да се мери струја со јачина која би го оштетила, тогаш во точките АВ (сл.1) се поврзува споредна гранка, т.е. шунт која има дополнителен отпор R_1 кој е n пати помал од отпорот R_2 на амперметарот, т.е. од отпрот во другата паралелна гранка која се одвојува од точката В.

Имено, ако отпорот на гранката во која амперметарот е $R_2 = nR_1$, тогаш врз основа на второто Кирхофово правило, т.е. од пропорцијата $I_1 : I_2 = R_1 : R_2$, се добива дека

$$I_2 = \frac{I_1}{n} \quad (1)$$

Тоа значи дека јачината на струјата I_2 во гранката во која е амперметарот е n пати помала отколку во шунтот. Како според првото Кирхофово правило јачината на струјата во неразгранетиот дел на колото е $I = I_1 + I_2$, од равенката (1) се добива $I_1 = nI_2$. Според тоа $I = nI_2 + I_2$ или

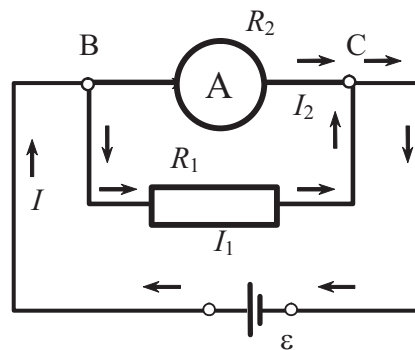
$$I = I_2 (n + 1) \quad (2)$$

На пример, ако односот на отпорите помеѓу амперметарот и шунтот е

$$n = \frac{R_2}{R_1} = \frac{9}{1} = 9,$$

односно $I = I_2(9 + 1)$ или $I = 10 I_2$.

Според тоа, јачината на струјата во неразгранетиот дел на струјното коло е десет пати поголема од вредноста што ја покажува амперметарот. На пример, ако јачината на струјата во струјното коло е 10 А, тогаш струјата што ќе тече низ шунтот, ќе има јачина од 9 А, а низ амперметарот ќе тече струја со јачина само од 1 А. На таков начин, мерното подрачје на амперметарот е проширено 10 пати. При мерењето на јачината на струјата, секоја поделка од скалата на мерното подрачје на амперметарот треба да се помножи со 10.



Сл. 2.

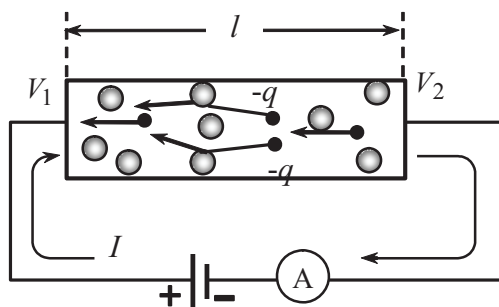
Ако, пак, со волтметарот треба да се мерат повисоки напони од оние кои се движат во границите на неговото мерно подрачје, потребно е во серија со волтметарот да се вклучи дополнителен отпорник, наречен предотпорник. Отпорот на предотпорникот е однапред избран и тој е поголем 9 пати, 99 пати, и 999 пати од внатрешниот отпор на волтметарот.

Прашања и задачи

1. Што е тоа шунт и за што се користи?
2. Колку треба да изнесува отпорот на шунтот кај амперметар со скала 1 А и внатрешен отпор на амперметарот 0,1 Ω, ако треба да се прошири мерното подрачје до 10 А.
(Одговор: 0,01 Ω)
3. Галванометар со отпор 3900 Ω има шунт чиј отпор е 1/99 од отпорот на галванометарот, аналогно на сл. 2. Да се определи отпорот на паралелно врзаниот шунт и галванометар.
(Одговор: 39 Ω)

5.6. РАБОТА И МОЌНОСТ НА ЕЛЕКТРИЧНАТА СТРУЈА. ЦУЛ-ЛЕНЦОВ ЗАКОН

При насоченото движење на електричните полнежи низ спроводникот, тие се судруваат со неговите честици и притоа им предаваат дел од својата кинетичка енергија која се трансформира во други видови енергија. Така, на пример, електричната енергија се претвора во внатрешна и светлинска кај решето, пеглата, сијалиците, кај електромоторите во механичка итн.



Сл.1.

Нека спроводник (отпорник) со должина l се вклучи во струјно коло (сл.1). Меѓу краевите на спроводникот постои потенцијална разлика ($V_1 - V_2 = U$ напон), а низ него протекува струја со јачина I .

За време t низ спроводникот ќе се пренесе количество електричество q и силата на електричното поле ќе изврши работа:

$$A = Fl = qEl = qU. \quad (1)$$

која е наречена *работа на електричната струја*.

При стационарна струја со јачина I , количеството електричество q кое протекува за време t може да се изрази со јачината на струјата $q=It$. Според тоа, работата на електричната струја (ослободено количество топлина $\Delta Q=A$) во спроводникот е:

$$\Delta Q = A = UI \Delta t. \quad (2)$$

Равенката (2), ако за спроводниците важи Омовиот закон ($U=IR$), постанува:

$$\Delta Q = I^2 R \Delta t. \quad (3)$$

Оваа формулација кажува дека ослободената топлина е пропорционална со отпорот R и се подразбира дека при различните отпори во кругот јачината на струјата се одржува константна. Кога, пак, напонот на краевите на спроводникот е константен, се користи:

$$\Delta Q = \frac{U^2}{R} \Delta t, \quad (4)$$

Тоа значи, при еднаков напон на спроводниците со различен отпор ослободената топлина е поголема во спроводникот чиј отпор е помал. Равенките (2), (3) и (4) се познати како **Цул-Ленцов закон**.

Претворањето на енергијата на електричната струја во топлина независно еден од друг го изучувале англискиот физичар Цул и рускиот физичар Ленц.

Од равенката (3) се гледа дека во спроводниците со поголем отпор се развива поголема топлина и дека таа е пропорционална со квадратот од јачината на струјата. Затоа, при пренесување на електрична енергија треба да се користат слаби струи и мали отпори. Пренесувањето на електрична енергија се одвива со далноводи со многу висок напон. За да имаат помал отпор жиците на далноводите се од материјал со мал специфичен отпор. Во тој случај, изгубената енергија поради нивно загревање ќе биде помала. Топлотното дејство на електричната струја наоѓа широка примена. На тој закон се заснова и работата на топлините осигурувачи, кои сервиски се вклучени со потрошувачот. Ако јачината ја надмине дозволената вредност, спроводникот во осигурувачот се загрева и се топи, притоа електричниот круг се прекинува. Кај греалките се користат јаки струи кои се пуштаат низ спроводници со голем отпор.

Моќност (ефект) на електричната струја е работа што ја извршува електричната струја во единица време:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UI t}{t} = UI. \quad (5)$$

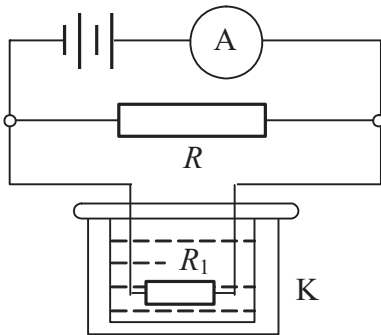
5. Електрична струја

Единицата за моќност на електричната струја во SI е 1 W (ват).

$$P = \frac{A}{t}; \quad 1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}. \quad (1)$$

Електричен потрошувач има моќност од 1 W ако кога на неговите краеве постои напон од 1 V, низ него тече постојана струја со јачина од 1 A.

ПРИМЕР 1.



Калориметарски сад K за загревање на водата има отпорник чиј отпор е $R_1 = 60 \Omega$. Тој е приклучен во струјно коло, како што е прикажано на сликата. Амперметарот A покажува струја со јачина од 6 A. Електричниот отпор на отпорникот R изнесува 30Ω . Да се определи одвоеното количество топлина за време од 5 минути

Решение. $R_1 = 60 \Omega$, $R = 30 \Omega$, $I_a = 6 \text{ A}$, $t = 5 \cdot 60 \text{ s}$

Најпрво треба да се определи јачината на електричната струја (I_1) која поминува низ жичката. Бидејќи жичката со отпор R_1 и електричниот отпор R се сврзани паралелно, следуваат равенките:

$$I_a = I_1 + I; \quad I_1 R_1 = IR$$

каде што со I_a е означена струјата низ амперметарот, а I струјата низ отпорникот R . Со решавање на системот равенки (непознати I_1 и I), се добива:

$$I_1 = \frac{1}{3} I_a = 2 \text{ A}$$

Количеството топлина кое се одвојува на жичката со електричен отпор R_1 , изнесува:

$$Q_1 = I_1^2 R_1 t.$$

ПРИМЕР 2. Бакарен спроводник, споен меѓу изворот на електрична струја и потрошувачот, треба да се замени со спроводник со иста должина од алуминиум. Колкав треба да биде напречниот пресек на спроводникот од алуминиум во однос на напречниот пресек на спроводникот од бакар за да остане непроменета загубата на електрична енергија издвоена во вид на топлина.

Специфичниот електричен отпор на бакарот е $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$, а на алуминиумот $2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$.

Решение:

$$\rho_1 = 2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$\rho_2 = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$R_1 = \rho \frac{l}{q_1} \quad R_2 = \rho \frac{l}{q_2}$$

$$Q_1 = \frac{U^2}{R_1} t \quad Q_2 = \frac{U^2}{R_2} t$$

Од условот на задачата треба:

$$Q_1 = Q_2$$

односно
$$\frac{U^2}{R_1} t = \frac{U^2}{R_2} t; \quad \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2}$$

или
$$\frac{q_1}{\rho_1 l} = \frac{q_2}{\rho_2 l}, \quad \frac{q_1}{q_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}}{1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}} = 1,64$$

ПРАШАЊА И ЗАДАЧИ

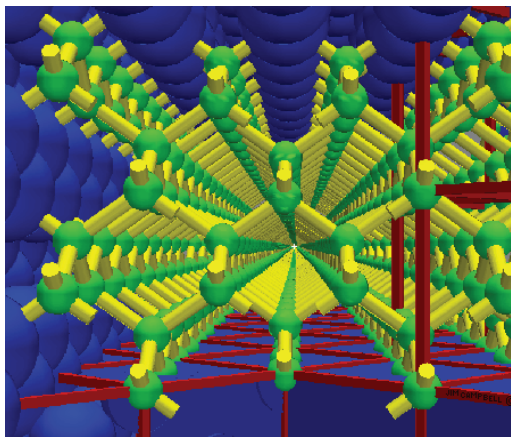
1. Што кажува Џул-Ленцовиот закон и под кои услови важи?

2. Со воведување на електричниот отпор кој го изразува Џул-Ленцовиот закон се иде до противречни заклучоци: ослободената топлина е пропорционална или обратно пропорционална со отпорот на спроводникот. Што е во прашање?

6. 1. ПОЛУСПРОВОДНИЧКИ МАТЕРИЈАЛИ



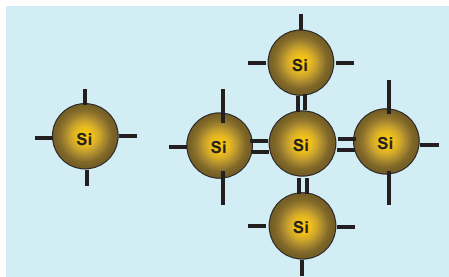
Полупроводниците имаат својства кои зависат од многу надворешни фактори (надворешен напон, светлина, температура, притисок). Оттука и нивната огромна примена. Науката за полупроводниците го овозможила овој брз напредок на човештвото. Продуктите од сликиве погоре не постоеја во времето на младоста на нашите баби и дедовци. Примената на полупроводниците овозможила брза замена на вакуумските цевки со соодветни полупроводнички направи.



Сл. 1. Тродимензионална кристална решетка на чистиот силициум. Атомите на силициумот се зелените топчиња. Жолтите стапчиња се валентните врски.

Уште во електростатиката спомнавме дека постојат материјали кои ја спроведуваат електричната струја многу подобро отколку изолаторите, а многу послабо од спроводниците, и се нарекуваат **полупроводници**.

Веќе кажавме дека цврстите тела имаат кристална структура која подразбира под редени атоми во просторот (сл. 2).



Сл. 2. Дводимензионална решетка на чистиот силициум. Од секој атом излегуваат 4 вакви врски.

Додека кај металите бројот на слободните електрони е приближно еднаков на бројот на атомите што се врзани во металот, помножен со неговата валенција, кај полупроводниците тој број е значително помал и се менува во зависност од условите. Така, полупроводниците во одредени услови можат да се однесуваат како добри спроводници, а во други услови како изолатори.

Полупроводник кој најмногу се користи во електрониката е хемискиот елемент силициум, и тоа во чиста форма и во форма со додатоци од други елементи, наречени **допинзи**. Ќе говориме само за силициумот бидејќи тоа е засега најзастапената комерцијална полупроводничка технологија.

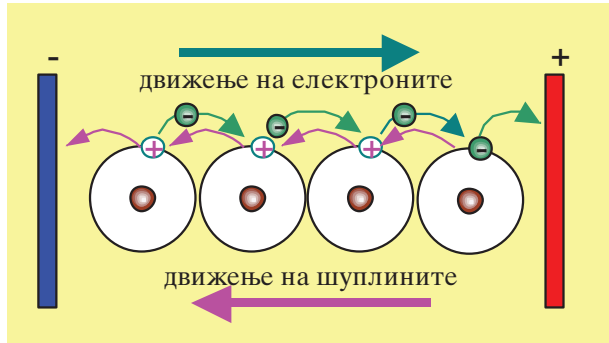
Силициумот е четиривалентен елемент кој формира цврсто тело со врзување со 4 соседни силициумови атоми. Чистиот, недопингуван полупроводник, силициум, се вика полупроводник со сопствена спроводливост или **СОПСТВЕН ТИП** силициум.

Сопствена спроводливост

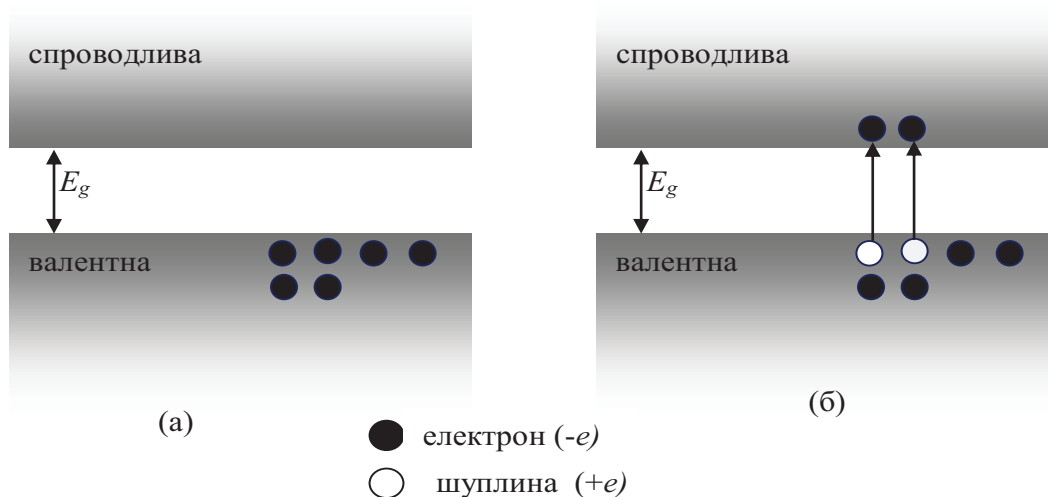
Да пробаме да ја разбереме зонската распределба на електроните кај полупроводниците со помош на сликата 3). Електроните од чистиот полупроводливик целосно ја исполнуваат валентната зона и делумно ја пополнуваат спроводливата зона.

Овие две зони се разделени со забранетата зона E_g . Ако им се додаде енергија однадвор, електроните од валентната зона можат да ја прескокнат забранетата зона и да се населат во спроводливата. Таму тие стануваат спроводливи електрони.

Испразнетото место во валентната зона (бели топчиња во дијаграмот 3б) се однесува како позитивен полнеж и се нарекува **шуплина (празнина)**. Значи, кај чистите полупроводливици спроводливоста се должи на **создавање** на парови **електрон-шуплина**. Чистите полупроводливици имаат спроводливост од



Сл. 4. Електронска и шуплинаска струја во полупроводник под напон.



Сл. 3. (а) Претстава за енергетските зони (зонски дијаграми) за полупроводливиците. (б) Електроните (црните топчиња) при дадени услови можат да прескокнат од валентната.

сопствен тип.

За да го разбереме механизмот на спроводливоста на полупроводниците, ќе замислиме наредени атоми од кристална решетка во електрично поле. Полето ни е потребно за да ја насочиме патеката на електронот (тој ќе се движи кон анодата (+)). Ако при одредени услови еден електрон се ослободил од еден од атомите, тој зад себе оставил испразнето место кое се однесува како да е позитивен електричен полнеж, сврзан за решетката (сл. 4). Тоа место има тенденција да врзе електрон, па затоа се нарекува **шуплина**.

Шуплината може да се пополни со електрон од соседниот атом, така што сега кај вториот ќе настане шуплина, и така натаму со ред. Потоа вториот ќе си пополни од третиот, па кај него ќе дојде шуплината. На тој начин електронот ќе се движи во една насока а шуплината (испразнетото место) како да се движи во спротивната насока. **Значи, како носители на струјата кај полупроводниците се јавуваат и електроните и шуплините.**

6. Полупроводници

Периодичен систем на елементите

	1A																	0			
1	H																	He			
2	Li	Be																	Ne		
3	Na	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VII						IB	II B	III A	IV A	V A	VI A	VII A	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr			
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113								

* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
+ Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

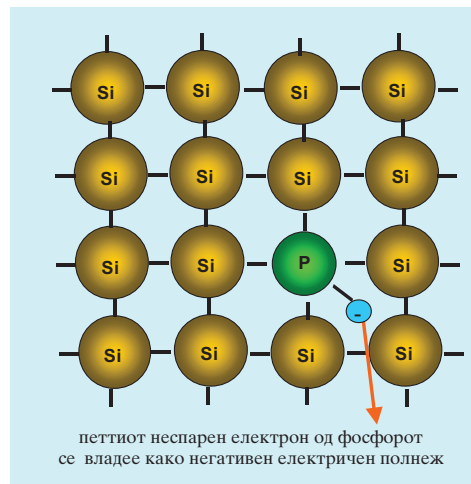
Сл. 5. Типични полупроводливици во елементарна форма во периодниот систем се елементите од IV-тата група, Si, Ge и Sn (жолта рамка). Со допингување на Si со тровалентни атоми (елементи од третата група), се добива P-тип Si (сина рамка). Со допингување со петвалентни атоми од петтата група, се добива N-тип Si (црвена рамка).

Полупроводливиците можат да бидат во елементарна форма, а може да бидат и дво и повеќеатомски соединенија. Од елементарните полупроводливи најтипични се оние од четвртата група на периодниот систем на елементите (сл. 5), и тоа Si (силициумот), Ge (германиумот) и Sn (сивиот калај).

Примесна спроводливост

Спроводливоста на чистиот силициум е многу мала, па може да се зголеми со додавање на атоми-примеси од некој друг елемент. Ваквата спроводливост се нарекува примесна спроводливост. Во зависност од видот и валенцијата на хемискиот елемент што се користи како допинг (додаток), полупроводниците можат да бидат од **P-тип** (позитивен тип) или **N-тип** (негативен тип).

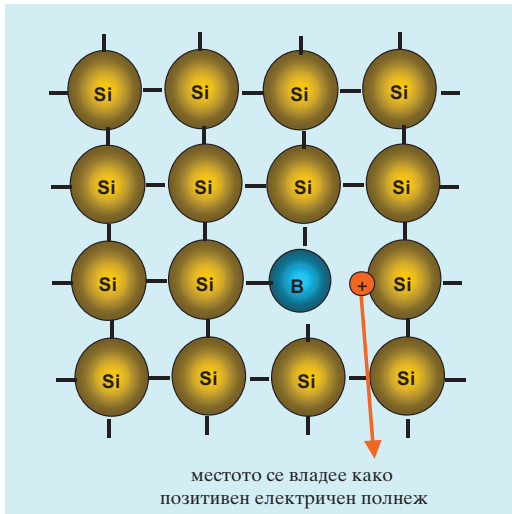
N-тип (негативен тип) силициум се добива при допингување со атоми со повисока валенција од силициумот како, на пример, петвалентниот фосфор (сл. 6).



Сл. 6. Слободен електрон кај N-тип силициум.

Така при формирањето на кристалот од силициум може да се случи или намерно да се направи во кристалната решетка на силициумот едно место на Si да биде заменето со фосфорен атом. Таквото место лесно може да го ослободи неспарениот електрон од петтата валенција на фосфорот. Така, кај полупроводникот постои поголема концентрација на слободни електрони отколку кај сопствениот тип, па затоа се нарекува негативен (N)-тип полупроводник.

P-тип (позитивен тип) силициум се добива при допингување со атоми со пониска валентност од силициумот (на пример, тривалентен бор).



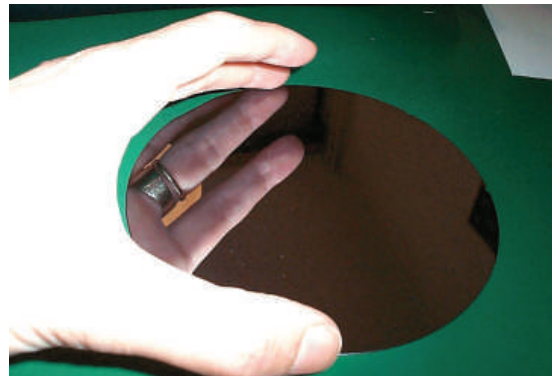
Сл. 7. Шуплина кај P-тип силициум.

Така, при формирање на кристалот од силициум може да се случи едно место во кристалната решетка на силициумот да биде заменето со тривалентниот јон на бор (сл. 7). На тоа место постои еден електрон од соседен силициумов атом кој не си добил “рачичка” од соседот (борот) бидејќи тој има само 3 раце. Ваквото место се однесува како позитивен полнеж кој има тенденција да зароби електрон. Ваквите полупроводници имаат повеќе шуплини отколку сопствениот тип, па затоа се нарекуваат P-тип полупроводници. Допингувањето на чистиот силициум, за да се добијат P и N силициум, се постигнува на многу различни начини. За некои намени тоа се прави уште додека силициумот е растопен, па тогаш се додава супстанцијата за допингување. Кога ќе се стврдне силициумот, тогаш атомите од допингот се вградуваат во решетката и прават P или N тип силициум.

Друг многу чест начин на вградување допинг во основната супстанција (силициумот) е најмногу застапен во микроелектронската индустрија со помош на бомбардирање на основната супстанција со забрзани атоми од допингот. Така, ако се доволно брзи допинг-честиците, тие пробиваат низ повр-

шината и влегуваат во внатрешноста на материјалот. Таму тие се вградуваат во него и создаваат нови слободни електрони или шуплини.

Полупроводниците се користат во електрониката и микроелектрониката (електронски направи со микрометарски димензии) за правење диоди, транзистори, чипови и друго. На сликата 8 е дадена таканаречена вафла (тенко пресечен кружен диск) од чист силициум кој понатаму се користи за правење на чипови.



Сл. 8. Полупроводник од силициум. Од него се прават чиповите за компјутерите

Дајте значење на следниве физички поими. Доколку е потребно, посочете и примери.

- Полупроводници
- формирање шуплини
- сопствен тип спроводливост
- примесна спроводливост
- допингување (P тип и N тип).

6. 2. PN-КОНТАКТ

Добивање PN-контакт

Самото име кажува дека таа се состои од контакт помеѓу два полупроводника, од кои едниот е од P-тип, а другиот од N-тип. При воспоставувањето контакт помеѓу P-полупроводникот (кој се однесува како да има вишок на слободни позитивни полнежи - шуплини) и N-полупроводникот (кој се однесува како да има вишок електрони),

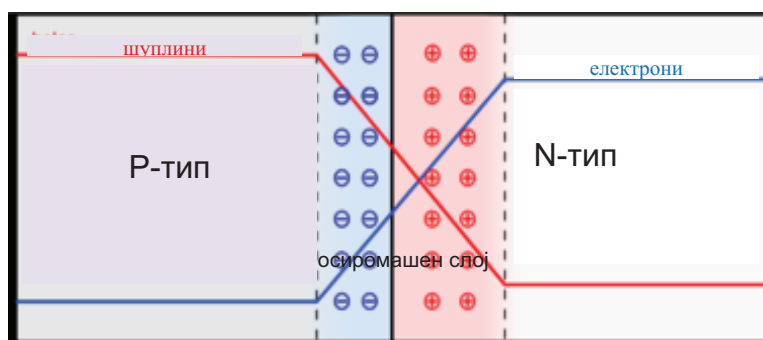
6. Полупроводници

контактот PN не може да се воспостави со едноставно физичко спојување или лепење на двата типа полупроводници. До формирање на PN контакт може да дојде при самото фабрикување на полупроводникот. Така, на пример, ако имаме силициум (Si) од сопствен тип, па од едната страна го бомбардираме со јони од бор-В, т.е. го допингуваме со акцепторски атоми, а од другата страна со атоми на фосфор-Р, т.е. го допингуваме со донорски атоми за да го претвориме сопствениот тип на Si во N-тип силициум, тогаш ќе дојде до формирање на PN-контакт. Постојат и многу други начини на создавање на PN контакт. Сепак, идеален PN-контакт најлесно се остварува ако полупроводникот се прави во форма на тенок филм (слој). Тогаш, ако при создавањето на слоевите, т.е. при нивното постепено растење, чистиот полупроводник до една одредена дебелина се допингува со донорски атоми, а потоа атомите од донорот се заменат со акцепторски атоми, тогаш доаѓа до формирање на резок PN-контакт.

Внатрешни промени во PN-контактот

Во P-полупроводникот секако дека има поголема концентрација на шуплини, а во N-тип полупроводникот има поголема

концентрација на електрони, па затоа на



Сл. 2. На границата на спојот се формира слој осиромашен со носители. Неговата спроводливост е намалена, па се нарекува и бариерен слој. Црвената линија кажува како се менува концентрацијата на шуплините низ целата должина на PN полупроводникот. Сината линија укажува на промената на концентрацијата на електроните.

местото на спојот доаѓа до раздвижување на основните носители. Така, дел од шуплините од P-типот ја преминуваат границата и по пат на дифузија одат на местото каде што нивната концентрација е пониска (во N), а дел од електроните од N-типот ја поминуваат границата и се населуваат во P-делот. На тој начин границата помеѓу P и N ќе создаде слој кој е осиромашен со основните носители (електрони и шуплини). Во граничната област, од каде што носители по пат на дифузија мигрираат преку границата, останува некомпензиран врзан просторен полнеж. Бидејќи како да е исчистен од носители, неговата спроводливост ќе биде намалена. Затоа тој се нарекува осиромашен слој, бариерен слој или запорен слој (осиромашен слој).

PN-контакт на надворешен напон

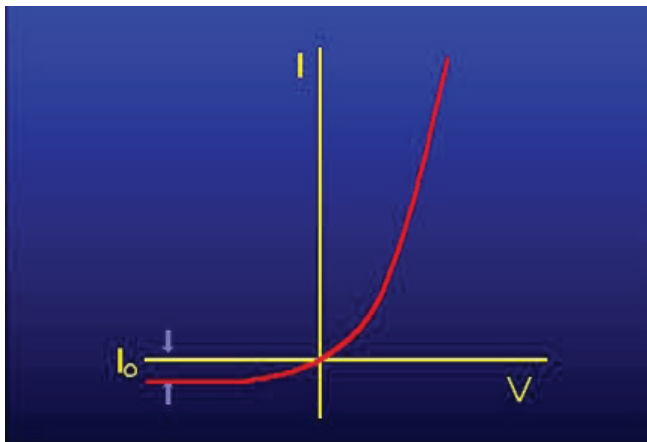
Ако P го приклучиме за (+) потенцијал а N за (-), т.е. го поларизираме право, тогаш електрони од изворот ќе доаѓаат во N-делот и ќе ги неутрализираат шуплините на граничниот слој (сл. 3а). Истовремено, електроните од граничниот слој од P-делот ќе бегаат кон позитивниот поларитет од изворот, па дебелината на осиромашениот (запорниот) слој ќе биде сè потенка и послаба. Тогаш струјата ќе може да потече низ PN-границата, па светилката С ќе светне (сл. 4а).

Ако PN-контактот се вклучи на инверзен напон (сл. 3б), така што P-делот ќе биде на негативниот потенцијал а N-делот на позитивниот, електроните од изворот нема да можат да поминат низ бариерниот слој, зашто ќе бидат одбиени од електроните на кои наидуваат на бариерата. Во овој случај низ PN-контактот нема да може да тече струја, па светилката С нема да засвети (сл. 4б).

Диодата се користи исто како и вакуумската диода, за исправување на наизменичен напон. Пропустливата насока на диодата е означена со насоката на стрелката од нејзиниот симбол (сл. 3а), а непропустливата е од обратната страна на вертикалната црточка (сл. 4б).

Волт-амперска (VA) карактеристика на диода

Зависноста на струјата (I) низ еден медиум од промената на напонот (V) на неговите краеве се нарекува **волт-амперска карактеристика**. Волт-амперската карактеристика на PN -контактот е нелинеарна (се разликува од права линија како што дава Омовиот закон за обичен отпорник). За негативни напони (сл. 5) струјата е сосем мала, додека, пак, за позитивни таа добива многу поголеми вредности кои растат со зголемување на напонот.



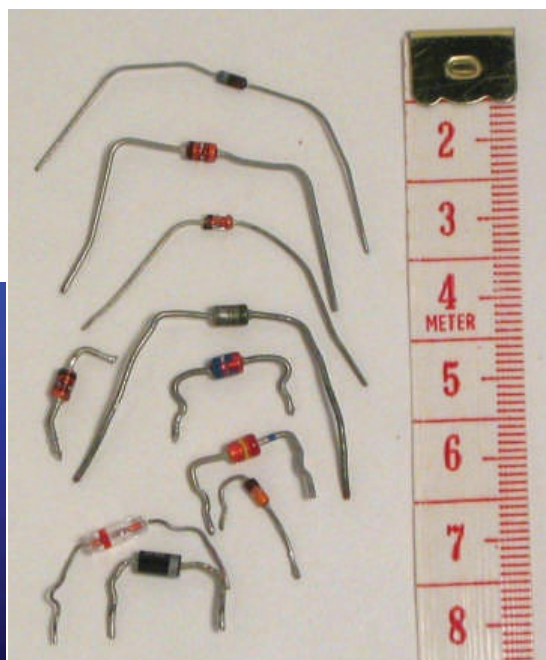
Сл. 5. Нелинеарна VA карактеристика на полупроводничка диода.

Теориски било најдено дека волт-амперската карактеристика за PN контакт може да се претстави со следнава зависност

$$I = I_0 (e^{eV/kT} - 1)$$

Каде што I_0 се нарекува инверзна струја на заситување (сл. 5). Се јавува при големи инверзни напони, а со натамошно

зголемување на инверзниот напон, таа не се менува). Во формулата e е полнежот на електронот, k - болцмановата константа, а T е апсолутната температура.



ЛАБОРАТОРИСКА ВЕЖБА:

Снимање на волтамперската карактеристика на PN -полупроводничка диода

Потребно:

- 1) батерија од 4,5 V.
- 2) отпорник со лизгач или потенциометар
- 3) PN -диода
- 4) прекинувач
- 5) волтметар
- 6) амперметар

6. Полупроводници

Поврзување

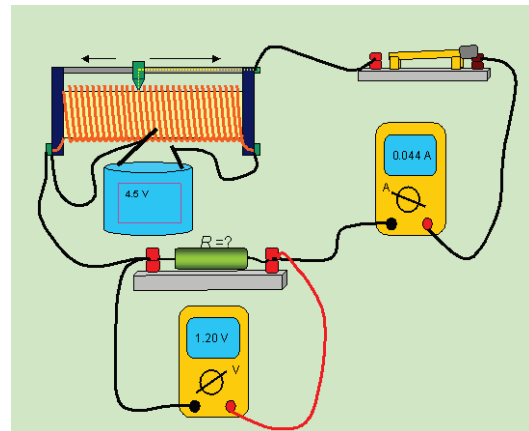
Батеријата се врзува со отпорникот во потенциометарски спој. Потоа, напонот од лизгачот и од едниот крај на потенциометарот се врзува во круг со прекинувач, амперметар и со PN-диодата. На крајот се врзува волтметарот паралелно со диодата.

Мерење

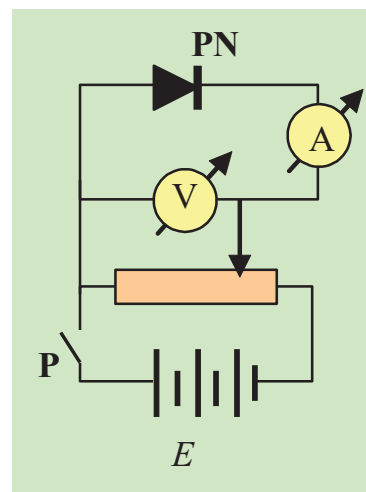
Се поместува лизгачот на потенциометарот за да се добијат напони 0 V, 0,5 V; 1 V; 1,5 V; 2 V; 2,5 V; 3 V 4,5 V, а притоа, за секоја вредност на напонот се чита вредноста на струјата. Вредностите се внесуваат во табела. Потоа се менува поларитетот на батеријата (се менуваат + и -), и постапката на промени на напонот за по половина волт се повторува за инверзните напони на PN, и притоа се запишуваат струите за секој напон.

Прикажување на резултатите во табела

Број на мерењето	Напон V[V]	Струја I [A]
1	-4,5	
2	-4,0	
3	-3,5	
9	0	
10	+0,5	
11	+1	
18	+4,5	



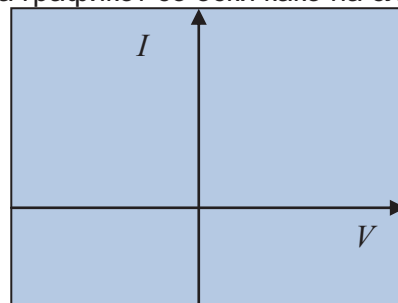
Скица на поврзување

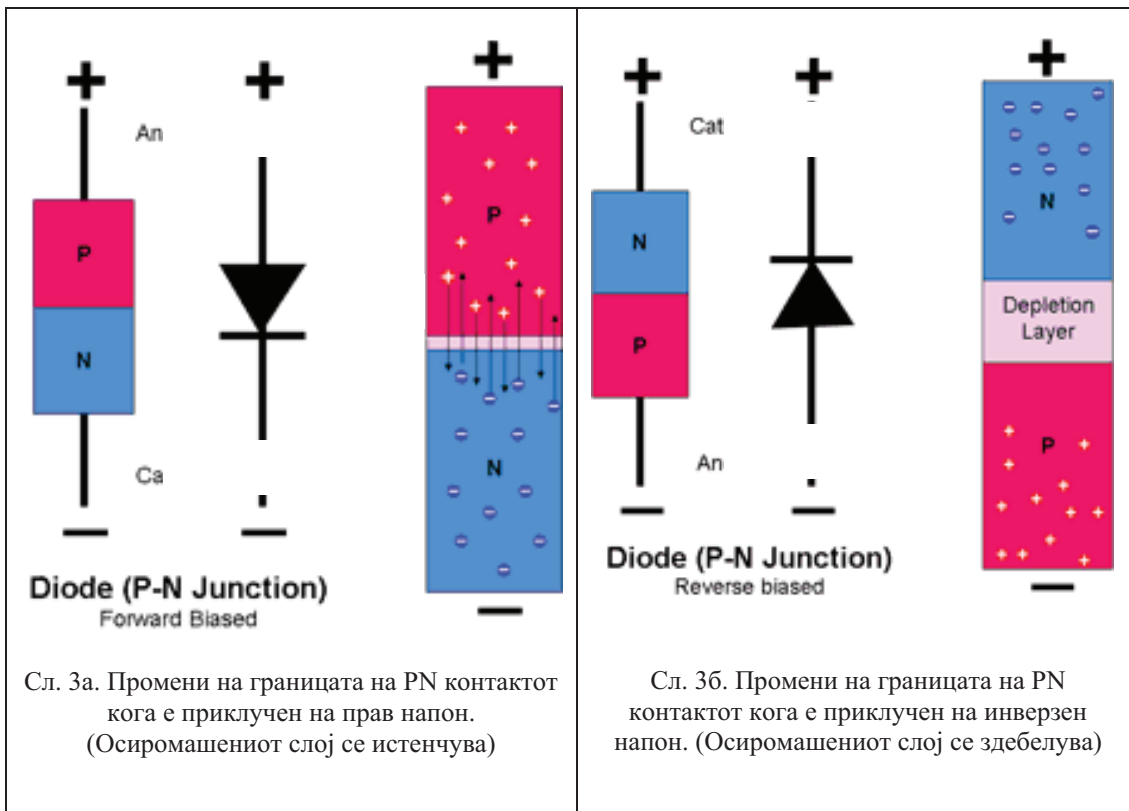


Шема на поврзување.

Графички приказ на резултатите

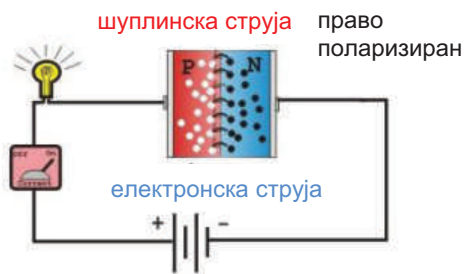
Паровите од вредности (V , I) се внесуваат на на графикот со оски како на сликата:



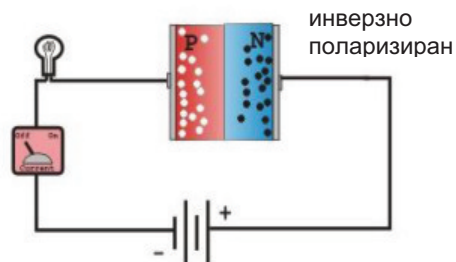


Сл. 3а. Промени на границата на PN контактот кога е приклучен на прав напон. (Осиромашениот слој се истенчува)

Сл. 3б. Промени на границата на PN контактот кога е приклучен на инверзен напон. (Осиромашениот слој се здебелува)



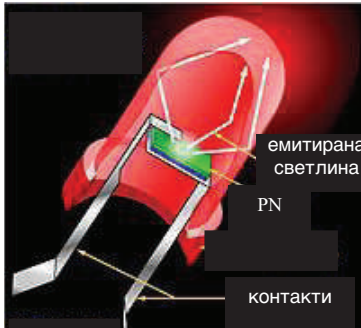
Сл. 4а. Ако PN-контактот е правополаризиран, тогаш светилката ќе засвети.



Сл. 4б. Ако PN-контактот е инверзно поларизиран, светилката нема да засвети.

6.3. ДИОДИ, ФОТОДИОДИ, LED-ДИОДИ

Light Emmiting Diode (LED) се состои, исто така, од *PN*-контакт (сл. 1). Некои диоди можат да емитураат светлина а други, пак, можат да ја детектираат, па се нарекуваат фотодиоди. Работи на принципот на ослободување на светлина која се создава при релаксација на атомите при враќање на возбудените електрони во основното ниво. ЛЕД диодите се употребуваат како индикаторски светилки кај многу електронски уреди. Ги има како мали зелени и црвени светленца што служат како индикатори на работата на компјутерот, тастатурата, телевизорот, музичкиот систем и др.



Сл.1. Градба на ЛЕД-диодата

Иднината на ЛЕД диодата е блескава. Научниците добиваат диоди кои според способноста да произведуваат светлина се повеќе им се приближуваат на обичните и халогените светилки, па се очекува набргу сосема да можат да ги заменат (сл. 2). Инаку ЛЕД светилките трошат околу 50 пати помалку електрична енергија за истото осветлување а траат несразмерно подолго.



Сл. 2. ЛЕД светилките ќе ги заменат обичните.

Покрај тоа, од *PN*-контакт се направени и разните сензори кои се чувствителни на

промена на осветлувањето, инфрацрвените детектори за гледање ноќе, детекторите за радиоактивни зрачења, и многу други.

Фотодиоди и фотоволтаични ќелии (PV)

Ако *PN*-контактот се осветли, тогаш светлинските кванти им даваат дополнителна енергија на електроните од валентната зона да прескокнат во спроводната. Така, со помош на светлина со енергија ($h\nu$), доволно голема за да им даде на електроните од валентната зона можност да ја прескокнат забранетата зона, се генерира напон. Поврзано во коло со потрошувач, ваквиот уред генерира и струја, па според тоа, електрична енергија. Постојат две примени од ова својство: фотодиоди и фотоволтаични ќелии.

Фотодиодите можат да служат како сензори на светлински и инфрацрвени и UV зрачења. Вашиот телевизор се контролира со далечински управувач преку ваква фотодиода. Невидливите инфрацрвени зраци пренесуваат на далечина кодирани информации кои се претвораат во аналогни струи.



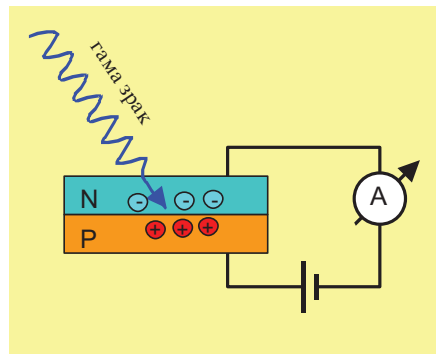
Сл. 3. Фотоволтаичните (соларни) ќелии од првата Македонска соларна електрана "СИЕТО" во близината на Скопје (Кадино).

PN-контакт до неодамна се користеше за правење на фотоволтаични ќелии. Денешните ќелии од силициумовата технологија се

прават од PIN-контакти (P-тип, I-сопствен тип (недопингуван) и N -тип).

На сликата 3 се дадени **фотоволтаични (соларни) ќелии** од полукристален силициум, кои ја претвораат сончевата енергија во електрична. Во развиениот свет никнуваат сè поголем број сончеви електрични централи. Во Македонија засега има една соларна електрична централа во селото Кадино, во близината на Скопје.

За да се заштити од глобалното затоплување поради прекумерната емисија на јаглендиоксидот, на светот му преостанува да направи замена на енергијата што се добива од јагленот и нафтата со енергијата од сонцето.



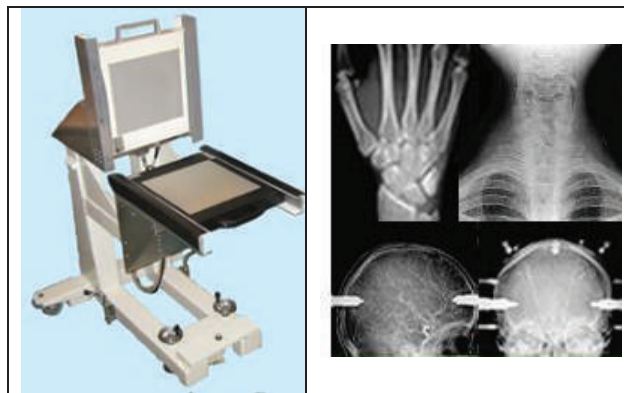
Сл. 4. Една упростена шема на полупроводнички детектор за гама зрачење.

Полупроводнички детектори на јонизирачки зрачења

Полупроводничките детектори се состојат од силициумова *PN*-диода, и се користат за детекција на рендгенско или гама-зрачења.

На местото на *PN*-контактот, веќе видовме, дека се формира бариерен слој кој ги попречува електроните и шуплините да минуваат и да даваат струја. Секогаш кога во *PN*-слојот упаѓа гама-зрак, поради јонизирачката способност ќе се произведат електрони и шуплини (сл. 4). Нивното присуство ќе ја зголеми спроводливоста на *PN*-контактот и ќе може да потече струја. Струјата се регистрира, а со дополнителна електроника се покажува големината на зрачењето.

На местото на *PN*-контактот, веќе видовме, дека се формира бариерен слој кој ги попречува електроните и шуплините да минуваат и да даваат струја. Секогаш кога во *PN*-слојот упаѓа гама-зрак, поради јонизирачката способност ќе се произведат електрони и шуплини (сл. 4). Нивното присуство ќе ја зголеми спроводливоста на *PN*-контактот и ќе може да потече струја. Струјата се регистрира, а со дополнителна електроника се покажува големината на зрачењето.



Сл.5 . Полупроводнички детектор на фирмата Bioscan SA, за дигитално рендгенско снимање (наместо слика на филм се добива дигитална слика).

ПОЛУСПРОВОДНИЧКИ ИСПРАВУВАЧ

Диодата се користи за исправувачи за наизменичен напон (напон при кој половите постојано си го менуваат знакот). Пропустливата насока на диодата е означена со насоката на стрелката од нејзиниот симбол (сл. 3 од претходната лекција). Непропустливата е од страната на вертикалната цртичка.

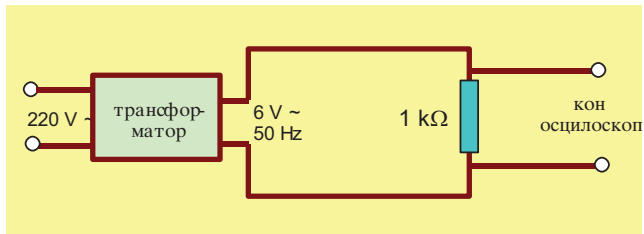
Исправувачот може да се изведе со се прави со една полупроводничка диода, еден електролитски кондензатор (со капацитет

6. Полупроводници

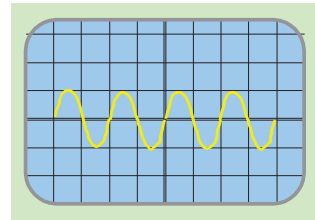
околу $10 \mu\text{F}$), еден отпорник и спроводни жици. За да можете да го видите исправувачкото дејство, потребени се еден трансформатор од 6V и еден осцилоскоп.

(а) За да се забележат промените на наизменичната струја, се врзува првата шема. Краевите на отпорникот се врзуваат на осцилоскоп.

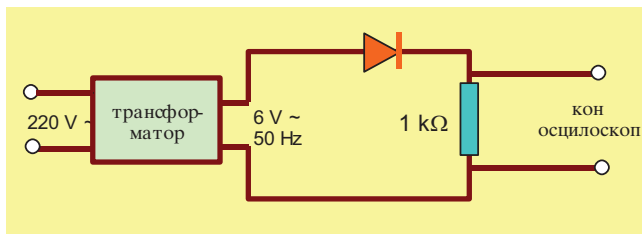
(б) За да добиете еднострано исправена



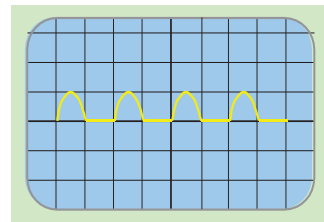
Сл. 1(а) Наизменична струја од трансформатор што треба да се исправи.



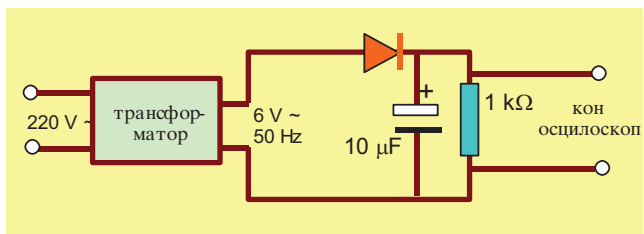
Неисправена наизменична струја.



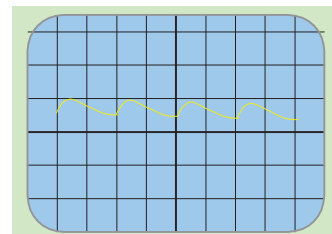
Сл. 1(б) Исправувач наизменична струја со една диода.



Исправена наизменична струја.



Сл.1(в) Исправувач и филтер за наизменична струја со една диода и еден кондензатор.



Исправена и филтрирана наизменична струја.

струја, потребна ви е само една полупроводничка диода. Тогаш исправениот напон, гледан на осцилоскоп, ќе изгледа како на сликата.

6. 4. ТРАНЗИСТОР

Првиот транзистор



Сл. 1. Првиот транзистор

Неговото пронаоѓање во 1948 направи револуција во електрониката и овозможи брза замена на кабестите и кршливи електронски ламби со минијатурни полупроводнички уреди. Оттогаш, па сè до денес, се создадени сите електронски технички благодети што секој ден ни го олеснуваат животот, ни даваат можност



(телефонски и сателитски врски), достап до информации (компјутери и интернет) и многу други работи. Првиот транзистор бил МОСФЕТ (сл. 1), но теориските основи за неговото засилувачко дејство биле направени нешто подоцна од неговата конструкција од страна на Шокли. Малата потрошувачка на електрична енергија, минијатурните димензии и елиминацијата на факторот кршливост, доведе до брза замена на електронските цевки. Во наредниот период по Втората светска војна следеше констрикцијата на сметачките машини со полупроводнички

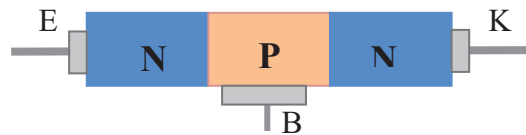
елементи. Наместо цели соби, компјутерите станаваа машини со релативно мали димензии.

Името на транзисторот доаѓа како кованица од англискиот назив, трансфер резистор, што значи преоден отпор.

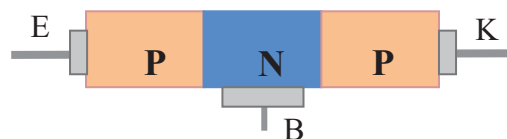
Биполарен слоен транзистор

Во поново време постојат транзистори со точкести и со слојни контакти. Ние, заради едноставноста, ќе ги разгледаме оние со слојни контакти. Името БИПОЛАРЕН доаѓа оттаму што се состои од два вида полупроводници: P и N.

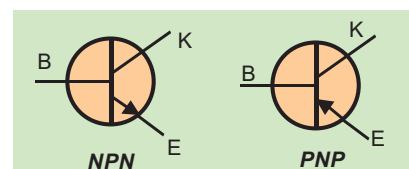
Слојниот биполарен транзистор претставува систем од две диоди врзани во серија, поточно, доведени во непосреден сериски контакт една до друга. Значи, транзисторот претставува две слојни диоди со заедничка електрода (заедничка база). Другите две електроди се нарекуваат **емитер** и **колектор**. Бидејќи постојат два типа полупроводници, постојат и две комбинации на слоен биполарен транзистор, и тоа, NPN (сл. 2.а) и PNP (сл. 2.б).



Сл. 2а. NPN транзистор.



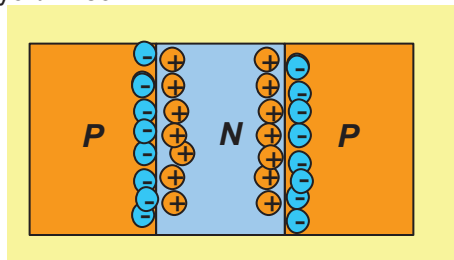
Сл. 2б. PNP транзистор.



Шематски ознаки за PNP и NPN.

Споеви на биполарен транзистор

Како што кажавме понапред, биполарниот транзистор се состои од три слоја (база -В, емитер-Е и колектор-К). По должината на патот низ транзисторот, на границите на двата биполарни контакта (PN, па потоа NP, се формираат два бариерни (запорни) слоеви - сл. 3. Така, за електроните, на пример, еден премин ќе биде пропустлив, а другиот непропустлив (бариера). Со помош на правилна поларизација на транзисторот, може да се создадат услови на пропустливост.



Сл. 3. PNP транзистор.

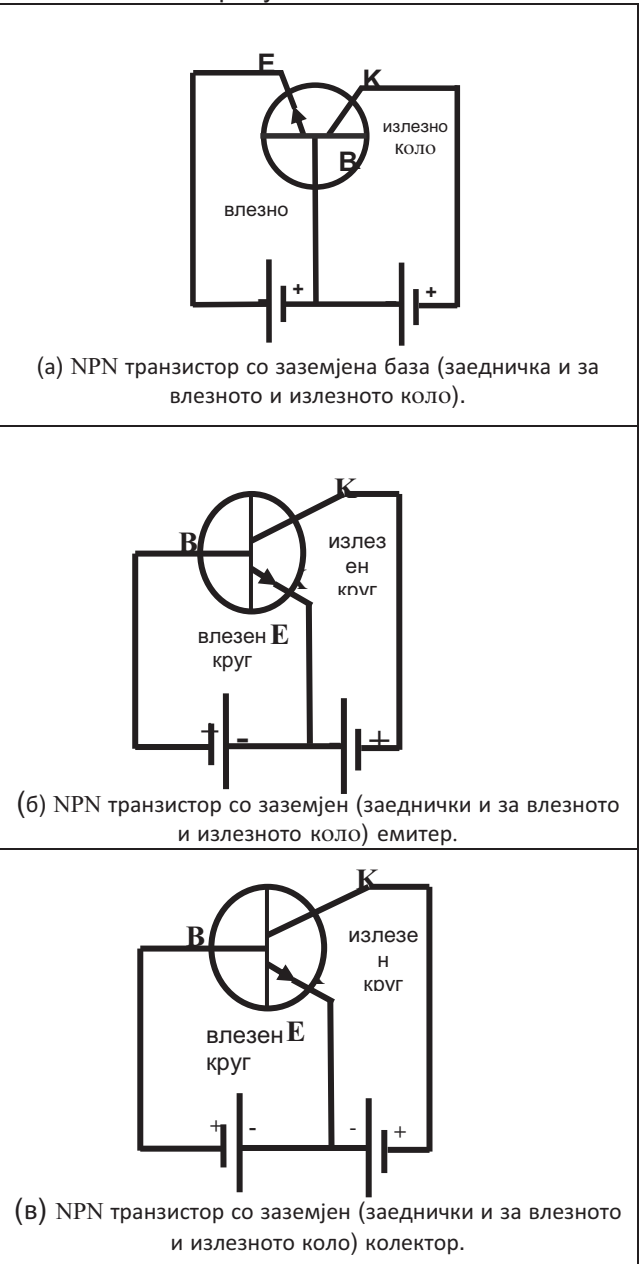
Нека првата PN диода од транзисторот претставува дел од влезното коло (емитер и база). Нека втората диода, составена од база (В) и колектор (К), е дел од излезното коло. Овие две кола е потребно да се врзат со извори на прав напон, и тоа, на влезот во пропустлива насока, а на излезот во непропустлива. Со тоа на влезот се постигнува бариерниот (запорниот) слој да се истенчи, а на излезот да се зголеми. При вакви услови на поларизација кај транзисторот може да се јави засилувачкиот ефект (транзисторски ефект).

Сето она што е дадено за NPN транзисторите ќе важи и за PNP, само што во шемите треба да се сменат знаците на изворите за поларизација.

Важноста на транзисторот е во тоа што тој е засилувачки елемент. Тоа значи дека ако се донесе мала променлива струја во влезното коло на транзисторот тој на излезот ќе се појави како многукратно засилена струја што се менува на ист начин како што се менува напонот во влезното коло. Транзисторот се употребува во засилувачите и во многу други

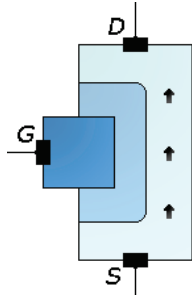
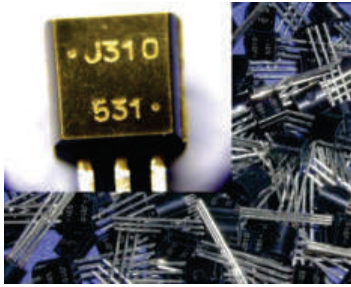
електронски уреди, кај радиоприемниците, телевизорите и др.

На сликата 4 е прикажан начинот на поларизација на еден NPN транзистор. Правилна поларизација на транзисторот за да се појави за да се појави засилувачко дејство. Притоа, влезот се поларизира во пропустлива, а излезот во непропустлива насока.

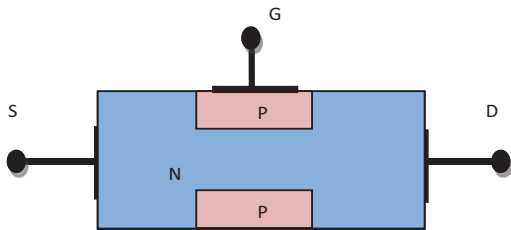


Сл. 4.

FET - транзистор



Името доаѓа од принципот на работа на транзисторот кој, всушност, ја контролира излезната струја со ефектот на индуцирање на електрично поле. Се состои од три електроди, и тоа порта ($G = \text{gate}$), извор ($S = \text{source}$) и увор ($D = \text{drain}$). Додека биполарните транзистори се исклучени направи, што значи дека, ако низ базата не тече струја, тогаш не може да тече никаква струја низ колекторското коло. За разлика од нив, транзисторите со ефект на поле (FET) се вклучени направи кои пропуштаат максимална вредност на излезната струја, ако на гејтот нема напон. Доведениот напон на гејтот (G) може само да го намали протокот на таа струја. FET-от се состои од PN премин. Неговата цел е да го обезбеди заборниот (барьерниот или неспроводниот) слој со кој може да се ограничува протокот низ каналот. Ако контактите помеѓу двата типа полупроводници се слојни, тогаш тој се нарекува слоен или JFET ($J = \text{Junction}$).

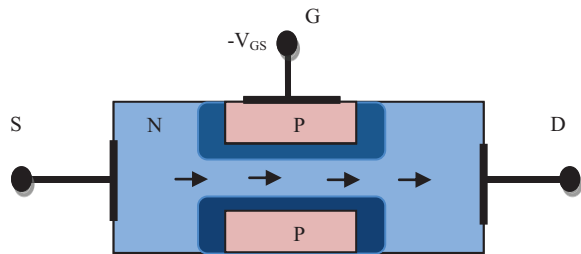


Сл. 1. Принцилна градба на JFET-от.

Слојниот FET (JFET) е направен од парче од N-тип полупроводник (сл. 1) кое се нарекува

канал. Во кој е всадено стеснување од P-тип полупроводник, што го создава гејтот (портата). По должината на патот помеѓу изворот ($S = \text{source}$) и уворот или сливот ($D = \text{drain}$), N-тип полупроводникот се однесува како отпорник.

Кај FET-от управувањето на струјата помеѓу сорсот (S) и дрејтот (D) се реализира преку донесување на инверзен напон (G поврзан на негативен напон, а S на позитивен напон). Во тој случај дебелината на заборниот слој се зголемува (темносно подрачје), а со тоа се намалува дебелината на спроводниот канал, па неговиот отпор расте. Струјата низ каналот ќе се намали. Значи дека JFET-от е уред кај кој со помош на напонот помеѓу сорсот и гејтот се управува струјата помеѓу сорсот и дрејтот.

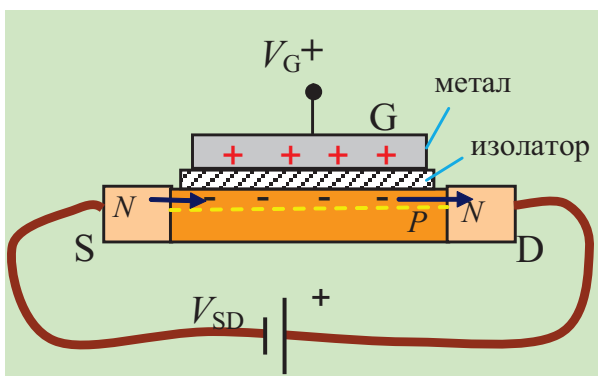


Сл. 3. N-канален JFET- поларизиран инверзно. Темносиното подрачје го претставува здебелувањето на заборниот слој поради инверзно поларизираните PN-премин.

МОСФЕТ (MOSFET = Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

Веднаш да ја дешифрираме кратенката. Овој транзистор е направен од спој помеѓу метал, ($M = \text{metal}$), оксид ($O = \text{oxide}$) и полупроводник ($S = \text{semiconductor}$), транзистор со ефект на поле (ФЕТ). Од сликата 4 може да се види дека тој се состои од NPN-контакт. Исто како кај FET-от, и кај мосфетот постојат три електроди: извор (source), увор (drain) и порта (gate).

Гејтот кај MOSFET-от претставува слојна метална електрода (сл. 4), која е одвоена од



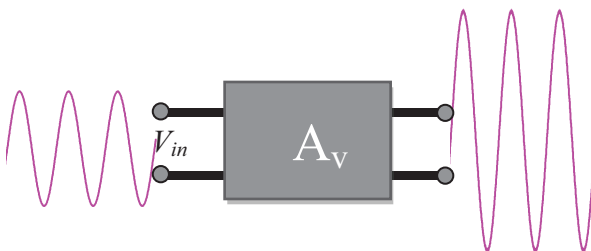
Сл. 4. Пресек на принципна скица на еден МОСФЕТ транзистор.

P-полупроводникот со изолаторски слој (бело шрафирано). Ако не постои напон на гејтот, тогаш помеѓу сорсот (S) и дрејнот (D) постојат бариери и двата PN-контакта од NPN структурата. Ако сега на портата G се донесе позитивен напон V_G , тогаш под дејство на индукција (инфлуенција) во слојот P, на самата негова граница (интерфејсот) со изолаторот ќе се создаде обратно по поларитет (негативно) количество електричност под дејство на инфлуенција. На тој начин во изолаторскиот слој се создава електрично поле (оттаму и името field effect транзистор) кое се управува однадвор со напонот V_G . Со доволно голем позитивен напон V_G (доволно јако поле) може да се случи бројот на индуцираните електрони да го надмине бројот на шуплините од акцепторските атоми од **P**-слојот. На тој начин се создава еден тенок слој во близината на изолаторот (над жолтата испрекината линија), во кој P-типот полупроводник ќе премине во **N**. Така, по должината на каналот заборните слоеви од PN-контактите ќе исчезнат, па помеѓу сорсот (S) и дрејнот (D) ќе се формира еден тенок спроводлив канал (над испрекинатата линија) низ кој ќе може да потече струја. Доколку напонот на портата V_G е негативен, тогаш пропустливоста на **PN**-контактите станува помала (тенкиот канал над жолтата испрекината црта се истенчува, па струја нема да потече. Слично како кај обичниот транзистор, мосфетот се употребува како засилувач.

6. 5. БИПОЛАРЕН ТРАНЗИСТОР КАКО ЗАСИЛУВАЧ

Раволуционерната ролја на транзисторот е неговото засилувачко дејство. Имено, со конструкција на едноставно коло со еден транзистор и неколку други елементи е возможно засилување на некој променлив напон или струја. Така, постојат засилувачи на напон, струја и моќност. Вистинските засилувачи на сигнали кои се користат во секојдневието се состојат од повеќе транзистори (повеќе степени).

Општо земено, еден засилувач на напон може да се претстави како една црна кутија во која еден сигнал (напон) влегува со мала амплитуда, а излегува со голема амплитуда. Притоа, амплитудата на влезниот сигнал се означува со V_{in} а засилениот сигнал се означува со V_{out} (сл.1).



Сл. 1. Засилувачот може да се претстави со црна кутија во којашто сигналот (променливиот напон) се засилува за A_v пати.

Односот помеѓу амплитудите на влезниот и излезниот (засилениот) сигнал се нарекува **коэффициент на напонско засилување** на засилувачот, т.е

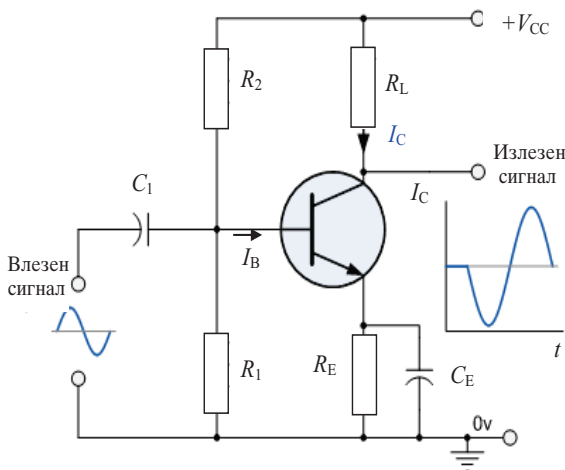
$$A_V = V_{out} / V_{in}.$$

Засилувач на напон со заземјен емитер

Ако засилувачот на напон е изведен со само еден транзистор со заземјен емитер, тој се нарекува едностепен засилувач. Тој не е идеален и има многу недостатоци, но сепак

претставува наједноставна засилувачка направа која се напојува со еден извор на напон. Напонот што треба да се засили (сигналот) се вклучува на влезот на засилувачот означен како "signal input". Потребно е да се знае типот на транзисторот PNP или NPN. Оттука се определува и поларитетот на напојувањето. Типот на транзисторот може да се побара во каталозите на производителот, и оттаму можат да се најдат потребните податоци (податок за напонот на напојувањето V_{CC} . Ако не е познат коефициентот на струјното засилување (H_{FE} или β), тогаш експериментално се снимаат неговите карактеристики, па се определуваат неговите параметри. Засилениот напон се добива на крајот од работниот отпорник R_L што е означен како "signal output". Кај идеалните засилувачи промените на засилениот излезен напон буквално ги репродуцираат промените на влезниот напон. Таквиот идеален засилувач, се вели, работи без изобличување.

Во реалноста вакви засилувачи не постојат, па се тежнее со дополнителни електронски кола да се смали изобличувањето, па излезниот напон да прилега на влезниот и да се менува едновремено со него.



Сл. 2. Транзисторски засилувач со заземјен емитер

На сликата 2 е дадена шемата на еностепен транзисторски засилувач со заземјен емитер

(емитерот е заеднички и за влезното и за излезното коло). Од шемата може да се забележи дека транзисторот се напојува само со еден извор на напон $+V_{CC}$ кој го поларизира во непропустлива насока излезното коло на транзисторот (колектор-емитер).

Поларизацијата на влезното коло во пропустлива насока е направена со помош на потенциометарско делење на падот на напонот V_{CC} , помеѓу отпорниците R_1 и R_2 , и со земање само на делот од напонот што паѓа на краевите на R_1 . Улогата на кондензаторот C_1 има улога да го попречи правиот напон за поларизацијата на влезниот круг да го оптовари изворот на сигналот. Улогата на емитерскиот отпорник R_E е да врши температурна стабилизација на засилувачот за да не се прегрева колекторот на транзисторот поради потекување на јаки струи. За да може сигналот да не се намалува поради течењето низ отпорникот R_E , се врши негово премостување со кондензатор со голем капацитет C_E . Така, сигналот, речиси, без дополнителен отпор поминува низ влезното коло. Излезниот сигнал е засилен поради транзисторското засилувачко дејство, па јаката колекторска струја тече низ потрошувачот R_L . Потрошувачот R_L може да биде звучник, мерен инструмент или нешто друго.

Најважниот параметар на транзисторот се нарекува коефициент на струјно засилување. Тој го претставува односот помеѓу промената на струјата на излезот (ΔI_C) и промената на струјата на влезот (ΔI_B) при даден колекторски напон, а се бележи со H_{FE} .

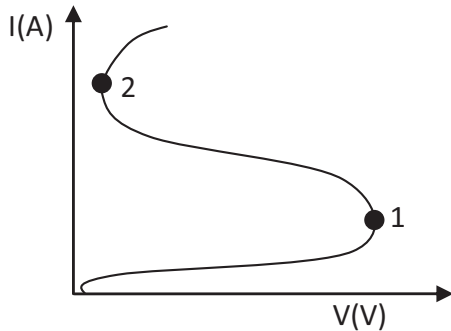
$$H_{FE} = \Delta I_C / \Delta I_B$$

Дајте им значење на следниве физички поими

- Коефициент на напонско засилување,
- фактор H_{FE} или коефициент на струјно засилување,
- еностепен транзисторски засилувач со заземјен емитер,
- засилување без изобличување.

6. 6. ДРУГИ ПОЛУСПРОВОДНИЧКИ ЕЛЕКТРОНСКИ КОМПОНЕНТИ

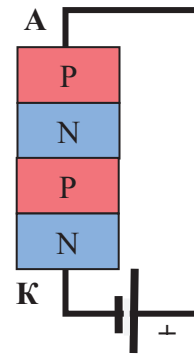
Тиристор (дијак и тријак)



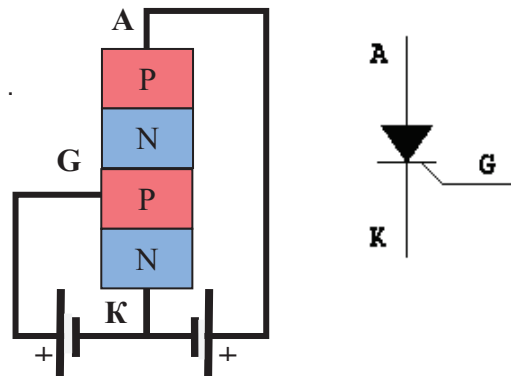
Сл. 1. S-образна волтамперска карактеристика.

Тиристорот претставува полупроводнички прибор кој има нелинеарна карактеристика во форма на латинската буква “S”. Кај приборите што имаат S-образна карактеристика, карактеристично е тоа што постои подрачје во кое струјата опаѓа со порастот на напонот, што се нарекува подрачје на негативен диференцијален отпор. Кај секоја S-образна волт-амперска карактеристика постојат две карактеристични точки: едната одговара на максимален напон кај кој тече многу слаба струја, а другата одговара на минимален напон при многу јака струја (сл. 1). Двете карактеристични точки одговараат на прекинувач (свич), при што првата одговара на отворен прекинувач, а втората на затворен. Поради ваквата карактеристика, тиристорот се користи во импулсната техника како електронски прекинувач. Постојат два вида тиристори, и тоа, едните се двополи (*динистори* или *дијаци*) а другите се трополи па се нарекуваат *тринистори* или *тријаци*. Дијакот и тријакот конструктивно се изведени на ист начин, т.е. од четири полупроводливи слоеви, и тоа наредени наизменично PNPN. Кај динисторот, едната електрода (катода) е првиот слој, а другата (анода) е последниот

слој (сл. 2а). Кај динисторот напонот на вклучување (положбата 1) и напонот на исклучување (положбата 2) не можат да се контролираат однадвор туку се предодредени со производството на компонентата. Кај тринисторот, пак, постои и трета електрода G (порта или гејт). Оваа е, всушност, вториот слој над катодата. И тријакот, како и дијакот, има S-образна карактеристика, чиј облик зависи од напонот на портата-гејтот. Значи, помеѓу G и K се донесува напон од кој зависи S-образната карактеристика помеѓу анодата и катодата, па според тоа и положбата на вклучување (палење) и исклучување (гасење) може да се менува. Оттука следува дека тринисторот може да се употребува како електронски прекинувач кај којшто напоните на палење и гасење можат да се контролираат однадвор.

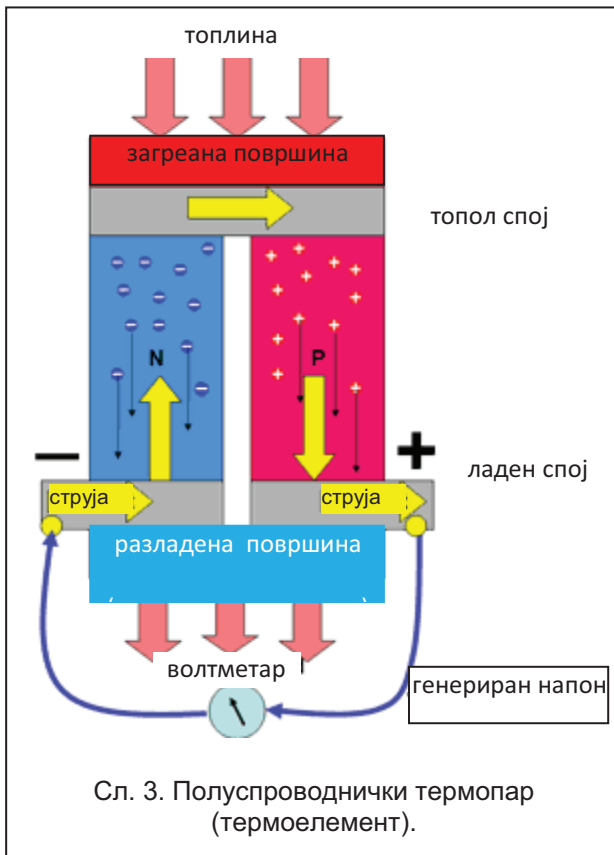


Сл. 2а. Динистор или дијак.



Сл. 2б. Тринистор или тријак и шематскиот симбол.

Полупроводнички термопар



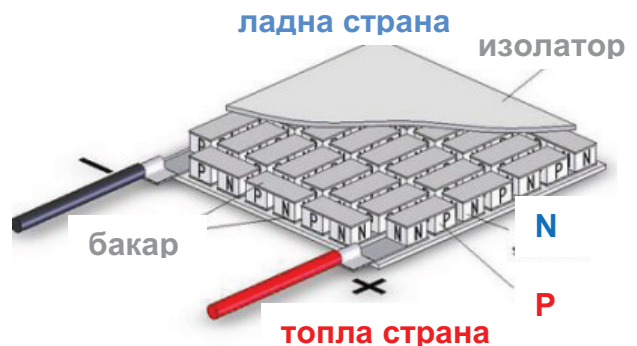
Полупроводничкиот термопар е прибор кој се состои од два типа полупроводници (р и п), а се користи за мерење на температура. Се заснова на генерирање на електрична енергија како последица на температурната разлика на двата контакта

Принципот на работата на полупроводничкиот термопар се состои од следново: кога ќе се доведе топлина на едната страна (од горе на сликата 3) на ваквиот полупроводнички термопар, топлинската енергија ги побудува електроните од донорските нивоа од п-тип полупроводникот и ги доведува во спроводливата зона, а шуплините од акцепторските нивоа од р-тип полупроводникот, во валентната зона.

Концентрацијата на носителите и во п и во р-полупроводникот е зголемена на топлата страна, па поради електростатичкото одбивање и дифузијата доаѓа до нивно раздвижување во правец на поладниот дел од полупроводникот (надолу на сликата 3). Движењето на носителите, значи, течење струја, па според правилата, во п-полупроводникот струјата тече нагоре, а во р-полупроводникот, струјата тече надолу. На долните краеве на секој од полупроводниците се натрупуваат спротивни количества електричества, па поради тоа се создава потенцијална разлика (напон) кој може да се измери. Измерениот напон е пропорционален со температурната разлика

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

пomeѓу потоплиот (T_2) и поладниот (T_1) дел, па според тоа, волтметарот може да се градуира за **мерење на температура**.

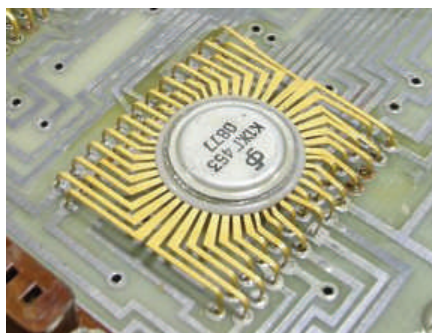


Сл. 4. Компонентна за мерење температура.

Дајте значење на следниве поими:

- S-образна волтамперска карактеристика,
- динистор (дијак),
- тринистор (тријак),
- полупроводнички термопар.

6. 7. ИНТЕГРАЛНИ КОЛА

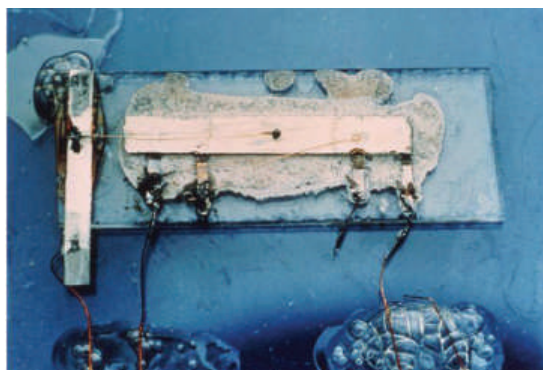


Интегрално коло од руско производство.

Интегралните кола (IC=Integrated Circuits) во електрониката се познати и како микрокола, микрочипови, чипови или силициумови чипови. Тие претставуваат минијатурни електронски кола кои се состојат, главно, од полупроводнички компоненти, но и од пасивни компоненти (отпорници и кондензатори) кои се изработени на површината на еден единствен супстрат (полупроводничка основна плоча). Интегралните кола се употребуваат буквално, во секоја електронска направа од поново време, и направија револуција во современата електроника.

Наместо поврзување на голем број посебни транзистори и други компоненти во електронски кола, IC технологијата овозможува нивно всадување (интеграција) во една единствена полупроводлива плоча. Друга предност е и цената на изработка, интеграцијата е далеку поевтина од правењето на кола од дискретни компоненти. Најголемата од сите предности е минијатуризацијата на електронските уреди. Компонентите во IC е мали и близу една до друга. Чиповите може да имаат димензија од неколку квадратни милиметри до повеќе од еден милион транзистори на 1 mm^2 . Бројот на компоненти на единица површина од чипот се нарекува **густина на интеграција**.

Откривањето на интегралните кола



Сл. 1. Првото интегрално коло изработено во тело на германиум од Џек Килби 1958 година.

Најголемите заслуги за конструкцијата на првото интегрално коло ги имаат Џек Килби од Тексас Инструментс и Роберт Нојс од Феарчајлд Семикондакторс кои работеле независно еден од друг. Килби ги запишал своите првични идеи и нацрти за изработка на едно интегрирано коло во јули 1958 година, а успешно ја демонстрирал својата интегрирана направа од германиум во септември 1958 година. Веќе на почетокот на 1959 година тој успеал да демонстрира направа со повеќе компоненти, интегрирани во едно полупроводливо тело - една плоча. Во 2000-та година Килби ја доби Нобеловата награда за физика за заслугите во откривањето на интегралните кола. Инаку, чипот на Роберт Нојс, кој бил од силициум и датира од неколку месеци подоцна, сепак бил понапреден, бидејќи имал разрешено многу практични проблеми што чипот на Килби ги имал неразрешени.

Ниво на интеграција

Првите интегрирани кола во шеесеттите години содржеа само неколку транзистори. Ваквата концентрација на интеграција се нарекувала интеграција од низок ранг (Small

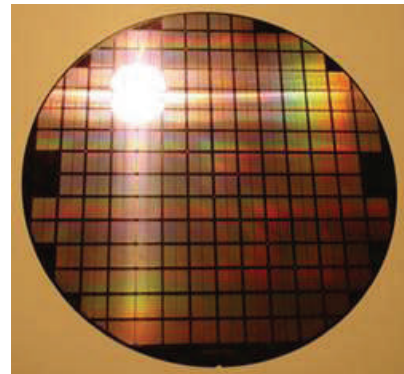
Scale Integration - SSI). Денес се познати колата со ултрависок ранг на концентрација во тродимензионална архитектура на интеграција каде што се постигнува и до милијарда компоненти на cm^2 . Во табелата подолу е даден историски преглед на растењето на нивото на концентрацијата на интеграција на бројот на компонентите во интегрираното коло.

1958	Ниско ниво на интеграција "Small-Scale Integration" (SSI),	неколку транзистори	
доцните 1960-ти	Средно ниво на интеграција "Medium-Scale Integration" (MSI).	стотина транзистори	
средната на 1970-тите	Високо ниво на интеграција "Large-Scale Integration" (LSI)	неколку илјади транзистори	
1980-ти	Многу високо ниво на интеграција "Very Large-Scale Integration" (VLSI)	до 1 милион	486 процесори
Доцните 1980-ти	Ултрависоко ниво на интеграција "Ultra-Large-Scale Integration" (ULS)	над 1 милион	Pentium
2008	Тродимензионална и интегрална архитектура (3D-IC)	над милијарда	Quad-core

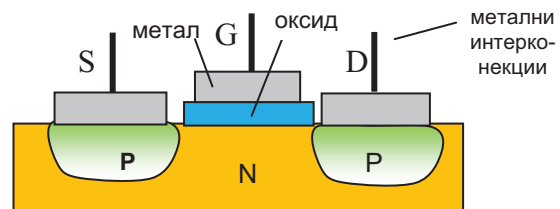
Пример за интеграција на MOSFET транзистор

Во поглавјето 5.1. стана збор за монокристалниот силициум кој се произведува со методот на Чохралски. Силициумот потоа

се сече на дискови со мала дебелина (околу 1 mm). На сликата 3 е прикажан еден диск од монокристален силициум на кој со методите за правење интегрирани кола одеднаш се произведени многу чипови од по 1 cm^2 . Потоа чиповите се сечат, па се создаваат металните интерконекции за надворешни контакти (ножиња) и се затвораат во пластични кукишта.



Сл. 3. Интегрирани кола (квадратчиња со повшина од 1 cm^2 , изведени на еден монокристален вафер (диск).



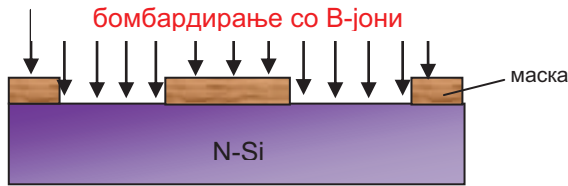
Сл. 4. Еден MOSFET изведен во основна плоча од N-тип силициум.

Производството на интегрираниот MOSFET од сликата 4 може во кратки црти да се опише со следнава процедура:

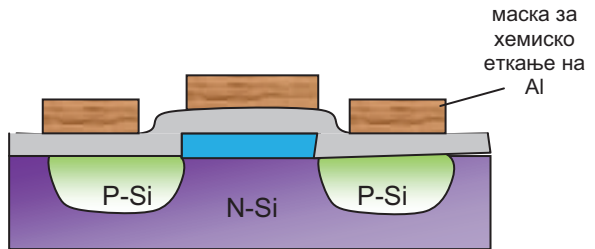
N-тип плочката од силициум се претвора во p-тип на саканите места со бомбардирање со плазма од акцепторски атоми. Маската овозможува јоните на борот да го допингуваат

6. Полупроводници

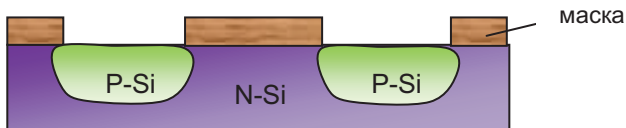
само откриениот (немаскираниот) дел од основната плоча.



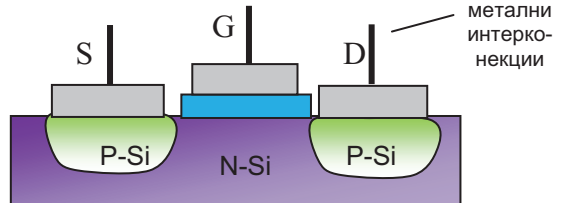
Се маскираат површините од плочата под кои Al-слојот треба да остане. Потоа се врши еткање со хемикалија која ги нагизува само откриените метални делови.



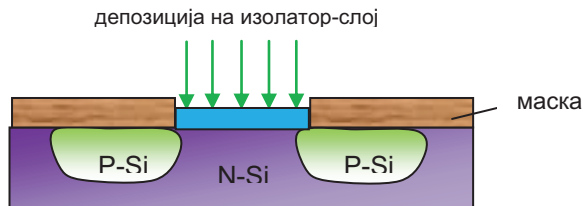
На тој начин, шуплините што се создаваат од имплантацијата на акцепторските атоми ги надминуваат слободните електрони и го претвораат N-Si во P-Si.



Се врзуваат метални интерконекции.



Се таложи изолаторскиот слој (оксидот). Маската овозможува изолаторскиот слој да се остане наталожен само над N-Si.

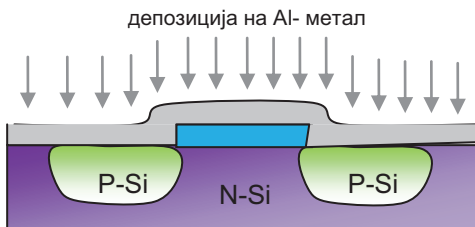


Кај интегрираните кола на еден квадратен сантиметар има повеќе милиони вакви компоненти.



Чипови од американско производство

Над целата плоча се прави депозиција на метален слој (најчесто алуминиум).



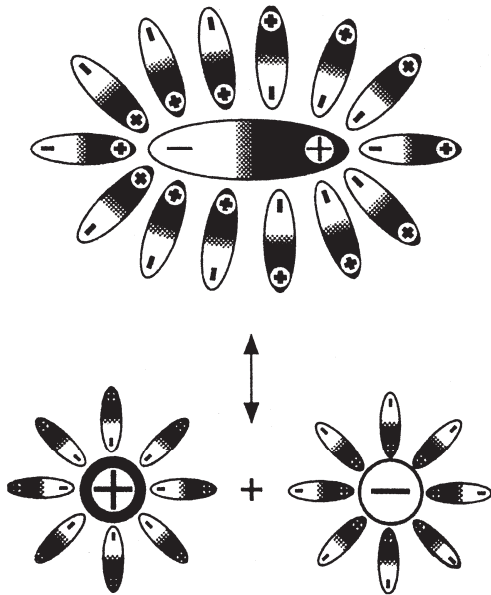
Дајте значење на следниве поими:

- интегрално коло (чип)
- ниво на интеграција
- интеграција на MOSFET.

7. ЕЛЕКТРИЧНА СТРУЈА НИЗ ТЕЧНИ СПРОВОДНИЦИ

7.1. ЕЛЕКТРОЛИТИ. ЕЛЕКТРОЛИТНА ДИСОЦИЈАЦИЈА

Електролитите (водени раствори или растопи на соли, бази и киселини) за разлика од чистите растворувачи спроведуваат струја. Спроводливоста се одвива со помош на јони и притоа доаѓа до хемиски промени во спроводникот. Во процесот на растворање молекулите на растворената супстанција дисоцираат на јони кои се создаваат по пат на *електролитна дисоцијација*. За разлика од металните спроводници (т.е. спроводници од I ред) каде електричната спроводливост се одвива со електрони, електричната спроводливост низ електролитните раствори се одвива со позитивните јони (катјони) и негативните јони (анјони). Затоа електролитите се познати и како спроводници од II ред.



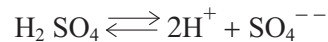
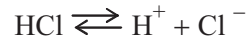
Сл. 1.

Процесот на електролитна дисоцијација се објаснува како појава на спонтано разложување на молекулите на растворената супстанција на јони. Молекулите на растворената супстанција и на H_2O , во однос на надворешната средина се однесуваат како диполи, додека молеку-

лите како целина се поларни. Кога еден поларен молекул се најде опкружен со поларните молекули од H_2O , ќе дојде до прегрупирање на молекулите (сл. 1). Поради ваквата состојба и термичките осцилации на молекулите, доаѓа до *електролитна дисоцијација* на молекулите на катјони и на анјони.

Паралелно со дисоцијацијата се одвива и обратен процес рекомбинација наречен *асоцијација* или *молизација* на јоните.

Моментот кога во единица време бројот на молекулите добиени по пат на молизација ќе се изедначи со бројот на дисоцираните молекули е момент на *динамичка рамнотежа* меѓу молизацијата и дисоцијацијата. Овие два еден на друг спротивни процеса симбилично се прикажуваат на начин, прикажан на следните примери:



Обично стрелката со насока на десно, го означува процесот на дисоцијација, а стрелката со насока на лево, го означува процесот на молизација.

Во електролитниот раствор истовремено постојат и неутрални молекули и јони, па електролитната дисоцијација не е стопостотна, туку делумна. Поради тоа Арениус ја вовел величината α , наречена *степен на електролитна дисоцијација*. Таа се дефинира со количник од бројот n на дисоцираните молекули во јони и бројот n_0 што го означува вкупниот број на растворените молекули. Според тоа:

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\text{број на дисоцирани молекули}}{\text{број на растворени молекули}}$$

При непроменлива концентрација на јоните, јачината на струјата што протекува низ електролитен раствор за време Δt е определена со количеството електричество на позитивните и негативните јони:

$$I = \frac{\Delta q_+ + \Delta q_-}{\Delta t} \quad (1)$$

Електролитниот раствор се карактеризира со одредена **специфична спроводливост** ($\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$), која зависи од бројот на јоните во единица волумен на растворот (степен на електролитна дисоцијација), концентрацијата на растворот, температурата и големината на јоните. Специфичната спроводливост, поради зголемената подвижност на јоните, расте со порастот на температурата.

За компарација, ќе наведеме дека специфичната спроводливост на дестилираната вода е $1.0 \cdot 10^{-8} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ што е за фактор 10^3 помал од специфичната спроводливост на некои биолошки течности и крв (на пример, специфичната спроводливост за: крв - $5.5 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$; крвна плазма - $14 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$; цереброспинална течност - $18 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$).

Кога во електролитен раствор се воспостави електрично поле, **подвижноста на јониите** (u) се дефинира со количникот од брзината на јоните v и јачината на електричното поле E :

$$u = \frac{v}{E} \quad (2)$$

Подвижност на јонот е еднаков на неговата брзина во електрично поле со единична големина.

Подвижноста на позитивните и негативните јони, обично, е различна ($u_+ \neq u_-$). Согласно равенката (2) единицата за подвижност на јоните во SI е $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$

Електролити се и сите биолошки течности во живите организми и растенијата, притоа тие се однесуваат како спроводници, а биоелектричната струја, поради хемиските процеси и прерасперделбата на полнежите, живите организми ја чувствуваат како дразнење, грчеви, физиолошки пореметувања итн.

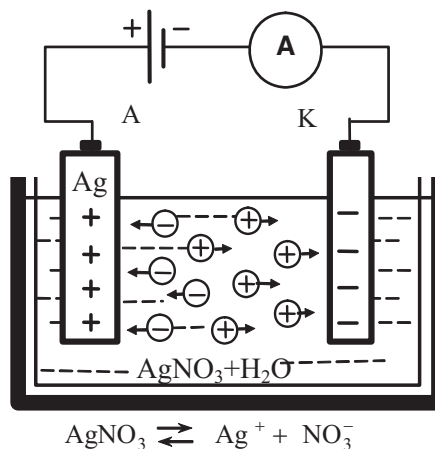
ПРАШЕЊА И ЗАДАЧИ

1. Што е тоа степен на електролитна дисоцијација?
2. Што е тоа асоцијација или молизација?
3. Дефинирајте подвижност на јоните.
4. Дефинирајте специфична спроводливост и нејзина SI единица.

7.2. ФАРАДЕЕВИ ЗАКОНИ ЗА ЕЛЕКТРОЛИЗА

Во отсуство на електрично поле, а поради термичките движења, јоните во електролитниот раствор се наоѓаат во постојано и хаотично движење.

Кога низ раствор на некоја сол, база или киселина се пропушти еднонасочна струја од надворешен извор, јоните што се присутни во растворот ќе почнат насочено да се движат кон спротивно наелектризираната електрода, **катијониите** кон негативната електрода (катода), додека **анијониите** кон позитивно наелектризираната електрода (анода) (сл. 1). Притоа треба да се има предвид дека во водениот раствор, покрај јоните од растворената супстанција, ќе постојат и водородни (хидрониум) и хидроксидни јони од водата. Имено, и водата дисоцира:



Сл. 1.

Електролизата претставува процес при кој под дејство на еднонасочна струја во електролитот (раствор или растоп) настанува оксидационо-редукциона реакција: на катодата некои од присутните катјони примаат електрони и се редуцираат, додека на анодата се врши оддавање на електрони (оксидација)

Ако за време Δt на електродите се неутрализираат N јони, со полнеж на еден јон $q = ze$,

7. Електрична струја низ електролити

тогаш вкупното количество електричество што поминува низ електролитот изнесува:

$$Q = Nq = Nze, \quad (1)$$

z е валентност на јоните; e е елементарен електричен полнеж.

Масата на супстанцијата m што се одделува на електродата е производ од бројот на јоните кои се неутрализираат на електродата и нивната маса (μ):

$$m = \mu N = \frac{A}{N_A} \frac{Q}{ze}. \quad (2)$$

За хемиските елементи масата на еден јон ($\mu = A/N_A$) е еднаква на односот меѓу масата на еден мол (атомската маса A) и Авогадровиот број N_A .

Равенката (2) во себе ги содржи двата закона формулирани од Фарадеј, а изведени врз база на низа експерименти.

Првиот Фарадеев закон покажува дека масата m на издвоената супстанција на една од електродите е пропорционална со количеството електричество Q , што поминува низ електролитот:

$$m = k_e Q = k_e I \Delta t, \quad (3)$$

каде што I е јачина на струјата; Δt е време на течење на струјата; k_e е коефициент на пропорционалноста наречен **електрохемиски еквивалент** ($k_e = m/Q$). Вредноста на k_e бројно е еднаква на масата на супстанцијата, што се одделува при поминување на количество електричество од еден кулон низ електролитот ($Q = 1$ C). Тој е карактеристична величина за секој хемиски елемент. На пример, за сребро и за бакар соодветно изнесува:

$$k_{e(\text{Ag})} = 1,118 \cdot 10^{-6} \text{ kg/C}; \quad k_{e(\text{Cu})} = 0,329 \cdot 10^{-6} \text{ kg/C}$$

Вториот Фарадеев закон гласи: електрохемискиот еквивалент k_e на секоја супстанција е пропорционален со нејзиниот хемиски еквивалент k . Или електрохемиските еквиваленти на различни супстанции се однесуваат, како што се однесуваат и нивните хемиски еквиваленти:

$$k_e = \frac{m}{Q} = \frac{1}{eN_A} \frac{A}{z} = \frac{1}{F} \frac{A}{z} = \frac{k}{F}. \quad (4)$$

или

$$k_{e1} : k_{e2} : k_{e3} = k_1 : k_2 : k_3$$

Хемискиот еквивалент (k) на јон од одреден вид зависи од атомската маса на елементот A и неговата валентност z . Тој е зададен со равенката:

$$k = \frac{A}{z}. \quad (5)$$

Константата $F = e N_A$ е **Фарадеев број**, каде што e е елементарен електричен полнеж, $N_A = 6,0210^{23} \text{ mol}^{-1}$ е **Авогадров број**. Фарадевиот број е бројно еднаков со количеството електричество Q што треба да се пренесе низ електролитот за да се издвои 1 mol од било која едновалентна супстанција. Ако во равенката (2) се стави $m=A$, $z=1$ се добива дека $e Q$ е еднакво на F . Фарадевиот број F е еднаков на 96 000 C/mol.

Ако експериментално се определи бројната вредност на Фарадеевата константа, со помош на вредноста на Авогадровиот број може да се добие вредност за полнежот на едновалентен јон кој е еднаков на елементарниот електричен полнеж:

$$e = \frac{F}{N_A} = \frac{96.500 \text{ C/mol}}{6.02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

што е од особена важност за докажување на дискретниот карактер на електричниот полнеж.

Електролизата наоѓа широка практична примена во разни области во науката, техниката и во практиката меѓу другото во електрометалургијата при добивање алуминиум, водород и др. Електролизата меѓу другото се користи во **галваносиеџијата** и **галванопластика**.

Галваносиеџијата е процес при кој се врши покривање на површините од некои метали со тенок слој на некои благородни метали, или со метали кои не оксидираат. Обложувањето се врши со цел да се заштитат

од корозија, механички оштетувања. Такви се, на пример, хромирањето, позлатувањето, посребрување, пониклувањето, поцинкувањето и слично.

Галванопласќикаџа е процес при кој се добиваат копии од некои релјефни површини по пат на електролиза со активна анода

Електролизата се користи при полнењето акумулатори. Електролизата се применува за добивање тенки слоеви кои служат како многу тенок диелектрик меѓу кондензаторски облоги кај електролитските кондензатори.

Прашања и задачи

1. Објасни ги Фарадеевите закони за електролизата.
2. Што е тоа електрохемиски еквивалент и од што зависи?
3. Како врз основа на Фарадеевите закони може да се определи елементарниот електричен полнаж на електронот?
4. Што е тоа Фарадеев број?
5. Кои честички се носители на струја во електролитите?
6. При посребрување на некој предмет за време 2,5 часа е издвоено од растворот на сребрениот нитрат 50,4 g сребро. Отпорот на растворот е 0,8 Ω , а електрохемискиот еквивалентна среброто $k_e (Ag) = 1,118 \cdot 10^{-6}$ kg/C. Да се определи јачината на струјата и напонот меѓу електродите. (Одговор:?)

РЕЗИМЕ

- Подвижноста на јоните (u) се определува со количникот од брзината на јоните v и јачината

на електричното поле E : $u = \frac{v}{E}$

- Хемискиот еквивалент k е даден со: $k = \frac{A}{z}$.

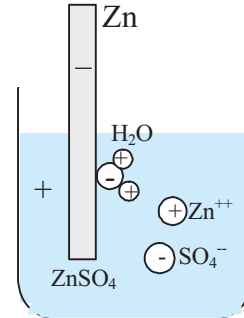
- Релацијата за првиот Фарадеев закон е:

$m = k_e Q = k_e I \Delta t$, каде k_e електрохемиски еквивалент

- Фарадеев број $F = e N_A$; N_A - Авогадров број.

7.3. ЕЛЕКТРОХЕМИСКИ ПОТЕНЦИЈАЛ. ГАЛВАНСКИ ЕЛЕМЕНТИ

Електрохемиски потенцијал



Сл.1.

Во општ случај, кога некоја метална електрода ќе се потопи во електролит, помеѓу електродата и растворот се создава потенцијална разлика која што зависи од природата на металот и електролитот, како и од концентрацијата на јоните во електролитот, а исто и од неговата температура. Потенцијалот на електродата што тука се јавува во однос на електролитот се вика **електрохемиски потенцијал**.

Појавата на електрохемискиот потенцијал била објаснета 1889 год. од Нернст (Walther Hermann Nernst, 1864-1941) германски физико-хемичар.

Претпоставуваме да имаме цинк во воден раствор на цинксулфат (сл.1). Молекулите на водата со својот голем диполен момент дејствуваат врз јоните на кристалната решетка на металот и го отцепуваат од неа. Така јоните на цинкот непрекинато поминуваат во растворот и со ништо не се разликуваат од јоните на растворот што настанале со електролитичната дисоцијација на $ZnSO_4$ во растворот.

Паралелно со овој процес на растворање на цинкот во растворот, настанува и спротивен процес. Јоните на цинкот од растворот учествувајќи во топлинско движење се сретнуваат со цинковата електрода и на неа се таложат, вградувајќи се во нејзината кристална решетка. Во прв момент по потопувањето на електродата во растворот, потоците јони кои одат од, и доаѓаат кон електродата, општо земено, не се еднакви. Но, по извесен период настанува

динамичка рамнотежа. Имено, процесот на напуштањето на јони од металот во електролитот настанува под дејство на т.н. **притисок на електролитно растворање** (p_r) и тој предизвикува цинканата електрода да се наелектризира негативно во однос на растворот. Потенцијалната разлика меѓу електродата и растворот значи појава на двослој со дебелина од ред на големина 10^{-4} μm , во кој се создава електрично поле, кое се спротиставува на натамошно преминување на јоните на цинк од електродата во растворот.

Процесот пак на премин на јоните од растворот станува под влијание на т.н. **осмотски притисок** (p_{os}). При некој одреден потенцијал двата потоци на јони се изедначуваат еден со друг и настанува *динамичка рамнотежа*. Тој рамнотежен потенцијал претставува електрохемиски потенцијал на металот (во конкретниот случај цинкот). Ако е за дадениот метал $p_r > p_{os}$, тој се електризира **негативно**, но постојат и такви метали кај кои е $p_r < p_{os}$, па надвладува таложење на позитивните јони врз електродата и таквите метали во растворот на нивната сол се електризираат **позитивно**. Такви метали се: злато, платина, живата, бакарот и некои други.

Електрохемиски потенцијал нацинкот потопен еднаш во раствор на цинксулфат, а потоа во раствор на цинкхлорид, ако им се концентрациите на цинковите јони еднакви, покажува ист електрохемиски потенцијал.

За да може да се споредуваат електрохемиските потенцијали на различни метали, споредувањето се прави во т.н. *нормална концентрација*, т.е. кога растворот содржи килограм еквивалент на јони на металот во еден метар кубен раствор. Потенцијал при нормален раствор се нарекува **апсолутен нормален електрохемиски потенцијал**.

Електрохемиските генератори (галвански елементи) имаат две електроди од различни метали и електромоторната сила на генераторот еднаква е на разликата на потенцијалот меѓу двете електроди, независно од тоа во однос на што тие се мерени.

Поради напред кажаното при мерење на електрохемиските потенцијали како рефе-

рентна електрода се користи таканаречената **водородна нормална електрода** која има доста постојани својства. Оваа електрода се добива кога платинска електрода ќе се превлече со прав од платина, кој што лесно апсорбира водород, ако се најде во атмосфера богата со водород.

Електрохемиски потенцијал на некоја метална електрода во раствор на нејзина сопствена сол при нормална концентрација, измерен во однос на нормалната водородна електрода, се вика **нормален електрохемиски потенцијал**. Ќе го означуваме овој потенцијал со φ_n . Посебни физико-хемиски методи покажале дека потенцијалот на самата водородна електрода во однос на електролит е $\varphi_1=0,274$ V. Така, мерејќи го φ_n може да се определи и апсолутниот нормален потенцијал φ , кој очигледно е:

$$\varphi = \varphi_n + 0,274 \quad (1)$$

Во табелата подолу дадени се вредностите за φ_n и φ за некои елементи

Табела

елемент	φ_n	φ	елемент	φ_n	φ
Na	-2,72	-2,45	Pb	- 0,12	+0,15
K	-2,92	-2,65	Cu	+0,34	+0,61
Mg	-1,55	-1,28	Ag	+0,80	+1,07
Zn	-0,77	-0,50	O ₂	+1,23	+1,50
Cd	-0,40	-0,13	Cl ₂	+1,36	+1,63
Hg	+0,86	+1,13	H ₂	0	+0,274

Вредностите во табелата се дадени во волти.

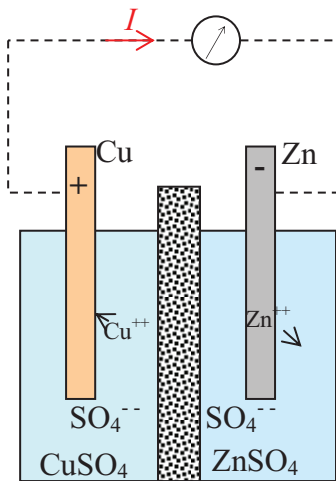
ГАЛВАНСКИ ЕЛЕМЕНТИ

Појавата на електрохемиски потенцијал лежи во основата за конструкција на **електрохемиските генератори - галванските елементи**. Прв галвански елемент е конструиран од Алесандро Волата 1800 година. Тоа е генераторот кој се состои од сад со раствор на сулфурна киселина во која се поставени една бакарна и една цинкова електрода. Бакарната

7. Електрична струја низ електролити

електрода е позитивен пол на изворот а цинковата негативен. Електромоторната сила што ја дава ваквиот елемент при нормална концентрација е : $\mathcal{E} = \varphi_{\text{Cu}} - \varphi_{\text{Zn}} = +0,61 - (-0,50) = 1,11 \text{ V}$.

Варијанта на Волтиниот елемент е **Даниеловот елемент**. Граден е исто така од електроди од бакар и цинк, но бакарната електрода се наоѓа во раствор на бакарен сулфат, а цинковата, во раствор на цинксулфат (сл. 2). Двата раствора се раздвоени со порозна преграда од печена глина која оневозможува мешање на растворите, но дозволува дифузија на металните јони Zn^{++} и Cu^{++} .



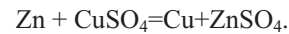
Сл.2

Кога Даниеловиот галвански елемент се користи како извор на ЕМС, имаме затворено струјно коло, електроните од цинковата електрода преку спроводниците од струјното коло, поминуваат на бакарната електрода, предизвикувајќи струја со на сликата назначената насока. Поради тоа, се нарушува динамичката рамнотежа помеѓу таа електрода и растворот, цинковата електрода станува помалку негативна и се потикнува нејзиното растворање. Од друга страна со доаѓањето на електроните на бакарната електрода, таа пак станува помалку позитивна, и таму меѓу неа и растворот се расипува динамичката рамнотежа па се поттикнува таложењето на бакарните јони.

При користењето, цинковата електрода се троши, бидејќи имаме постојано растворање на нејзините јони во растворот, а бакарните

јони на бакарната електрода се таложат како елементарен бакар. Значи ЕМС на Даниеловиот елемент се одржува на постојана вредност со постојаното поминување на цинковите јони во растворот, и таложење на бакарните јони од растворот на електродата. Процесот ќе тече сè дури цинкот сосема не се истроши, односно не се потрошат сите јони на на бакарот.

Во текот на процесот растворот во цинковиот дел (цинковиот полуелемент) ќе стане побогат со позитивни јони, а во бакарниот полуелемент посиромашен со позитивни јони. Значи растворот на едниот дел ќе биде позитивен, а на другиот негативен. Всушност тоа не станува така, бидејќи паралелно со движењето на електроните од цинкот кон бакарот низ надворешниот дел од срујното коло, во растворот од бакарниот дел кон цинковиот се движат низ полупропусливата преграда негативни јони. Конечно во погоре опишаниот елемент доаѓа до врзување на цинковите јони со SO_4^{--} во цинксулфат, а бакарот се ослободува од растворот на бакарниот сулфат:



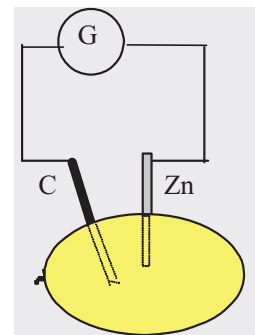
Во принцип два различни метала поставени во раствор на електролит претставуваат извор на ЕМС.

Два различни метала внесени во некое овошје или зеленчук претставуваат извор на електрична струја (сл.2).

Ако се земе лимон (може да се употреби и портокал, зелка, компир, морков или друг плод што е сочен) и во него набијат две електроди од различни метали, на пример цинкова и јаглена и ги поврзете со осетлив инструмент ќе добиете струја.

Волтиниот и Даниеловиот елемент се т.н. **примарни галвански елементи**. Кај нив движењето на јоните низ електролитите имаат сировинска насока од насоката во процесот електролиза.

Галванските елементи кај кои метал-



Сл.2

ните електроди се наоѓаат во растворите на нивните соли, и киселинскиот остаток им е ист, го поседуваат својството на реверзибилност. Тоа значи дека по неговото искористување, со вклучување во надворешно струјно коло истиот повторно се оспособува за користење на ЕМС. За разлика од Волтиновиот елемент кој е иреверзибилен, Даниеловиот е реверзибилен. Кај реверзибилните елементи не доаѓа до создавање на нови супстанции, туку само до промени на концентрациите на растворот.

Кај иреверзибилните галвански елементи, при течењето на струја низ нив, настануваат хемиски промени или во растворот или на електродите. Појавата која доведува до намалување на ЕМС на галванскиот елемент се вика поларизација на електродите.

Дајте го значењето на следниве основни поими. таму каде што е потребно посочете и примери

-електрохемиски потенцијал	-галвански елемент
-притисок на растворање	-волтин елемент
-осмотски притисок	-Даниелов елемент
- нормален електрохемиски потенцијал	- примарни галвански елементи
	-реверзибилен галвански елемент
	-иреверзибилен галвански елемент

7.4. ПОЛАРИЗАЦИЈА НА ЕЛЕКТРОДИТЕ. ДЕПОЛАРИЗАЦИЈА. АКУМУЛАТОР

Поларизација и деполаризација на електродите

Во раствор на сулфурна киселина во вода се поставуваат електрода од бакар и електрода од цинк. Се конструира Волтин елемент. Електродите се поврзуваат со галванометар. Во почетокот галванометарот покажува отклон, што укажува дека струја тече. Меѓутоа, ако ефектот го посматраме подолго време, се забележува дека отклонот на галванометарот се намалува. До намалувањето на струјата

доаѓа поради тоа, што јоните на водородот при неутрализацијата, се издвојуваат на катодата, како молекули на водород. И сега, наместо електроди од цинк и бакар, се добиваат електроди кои не се со ист состав, бидејќи на електродата се издвојува водородот. Тоа создава дополнителна електромоторна сила, чија што насока е спротивна.

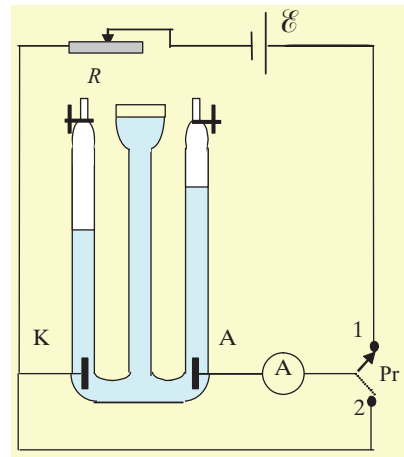
Исто така, издвоениот водород претставува поголем отпор за струјата.

Ако меурите од гас ги очистите и повторно ги спуштите електродите, повторно ќе се воспостави поранешната електромоторна сила, односно ист отклон на галванометарот.

Појавата поларизација на електродите се демонстрира со електролиза на вода.

Хофмановиот апарат се поврзува во струјно коло како на сликата 1. Еден преклопник P_r може да биде поврзан на положба 1 кога во колото е поврзан изворот на струја, или во положба 2 - кога изворот е елиминиран.

Прво се поврзува изворот, со тоа што преклопникот е поврзан на положба 1. На електродите се издвојуваат гасовите водород и кислород, исто како во експериментот на електролиза на вода.



Сл.1.

По 5-10 минути се префрла преклопникот на положба 2, на амперметарот ќе се регистрира течење на струја во спротивна насока. (Внимавјте: поларизационата струја е значително послаба. За да се регистрира, треба да се промени мерното подрачје на амперметарот.)

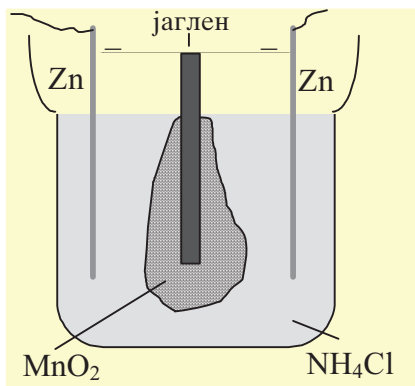
7. Електрична струја низ електролити

Од досега кажаното е јасно дека, отстранување на појавата поларизација на електродите (нивна **деполаризација**) може да настане ако на некој начин се ослободиме од водородот што стално се издвојува на електродата. Тоа се прави на следниов начин. На електродата се ставаат (електродата се обложува) со супстанции кои се активни оксидатори. Тие брзо реагираат со водородот претворајќи ги во вода.

Поларизацијата може да се одбегне и на друг начин. На пример кај Даниеловиот елемент (сл.8.7) се користат два раствора одвоени со полупропустлива преграда, така одбрани, што не може да дојде до промена на природата на електродите.

Лекланшеов елемент

Пример на галвански елемент со хемиска деполаризација е многу користениот Лекланшеов елемент (сл. 2). Неговата негативна електрода е од цинк, а позитивната е јаглеродна прачка обложена со прав од манганов оксид со графит за да се зголеми спроводливоста.



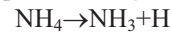
Сл.2

Како електролит служи раствор на амониум хлорид. Нормален електрохемиски потенцијал на MnO_2 изнесува 0,71 V, а тој на цинкот е -0,77 V. Така, ЕМС на елементот е :

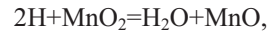
$$\mathcal{E}=(0,71)-(-0,77)\approx 1,5 \text{ V}$$

При активна работа на елементот, нега-

тивните јони на хлорот Cl^- од електролитот одат кон негативната електрода од цинк, додека позитивните јони NH_4^+ одат кон позитивната електрода и таму се распаѓаат на:



Бидејќи мангандвооксид е јак оксидатор, тој стапува во реакција со водородот по равенката :



така што се добива вода и манганоксид, а водород во слободна состојба не се одделува.

Сувите елементи, популарно наречени “батерии” се само некои варијанти на Лекланшевиот елемент и во основа се состојат од исти хемиски супстанции. Единствена разлика е во тоа што течниот електролит е заменет со влажна пивтиеста маса на амониум хлоридот измешана со вода и брашно, за електролитот да не излезе од садот. Како сад служи цилиндрично лонче од цинк, кој е истовремено и негативната електрода. Цилиндричниот сад е затворен со смола за подолготрајно да се задржи влажноста.

Во современите батерии се користат и галвански елементи од тврд електролит: или тврда кристална сол со јонска спроводливост или мембрана селективно пропустлива за јоните. Нивната ЕМС е 3 V, работат на температура од $(-55^{\circ}C)$ до $(+75^{\circ}C)$.

Од сето што погоре го кажавме ЕМС при појавата поларизација зависи од природата на електролитот и природата на електродите, бидејќи и двата фактора влијаат на секундарните реакции кои настануваат.

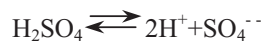
Во некои случаи ЕМС на поларизацијата може да е еднаква на нула. Таков е случајот на електролиза на $CuSO_4$ ако двете електроди се бакарни. Таму електродите не ја менуваат својата природа. Поларизација на електродите не настанува. Всушност до мала поларизација доаѓа поради промената на концентрацијата на електролитот во растворот, но таа е многу мала.

ЕМС на поларизацијата главно штетно влијае при процесите на електролиза. Но, постојат и уреди каде е таа појава корисно употребена. Тоа се акумулаторите.

Акумулатори

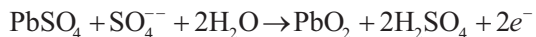
Електролитична поларизација нашла голема техничка примена кај акумулаторите, или, како што уште се викаат **секундарни галвански елементи**. При полнење на акумулаторите всушност се врши процесот електролиза, при што еден дел од работата на електрична струја се претвора во хемиска енергија, која, потоа, при празнењето се користи. Најпознат тип на акумулаторите се **оловни акумулатори**. (сл. 3).

Оловниот акумулатор се состои од две оловни електроди поставени во раствор на сулфурна киселина со густина $1,25 \text{ g/cm}^3$. При поставување на сулфурната киселина електродите се обложуваат со оловен сулфат PbSO_4 , а и растворот се заситува со таа сол. Инаку во растворот имаме јони на водород 2H^+ и SO_4^{2-} добиени со електролитична дисоцијација на сулфурна киселина:



При процесот полнење на акумулатор, тој се врзува за извор на струја и настануваат следниве процеси. Негативните SO_4^{2-} јони одат на анодата, која е поврзана со позитивниот пол на изворот на ЕМС, а позитивните 2H^+ одат на катодата. Тогаш на електродите настануваат следниве хемиски реакции:

На анодата:



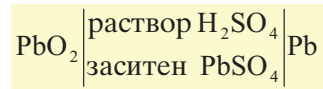
На катодата:



Како што гледаме, во текот на процесот полнење доаѓа до поларизација на електродите, на анодата се формира оловен двооксид (PbO_2) а на катодата елементарно олово Pb . Овие процеси се проследени и со создавање на молекули на сулфурна киселина H_2SO_4 кои остануваат во растворот и ја зголемуваат нејзината концентрација.

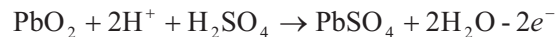
Кога акумулаторот е формиран, или, како што се вели “полн”, на позитивната електрода имаме оловен двооксид, а на катодата олово. За да се зголеми масата на активната супстанција на анодата и се олесни формирањето на

акумулаторот, анодата се прави во вид на скелет на олово кој се исполнува со оловен двооксид. Значи, по полнењето се добива елемент:

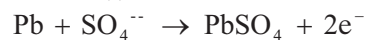


При празнење на акумулаторот, т. е. кога акумулаторот врши функција на извор на ЕМС, во надворешното струјно коло тече струја со насока од позитивната електрода на негативната, а во внатрешноста на изворот од негативната електрода кон позитивната. Струјата се одржува благодарение на електромоторната сила на акумулаторот, која е еднаква на разликата на електрохемиските потенцијали на двете електроди. При празнењето на акумулаторот настануваат хемиски реакции кои се инверзни на оние при полнењето. Притоа, на крајот двете електроди ќе станат еднакви и прекриени со PbSO_4 . Имено, при процесот **празнење** настануваат следниве реакции:

На анодата:



На катодата:



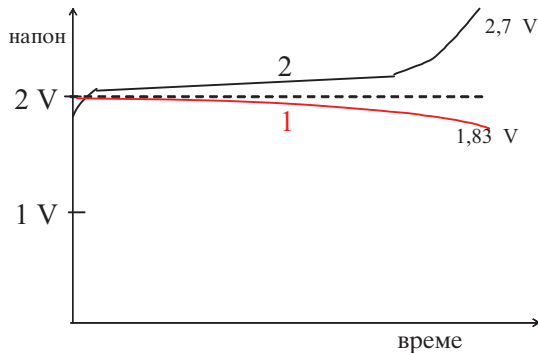
Гледаме дека двете електроди повторно стануваат еднакви. Поради тоа и разликата на електрохемиските потенцијали се намалува за на крајот сосема да се изгуби. Во електролитот за сметка на сулфурна киселина се добива вода, па значи и концентрацијата на сулфурната киселина се намалува. При опишаните хемиски реакции на анодата се ослободуваат електрони, а на катодата се примаат што и одговара на насоката на струјата кога акумулаторот се користи како извор на струја. На сликата 4 е дадена графичка зависност на напонот на еден акумулатор во функција од времето на користењето (крива 1) и полнењето (крива 2). Напонот е еднаков на ЕМС



Сл.3

7. Електрична струја низ електролити

намалена за падот на напонот на внатрешниот отпор на изворот. Во почетокот веднаш по формирањето, напонот на акумулаторот е 2 V, за потоа многу бавно да опаѓа, задржувајќи се на напонот од 1,95 V. Кога напонот ќе падне на 1,83 V, празнењето треба да се прекине за да се спречи претераната сулфатизација на електродите која го отежнува процесот на регенерација. При напон од 2,7 V при полнењето тоа се прекинува.



Сл. 4

Акумулаторите се карактеризираат со повеќе, за практиката важни, величини. Така, покрај ЕМС, тие се карактеризираат со големината на полнежот оддаван во текот на користењето. Таа величина се вика **капацитет на акумулаторот**. Обично се искажува во амперчасови (Ah). (Внимавајте иако се вика капацитет, оваа величина нема иста природа со електричниот капацитет). Капацитетот на акумулаторот е толку поголем колку е површината на електродите поголема. (Обично за секој килограм маса на акумулатор припаѓа по околу 35-40 амперчасови).

Контролата на состојбата на акумулаторот може да се прави или со мерење на неговиот напон со волтметар (задолжително при оптоварен акумулатор), или со контрола на концентрацијата на сулфурната киселина во неговиот електролит. За таа цел се користат специјално изградуирани ареометри (бометри) кај кои се дадени граничните вредности на концентрацијата на киселината (бомеи) за празен и полн акумулатор.

Количникот помеѓу количеството електричество Q_2 што поминува низ акумулаторот при неговото празнење (користење) и

количеството електричество што низ него поминува при полнењето Q_1 се вика **доброта на акумулаторот** ξ :

$$\xi = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1)$$

Енергетскиот **коэффициент на полезно дејство** η се дефинира како однос помеѓу искористената работа при користењето на акумулаторот W_2 и утрошената работа на струјата при полнењето W_1 :

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} \quad (3)$$

Оловните акумулатори имаат голема доброта до 95%, а коэффициентот на полезно дејство им е помеѓу 75-85%. Внатрешниот отпор им е мал, од ред на големина на стоти делови, или дури илјадити делови од ом.

Покрај оловните акумулатори денес се користат и железно-никелски, кои имаат ЕМС од околу 1,3 V.

Пример задача

На батерија акумулатори со 20 Ah, е вклучена светилка низ која тече струја од 0,25 A. Колкаво време може да свети оваа светилка без потреба на ново полнење на батеријата?

Решение

Со оглед на тоа што капацитетот на батеријата е 20 Ah, ќе биде:

$$Q = It \quad ; \quad t = \frac{Q}{I} = \frac{20}{0,25} = 80 \text{ h.}$$

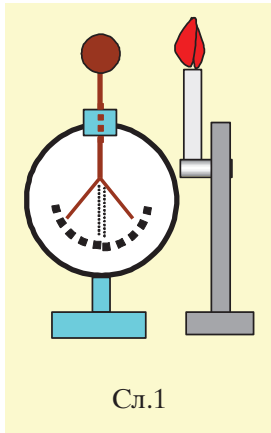
Дајте го значењето на следниве основни поими. таму каде што е потребно посочете и примери

-поларизација	-капацитет на акулулатор
-деполаризација	-доброта на акумулатор
-Лекланшеов елемент	-КПД на акумулатор
-оловен акумулатор	

8.1. ЕЛЕКТРИЧНА СТРУЈА НИЗ ГАСОВИ

Јонизација и рекомбинација

Гасовите при нормални услови се многу лоши спроводници на електричната струја. Ако во сув воздух се донесе наелектризиран електроскоп тој подолго време ќе остане наелектризиран. Тоа е затоа што помеѓу неговата глава и неговото тело е воздухот кој е многу добар изолатор.



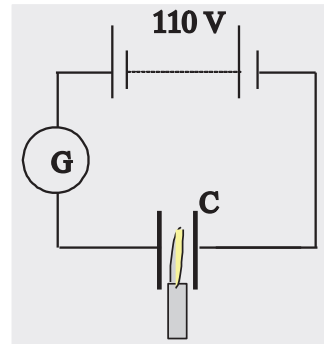
Сл.1

Состојбата ќе се промени ако во близина на електроскопот се донесе пламен од една свеќа (сл.1). Електроскопот веднаш се празни. Ако свеќата ја оддалечиме и од подалеку полека дуваме во свеќата, повторно може да дојде до неговото празнење. Што

предизвикува празнење на електроскопот? Сигурно нешто што го има во пламенот на свеќата. Во пламенот на свеќата се наоѓаат јони и електрони. Тие се создаваат со горењето на фитилот и високата температура што се развива во гасот.

Да се потсетиме што е тоа јон? Ако од атомот се одвои еден или повеќе од најслабо врзаните електрони, атомот станува позитивен јон. Велиме дошло до негова **јонизација**. Но, за да се случи тоа, треба на атомот да му се донесе некоја енергија. Откако атомот ќе ја прими енергијата, најслабо врзаниот електрон ќе може да ги совлада електростатичките сили и да го напушти атомот. Во случајот на пламенот, до јонизација дошло поради високата температура на гасот. Заклучуваме дека до празнење на електроскопот доаѓа поради движење на јоните и електроните помеѓу главата на електроскопот и неговото тело. Ова движење може да го сметаме за струја.

Значи, носители на струјата кај гасовите се електрони и јони.



Сл.9.2

Јонизација на гасовите можат да предизвикаат и други фактори, на пример, рендген зраците, ултравиолетови зраци или радиоактивните зраци. Предизвикувачите на процесот јонизација се викаат **јонизатори**.

При нормални услови, бројот на јоните и електроните предизвикани поради природното радиоактивно или космичко зрачење е многу, многу мал. Затоа гасот при нормални услови е изолатор.

Течењето струја кај гасовите често се вика **гасно празнење**.

Експеримент сличен на претходниот е скициран на сликата 2.

Се составува електрично коло како на сликата 9.2. Како инструмент се употребува многу осетлив галванометар G (осетливост и до 10^{-8} A).

Ако меѓу кондензаторските плочи се предизвика јонизација, галванометарот ќе покаже отклон.

Како јонизатор, освен пламенот, може да бидат употребени и други видови јонизатори: насочен сноп рендген-зраци, радиоактивен извор и сл.

Појавата јонизација се карактеризира со некои физички величини. Така, минимална енергија што треба да му се даде на еден атом за тој да се јонизира се вика **енергија на јонизација** (W_j). Таа зависи од градбата на атомите па затоа е различна кај атомите од различни супстанции.

Енергија на јонизација може да се определи на различни начини. Во табелата 1 се

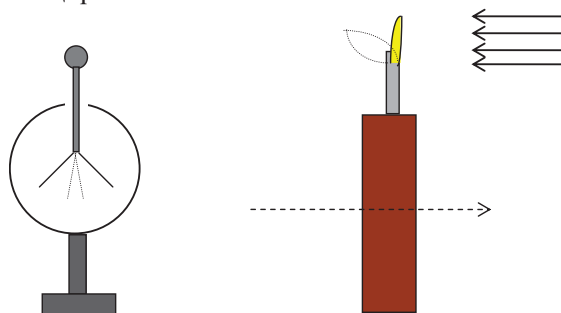
8. Електрична струја низ гасови

дадени енергии на јонизација за некои гасови. Вредностите се дадени во електронволти.

Табела 9.1

елемент	He	Ne	Ar	Hg	Na	K	Rb
енергија на јонизација во eV	24,5	21,5	13,9	10,4	5,12	4,32	4,68

По прекратувањето на дејството на јонизаторот, јоните во гасот не исчезнуваат веднаш. Јоните живеат уште извесно време. Во тоа може да нè убеди експериментот скициран на сликата 3.



Сл.3

Ако пламенот на свеќата го одалечиме од наелектризиран електроскоп, а во него дуваме со слаб фен, електроскопот ќе се разелектризира пак. Значи јоните создадени во пламенот се задржуваат во воздушната струја уште извесно време. Но тоа ќе станува сè до некое растојание. При некое растојание (над 1 метар) иако се дува во свеќата, до разелектризација на електроскопот не доаѓа. Ова покажува дека сега јоните учествувајќи во топлинското движење ќе се најдат во близина на избениите електрони и ќе се неутрализираат. При судир на јон и електрон се создава неутрален атом. Овој процес на заемната неутрализација на јоните и електроните се вика процес на **рекомбинација** на јони.

Објаснивме дека за да дојде до јонизација на неутрален атом треба да се потроши некоја енергија. При рекомбинација на позитивен јон и електрон, обратно, енергија се ослободува. Најчесто таа се

ослободува во вид на светлина. Затоа во процесот на рекомбинација на јони доаѓа до светење на гасот.

Јонизацијата е појава која се карактеризира со физичката величина **степен на јонизација** α .

Нека со n_0 ја означиме концентрацијата на молекулите на гасот:

$$n_0 = \frac{n}{V_g} \quad (1)$$

при што n е вкупниот број молекули на гасот а V_g неговиот волумен (Внимание: во ознаката на волуменот го ставаме индексот g за да не се брка оваа ознака со ознаката на напонот). Еден дел од тие молекули е јонизиран N , така што концентрацијата на јонизираните молекули N_0 е:

$$N_0 = \frac{N}{V_g} \quad (2)$$

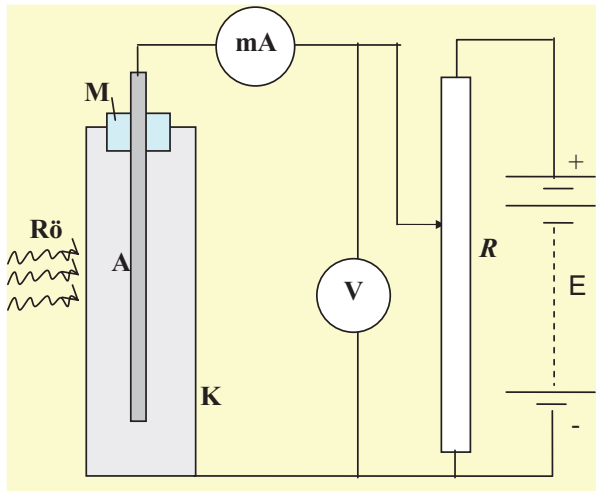
односот помеѓу бројот на јонизираните молекули и вкупниот број молекули е степен на јонизација α :

$$\alpha = \frac{N}{n} = \frac{N_0}{n_0} \quad (3)$$

Обично кај гасовите, при нормални услови овој однос е многу мал приближно 10^{-12} до 10^{-10} .

Паралелно со процесот јонизација во гасот тече и рекомбинација.

За испитување на процесот течење струја под влијание на надворешен јонизатор ќе разгледуваме што станува во т. н. јонизациона комора чија што шема е дадена на сликата 95. Телото на садот кое е наполнето со гас обично служи како катода, а анода има форма на прачка. Таа е изолирана од телото со добри изолаторски делови од килибар, порцелан, или специјална изолаторска пластмаса. Интензивно (рендген, гама или космичко) зрачење поминува низ сидот на комората. За β или α зрачење се користи специјално прозорче.

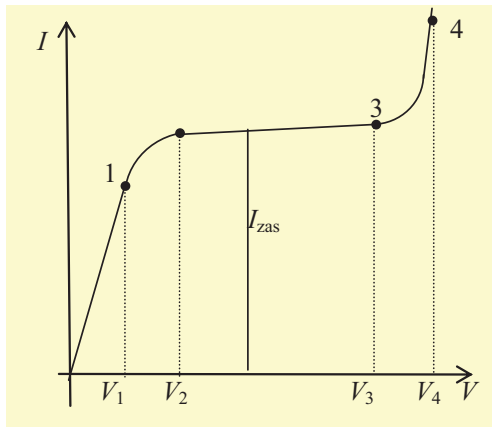


Сл. 4

Електродите се поврзуваат потенциометарски со извор на ЕМС од неколку стотици или илјади волти.

Со промена на напонот меѓу електродите и мерење на јачината на струјата во колото може да се добие волт-амперска карактеристика на гасното празнење во комората.

Волт-амперска карактеристика е прикажана со кривата дадена на сликата 5.



Сл.5

Прво, што може веднаш да се заклучи е дека оваа зависност не е омска. Имено, само во малиот дел од кривата кога напонот се менува од нула до V_1 зависноста е линеарна, во интервалот на напонот од V_1 до

V_2 линеарноста се нарушува и порастот на струјата е побавен од порастот на потенцијалната разлика. Најпосле, при напони поголеми од V_3 настанува заситување. Струјата е константна и еднаква на струја на заситување I_{zas} .

За да го објасниме ова однесување ќе ја пресметаме јачината на струјата во комората. Заради поеднастување на пресметките ќе претпоставиме дека двете електроди се паралелни рамнини, поставени на мало растојание d , така што може да се смета дека полето меѓу нив е хомогено, а густината на струјата во сите точки паралелни со рамнините еднаква.

Густината на струјата, слично како кај електролитите може и овде да се изрази со релацијата:

$$j = Q(N_+v_+ + N_-v_-) = e(N_+b_+ + N_-b_-)E \quad (9.11)$$

Во оваа формула b_+ е подвижност на позитивните јони, а b_- подвижност на електроните, N_+ концентрација на позитивните јони, N_- концентрација на негативните носители.

Треба да се напомене дека движење на јоните во гасовите е многу посложено од движењето јони во растворите на електролити, или движење на електрони во металите. Во металите дури и при многу синлни струи, концентрацијата на електроните е константна во целиот волумен на металот. Кај гасното празнење често се среќава нерамномерна распределба на јони меѓу електродите, тоа значи постои градиент на концентрацијата на јоните поради што се јавува и појавата дифузија на јони, односно електрони.

Втор факт што предизвикува сложеност на проблемот кај гасовите предизвикан е со промената на концентрацијата на јоните при течење на струја низ гасот. Со растење на струјата се намалува концентрацијата на јоните и зависноста на струјата од потенцијалот е една доста сложена функција.

8.2. САМОСТОЈНО ПРАЗНЕЊЕ

Судирна јонизација. Електронска лавина

Како што се гледа од графикот на сликата 5, од претходната лекција, при напони поголеми од V_3 струјата во комората нагло расте. Тогаш доаѓа до нагол скок на концентрацијата на јоните и електроните. Причина за тоа е појавата на **судирна јонизација**.

Објасниме дека за да се јонизира еден атом или молекул, тој треба да добие повисока или еднаква енергија од енергијата на јонизација W_j која зависи од природата на гасот. Така, ако кинетичката енергија на една честичка што се судира со некој атом, ја надминува енергијата на јонизацијата, тогаш при нееластичен судир, можна е негова јонизација. При високи вредности на електрично поле, електроните и јоните што се наоѓаат во просторот каде што е тоа поле, се забрзуваат од полето и добиваат кинетичка енергија еднаква на работата W на електростатските сили на полето E . За електронот таа ќе биде еднаква на:

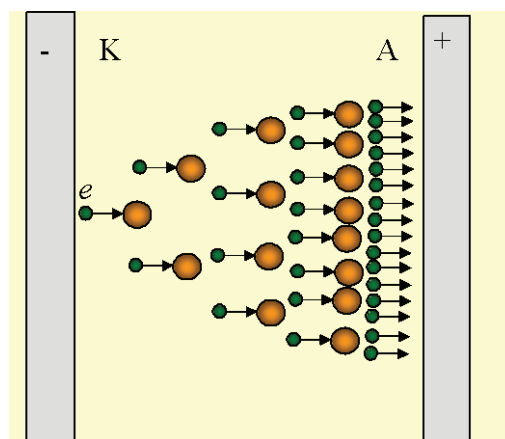
$$E_k = W = F\lambda = eE\lambda \quad (1)$$

Овде λ е среден слободен пат на електроните.

Во процесот на судирната јонизација, се забрзуваат и електроните и јоните. Меѓутоа, електроните имаат многу поголем среден слободен пат, па долж него повеќе се забрзуваат од јоните. Тоа е првата причина поради која што **електроните играат многу позначајана улога при судирната јонизација од јоните**. Втората причина лежи во следново. При судир со неутрален атом или молекул, за да дојде до нарушување на атомската градба, судирот мора да биде нееластичен. Според законот за запазување на импулсот при нееластичен судир само дел од кинетичката енергија може да се претвори во внатрешна енергија на атомот. Теоријата на нееластичен судир покажува дека, колку е масата на јонизирачката честичка помала во

споредба со масата на атомот или молекулот со кој се судира, толку е поголем делот на кинетичката енергија која може да се претвори во внатрешна енергија и да се потроши како енергија на јонизација. Поради оваа причина електронот како јонизатор е два пати поефективен од позитивниот јон. При судирна јонизација, во надворешно електрично поле со доволно голема јачина во гасот се создава лавина на електрони (јони)(сл. 1).

Еден од првите научници кој се занимавал со теоријата на самостојното празнење е Таунсенд (John Sealy Edward Townsend, 1868-1957). Тој прв и го објаснил создавањето на **електронската лавина** која настанува при судир на електрони со неутрални атоми или помекули.



Сл.1

Нека претпоставиме дека под влијание на некој надворешен јонизатор, на пример космичко зрачење, во комората се нашол еден електрон. Тој на својата должина на слободниот пат во електричното поле се движи забрзано и пред судирот ќе има некоја кинетичка енергија. Ако оваа енергија е поголема или еднаква на енергијата на јонизација, тогаш при судир со атомот ќе дојде до негова јонизација, и сега покрај јонот, и електронот -проектил, ќе се јави уште еден електрон. Електроните се движат кон анодата, а јонот кон катодата. Така, по овој акт на јонизација бројот на електроните

8. Електрична струја низ гасови

е два. Сега овие два електрона во силното електрично поле се забрзуваат и ја зголемуваат својата кинетичка енергија, такшто при идните судири се јавуваат 4 електрона. По третиот акт на јонизација, бројот на електроните се зголемува на 8, по четвртиот на 16 и.т.н. На тој начин бројот на електроните и јоните како се доближуваме до анодата лавинообразно расте.

Меѓутоа, појавата електронска лавина во гасот, сè уште не претставува самостојно празнење. При исклучување на надворешен јонизатор нема празнење.

За празнењето да биде самостојно, треба на некој начин да се создаваат електрони, за да може лавината сама од себе да се подржува, велиме да може да опстојува самостојното празнење.

Такви процеси има неколку. Понекогаш тие се случуваат истовремено, а понекогаш еден од нив има доминантна улога, сето тоа зависи од притисокот на гасот, од неговата температура како и од јачината на електричното поле. Ќе наброиме некои најважни од нив :

Термоелектронска емисија се случува тогаш кога катодата се наоѓа на висока температура. Овој процес е одговорен за самостојното празнење познато како електричен лак.

Секундарна електронска емисија од катодата се јавува во тој случај, кога кинетичката енергија на позитивните јони кои упаѓаат на катодата имаат доволно голема енергија да избиваат од катодата електрони. Тој процес е одговорен за самостојното празнење познато како тлеечко празнење.

Термојонизација на гасот станува тогаш кога е кинетичката енергија на молекулите на гасот поголема од енергијата на јонизација:

$$\frac{mv^2}{2} > W_j \quad (2)$$

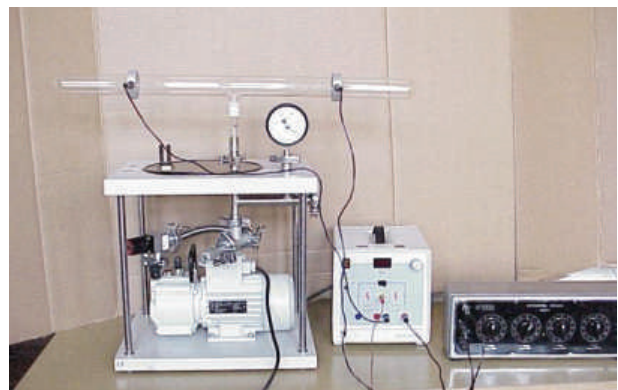
Овој вид создавање на јони значи многу висока температура на гасот. Знаеме дека средната кинетичка енергија на гасот е директно пропорционална со производот kT , каде што k е Болцмановата константа, па ако се има предвид дека енергија на јонизација е од ред на големина на 10 eV , тогаш

$$T > \frac{W_j}{k} = \frac{10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23}} \approx 10^5 \text{ K}$$

Фотојонизација на гасот настанува под влијание на кратkobраново ултравиолетово или рендгенско зрачење. Молекулот на гас кој ќе прими одреден квант на зрачење кој по големина на енергијата е поголем од енергијата на јонизација, тој може да предизвика јонизација на молекулот.

Тлеечко празнење

Еден од најважните процеси кој овозможува постојаност на самостојното празнење е секундарната емисија на електрони под дејство на бомбардирање на катодата со позитивни јони. Настанува тогаш кога позитивните јони имаат доволно голема енергија за да можат да избијат од катодата електрони, па така се добиваат додатни извори на јони, неопходни процесот да тече постојано. Овој вид надополнување на бројот на јоните се среќава кај празнењето кое се вика **тлеечко**.



Сл. 2.

8. Електрична струја низ гасови

Тлеечкото празнење може да се набљудува во една стаклена цевка со должина 30-50 cm која е поврзана со извор на постојан висок напон од неколку стотици волти (Сл. 2)

При атмосферски притисок иако меѓу електродите има висок напон, празнење нема, цевката е темна. Цевката потоа постепено се евакуира. При намалувањето на притисокот, во некој момент во цевката ќе дојде до празнење, прво во вид на искривен гајтан што оди од катодата кон анодата, а при понатамошно снижување на притисокот гајтанот се шири и постепено го исполнува сиот пресек на цевката, а светењето во близината на катодата ослабнува.

Механизмот на празнењето може поедноставено вака да се прикаже. Позитивните јони, кои се создаваат со судир со неутрални атоми на гасот со забрзаните електрони се движат кон катодата и поминувајќи го делот во близина на катодата, каде што постои катодниот пад на потенцијалот добиваат значителна кинетичка енергија. Така забрзаните јони ја бомбардираат катодата и од катодата избиваат електрони. (Избивање на електрони од катодата настанува и поради фотоефект). Избиените електрони во областа на катодниот пад на потенцијалот многу се забрзуваат, така што имаат доволно голема кинетичка енергија за да можат да вршат јонизација врз неутрални молекули или атоми на гасот. Како резултат на јонизацијата пак се јавуваат позитивни јони, кои се движат кон катодата, во областа на катодниот пад на потенцијалот добиваат значителна енергија за кога ќе паднат на катодата да предизвикаат избивање на електрони и така процесот трае постојано. На тој начин основните процеси кои го подржуваат тлеечкото празнење се судирна јонизација и секундарна емисија на електрони.

Постоењето на катодниот пад на потенцијалот се објаснува на следниот начин. Од катодата избиеените електрони не се судираат со неутралните атоми веднаш, туку на некое растојание од катодата. Ширината

на областа со катодниот пад на потенцијалот одговара приближно на средниот слободен пад на електроните. Оваа ширина се зголемува со намалувањето на притисокот на гасот.

Гледаме дека катодниот пад на потенцијалот е неопходен за да тече процесот на тлеечко празнење.

Тлеечкото празнење денес наоѓа широка примена за конструкција на различни цевки со гасно празнење. Така постојат живини лампи, кај кои празнењето се прави низ парите на жива, а притоа со нанесување на различни флуоресцентни супстанции на ѕидовите на цевката може да се добијат светилки со различни бои. Таквите цевки се користат како рекламни светилки, различни видови украсни светилки и др. Кај овие светилки многу е поголем делот на електричната енергијата што се претвора во светлина (и до 20%) во однос на обичните светилки каде што тој дел е многу помал (до 5%).

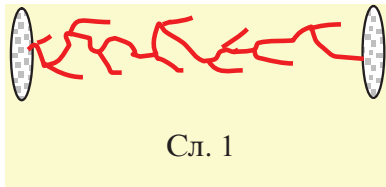
Користејќи го фактот дека катодниот пад на потенцијалот зависи од материјалот на катодата, може да се конструираат и цевки со мал напон на палење. Таква е на пример неонската тлеечка светилка. Таа се состои од две железни електроди прекриени со слој од бариум. Поради малата излезна работа на бариумот, катодниот пад на потенцијалот во овој случај изнесува само 70 V, па затоа ваквата светилка се пали и при напон од градска мрежа. Исто така вакви светилки се користат и како сигнални уреди во различни апарати.

Тлеечко празнење се користи и како катодно-распрснувачки метод за добивање на тенки филмови од супстанција од која се прави катодата. Кога катодата се бомбардира со многу забрзаните позитивни јони тие може да исфрлат цели атоми од супстанцијата на катодата. Избиените атоми се таложат на даден супстрат и така се добиваат тенки филмови.

8.3. НЕКОИ ВИДОВИ САМОСТОЈНО ПРАЗНЕЊЕ

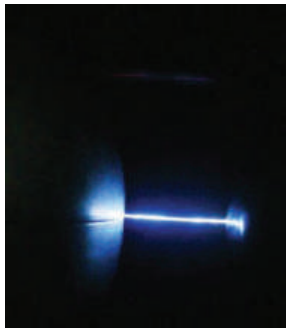
И при нормални услови може да дојде до гасно празнење. Тоа настанува во силно електрично поле. Силно електрично поле се создава во близина на шилците на наелектризираните тела.

Такво празнење е и *искрата*.



Сл. 1

Искрата претставува многу тенок светол канал кој е на многу места разгранет (сл. 1). Трае многу кусо време. Притоа се ослободува голема енергија за многу кусо време. Тоа го загрева гасот до високи температури, поради што тој засветува, нагло се шири и предизвикува пуцкање - звук.



Сл.2

Корона (Сл.2) настанува во силни многу нехомогени полиња. Така при атмосферски притисок во близина на шилци или жици, се создава силно електрично поле, и околу нив доѓа до празнење на гасот, кои се состојат од лавини на јони и електрони. Гасот во близина на шилецот почнува да свети. Светењето потсетува на корона. Високонапонските далноводи, поради зрачење во вид на корона губат значителен дел од нивната енергија.

Громобранот, зашилена жица поради коронално празнење лесно создава канал за атмосферско празнење.

Коронално празнење е искористено и кај електростатичките филтри за прочистување на воздухот од разни видови прашина и чад.

Атмосферско празнење



Сл. 3.

Пример на грандиозна искра во природни услови е празнењето при луњи (Сл. 3).

Повеќебројни истражувања покажале дека Земјата има вишок на електрони. Поради тоа, околу себе таа создава електрично поле. Покрај тоа, и молекулите на воздухот кои се наоѓаат високо над Земјата, се јонизираат под влијание на зрачењата кои доаѓаат од вселената и образуваат позитивно наелектризиран слој на атмосферата кој се вика *јоносфера*. Помеѓу Земјата и јоносферата постои силно електрично поле.

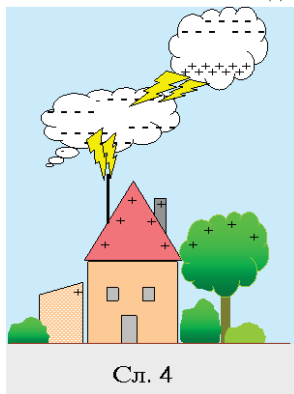
Температурата на слоевите воздух што се блиски до Земјината површина е повисока од температурата на повисоките слоеви. Таа разлика во температурата е причина за конвекција на воздухот. Топлиот воздух се крева повисоко, а постудениот паѓа надолу. Топлиот воздух е богат со водена пара која на поголеми височини, каде што е постудено, се кондензира во ситни водени капки. Ситните капки кои претставуваат облак, поради триење со воздухот се електризираат. Велиме облакот се наелектризира (сл.4).

8. Електрична струја низ гасови

Тој со инфлуенца ги електризира околните облаци или предметите на Земјината површина. Напонот помеѓу облаците и Земјата може да достигне и до 100 милиони волти. Така, при одредени услови може да дојде до електрично празнење низ воздухот.

Светлината што се емитуира при празнењето е *молња* (сл. 4), а звукот што се јавува после светењето на молњата е *грмотевица*. Празнењето врз објекти на Земјината површина се вика *гром*.

Јачината на струјата по должината каналот на молњата достигнува до 500000 А, а празнењето трае дел од микросекунди. Дејството на атмосферското празнење често е разорно. Така, ако гром удри во дрво, во него за кратко време се ослободува големо количество топлина и тоа може да се запали.



Сличноста помеѓу искрата и молњата експериментално ја потврдил во XVIII век американскиот физичар Франклин. Тој прв конструирал и *громобран* кој ги заштитува објектите и луѓето од ударот на гром. Громобранот се прави од метална прачка, зашилена на врвот и се поставува на највисокото место на објектот што се заштитува. Со подебела метална жица оваа прачка се поврзува со бакарна плоча добро закопана во земјата. Безбедната зона што ја штити таквиот громобран има форма на конус, чиј дијаметар на основата е со должина приближно еднаква на висината на громобранот. Подобра заштита се прави со помош на т.н. мрежести громобрани - метални ленти поставени на рабовите на покривите на објектите кои, исто така, треба добро да се поврзани со земјата.

Состојба на плазма

Плазмата е состојба кога атомите од кои е составен гасот се во јонизирана состојба. Плазмата може да се состои од електрони и јони (целосно јонизиран гас) а може да содржи и неутрални атоми (делумно јонизиран гас). ПЛАЗМАТА е четвртата агрегатна состојба на материјата (покрај гасовитата, течната и цврстата). Околу 99% од материјата во Вселената се состои од плазма. Сонцето и ѕвездите се состојат од наполно јонизирана плазма на висока температура

Дајте го значењето на следниве основни поими. Таму каде што е потребно посочете и примери

- судирна јонизација
- празнење
- самостојно празнење
- несамостојно празнење
- молња
- гром
- громобран
- неонски светилки

Прашања, задачи, активности

1. Како го објаснувате фактот што позитивните јони се движат во една насока, а електроните во спротивна, додека струјата низ гасот тече од анодата кон катодата?
2. Ако времетраењето на молњата изнесува $0,0000001$ s, а струјата е со јачина од 300000 А, тогаш колкав е полнежот што е пренесен во Земјата. (одговор: 0,03 C).
3. Се смета дека на целата Земја истовремено се случуваат по околу 1800 луњи. Тие предизвикуваат по околу 300 молњи во секоја секунда. Со оглед на фактот што тие носат негативен полнеж, колкав е полнежот што дневно се натрупува на Земјата? (Користете податоци од претходната задача) (Одговор: 777600 C)

9.1. ЗАЕМНОДЕЈСТВО ПОМЕЃУ СПРОВОДНИК НИЗ КОЈ ТЕЧЕ СТРУЈА И МАГНЕТНО ПОЛЕ

Околу секој спроводник се создава магнетно поле. Ќе направиме еден мал експеримент за да го докажеме тоа. Да поставиме спроводник во полето на еден потковичест магнет (сл. 1). Во моментот кога ќе го вклучиме спроводникот на извор на електрична енергија, на пример на некоја батерија, тој ќе се придвижи. Експериментот покажува дека **на спроводник низ кој тече струја дејствува сила во насока која е едновремено нормална на насоката на магнетното поле и нормална на насоката на течење на струјата**. Оваа сила со која магнетното поле дејствува на спроводникот низ кој тече струја се вика **Амперова сила**. За да ја откриеме насоката во која ќе дејствува Амперовата сила, може да се послужиме со Флеминговото правилото на левата рака (сл. 2). Наместете ги палецот, показалецот и средниот прст да бидат сите нормални еден на друг. Ако показалецот ја покажува насоката на магнетното поле, а средниот прст насоката на течење на струјата, тогаш палецот ја покажува насоката на Амперовата сила.

Ако два пати ја зголемиме јачината на струјата во спроводникот, ќе се зголеми и отклонот на спроводникот, што значи дека и

силата се зголемила два пати. Значи силата е право пропорционална со јачината на струјата. Ако ја зголемиме должината на спроводникот што се наоѓа во магнетното поле, силата повторно ќе се зголеми. И оваа зависност е право пропорционална. Значи:

$$F_m \sim I \ell \quad (1)$$

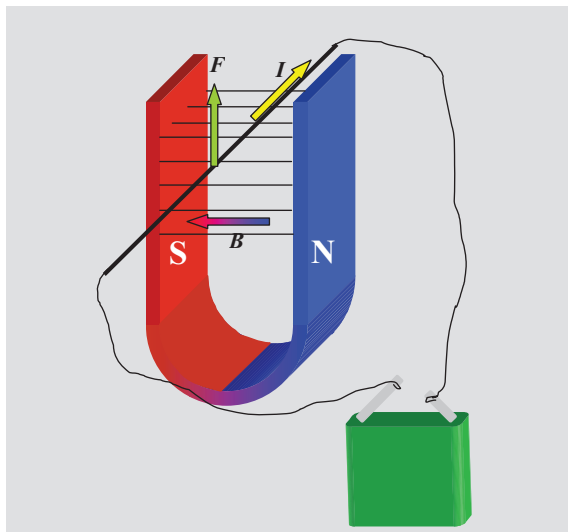
За да имаме равенство ни треба само уште еден коефициент на пропорционалност, B :

$$F_m = B I \ell \quad (2)$$

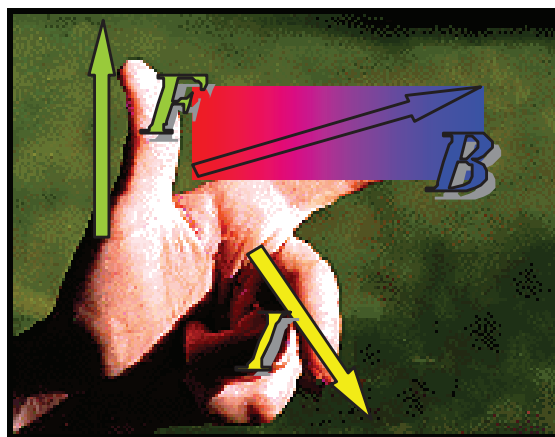
Овој коефициент на пропорционалност во физиката има свое физичко значење и се вика **магнетна индукција**. Нејзината вредност е карактеристика на магнетното поле кое дејствува на спроводникот, во која се вклучени јачината на магнетното поле и својствата на средината во која се наоѓа тоа поле. Всушност равенката за Амперова сила во општ случај е:

$$F_m = B I \ell \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

каде што α е аголот што го зафаќаат насоката на магнетните силиви линии и насоката на течење на струјата. Во нашиот експеримент тој агол изнесуваше 90° . За таа вредност на аголот силата е најголема. Ако се намали аголот, значи ако насоката на



Слика 1



Слика 2

9. Електромагнетизам

магнетното поле, односно на магнетната индукција и насоката на течење на струјата зафаќаат некој остар агол, тогаш и силата ќе се намали. За вредност 0° на аголот, значи кога насоката на магнетната индукција и насоката на течење на струјата се паралелни, силата е нула.

Магнетната индукција е векторска величина. Векторот на магнетната индукција е поставен по тангентата на магнетните силиви линии и е насочен како и магнетното поле. Од рав. 3 се добива:

$$B = \frac{F_m}{I \ell} \quad (4)$$

Од рав.(4) следува дека **магнетната индукција претставува сила со која магнетното поле дејствува на спроводник со должина 1 m и низ кој тече струја од 1 A, кога спроводникот е поставен нормално на магнетните силиви линии**. Единица за магнетна индукција е тесла (T). Ако во рав. 4 ги замениме единиците, добиваме:

$$T = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ m}} \quad (5)$$

односно **магнетното поле е со индукција од 1 T ако тоа поле дејствува со сила од 1 N на спроводник низ кој тече струја со јачина од 1 A, при што спроводникот е поставен нормално на насоката на магнетното поле**.

Кога зборувавме за постојан магнет и силивите линии на неговото магнетно поле, рековме дека онаму каде што се погусте линиите и полето е појако. На сликите на кои се претставени магнетни полиња на магнети, а подоцна ќе видиме и на спроводници, на некои места нема нацртано силиви линии, или пак струганиците што ги користиме за визуелизирање на магнетното поле и силивите линии на некои места нема да го пополнат просторот. Тоа не значи дека во тие точни нема магнетно поле и нема магнетна индукција. Во секоја точка од магнетното поле постои магнетна индукција, но ние не можеме да ги нацртаме сите силиви линии. Затоа постои договор да се

цртаат онолкува број силиви линии, колку што изнесува модулот (големината) на магнетната индукција на единица плоштина од нормална површина. Тоа значи дека густината на силивите линии може да биде некаква мерка за јачината на магнетното поле, односно за магнетната индукција. Ако со Φ (фи) го означиме бројот на силиви линии што поминуваат низ дадена површина поставена нормално на силивите линии, а со S ја означиме плоштината на површината, тогаш производот од магнетната индукција и плоштината ќе го даде бројот на силиви линии Φ :

$$\Phi = B \cdot S \quad (6)$$

Φ се вика **магнетен флукс**. Оттука за магнетната индукција се добива:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (7)$$

Единица за магнетен флукс е вебер (Wb), а значењето на таа единица може да го добиеме ако ги замениме единиците за индукцијата и за плоштината во равенка (7):

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m}^2$$

Магнетниот флукс е 1 Wb, ако магнетната индукција на површината низ која силивите линии поминуваат нормално е 1 T, а плоштината изнесува 1 m². Ако магнетните силиви линии не поминуваат низ рамнината во која го мериме флуксот под прав агол, туку под некој произволен агол (сл.4), тогаш во рав.(6) на местото за магнетната индукција, B , треба да ја замениме компонентата на магнетната индукција која е во насока на нормалата на рамнината, B_n :

$$B_n = B \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

со што равенката (10) го добива општиот облик:

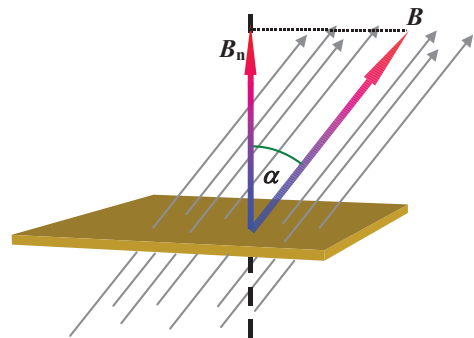
$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha \quad (9)$$

каде што аголот α е агол помеѓу силивите линии и нормалата на рамнината во која го пресметуваме флуксот (сл.3).

9. Електромагнетизам

Дајте го значењето на следниве основни поими. Таму каде што е потребно посочете и примери

- Амперова сила
- магнетна индукција
- Флемингово правило на левата рака
- тесла
- магнетен флукс
- вебер



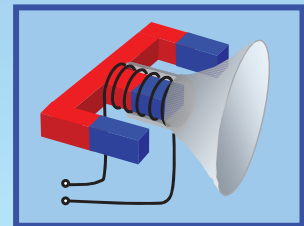
Слика 3

Заемнодејството помеѓу магнетното поле и спроводниците низ кои тече струја масовно се користи во техниката.

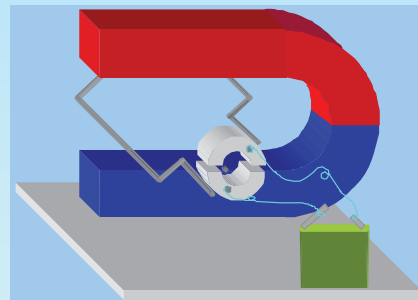
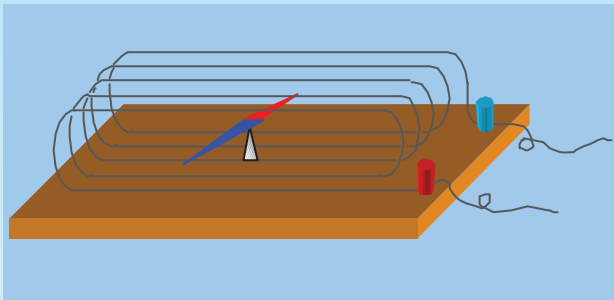
Сите звучници (во радиото, касетофонот, CD-плеерот и друго) ја користат токму оваа појава. Мембраната на звучникот е закачена на една намотка од жица. Овој калем се наоѓа во магнетното поле на еден постојан магнет, поставен во близина на калемот. Кога низ



калемот тече струја во една насока, магнетното поле влијае со сила врз калемот, а со тоа и врз мембраната во една насока. Кога тече струја низ калемот во друга насока и силата ја менува својата насока, па калемот, односно мембраната се придвижува во другата насока. На тој начин промената на струјата се претвора во вибрирање на мембраната, односно во звук.



Мерните инструменти, како што се: амперметрите, волтметрите, омметрите, галванометрите, ја користат појавата на заемното дејство помеѓу спроводник низ кој тече струја и магнетно поле. На сликата долу лево е даден еден едноставен мерен инструмент. Обидете се да го објасните начинот на работа на овие инструменти.



На втората слика десно е даден шематски изглед на мотор. Искористете го знаењето од оваа лекција за да го објасните принципот на работа на моторот?

Помош: обрнете внимание на контактите кои го носат електричниот сигнал кај мерниот инструмент, односно кај моторот. Системот од полуцилиндри што се искористени кај моторот како контакти се вика комутатор. Со ротирање, на комутаторот на контактите рамката во моторот се менуваат, односно го менуваат поларитетот. Зошто е тоа така направено?

9. Електромагнетизам

Прашања, задачи, активности

1. Магнетот преку своето магнетно поле дејствува со сила врз спроводникот. Дали и спроводникот дејствува со некоја сила врз магнетот? Колкава е таа сила? Кој е законот кој го опишува ова?

2. Низ дадена површина нормално на неа поминуваат 100 силиви линии. Дали флуксот низ таа површина е ист ако 100 силиви линии поминуваат низ таа површина под агол од 30° во однос на нормалата на површината?

3. Низ дадена површина нормално на неа поминуваат 100 силиви линии. Дали флуксот низ таа површина ќе се смени ако се искоси површината во однос на силивите линии?

4. Која е суштинската разлика помеѓу галванометрите и моторите? Дали еден галванометар може да се претвори во мотор и обратно?

5. Спроводник долг 0,5 m низ кој тече струја со јачина од 8 A е поставена под прав агол во однос на силивите линии на хомогено магнетно поле. Силата со која полето дејствува на спроводникот изнесува 0,4 N. Колкава е магнетната индукција?

(Одговор: 0,1 T)

6. Магнетната индукција на полето во еден звучник изнесува 0,15 T. Електромагнетот е направен од жица намотана на цилиндрично јадро со дијаметар од 2,5 cm. На тој начин се направени 250 навивки. Ако отпорот на жицата е 8 Ω , а напонот кој е приклучен на звучникот е 15 V, пресметајте ја силата која е употребена за да се помести мембраната на звучникот.

(Одговор: 5,5 N)

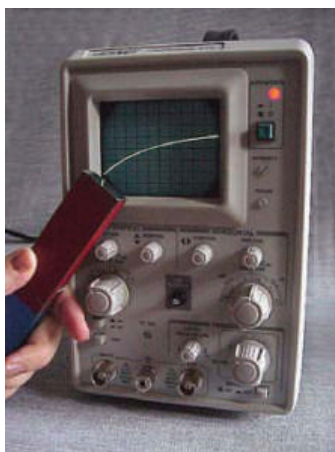
Zanimivosti

Колкава е магнетната индукција на некои карактеристични магнетни полиња?

Извор на магнетното поле	B (T)
површина на неутронска ѕвезда	10^8
многу силни електромагнети кои во лабораториски услови работат кратко, околу 10^{-4} s	до 500
силни лабораториски магнети	до 20
мал постојан прачкест магнет	$\sim 0,01$
магнетно поле на површината на Земјата	$3 \cdot 10^{-5}$
во меѓузвездениот простор	10^{-10}
човечки мозок	10^{-12}

9.2. ЗАЕМНОДЕЈСТВО ПОМЕЃУ ЕЛЕКТРИЧЕН ПОЛНЕЖ ВО ДВИЖЕЊЕ И МАГНЕТНО ПОЛЕ

Видовме дека магнетно поле и спроводник низ кој тече струја заемно си дејствуваат со сила. Но, кога низ спроводникот тече струја, всушност низ него се движат електрични полнежи, односно електрони. Силата која го поместува спроводникот всушност е сила со која магнетното поле дејствува на електроните во движење. Дека е тоа така може да провериме на многу едноставен начин. Може да земеме осцилоскоп, да го вклучиме, но на влезот да не донесеме никаков сигнал. Во тој случај на екранот од осцилоскопот ќе имаме хоризонтална права линија. Таа линија е испишана од електроните кои се испратени од електронската пушка на катодната цевка и паѓаат на екранот. Ако во близина на екранот донесеме магнет, правата линија ќе се искриви (сл.1). Ако го поместуваме магнетот и искривениот дел ќе се поместува и ќе ја менува својата искривеност. Ефектот е поголем со потковичест магнет.



Сл. 1.

Нека еден електричен полнеж со количество електричество Q се движи со брзина v низ простор во кој владее магнетно поле со магнетна индукција B . При тоа, векторите на брзината и магнетното поле нека зафаќаат агол α . Тогаш силата со која дејствува маг-

нетното поле врз полнежот е дадена со следниов израз:

$$F_L = qvB \sin \alpha \quad (1)$$

Оваа сила се вика **Лоренцова сила**. Ако $\alpha=90^\circ$, односно ако векторите на брзината и на магнетната индукција се нормални еден на друг, тогаш $\sin \alpha=1$ и рав. (6) го добива следниов поедноставен облик:

$$F_L = qvB \quad (2)$$

На истиот начин како што ја определивме насоката на Амперовата сила при заемно дејство помеѓу спроводник низ кој тече струја и магнетно поле, може да ја определиме насоката на Лоренцовата сила со помош на Флеминговото правило. Овде разликуваме правило на левата рака, кога се работи за негативен електричен полнеж и на десна рака, кога се работи за позитивен електричен полнеж. И во двата случаи средниот прст ја покажува насоката во која се движи полнежот, показалецот ја покажува насоката на магнетната индукција, а палецот насоката на Лоренцовата сила (сл.2 од лекцијата 3.2 *Заемно дејство помеѓу спроводник низ кој тече струја и магнетно поле*, со таа разлика што на местото на јачина на струјата, треба да стои вектор на брзина на електричниот полнеж).

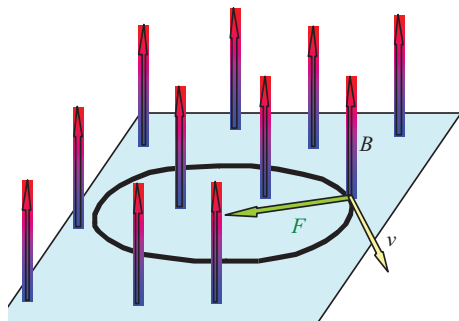
Кога векторите на брзината и магнетната индукција се паралелни меѓу себе, односно кога полнежот се движи паралелно со силите линии на магнетното поле (не ги сече), тогаш $\sin 0^\circ = 0$ и $F_L = 0$, односно магнетното поле не дејствува со сила на полнежот.

Според вториот закон на Њутн, на Лоренцовата сила ѝ одговара соодветно **забрзување**:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_L}{m} \quad (3)$$

каде што m е маса на честицата. Забрзувањето \vec{a} има иста насока како и Лоренцовата сила. Лоренцовата сила секогаш е нормална на векторот на брзината на честицата, па тоа значи дека таа нема да влијае на големината на брзината, но ќе влијае на правецот на брзината. Ова не води до заклучок дека ваква честица во магнетно поле ќе се движи по

кружница која лежи во рамнина нормална на силовите линии на магнетното поле.



Сл.2

Всушност, под влијание на Лоренцовата сила, честицата добива **центрипетално забрзување**, односно Лоренцовата сила е **центрипетална сила**. Ако е така, тогаш во рав.(3) може да се замени изразот за Лоренцовата сила од равенка (2) и да се добие:

$$a = \frac{q v B}{m} \quad (4)$$

Од друга страна, знаеме дека центрипеталното забрзување можеме да го изразиме преку брзината на честицата, v , и радиусот на кружницата по која се движи честицата, R :

$$a = \frac{v^2}{R} \quad (5)$$

Од рав.(4) и (5) следува:

$$\frac{q v B}{m} = \frac{v^2}{R} \quad (6)$$

По кратко средување на овој израз, ја добиваме равенката за радиусот на патеката по која се движи полнежот:

$$R = \frac{m v}{q B} \quad (7)$$

Прашања, задачи, активности

1. Какво поле постои околу електричен полнеж во мирување, а какво околу електричен полнеж во движење?

2. Кога векторите на магнетната индукција и брзината на електричниот полнеж се под прав агол, полнежот се движи по кружница. Ако се смени аголот, каква ќе биде патеката на полнежот?

Помош: векторот на брзината разложете го на две компоненти, една компонента нормална на полето, v_n , и една паралелна со насоката на полето, v_p . Разгледајте го прво движењето на полнежот како да ја има само компонентата v_n , а потоа како да ја има само компонентата v_p . Колкава е силата во вториов случај? Како ќе влијае компонентата v_p на патеката што ќе се добие од компонентата v_n . Соберете ги овие две движења заедно. Што добивте?

3. Еден електрон, кој е во мирување, е поставен во магнетно поле со индукција од 0,5 Т. Колкава е силата со која полето дејствува врз електронот?

4. Електрон се движи со брзина од $2 \cdot 10^7$ m/s во рамнина нормална на магнетните силиви

линии во поле со магнетна индукција $B=0,1$ Т. Определете го радиусот на траекторијата.

(Одговор: 1,1 m)

3. Вклучете го вашиот телевизор или мониторот на компјутерот. Земете еден магнет и приближете го до екранот. Што се случува? Зошто? Внимавајте!!! Ако е магнетот пресилен, немојте да го приближувате многу и немојте да го задржувате предолго на едно место од екранот. Ефектот може да биде многу интензивен и привремено да ги смени карактеристиките на екранот. Почнете да се приближувате кон екранот од поголемо растојание (околу 0,5 m). Штом ќе забележите големи промени на екранот, веднаш отстранете го магнетот од екранот.

Дајте го значењето на следниве основни поими. Таму каде што е потребно посочете и примери

- Лоренцова сила
- центрипетално забрзување кај Лоренцовата сила
- радиус на кружница кај Лоренцовата сила

9.3. МАГНЕТНО ПОЛЕ НА СПРОВОДНИК НИЗ КОЈ ТЕЧЕ СТРУЈА

Видовме дека два магнета заемно си дејствуваат преку своите полиња со сили на одбивање или привлекување. Исто така, видовме и дека спроводници низ кои тече струја заемно дејствуваат со магнет, односно се појавува Амперовата сила.

Спроводникот низ кој тече струја заемно дејствува со магнет, многу слично како магнет со магнет. Дали ова значи дека струјата околу себе создава магнетно поле? Да направиме еден експеримент. Низ еден картон нормално на него да протнеме еден спроводник. Картонот да го поставиме хоризонтално и на него да "посееме" железни струганици. Кога ќе пуштиме да протече струја низ спроводникот, струганиците ќе се подредат околу спроводникот во вид на концентрични кружници (сл. 1).

Ова нè наведува на заклучок дека кога ќе протече струја, **околу спроводникот се појавува магнетно поле**. Можеме да заклучиме дека силовите линии на ова магнетно поле се во облик на кружници кои лежат во рамнини нормални на спроводникот. Како се оддалечуваме од спроводникот, густината на силовите линии се намалува, односно магнетното поле станува послабо.

Десната рака ја употребиме за да ги определеме насоките на Амперовата и Лоренцовата сила, а сега ќе го употребиме **правилото на свиени прсти на десна рака** за да ја определеме насоката на магнетните силови

линии. Да го фатиме спроводникот со десната рака, така што испружениот палец да ја покажува насоката на течење на струјата. Свитканите прсти околу спроводникот ја покажуваат насоката на магнетните силови линии (сл.1).

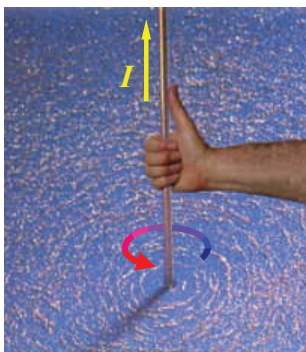
Независно од обликот на спроводникот, кога низ него тече струја, во неговата околина секогаш се формира магнетно поле (сл.2 и 3).

Да видиме колкава е магнетната индукција на магнетно поле околу прав спроводник.

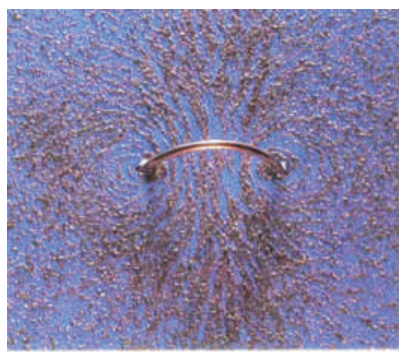
Логичното размислување нè води до заклучок дека колку е појака струјата што тече низ спроводникот, толку ќе биде поголема и магнетната индукција. Малку посложени експерименти и теориска анализа би ни покажале дека магнетната индукција е токму право пропорционална со јачината на струјата, односно, ако двапати се зголеми јачината на струјата, и магнетната индукција ќе се зголеми двапати ($B \sim I$). Од друга страна експериментот со железните струганици ни покажа дека ако се оддалечуваме од спроводникот полето ослабува. Уште еден малку посложен експеримент и една теориска анализа би ни покажале дека магнетната индукција е токму обратно пропорционална со растојанието ($B \sim 1/r$). Значи:

$$B \sim \frac{I}{r} \quad (1)$$

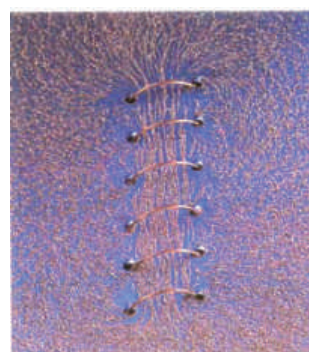
За да имаме равенство ни треба само уште еден коефициент на пропорционалност $k = \mu / 2\pi$. Оттука ја добиваме формулата за пресметување на магнетната индукција околу прав спроводник низ кој тече струја со јачина I :



Слика 1



Слика 2



Слика 3

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2)$$

Константата μ_0 има физичко значење и се вика **магнетна константа или магнетна пермеабилност во вакуум**. За вакуум таа изнесува:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T m}}{\text{A}}$$

Почесто магнетната константа се искажува во Н/м (хенри врз метар). Зошто е тоа така ќе видиме малку подоцна.

Многу интересен случај од практична гледна точка е магнетното поле на соленоид (сл.3), затоа што од соленоидите се прават електромагнети. Соленоидот претставува намотка, која нема тело и нема јадро во внатрешноста. На сликата може да се види дека во неговата внатрешност се создава хомогено магнетно поле, односно, во сите точки од тој простор магнетната индукција е иста по правец, насока и големина. Дека полето е хомогено, ни покажуваат и силовите линии кои се паралелни и со еднаква густина. Големината на магнетната индукција во внатрешноста на соленоидот се определува со:

$$B = \mu_0 \frac{N \cdot I}{\ell} \quad (3)$$

каде што N е број на навивки на соленоидот, I е јачина на струјата што тече низ соленоидот, а ℓ е должина на соленоидот.

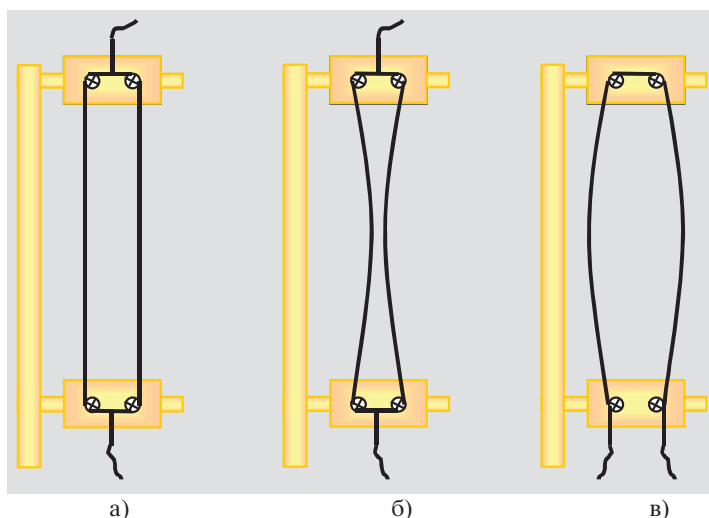
Заемнодејство помеѓу два паралелни спроводника низ кои тече струја

Видовме дека околу спроводник низ кој тече струја се формира магнетно поле. Тоа значи дека два спроводника може заемно да си дејствуваат како што тоа го прават два магнета, да се привлекуваат и одбиваат. Да направиме експеримент. Да поставиме две паралелни жици да висат една до друга (сл.4а). Ако низ жиците пуштиме да течат струи со иста насока, жиците ќе се привлечат

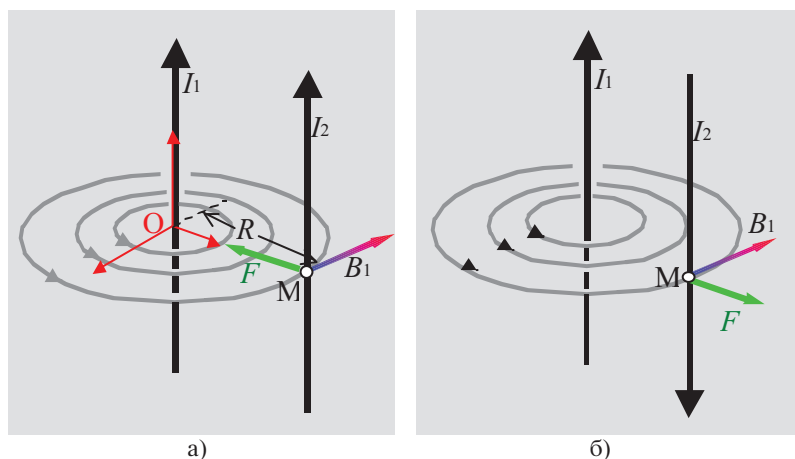
(сл.4б). Ако низ жиците пуштиме да течат струи со спротивни насоки, двете жици ќе се одбијат (сл.4в).

Внимание! За да ви успее овој експеримент потребно е да течат струи со големи јачини. Не се обидувајте да го направите експериментот без помош од професорот или некој друг возрасен.

Да ја определиме насоката и големина на силата со која заемно си дејствуваат спроводниците. Нека во едниот спроводник тече струја со јачина I_1 , а во другиот со јачина I_2 (сл.5а). Првиот спроводник формира магнетно поле во просторот околу себе. Со B_1 да ја означиме магнетната индукција на полето од првиот спроводник на местото каде што се наоѓа вториот спроводник. Применете го Флеминговото правило на левата рака за да ја определите насоката на силата која дејствува врз вториот спроводник (средниот прст ја покажува насоката на течење на струјата, показалецот ја покажува насоката на магнетното поле, односно на магнетната индукција и палецот ја покажува насоката во која дејствува силата). Ќе дојдете до заклучок дека силата е во насока кон првиот спроводник. Направете ја истата анализа и за силата на магнетното поле од вториот спроводник врз првиот спроводник. Ќе заклучите дека оваа сила е во насока кон вториот спроводник. Двата спроводника дејствуваат еден кон друг,



Слика 4



Слика 5

односно се привлекуваат.

Два паралелни спроводника низ кои течат струи со исти насоки се привлекуваат.

Да ја повториме истата анализа за спроводници низ кои течат струи со спротивни насоки. Правилото на десната рака за определување на насоката на силата ќе покаже дека силите дејствуваат од спроводниците на надвор (сл.5б), односно во насока на одбивање на спроводниците.

Два паралелни спроводника низ кои течат струи со спротивни насоки се одбиваат.

Да ја пресметаме силата со која заемно си дејствуваат овие спроводници. Координатниот почеток на координатниот систем да го поставиме во точката О на првиот спроводник низ кој тече струја со јачина I_1 (сл.5а). Точката М се наоѓа на вториот спроводник низ кој тече струја со јачина I_2 . Магнетната индукција на полето создадено од првиот спроводник во точката М е:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R} \quad (4)$$

Вториот спроводник се наоѓа во магнетното поле создадено од првиот спроводник. Ако должината на вториот спроводник е ℓ , тогаш силата со која првиот спроводник дејствува на вториот е:

$$F = I_2 \cdot \ell \cdot B_1 \quad (5)$$

Ако во рав.(5) го замениме изразот за магнетната индукција од рав.(4), ја добиваме силата на заемно дејство помеѓу два паралелни

спроводника низ кои тече струја, кога тие се поставени во вакуум:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} \cdot \ell \quad (6)$$

каде што R е растојанието помеѓу двата спроводника, а ℓ е нивната должина.

Релацијата (6) е употребена за да се дефинира единицата за јачина на струја, ампер.

Низ два многу долги и многу тенки паралелни спроводници тече еднаква струја со јачина од по 1 А, ако тие се поставени во вакуум на растојание од 1 m и на секој 1 m од својата должина си заемно дејствуваат со сила од $2 \cdot 10^{-7}$ N.

Прашања, задачи, активности

- Кои од следниве тврдења се точни, а кои погрешни:
 - магнетните силиви линии околу прав спроводник низ кој тече струја се во облик на концентрични кружници;
 - магнетните силиви линии околу кружен спроводник низ кој тече струја се во облик на паралелни прави;
 - магнетните силиви линии околу соленоид се слични на оние околу постојан магнет.
- Како ќе се промени магнетната индукција во внатрешноста на соленоидот, ако соленоидот го развлечеме така, што должината ќе му стане два пати поголема?
- Два прави спроводника се поставени паралелни еден на друг и на растојание r . Низ првиот тече струја со јачина I_1 , а низ вториот со јачина $2I_1$. Со колкава сила дејствува првиот на вториот спроводник, а со колкава вториот на првиот?
- Два прави спроводника се поставени во воздух еден над друг. Двата имаат еднакви должини-по 1 m и еднакви маси-по 1 g. Низ нив течат еднакви струи по јачина но со спротивни насоки. Колкава треба да биде јачината на струјата за да лебди горниот спроводник над

долниот на растојание од 2 cm.

(Одговор: ~31 A)

5. Конструирајте електромагнет. Навиткајте околу молив изолирана бакарна жица така, што ќе направите 30 навивки. Спојте ги краиштата на жицата со батерија од 4,5 V. До таквиот електромагнет доближете железен предмет (клинче, игла, спојувалка на хартија и сл.). Испитајте ја јачината на магнетот на начин на кој го направивте кај постојаниот магнет во првата лекција од оваа глава, *Магнетно поле на постојан магнет*. На местото од оваа батерија ставете друга од 1,5V. Испитајте ја јачината и на овој магнет. Дали тие имаат иста јачина? Која физичка величина се сменила? Зошто? Променете го бројот на навивки и повторете го испитувањето.

7. Со помош на софтверскиот пакет EM Field (Електромагнетно поле) визуелизирајте магнетно поле на прав спроводник низ кој тече струја. Исцртајте ги силовите линии. Исцртајте ги векторите на магнетните индукции во различни точки. Каква е насоката на овие вектори во однос на силовите линии? Симулирајте повеќе спроводници низ кои течат струи со различни јачини. Исцртајте ги силовите линии и на овие спроводници. Како се менуваат силовите линии во зависност од јачината на струјата што тече низ спроводниците?

Стартувајте ја Challenge Game (Играта на предизвик). Започнете ја играта во најлесно ниво, со еден сокриен спроводник. Кликнувајќи во празното поле добивате информации за насоката и големината на векторот на магнетна индукција во различни точки. Искористете ги овие информации за да откриете каде се наоѓа спроводникот. Обидете се да го направите тоа со што е можно помалку референтни вектори на магнетната индукција. Откако ќе откриете каде се наоѓа спроводникот, продолжете со играта во повисоките нивоа. Среќно!

Дајте го значењето на следниве основни поими. Таму каде што е потребно посочете и примери

- Магнетна индукција на прав спроводник
- Амперова сила помеѓу два паралелни спроводника
- правило на свиените прсти на десната рака

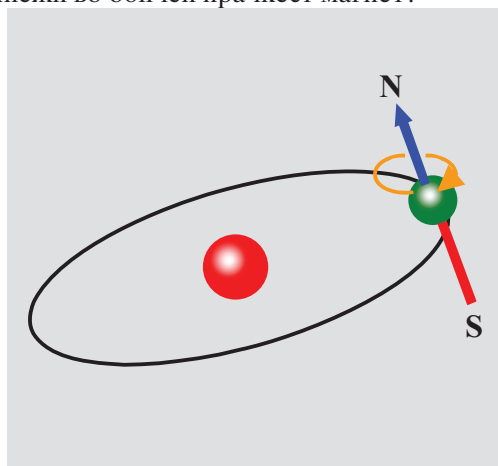
9.4. МАГНЕТНИ СВОЈСТВА НА СУПСТАНЦИИТЕ

Конечно, имаме доволно знаење да навлеземе подлабоко во природата на магнетизмот, да си објасниме што е тоа магнет, зошто ги има тие својства, зошто некои материјали може да се привлекуваат со магнет, а други не.

Видовме дека магнетизмот е во непосредна врска со електричеството. Околу спроводник низ кој тече струја се формира магнетно поле. А што, всушност, е струја? Тоа е движење на наелектризиани честици. Како што околу електричен полнеж во мирување постои електрично поле, така околу електричен полнеж што се движи има магнетно поле. Зошто е тоа така прв објаснил шкотскиот физичар Џејмс Кларк Максвел (James Clarck Maxwell, 1831-1879), а подоцна ја дообјаснил германскиот физичар Алберт Ајнштајн (Albert Einstein, 1879-1955), во 1905 година со неговата специјална теорија на релативноста, но ние нема да навлегуваме во тие објаснувања.

Дали можеби и магнетното поле на постојаните магнети е резултат на движење на електрични полнежи? Можеби ќе се зачудите, но одговорот е ДА.

Но, каде е движењето на електрични полнежи во обичен прачкест магнет?



Сл.1

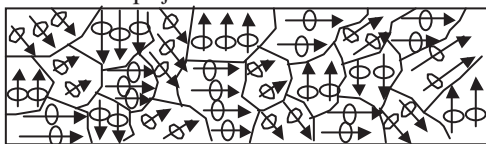
Магнетот е составен од атоми. Околу јадрата на атомите во постојано движење се електроните (сл.1). Тие се движат по кружни патеки. Ова движење на електроните, како и

секоје друго движење на наелектризираните честици, предизвикува создавање на **орбитално магнетно поле**. Освен што електронот орбитира околу јадрото, тој, исто така, ротира и околу својата оската како вртешка. Ова ротирање се вика **спин** на електронот. Ротацијата на овој електрон, исто така, одговара на движење на електричен полнеж, што е повторно течење на струја. Ова движење, од своја страна, создава дополнително **спинско магнетно поле**. На овој начин секој електрон станува еден мал елементарен магнет. Електроните се обично "спакувани" во парови, кои имаат спротивни спинови. Овие спротивни спинови имаат спротивни магнетни полиња, па така тие се поништуваат. Тоа е причина зошто повеќето од материјалите не се магнети.

Но кај некои материјали овие полиња не се поништуваат целосно. На пример, кај железото, секој атом има по четири електрони чии спинови се во иста насока и така нивните магнетни полиња не се поништуваат.

Феромагнетици, парамагнетици и дијамагнетици

Но тука не завршува приказната за потеклото на магнетното поле. Материјалите се поделени на оние кај кои е доминантно спинското магнетно поле и на оние кај кои е доминантно орбиталното магнетно поле. Постои и трета група материјали, а тоа се оние кај кои не постои магнетно поле воопшто. Да ги разгледаме поединечно секој од овие видови магнетни материјали.



Сл 2



Сл.3

Овие материјали, кај кои е доминантно спинското магнетно поле се викаат **феромагнетици**. Такви се железото, кобалтот и никелот. Магнетното поле на секој елементарен магнет кај феромагнетиците е толку силно, што заемно дејствувајќи си еден на друг се подредуваат и на тој начин формираат големи зони во кои сите елементарни магнети се подредени во една насока (сл.2). Овие зони се викаат **магнетни домени**. Секој од домените е составен од милијарди подредени атоми, но сепак тие домени се микоскопски. Разликата помеѓу парче обично железо и железен магнет е во подреденоста на домените. Кај обично парче железо, клинец на пример, домените хаотично се распоредени (сл.2). Кога клинецот ќе го доведеме во слабо магнетно поле, домените ќе се подредат, но не сите и не целосно. Ако клинецот се стави во силно магнетно поле, тогаш сите домени се подредени. Клинцот е силно намагнетизиран и велеме дека сме извршиле **магнетизирање** (сл.3). При ова настануваат два ефекта. Прво се подредуваат оние домени кои не се подредени, а второ сите домени се подредуваат во насока на надворешното магнетно поле. Така, тие две полиња, надворешното и она создадено од елементарните магнети во внатрешноста на материјалот создаваат многу силно магнетно поле. Кога надворешното магнетно поле ќе се отстрани, поради дејство на топлотното брауновско движење, домените во клинецот повторно се подредуваат хаотично.

Феромагнетиците може да бидат "тврди" и "меки". Тврдите феромагнетици тешко се магнетизираат, но, затоа и тешко се размагнетизираат. Таков е челикот. Од овие материјали се прават постојани магнети. Меките феромагнетици лесно се магнетизираат и исто така, лесно се размагнетизираат. Такво е мекото железо. Од вакви материјали се прават електромагнети.

За да се направи постојан магнет, можни се два начина. Првиот е, да се постави парче челик во силно магнетно поле. Вториот е, челикот да се протрие повеќе пати со постојан магнет. Интересно е тоа што магнетизирањето на феромагнетиците зависи од нивната "историја", односно, од тоа, дали претходно тој

материјал бил магнетизиран или не.

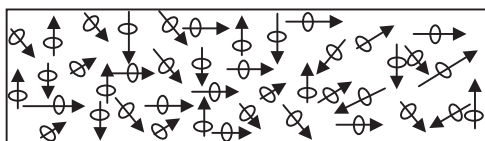
Сега е јасно зошто половите на магнетите не може да се одделат и зошто кога ќе се подели магнетот на два или повеќе делови, секој дел се однесува повторно како магнет со два пола (сл.4)



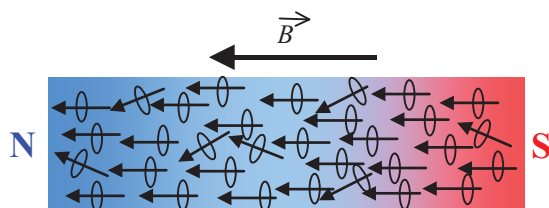
Сл.4

Кај феромагнетиците е интересно тоа што нивната магнетна пермеабилност не е константна и таа зависи од големината на надворешното поле. Исто така Можен е и обратен процес, **размагнетизирање**. Ако се удри силно магнет или ако се загрее на определена температура, подредувањето се губи и постојаниот магнет станува обично парче железо.

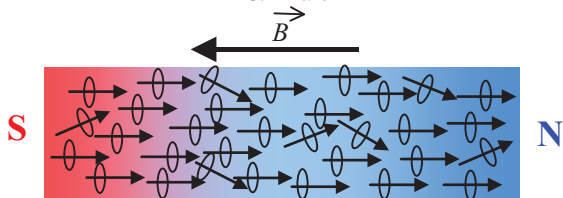
Материјалите кај кои е доминантно орбиталното магнетно поле се викаат **парамагнетици**.



Слика 5



Слика 6



Сл.7

Кај нив заемното дејство помеѓу елементарните магнети не е толку големо, па затоа тие не се подредуваат локално и не се формираат магнетни домени (сл.5). Елементарните магнети се хаотично ориентирани. Кога ќе се доведат во надворешно магнетно поле, елементарните магнети се подредуваат во насока на полето и тогаш овој материјал покажува магнетични својства (сл.6). На тој начин, надворешното магнетно поле и она создадено од елементарните магнети создаваат магнетно поле, кое е посилно од надворешното, но многу послабо од она кај феромагнетиците. По отстранувањето на надворешното магнетно поле елементарните магнети се враќаат во првобитниот, хаотичен распоред. Вакви материјали се алуминиумот, платината, кислородот и други.

Конечно, третата група материјали, кај кои не постои ни спинското ни орбиталното магнетно поле, се викаат **дијамагнетици**. Кога не се поставени во магнетно поле, овие материјали не покажуваат никакви магнетични својства. Но, кога ќе се постават во надворешно магнетно поле, се индуцира дополнително движење на електроните, поради кое атомот станува елементарен магнет. Разликата во однос на претходните два материјали е тоа, што, **елементарните магнети кај дијамагнетиците се насочуваат обратно од надворешното магнетно поле** (сл.7). На тој начин вкупното магнетно поле во внатрешноста на материјалот, создадено од надворешното и она што се должи на елементарните магнети е помало од надворешното. По отстранувањето на надворешното поле, атомите ги губат магнетичните својства. Претставници на оваа група материјали се бизмутот и гадолиниумот.

Магнетна индукција во материјална средина

Видовме дека магнетното поле може да си ги смени карактеристиките со едноставно менување на средината во кое тоа ќе се формира. Доволно е во просторот во кој постои магнетно поле, да ставите феромагнетик и полето во феромагнетикот ќе биде многу пати посилно од она кое било на истото место, пред да се доведе феромагнетикот, кога

на тоа место владеел вакуум. Или обратно, во просторот кајшто владее магнетно поле да се доведе дијамагнетик и во него ќе се создаде магнетно поле кое е послабо од она кога во тој простор владеел вакуум. На овој начин се менува и магнетната индукција на магнетното поле. Ако B е магнетната индукција на магнетното поле во некоја материјална средина, а B_0 е магнетната индукција на истото поле, но во вакуум, тогаш може да дефинираме

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} \quad (1)$$

релативна магнетна пермеабилност, како однос од овие две величини.

Од она што го научивме претходно, може да дојдеме до заклучок дека **релативната магнетна пермеабилност кај феромагнетниците е многу пати поголема од единица ($\mu_r \gg 1$), кај парамагнетниците таа е поголема од единица ($\mu_r > 1$) и кај дијамагнетниците таа е помала од единица ($\mu_r < 1$).**

Така, **апсолутната магнетна пермеабилност** на некоја материјална средина, μ е во врска со релативната и онаа на вакуумот преку изразот:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (2)$$

каде што μ_r е релативна магнетна пермеабилност на средината, а μ_0 е магнетната пермеабилност на вакуумот.

Во следниве табели се дадени податоци за релативните магнетни пермеабилности на некои средини.

Средина	μ_r
Феромагнетници	
железо 99,9%	200 - 5 000
Легура 96,7%Fe; 3,3%Si	600 - 10 000
Пермалој 78%Ni; 22%Fe	8 000 - 100 000
Пермалој, 79%Ni; 5%Mo; 16%Fe	100 000 - 800 000
Парамагнетници	
Кислород, O ₂	1,0000018
Алуминиум, Al	1,000021

Платина, Pt	1,0003
железо (III) хлорид	1,0025
Дијамагнетници	
Азот, N ₂	0,999999938
Јаглерод двооксид, CO ₂	0,9999947
Бакар, Cu	0,9999926
Вода, H ₂ O	0,999991
Сребро, Ag	0,999974
Бизмут, Bi	0,99983

Дајте го значењето на следниве основни поими. Таму каде што е потребно посочете и примери

- парамагнетници
- дијамагнетници
- феромагнетници
- релативна магнетска пермеабилност
- апсолутна магнетска пермеабилност

Прашања, задачи, активности

1. Каде е потеклото на магнетното поле?
2. Како може магнетот да привлече парче железо кое самото не е магнет?
3. Железните струганици не се магнетизирани, а сепак се подредуваат во насока на полето. Зошто?
4. Секој електрон кој поседува спин претставува елементарен магнет. Материјата е составена од атоми. Зошто секој материјал не може да биде магнет?
5. Магнетот е направен од железо. Но и клинците се направени од железо. Која е разликата помеѓу железото во магнетот и она во клинците?
6. Колку ќе се промени магнетната индукција на соленоид, кога во неговата внатрешност ќе се постави железно јадро со $\mu_r=10000$?
7. Направете повторно електромагнет, како во активноста број 6 од претходната лекција, *Магнетно поле на спроводник низ кој тече струја*. Извадете го моливот и на негово место ставете клинец. Испитајте ја јачината на овој електромагнет. Дали забележувате разлика кога во внатрешноста има молив или клинец? Кога магнетот ќе биде посилен? Зошто?

9.5. ВЕКТОР НА ЈАЧИНА НА МАГНЕТНО ПОЛЕ И ВРСКА СО МАГНЕТНАТА ИНДУКЦИЈА

Да разгледаме соленоид, калем во чија што внатрешност поставуваме јадро од некоја супстанција, не мора да е феромагнетична. Вкупната магнетна индукција е дадена со релацијата

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m \quad (1)$$

е еднаква збирот од магнетната индукција создадена со течење на струја низ соленоидот -значи надворешно магнетно поле \vec{B}_0 и магнетната индукција создадена во материјалот \vec{B}_m . Големината на \vec{B}_m е мала во споредба со големината на \vec{B}_0 , за пара и диа-магнетичните материјали, додека за феромагнетичните таа е многу поголема од големината на \vec{B}_0 .

Познато ни е дека големината на магнетната индукција во соленоидот, создадена од течењето струја со јачина I низ него, е дадена со:

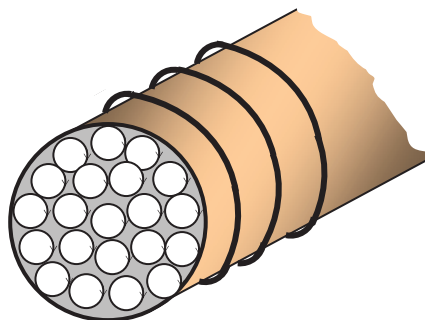
$$B_0 = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{l} I \quad (2)$$

каде што N е вкупниот број навивки на соленоидот, а l неговата должина.

Може да се претпостави дека магнетната индукција \vec{B}_m создадена во супстанцијата е резултат на елементарни струи кои се создаваат или постојат во неа. Денес се знае дека се тие резултат на движењата во внатрешноста на атомот, а уште многу одамна нив хипотетично ги вовел Ампер.

Ќе претпоставиме дека внесеното јадро во соленоидот е цилиндрично (види слика 1). Од сликата е јасно дека сите внатрешни делови од елементарните струи се поништуваат и дека се воспоставуваат додатни струи, кои се резултат на внатрешните елементарни струи, се јавува

дополнителна струја I_m . Ќе ја викаме Амперова струја. Таа покажува ист ефект како и секоја струја во соленоидот.



Сл. 1.

Ќе издвоиме мал диск од цилиндричното јадро, со должина Δl , на кое се јавува струја ΔI_m . Може да се каже дека оваа струја ΔI_m е еднаква на производот од бројот на навивките на Амперовите струи во дадениот диск N_m и јачината на струјата на Амперовите струи I_m . Или,

$$\Delta I_m = N_m I_m$$

Магнетен моменти на тој диск е производ од плоштината на пресекот A и јачината на струјата ΔI_m :

$$\Delta p_m = A \Delta I_m \quad (3)$$

Од друга страна величината *вектор на магнетизација*, по дефиниција е магнетен момент на единица волумен. Бидејќи волуменот на тој замислен диск е $A \Delta l$, тогаш големината на векторот на магнетизацијата M во тој диск е еднаква на :

$$M = \frac{A \Delta I_m}{A \Delta l} = \frac{\Delta I_m}{\Delta l} = j_{l,m} \quad (4)$$

Ако претпоставиме дека јадрото е хомогено, тогаш овој израз за магнетизацијата важи за целото јадро. Како што се гледа *векторот на магнетизација* е еднаков на *линиската густина на површинските Амперови струи* ($j_{l,m}$) кои се создадени во јадрото. Единица за мерење на магне-

тизацијата е ампер врз метар (A / m).

Од друга страна и Амперовите струи создаваат магнетна индукција B_m која е (според релацијата за магнетна индукција создадена во внатрешноста на дискот, односно соленоидот) еднаква на:

$$B_m = \mu_0 \frac{N_m I_m}{\Delta l} = \mu_0 \frac{\Delta I_m}{\Delta l} = \mu_0 j_{l,m} \quad (5)$$

или векторски:

$$\vec{B}_m = \mu_0 \vec{M} \quad (6)$$

Според тоа, вкупната магнетна индукција во јадрото е еднаква на:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M} \quad (7)$$

Понекогаш векторот $\vec{B}_m = \mu_0 \vec{M}$ се бележи со буквата \vec{J} и се вика **магнетна поларизација**.

Ако покрај тоа се има предвид, дека надворешното поле, покрај прикажувањето со магнетна индукција \vec{B}_0 може да се прикаже и со **векторот на јачината на магнетното поле** \vec{H} , поврзан со векторот на надворешното поле со релацијата:

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H} \quad (8)$$

тогаш релацијата (7) може да се запише, како:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} \quad (9)$$

Според своето физичко значење, векторите \vec{E} и \vec{B} се аналогни. И двата претставуваат силова карактеристика, на електрично, односно магнетно поле. Од друга страна, векторот на јачината на магнетното поле е вектор кој го определува надворешното поле, и иако во последно време не се користи, на пример за соленоид неговата големина е дадена со:

$$H = \frac{NI}{l} = nI \quad (10)$$

и како што гледаме е поврзан само величините кои го определуваат

надворешното магнетно поле, зависи **само** од струјата што однадвор се пушта за да се врши магнетизацијата.

Експериментите покажуваат дека големината на векторот на магнетизацијата е правопрпорционална со магнетната индукција на надворешното поле, односно со јачината на полето:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} = \chi_m \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \quad (11)$$

Константата χ_m што овде се јавува е број без димензии и се вика **магнетска susceptibilност**. Таа е константна за ди- и парамагнетичните супстанции, а за феромагнетичните таа зависи од надворешното поле.

Ако релацијата (11) се внесе во (7) се добива:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M} = \vec{B}_0 + \mu_0 \frac{\chi_m \vec{B}_0}{\mu_0} = \vec{B}_0 (1 + \chi_m) \quad (12)$$

Со релацијата (1) во претходната лекција ние покажавме дека односот меѓу магнетната индукција во дадената средина \vec{B} , и магнетската индукција во вакуум, \vec{B}_0 , односно магнетската индукција добиена од надворешното магнетно поле е еднаков на релативната магнетската пермеабилност на дадената средина:

$$\frac{B}{B_0} = \mu_r \quad \text{а од (12)}$$

$$\frac{B}{B_0} = 1 + \chi_m \Rightarrow \mu_r = 1 + \chi_m \quad (13)$$

Дајте го значењето на следниве основни поими. Таму каде што е потребно посочете и примери

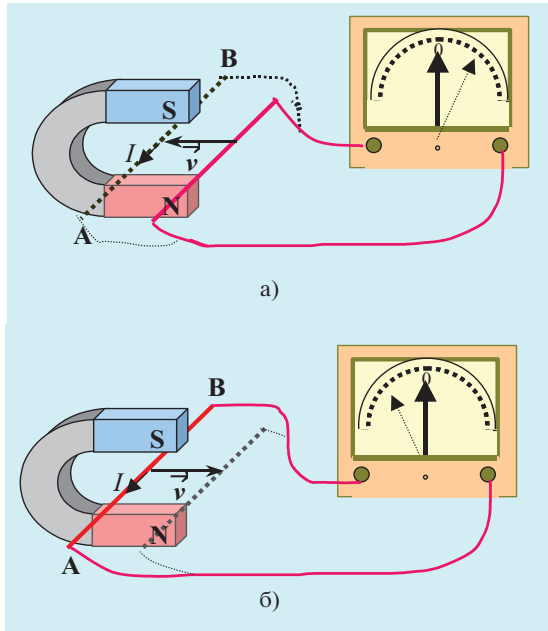
- Вектор на магнетизација
- вектор на магнетска поларизација
- магнетен момент
- вектор на јачина на магнетно поле
- магнетна susceptibilност

9.6. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНА ИНДУКЦИЈА

Основни експерименти

Ние досега изучувавме магнетни полиња на спроводници низ кои тече постојана струја. Таквите спроводници создаваат и временски константни полиња. Кај временски променливите струи, односно временски променливите магнетни полиња, имаме низа нови појави. Една од најважните, секако, е појавата **електромагнетна индукција**, откриена во 1831 година од Мајкл Фарадеј.

Откритието на оваа важна појава овозможило следните 50-100 години да бидат конструирани голем број технички уреди: генератори за струја, трансформатори, телеграф, телефон, радио, телевизија и многу, многу други, без кои ние денес не би сме можеле да го замислиме светот во кој живееме.



Сл.1. а) Кога спроводникот го внесуваме, отклонот на галванометарот е на една страна, б) кога спроводникот го вадиме, отклонот на галванометарот е на спротивната страна.

За да ја разбереме појавата, ќе го направиме наједноставниот можен експеримент. Спроводник, поврзан со еден галванометар, ќе движиме помеѓу половите на постојан потковичест магнет (сл. 1). Сè дури постои релативно движење помеѓу магнетот и спроводникот, постои отклон на галванометарот, значи низ колото тече струја. Велиме, во колото се создала **индуцирана електромоторна сила** поради која протекла **индуцирана струја**.

Насоката на струјата зависи од насоката на движењето (на силата \vec{F}) и насоката на магнетното поле (магнетната индукција \vec{B}). Отклонот на галванометарот ќе се зголеми, ако се зголеми брзината на релативното движење на спроводникот.

Ако магнетот и спроводникот ги движиме заедно така да меѓу нив не постои релативно движење, отклон нема да има.

Отклон нема да има, исто така, ако движењето се прави паралелно со магнетните силиви линии. Велиме, за да се индуцира струја спроводникот треба да ги **сече** магнетните силиви линии.

Насоката на индуцираната струја обично се опишува со **Флеминговото правило на десната рака** (сл. 2):

кога палецот, показалецот и средниот прст ќе се постават под прав агол, и ако показалецот се постави во насоката на магнетната индукција, а движењето го правиме во насоката на палецот, насоката на средниот прст ќе ни ја даде насоката на индуцираната струја.

Претходниот опит е поефикасен ако наместо да се движи

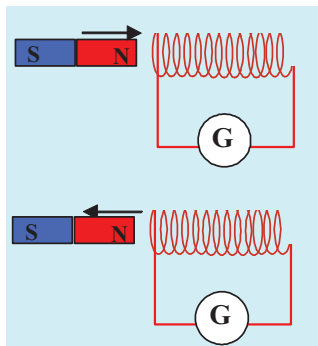
спроводникот во однос на магнетот, да се движи магнет во однос на **калем** со **N** навивки (сл.3). Ви предлагаме да го направите тој експеримент.

Проверете, како ќе се менува насоката на галванометарот кога ќе ја промените насоката на движењето, или кога наместо северен ќе внесувате јужен магнетен пол.



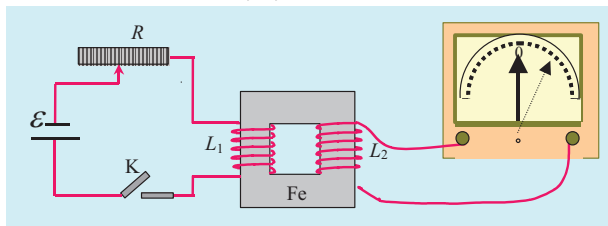
Сл. 2

9. Електромагнетизам



Сл.3

Повторете го опитот со бавно и со брзо движење. Што заклучувате?



Сл. 4. Во примарното коло се поврзани отпорникот R и прекинувачот K .

Втора серија експерименти ќе направиме со две кола: првото, кое е поврзано со извор на електромоторна сила, да го наречеме примарно коло и второто, во кое има само галванометар, и кое ќе го наречеме секундарно коло (слика 4). Овие две кола имаат калем и заедничко железно јадро. Калемот L_1 , кога низ него тече струја, создава магнетно поле чии магнетни силиви линии го пронизуваат и калемот L_2 .

Кога магнетното поле во примарниот калем ќе се промени, ќе дојде до индуцирање на електромоторна сила во секундарот и галванометарот ќе покаже отклон. Промената на магнетната индукција \vec{B} ќе ја направиме или со вклучување и исклучување на струјата или со менување на отпорот. И во двата случаја доаѓа до промена на јачината на струјата, а бидејќи магнетната индукција во калемот L_1 е дадена со:

$$B = \mu_r \mu_0 \frac{NI}{l}, \quad (1)$$

очигледно е дека се менува и магнетната индукција. Во релацијата (1) μ_r е релативната магнетна пермеабилност на железното јадро, N е бројот на навивките, а l -должината на соленоидот (калемот). При вклучување на струјата и при зголемување на јачината на струјата, отклонот на галванометарот е на една страна. Ако струјата ја намалуваме или ја прекинуваме, индуцираната струја ќе тече на спротивната страна. И овде доаѓа до израз брзината на промената на струјата. Имено, ако лизгачот на отпорникот го движиме бавно, индуцираната струја е слаба, и обратно, ако отпорот брзо го менуваме, струјата е појака. Во што нè убедуваат сите овие опити?

Гледаме дека овде нема никакво движење на спроводник во магнетно поле, но сепак настанува индуцирање на струја.

Индуцирање на струја настанува или при сечење на магнетните силиви линии или при промена на големината на векторот на магнетната индукција.

Основен закон за електромагнетна индукција

Која физичка величина се менува во сите погоре опишани експерименти? Размислете, во експериментите скицирани на сликата 1 или 3 се менуваше плоштината на површината со која е пронизано полето, а во експериментите од сликата 4 се менува магнетната индукција. Која физичка величина ги поврзува овие две величини?

Магнетен флуks е величината што ги поврзува овие две величини. Јасно е, од експериментите може да заклучиме, дека при индуцирање на струјата доаѓа до **временска промена на магнетниот флуks**.

Магнетниот флуks што ја пронизува некоја рамна површина со плоштина S , како што веќе знаеме, е определен со релацијата:

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (2)$$

каде што α е аголот што нормалата на рамната површина го гради со векторот на магнетната индукција (\vec{B}). Во случаите кога овој агол е нула, значи рамнината на колото е нормална на магнетните силиви линии и колото тогаш опфаќа најголем флуks.

9. Електромагнетизам

Основниот закон за електромагнетната индукција се пишува со релацијата:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (3)$$

Индуцираната електромоторна сила \mathcal{E}_i е еднаква на брзината на менувањето на магнетниот флукс земена со спротивен знак.

Ако индуцирањето на струја настанува во соленоид со N навивки, бидејќи магнетните силиви линии ја понижуваат секоја од навивките, индуцираната електромоторна сила ќе биде N пати поголема:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta(BS \cos \alpha)}{\Delta t} \quad (4)$$

Што значи негативниот знак во оваа релација ќе појасниме во следната лекција. Сега, сакаме сами да размислите, во кои од експериментите се менуваше плоштината опфатена со контурата, а во кои магнетната индукција?

Исто така сакаме да ви обрнеме внимание на тоа дека е многу важна брзината на промената на магнетниот флукс.

Активности со компјутер

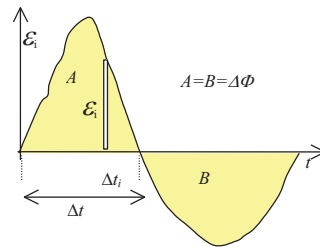
Со помош на интерфејсот СОАСН 5, активност “Индуцирана електромоторна сила” прачкест магнет и калем, правејќи експеримент алналогно со тој даден на сликата 3, проверете ја зависноста на електромоторната сила од брзината на движењето на магнетот.

Направете го опитот со повеќе различни брзини. Пресметајте ја плоштината опфатена

со кривата $\mathcal{E}_i = F(t)$, ќе добиете секогаш приближно еднаква вредност. Плоштината што секоја таква крива ја зафаќа со апсцисната оска (види сл. 5) може да се прикаже како сèвкупност на правоаголници,

чија една страна е електромоторната сила \mathcal{E}_i , а друга временски интервал Δt , тогаш плоштината на секое такво правоаголничче е еднаква на промената на флуксот за временскиот интервал Δt , а целата плоштина

промената на флуксот при внесување, или во спротивна насока - при вадење на магнетот.



Пример задачи

1. Во затворено струјно коло магнетниот флукс опаѓа од 100 Wb на 0, за време од 0,2 s. Колкава е индуцираната е.м.с. во тоа коло:

Решение

Дадено: $\Phi_1=100$ Wb, $\Phi_2=0$ Се бара $\mathcal{E}_i=?$
 $\Delta t=0,2$ s

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{0 - \Phi_2}{\Delta t} = \frac{100}{0,2} = 500 \text{ V}$$

2. Спроводник со должина од 10 cm се движи во магнетно поле од 0,2 T, со брзина од 20 cm/s нормално на магнетните силиви линии. Колкава е.м.с. ќе се индуцира на неговите краеве, а ако колото се затвори и има отпор од 2 Ω, колкава струја ќе протече низ него?

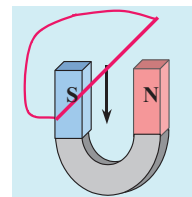
Решение

Дадено: $l=0,10$ m, $B=0,2$ T Се бара $\mathcal{E}_i=?$
 $v=0,2$ m/s $R=2$ Ω

$$\mathcal{E}_i = lvB = 0,1 \cdot 0,2 \cdot 0,20 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ V}; I = \mathcal{E}_i / R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

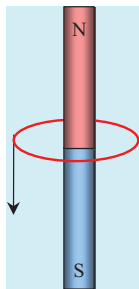
Прашања, задачи, активности.

1. Каква е насоката на индуцираната струја (означете со стрелка) ако движењето на спроводникот се прави во насоката означена на сл. 6.



Сл.6

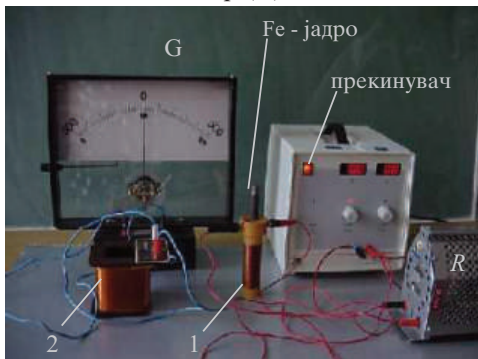
2. Каква е насоката на индуцираната струја ако движењето на спроводникот се прави паралелно со прачкестиот магнет, околу неговата средина, како на сликата 7.



Сл.7

Означете ја насоката со стрелка.

3. Направете серија експерименти со следнава опстановка: вклучете во примарно коло со извор на напон еден калем (1) со мал пресек (сл.8), отпорник со лизгач R и прекинувач. Како извор може да употребите повеќе батерии сврзани сериски за да обезбедите напон од 9 до 12 V. Поврзете друго коло во кое ќе биде вклучен калем (2) со значително поголем пресек и галванометар (G).



Сл.8. Со црвени жици е поврзано примарното коло, а со сини секундарното коло

Направете ги следниве експерименти :

- прво вклучете струја во примарното коло, и калемот 1 внесете го во калемот 2. Што се случува? Што ќе стане кога калемот 1 ќе го извадите?
- Потоа поставете го калемот 1 во внатрешноста на вториот калем и во него внесувајте железно јадро. Што ќе забележите? Извадете го железното јадро. Проверете што ќе се промени ако ја промените брзината на внесувањето или на вадењето на јадрото.
- Системот со двата калема потоа движете го напред - назад, но така што да нема релативно движење меѓу калемите. Има ли отклон?
- Поставете го калемот 1 во калемот 2. Исклучете ја струјата од примарното коло. Забележете ја насоката на галванометарот. Потоа, вклучете ја струјата. Повторете го овој дел од

експериментот кога во калемот 1 се наоѓа железното јадро.

д) Менувајте го отпорот R во примарното коло, прво нека расте, а потоа нека опаѓа. И сега проверете што ќе стане ако тоа го правите брзо или бавно.

Кратко резиме

Индуцираната електромоторна сила \mathcal{E}_i е еднаква на брзината на менувањето на магнетниот флукс земена со спротивен знак.

Таа може да настане со релативно движење на магнет и спроводник, кога доаѓа до сечење на магнетните силиви линии, или со промена на магнетната индукција.

9.7. ЛЕНЦОВО ПРАВИЛО ЗА ИНДУЦИРАНА СТРУЈА.

Флеминговото правило на десната рака за насоката на струјата може да се примени само во случај кога станува збор за движење на спроводник нормално на магнетните силиви линии. Како што покажавме порано, индуцирање на струја настанува и во многу случаи.

Постои универзално правило за насоката на индуцираната електрична струја кое се вика **Ленцово правило**. Го формулирал Е. Х. Ленц во 1834 година. Пред да го дадеме ова важно правило, да се потсетиме на следново.

Како што покажавме, индуцираната електромоторна сила се создава во колото во кое доаѓа до временска промена на магнетниот флукс. Во колото тогаш протекува индуцирана струја. Индуцираната струја создава магнетно поле кое се нарекува **индуцирано магнетно поле**.

Насоката на индуцираната струја е таква што таа со своето магнетно поле се спротиставува на промената на магнетниот флукс кој е причина за нејзиното создавање.

Ако причина за индуцирање на струјата е релативното движење на спроводникот во однос на магнетното поле, индуцираната струја се спротиставува на тоа движење.

9. Електромагнетизам

Ако причина за индуцирање на струјата е промената на големината на магнетната индукција, магнетното поле на индуцираната струја се спротиставува на таа промена.



Сл.1

На сликата 1 е дадена фотографија на мала “терезија” на чии краци се наоѓаат два алуминиумски прстена, така што тие можат лесно да се движат во хоризонтална рамнина. Едниот од прстените е цел, а вториот (пооддалечениот) има попречна пукнатина. Кога до алуминиумскиот прстен ќе се доближи прачкест магнет, прстенот се одбива од магнетот. Но, ако по смирувањето на системот магнетната прачка ја вадиме од прстенот, прстенот ќе се доближува до магнетот.

Во првиот случај, индуцираната струја создадена во прстенот се спротиставува на растењето на флуксот, кое е условено со доближувањето на магнето, додека при вадењето на магнетот доаѓа до намалување на магнетниот флукс, поради што се индуцира таква струја чие магнетно поле се спротиставува на намалувањето на флуксот.

Ако опитот се повтори така што магнетната прачка се внесува или вади од другиот (пресечениот) прстен, појавата ќе ја нема. Јасно, таму индуцираните струи не можат да се затворат во прстенот, тие создаваат многу слабо поле кое не може да се спротистиави на промената на магнетниот флукс.

Ленцовото правило го објаснува и знакот минус во основниот закон за индуцираната електромоторна сила:

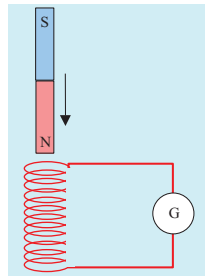
$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

Ако $\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ е позитивно, значи $\Phi_2 > \Phi_1$, флуксот расте, тогаш електромоторната сила на индуцираната струја се спротиставува на растењето на флуксот. Обратно, ако е $\Phi_2 < \Phi_1$, флуксот опаѓа, индуцираната електромоторна сила се спротиставува на тоа опаѓање.

Ленцовото правило за насоката на индуцираната струја важи во сите појави на индуцирање на струја. Посебно јаки индуцирани струи може да се создадат во спроводници кои се масивни, ако се најдат во простор во кој се менува магнетниот флукс. Таквите струи се викаат виорни.

Прашања, задачи, активности

1. Во калем (соленоид) навлегува северниот пол на магнетот. (Сл2) Ако калемот е поврзан во струјно коло, тогаш каква ќе биде насоката на струјата во колото (нацртајте со стрелка)? Кој пол се создава на горниот дел од соленоидот?



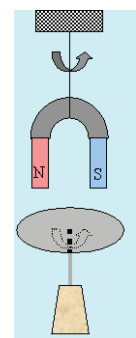
Сл.2.

2. Магнетот од претходното прашање паѓа надолу. Дали се еднакви забрзувањата на магнетот кога колото на калемот е отворено (прекинато) и кога е тоа

затворено?

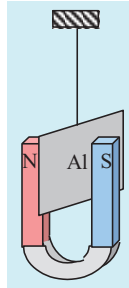
4. Ако помеѓу половите на силен електромагнет се пушти слободно да паѓа некоја метална монета, нејзиното забрзување ќе се намали. Објаснете го ефектот.

5. Направете го следниов опит. Опитот е можно да го изведете и во домашни услови. Од алуминиумска фолија исечете кружен диск. Поставете вертикално игла, а врз неа ставете го дискот така што да биде потпрен во центарот на кругот (видете слика 3. Земете каков било магнет (најдобро е потковичест) и обесете го така што половите да му лежат над дискот. Потоа, заврете го магнетот. Во иста насока со магнетот ќе се заврти и кружниот алуминиумски диск. Објаснете го експериментот!



Сл.3

7. Обесете на конец правоаголна алуминиумска плочка (направете ја од подебела фолија). Поставете ја плочката помеѓу половите на посилен магнет (сл. 4). Ако магнетот го движите и плочката ќе се придвижи во иста насока. Зошто?



Сл.4

Кратко резиме

За индуцираната електрична струја важи универзално Ленцово правило кое гласи:

Насоката на индуцираната струја е таква што таа со своето магнетно поле се спротиставува на промената на магнетниот флукс кој е причина за нејзиното создавање.

Индуцирана струја настанува и во масивни спроводници, позната како виорни струи.

9.8. САМОИНДУКЦИЈА. ИНДУКТИВНОСТ

Самоиндукција

Знаеме дека кога низ некој спроводник тече струја околу него се создава магнетно поле. Ако струјата што тече низ спроводникот е променлива, се менува и големината на магнетната индукција на полето што таа струја го создава. Значи, имаме спроводник што се наоѓа во простор со сопствен променлив магнетен флукс. Според Фарадеј, и во таквиот спроводник се индуцира електромоторна сила која се спротиставува на промената на магнетниот флукс.

Појава на индуцирање на е.м.с. во спроводник низ кој тече променлива струја под дејство на промените на сопствениот магнетен флукс се вика **самоиндукција**. Индуцираната електромоторна сила што притоа се јавува ја викаме **самоиндуцирана електромоторна сила** или **електромоторна сила на самоиндукцијата**.

Ќе ја проанализираме појавата подетално. Магнетниот флукс создаден од струјата што тече низ струјното коло е определен со познатата релација:

$$\Phi = BS \quad (1)$$

Во релацијава, B е големината на векторот на магнетната индукција на магнетното поле создадено од струјата, а S е плоштината на површината зафатена со струјното коло. Во (1) не се води сметка за аголот помеѓу магнетната индукција и површината S , бидејќи магнетните силиви линии создадени од спроводникот ја сечат рамнината на колото (контурата) под прав агол, па аголот α помеѓу магнетните силиви линии и нормалата на површината е нула, $\cos \alpha = 1$.

Ако претпоставиме дека струјата во колото се менува, тогаш се менува и магнетната индукција, а поради тоа се менува и магнетниот флукс. Така, може да се напише дека магнетниот флукс создаден во некоја контура низ која тече струја, е пропорционален со јачината на струјата I :

$$\Phi = LI \quad (2)$$

каде што L е коефициентот на пропорционалноста кој се нарекува **коефициент на самоиндукција** или **индуктивност (индуктивитет)**.

Индуктивноста е важно својство на струјното коло кое зависи како од геометријата и елементите на струјното коло така и од магнетната пермеабилност на средината во која тоа, поточно некои негови делови се наоѓаат. За дадено струјно коло најчесто индуктивноста е константна. Според Фарадеевиот закон за индуцирана електромоторна сила, електромоторната сила на самоиндукција \mathcal{E}_s може да се напише:

$$\mathcal{E}_s = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3)$$

Од релацијата (3) се гледа дека самоиндуцираната електромоторна сила е пропорционална со брзината на промената на јачината на струјата $\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$. Релацијата (3) да ја напишеме и во следнава форма

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -L \frac{I_2 - I_1}{\Delta t} \quad (4)$$

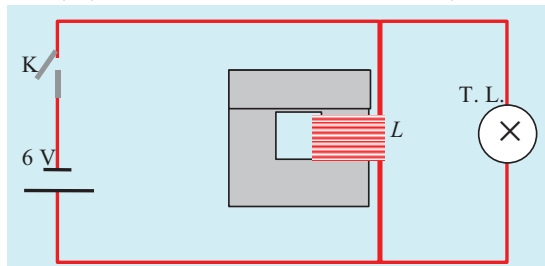
9. Електромагнетизам

при што I_2 е јачината на струјата на крајот, а I_1 на почетокот на временскиот интервал Δt за кој дошло до промената на струјата. Ако струјата расте, $I_2 > I_1$, $\frac{\Delta I}{\Delta t} > 0$, самоиндуцираната е.м.с. и самоиндуцираната струја има насока спротивна од насоката на струјата во колото. Таа се спротивставува на растењето на струјата. Ако струјата опаѓа, $I_2 < I_1$, $\frac{\Delta I}{\Delta t} < 0$, самоиндуцираната електромоторна сила се спротивставува на опаѓањето на струјата, па самоиндуцираната струја има иста насока како и струјата што тече низ колото.

Следниве два експеримента ќе ни ја илустрираат појавата самоиндукција која доаѓа до израз во сите случаи кога низ дадено струјно коло се менува јачината на струјата, но најизразена е при вклучувањето и исклучувањето на струјата.

Експеримент 1. Со самоиндукција може да се постигне значително повисок напон од напонот на постојниот извор на струјата.

Поврзете електрично коло како на сл. 1 На извор на струја од 6 V паралелно се поврзани калем L со голем број навивки и тлеава ламба Т. Л., која нормално свети на 220 V. При вклучено коло, ламбата не свети, бидејќи е приклучена на извор од само 6 V. Но, при исклучување, тлеавата ламба засветува.

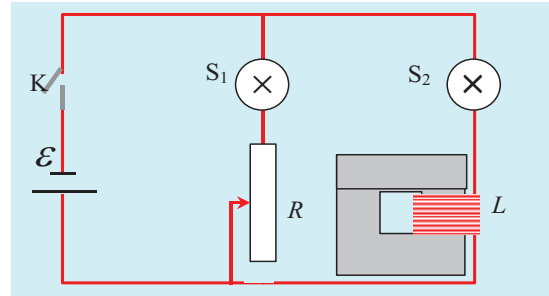


Сл.1

Кое е објаснението?

При исклучувањето на струјата доаѓа до нагла промена на магнетниот флукс во калемот. Таа промена е причина да се самоиндуцира електромоторна сила од редот на големина на напонот на палењето на тлеавата ламба.

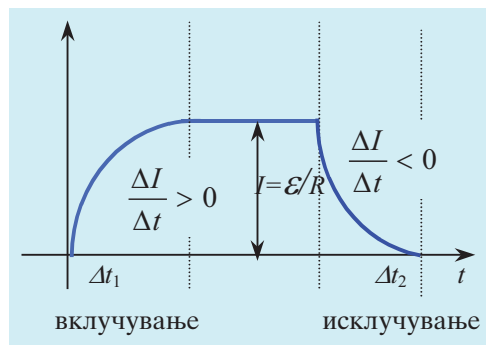
Експеримент 2. На извор на прав напон се поврзуваат паралелно две еднакви светилки (сл.2). Во гранката на првата светилка S_1 е поврзан отпорник со лизгач R , а во гранката со светилката S_2 - калем со голем број навивки и железно јадро со индуктивност L .



Сл. 2

Со менување на отпорот во гранката на првата светилка се дотерува двете светилки еднакво да светат. Кога со помош на прекинувачот K се вклучува колото, светилката S_1 веднаш засветува, додека светилката S_2 засветува со задоцнување. Тоа е поради самоиндуцираната електромоторна сила која во оваа гранка е голема. Колку е поголем коефициентот на самоиндукцијата толку времето за да се постигне нормално светење на оваа светилка ќе биде поголемо.

При секое вклучување и исклучување на струјата се појавува самоиндуцирана електромоторна сила. Затоа, во коло во кое има вклучен калем, графикот на зависноста на струјата во зависност од времето има форма дадена на сликата 3.



Сл.3

При вклучување на струјното коло, јачината на струјата не ја достигнува веднаш вредноста

што би ја имала според Омовиот закон $I = \mathcal{E}/R$, туку по некое време Δt_1 кое е толку поголемо колку што е самоиндуцираната електромоторна сила поголема. При исклучувањето, за временски период Δt_2 , струјата постепено се намалува до нулта вредност, бидејќи тогаш самоиндуцираната електромоторна сила е насочена исто како и постојната струја.

Индуктивност

Ќе го искористиме законот за самоиндуцираната електромоторна сила (равенка 3) за да ја објасниме физичката величина **индуктивност (индуктивитет)**:

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Од формулата се гледа дека:

Индуктивноста е физичка величина која е еднаква на електромоторната сила на самоиндукцијата што се појавува во дадено струјно коло во кое струјата се менува со брзина од еден ампер во секунда.

Индуктивноста е величина слична на електричниот капацитет, таа зависи од геометриските својства на спроводникот, од неговите димензии и форма, но не зависи од тоа дали низ спроводникот тече струја или не. Индуктивноста, исто така, многу зависи и од магнетната пермеабилност на средината во која се наоѓа дадениот спроводник. Индуктивноста е пропорционална со релативната магнетна пермеабилност на дадената средина μ_r .

Единица за индуктивност во SI е **хенри**, (ознака H). *Некој спроводник има индуктивност од еден хенри, ако кога би бил вклучен во струјно коло со променлива струја, при промена на јачината на струјата од еден ампер за секунда, на краевите на спроводникот би се самоиндуцирала електромоторна сила од еден волт.*

Индуктивноста на соленоидот со N навивки, напречен пресек S и должина l , е дадена со релацијата

$$L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2 S}{l} \quad (5)$$

μ_r е релативната магнетна пермеабилност на средината поставена во соленоидот.

Од релацијата (5) се гледа зошто магнетната константа μ_0 се искажува во единицата H/m.

Енергија на магнетно поле

Ќе се вратиме на експериментот скициран на сликата 1. При неговото изведување видовме дека по прекинувањето на колото, тлеавата ламба, паралелно врзана со калемот со голема индуктивност, засветува. Се прашуваме: нели го исклучивме изворот? Од каде енергија за засветување на ламбата?

Може да претпоставиме дека во калемот постоела магнетна енергија која таму била акумулирана и која, по исклучувањето се троши за светење на ламбата.

Покажавме, исто така, дека при вклучувањето струјата е променлива, и тогаш електромоторната сила на самоиндукцијата се спротиставува на растењето на струјата. Тоа значи дека за да се воспостави струјата во калемот, а со тоа и магнетното поле, треба да се совлада електромоторната сила на самоиндукцијата. Ако средната големина на само-

индуцираната електромоторна сила е \mathcal{E}_s , а низ колото поминал полнеж Q , тогаш работата што треба да се изврши за совладување на са-

моиндуцираната е.м.с е еднаква на $Q\mathcal{E}_s$. Таа работа е претворена во магнетна енергија на калемот.

Бидејќи промените на струјата при вклучувањето и исклучувањето се претставени со сложена зависност (видете ја сликата 3) строгото изведување на релацијата за магнетна енергија не е едноставно, па ние овде ќе ја дадеме таа релација како готова:

$$W_m = \frac{LI^2}{2} \quad (6)$$

Енергијата на магнетното поле W_m на дадено коло е право пропорционална со неговата индуктивност L и со квадратот на струјата во колото (I^2).

При исклучување на колото, магнетната енергија се троши за индуцирање на е.м.с. на

9. Електромагнетизам

самоиндукцијата која предизвикува течење на струја уште извесен период по исклучувањето.

Бидејќи индуктивноста на калемите со феромагнетични јадра е многу голема, во кола со такви електромагнети, енергијата на магнетното поле е многу голема.

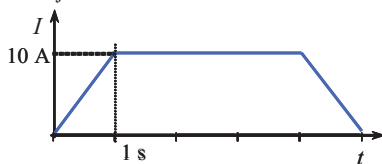
Под **густината на енергијата на магнетното поле** (слично како во електростатиката) се подразбира енергија на единица волумен од полето.

Прашања, задачи, активности

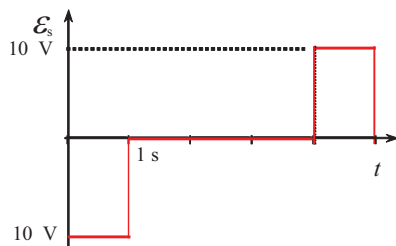
1. Како ќе објасните зошто при брзо исклучување на некој потрошувач на струја, помеѓу штекерот и вклучувачот прескокнува искра?
2. Жиците во отпорниците се мотаат бифиларно (двата краја на жицата се спојуваат и потоа заедно се мотаат). Дали знаете што се одбегнува со таквото мотање?

Пример задачи

3. Ако графичкиот приказ на јачината на струјата во зависност од времето е таков како на сл. 4а, а колото низ кое тече таа струја е со индуктивитет $L = 1 \text{ H}$, да се нацрта соодветен график на електромоторната сила на самоиндукцијата, како и да се определи нејзината големина.



Сл.4 а



Сл.4 б

Решение

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -L \frac{I_2 - I_1}{\Delta t} = -L \frac{I_2}{\Delta t}$$

Бидејќи $I_2 = 10 \text{ A}$, а Δt и при растењето и при опаѓањето на струјата е 1 s , за индуцираната електромоторна сила на самоиндукцијата се добива по апсолутна вредност иста големина од 10 V (сл. 4б), но при растењето таа е негативна, а при опаѓањето на струјата -позитивна, исто како и струјата.

Во текот на времето кога струјата не се менува, електромоторната сила на самоиндукцијата е нула.

4. Определете ја енергијата на магнетното поле на соленоид со $N=250$ навивни, ако неговата должина е 12 cm , а напречниот пресек е во форма на квадрат со страна од 6 cm , ако низ него тече струја од 5 A .

Колку ќе се промени оваа енергија ако во калемот се внесе јадро со релативна магнетна пермеабилност $\mu_r = 1000$?

Решение

Дадено:

$$N=250 \quad l=0,12 \text{ m}$$

$$a=0,06 \text{ m} \quad I=5 \text{ A}$$

Прво треба да се определи индуктивноста на соленоидот:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l}$$

Кога ќе се внесат бројните вредности се добива:

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{250^2 \cdot 0,06^2}{0,12} = 23,6 \cdot \mu\text{H}$$

Енергијата ќе биде:

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{23,6 \cdot 10^{-6} \cdot 5^2}{2} = 295 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

Кога ќе се внесе железното јадро, оваа енергија се зголемува 1000 пати, бидејќи толку пати се зголемува индуктивноста на калемот.

Кратко резиме

- Индуцираната ЕМС е дадена со релацијата

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \text{ каде што } L \text{ е индуктивитет на}$$

дадената контура. Тоа е физичка величина еднаква на електромоторната сила на самоиндукцијата што се појавува во дадено струјно коло во кое струјата се менува со брзина од еден ампер во секунда.

-Единицата за индуктивитетот е хенри (1 H).

- Релација за индуктивитет на соленоидот е

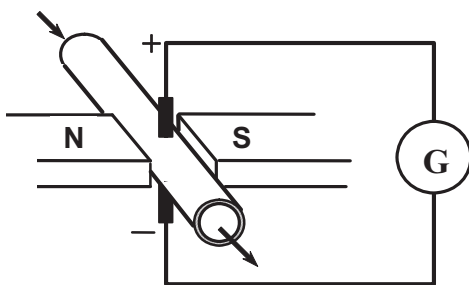
$$L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2 S}{l}, \text{ каде } N \text{ е број навивки, } S$$

пресек на соленоидот, l неговата должина .

Енергијата на магнетното поле е определена

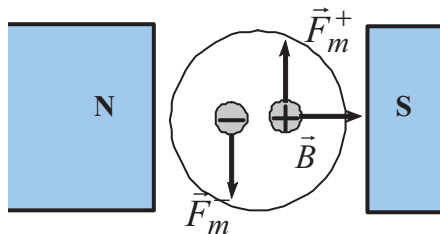
со релацијата : $W_m = \frac{LI^2}{2}$.

9.9. ЕЛЕКТРОМАГНЕТСКО МЕРЕЊЕ ПРОТОК НА КРВ



Сл. 1.

Овој методот е поставен врз база на движење наелектризирани честички во магнетно поле. Познато е дека кога дел од струен спроводник се придвижува со брзина \vec{v} во магнетно поле со магнетна индукција \vec{B} на неговите краеве се индуцира електромоторна сила (ЕМС) која може да се измери со соодветен инструмент. Измерената потенцијална разлика, на краевите на спроводникот со должина l , е зададена со : $U = vBd$ која укажува дека при позната потенцијална разлика меѓу краевите на спроводникот може да се определи брзината со која се тој се придвижува.



Сл. 2.

Да претпоставиме дека низ крвен сад (на пример, артерија) со дијаметар d поставен во магнетно поле \vec{B} , Na^+ и Cl^- јони се движат со определена брзина \vec{v} . Силата \vec{F}_m^+ која дејствува на позитивните јони според насоката на \vec{B} и \vec{v} , прикажана на сл.2 нагоре, а силата \vec{F}_m^- која дејствува на негативните јони е насочена надолу. Под влијание на тие сили јоните се движат кон спротивните сидови на артеријата. Оваа поларизација на јоните создава електрич-

но поле \vec{E} еквивалентно со полето на плочест кондензатор. Ова електрично поле дејствува на јоните со сили \vec{F}_{el}^+ и \vec{F}_{el}^- .

Концентрацијата на полнежите на јоните со спротивен знак на сидовите од артеријата се наголемува се дотогаш додека електричното поле не достигне таква јачина што $\vec{F}_{el}^+ = \vec{F}_{el}^-$.

При состојба на динамичка рамнотежа $\vec{F}_{el}^+ = \vec{F}_m^+$, па може да се запише:

$$qE = q \frac{U}{d} = qvB, \quad (1)$$

Од последната равенка за брзината се добива:

$$v = U / Bd. \quad (2)$$

Равенката (.2) покажува дека за брзината на струење на крвта може да се суди според потенцијалната разлика U која може да биде измерена со инструмент поврзан со електроди поставени на спротивните сидови од крвниот сад. Така, знаејќи ја потенцијалната разлика U , магнетната индукција B и дијаметарот на крвниот сад d , можно е да се определи брзината v на крвта.

Потенцијалната разлика што треба да се измери со овој метод е многу мала. На пример, да разгледаме крвен сад со дијаметар $d = 1$ cm, а брзината на крвта е $v = 0,3$ m/s. Кога магнетната индукција е $B = 10^{-1}$ T, во тој случај потенцијалната разлика би изнесувала:

$$U = vBd = 0,30 \text{ m/s} \cdot 0,1 \text{ T} \cdot 0,01 \text{ m} = 0,3 \text{ mV}$$

При користење на константно магнетно поле мерењето на брзината е сврзано со низа тешкотии. Како што се гледа од примерот потенцијалната разлика е многу помала од акциониот потенцијал на мускулите, срцето или нервните влакна кој изнесува неколку mV. Освен тоа настанува и поларизација на електродите што е појавува како шумови.

Вообичаен начин да се реши тој проблем е наместо константно магнетно поле, да се користи променливо магнетно поле со висока фреквенција. Обично, кога магнетното поле се менува по синусен закон, по истиот закон ќе се менува и индуцираната електромоторна сила што е последица од струењето на крвта. На тој начин би се избегнале влијанијата од поларизацијата на електродите.

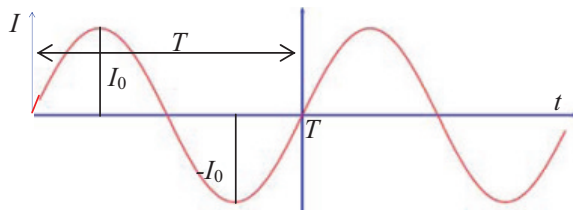
10. 1. НАИЗМЕНИЧНА СТРУЈА

Принцип на работа на генератор за наизменичната струја

Галванските елементи и акумулаторите даваат струја што постојано тече во иста насока и има иста јачина (слика 1а). Во техниката, денес, во многу поголема употреба е наизменичната струја. Тоа е струја чија насока и големина постојано се менуваат и тоа најчесто според законот на синус (сл.1.б) .



Сл.1а. Еднонасочна постојана струја



Сл. 1б Наизменична струја

Електромагнетна индукција има голема примена во науката и техниката. Една од најважните е добивањето на наизменичната струја.

Извор на ЕМС на наизменичната струја (често се вика само променлива) претставува генератор. Ќе дадеме принципна шема на генераторот за наизменична струја. Тој се состои од:

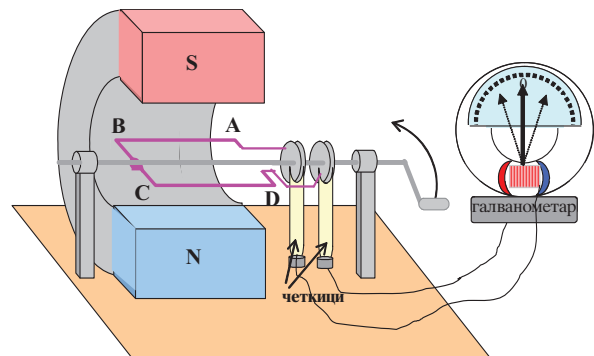
1. индуктор (статор) кој претставува магнет и создава постојано магнетно поле (сл.2) ;
2. подвижна рамка-калем ABCD (ротор) дел што ротира со постојана аголова брзина во просторот во кој се наоѓа постојаното магнетно поле; и
3. контактен дел со комплет на четкици преку кои се однесува индуцираната струја.

Во принцип имаме рамка која ротира

во постојано магнетно поле.

Експериментот од сликата 2 покажува дека кога со рака ја ротираме рамката, галванометарот поврзан преку четкиците покажува постојано осцилирањена струјата.

Се разбира кај генераторот ротацијата се добива преку турбини и аголната брзина е поголема. Но во принцип опитот ја објаснува шемата на генераторот.



Сл. 2

Низ рамката, поставена како на сликата, постои магнетен флуks Φ даден со:

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (1)$$

каде што B е магнетната индукција на магнетното поле, S е плоштината на површината опфатена со рамката, а α е аголот меѓу силовите линии на магнетното поле и нормалата на површината во која лежи рамката..

Бидејќи доаѓа до ротација на рамката, се менува и магнетниот флуks, при што се менува аголот помеѓу нормалата на рамката и правецот и насоката на магнетната индукција, и тоа така што, ако ω е аголната брзина на ротација, $\alpha = \omega t$ па,

$$\Phi = BS \cos \omega t \quad (2)$$

и е јасно дека тој е функција од времето t .

Според она што го знаеме за електромагнетната индукција, таму каде што доаѓа до временска промена на магнетниот флуks се

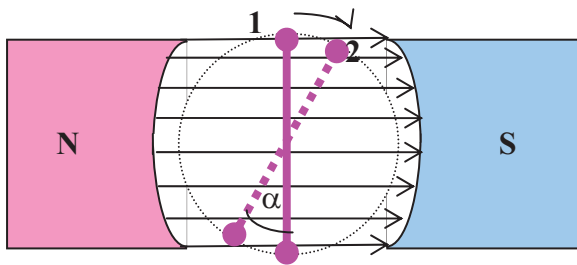
10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

индуцира електромоторна сила.

Според Фарадеевиот закон за електромагнетна индукција се индуцира ЕМС \mathcal{E}_i дадена со:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (3)$$

Тоа значи дека треба да ја определиме каква е временската промена на магнетниот флукс и истата ја замениме со времето за кое таа настанала. За таа цел ќе се послужи́ме со сликата 3. На која е даден пресекот на рамката поставена меѓу половите на магнетот.



Сл.3. Пресек на рамката меѓу половите на магнетот.

При ротацијата, движењето на спроводниците АВ и CD станува по кружница со дијаметар $d = AD$ (од сл.2) и со линиска брзина $v = \omega \frac{d}{2}$. Се покажува теориски дека индуцираната електромоторна сила е

$$\mathcal{E}_{i1} = Blv \sin \alpha \quad (4),$$

каде што l е должината на спроводниците $AB = CD = l$. Овие два спроводника се активни, и при вртење на спроводникот само во нив се индуцира ЕМС. Па така вкупната индуцирана ЕМС е дадена со

$$\mathcal{E}_i = 2\mathcal{E}_{i1} = 2 \omega \frac{d}{2} l B \sin \alpha = \omega B S \sin \omega t; \quad (5)$$

бидејќи $S = dl$.

Величината: $\omega B S$ е константа и ја има максималната, амплитудната вредност на електромоторната сила \mathcal{E}_0 . Фазата на наЕМС е ωt . ЕМС е осцилаторна функција од времето чиј

што период на осцилирање е $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Ако наместо рамка, како роторот е се употреби калем со N навивки, тогаш

$$\mathcal{E}_0 = NBA\omega \quad (6)$$

Ако колото е затворено, знаеме индуцираната ЕМС е всушност еднаква на максималната потенцијална разлика (напонот V) (Внимавајте, во оваа глава напонот го бележиме со $V!$) меѓу двата краја на изворот, па ќе биде:

$$V = V_0 \sin \omega t \quad ; \quad V_0 = NBA\omega \quad (7)$$

Се гледа дека напонот $V = V(t)$ е синусна функција од времето.

Во современите генератори на наизменичната струја со голема моќност, индукторот е силен електромагнет, и тој е ротор. “Рамката” е составена од голем број навивки од изолиран спроводник поставени околу листови на легиран т. н. електротехнички челик. Така, калемот во кој се индуцира струјата е неподвижен дел на генераторот.

Ако е колото затворено и во него е поврзан само отпорник, како на сликата 4, тогаш низ колото тече струја со исто така синусоидна зависност од времето:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t \quad ; \quad (8)$$

$$I_0 = \frac{V_0}{R}$$

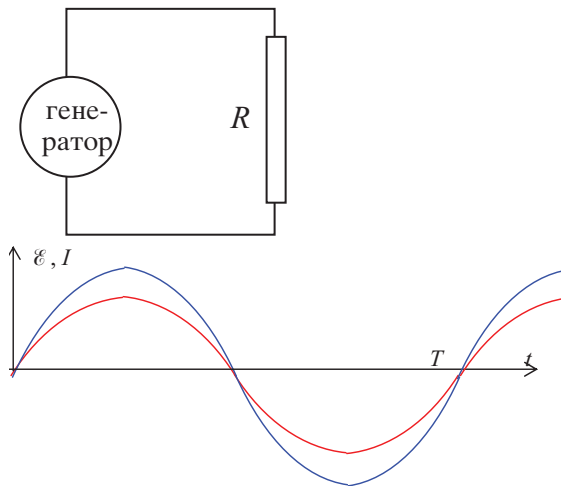
Графичката зависност на јачината на струјата и ЕМС (напонот) од времето се дадени на сликата 4.

Како што се гледа, со вртење на роторот во постојано магнетно поле се добива струја. Значи со помош на механичка енергија се добива електрична. Машините кои тоа го овозможуваат се викаат **генератори или алтернатори**.

При ротација на роторот во магнетното поле, на статорот се добива наизменична струја. Ако за време од 1 секунда роторот прави едно завртување, тогаш јачината на струјата ќе ја промени големината и насоката,

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

така што графичкиот приказ на нејзината јачина во зависност од времето ќе биде една синусоида. Таквиот генератор ќе работи со фреквенција од 1 Hz. Генераторите на наизменичната струја во нашата градска мрежа работат со фреквенција од 50 Hz (50 завртувања во секунда). Во САД градската струја има фреквенција од 60 Hz.



Сл.4. Во колото е вклучен само омски отпор. Јачината на струјата и напонот се во фаза

Генераторите се машини со кои механичката енергија се претвора во електрична, а кај електромоторите со помош на електричната енергија може да се добие механичка. Од таму изгледот на еден мотор или генератор се многу слични.

Во секој случај, кај сите овие машини доаѓа до претворање на еден вид енергија во друг. Кај генераторите треба да се внесе енергија за да се врти роторот. Тоа се прави со огромни турбини кои се вртат или со вода - кај хидроцентралите, или со помош на загреана водена пара под висок притисок, а која е добиена со согорување на гориво (јаглен или нафта) кај термоцентралите. Кај атомските централи, нуклеарната енергија добиена со процесите кои настануваат со разбивање на атомските јадра се користи исто така за загревање големи количеств водена пара. Водената пара е со многу висок притисок така што нејзината енергија се претвара во механичка, а оваа во електрична.

Ефективни вредности на наизменичната струја

Наизменичната струја се карактеризира со следниве физички параметри: моментна, ефективна и максимална вредност на наизменичната струја. Од тоа што досега го кажавме е јасно што се тоа максимална (амплитудна) вредност, како и моментна вредност.

Ефективна вредност на наизменичната струја се подразбира вредноста на онаа постојана струја која за исто време низ исто коло ослободува исто количество топлина како и наизменичната.

Во услови кога во колото на наизменичната струја е вклучен само омски отпор, целокупната нејзина енергија се претвора во топлина. Имено, тогаш воопшто не е важна насоката на струјата. Во таа смисла топлинската моќност на наизменичната струја може да се спореди со топлинска моќност на постојана еднонасочна струја која за ист временски интервал, низ истото коло ослободува исто количество топлина. Со водење сметка за тоа, се покажало дека ефективната вредност на јачината на струјата и напонот на наизменичната струја е определена со релациите:

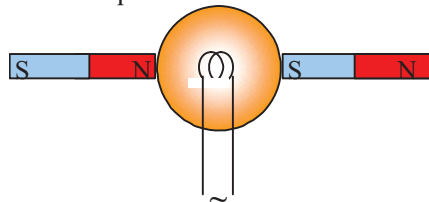
$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}; \quad V_{ef} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}; \quad (9)$$

каде што I_0 и V_0 се амплитудните вредности на струјата и напонот.

Со инструментите за мерење на величините на наизменичната струја обично се мерат ефективните вредности на струјата и напонот.

Прашања, задачи и активности

1. Кој од роторите побрзо ротираат, оние во САД или во Европа?

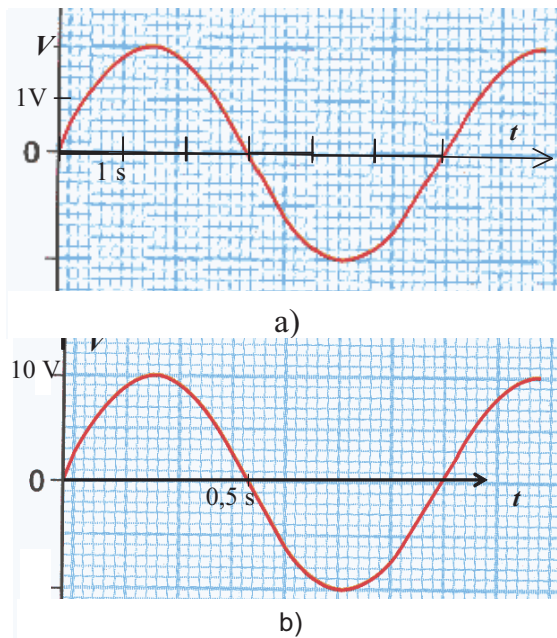


Сл.5

2. Како ќе го објасните следниов експеримент:

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

Ввектрична светилка. За подобро гледање, вклучуваме на светилката помал напон од пропишаниот така, што при гледањето во неа, светлината да не смета на очите. Внимателно принесуваме до светилката еден постојан потковичест магнет, или два прачкасти (како на сликата 5), така што магнетните силиви линии да се нормални на нитката што свети.



Сл. 6

Ќе видиме дека нитката на ламбата ќе ни изгледа како раширена.

3. На сликата 6 се дадени дијаграмите за наизменичен напон на струи добиени со различни генератори. Определете ги од графикот вредностите на периодите, фреквенциите и амплитудите на напоните.

Кратко резиме

- Појавата електромагнетна индукција најширока примена нашла при генерирањето на наизменичната синусна струја.

- Синусна струја е струја кај која ЕМС, напонот и јачината на струјата се синусни функции од времето.

- Генератори за наизменичната струја се уреди во кои настанува претворање на механичка

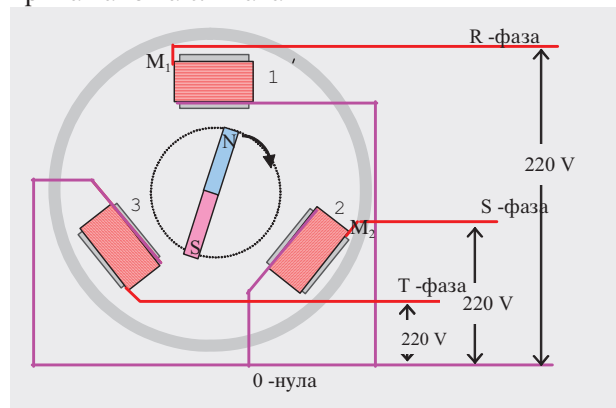
енергија во електрична.

- Ефективната вредност на наизменичната струја е еднаква на големината на онаа еднонасочна права струја која за исто време би ослободила исто количество топлина како и дадената наизменична струја.

10.2 .ТРИФАЗНИ СТРУИ

Полифазните струи во науката и техниката се воведени од Никола Тесла (1856-1943). Во техниката од најголемо значење се трифазните струи. Знаеме дека со користење на ротација на рамка во магнетно поле во неа се индуцира синусодална струја. Тоа е во основа принципот на генераторот на еднофазна наизменична струја.

Генерирањето на трифазната струја е прикажано на сликата 1



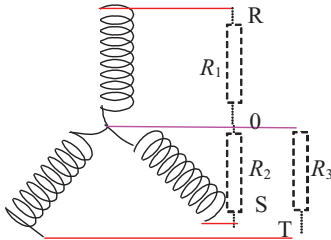
Сл. 1

Генераторот за трифазна струја се состои, исто како и генераторот на монофазната струја од статор и ротор. Статорот има три калемии чии оски се поставени под агол од 120° една во однос на друга. По еден крај, од секој калем на статорот ја пренесува струјата до потрошувачот, а другите краевии се поврзани меѓусебно во еден спроводник, кој обично се вика нулти спроводник. Поврзувањето во нултиот спроводник овозможува бројот на спроводниците, кои при пренос до потрошувачите од секој калем би бил $3 \times 2 = 6$, да се сведе на 4. Намалувањето на бројот на спроводниците од 6, на 4, се прави, како што е покажано на сликата 2, кое шематски се

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

прикажува со т. н. “свезда” поврзување (сл. 2)

Помеѓу калемите на статорот се наоѓа роторот, кој обично е електромагнет, напојуван со извор на постојана струја, така што игра иста улога како да е таму поставен постојан магнет (За подобро разбирање, на сликата е нацртан постојан магнет).



Сл.2

При вртење на роторот, секој пол на електромагнетот прво поминува покрај првиот калем (1), па по истекот на време потребно да се направи $1/3$ завртување, поминува покрај вториот (2), додека по време од $2/3$ од времето потребно за едно завртување, поминува покрај калемот (3).

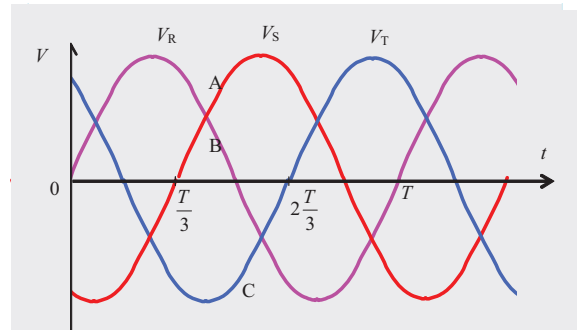
Ако времето што е потребно да се направи едно завртување е период T , тогаш во секој од калемите ќе се индуцира ЕМС со задоцнување од $1/3 T$, во однос на претходниот калем (сл.4). Фазите обично се означуваат како R, S и T.

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 &= \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad ; \quad \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_0 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) ; \\ \mathcal{E}_3 &= \mathcal{E}_0 \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

При натамошното вртење на роторот, ова постојано се повторува. Тоа значи дека индуцираниот напон во калемите може да се претстави со графикот што е даден на сликата 2.

Добиените напони во сите три калемии се еднакви, само што во исто време не се постигнуваат максималните струи, ниту нултите вредности (сл.3), тие не се во фаза, туку се фазно одместени.

Ефективните вредности на тие напони во нашата градска мрежа изнесуваат 220 V.



Сл.3

Напонот меѓу фазите, значи, меѓу спроводниците R и S, или R и T, или S и T се вика **меѓуфазен напон**. Ако ефективната вредност на напонот во градска мрежа меѓу нулата и било кој од фазите е 220 V, меѓуфазниот е 380 V.

Тоа значи при соединување на генераторот во “свезда” врска, може да се добијат два вида напони со амплитудни вредности \mathcal{E}_0 и се покажува $\mathcal{E}_0 \sqrt{3} = 380 \text{ V}$.

Ако мрежата е оптоварена со потрошувачи R_1, R_2 и R_3 и тоа така што $R_1 = R_2 = R_3$ (симетрично оптоварување, во тој случај низ сите фази R, S, и T ќе тече иста струја и низ нулниот спроводник нема да тече струја.

Дека е тоа така, може да се покаже ако ги собереме напоните во кој било момент t од графициите на сликата 2.

Индуцираните напони (ЕМС) се синусоидални и дадени со релациите (1) нив им одговараат соодветни струи:

$$\begin{aligned} I_R &= I_0 \sin \omega t \quad ; \quad I_S = I_0 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) ; \\ I_T &= I_0 \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Ако ги собереме овие струи кога за сите е иста максималната големина на струјата I_0 ќе се добие:

$$\begin{aligned} I &= I_R + I_S + I_T = I_0 \sin \omega t + I_0 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \\ &+ I_0 \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad a$$

бидејќи според тригонометриските закони:

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

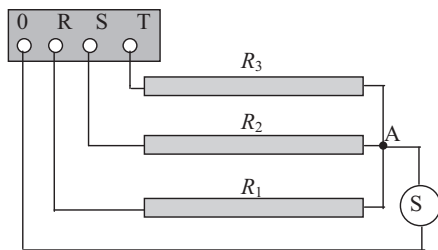
$$\begin{aligned} & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = \\ & = 2 \sin(\omega t - \pi) \cos \frac{\pi}{3} = -\sin \omega t \end{aligned}$$

тогаш вкупната струја $I=0$.

Во услови на симетрично оптоварување, или приближно симетрично, низ нултиот спроводник нема да тече струја, или и ако тече е незначителна. Меѓутоа, ако трите фази не се еднакво оптоварени, значи I_0 е различно, низ нултиот спроводник може да тече значителна струја.

Експеримент

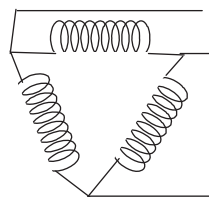
Демонстрација на нееднакво оптоварување на трите фази се прави со три отпорника со голема моќност врзани во градска мрежа као на сл. 4.



Сл.4

Помеѓу заедничката точка А и нулата се поврзува некој регистратор за струја, на пример свонче S (или амперметар). Ако се сите потрошувачи, овде отпорници, со еднаков отпор (еднакво оптоварување), низ колото на нултиот спроводник не тече струја. Меѓутоа, ако едниот отпор е различен од другите два, своното ќе засвони, низ нултиот спроводник тече струја.

Покрај “свезда” поврзување во електро-техниката се користи и **триаголно поврзување** (сл. 5). Кај таквото поврзување се добива само меѓуфазен напон.

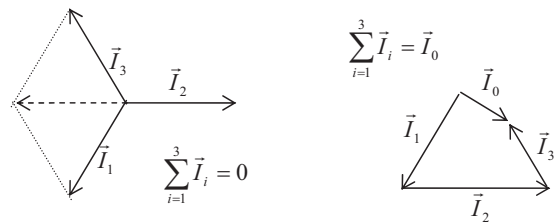


Сл.5

Предноста на ова врзување е намалениот број спроводници, како и фактот дека при несиметрично оптоварување не се нарушува симетричноста на меѓуфазните напони.

Трифазните струи може да бидат

прикажани и преку векторски дијаграм. На сликата ба е даден векторски дијаграм на струите при симетрично оптоварување. На сликата б б се однесува на случајот која амплитудните вредности на струите се различни па нивниот векторски збир ја дава струјата низ нултиот спроводник I_0 .



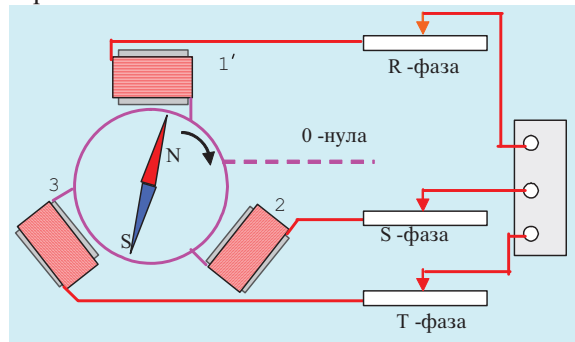
а)

б)

Сл. 6

Трифазните струи имаат многу предности. Така, со ротација на еден ротор се добиваат три напони кои можат одделно да се користат. При пренос на електричната енергија на големи растојанија, наместо 6 спроводници што би биле потребни кај 3 монофазни генератори, доволни се 4, од кои нултиот најчесто е нешто потенок. Тој кај далноводите се одбегнува, со помош на триаголна врска.

Најголема предност на трифазните струи е можноста да се добие вртливо магнетно поле, а со негова помош добивање на мотор.



Сл.7

Шема на експеримент со кој се покажува вртливото магнетно поле е дадена на сликата 7 Тука три калемии се поставени под агол од 120° и истите се поврзани со трите фази на градската мрежа. Во секоја врска е поставен и по еден отпорник. Отпорниците се еднакви, и вклучениот отпор, исто така,

еднаков. Бидејќи во секој калем струјата не постигнува максимум во исто време, на пример северен магнетен пол во калемот со S- фаза ќе се воспостави по $(1/3)T$ по воспоставувањето во R-фазниот калем, а во T-калемот уште подоцна, по $(2/3)T$. Се создава вртливо магнетно поле. Ако како ротор употребиме магнетна игла, таа ќе почне да ротира. Значи сме добиле механичка енергија со помош на електрична трифазна струја. Реализиран е електричен мотор на наизменична струја.

Вртливото магнетно поле може да предизвика и ротација на метален диск, кој ќе се најде во просторот меѓу трите калема. Тоа е демонстрација чие што објаснение е исто како и кај таканареченото Теслино јајце (Тесла го викал Колумбово јајце) (сл. 8).



Сл.7.

Во просторот помеѓу трите калеми поставени под агол од 120° , како на сликата 7, поставено е метално јајце. Кога ќе се пушти струја низ калемите, со оглед на тоа што максимумите на струјата во секој од калемите се постигнува со закаснение од $T/3$, се создава магнетното поле кое е ротирачко. Ротацијата на магнетното поле е причина во металното јајце да се индуцираат виорни Фукоови струи кои, според Ленцовото правило имаат таква насока што нивното магнетно поле се спротиставува на причината поради која доаѓа до нивното создавање, па поради тоа јајцето ќе започне да ротира и при таа ротација ќе се исправи како што се гледа на сликата. Така, со помош на трифазната струја се добива механичка енергија, што всушност претставува основен принцип на работа на индукциониот (асинхронен) мотор кој Тесла го има изумено уште во 1882 година, а кој денес најчесто се среќава во индустријата, (се смета 90% од сите мотори се базираат на Теслиниот асинхрон

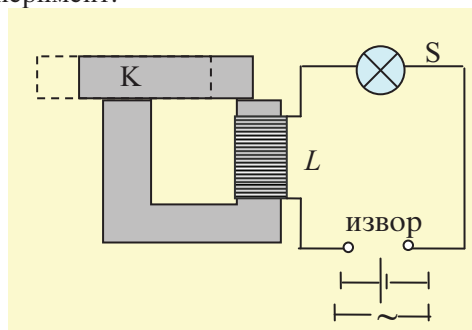
мотор). Овој тип мотори може да се сретне и во уредите во домаќинствата, па дури и кај компјутерите (ротација на компакт дисковите).

Треба да се напомене дека сè до Теслините изуми променлива наизменична струја се сметало дека е некорисна.

10. 3. ОМСКИ, КАПАЦИТАТИВЕН И ИНДУКТИВЕН ОТПОР

Индуктивен отпор

Низа елементи од кола со наизменична струја, како што се трансформатори, електромотори, придушници и сл, освен активен омски отпор имаат исто така и индуктивен отпор. Имено, променливата струја е причина во колото да се појави на ЕМС на самоиндукцијата која се спротиставува на промените на јачината на струјата, поради кое и се јавува овој дополнителен отпор. Тоа го потврдува следниот експеримент.



Сл.1

Еден калем е поврзан во струјно коло во кое може да биде вклучен извор на прав или на наизменичен напон. Калемот L е поставен на јадро од раставлив трансформатор, со помош на кој може да се менува индуктивитетот на калемот. Кога во колото е вклучен извор на прав напон светилката S еднакво свети, независно од тоа дали дали калемот е вовлечен во јадрото или не, додека кога напонот е наизменичен, светилката помалку свети кога се зголемува индуктивитетот на калемот (при вовлекување во јадрото), а може и сосема да претстане да свети кога јадрото ќе го затвориме со железната котва K .

Ако како извор се употреби генератор чијашто фреквенција може да се менува (RC-генератор) се покажува дека отпорот расте со

фреквенцијата на наизменичната струја.

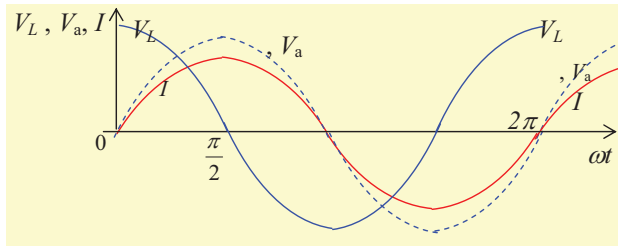
Што може да се заклучи?

Во коло на наизменична струја покрај омскиот отпор, кој често се вика и активен, се јавува додаден отпор R_L , чија големина е еднаква на :

$$R_L = \omega L \quad (1)$$

и се вика *индуктивен отпор*. Како што се гледа, индуктивниот отпор не е само карактеристика на спроводникот, како што е тоа случај кај омскиот отпор, туку тој зависи и од фреквенцијата на струјата.

Поради појавата на индуктивниот отпор во колото доаѓа до појава на фазна разлика помеѓу јачината на струјата и падот на напонот во делот каде се јавува индуктивниот отпор. Сликата 2 го илустрира тоа. Со црвено е нацртана зависноста на јачината на струјата, а со сино падот на напонот на индуктивниот отпор. Со сино (со испрекинатата линија) е дадена зависноста на нападот на понот на активниот, омскиот отпор.



Сл.2. Појава на фазна разлика меѓу јачината на струјата и напонот кај индуктивниот отпор. Напонот изврзува за $\pi/2$ пред струјата.

Заостанувањето на струјата I зад напонот за $\pi/2$ се објаснува со фактот дека во калемот се

појавува ЕМС на самоиндукцијата $\left(-L \frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$

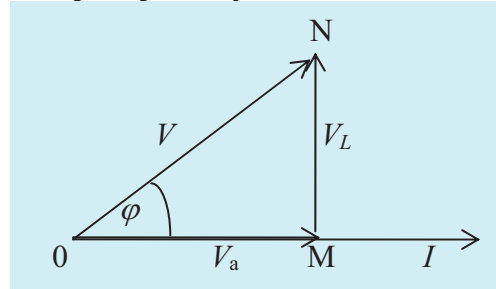
чија големина е пропорционална со брзината на промената на струјата. Значи во моментот кога струјата има нулта вредност, нејзината

промена $\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$ има максимална големина, па

според тоа и ЕМС на самоиндукцијата е максимална, додека во случајот кога струјата има максимална вредност ЕМС на

самоиндукцијата е еднаква на нула. Па како резултат на кажаното струјата ѝ претходи на ЕМС на самоиндукцијата за 90° ($\pi/2$). А бидејќи, според Ленцовото правило ЕМС на самоиндукцијата има спротивен знак со V_L , тогаш во однос на овој напон јачината на струјата доцни во фазата за 90° .

Фазорно претставување



Сл. 3

На сликата.3 е даден векторскиот дијаграм за вакво коло. Со вектори се прикажани, јачината на струјата, носечки основен вектор, бидејќи таа е еднаква за целото коло и активната компонента на падот на напонот како и индуктивната компонента на напонот, V_a и V_L . Активната компонента на напонот $V_a = IR$ се совпаѓа по својата насока и правец со насоката на фазорот на јачината на струјата I . Индуктивната компонента V_L избрзува во фазата за 90° пред јачината на струјата. Векторски збир на тие две компоненти го дава векторот на напонот V , кој со јачината на струјата, зафаќа агол φ што претставува *фазна разлика* помеѓу јачината на струјата и напонот. При сложување на овие два вектора се добива триаголник OMN, кој се вика *триаголник на напонот*. Од него следат следниве врски:

$$V_a = V \cos \varphi, \quad V_L = V \sin \varphi, \quad \tan \varphi = \frac{V_L}{V_a} \quad (2)$$

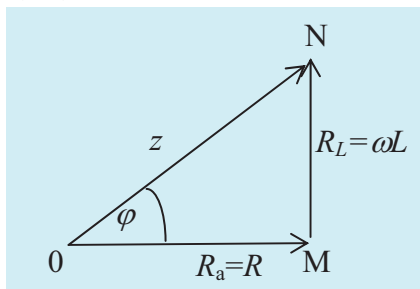
Од тој триаголник исто така следува:

$$V^2 = R^2 I^2 + (\omega L)^2 I^2; \Rightarrow$$

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{V}{Z} \quad (3)$$

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

Последнава релација го дава Омовиот закон за ова коло. Во него со z е означен вкупниот отпор за даденото струјно коло еднаков на $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$.



Сл.4. Триаголник на отпорот

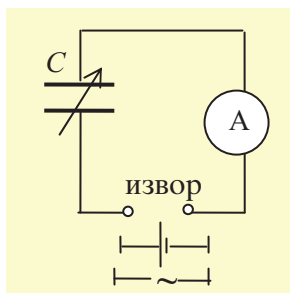
Ако сите напони се поделат со јачината на струјата, може да се добие **триаголник на отпорот** (сл. 4). Од него се гледа дека :

$$\tan \varphi = \frac{\omega L}{R} \quad (4)$$

фазната разлика меѓу јачината на струјата и напонот ја определува односот помеѓу индуктивниот отпор и активниот омски отпор. Отпор кој е причина за создавање фазна разлика меѓу јачината на струјата и напонот го викаме *реактивен отпор*. Јасно е дека индуктивниот отпор е реактивен.

Капацитативен отпор

Ако составиме струјно коло од кондензатор и амперметар (сл.5) и истото го вклучима на извор на прав напон, ќе се убедиме дека струја нема да тече. Кондензаторот за постојаната права струја претставува бесконечен отпор.



Сл.5

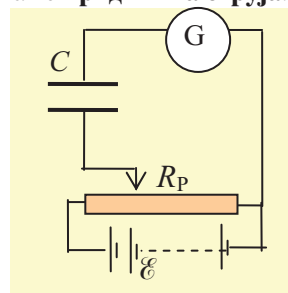
Меѓутоа, ако кондензаторот се вклучи на извор на наизменичен напон амперметарот ќе

се отклони. Со зголемување на капацитетот на кондензаторот, струјата расте.

Струјата низ кондензаторот, за разлика од струјата низ спроводниците, која е резултат на спроводливоста, не е со иста природа. Нејзината големина зависи од брзината на промената на електричното поле создавано помеѓу кондензаторските облоги, а пак тоа зависи од брзината со која доаѓа до промена на полнежите Q на самите облоги:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (5)$$

Таквата струја ќе ја има и во вакуум. Оваа струја ја викаме **придвижна струја**.



Сл.6

Со експеримент скициран на сликата 6, може да се покаже дека во кој и да било случај кога настанува промена на напонот на кондензаторските облоги, низ колото ќе тече струја. Ако таа промена на напонот ја правиме со тоа што го движиме лизгачот на потенциометарот R_p , сè дури доаѓа до промена на напонот ќе има и отклон на галванометарот. Колку е промената на напонот побрза, толку е отклонот на галванометарот поголем.

Ќе се вратиме повторно на релацијата (.5). Ако на кондензаторските облоги се менува полнежот, тогаш со оглед на тоа што полнежот е $Q = CV$, а капацитетот на кондензаторот C не се менува, она што се менува е напонот, имено:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad ; \quad I = C \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (6)$$

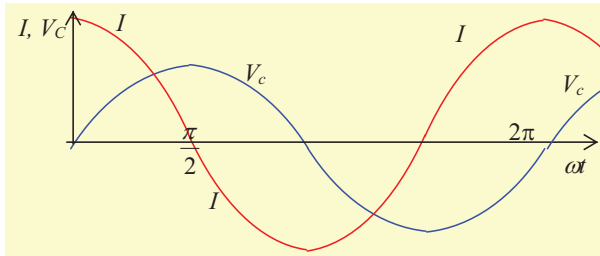
Ако е на облогите донесен напон кој се менува синусоидално:

$$V_c = V_0 \sin \omega t \quad (7)$$

тогаш и јачината на струјата, дадена со (6), исто ќе се менува синусоидално, но меѓу напонот и струјата ќе постои фазна разлика.

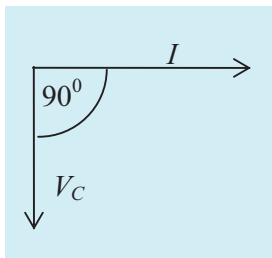
10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

Кај променлива струја со врзан кондензатор се создава фазна разлика помеѓу напонот и јачината на струјата. Таа фазна разлика исто изнесува $90^\circ (\pi/2)$, но, овде *јачината на струјата избрзува пред напонот*. Капацитивниот напон задоцнува зад струјата за $\pi/2$.



Сл. 7

Графиците на јачината на струјата и напонот за овој случај се дадени на сликата 7, а на сл. 8 даден е соодветниот векторски дијаграм.



Сл.8

Фазната разлика меѓу напонот и јачината на струјата се објаснува на следниов начин. Кога напонот на кондензаторските облоги ја менува насоката, т.е. поминува низ нулата, доаѓа до создавање на најголема придвижна струја.

Се покажува дека улогата на **капацитивен отпор** R_C ја игра величината

$$R_C = \frac{1}{\omega C} \quad (8)$$

Како што се гледа и капацитивниот отпор е вид на *реактивен отпор*. И тој предизвикува создавање на фазна разлика помеѓу напонот и јачината на струјата.

Ако во колото покрај капацитивниот отпор е вклучен и активен, омски отпор, поради тоа што тогаш ќе постојат две компоненти на

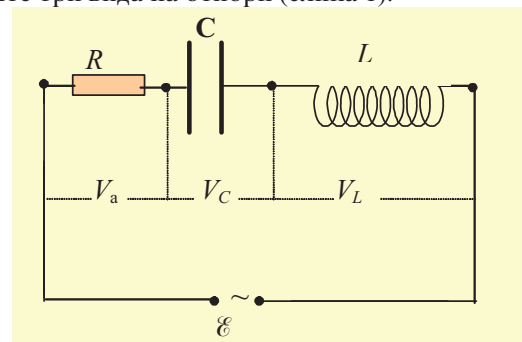
напонот кои се фазно поместени, вкупниот отпор е еднаков на

$$z = \sqrt{R^2 + R_C^2} .$$

10.4. СЕРИСКА (и паралелна) ВРСКА НА ОМСКИ, ИНДУКТИВЕН И КАПАЦИТАТИВЕН ОТПОР. ОМОВ ЗАКОН ЗА НАИЗМЕНИЧНА СТРУЈА

Сериска врска на сите три вида отпори. Омов закон

Да разгледаме струјно коло во кое се вклучени сите три вида на отпори (слика 1).



Сл.1

Тука јачината на струјата низ сите три видови отпори е еднаква и нека е дадена со:

$$I = I_0 \sin \omega t \quad (1)$$

Падовите на напоните на одделните делови на колото се:

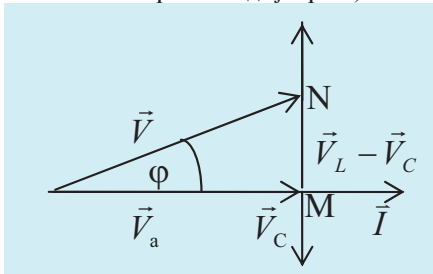
$$V_a = IR; \quad V_C = IR_C = \frac{I}{\omega C} \quad \text{и}$$

$$V_L = IR_L = I\omega L \quad (2)$$

Напонот, донесен на краевите на трите елементи еднаков е на збирот на падовите на напоните во векторска форма, заради постоењето на фазната разлика меѓу V_L и V_C во однос на V_a , така што може да се запише:

$$\vec{V} = \vec{V}_a + \vec{V}_C + \vec{V}_L \quad (3)$$

(Внимавајте, напоните се скалари, овде доаѓа предвид на собирање на нивните фазори кои претставуваат векторски претставени величини во векторскиот дијаграм).



Сл. 2

На сликата 2 е даден векторскиот дијаграм (триаголникот на напонот) за ова коло. На него како основен вектор е земен фазорот на јачината на струјата, бидејќи е таа иста за сите делови на колото. V_L е по големина поголемо од V_C , што не мора секогаш да е случај.

Од триаголникот на напонот OMN се добива:

$$V^2 = V_a^2 + (V_L - V_C)^2 = R^2 I^2 + I^2 \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2$$

или

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2}} = \frac{V}{z} \quad (3)$$

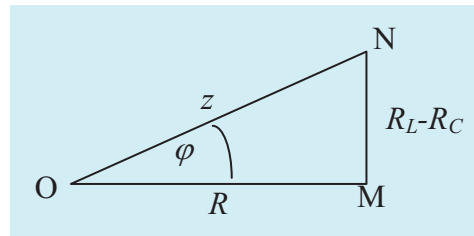
Овој израз претставува **Омов закон за наизменична струја**, каде што именителот z се вика **импеданција** и е еднаква на :

$$z = \sqrt{R^2 + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2} \quad (4)$$

На сликата 3 е даден *триаголникот на отпорот*, од каде и се добива релацијата за импеданцијата.

Во случај кога капацитивниот отпор е поголем од индуктивниот, фазната разлика помеѓу струјата и напонот φ е негативна.

Од сликата се гледа дека за фазната разлика важат релациите:



Сл.3

$$\cos \varphi = \frac{R}{z}, \quad \sin \varphi = \frac{R_L - R_C}{z},$$

$$\tan \varphi = \frac{R_L - R_C}{R}. \quad (5)$$

Резонанција на напонот

Ако постои можност да се менува индуктивниот и капацитивниот отпор, и успееме да подесиме, тие да бидат еднакви, значи :

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (6)$$

па реактивниот отпор да е еднаков на нула, напонот и јачината на струјата се со иста фаза, и според релацијата (3) низ колото тече максимална струја. Појавата ја викаме **резонанција на напон**.

Оваа појава може да се демонстрира така, што во коло како на сликата 1 се вклучени кондензатор чиј капацитет се менува, а индуктивитетот на калемот го менуваме со вовлекување или вадење на калемот во јадрото на раставливиот кондензатор. Ако наместо отпорник во колото е вклучена светилка, во услови кога реактивните отпори ќе се изедначат, светилката ќе свети максимално.

Резонанција на струјата

Да разгледаме коло со паралелно поврзани кондензатор и калем, како на сликата 4.

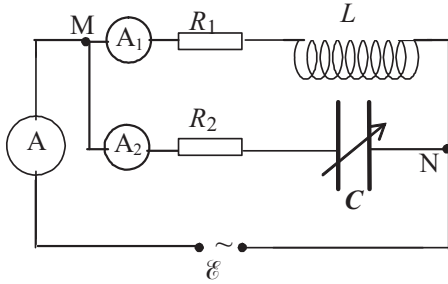
При ваква врска помеѓу точките M и N постои одредена потенцијална разлика, еднаква за двете гранки. Во двете гранки струите се различни и еднакви на :

$$I_1 = \frac{V}{z_1} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{V}{z_2} \quad (7)$$

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

каде што соодветните импеданции се дадени со:

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2} \quad ; \quad z_2 = \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (8)$$



Сл.4.

Јачината на струјата во неразгранетиот дел не е еднаква на обичната сума на струите во одделните гранки 1 и 2, бидејќи меѓу струите постојат фазни разлики, предизвикани со постоењето на реактивните отпори во двете гранки. Со користење на векторски дијаграм, овде јачината на струјата во неразгранетиот дел е векторска сума на јачините на струите во одделните гранки (види слика 5). За сликата да биде појасна векторите на струјата кои се однесуваат на првата гранка се нацртани со испрекинататаи линии, а векторите на втората гранка исто со комбинирано испрекинати линии, додека струјата во неразграниот дел и напонот се нацртани со црни линии.

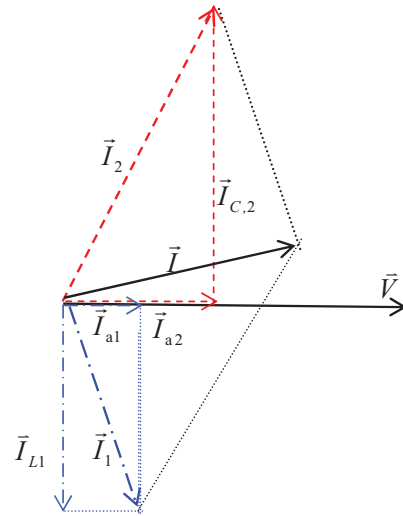
Фазната разлика во одделните гранки може да се определи според нам веќе познатите релации:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{z_1} \quad ; \quad \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{z_2}$$

или

$$\tan \varphi_1 = \frac{R_L}{R_1} \quad ; \quad \tan \varphi_2 = \frac{R_C}{R_2} \quad (8)$$

При цртањето на векторскиот дијаграм (сл. 5) во овој случај, како основен вектор се одбира векторот на напонот, бидејќи тој е за двете гранки еднаков. Векторот на јачината на струјата го добиваме со векторско собирање на јачините на струите во двете гранки:



Сл.5

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 \quad (9)$$

И во овој случај може да се постигне услов за резонанција. Имено, ако претпоставиме дека омските отпори во двете гранки се еднакви, и мали, значи $R_1=R_2$ и уште ако се подесат реактивните отпори во двете гранки да се еднакви :

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (10)$$

тогаш во двете гранки течат струи кои се фазно одместени за еднакви фази φ_1 односно φ_2 во спротивни насоки. Кога уште исполнет условот да $R_1=R_2$ и се така мали што може да се занемарат, тогаш $\varphi_1 \cong (\pi/2)$ а $\varphi_2 \cong -(\pi/2)$, се постигнува дека меѓу струите во двете гранки I_1 и I_2 постои фазна разлика π , тие стануваат противфазни. Тогаш струјата во неразгранетиот дел ќе стане еднаква на нула:

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 = 0 \quad (11)$$

Ако постојат активни отпори, а е исполнет условот (10), тогаш струјата во неразгранетиот дел е еднаква на збирот од активните компоненти, и е **минимално можна** за даденото струјно коло. Појавата на минимално можната струја, поточно на изедначување на индуктивната компонента на струјата од едната гранка со капацитативната од другата, се вика **резонанција на струјата**.

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

Ако во коло на наизменична струја се вклучени повеќе омски отпори, повеќе капацитативни и повеќе индуктивни отпори, секој вид треба посебно да се соберат, па потоа да се употреби релацијата за Омов закон за наизменичната струја, односно да се црта векторскиот дијаграм

Прашања, задачи, активности

1. Краевите на еден калем кој има голем индуктивитет, се приклучени прво на еднонасочен постојан напон, а потоа на наизменичен напон. Ако ефективната вредност на наизменичниот напон е еднаква со правиот напон, ќе бидат ли еднакви ли и јачините на струите?
2. Каква е разликата помеѓу активниот и реактивниот отпор?
3. Од што зависи фазната разлика помеѓу напонот и јачината на струјата?
4. Под кој услов фазната разлика помеѓу напонот на краевите на колото и струјата во колото е еднаква на нула?
5. Под кој услов во случај на сериска врска меѓу омски, капацитативен и индуктивен отпор, струјата ќе зависи само од големината на омскиот отпор?
6. Што е тоа резонанција на напон?
7. Што е тоа резонанција на струјата?
8. Што мислите зошто како носечки вектор во случај на сериска врска се користи јачината на струјата, акај паралелната напонот?

Кратко резиме

Кај наизменичната струја покрај омскиот отпор (R) постои и индуктивен ($R_L = \omega L$) и капацитативен отпор ($R_C = 1/\omega C$). Постојење на индуктивен и капацитативен отпор предизвикува фазна разлика (ϕ) меѓу јачината на струјата и напонот во колото,

затоа тие отпори се викаат реактивни отпори. Ако е во колото вклучен само индуктивен отпор, тој предизвикува избрзување на напонот за $\pi/2$ пред јачината на струјата, а ако е вклучен само капацитативен отпор тој предизвикува доцнење на напонот за $\pi/2$ во однос на јачината на струјата.

Импеданција (z) е вкупен отпор кај сериски врзаните трите вида отпори, дадена со релацијата:

$$z = \sqrt{R^2 + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C}\right]^2}.$$

За сериски врзаните отпори важи Омов закон за наизменична струја, според кој, јачината на струјата (I) е дадена со:

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C}\right]^2}} = \frac{V}{z}$$

Кога се сериски врзани трите видови отпори, и е дотерано $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ низ колото тече максимална струја. Настанала резонанција на напон.

Во случај на паралелно поврзани капацитативен и индуктивен отпор, и кога се тие еднакви, настанува резонанција на струјата.

Струјата во неразгранатиот дел од колото е минимална.

10.5. РАБОТА И МОЌНОСТ НА НАИЗМЕНИЧНАТА СТРУЈА

Кога низ некое коло тече наизменична струја во спроводниците на колото се ослободува топлина. Тоа значи наизменичната струја, исто како и постојаната еднонасочна врши работа. Бидејќи напонот и јачината на наизменичната струја постојано се менуваат во текот на врџемето, разликуваме: **моментална, максимална и ефективна моќност** на наизменичната струја.

Коло со омски отпор

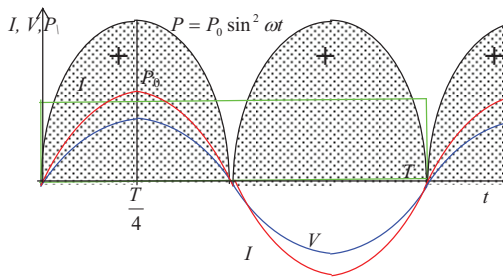
10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

Ако во колото е вклучен само активниот (омскиот) отпор, односно во колото е вклучен занемарливо мал индуктивитет, а и во колото не е вклучен кондензатор, моменталната вредност на моќноста, според Џул-Ленцовиот закон е:

$$P(t) = I \cdot V = I_0 V_0 \sin^2 \omega t = P_0 \sin^2 \omega t \quad (1)$$

и е добиена така што се измножени моменталните вредности на јачината на струјата и напонот ($V = V_0 \sin \omega t$ и $I = I_0 \sin \omega t$). Моменталната моќност се менува од вредноста 0 па до $P_0 = I_0 V_0$ – максималната вредност на моќноста и секогаш е позитивна, бидејќи :

$$\sin^2 \omega t > 0.$$



Сл. 1. Зависност на моменталната моќност на наизменичната струја од времето, кога не постои фазна разлика

Графичка зависност на моменталната моќност од времето (слика1), во овој случај кога не постои никаков реактивен отпор па ниту фазна разлика меѓу струјата и напонот ја илустрира таа позитивност на моќноста.

Работата на електричната струја е бројно еднаква на плоштината на изшрафираната површина. Од друга страна може да се покаже дека таа плоштина за време од еден период T , е еднаква и на плоштината на правоаголникот, означен со зелени рабови, а чии страници се периодот T и $P_0/2$, значи:

$$\frac{P_0}{2} T = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_0}{\sqrt{2}} T = I_{ef} \cdot V_{ef} T \quad (2)$$

Ако равенката се скрати со T , се добива дека во овој случај мочноста на наизменичната струја е еднаква на производот од ефективните

вредности на напонот и струјата:

$$P = I_{ef} \cdot V_{ef} \quad (3).$$

Коло со реактивни отпори

Изразот (3) за моќноста на наизменичната струја не важи за случај кога во колото е вклучен индуктивен и капацитативен отпор. Тогаш меѓу напонот и струјата постои фазна разлика φ и се дадени со

$$V = V_0 \sin \omega t \quad \text{и} \quad I = I_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (4)$$

Моменталната моќност е тогаш дадена со:

$$\begin{aligned} P(t) &= I \cdot V = I_0 V_0 \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= \frac{I_0 V_0}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] \end{aligned} \quad (5)$$

односно

$$P(t) = I_{ef} V_{ef} \cos \varphi - I_{ef} V_{ef} \cos(2\omega t + \varphi) \quad (6)$$

Како што се гледа моменталната вредност на моќноста се состои од две компоненти. Првата е константна и не зависи од времето. Таа компонента се вика **активна моќност**.

Втората компонента на моменталната моќност се менува со двојна фреквенција и може да биде како позитивна така и негативна.

Осцилирањето на моќноста во колото треба да се разбере на следниов начин. Во колото кое содржи индуктивен отпор, првата четвртина од периодот T кога струјата се зголемува, магнетното поле расте и дел од енергијата на изворот се претвора во енергија на магнетното поле во колото. Во моментот $t=T/4$, енергијата на магнетното поле U_m ја има својата максимална вредност. Ваквата насока на преносот на енергијата се смета за позитивна, и моменталната моќност што ја карактеризира брзината на преносот на енергијата, ќе биде позитивна.

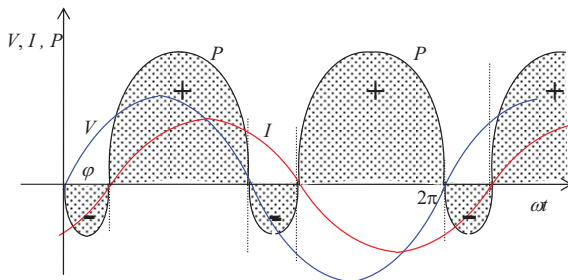
Во втората четвртина на периодот, кога струјата се намалува, од максималната вредност на нултата, енергијата на магнетното поле од колото се враќа на изворот, што се смета за негативна насока на преносот на енергијата, па одтаму и негативна моментална моќност. Тоа значи дека за една половина од периодата на струјата, енергијата извршува

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

цел циклус на претворања, т.е. цела осцилација, што одговара на двојната фреквенција на моменталната моќност.

Сосема аналоган процес настанува ако во колото е вклучен капацитивен отпор, само што тогаш, енергијата на изворот за време од $(1/4) T$ се троши за создавање на максимална енергија на електрично поле.

Од кажаното може да се заклучи дека втората компонента на моќноста зависи од реактивниот отпор во колото, и затоа се вика **реактивна моќност**. Реактивната моќност ја карактеризира брзината на реверзибилниот процес на размена на енергијата меѓу изворот на ЕМС и променливото магнетно, или електрично поле. Активната моќност ја определува брзината на преобразбата на електричната енергија во други видови енергии (внатрешна-топлинска, светлинска, механичка или хемиска). Графичка зависност на моменталната моќност при постоење на реактивен отпор е дадена на сликата 2.



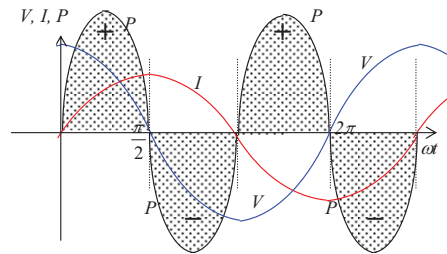
Сл. 2. Зависност на моќноста на наизменичната струја од ωt , кога во колото постои фазна разлика меѓу напонот и струјата.

Од равенката (6) како од сликата 2 е видно колку е помала фазната разлика меѓу напонот и струјата, т.е. колку е помал реактивниот отпор, толку е помала реактивната моќност.

Во нереален идеален случај кога во колото постои само реактивен отпор, на пример индуктивен, $\varphi = 90^\circ$, равенката (6) поминува во

$$P(t) = I_{\text{ef}} V_{\text{ef}} \cos(2\omega t + 90^\circ) \quad (7)$$

па зависноста на моменталната моќност е дадена со сликата 3.



Сл.3 Моќност на наизменичната струја при $\varphi = \pi/2$

На графикот се гледа дека колку има позитивна моќност, толку е и негативна. Нема моќност која би можела да биде искористена.

Средна, максимална и реактивна моќност на наизменичната струја

Преку изразот за моменталната моќност на наизменичната струја (релација 5) може да се пресмета средната моќност и тоа за еден период од осцилирање на струјата и теориските пресметки покажуваат дека:

$$P_{\text{sr}} = I_{\text{ef}} V_{\text{ef}} \cos \varphi \quad (7)$$

Гледаме дека средната моќност за еден период е еднаква всушност на активната моќност. Активната моќност се мери во вати, како и други поголеми единици од ват, мегават, гигават и сл. Вообичаено е под моќност на наизменичната вредност да ја подразбираме оваа активна моќност. Како што се гледа оваа моќност, освен од големините на напонот и јачината на струјата, зависи уште од фазната разлика меѓу напонот и јачината на струјата, поточно од $(\cos \varphi)$. Овој фактор често се вика **коефициент на моќноста**.

Во електротехниката, по аналогија на правата струја се воведува и поим на **вкупна (максимална) моќност S** на наизменичната струја равна на производот од ефективните вредности на напонот и јачината на струјата:

$$S = V_{\text{ef}} I_{\text{ef}} \quad (8)$$

При тоа најчесто индексите не се пишуваат, па е $S = V \cdot I$. За разлика од активната моќност, оваа моќност се мери во единицата волт-ампер (VA).

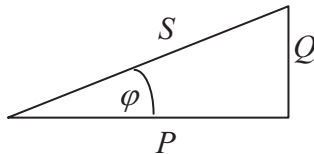
Коефициентот на моќноста покажува кој дел од вкупната моќност е активен. Колку е во колото поголем реактивниот отпор, толку е $\cos \varphi$ помал, и помала е активната моќност.

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

Зголемување на реактивниот отпор значи зголемување на реактивната моќност Q . Тоа значи во векторски дијаграм на моќноста (сл.4), втората компонента на моќноста е **реактивната моќност** дадена со

$$Q = V_{\text{ef}} I_{\text{ef}} \sin \varphi \quad (9)$$

Од дијаграмот е јасно дека $S^2 = P^2 + Q^2$. Реактивната моќност се мери со единицата вар (var).



Сл.4. Векторски дијаграм на моќноста

За мерење на активната моќност постојат инструменти ватметри. Максималната моќност се мери како производ од измерената струја и напон кај наизменичната струја. Коefициентот на моќноста ($\cos \varphi$) е од големо практично значење, кај сите електрични машини и уреди (посебно кај електромоторите) се тежнее тој да има поголема вредност, со што се зголемува коефициентот на полезна дејност на машините.

Пример задача

Во коло со напон 220 V и фреквенција 50 Hz е вклучен калем со индуктивитет $L = 0,127$ H и отпорник со отпор $R = 30 \Omega$. Определете го активниот отпор, импеданцијата, активната и реактивната компонента на напонот, како и активната и реактивната моќност.

Дадено: $V=220$ V; $f=50$ Hz; $L=0,127$ H; $R=30 \Omega$

Решение:

$$R_L = \omega L = 2 \pi \cdot 50 \cdot 0,127 = 39,87 \Omega$$

$$z = \sqrt{R^2 + R_L^2} = \sqrt{900 + 1689,61} \approx 50 \Omega;$$

$$I = \frac{V}{z} = 4,4 \text{ A}; V_a = RI = 132 \text{ V}; V_L = \omega LI = 175,42 \text{ V}$$

$$S = IV = 968 \text{ V A}; P = IV \cos \varphi = 968 \cdot 0,6 \text{ бидејќи } \cos \varphi = P/z = 30/50 = 0,6;$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 774,4 \text{ var}$$

Прашања, задачи, активности

1. Под кој услов може електричната енергија, која во коло со наизменична струја се претвора во топлина да биде еднаква на нула?

2. Што мислите, дали е активната моќност најголема во услови на резонанција на напонот?

Кратко резиме

Кај наизменичната струја разликуваме моментална, максимална и средна моќност. Моменталната моќностна наизменичната струја зависи од тоа каков отпор е вклучен во колото.

Ако во колото е вклучен само омски отпор, моменталната моќност се добива како производ од ефективните вредности на напонот и струјата. Таа е сеогаш позитивна и се менува од вредност 0 до максималната вредност, добиена како производ од амплитудните вредности на напонот и струјата.

Ако во колото е вклучен и реактивен отпор, моќноста е активна и реактивна. Нивниот однос зависи од големината на косинусот на фазната разлика меѓу напонот и струјата.

Средната моќност е еднаква на активната и дадена со: $P_{\text{sr}} = I_{\text{ef}} V_{\text{ef}} \cos \varphi$

Во дијаграмот на моќноста, вкупната моќност е дадена преку активната и реактивната, така што $S^2 = P^2 + Q^2$

10. 6. ТРАНСФОРМАТОРИ

Електромагнетната индукција нашла примена и кај уредите што служат за претворање на високите напони на наизменичната струја во ниски или обратно, од ниски во високи.

Тие уреди се викаат **трансформатори**. Зошто е потребна таквата трансформација и како се градени овие уреди?

Електричната енергија треба да биде пренесувана на големи растојанија од електричните централи до домовите или фабриките. Во тоа е и нејзината основна предност во однос на другите видови енергија. Но, при преносот на енергијата еден нејзин дел се "губи" поради загревањето на спроводниците.

Загубата на енергијата за загревање на спроводниците, во тек на време t , е дадена со релацијата за Џуловата топлина W :

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

$$W = I^2 R t$$

Загревањето на спроводниците е толку поголемо колку што се поголеми отпорот на спроводникот R и јачината на струјата I што тече низ него. Значи, за да се намали загревањето, треба да се намалат отпорот или јачината на струјата. Отпорот може да се намали со зголемување на напречниот пресек на спроводникот. Но, тоа е скапо, а и можно е само на мали растојанија; таквите спроводници би биле со голема маса. Така тој пат на намалување на загубите на енергијата е непогоден. Затоа, при преносот на електричната енергија на поголеми растојанија се оди кон намалување на јачината на електричната струја. Но, при преносот треба да се запази моќноста (сетете се моќноста $P=VI$). Тоа значи дека, за да се намали струјата, треба да се зголеми напонот.

Пример: Една иста моќност од 1000 W може да се добие ако се земе напон од 20 V и јачина на струја од 50 A, или напон од 2000 V и јачина на струја од 0,5 A. Но, имајќи ја предвид релацијата за ослободената топлина, за истиот пример, во вториот случај кога е струјата 100 пати послаба, загубите на енергијата за исто време и ист спроводник се 10 000 пати помали.

Во техниката при пренос на енергијата се користат многу високи напони од 3300 V па и до 400 000 V. Колку се подолги растојанијата толку треба да се повисоки напоните.

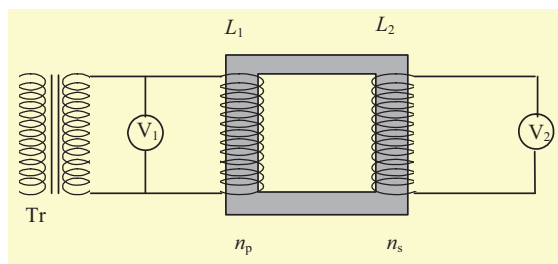
Од друга страна, така високите напони се опасни за живот. Исто така, сите важни технички уреди што ги користиме работат на значително пониски напони. Значи, таквите високонапонски струи треба да се трансформираат во нисконапонски (сл. 1). Понекогаш и во еден ист уред е потребно да се користат различни напони. Во телевизорот, на пример, за напојување на електронската цевка е потребен понизок напон од напонот на неговиот засилувач. Затоа е потребно трансформирање на напонот, а со тоа и трансформирање на струјата.



Сл.1 Трансформаторите ги има во близина на нашите домови. Тие високонапонската слаба струја ја претвораат во нисконапонска појака струја

Трансформаторот работи на принципот на електромагнетна индукција. Тој се состои од две кола - примарно (влезно) кое е поврзано со извор на струја и секундарно (излезно) кое е поврзано со потрошувачот. Примарното и секундарното коло се намотани на заедничко железно јадро (видете ја сликата 2). Јадрото е составено од повеќе тенки железни плочки, залепени меѓусебе со изолатор. Така се избегнува индуцирање на виорни струи во железото, кои само би го загревале јадрото на трансформаторот со што би се губела енергијата.

Кога примарното коло ќе се вклучи на извор на наизменичен напон, низ колото тече струја со синусоидална промена на големината. Поради променливиот карактер на струјата во јадрото се создава променливо магнетно поле. Ова променливо магнетно поле е причина за индуцирање на наизменичен напон во секундарното коло (сл.2).



Сл. 2

Односот помеѓу напонот на примарното коло V_p и напонот на секундарното коло V_s е еднаков на односот помеѓу бројот на

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

навивките n_1 на примарниот калем и бројот на навивките на секундарниот калем n_2 :

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_p}{n_s} \quad (1)$$

Од друга страна, бидејќи може да се смета дека моќноста на примарот $P_p = I_p V_p$ е еднаква со моќноста на секундарот $P_s = I_s V_s$ (ако се занемарат загубите на енергијата), за трансформаторите ќе важат следниве равенства:

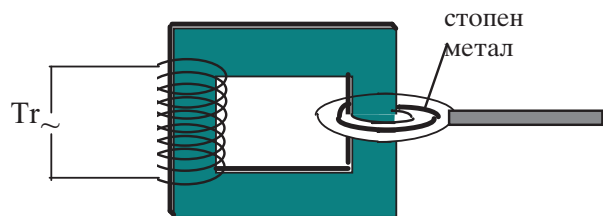
$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_p}{n_s}; \quad I_p V_p = I_s V_s$$

следи

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}; \quad \frac{I_p}{I_s} = \frac{n_s}{n_p} \quad (2)$$

Тоа значи, ако бројот на навивките во примарот е помал од бројот на навивките во секундарот, напонот на примарот се трансформира во повисок напон ($n_p < n_s$ и $V_p < V_s$), но тогаш јачината на струјата во примарот ќе биде појака од струјата во секундарот $I_p > I_s$. Можно е и обратното, напонот со трансформаторот да се намалува, а јачината на струјата да се наголемува. Тоа станува кај трансформаторите кај кои $n_p > n_s$. Трансформирање на струјата е искористено кај некои уреди, како што е уредот за заварување. Ние ќе го демонстрираме со опитот даден на сликата 3.

Примарот на раставливиот трансформатор се поврзува со извор на наизменична струја (реглер трансформатор). Како секундар на трансформаторот е поставена само една метална витка во којашто е поставено малку калај. Бидејќи во секундарното коло се индуцира многу јака струја ($n_s=1$, а $n_p=500$), таа го загрева спроводникот и металот се топи.



Сл. 3

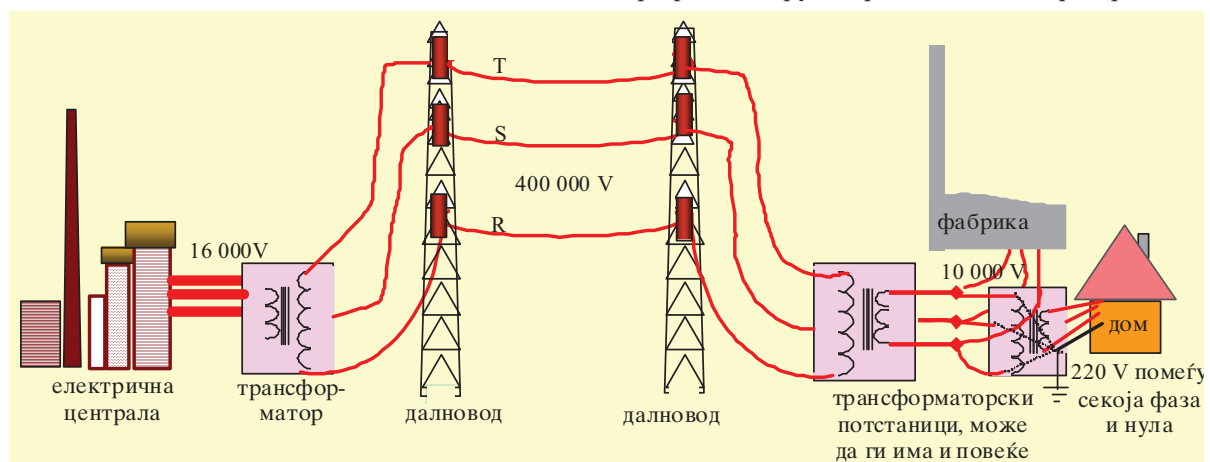
Важна физичка величина кај трансформаторите е коефициентот на полезно дејство (КПД) кој се дефинира како однос меѓу моќноста во секундарот и моќноста во примарното коло, обично искажана во проценти:

$$\text{КПД} = \frac{I_s V_s}{I_p V_p} \cdot 100\% \quad (3)$$

Трансформаторите имаат голем КПД, и до 98%.

Струјата што се добива од електричната централа може неколку пати да се трансформира (слика 5), па потоа да биде користена.

Во денешните центри се генерираат трифазни струи, при што сите три фази се



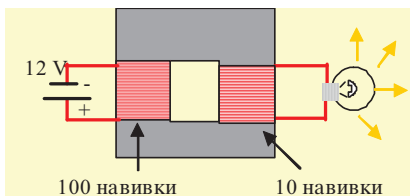
Сл. 4. Шематски приказ на преносот на струјата од централите до потрошувачите

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

трансформираат на погоре опишаниот начин.

Прашања, задачи, активности

1. Колкава струја тече низ светилката на сликата 5? Колкав напон владее на нејзините краеве? Ако светилката има моќност од 10 W, ќе свети ли со полн сјај?



Слика .5

2. Во автомобилите се користат уредите популарно наречени "бобини". Кај нив во примарното коло е вклучен акумулатор (12 V) но и специјален електромагнетен прекинувач кој овозможува постојано прекинување на струјата. Колкав треба да биде бројот на навивките во секундарниот калем за да се овозможи добивање на напон од 12000 V, кој овозможува искрење на "свеќичките" и палење на бензинските пари во моторот?

3. Потребно ви е да користите светилка од 24 V, а имате довод на струја од 120 V и лабораториски напонски претворувач кој претставува вид трансформатор. Каков е односот на бројот на навивките во примарот и секундарот кај ваквиот уред?

5. Еднофазен трансформатор кој во секундарот има 100 навивки вклучен е во мрежа со напон 220 V. Колкав е бројот на навивките во примарот и ЕМС на секундарот, ако коефициентот на трансформацијата е 10.

(Под коефициент на трансформација се подразбира односот меѓу бројот на навивките во секундарот и бројот на навивките во примарот)

(Одг. $N_p = 1000$, $EMC_s = V_c = 22$ V)

Кратко резиме

Трансформаторите се уреди кај кои е искористена појавата електромагнетна индукција.

Трансформаторот се состои од две кола.

Примарно кое е поврзано со извор на наизменичен напон и секундарното во кое, обично се наоѓа потрошувачот. Овие две кола се индуктивно поврзани преку заедничко железно јадро. Промените на струјата во примарот предизвикуваат создавање на променливо магнетно поле, кое се пренесува преку заедничкото јадро и на секундарот во кој се индуцира електромоторна сила според Фарадеевиот закон за електромагнетна индукција.

Односот на напонот на примарот наспроти напонот во секундарот е еднаков на односот меѓу бројот на навивките на примарот и бројот на навивките на секундарот:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

Во трансформаторите се трансформира и јачината на струјата, при што таа е обратнопропорционална со односот на броевите на навивките во примарот и секундарот:

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{n_s}{n_p}$$

КПД на трансформаторот се дефинира како однос меѓу моќноста во секундарот и моќноста во примарното коло, обично искажана во проценти:

$$\text{КПД} = \frac{I_s V_s}{I_p V_p} \cdot 100\%$$

10.7. ЕЛЕКТРИЧНО ОСЦИЛАТОРНО КОЛО. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ ОСЦИЛАЦИИ

Сопствени електромагнетни осцилации

Меѓу разните електрични појави, посебно важно место имаат електромагнетните осцилации, кај кои електромагнетните величини (полнеж, јачина на електрично поле, магнетна индукција и др.) се менуваат временски периодично (по законот на синус).

За подржување на ваквите осцилации потребен е одреден систем кој го викаме **елек-**

трично осцилаторно коло. Тоа е обично коло во кое сериски се поврзани индуктивен, капацитативен и омски отпор (најважни делови се индуктивниот калем и кондензаторот).

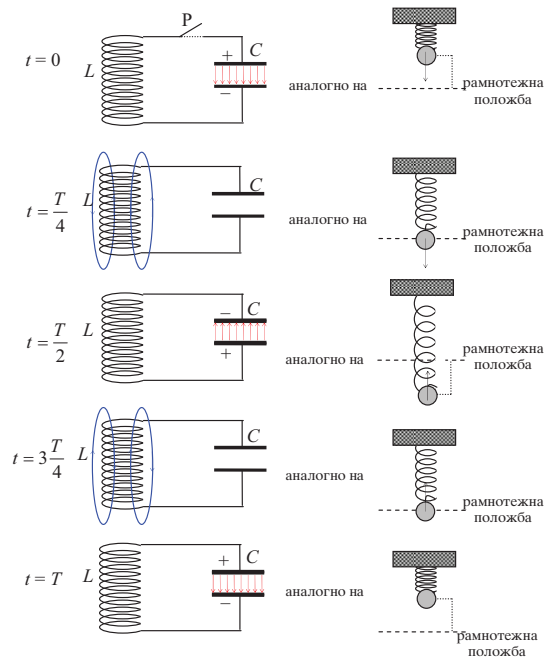
Напоменуваме дека и генераторите на наизменичната струја се, исто така, извори на хармониски осцилации на физичките величини, меѓутоа фреквенциите на овие величини што се создаваат се многу пониски од осцилациите што се добиваат кај идеализираните осцилаторни кола, кај кои се претпоставува дека не постои омски отпор $R \rightarrow 0$. Се разбира оваа претпоставка не е реална, но често во случај кога капацитативниот и индуктивниот отпор се значително поголеми од омскиот, и дадено реално осцилаторно коло може да се смета како идеално.

Што станува во идеалното осцилаторно коло ќе разгледаме преку анализирање на колото составено од набиен кондензатор и индуктивен калем (слика 1). Претпоставуваме дека кондензаторот во почетниот момент ($t=0$) е набиен. Во него постои електрично поле. Состојба е аналогна на една набиена пружина, која има потенцијална енергија.

По вклучувањето на прекинувачот, почнува низ колото да тече струја. Се јавува и магнетно поле, а бидејќи струјата расте се јавува и ЕМС на самоиндукцијата, која се спротиставува на растењето на струјата, односно на порастот на магнетниот флуks на појавеното магнетно поле. Во моментот $t = T/4$, струјата ја достигнала својата максимална вредност, и целата енергија се претворила во енергија на создаденото магнетно поле. Оваа состојба одговара на состојбата на пружината кога таа се наоѓа во рамнотежна положба и има максимална кинетичка енергија.

По постигнатиот максимум, струјата почнува да опаѓа, а ЕМС на самоиндукцијата има таква насока што се стреми да го намали опаѓањето на струјата, па, значи, насоката ѝ е иста како и насоката на првобитната струја. Така, по истекување на време од една половина периода ($t=T/2$), кондензаторот е повторно наелектризиран, меѓу неговите облоги повторно е воспоставено електрично поле, но со спротивен знак. Состојбата е аналогна на пружината кога е таа максимално оптегната и повторно

има максимална потенцијална енергија.



Сл.1.

Процесот повторно тече, но сега во спротивна насока. Пак почнува да тече струја, која создава растечко магнетно поле, на кое му се спротиставува ЕМС на самоиндукцијата, па во моментот $t=3T/4$, струјата го постигнува максимумот, целата енергија е претворена во енергија на магнетното поле. Потоа, поради опаѓањето на струјата се јавува ЕМС на самоиндукцијата која ги враќа полнежите на кондензаторските облоги, и по истекувањето на цела периода се воспоставува состојбата како во почетокот. И процесот се повторува понатаму. Аналогно на осцилирање на пружина, каде што, ако не водиме сметка за загубите на триењето, доаѓа до постојано претворање на механичката потенцијална енергија во кинетичка и обратно, кај идеалното електрично осцилаторно коло доаѓа до постојано претворање на енергија на електричното поле во енергија на магнетното и обратно.

Томсонова релација

Како што покажува теоријата, периодот на осцилирање во идеалното осцилаторно коло ($R \rightarrow 0$) се определува со условот на еднаквоста

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

на реактивните отпори на соленоидот и кондензаторот:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} ; \Rightarrow \quad \omega^2 = \frac{1}{LC} \quad (1)$$

Фреквенцијата ω обично ја бележиме со ω_0 и ја викаме *сопствена кружна фреквенција* на осцилаторното коло, е според познатата врска со периодот и фреквенцијата дадена со:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = 2\pi f_0 \quad (2)$$

за *сопствениот период* T_0 , односно *сопствената фреквенција* f_0 , преку $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$; добиваме:

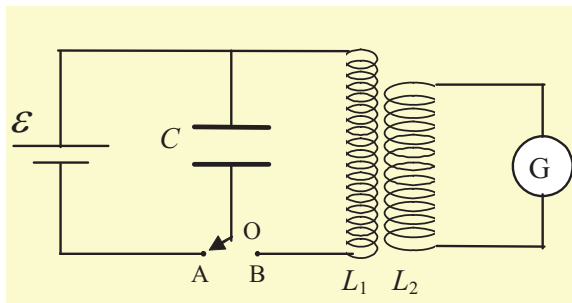
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} ; \quad T_0 = 2\pi\sqrt{LC} \quad (3)$$

Формулата (3) е позната во физиката како **Томсонова релација за сопствената фреквенција (периодот) на осцилаторното коло.**

Од оваа равенка е видливо, дека при доволно мали вредности на индуктивитетот и капацитетот во дадено осцилаторно коло може да се добијат осцилации со високи фреквенции, од милиони херци и поголеми.

Експеримент. За да може да се демонстрираат слободните електрични осцилации потребно е да се оформи електрично осцилаторно коло со мала сопствена фреквенција и по можност што помало придушување.

Шемата дадена на сликата 2 може да го овозможи тоа.



Сл. 2. Добивање слободни електрични осцилации

Во шемата осцилаторното коло се состои од кондензатор, кој е добиен кога 3 кондензатори

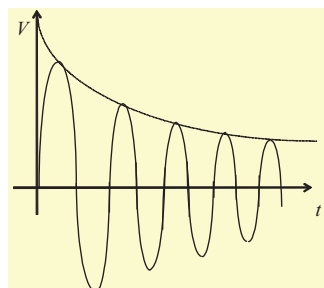
од по 58 μF ќе се поврзат паралелно и калем со голем индуктивитет L (2400 навивки). Така, ова осцилаторно коло овозможува добивање осцилации со голем период T , т. е. со мала фреквенција.

Осцилирањето се добива на тој начин што кондензаторот C се поврзува со изворот на прав напон од 40 до 50 V. Калемот L_1 е поврзан индуктивно со втор калем со мал број на навивки L_2 , така што осцилациите во примарното коло се претвораат во осцилации на струја во секундарното коло со ист период како и периодот на примарното коло. Тој период е релативно голем, споредлив со периодот на сопствените осцилации на сказалката на галванометарот G .

Во услови кога овие периоди би биле еднакви, би настанала резонанција, со што сказалката на инструментот максимално би ги прифатила осцилациите на осцилаторното коло. За да се постигне таква резонанција треба да се прават повеќе комбинации на капацитативниот и индуктивниот отпор во примарот. Кога ќе се дотера електричните осцилации на примарот да се со фреквенција блиска до механичките осцилации на галванометарот, се покажува дека при префрлањето на преклопникот во положба B , сказалката на галванометарот осцилира. Осцилирањето станува со се помали амплитуди, значи тоа е реален експеримент и доаѓа до придушување.

Придушени осцилации

Осцилациите од претходниот експеримент се придушени, не е можно сосема да се елиминира омскиот отпор. Амплитудите на осцилирањето на галванометарот се сè помали.

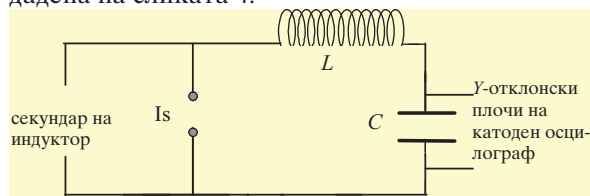


Сл. 3.

Ако сакаме да го добиеме карактеристичниот

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

осцилограм за придушените осцилации (слика 3), тогаш се прави експериментална шема дадена на сликата 4.

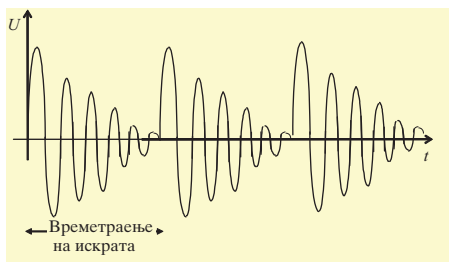


Сл. 4

Со оваа шема, полнењето на кондензаторот се врши со помош на секундарот на даден индуктор. Во шемата е поврзано и искриште I_s , и индуктивна навивка L .

Падот на напонот на кондензаторот се носи на Y -отклонски плочки на катодниот осцилограф. Секоја искра претставува затворање на струјното коло, при што се добиваат осцилации со висока фреквенција.

Сликата што се добива на екранот претставува низа од повеќе придушени осцилограми, кои настануваат во текот на времетраењето на искрата (слика5).



Сл.5

Јасно е дека штом е поголем омскиот отпор во дадено осцилаторно коло, така придушувањето полесно настанува.

Прашања, задачи, активности

1. Од кои елементи се состои наједноставното електрично осцилаторно коло?
2. Од што зависи сопствената фреквенција на електричното осцилаторно коло? Како таа ќе стане повисока?
3. Кондензатор со капацитет 1200 pF е наелектризиран со батерија до напон од 500 V. Во моментот $t = 0$, се прекинува контактот со батеријата, а кондензаторот се поврзува со калем со индуктивитет 75 mH. Да се определи а) почетниот полнеж на кондензаторот; б)

фреквенцијата и периодот на осцилирањето во колото; (Помош:а) Полнежот го определувате преку врска меѓу капацитетот,напонот и полнежот – одг. $6 \cdot 10^{-7}$ C. б) Употребете ја Томсоновата релација –Одг. $f=17$ kHz)

Кратко резиме

Електромагнетни осцилации настануваат во коло во кое покрај омски отпор се вклучени кондензатор и калем.

Идеално електрично осцилаторно коло е коло со занемарлив омски отпор.

Кај идеалното осцилаторно коло постојано доаѓа до претворба на енергијата; од електрична меѓу кондензаторските облоги во магнетна која се создава во калемот.

Реалните електрични осцилаторни кола создаваат придушени електрични осцилации.

Сопствениот период T_0 (односно сопствената фреквенција f_0 на електричното осцилаторно коло) се определува со индуктивитетот L и капацитетот C во колото и се пресметува според Томсонова релација

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad T_0 = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Ако во едно коло со наполнет кондензатор до напони при кои прескокнува искра, се поврзе искриште, при секоја искра настануваат придушени електрични осцилации.

10.8. ДОБИВАЊЕ НА НЕПРИДУШЕНИ ЕЛЕКТРИЧНИ ОСЦИЛАЦИИ. ОТВОРЕНО ОСЦИЛАТОРНО КОЛО

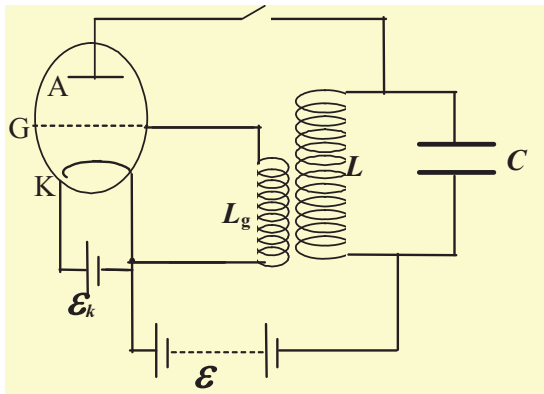
Ламбов генератор

Добивањето на непридушените електрични осцилации се реализира со помош на ламбов генератор. Генераторот што се користи претставува двотриоден ламбов генератор. Принципно шема на ламбовиот генератор е дадена на сликата 1.

Осцилаторното коло $L - C$ е вклучено во анодното коло на триодата, а во решеткиното коло е вклучен калемот L_g кој е во индуктивна врска со калемот на $L-C$ колото. (Напомена: индуктивна врска значи дека имаат заедничко

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

магнетно поле, или заедничко јадро, или се вметнати еден во друг)



Сл.1

Така, овој калем L_g всушност ја претставува т. н. *обратната врска* за осцилаторното коло.

Променливиот решеткин напон предизвикува променлива анодна струја со фреквенција иста, како што е фреквенцијата на L - C колото. Бидејќи фазата на осцилациите се дотерува да биде синхронизирана со фазата на осцилаторното коло, загубената енергија се надополнува на сметка на енергијата на анодната батерија.

Ваквиот ламбов генератор создава електрични осцилации со постојана амплитуда - непридушени осцилации, чијашто струја се менува според законот

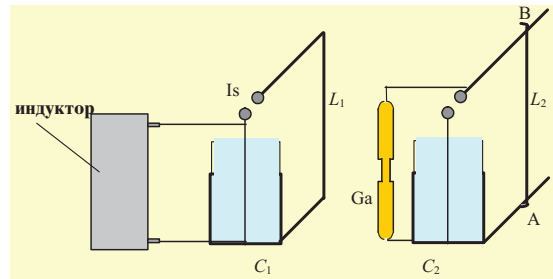
$$I = I_0 \sin \omega t \quad (1)$$

Ваквите осцилации понатаму, преку резонанција со друго отворено осцилаторно претставуваат извор на бранови, познати како електромагнетни бранови.

Резонанција кај електричните осцилаторни кола

Како и другите видови осцилатори, и електричните осцилаторни кола, ја пренесуваат својата енергија од едно на друго преку присилени осцилации, поточно преку појавата резонанција.

Појавата може експериментално да се покаже со Лоцовиот опит. Опитот се реализира доста едноставно.



Сл.2

Треба да се состават две осцилаторни кола и да се постават на извесно растојание. Првото осцилаторно коло претставува лајденска чаша C_1 , поврзана со една жица со извесен индуктивитет L_1 . На облогите на лајденската чаша е поврзан извор на струја (индуктор). Ова коло ќе го викаме осцилатор, а колото во кое не постои извор на струја - резонатор (види ја сликата 2).

Во резонаторското коло, составено од лајденска чаша C_2 и жица, преку движење на спроводникот АВ може да се менува индуктивитетот L_2 .

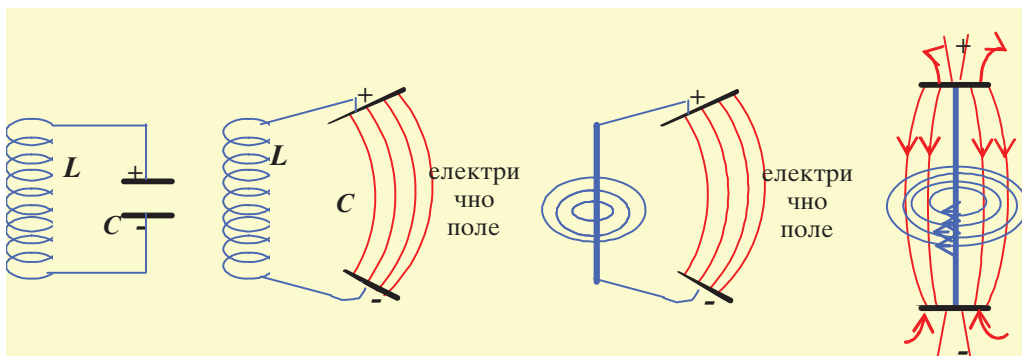
Штом осцилаторот ќе се побуди да осцилира, со поврзување на облогите на неговата лајденска чаша со секундарот на индукторот, преку искриштето I_s доаѓа до наизменично периодично празнење и полнење на кондензаторот. Ако двете осцилаторни кола се поставени паралелно еден наспрема друг доаѓа до побудување на резонаторот на осцилирање. Со менување на должината на жицата во резонантното коло, што се прави со поместување на спроводникот АВ, се менува неговиот индуктивитет, и во услови кога ќе дојде до израмнување на сопствените фреквенции на двете кола, резонаторот ќе почне да осцилира со максимални амплитуди. Ова ќе се манифестира така, што Гајслеровата цевка, поставена меѓу облогите на кондензаторот C_2 , ќе засвети со максимален интензитет. Дури и мали отстапувања од условот:

$$\begin{aligned} T_1 = T_2 \quad ; \quad T_1 &= 2\pi\sqrt{L_1 C_1} \quad ; \\ T_2 &= 2\pi\sqrt{L_2 C_2} \quad \Rightarrow \quad L_1 C_1 = L_2 C_2 \end{aligned} \quad (2)$$

ќе придонесат светењето на Гајслеровата ламба да престане.

Отворени осцилаторни кола. Антена

Се покажало дека фреквенцијата на осцилаторното коло може да се зголеми со намалување на капацитетот на кондензаторот и со намалување на бројот на навивките во калемот, како и на нивната густина на мотањето. Тоа се постигнува кај **отворените осцилаторни кола** (сл. 3).



Сл. 3 Шематски приказ како од затворено осцилаторно коло се добива антена

Со поместувањето на плочите на кондензаторот електричното поле зафаќа сè поголем простор. Се создава отворено електрично осцилаторно коло.

Ваквото отворено осцилаторно коло претставува **антена**. По воспоставувањето на ваквото отворено коло, процесот на создавање на електрично и магнетно поле е идентичен како и кај затвореното коло. Затоа, вака создаденото поле се вика **електромагнетно поле**. Тоа се шири во просторот во вид на **електромагнетен бран**.

Бидејќи променлива струја значи променливо движење на полнежи, значи секаде каде што постои променливо движење доаѓа до создавање на променливо магнетно поле.

Ова поле, според Фарадеј и Максвел, значи индуцирање на променливо електрично поле, поточно извор на електромагнетен бран.

Ова укажува дека извор на електромагнетно зрачење може да биде каква и да било струја, поточно променливо движење на полнежи.

Како извор на електромагнетни бранови, покрај електрични осцилаторни кола може да бидат движењата на полнежите во атомот, односно во атомското јадро. Во таа смисла електромагнетното зрачење опфаќа широк

спектар на појави, со кои ние секојдневно се среќаваме.

Прашања, задачи, активности

1. Како се добиваат непридушени електрични осцилации?
2. Кој е основниот услов меѓу две осцилаторни електрични кола да настане резонанција?

Кратко резиме

За реализација на непридушени електрични осцилации потребно е на електричното осцилаторно коло да му се додава енергија, тоа се постигнува со лампов осцилатор.

Основен услов за резонанција на кола е производот од индуктивитетот и капацитетот на осцилаторот да е еднаков со таков производ на резонаторот.

Извор на електромагнетен бран е антената.

10.9. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ БРАНОВИ

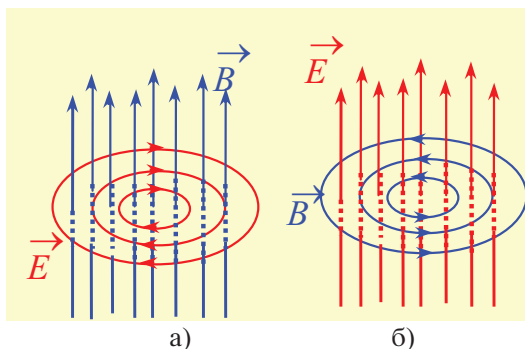
Врска помеѓу променливите магнетни и променливите електрични полиња

При изучувањето на појавата електромагнетна индукција, одделот “виорни струи” беше покажано дека *секаква временска промена на магнетното поле доведува до индуцирање на променливо виорно електрично поле*. Значи при временска промена на магнетната индукција \vec{B} се јавува електрично поле, чие што силини линии ги опфаќаат линиите на магнетната индукција (видете ја сл.1). Колку е побрза промената на магнетната индукција

толку е појака виорната струја, која е последица на променливото електрично виорно поле. Согласно со Ленцовото правило при растењето на магнетната индукција виорните струи се спротивставуваат на растењето, тоа значи дека виорното електрично поле ќе има насока спротивна од правилото кое важи за магнетен лист (правило на свиените прсти на десната рака), и ќе се повинува на правилото на свиените прсти на левата рака во однос на \vec{B} .

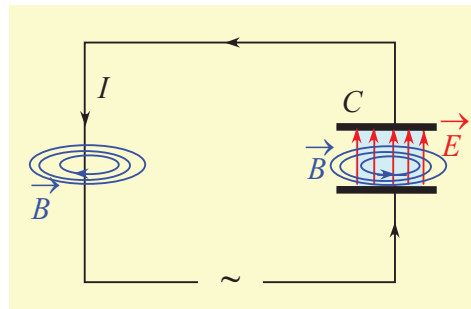
Сфаќањата на Мајкл Фарадеј, во 60-тите години на XIX век ги проширува Џејмс Кларк Максвел. Имено, Максвел претпоставил дека и во сите случаи кога електричното поле се менува во текот на времето, тоа околу себе создава магнетно поле. Магнетните силиви линии на тоа поле ги опфаќаат силивите линии на електричното поле (сл. 1б). Насоката на линиите на магнетната индукција, при растењето на електричното поле се повинува на правилото на десен винт, во однос на векторот \vec{E} . Оваа идеја, која произлегува од увереноста за единството во природата, и хармонијата на природните закони ја прави основата на Максвеловата теорија.

Согласно хипотезата на Максвел, ако имаме променливо електрично поле помеѓу плочите на даден кондензатор, тогаш тоа електрично поле се однесува како еден вид струја која тој ја нарекол **привидна**. Таа создава магнетно поле исто како што тоа станува во



Сл. 1. а) Магнетната индукција \vec{B} расте б) Јачината на електричното поле \vec{E} расте

спроводникот (сл. 2).



Сл. 2. Променливо електрично поле се однесува исто како да меѓу кондензаторските облоги тече струја со иста јачина како и низ спроводникот

Максвеловата теорија била докажана со експериментално добивање на електромагнетни бранови. Електромагнетни бранови се создаваат токму поради тоа што променливо магнетно поле создава променливо електрично поле кое, понатаму, создава променливо магнетно поле. Тоа значи дека меѓу променливото електрично и магнетно поле постои нераскинлива врска и дека тие не можат да постојат едно без друго. Тоа единствено поле го викаме **електромагнетно поле**.

Како се создава и простира електромагнетен бран ?

Ако во близина автоосцилаторен систем (систем со лампов осцилатор), обработен во претходната лекција) се донесе отворен осцилаторен систем (антена) со иста, или приближно иста сопствена фреквенција, како што знаеме, настанува појавата резонанција и во антената се побудуваат хармониски синусоидални струи. Побудувањето осцилации долж антената, всушност претставуваат создавање на стоен бран во спроводникот. И ако од двете страни антената е отворена тогаш брановата должина на стојниот бран зависи од неговата должина L и слично на стојниот механички бран кај жица, за можните бранови должини кои се побудуваат во антената треба да биде исполнет условот:

$$L = m \frac{\lambda}{2} \quad \text{каде што } m = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Фреквенцијата пак на стојните бранови f во

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

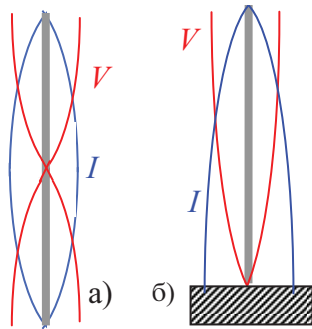
антената е определена со релацијата:

$$f = \frac{v}{\lambda} = m \frac{v}{2L} \quad ;$$

$$(m = 1, 2, 3..)$$

(2)

каде што v е брзината на ширењето на импулсот во антената.



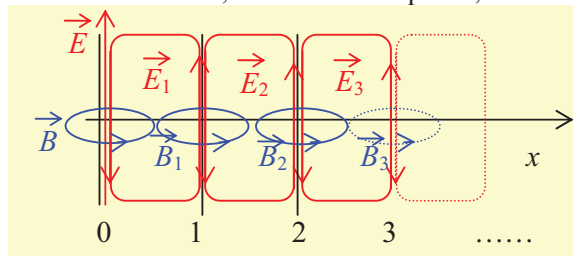
Сл. 3

Стојниот бран што одгова на $m = 1$ е основна осцилација на вибраторот.

Распределбата на амплитудите на осцилирање на јачината на струјата и напонот кај основната осцилација дадена е на сликата 3а,

На сликата 3б е прикажана заземјена антена. На местото на заземјувањето тогаш ќе се појави јазол на напонот, а мев на струјата. Од сликата е јасно дека при заземјувањето на антената брановата должина на неговата основна осцилација е два пати поголема, а тоа значи фреквенцијата се намалува два пати.

Ќе проследиме како доаѓа до ширење на бранот во просторот (сл.4). Нека на местото означено со 0 претпоставиме поставена антена, во која, поради променливиот напон се создава електрично поле \vec{E} кое во даден момент расте. Тоа поле создава околу себе магнетно поле \vec{B} , кое исто така расте,

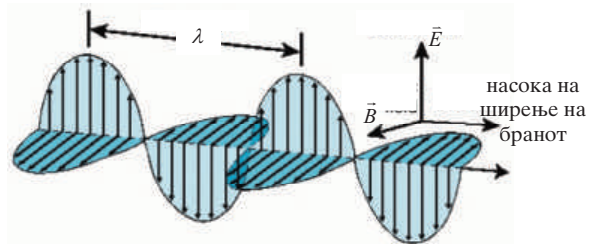


Сл. 4

Но, според Ленц во просторот во кој полето расте се создава индуцирано виорно поле \vec{E}_1 кое се спротивставува на растењето на магнетното поле, па затоа силовите линии

на местото 0 ќе имаат спротивен знак, полето на местото 0 ќе го снеса но ќе се појави електрично поле кое расте на местото 1. Сега ова поле \vec{E}_1 , создава околу себе магнетно поле \vec{B}_1 кое расте. Ова поле индуцира електрично виорно поле \vec{E}_2 кое се спротивставува на растењето, и кое го поништува осцилирањето во положбата 1, а се појавува на местото 2. Така понатаму во насока од 0 кон x доаѓа до ширење на бран кој е севкупност на осцилациите на електричното и магнетното поле, електромагнетен бран. Се разбира бранот може да се простира и во спротивна насока, поточно во сите можни насоки. Местоположбите на точките 0, 1, 2, 3 ... се многу, многу блиски така што низ просторот од изворот на осцилирањето, антената, се пренесува електромагнетен бран, чиј "ментале изглед" е даден на сликата 8.8.5. Во секоја точка од просторот електричното и магнетното поле се менуваат периодично хармониски во зависност од времето. Колку е подалеку точката од изворот толку подоцна започнува осцилирањето на електричното и магнетното поле. Тоа укажува на тоа дека во различните точки од просторот осцилациите се со различна фаза.

Ние овде проучивме дека извор на електромагнетен бран беше антената во која струјата се менува периодично. Бидејќи течење на струја значи движење на полнежи, тоа кај антената електромагнетен бран настанува поради промена на брзината на полнежите.



Сл. 5.

Главен услов за создавање на електромагнетен бран е постоење на забрзувањето на полнежите.

Како што се гледа од сликата 5 векторите \vec{E}

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

и \vec{B} осцилираат во меѓусебно нормални рамнини и нормално на насоката на ширењето на бранот. Значи **електромагнетните бранови се трансверзални**. Ако се искористи правилото на десниот винт, и вртењето се прави од \vec{E} кон \vec{B} , одот на винтот се поклопува со насоката на ширењето на бранот - векторот на брзината \vec{v} .

Многу од последиците на Максвеловата теорија за електромагнетни бранови се многу важни и за нив ќе зборуваме пошироко. Но, од особено значење на оваа теорија е следново:

-електромагнетните бранови се простираат и во вакуум и во материјални средини. Брзината со која тие се простираат е конечна и во вакуум еднаква на брзината на светлината c :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3)$$

каде што ϵ_0 е електрична, а μ_0 магнетна константа, уште познати како диелектрична константа и магнетна пермеабилност во вакуум.

Прашања, задачи, активности

1. Како во просторот може да се појави магнетно поле?
2. Дали електрон што се движи по кружница претставува извор на електромагнетен бран?
3. Ако наелектризирана прачка ја движиме лево десно, дали таа е извор на електромагнетен бран?
4. Дали наелектризирана топка поставена врз изолатор е извор на електромагнетни бранови?

4. Побарајте на интернет веб страница:

[Propagation of Electromagnetic Wave](http://www.phy.ntnu.edu.tw/~hwang/emWave/emWave.html)

www.phy.ntnu.edu.tw/~hwang/emWave/emWave.html - 4к и други слични линкови, со симулации и анимации.

5. Побарајте видео филм на Youtube.com со назив **PHYS 101/102 #1: Electromagnetic Waves** на кој се филмувани повеќе демонстрации поврзани со

електрични осцилаторни кола, резонанција и електромагнетни бранови.

Кратко резиме

Извор на електромагнетен бран е антената.

Во антената се создава стоен бран. Мехови на напонот на основниот стоен бран се на краевите на една слободна антена, а мехови на струјата се во средината на антената.

Електромагнетен бран се шири во просторот така што доаѓа до заемнопостоење и на осцилациите на јачината на електричното поле и на магнетната индукција. При тоа тие осцилираат во две заемно нормални рамнини, нормални на правецот на ширењето на бранот. Електромагнетни бранови се трансверзални бранови, тие се шират во вакуум и во диелектрици.

Брзината на ширење на електромагнетните бранови во вакуум е иста со брзината на ширење на светлината и е определена со релацијата : $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ каде што ϵ_0 е

електрична, а μ_0 магнетна константа.

10. 10. СВОЈСТВА НА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИТЕ БРАНОВИ. ХЕРЦОВИ ЕКСПЕРИМЕНТИ

Херцови опити

Максвел ја развил својата теорија и бил длабоко убеден во постоењето на електромагнетните бранови. Но тој не ја потврдил својата теорија и експериментално. Дури 10 години по неговата смрт во 1886 година Хајнрих Херц експериментално потврдил постоењето на електромагнетните бранови и го проучил нивните основни својства.

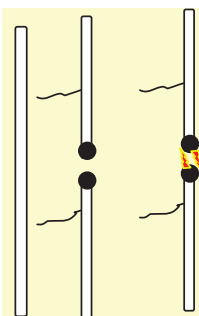
За добивањето на електромагнетните бранови Херц користел отворена осцилаторна контура – антена. Тој антената ја пресекол на половина, така што помеѓу двете половини бил мал воздушен меѓупростор (сл. 1). Кога двата дела од спроводникот ќе се поврзат со извор на висок напон, при определена големина на напонот помеѓу двете половинки ќе прескокне

искра. Тогаш, всушност, осцилаторното коло се затвора и во просторот околу вибраторот се простираат електромагнетни бранови. Вака добиените електромагнетни бранови биле придушени, и тоа од две причини :

- прво поради постоење на омски отпор во осцилаторот, и

- второ, поради тоа што осцилаторот

зрачи електромагнетни бранови и со тоа неговата енергија се намалува. Откако сосема ќе се намали енергијата, искрата се прекинува, но двата спроводника повторно се електризираат до високитот напон на пробив на искрата, и сè се повторува одново.



Сл.1

Електромагнетниот бран што се создава се простира така што електричното поле осцилира во рамнината на антената, а магнетното во рамнина нормална на таа. Најинтензивно е зрачењето во насока нормална на антената, додека во насока на антената не доаѓа до создавање на бран.

Денес, како што веќе кажавме антените зрачат електромагнетни бранови така што по пат на резонанција добиваат енергија од затворени и автоосцилаторни кола.

Како регистратор на постоење на електромагнетните бранови, Херц конструирал примен вибратор кој имал иста конструкција како и емисионен. И кога до ваков вибратор ќе дојде електромагнетен бран, под влијание на електричното поле, во спроводникот ќе се јави струја. Ако се подеси сопствената фреквенција на приемната антена да е еднаква со фреквенцијата на емисионата, побудените осцилации ќе бидат со голема амплитуда. Херц тој факт го набљудувал со добивање на искра во меѓупросторот на приемната антена.

Покрај тоа што ги добил електромагнетните бранови, Херц покажал дека тие ги имаат истите својства како и другите видови бранови. метална средина, доаѓа до појава на стојни електромагнетни бранови, а со мерење на меѓурастојание помеѓу два јазла тој успеал да ја измери брановата должина на бранот.

Брановата должина на Херцовите бранови

изнесувала неколку сантиметра. Со познавање Херц покажал дека брзината на простирање на електромагнетните бранови изнесува

$c = 300000 \text{ km/s}$, исто колку и брзината на простирање на светлината. Брзината на простирање во која било друга диелектрична средина, зависи од нејзините својства (релативната диелектрична константа ϵ_r и релативната магнетна пермеабилност μ_r) и е помала од таа во вакуум и изнесува:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n} \quad \text{или}$$

$$v \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \Rightarrow n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

каде што со n сме го означиле **индексот на прекршување** за дадената диелектрична средина.

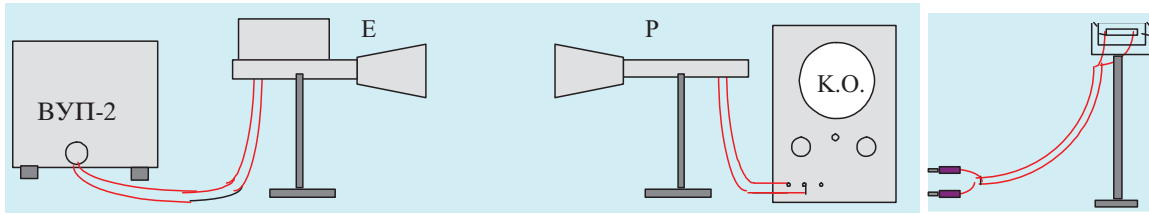
Демонстрирање на својствата на електромагнетните бранови (ЕМБ) со помош на генератор на сантиметарски бранови

Изучувањето на својствата на електромагнетните бранови денес се прави со помош на клистронски генератор на центиметарски бранови ($\lambda=3 \text{ cm}$). Уредот (слика 2) се состои од предавател со емитирачка антена Е, приемник со диполна приемна антена Р, катоден осцилограф, или нискофреквентен засилувач и микрофон, а може за некои опити да послужи и електричен инструмент - волтметар

Покрај ова, придружни делови на уредот се: специјален исправувач ВУП-2, едно тело со форма на квадар од диелектрик, диелектрична призма, диелектрична леќа, алуминиумски екран, решетка што може да се постави во насока на електричниот вектор (насока на емитирачкиот вибратор) или нормално на него. За некои експерименти може да се користи и полупроводничка диода (слика 2 а)

Генераторот на сантиметарските бранови е конструиран врз принципот на работа на клистронот (тоа е специјален вакуум-уред кој генерира осцилации во областа на високите фреквенции). Високата фреквенција на клистронот, амплитудно се модулира од ламбов мултивибратор (сè е затворено во корпусот на емитерот Е). Таквиот генератор емитира електромагнетни бранови со фреквенција околу 500 Hz. Клистронскиот генератор и мултивибраторот се поставени на едниот крај на правоаголниот брановод на чиј што друг крај е поставена емитирачката антена која зрачи насочено.

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја



Сл. 2

Сл.2а

Генераторот се напојува со специјален исправувач, со помош на специјален контакт. Внимавајте при спојувањето на овој контакт! Треба да се вклучат соодветните ознаки на контактниот штекер.

Приемната антена Р исто така е поставена во пирамидален оклоп. Таа претставува детектор, многу квалитетна диода, споена со соодветен брановод и гајтан за спојување, или со засилувач и микрофон, или со отклонски плочички од катодниот осцилограф.

Во некои од експериментите е погодно да се користи приемната диода дадена на сликата .2 а.

ЕМБ низ спроводна и диелектрична средина

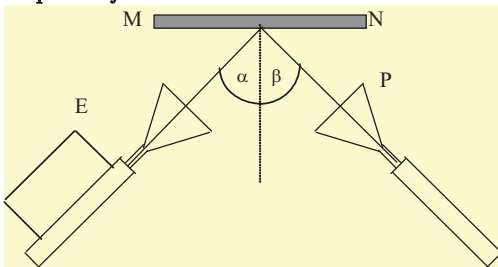
Првото својство на електромагнетните бранови е тоа дека тие не поминуваат низ спроводни средини.

За таа цел, меѓу емитирачката и приемната антена, кои се поставени една наспроти друга, се поставува плоча од метал. Сигналот, регистриран или со катодниот осцилограф, или со звучник преку засилувач, ќе го снима.

Ако претходниот експеримент се повтори, но така што наместо метална плоча ќе се употреби диелектрик, ќе се покаже дека електромагнетните бранови поминуваат низ него, но доаѓа до намалување на нивниот интензитет. Тие се придушваат. Ова го регистрира катодниот осцилограф со намалувањето на амплитудата, а ако како регистратор го користиме звучникот, тогаш интензитетот на звукот се намалува.

Потоа се демонстрираат другите својства на електромагнетните бранови.

Рефлексија на ЕМБ



Сл.3

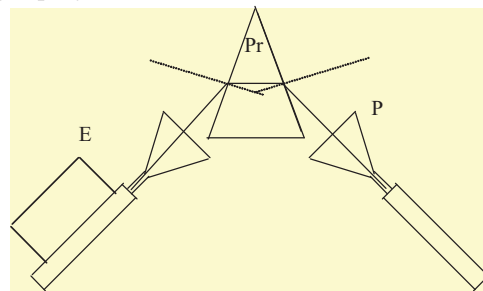
Електромагнетните бранови се рефлектираат според законите за рефлексија на светлината.

За да може ова да го демонстрираме, ги

поставуваме предавателната и приемната антена под агол (слика.3).

На патот на зраците ја поставуваме металната плочка MN. Бидејќи насоченоста на двете антени не е еднаква, сигналот што го фаќа приемната антена нема да се добива. Во услови кога ќе погодиме упадниот агол α на зракот да е еднаков на рефлектираниот β , тогаш сигналот повторно ќе се јави .

Прекршување на ЕМБ

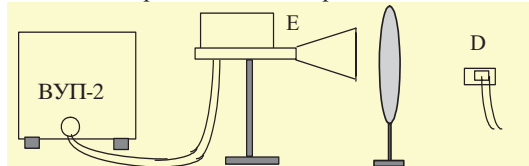


Сл.4.

Ги поставуваме приемната и емитирачката антена под агол една во однос на друга, како и во претходниот експеримент. Сигналот нема да постои. Ако на патот на зракот од емитирачката антена се постави призма Pr од диелектрик, тогаш, после прекршувањето низ призмата кон нејзиниот поширок дел, сигналот повторно ќе се јави (види слика 4.

Може да се покаже и прекршување низ планпаралелна диелектрична плочка. Планпаралелната диелектрична плочка се поставува косо меѓу приемната и емитирачката антена.

Сигналот се добива тогаш, кога зраците поминуваат пат кој би одговарал на прекршување на светлинските зраци низ планпаралелната плочка.



Сл..5

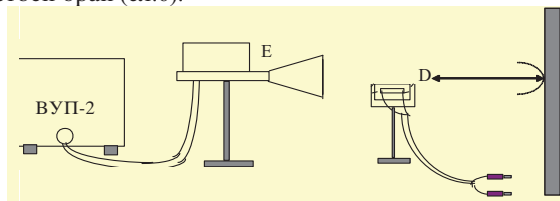
Леќа направена од диелектрик се поставува пред емитирачката антена (сл..5). Таа ги фокусира

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

електромагнетните бранови во една точка. Ако во таа точка се донесе диодата, дадена на сликата 9а, ќе се добие засилен сигнал.

Интерференција на ЕМБ

Ако на растојание од 1 до 1,5 метра се постави метална плочка, електромагнетните бранови емитирани од емитирачката антена се рефлектираат од неа и интерферираат, создавајќи стоен бран (сл.6).



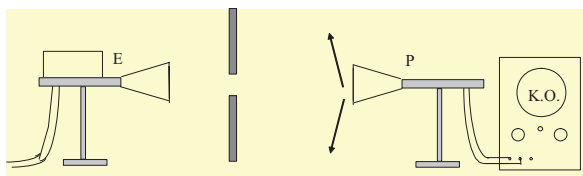
Сл.6

Ако диодата D ја движиме во просторот меѓу плочата и антената, може да се покаже дека на одредени места постојат мегови (засилување на сигналот) или јазли (слабење, дури и губење, на сигналот).

Со овој експеримент се демонстрира добивањето на стојните електромагнетни бранови, што, всушност, претставува специјален вид на интерференција на бранови кои се движат во спротивни насоки.

Дифракција на ЕМБ

И појавата дифракција на електромагнетните бранови може да се демонстрира со оваа апаратура. За таа цел меѓу емитирачката и приемната антена се поставува метална плочка со пукнатина од околу 2-3 cm (слика 7).



Сл.7

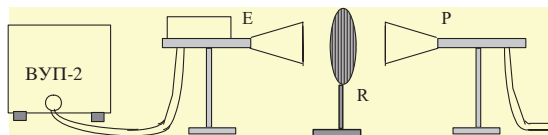
Се покажува дека лево и десно од пукнатината доаѓа до создавање максимуми на зрачење.

Внимание! Оската на приемната антена треба да се постави во насока на радиусот на кружницата со центар во средината на пукнатината!

Електромагнетните бранови се поларизирани

Како што веќе покажавме електромагнетните бранови се исклучиво трансверзални бранови, поларизирани така, што електричниот вектор осцилира во рамнината на оската на емитирачката антена, а векторот на магнетната индукција - во

рамнина што е нормална на неа. Овој факт се демонстрира со помош на решетка R која има повеќе паралелни метални спроводници поставени паралелно едни на други (види ја сл. 8).



Сл. 8

Кога спроводниците на решетката се поставени паралелно на векторот на јачината на електричното поле, тогаш во нив се индуцираат спроводни струи, и енергијата на електромагнетниот бран се претвора во топлинска внатрешна енергија на спроводниците. Во овој случај, приемната антена нема да прима сигнал.

Спротивно на тоа, кога паралелните решеткени спроводници се поставени нормално на рамнината на осцилирањето на електричниот вектор, струите што се индуцираат се многу слаби и сигналот не се појавува.

Прашања задачи активности

1. Што претставува фундаментален извор на електромагнетните бранови?
2. Дали жица споена во електрично коло со извор-батерија е извор на електромагнетен бран? Објасни.
3. Ако го наелектризираме чешелот со чешлање на вашата коса па потоа него го држите до прачкест магнет, дали електричното и магнетното поле ќе создадат електромагнетно поле? Објасни.
4. Посочете ги сите сличности и сите разлики помеѓу звучните и електромагнетните бранови.
5. Кога еден електромагнетен бран поминува низ некој регион, што е тоа што се движи ?

Кратко резиме

Електромагнетните бранови се шират во вакуум и во диелектрични средини. При премин низ спроводничка средина веднаш се придушуваат.

Електромагнетните бранови ги имаат сите особини на механичките бранови:

- се рефлектираат и прекршуваат според законите за рефлексија на брановите;
- пројавуваат појава на интерференција и на дифракција исто како и другите видови бранови;
- тие се трансверзални поларизирани бранови, Векторите на електричното и на магнетното поле осцилираат во рамнината во која е поставена антената од која се емитираат.

10.11. РАДИОТРАНСМИСИЈА



Од телевизиското студио вестите одат во живо и едновремено можат да ги гледаат гледачите од целата Земјина топка. Денешницата не може веќе да се замисли без телекомуникациите на денешното развојно ниво. Радиото, телевизијата, сателитскиот пренос на информации, интернетот, мобилните телефони па и ГПС (глобалниот позиционирачки систем).

Развојот на телекомуникациите обезбедува зближување на човек со човека, зголемување на информираноста за случувањата во светот, достапност на информациите од целиот свет, достапност на светската литература и сознанијата преку интернетот во вашите домови. Телекомуникациите се оние што постепено го претвораат светот во едно “глобално село”.

Телекомуникациите, воопшто, претставуваат пренесување на информации (слика или звук) на далечина по жичен или по безжичен пат (со помош на електромагнетни бранови).

Елементи на радиотехниката

Искористувањето на радиобрановите за пренос на информации по безжичен пат започнало на почетокот на XX-от век, откако Флеминг ја изумил вакуумската диода и,

подоцна, Ли Де Форест ја изумил триодата. Развојот на оваа техничка дисциплина до ден денешен е интензивен и, главно, е условен од напредокот во физиката на полупроводниците и микроелектрониката.

Радиотехниката се заснива на произведување, емитување и прием на радиобрановите. Неопходно е проучување и на условите и начинот на простирање на радиобрановите.

Имињата на пронаоѓачите Попов и Маркони се поврзани со првата успешна примена на електромагнетските бранови за пренос на информации. Многу значителен придонес дал и научникот Никола Тесла.

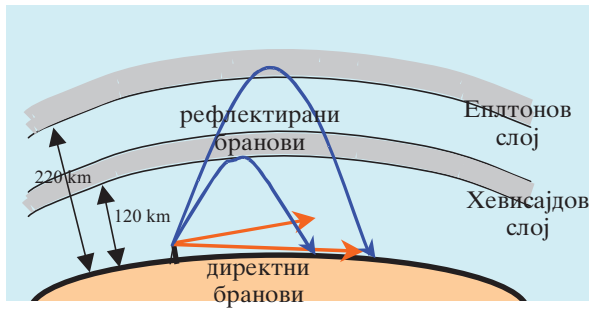
За одржување на радиоврските неопходно е постоење на предавател и приемник. Предавателот се состои од уред што произведува синусни електромагнетни осцилации (осцилатор), модулатор, засилувач и предавателска антена. Антената претставува метален спроводник што е приклучен на засилувачот во кој се побудуваат електрични осцилации со голема моќност при што настануваат електромагнетски осцилации што се шират во просторот во вид на електромагнетни (радио) бранови.

Применикот на овие бранови исто така треба да има антена, засилувач, демодулатор и претворувач (звучник).

Емитираните електромагнетни осцилации во приемничката антена индуцираат високофреквентни електрични осцилации со многу мала моќност. Така слабите осцилации потоа со помош на засилувачот се засилуваат, така што нивната моќност по извршената демодулација е доволно голема да предизвика ефект кај претворувачот (на пример, да придвижи мембрана на звучникот).

Во хомогена средина електромагнетните бранови се простираат праволиниски. Оддалеченоста до која можат да стигнат поради закривеноста на Земјата е релативно мала (десетина километри).

Меѓутоа уште со првите експерименти на Маркони емирирани во Европа биле примени и во Северна Америка.



Сл. 1. Одбивање на радиобрановите од јоносферата.

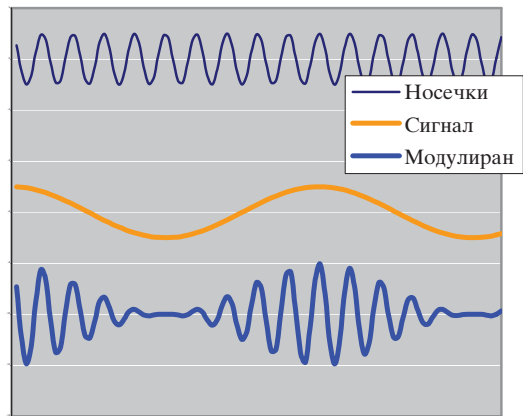
Објаснувањето стигнало нешто подоцна од Хевисајд, кој го објаснил приемот преку рефлексијата на електромагнетните бранови кон Земјата од горните јонизирани слоеви на атмосферата (сл. 1). Подоцна Епלטон покажал дека постојат повеќе вакви јонизирани слоеви од атмосферата што ја сочинуваат јоносферата на висина од 60 до 300 километри. Јонизацијата на овие воздушни слоеви настанува од космичките зрачења и Сончевите зраци. Благодарение на рефлексијата на радиобрановите од овие слоеви (сетете се електромагнетните бранови се рефлектираат од спроводна средина, поглавје 1.10) е овозможено нивно простирање и прием на растојанија од неколку илјади километри од предавателот.

Радио. Модулација и демодулација

Фреквентното подрачје на звукот се простира од околу 20 до околу 20 000 Hz. За пренесување на звучна информација на големи далечини потребно е претворање на звукот, кој претставува механички вибрации во еластична средина, во електрични осцилации, а потоа во електромагнетни бранови. Во микрофонот звучните осцилации се претвораат во синхрони електрични осцилации на струја. Звучниот сигнал се претвора во електричен. Се добиваат електрични осцилации, кои по пат на резонанс со отворено осцилаторно коло би можеле да се пренесат на растојание во вид на електромагнетни бранови. Но, електромагнетните бранови со такви ниски фреквенции не се погодни за одржување на радиоврски.

Овој проблем е решен со тоа што

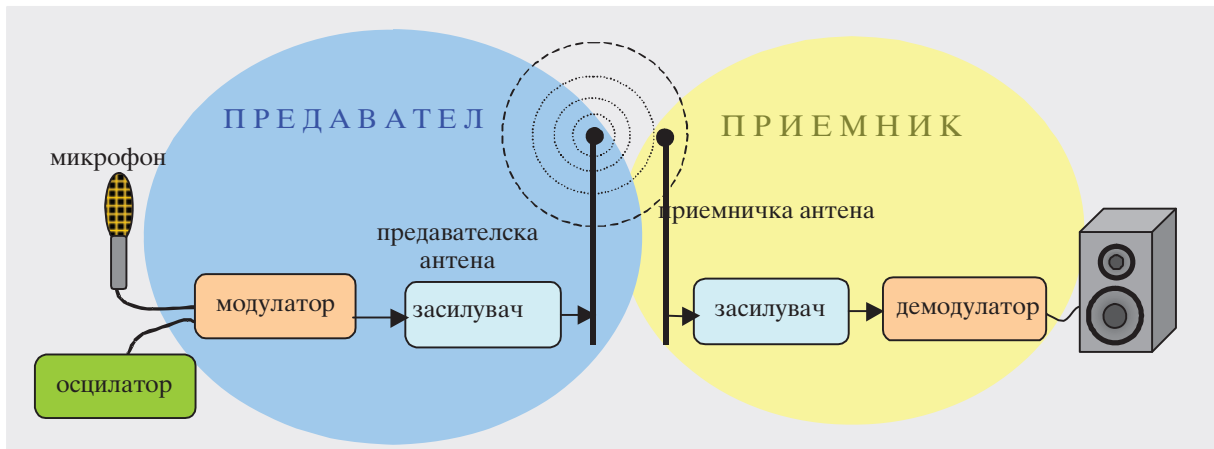
високофреквентните осцилации (ред големина од 1 000 000 Hz) се користат како носечки бран, а на нив се втиснуваат осцилациите со звучната фреквенција (сигналот). Овој процес е познат како **модулација** и се одвива во делот од **радио предавателот** кој се нарекува модулатор. Притоа се добиваат модулирани високофреквентни осцилации чија што амплитуда временски се менува синхронно со промените на звучниот сигнал (сл. 2). По засилувањето, модулираниот високофреквентен сигнал се води на **предавателската антена** којашто зрачи модулирани електромагнетни бранови.



Сл. 2. Амплитудна модулација: носечки бран, сигнал и модулиран бран. Сигналот е еден тон на звучен бран.

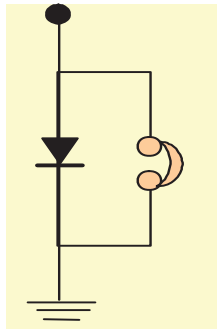
Во **приемничката антена** овие радиобранови се прифаќаат со помош на резонантно коло и во случај на резонанс индуцираат максимална електромоторна сила (ЕМС). Притоа протекува струја што има ист облик (амплитуда и фреквенција) како и модулираниот бран (сл.2). Бидејќи струјата е високофреквентна, таа не може да побуди осцилации на мембраната од звучникот или слушалките, па затоа е потребно звучната компонента (сигналот) што беше втисната (модулирана) во носечкиот бран да се оддели, и само таа да се пушти низ калемот на звучникот за да ја придвижи мембраната.

Процесот на раздвојување е познат како **демодулација**, којашто може да се постигне не со една исправувачка полупроводничка или



Сл.3. Пренесување на звук на далечина. Принцип на радио.

вакуумска диода (сл.4). На тој начин низ слушалките доаѓа само еднонасочната компонента та (електрични осцилации само во една насока).

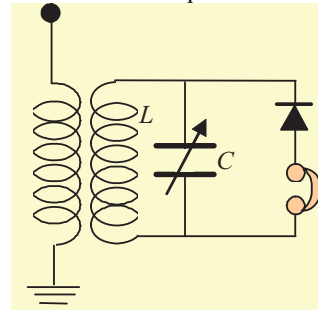


Сл. 4. Демодулатор со полупроводникова диода

Високофреквентната компонента се придушува со помош на индуктивитетот што го имаат слушалките (Сетете се индуктивниот отпор е пропорционален со фреквенцијата, $R_L = \omega L$, па затоа при голем индуктивитет и голема фреквенција, носечкиот сигнал се придушува), па на тој начин низ слушалките поминува само нискофреквентната демодулирана компонента. Мембраната од звучникот почнува да осцилира со таа фреквенција и произведува звук.

Ваквиот прием на звук изгледа сосем едноставно, но може да постои само кога моќноста на сигналот што го прима антената е доволно голема и кога постои само еден извор на електромагнетни осцилации. Ако

истовремено постојат многу такви бранови во просторот со различни носечки фреквенции тогаш како ќе се одвои онаа што сакаме да ја примиме? Таквото одвојување се нарекува **дотерување на применикот** на одредена бранова должина. Дотерувањето се постигнува со тоа што сигналот од антената се води во осцилаторното коло на применикот (сл..5).



Сл. .5. Селектирање на саканата фреквенцијата. Ако сакате да ја слушате првата програма на Македонското радио треба да го наместите применикот на 820 kHz

Осцилаторното коло се состои од намотка со индуктивитет (L) и променлив кондензатор со капацитет (C), па така сопствената фреквенција на колото изнесува:

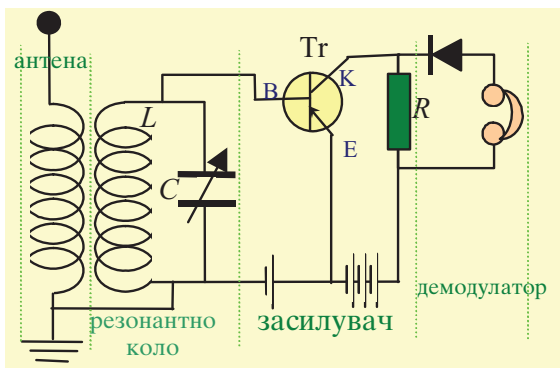
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Ако со менување на вредноста на капацитетот C (равенка 1) се намести да сопствената фреквенција на осцилаторот се поклопи со фреквенцијата на радиобрановите тогаш

настанува резонанс, па во тој случај индуцираниот напон е максимален. Поради тоа високофреквентната струја ќе стане најголема. Истовремено, за сите други фреквенции што стигнуваат до приемничката антена индуцираниот напон ќе биде мал, па тие нема да предизвикаат осцилации на мембраната, нема да се слушаат.

Засилувач

Јачината на струјата по извршената демодулација најчесто е многу слаба и не може да ја придвижи мембраната на звучникот, па затоа потребно е сигналот да се засили. Засилувањето се вршело порано со електронски ламби, а денес и со транзистори. Еден таков едноставен **засилувач** на моќноста со МОСФЕТ транзистор кој се наоѓа во склопот на еден радиоприемник е даден на шемата од сл.6



Сл. 6. Засилувач во склопот на радиоприемникот.

Селектираниот модулиран бран се донесува на влезот на еден транзисторски засилувач помеѓу неговиот емитер и база. Излезот на овој засилувач се зема помеѓу емитерот, кој е заеднички и за влезот и за излезот и колекторот како засилената струја на краевите од еден орпорник R . Струјата што тече низ овој отпорник се менува во ритамот на струјата што се донесува на влезот на транзисторскиот засилувач, но е неколку пати засилена. Така засилена, таа потоа се демодулира низ демодулаторот (диодата и индуктивниот елемент од слушалките). Движење на мембраната од слушалките

(звучниците) предизвикува само демодулираната компонента што се менува во ритамот на звучната фреквенција.

Прашања, задачи, активности

1. Како ќе ја објасните појава што на некои места не се слушаат кратки радио бранови?
2. Зошто не се слуша, или помалку се слуша радио во тунел?
3. Како треба да се промени капацитетот на кондензаторот кај приемното коло, ако сакаме да слушнеме радиостаница со поголема бранова должина?
4. Како си го објаснуваме одбивањето на радиобрановите од јоносферата?
5. Најдете која е фреквенцијата на вашата најблиска локална радиостаница. Вклучете ја на вашето радио.
6. Организирајте посета на некоја радиостаница во близината на вашето училиште.
7. Во историјата на радиопреносот голема улога имал Никола Тесла. Побарајте во библиотека, или на интернет соодветна веб страница и прочитајте пошироко за неговите експерименти со радиобрановите.

Кратко резиме

За одржување на радиоврските неопходно е постоење на предавател и приемник. Предавателот се состои од осцилатор, модулатор, засилувач и предавателска антена.

При преносот носечкиот бран со висока фреквенција се модулира со сигналот што се пренесува (сигналот кој потекнува од звукот, на пример).

Приемникот се состои од приемна антена, резонантно коло кое ги прима осцилациите, демодулатор и звучник,

При радиопреносот најчесто се врши засилување на сигналот. Тоа се прави со транзистори.

10.12. ТЕЛЕВИЗИЈА- подвижни слики



Сл. 1. Опрема во едно телевизиско студио.

Кога гледате телевизија вие на екранот всушност гледате ликови, настани и дејствија што се одвиваат на некое друго место, во истиот момент или во некое минато време (на пример во Охрид, минатото лето). *Начинот на којшто се формира слика кај телевизијата може да се разбере ако се зголеми една слика од печатен весник. На сликата ќе се забележат точки, од кои едни се помали а други поголеми.*

Истото е и кај црно-белиот екран. На нормално растојание на кое се гледа телевизија, растојанијата меѓу точките не се гледаат, па човекот гледа чиста слика на ликовите. Ако се снимени движења, сликите се менуваат така што во секоја секунда се прожектираат по 25 слики. Окото овие слики ги гледа како подвижна слика. *Предавање и прием на подвижни слики на растојание со помош на електромагнетни бранови се вика телевизија.*

За да се оствари телевизискиот пренос, исто како и кај радиопреносот, треба да постои телевизиски предавател и телевизиски приемник.

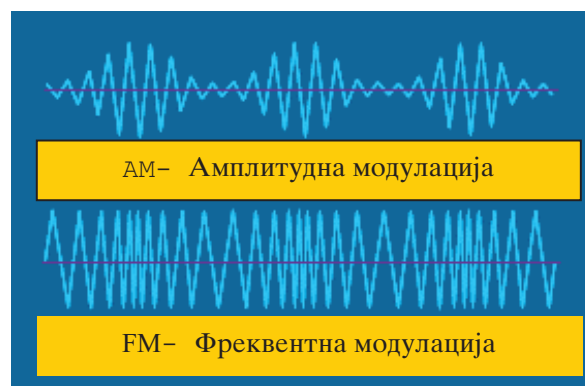
Црно-бела телевизија

Во предавателот се обезбедува добивање на електромагнетен бран што ја носи

информацијата за снимената слика и звукот што ја следи.

Сликата може да се пренесе откако претходно оптичкиот лик ќе се претвори во електричен запис, а тоа го овозможуваат електро-оптичките претворувачи или телевизиските камери.

Принципот на пренесување на слика на далечина е идентичен со пренесувањето на звукот. Кај телевизијата постои потреба од едновремено пренесување на звукот и сликата. Тоа се постигнува со тоа што сликата се втиснува во носечкиот бран како амплитудна модулација (АМ). Звукот пак се втиснува како фреквентна модулација (FM). На сликата 2 е прикажана принципиелна скица на АМ и FM.

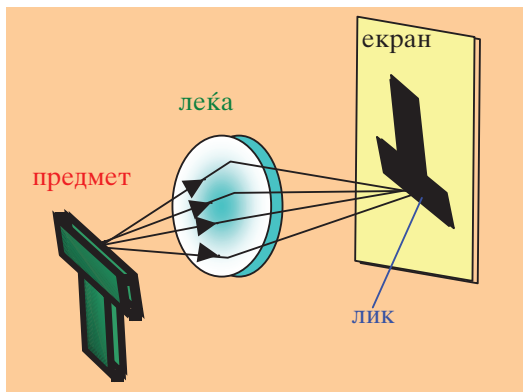


Сл. 2. АМ и FM модулација.

Телевизиска камера

Еден од основните делови на телевизискиот предавател е телевизиската камера, со помош на која сликата се претвора во електричен сигнал.

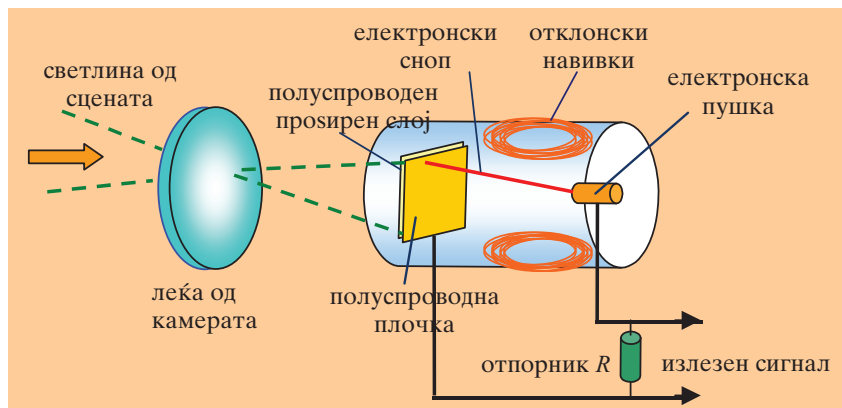
Принципот што е искористен кај наједноставниот тип камера е промената на отпорот на еден полупроводник кога на него ќе падне светлина (фоторезистор). На сликата 3 е даден принципот на формирање лик кај собирната леќа. Сега флуоресцентниот екран мисловно да го замениме со полупроводна плочка сместена во специјално изработена катодна цевка.



Сл. 3. Светлината што го напушта предметот со помош на стаклена леќа се фокусира на флуоресцентен екран и формира лик.

На страната од кајшто доаѓа светлината на полупроводниковата плоча е нанесен тенок спроводен и просирен слој којшто е поврзан со спроводник со надворешно електрично коло како на сликата 4.

Од сликата може да се види дека електричното коло се воспоставува помеѓу спроводниците, излезниот отпор R и полупроводникот кога електронската пушка произведува електронски сноп кој паѓа на полупроводната плочка. Кога на камерата не паѓа светлина (сосем е темно) тогаш отпорот на полупроводникот е многу голем, па струјата што ќе потече низ колото ќе биде мала. Но, кога светлина паѓа на полупроводникот, тогаш неговиот отпор многу се намалува, па низ колото потекнува



Сл. 4. Принципиелна шема на телевизиска камера. Во неа светлинскиот сигнал се претвора во електричен.

појака струја, па излезниот сигнал, којшто е пад на напонот на отпорникот R , е посилен. Тоа значи дека колку е појака светлината што го осветлува полупроводничкиот фотоспроводнички елемент толку е поголем излезниот напон.

Ако сега земеме дека системот од леќи создава лик на фотоспроводникот, и ако едновременно електронскиот сноп се движи по неа и ја скенира ред по ред, тогаш излезниот напон ќе варира со осветленоста на делот од плочата што во даден момент се скенира.

Трансмисија на сигналот

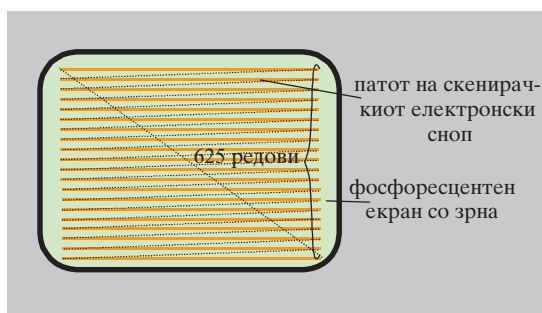
Сигналот што се добива од камерата се втиснува (модулира) на носечкиот бран - УHF (ултра висока фреквенција) и таков се емитува во просторот од телевизискиот предавател. Од предавателската антена се зрачат електромагнетски бранови што ја носат информацијата за сликата во сите правци. Телевизискиот пренос е можен само со помош на бранови во ултракратко браново подрачје. Таквите бранови се простираат праволиниски. Затоа е нужно да се поставуваат телевизиски антени, кои ќе ги примаат и пренесуваат на големи растојанија брановите. Во нашата земја има повеќе такви релејни антени, откаде може да бидат примани сигнали од повеќето телевизиски предајници.

Телевизиски приемник

Рисиверот (приемникот) од ТВ апаратот го собира од антената електромагнетниот бран. Сигналот што ја носи сликата се одвојува од носечкиот бран и се претвора во променлива струја (само сигнал). Оваа струја потоа се испраќа до делот од катодната цевка што ја контролира јачината на струјата на електронскиот сноп во телевизиската катодна цевка. Направено е така да

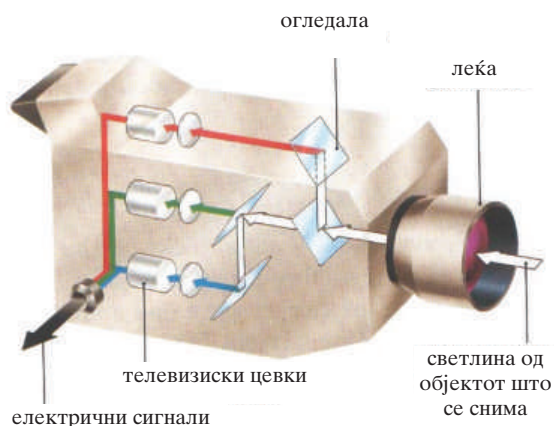
електронскиот сноп поминува врз телевизискиот екран истовремено како што тоа го правел електронскиот сноп кај камерата. Така сликата што била снимена и емитувана се репродуцира верно.

Инаку внатрешната страна на телевизискиот екран е обложена со голем број мали петна распоредени во 625 линии, (сл. 5) кои се направени од фосфоресцентна материја (материја што е способна да емитира светлина кога ќе биде погодена од електрони). Инаку, времето за кое се скенира една цела слика изнесува околу 0,04 s.



Сл. 5. На ТВ екранот електричниот сигнал се претвора во слика.

Телевизија во боја



Сл. 6. ТВ камера.

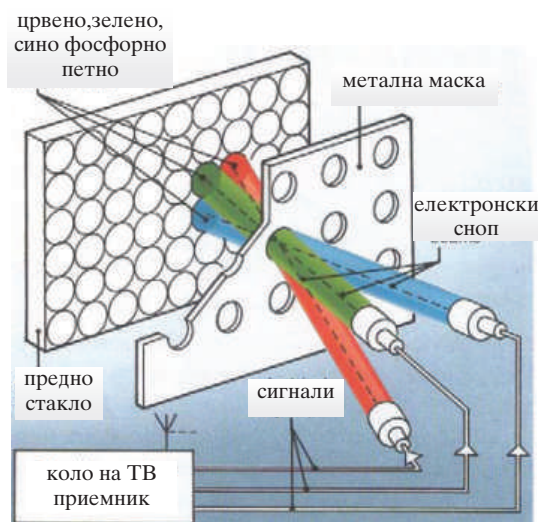
Телевизиската камера во боја всушност како да се состои од три камери во една. Светлината од предметот што се снима влегува во

камерата каде што има систем од оптички леќи, огледала и филтри ја разделува светлината на трите примарни бои: црвена, зелена и сина (сл. 6).

Секоја од сепарираниите бои светлина се носи до цевки (слични на онаа од црно-белата камера) кои ја претвораат во електричен сигнал. На тој начин се добиваат три електрични сигнала што потоа се втиснуваат во носечкиот бран. Пред трансмисијата, електричните сигнали се кодираат за да ја покажат бојата и осветленоста на секое последователно зрно во редовите.

Телевизиска цевка во боја

Антената и приемникот (рисиверот) на телевизорот го фаќаат модулираниот бран што ги содржи кодираните информации за боја, осветленост и звук. Сигналот што ја носи информацијата за црвената боја се носи на електронскиот сноп што е одговорен за произведување на црвена боја на екранот. Слично се случува и со сигналите од сината и зелената боја (сл. 7).

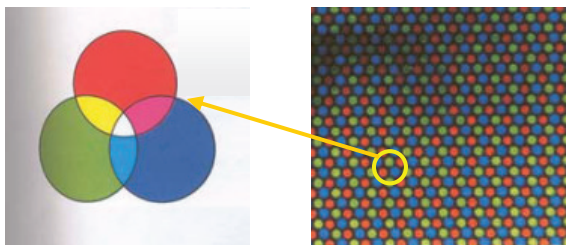


Сл. 7. Добивање слика кај колор ТВ.

Внатрешната страна од ТВ екранот е обложена со голем број зрна што можат да засветат со една од следниве бои: црвена, зелена или сина. На тој начин е можно да се произведе широк спектар од бои и нијанси.

Блиску до екранот е монтирана издупчена маска, така што секој од електронските снопови може да поминат низ едно дупче и да погодат само определени зрнца (сл. 7). Секој електронски снап погодува само еден тип флуоресцентно зрно кое засветува со обоена светлина. Крајната боја на еден мал дел од екранот се добива од засветувањето на трите одделни зрнца (сл. 8).

За да на екранот се добие обоена слика, потребно е електронските снопови да се скенираат долж линиите и редовите и да направат сите зрнца за засветат, се додека не се покрие целиот екран.

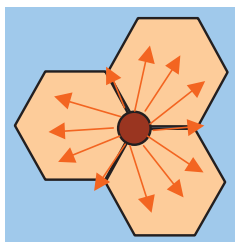


Сл.8. Трите фосфоресцентни зрна кај колор ТВ.

Скенирањето на целиот екран се повторува по 25 пати во секунда, а тоа е доволно често за да човечкото око сликите не може да ги набљудува како посебни слики, туку како континуирано движење.

Мобилни телефони

Мобилниот телефон не е ништо друго освен минијатурно софистицирано двонасочно радио. Принципот на мобилната телефонија се состои во



Сл. 9. Три клетки со една антенска кула.

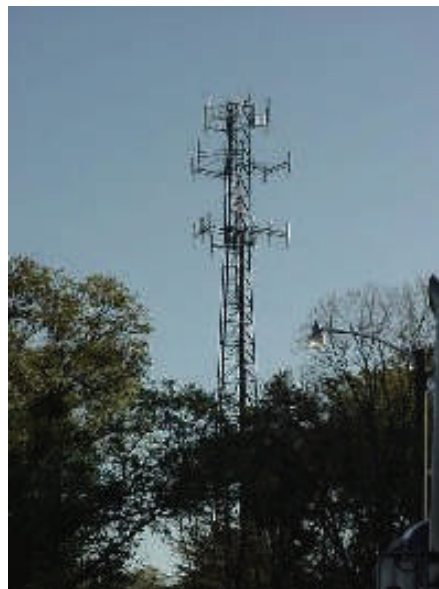
тоа што една територијална целина (н.пр. држава) се дели на клетки (cells), па оттаму и популарното име за

мобилните телефони во САД (cell phones).

За таа намена областа се дели на клетки со форма на правилни шестоаголници со плоштина од околу 26 квадратни километри (сл. 9). Секоја клетка има базна станица што се состои од антенска кула (сл. 10) и мала зграда во која е сместена електронската опрема.

Во еден голем град може да има и стотина антенски кули. Сите клетки се во комуникација со централната канцеларија на провајдерот.

Повикот од вашиот мобилен телефон користи погодна избрана носечка фреквенција и него го прима најблиската антена во околината на клетката во која се наоѓате.



Сл.10 . Антенска кула за мобилна телефонија

Електрониката слична како кај радиостаниците го засилува сигналот и го препраќа наоколу. Потоа ја пребарува базата, и го лоцира телефонот што го бирате. Едновременно, најблиската антената го регистрира апаратот на телефонот на соговорникот што го бирате. Автоматски се избира погодна и слободна фреквенција и повикот се воспоставува. Сега мобилниот телефон работи како двонасочно радио: едновременно работи и како приемник и како предавател. За разлика од воки-токите или обичните радиостаници, кајшто за двете насоки се користи само една иста

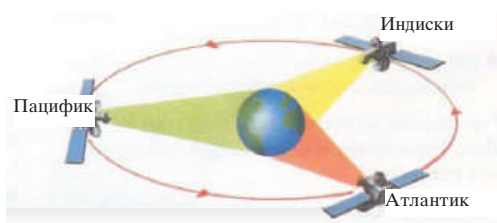
фреквенција, мобилните телефони едновременно користат две фреквенции: една за говорење а друга за слушање, што значи дека двата корисника можат да зборуваат во исто време. Во табелата подолу е направена споредба во можноста за користење на разни фреквентни канали и дометот кај наведените радио-уреди.

	Токи-воки	Радио-станција	Мобилен
Број на канали	1	< 40	1664
Домет	1,5 km (0,25W)	8 km (5W)	секаде каде има клетки

Сателитски пренос на информациите

Бидејќи Земјата е топка, а електромагнетните бранови се простираат праволиниски, тогаш се прашувате како една информација од една хемисфера ќе се пренесе до другата по безжичен пат?

Решението за ваквиот проблем било најдено со примена на **телекомуникациските (геостационарни) сателити**. Така, проблемот на покривање на целата Земја со достапност на електромагнетскиот прием на информации се решава со најмалку 3 сателити кои се во меѓусебна комуникација. Тие си ја предаваат информацијата еден на други и ја дистрибуираат секој во својот просторен домен на површината на Земјата (сл. 11).



Сл. 11. Сателитски телекомуникации.

Примената на електромагнетните бранови во денешната радиофизика е многу голема. Ќе ги спомнеме само уште радиолокацијата, со помош на која се определува местото на некој објект. Основен уред за радиолокација е радарот. Денешната космонаутика не може да се замисли без радионавигацијата, автоматско

управување со космички летала, а голем дел од техниката користи радиоавтоматика, каде што се управува со одредени технички уреди преку пренос на радиоуправувачки сигнали.

Дајте го значењето на следниве поими

-телевизија	-телевизиски приемник
-телевизиски предавател	-ТВ во боја
-телевизиска камера	-мобилни телефони
-црно-бела телевизија	-телекомуникациски сателити

Прашања, задачи и активности

1. Носечкиот сигнал кај телевизијата е со значително повисока фреквенција, дали може да одговорите зошто е тоа така?
2. Зошто за преносот на телевизијата се потребни телевизиски релејни антени?
3. Посочете некои релејни станици во Македонија. Зошто се тие поставени на високи врвови?



Телекомуникации = теле (грч.) + comunicatio (лат.)= соопштување на далечина

фоторезистор = фотоσ (грч.) + resistere (lat.)= светлински зависен отпор

Првите забележани резултати на пренос на сигнали биле добиени со помош на усовершениот Херцов уред којшто емитура непрекинато несинусно зрачење. Сигналите од овој уред биле детектирани на мало растојание (околу 250 метри). Подоцна, со помош на триодата бил конструиран првиот извор на непригушени синусни радиобранови, со што бил трасиран патот кон радиотелеграфичката, т.е. можноста за испраќање на кодирани пораки со помош на таканаречената Морзеова азбука. Натомошниот развој овозможил пренос на звук, а во триесетите години на XX век и пренос на слика.

10.13. СПЕКТАР НА РАДИОБРАНОВИ

Радиобрановите, иако само еден мал дел од спектарот на електромагнетното зрачење исто така се делат на помали подрачја. Во табелата подолу дадени се подрачјата на денес користените радио бранови .

Бранови подрачја во распон на фреквенции од 3 Hz до 300 GHz

Англиска кратенка (назив)	назив	фреквенција	Бранова должина	Техничка примена
ELF (Extremely Low Frequency)		3 Hz – 30 Hz	10 Mm – 100 Mm	комуникација со подморници
SLF (Super Low Frequency)		30 Hz – 300 Hz	1 Mm – 10 Mm	
ULF (Ultra Low Frequency)		300 Hz – 3 kHz	100 km – 1 Mm	
VLF (Very Low Frequency)	миријаметарски бранови	3 kHz – 30 kHz	10 km – 100 km	комуникација со подморници
LF (Low Frequency)	долги бранови (DV), километарски бранови	30 kHz – 300 kHz	1 km – 10 km	радио, радиски часовници, радио навигација
MF (Medium Frequency)	средни бранови (SV), хектометарски бранови	300 kHz – 3 MHz	100 m – 1 km	радио
HF (High Frequency)	кратки бранови (KV), декаметарски бранови	3 MHz – 30 MHz	10 m – 100 m	радио
VHF (Very High Frequency)	ултракратки бранови (УКВ), метарски бранови	30 MHz – 300 MHz	1 m – 10 m	радио, телевизија, радар
UHF (Ultra High Frequency)	микробранови, дециметарски бранови	300 MHz – 3 GHz	1 dm – 10 dm	телевизија, подвижна телефонија (нпр. GSM), микробранови печки, безжични компјутерски мрежи (нпр. WI-Fi)
SHF (Super High Frequency)	центиметарски бранови	3 GHz – 30 GHz	1 cm – 10 cm	радар, насочени врски, сателитска телевизија
EHF (Extremely High Frequency)	милиметарски бранови	30 GHz – 300 GHz	1 mm – 10 mm	насочени врски

Преземено од "http://hr.wikipedia.org/wiki/Radio_valovi"

10.14. МИКРОБРАНОВИ. ПРИМЕНА

Микробрановите се дел од спектарот на електромагнетни бранови, како и дел на радиоспектарот, но сепак често се зборува посебно за нив. Понекогаш се нарекуваат радарски бранови. Подрачјето на микробрановиот спектар опфаќа бранови должини од 1 mm до 30 cm, односно на фреквенции од 1 GHz до 300 GHz.

Практичната примена на микробрановите започнала во минатиот век (1931 година).

Во следната табела се дадени подрачја и називи на одредени делови на микробранови.

Назив	Фреквенција
L –подрачје	1 do 2 GHz
S –подрачје	2 do 4 GHz
C –подрачје	4 do 8 GHz
X –подрачје	8 do 12 GHz
K _u –подрачје	12 do 18 GHz
K –подрачје	18 do 26.5 GHz
K _a –подрачје	26.5 do 40 GHz
Q –подрачје	30 do 50 GHz
U –подрачје	40 do 60 GHz
V –подрачје	50 do 75 GHz
E –подрачје	60 do 90 GHz
W –подрачје	75 do 110 GHz
F –подрачје	90 do 140 GHz
D –подрачје	110 do 170 GHz



Сл.1

Секое од подрачјата има своја посебна примена. Главна примена на микробрановите е во микробрановите печки, мобилната телефонија, комуникациони сателити и радари.

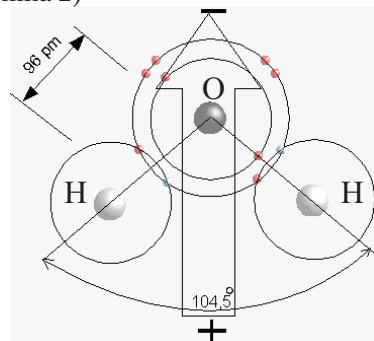
На сликата 1 е дадена фотографија на една далекуметна антена на радар која има околу 40 метри во дијаметарот.

Микробранова печка

Микробрановите е такви бранови кои се погодни да навлезат во храната и да ја загрејат, а при тоа да не ѝ се промени хемискиот состав. Во што е тајната на оваа примена?

Тајната лежи во однесувањето на молекулите на водата електромагнетното поле на микробранот. Може да се каже дека микробрановите ги претвораат молекулите на водата од храната и појалоците во ефикасни грејни тела.

Знаеме дека молекулот на водата се состои од еден атом на кислород и два атома на водород (види слика 2)



Сл.2

Градбата на молекулот не е симетрична. Поради тоа молекулот како целина се однесува како дипол. На една страна преовладува позитивниот, а на друга негативниот полнеж. (На сликата 2 тоа е прикажано горе долу).

Однесувањето на диполот во електрично поле е такво што на него дејствува спрег на сила и тој тежнее да се насочи во насока на полето (слика3).

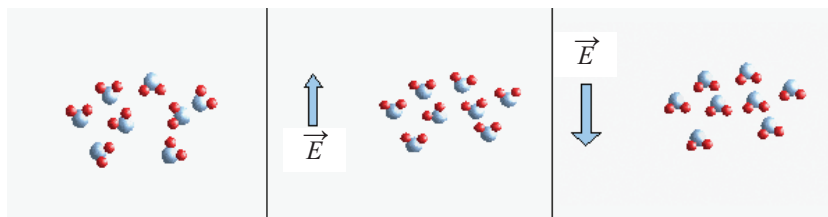
На сликата 4 е прикажан микробранот со бранова должина од 12,2 cm.

Молекулот на водата тежнее да се насочи исто како и електричното поле, кое на него како на дипол дејствува со спрег на сили. На ротацијата и се спротиставуваа околната средина

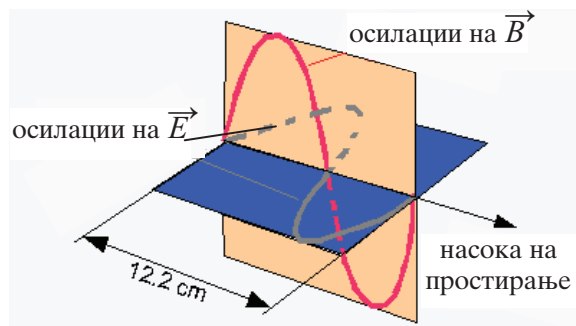
10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

со триење, па поради тоа таа задоцнува во насочувањето, а поради триењето се зголемува температурата на тоа место. Молекулите во исто време се поврзуваат поради привлекувањето на разните полнежи на диполите. Во молекулот крајот со кислородот е негативен и тој се поврзува со крајот каде се наоѓаат атомите на водородот.

настанува многу спора ротација на молекулот, така што и при тоа не доаѓа до загревање. Молекулите ротираат, но при тоа не се случува зголемување на температурата. Неопходно е при ротацијата, или осцилацијата да постои триење, односно ротацијата да станува во средина која се спротиставува на движењето, а тоа се течностите и цврстите тела.



Сл.3. Молекулите на водата се безредно ориентирани. Во услови кога ќе се најдат во електрично поле тие се ориентираат. Тие ја следат и промената на насоката на полето



Сл.4

При собна температура потребна е многу малку енергија на микробранови за да разбие т.н. водородна врска и да се предизвика ротација на молекулот. А по покачувањето на температурата одвојувањето и предизвикувањето на ротација бара уште помалку енергија (и предизвикува помал губиток на енергијата на микробрановите кои поминуваат низ водата). Не може секое променливо електромагнетско поле да го загрее молекулот на водата. Така, ако полето е со бранова должина помала од 0,3 mm (или фреквенција поголема од 1000 GHz) тогаш промените на насоката на полето стануваат така брзо молекулот на водата и не може да ги следи. Исто така, ниту поле со бранова должина поголема од 30 cm (фреквенција помала од 1 GHz) во кое што



Сл.5. Миробранова печка

Ова резонирање ни дава можност да заклучиме кој е принципот на работа на микробрановата печка.

Според тоа: **Микробрановите се електромагнетски бранови који се погодни да продрат во даден прехранбен продукт и го загрејат, а да при тоа да не се промени хемискиот состав.**

За подобро разбирање да се вратиме на сликата 4. Тоа е електромагнетен бран кој во воздух се движи со брзина на светлината и една осцилација на електричното, а истовремено и магнетното поле го прави на растојание од 12,3 cm. Во некоја друга средина, на пример нека микробранот навлегува во домот кој се вари во печката нема да се смени фреквенцијата на бранот, значи нема да се смени ниту период на осцилирање, но ќе се скрати брановата

10. Електрични осцилации и бранови, наизменична струја

должина, што е последица на помалата брзина на ширење на микробранот во материјалната средина, овде домотот. Кога бранот ќе излезе надвор од домотот, неговата бранова должина повторно ќе стане 12,2 cm, а брзината повторно станува еднаква на брзината на светлината во вакуум.

Така, ако во просторот низ кој микробранот поминува се најдат наелектризирани честиици, тие ќе се придвижат под влијанието на полето, при што дел од енергијата на микробранот за тоа ќе се потроши. Енергијата која секој микробран ја поседува може во биолошкото ткиво (на. пример, во месото) да предизвика придвижување на наелектризирани честиици (електрони или јони) како и на поларизирани диполни молекули, но таа не е доволна за да се изврши јонизација на атомот, ниту разбивање на молекулите, па со тоа да дојде до хемиски промени на супстанцијата низ која бранот поминува. Заради ова, микробрановите им припаѓаат на групата на нејонизирачки зрачења (за разлика од рендген, или гама зрачењето).

За подетално разбирање на улогата на микробранот, да си замислиме една точка низ која поминува микробран. Нека замислиме дека може да набљудуваме што станува во текот на една секунда. Низ точката во текот на таа секунда ќе поминат 2 540 000 000 мали елекромагнетни бранови. Тоа значи толку пати полето ќе опишува цела осцилација (од нулта вредност до амлитудна во една насока, преку нулта во амлитудна вредност во спротивна насока и повторно враќање на нулта вредност). Ако во дадената точка се наоѓа наелектризирана честичка, со полнеж Q на неа ќе дејствува полето на микробранот \vec{E} , со сила чјашто големина и насока ја следат промената на полето ($\vec{F} = Q\vec{E}$). Значи дека во дадената точка, во една секунда силата 2 540 000 000 пати ќе ја промени насоката. Поради тоа наелектризираната честиица осцилира присилено. Таа ја зголемува внатрешната енергија на средината, доаѓа до загревање.

Првата микробранова печка била конструирана во 1947 година, а денес 90% од семејствата во САД поседуваат такви печки. Покрај за домашни потреби, микробранови печки се користат во ресторани, самопослуги, болници

и други установи. Посебно проектирани се микробранови печки за индустриска обработка на прехранбени продукти.

За термичка обработка на храната во микробрановата печка служат посебни садови. Се прават од специјална пластика или огноотпорно стакло. Тие не смеат да бидат метални. (Сетете се електромагнетни бранови тотално се апсорбираат во спроводничка средина). При подготвувањето на храната во вакви печки се додаваат помалку маснотии и помалку вода. Затоа, во така зготвената храна има помалку маснотии, а повеќе минерали и витамини во однос на храна подготвувана на класичен начин.

Со посебни уредби се регулира дозволената енергија на микробрановите во микробрановите печки. Не смеат да се пуштат во продажба печки со енергија поголема од дозволената. Посебно се внимава на „истекувањето“ на енергијата надвор од печката. Таа не смее да биде поголема од дозволената.

Нивото на „истекувањето“ на енергијата треба повремено да се контролира, бидејќи со време се расипува вратата на печката.

Прашања, задачи, активности

1. Што се тоа микробранови?
2. Објаснете со свои зборови како храната се загрева во микробранова печка, а хемиски не се разградува.
3. Дали во микробранова печка може да се пржи храната?
4. Можно ли е во микробрановата печка да се загрее масло на висока температура?

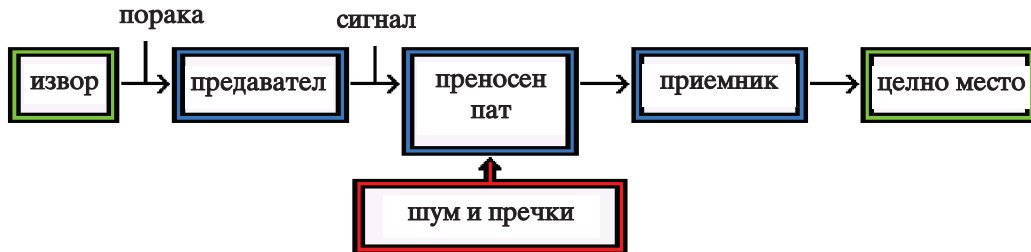
Кратко резиме

- Микробранови се електромагнетни бранови со бранова должина покуса од тие на радиобрановите. Тие припаѓаат на доменот на нејонизирачко зрачење.

- Микробрановите нашле широка примена во техниката: радар, некои уреди наменети за воени цели како и микробранови печки.

- Храната во микробрановите печки се загрева на принципот на поларизација на диполните молекули на водата кои следејќи ја насоката на електричното поле се тријат со околните молекули со што се зголемува внатрешната енергија на продуктот кој се грее.

10.15. КОМУНИКАЦИСКИ СИСТЕМ. КОМУНИКАЦИСКИ СИГНАЛ



Сл. 1.

Во денешно време на нагол развој на технологијата на преносот на информациите важно е да се разберат најважните поими на науката за пренос на информациите. Основните елементи на еден комуникациски (Shannon-ов) систем се дадени со графиконот даден на сликата 1.

Претворба на пораката во сигнал се вржи во предавателот, а претворба на сигналот во порака се прави во приемникот. Целокупниот систем на преносот претставува *комуникациски систем*.

Пораката е производ на изворот на информацијата. Секојдневен пример е телефонот кога човекот со смислен говор ја создава пораката содржана во акустичен сигнал, којшто микрофонот го претвора во електричен сигнал, кој потоа преку систем спроводници се пренесува до слушалката на другиот телефон и потоа повторно се претвора во акустичен сигнал кој слушателот го препознава како порака.

Технички оформениот преносен систем се вика *комуникациски канал*, кој е, се разбира, дел на целокупниот комуникациски систем. Значи, комуникациски канал е сèвкупност на

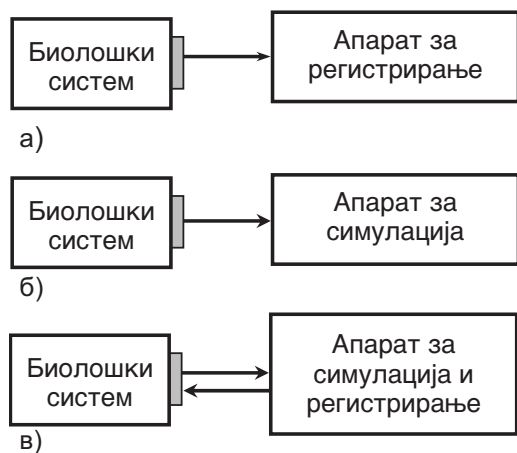
уреди кои овозможуваат пренос на сигналот, преку преносен пат и приемник. Шумовите и пречките (случајни или намерни) можат во потполност да го оневозможат приемникот од примениот сигнал да ја „извлече“ пораката, или пак за комуникацискиот канал може да се вклучи „трета“ личност која ќе ги пресретне податоците кои се пренесуваат со комуникацискиот сигнал, па ќе ги украде, лажира или попречи, или пак ќе изврши некои други постапки поради остварување најчесто на некои незаконски користи. Затоа, податоците кои се од големо значење се пренесуваат со *криптирани комуникациски канали*.

Преносот на податоците, вестите или новините помеѓу луѓето и механизмите или пак помеѓу и едните и другите меѓусебно, потобен во целокупното глобално ниво- во најширока смисла, комуникацијата, претставува многу сложен процес. Проблемот е повеќедисциплинарен и неговото проучување навлегува во повеќе научни дисциплини, и тоа и од природен и од општествен карактер. Повеќе за физиката на комуникациите ќе биде кажано во посебно поглавје на оваа книга.

11. ФИЗИЧКИ ОСНОВИ НА ЕЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЈАТА

Електрофизиологијата е интердисциплинарна област од физиологија и електомагнетизам која главно ги опфаќа: 1. проучувањето на електричните појави во живиот организам и 2. проучувањето на влијанието на електричната струја на процесите во живиот систем низ кој таа протекува.

Овие испитувања се вршат со помош на електрични апарати чии основни делови се спроводници од прв ред, додека од друга страна деловите од организмот може да се третираат како лоши волуменски спроводници од втор ред. Следењето на електричните појави во организмот (сл.1а), електростимулацијата (сл.1б) и регистрирањето на одговорот на биолошкиот систем од негова предходна стимулација (сл.1в) се изведува со помош на *електроди*.



Сл.1.

Задачата на електродите е да го реализира контактот помеѓу металниот спроводник кој оди до апаратот за регистрирање или стимулација, и електролитот во ткивото кое го опколува. Електродата овој спој треба да го воспостави: 1) без било какви биохемиски или физички влијанија врз живата супстанција кои се во допир со електродата; 2) без воведување на контактна потенцијална разлика, 3) не е пожелно да се воспостави поларизациона електромоторна сила.

11.1. ПОЈАВИ НА МЕСТОТО НА ДОПИР ЕЛЕКТРОДА-ТКИВО

При протекување на права струја низ биолошкиот систем треба да се имаат предвид појавите кои се одвиваат на местото на допир на спроводниците од I и II ред. Имено, спроводникот кој ги спојува електродата и апаратите се спроводници од I ред, додека ткивото и течностите во организмот се спроводници од II ред во околината на кое на електродите се одвиваат различни процеси кои се последица од протекување на електрична струја низ нив.

На пример, ако пар електроди од племенит материјал се постават на кожата и преку нив се спроведува струја низ ткивата. Основните ефекти од протекувањето на струјата ќе се појават на местото на допирот електрода-ткиво. Имено, под електродите зависно од нивниот поларитет ќе се појави кисела односно базна реакција која предизвикуваат коагулација на ткивата и рани кои тешко заздравуваат. Затоа електродите преку кои протекува струја не смеат да се допираат непосредно на кожата, туку меѓу нив се става хидрофилна газа натопена со физиолошки раствор. Така продуктите од електролизата сега ќе се појават на местото електрода-газа, додека системот кожа – газа сега како една целина е спроводник од II ред.

При регистрирање на биоелектричните потенцијали на местото на допирот на електродите со ткивото настанува *контактна потенцијална разлика* која може доста да ја промени вредноста на поренцијалот кој се регистрира.

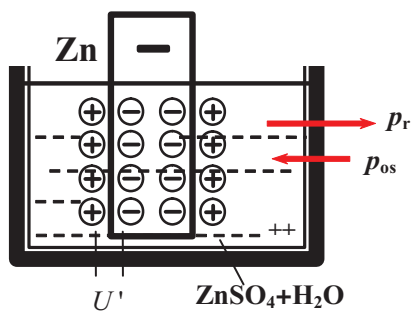
Како настанува оваа појава може лесно да се разбере преку примерот на галвански полуелемент. Кога спроводник од прв ред (на пример, цинкова електрода) се потопи во електролит (на пример, воден раствор на некоја од солите на металот или сулфурна киселина) на местото на допирот доаѓа до *хидратација на јоните* на металот, т.е. постои тенденција диполните молекули на водата да ги зафатат позитивните јони на металот со кој се во допир. Поради слабите електростатски сили што ги држат цинковите јони за решетката на металот извесен број јони, чија

брзина на термичко осцилирање во даден момент е релативно голема, се откинуваат од својата решетка и преминуваат во растворот.

Спонтаната тенденција на позитивните јони да ја напуштат решетката на металот и нивното поминување во електролитот, се вика **растворливост на металите**.

Според Нернстовата теорија, секој метал потопен во електролитен раствор има тенденција неговите позитивни јони да поминуваат во растворот при што постои одреден **притисок на растворливост** p_r или потенцијал. Како резултат на заостанатите електрони во металот неговата површина е негативна, а растворот во близина на металот е позитивно наелектризиран. Негативно наелектризираниот метал ги привлекува позитивните јони и тие повторно се враќаат во металот (металот исто така е изложен на еден притисок, т.н. **осмотски притисок** p_{os}). Меѓутоа, истовремено и нови јони го напуштаат металот. По извесно време се воспоставува динамичка рамнотежа помеѓу бројот на јоните што го напуштаат металот и бројот на истовалентните јони кои под дејство на осмотскиот притисок од растворот поминуваат во металот.

На границата метал-електролит се создава тенок **електричен двоен слој** каде постои јако електрично поле. Дебелината на слојот е од ред на големина 10^{-8} cm.



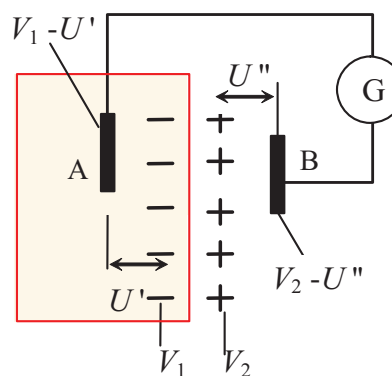
Сл. 1.

Потенцијалната разлика воспоставена меѓу површината на металот и растворот, која се одржува како резултат на создадената динамичка рамнотежа, се вика **електрохемиски потенцијал** или само **контактен потенцијал** (на сл.1 е обележан со U'). Различни метали, различно се раствораат, па и електрохемискиот потенцијал е различен.

11.2. ЕЛИМИНИРАЊЕ НА ВЛИЈАНИЕТО НА КОНТАКТНАТА ПОТЕНЦИЈАЛНА РАЗЛИКА

Видовме дека потенцијалната разлика меѓу негативниот (електронскиот) и позитивниот (јонскиот) слој при динамичка рамнотежа, кој е во непосредна близина на површината на металот, позната е како **контактна потенцијална разлика**.

Ако металните електроди А и В (сл.1) се поставени во близина на мембраната на неуронот чиј електролит е позитивен, а оној што го опколува (интрцелуларниот) негативен (сл.1) електродите нема да бидат на потенцијалите на овие електролити (V_2 односно V_1), туку на потенцијали кои се пониски од нив за контактен потенцијал (U' и U'').



Сл. 1.

Притоа, надворешната електрода е на потенцијал $V_2 - U''$, а внатрешната на потенцијал $V_1 - U'$. Потенцијалната разлика U_0 помеѓу овие електроди, што ја регистрира волтметарот ќе биде:

$$U_0 = (V_2 - U'') - (V_1 - U')$$

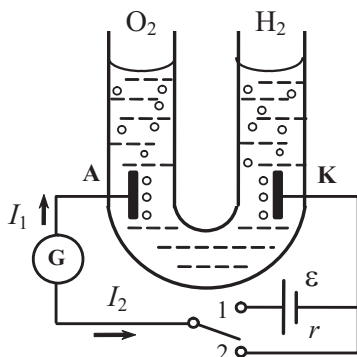
$$U_0 = (V_2 - V_1) - (U'' - U') \quad (1)$$

Бидејќи контактните потенцијали често се поголеми од вредноста на потенцијалната разлика U_0 што треба да се измери (на пример, при мерење на мембранскиот потенцијал, кој е од ред на големина 0,1 V, контактниот потенцијал може да биде и 0,5V), потребно е овие извори на дополнителна потенцијална разлика да се елиминираат. Тоа

најчесто се постигнува ако двете аплицирани електроди се направат од ист материјал. Тогаш контактните потенцијали ќе бидат еднакви $U''=U'$, односно $U''-U'=0$, па вредноста U_0 која се регистрира со волтметарот, според (1), се сведува на $U_0=V_2-V_1$, што требаше и да се измери.

11.3. ПОЛАРИЗАЦИЈА НА ЕЛЕКТРОДИТЕ

Ако во електролит се внесат две еднакви електроди, меѓу нив нема да постои потенцијална разлика. Кога преку такви електроди одредено време протекува струја, на нив, освен продуктите на електролизата, во нивна близина се собираат и јони со спротивен знак.



Сл. 1.

При електролизата, како резултат на хемиските процеси што настануваат помеѓу примарните електроди и електролитот, се воспоставува потенцијална разлика т.н.

електромоторната сила на поларизација ϵ_p . Поларизацијата на електродите може да се покаже со следниот пример: Кога пар платински електроди (сл. 1), потопени во воден раствор на сулфурна киселина (или било која друга) се поврзат со надворешен извор, чија електромоторна сила е ϵ (тоа се постигнува со поставување на преклопникот во положба 1), јачината на струјата I_1 следена со галванометарот G со текот на времето опаѓа. (види 7.4) Со исклучување на изворот, потенцијалната разлика меѓу електродите ќе предизвика течење на струја I_2 , која во надворешниот круг има спротивна насока од I_1 .

При електролизата, наместо примар-

ните платински електроди, практично се добиваат секундарни електроди од кислород и водород кои во растворот се на различен потенцијал. Таа потенцијална разлика е електромоторната сила на поларизација ϵ_p .

Електромоторната сила на поларизацијата ϵ_p , која почнува да дејствува од почетокот на електролизата, во текот на целиот процес ја намалува јачината на струјата I_1 , која врз основа на Омовиот закон изнесува:

$$I_1 = \frac{\epsilon - \epsilon_p}{R + r} \quad (1)$$

каде што R е вкупниот електричен отпор на надворешниот круг, внатрешниот отпор r на изворот чија електромоторна сила е ϵ_p .

Електродите кои на овој начин го промениле својот контактен потенцијал се вели дека се **поларизирани** (т.е. преставуваат полови на нов, секундарен галвански елемент). Електродите кои се користат во електрофизиологијата треба да се **неполаризациони**.

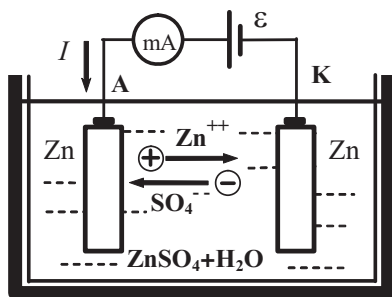
Прашања и задачи

1. Објасни ги поларизационите појави?
2. Што е тоа секундарен галвански елемент?

11.4. НЕПОЛАРИЗАЦИОНИ ЕЛЕКТРОДИ КОИ СЕ КОРИСТАТ ВО ЕЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЈАТА

Поларизацијата на електродите може да се елиминира, ако меѓу електродите, кои се од ист материјал, се постави воден раствор на некоја сол на металот од кој се направени електродите. Во тој случај на електродите се одвиваат само примарни реакции, односно ист метал се таложи или се одведува од нив, притоа електродите не се поларизираат, туку се променува само нивната маса.

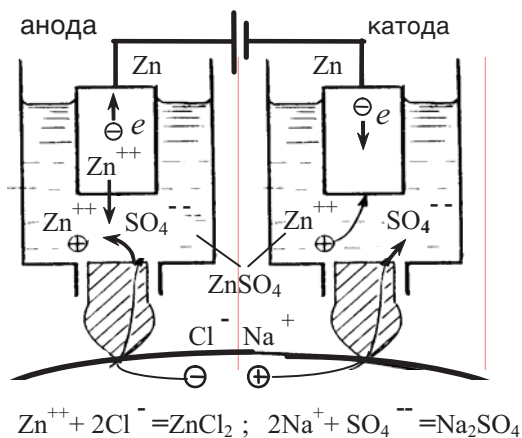
На пример, ако во воден раствор на $ZnSO_4$ се внесат електроди од цинк, на нив ќе се одвиваат само примарни процеси: цинкот се таложи на катодата, додека од анодата цинкот се одведува во електролитот во форма на $ZnSO_4$. Затоа, јачината на струјата I , која се следи со милиамперметарот, (сл.2.) во текот на времето не се менува.



Сл. 1.

Системот што го градат електродата и електролитот, кој претставува воден раствор на некоја од солите на металот од кој е направена електродата, како целина претставува **неполаризациона електрода**.

Пример за неполаризациона електрода е **Ди-Буа-Рејмондовата електрода** (сл.2.). Оваа електрода е изградена од цинкова прачка која се потопува во заситен раствор на $ZnSO_4$. Долниот дел на цевката во која е потопена електродата се затвора со сонда од желатин натопен со раствор на $NaCl$. Кога две вакви електроди се притиснат за кожата на пациентот, не се случуваат секундарни ефекти на ткивото, воедно нема опаѓање на струјата поради поларизацијата на електродите.



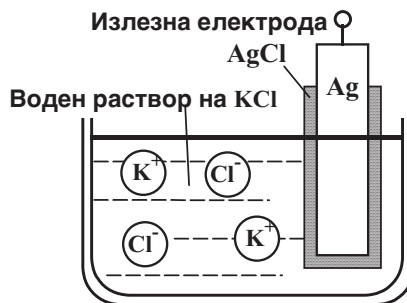
Сл. 2. Ди-Буа-Рејмондоваа електрода

Неполаризационата $Ag/AgCl$ електрода (сл. 3) е направена од сребрена жичка или плочка, а на нејзината површина е нанесен

слој $AgCl$, кој е практично нерастворлив во вода. Електродата е потопена во воден раствор од калиум хлорид (KCl).

Кога електродата се користи како катода, калиевите јони реагираат со слојот $AgCl$, и како резултат на тоа делумно се враќа металното сребро. Едновременно со тоа расте концентрацијата на Cl^- во растворот. Кога, пак, електродата се користи како анода при реакција на Cl^- јоните и сребрената електрода се добива додатно количество $AgCl$.

Според тоа, квалитативниот состав на $Ag/AgCl$ - електродата останува постојан независно од поларитетот. Тоа доведува и до постојаност на потенцијалот на електродата, кој за заситен раствор на KCl при 298 K е 0,222 V.



Сл. 3. Неполаризациона $Ag/AgCl$ - електрода

Стабилноста на $Ag/AgCl$ - електродата дава можност за нејзино користење во повеќе области. Таа се користи кај pH - метрите како електрода за споредба. $Ag/AgCl$ - електродата се користи за мерење на клеточниот потенцијал, потоа за електрофоретски мерења, во физиотерапијата и др.

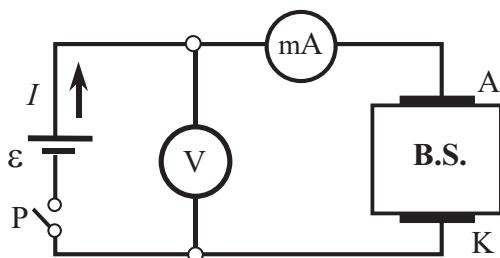
Покрај $Ag/AgCl$ електродите во електрофизиологијата се користат Hg_2Cl_2 електроди потопени во раствор од KCl .

Прашања и задачи

1. Какви електроди се користат во електрофизиологијата ?
2. Зошто двете електроди обичо се од ист материјал?
3. Потсетете се што се тоа галвански елементи и како се добиваат (направи есеј).
4. Кога се користат микроелектродите?

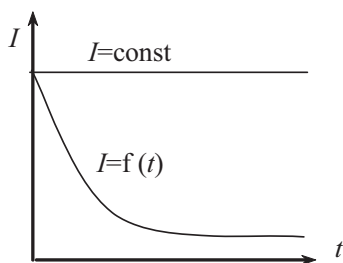
11.5. ПОЛАРИЗАЦИОНИ ПОЈАВИ ВО БИОЛОШКИТЕ СИСТЕМИ

Протекување на права струја низ биолошкиот систем



Сл. 1.

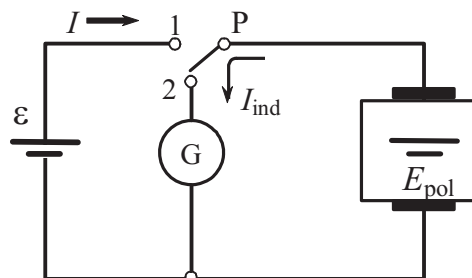
Ако извор на константен напон U (контролиран со волтметарот V) преку електродите K и A сервиски се поврзе за биолошки систем ($B.S.$ сл.1), јачината на струјата во колото со текот на времето опаѓа и по подолго време ја задржува константната вредност (сл.2).



Сл.2.

Оваа стална струја може да биде и до илјада пати помала во однос на почетната вредност. Бидејќи напонот U на електродите константен, а јачината на струјата во текот на времето сепак опаѓа, според Омовиот закон $I=U/R$ следува дека ова опаѓање може да се биде само од зголемувањето на отпорот (R) на биолошкиот систем. Меѓутоа, доколку отпорот е константен и струјата би требало да е константна. При претпоставка дека отпорот е константен тоа опаѓање се објаснува на следниот начин: Таквото однесување на биолошкиот систем е резултат од неговото својство за **поларизација**. Имено, биолошкиот систем, аналогно со примерот за поларизација на електрохемискиот систем, се однесува како секундарен галвански елемент.

Ако преклопникот P на сл. 3 се постави во положба 1, ќе дојде до спомнатото опаѓање на струјата I во електричниот круг. По извесно време преклопникот се префрла од положба 1 во положба 2, како резултат на поларизацијата на биолошкиот систем, галванометарот G регистрира краткотрајна струја која сега протекува во спротивна насока. Имено, биолошкиот систем постанал нов галвански елемент.



Сл. 3.

Имено, при протекување на струја низ биолошкиот систем во него се создава електро- моторна сила со обратна насока во однос на надворешната. Оваа поларизациона електро- моторна сила (E_{pol}) влијаат на смалувањето на јачината на струјата во кругот. Според тоа, Омовиот закон за биолошкиот ситем го добива обликот

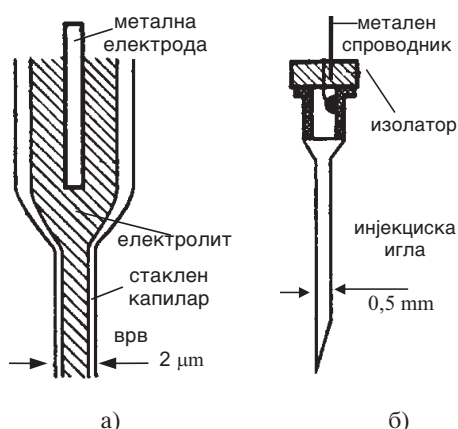
$$I = \frac{E - E_{pol}}{R} \quad (1)$$

каде што R е соодветниот константен омски отпор на биолошкиот систем, E_{pol} е во зависност од времето.

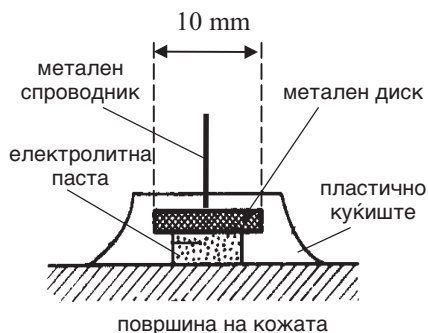
За разлика од механизмот на создавањето на поларизациона електро-моторна сила во електрохемискиот систем, генезата на поларизационата електро-моторна сила во биолошкиот систем се објаснува врз база на повеќе теории, кои меѓусебно не се исклучуваат, туку се дополнуваат. Такви се *теорија на диполна поларизација*, *теорија на мембранска поларизација* и *теорија на фазна поларизација*

11.6. ЕЛЕКТРОДИ ЗА МЕРЕЊЕ НА БИОЕЛЕКТРИЧНИ ПОТЕНЦИЈАЛИ И ТЕРАПИЈА

Мерењето на биопотенцијалите и биоструите, како и пропуштањето на електрична струја низ организмот при електродијагностика и електротерапија, се изведува со инструменти кои со биолошкиот систем се поврзани преку електроди. Електродите овозможуваат биоелектричниот потенцијал да се претвори во струен или напонски сигнал кој потоа може да се засилува и да се мери.



Сл. 1. а) Микроелектрода, б) иглеста електрода



Сл. 2. Површинска електрода.

За мерење потенцијали на ниво на клетката се користат *микроелектроди*. *Иглести електроди* се користат за мерење во точно одредени подрачја, и *површинските* за мерење потенцијал по површината. Примери од такви електроди се прикажани на сл.1 и сл.2.

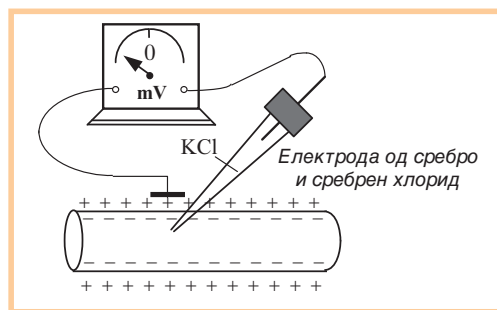
Од друга страна електродите се делат на контактни, имплантирани и интраце-

луларни. Контактните електроди обично се од метал и со ткивото имаат голема допирна површина. Во електрокардиографијата електродите имаат облик на диск, со големина од околу 5 cm, направени се од сребро или посребрени, или пак од хромитан челик.

Во енцефелографијата се користат електроди со кружен облик од сребро со отвор во средината. Низ отворот се вметнува електродно желе кое се лепи за скалпот на болниот.

При електромиографијата се користат електроди кои во мускулот се вметнуваат со хидродермална игла (која кога ќе се вметне електродата се извлекува). За испитување на електричната активност на мозокот се користат тн. длабински електроди. Овие електроди во однос на поткожните значително се подебели (80-120 μm).

Мерењето на потенцијалната разлика што постои меѓу внатрешната и надворешната страна на клетката, тешко се изведува. Таа може да се измери со соодветен миливолтметар кој е поврзан со две електроди, како што шематски е прикажано на сл. 3.



Сл. 3. Мерење на биопотенцијалот на неврон

За мерење на овие потенцијали се користат микроелектроди, со нив се пробива клеточната мембрана и се навлегува во внатрешноста на клетката. Едната електрода всушност е тесен капилар. Капиларот е исполнет со електролитен раствор (обично изотоничен раствор на KCl). Другата референтна електрода, во форма на плоча, е поставена во течноста на меѓуклеточниот простор. При интерцелуларните мерења со цел да не се оштети клетката, дијаметарот на микроелектродите треба да е барем десет пати помал од клетката. Електричните спроводници кои се ко-

ристар обично се изградени од сребро и сребрен хлорид. Општа карактеристика за секоја електрода е нејзината временска константа која треба да е помала од траењето на импулсот. Временската константа на електродата е производ од нејзиниот омски (R_e) и капацитативен отпор (C_e) т.е $\tau = R_e C_e$.

Електродите (и нивниот спој со ткивото) би требало да е таков да не се создава додатна електромоторна сила (поларизациони или контактни) ниту некој додатен отпор, наедно не смее да постојат некои физички или хемиски процеси кои имаат штетно влијание на живата супстанција.

Ако металните електроди се поставени непосредно на кожата при донесување струја на допирното место електрода-ткивото се одвојуваат киселини или бази кои при долготрајно дејство може да се предизвикаат коагулација на ткивата или болни рани. Од тие причини контактот електрода-ткиво, низ кој поминува долготрајна струја, се прави така што меѓу електродата и кожата се става хидрофилна газа натопена со физиолошки раствор (раствор на NaCl). Притоа киселините и базите се создаваат на допирната површина на газата и електродата.

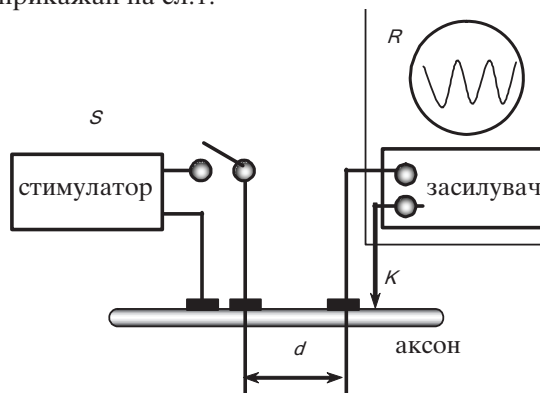
За да се елиминира додатната електромоторна сила се користат специјални електроди. Електродите кои се користат за елиминирање на контактната потенцијална разлика се прават од ист метал, а за да се елиминираат поларизационите ефекти се користат *неполаризациони електроди*. Неполаризационите елктроди обично се прават од метал потопен во воден раствор на некоја сол на тој метал.

При мерењето се користи раствор на натруим хлорид со кој се топи газата која е намотана околу електродата. Електролитот продира во надворешниот слој на кожата, чиј отпор е голем, а со тоа го намалува отпорот на кожата. Меѓутоа, присуството на електролитот создава поларизација, која не зависи само од видот на металот, туку и од концентрацијата на електролитот. Со цел да се намали поларизацијата, сребрените електроди се обложуваат со сребро хлорид $AgCl$, кој слабо се раствора во вода, а создадениот електрохемиски потенцијал е незначителен.

11.7. ЕЛЕКТРИЧНА СТИМУЛАЦИЈА

Електричната стимулација претставува предизвикување на електрични промени на клетките, нервните и мускулните влакна. Како резултат на стимулацијата се појавува акционен потенцијал. Неговото предизвикување може да биде за дијагностички или терапевтски цели.

Принципот на електро-стимулацијата е прикажан на сл.1.

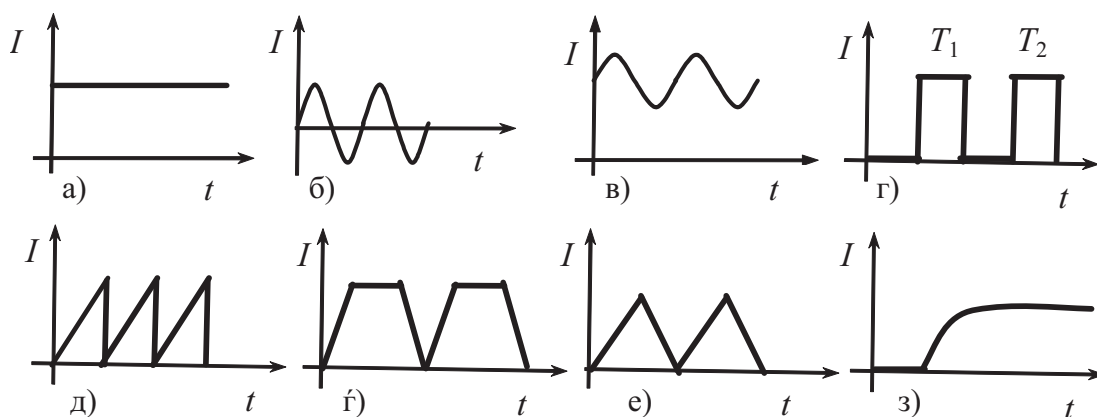


Сл. 1. Предизвикување, простирање, зајакнување и регистрација на акциониот потенцијал на аксон - централниот дел на нервното влакно.

Со помош на електрични импулси од стимулатор (генератор на импулси) S се предизвикува акционен потенцијал на едно место на нервното влакно N. Овој импулс се пренесува долж аксонот (растојание d) и на другиот крај преку електроди K се однесува на засилувач P и регистратор R. Треба да се напомене дека поголемиот дел од нервните влакна се обвиткани со миелинска обвивка што има особини на изолатор па импулсот не се пренесува на соседните нервни влакна.

Одреден импулс за да предизвика електро-стимулација на некое нервно или мускулно влакно треба да има соодветно време на траење и минимална амплитуда, односно јачина на струја (напон). Примената на електричната струја како дразба има повеќе предности:

1. таа е најблиска по своите особини до природната дразба;
2. не го оштетува ткивото при јачина која се користи за дразнење;
3. може да се дозира по јачина, времетрае-



Сл. 3. Аплицираните електрични импулси можат да имаат различен облик: а) прав, б) синусен, в) пулсирачки, г), правоаголен, д) назабен, е) трапезовиден, е) триаголен з) експоненцијален.

ње и слично.

Кога се применува константантна струја како дразба на нервно или мускулно влакно, постои сооднос меѓу јачината на струјата и времето на појава на дразбата. Внесени во координатен систем, овие промени ја даваат кривата прикажана на сл. 2.



Сл. 2. Зависност на напонот на електричните импулси од времето. Крива на надразнување на нервно влакно

Најкраткото можно време потребно за појава на дразба се вика **корисно време** (точката А од кривата на сл.2). Спротивно на тоа, најнискиот мажен напон со кој нервот или мускулот ќе се надразнат, независно од времето на дразбата, се вика **реобаза** (точката Д од кривата на сл. 2.). Тоа е **праг на дразбата**. На неа ѝ одговара време на реобаза t_R . Под овие вредности на струјата и за поголем временски интервал, не може да се предизвика дразба.

Значи, електрична дразба може да се предизвика само ако јачината на струјата има вредност поголема од I_R , а истовремено времетраењето на електричниот импулс е поголем од t_{min} . Точката Г од кривата се вика **хронаксија** и одговара на двапати поголема вредност на струјата од реобазата.

Хронаксијата е величина која често се користи за споредување на надразливоста на ткивата. Хронаксијата во дебелите и тенките нервни влакна е различна. Реобазата не се користи за споредување, затоа што не е со постојана големина. Утврдено е дека за исто ткиво таа може да има различни вредности, што зависи од промените на мембранскиот потенцијал во мирување кои постојано се менуваат во мали граници.

Електричната стимулација функционира на принципот "сè или ништо". Акциониот потенцијал не се создава, ако дразбата е помала од прагот. Сепак, ако има услови за негово постоење, тој секогаш ќе има еднаква амплитуда без разлика дали нивото на дразбата е еднакво на прагот или е поголем од него. Тоа е како последица од природата на акциониот потенцијал.

Познато е дека при дразба на клеточната мембрана, таа се деполаризира и се појавува акционен потенцијал. За време додека мембраната е деполаризирана не можно било каква дразба, па и со најголем интензитет, да предизвика нов акционен потенцијал, односно појава на нова дразба. Тоа е период на апсолутна рефрактерност

(ненадразливост). Аплицираните електрични импулси можат да имаат различен облик. Електростимулација може да се оствари само со помош на електрични импулси со *мала фреквенција* или со *единечни (осамени) импулси*.

Основните величини што ја карактеризираат електростимулација со триаголен и со правоаголен електричен импулс се: амплитудата, времето на траење на импулсот, време на пауза, периодот, време на пораст и време на опаѓање на импулсот.

Стимулативното дејство на дразба со електрична струја се должи на предизвиканото движење на јоните на електролитите во ткивата поради што се променува нормалниот јонски состав на двете страни на клеточната мембрана. При користење на големи фреквенции, јоните на електролитите во ткивата не успеваат да ги следат промените на електричното поле и затоа стимулацијата не е ефикасна.

Прашања и задачи

1. Кои се предностите од примената на електричната струја како дразба.
2. Како се вока најкраткото можно време потребно за појава на дразба?
3. Што е тоа хронакција?

11.8. ПРОТЕКУВАЊЕ НА НАИЗМЕНИЧНА СТРУЈА НИЗ БИОЛОШКИОТ СИСТЕМ

При протекување на наизменична струја низ биолошкиот систем досега не се најдени такви елементи кои би имале особини на индуктивен отпор. Според тоа, во биолошкиот систем се воспоставуваат само карактеристики на *омски и капацитативен отпор*, или нивни комбинации што зависи од особините на ткивата.

Хомогените области на овој систем кои не содржат мембрани, се однесуваат како *омски отпори*, додека подрачјата со мембрани и фазни премини каде се создава двоен електричен слој на спротивно наелектризирани полнежи, одговараат на кондензатори, т.е. на *капацитативни отпори*. Бидејќи вкупниот отпор на некој систем ја дава неговата *импеданса*, може да се заклучи дека *импедансот на*

живиот систем се сведува на омски и капацитативен отпор.

Зависност на импеданцијата од фреквенцијата на наизменичната струја. Бидејќи капацитативниот отпор на кондензаторот, зададен со равенката:

$$R_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}; \text{ каде што } \omega = 2\pi f,$$

е обратно пропорционален со фреквенцијата f на наизменичната струја, може да се заклучи дека при ниски фреквенции отпорот е релативно голем, па појаката струја поминува таму каде што отпорот е помал.

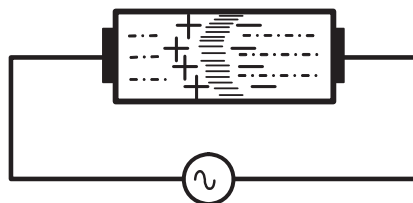
За сериско односно паралелно поврзани капацитативниот отпор и омски отпор *вкупен отпор* или **импеданс** важат равенките:

$$Z^2 = R^2 + R_c^2; \quad Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

$$\frac{1}{Z_p^2} = \frac{1}{R^2} + \frac{1}{R_c^2}; \quad Z_p = 1 / \sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2}.$$

Електрични модели на биолошките системи

Биолошкиот систем низ кој протекува наизменична струја може да се *моделира*, т.е. да се замени со еквивалентен систем кој претставува соодветен *електричен модел* составен од различно поврзани отпорници и кондензатори. Така, електричните испитувања на живиот систем во одредени граници може да се заменат со испитувања на неговиот **електричен модел**.



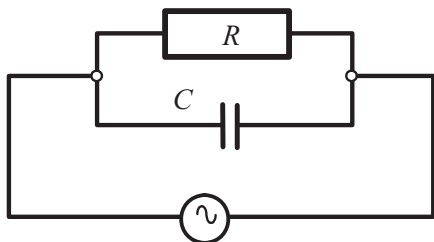
Сл. 1.

На пример, ако се разгледува дел од биолошки систем со мембрана, (сл.1), мембраната може да се замени со паралелно поврзани

11. Електрофизиологија

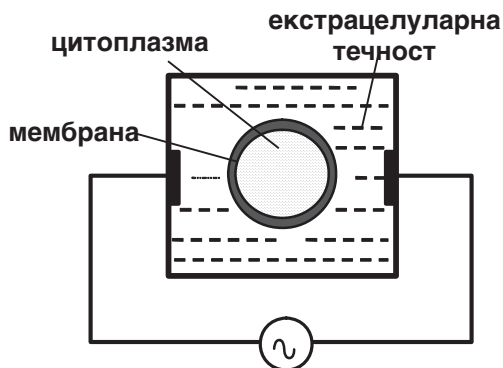
омски отпор R и кондензатор со капацитет C (сл. 2). Омскиот отпор одговара на отпорот на мембраната, додека кондензаторот одговара на двојниот електричен слој на мембраната.

Во тој електричен модел со R_c е означен омскиот отпор на екстрацелуларната течност. На мембраната одговара омски отпор R_m кој паралелно е поврзан со кондензатор, чиј капацитет е C . Меѓутоа со кондензаторот сериски е поврзан и еден омски отпорник R_i , што одговара на отпорот на цитоплазмата.



Сл. 2.

Кога, пак, се земе систем од цитоплазма опколена со мембрана од високо отпорен липиден слој, а целото тоа е опкружено со екстрацелуларната течност во која се поставени две електроди поврзани за извор на наизменична струја (сл. 3), таков биолошки систем како целина може да се прикаже со еквивалентен модел како на сл. 4.



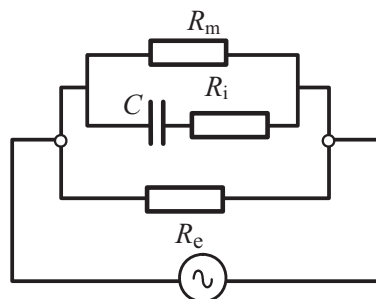
Сл. 3.

Бидејќи капацитативниот отпор на кондензаторот, зададен со равенката:

$$R_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}; \text{ каде што } \omega = 2\pi f,$$

е обратно пропорционален со фреквенцијата f на наизменичната струја, може да се заклучи

дека при ниски фреквенции отпорот е релативно голем, па појаката струја поминува таму каде што отпорот е помал, а тоа е екстрацелуларната течност. Меѓутоа, ако фреквенцијата е голема, капацитативниот отпор на овој кондензатор е релативно мал, па струјата поминува како низ течноста, така и низ клетката. Значи импедансата ќе зависи од еквивалентната шема на круг, како и од фазното поместување помеѓу јачината на струјата и напонот.



Сл. 4.

Импедансот на ткивата во организмот зависи од физиолошката состојба на ткивото. За секое ткиво импедансот е константен за дадена фреквенција. Промени настануваат при поголемо или помало протекување на крв. Поголемото количество, како и поголема брзина на протекување на крвта, го намалува вкупниот отпор на ткивото.

Дијагностичкиот метод, која се базира на регистрирање на промената на импедансот на ткивото во процесот на срцевата активност (која предизвикува промена на количеството крв во ткивата како и различна брзина на крв), се вика **реографија** или **импеданс плетизмографија**. Со помош на овој метод може да се снимат реограм на мозокот (**реоенцефелограм**), на срцето (**реокардиограм**), крвните садови, екстремитетите и др.

Во електричен поглед кога низ организмот протекува променлива струја тој претставува систем кој се карактеризира со свој **вкупен отпор** или **импеданс** зададен со равенката:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + R_c^2}.$$

11.9. ЦУЛОВ ЗАКОН ЗА ХЕТЕРОГЕН ВОЛУМЕНСКИ СПРОВОДНИК

Електротерапија со права струја

Цул-Ленцовиот закон освен за хомоген спроводник може да се изведе и за хетероген спроводник каков што е организмот на човекот. Во живиот организам многу области имаат специфичен електричен отпор ($\rho=1/\sigma$) и релативна диелектрична константа ϵ_r кои се менуваат во разни области. Иако станува збор за хетероген спроводник постојат релативно големи подрачја со константен специфичен електричен отпор ρ (ρ за мускулно ткиво $2 \cdot 10^4 \Omega m$, за крв $1,7 \cdot 10^4 \Omega m$, за масно ткиво $5 \cdot 10^5 \Omega m$, за сува кожа $3 \cdot 10^7 \Omega m$, за коски $2 \cdot 10^{10} \Omega m$).

Според тоа, организмот или само дел од него, може да се прикаже како соодветна комбинација на повеќе хомогени отпорници. На пример, коската на некој екстремитет, како хомогена област, е опколена со мускулно ткиво, масно ткиво и кожата имаат свој електричен отпор. Притоа, тие се однесуваат како различни поврзани отпорници.

Ако два отпорника, чии отпори се R_1 и R_2 , се поврзани сериски низ двата ќе поминува еднаква јачина на струја. Според Цул-Ленцовиот закон, во нив ќе се ослободи количество топлина $\Delta Q_1 = I^2 R_1 t$ односно $\Delta Q_2 = I^2 R_2 t$. Кога ќе се поделат овие две равенки, се добива:

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta Q_2} = \frac{I^2 R_1 t}{I^2 R_2 t} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

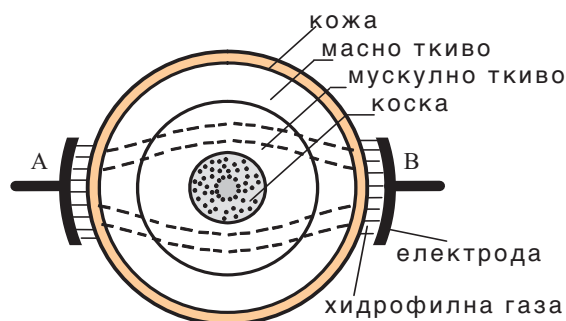
Според тоа, поголемо количество топлина ќе се ослободи кај отпорникот со поголем електричен отпор. Имено, при сериско поврзување на отпорниците ако $R_1 > R_2$ тогаш и $\Delta Q_1 > \Delta Q_2$.

Ако, пак, отпорниците се врзани паралелно, бидејќи напонот и на двата отпора е еднаков, важи:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{U^2 t / R_1}{U^2 t / R_2}; \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

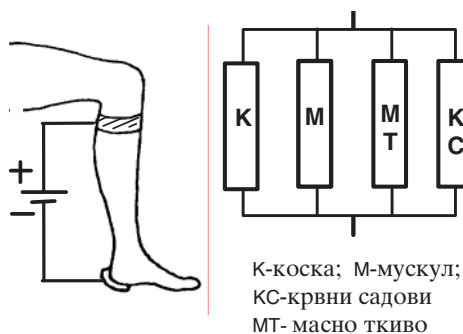
Односно, при паралелно сврзување поголемо количество топлина се ослободува во отпорникот со помал електричен отпор.

Во човечкиот организам, кој може да се прикаже како хетероген спроводник составен од поголем број отпори со различен специфичен отпор, при протекување на права струја, ќе дојде до ослободување топлина. Колку топлина ќе се ослободи, зависи од тоа дали делот низ кој протекува струјата може да се прикаже со сериско или паралелно поврзани отпорници (или нивна комбинација).



Сл. 1. Модел на напречен пресек на екстремитет каде електродите се трансверзално поставени.

На пример, кога на надлактицата се поставени електроди А и В и тоа *трансверзално* (сл.1. прикажан е напречен пресек), струјата ќе поминува низ сите делови (кожата, масното ткиво, мускулното ткиво) освен низ коската која со својот голем специфичен отпор претставува неспроводлива средина. Вкупниот отпор, што надлактицата како хетероген спроводник го има, може да се прикаже како збир од сериски сврзани отпори. Според тоа, најголемо количество топлина ќе се ослободи на места со најголем отпор (равенка 2), а тоа е кожата (за сува кожата $\rho=3 \cdot 10^7 \Omega m$).



Сл. 2. Лонгитудинално поставени електроди

11. Електрофизиологија

Меѓутоа, при *лонгитудинално* аплицирање на електродите, кога едната електрода е поставена на коленото, а другата на стапалото од ногата, струјата истовремено поминува низ сите слоеви, па целокупниот отпор може да се прикаже со паралелно сврзани отпори (сл. 2). Тоа се постигнува со *гальванизацијата*. Според равенката (2), најмногу топлина ќе се ослободи во деловите со најмал отпор, а тоа е таму каде што има најмногу крвни садови (за мускулно ткиво $\rho=2 \cdot 10^4 \Omega\text{m}$).

Ваквото загревање условува *вазодилација* (ширење на крвните садови) и намалување на коефициентот на вискозноста кој опаѓа со зголемување на температурата, а со тоа се зголемува и протокот на крв низ крвните садови. Примена на електричната струја за лекување е терапевтски метод во физикалната медицина познат како *електројераија*.

11.10. ЕЛЕКТРОТЕРАПИЈА

Според фреквенцијата, струите се делат на истонасочни (0 Hz), ниско-фреквентни (до 20 Hz), среднофреквентни (20 Hz - 20 KHz) струи со фреквенција како ултразвукот (20 kHz - 200 KHz), високофреквентни (20 kHz - 30 MHz) и ултра-високофреквентни (до 300 MHz и повеќе). Во медицината се користат истонасочната струја, синусно променливите струи и правоаголните струјни импулси.

Електростимулацијата се врши со струи со фреквенција до 100 Hz.

Електротерапијата или директната примена на електричната струја за лекување е често применуван терапевтски метод во физикалната медицина. Електротерапијата може да биде: 1) електротерапија со права струја и тоа константна или импулсна; 2) електротерапија со високофреквентни струи (дијатермија) или високофреквентни магнетни полиња; 3) примена на високофреквентните струи во електрохирургијата - хирушка дијатермија.

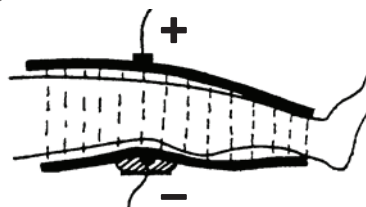
1. Електротерапија со права струја и нискофреквентна струја

Користењето на истонасочната електрична струја со напон 60-80 V за терапевтски цели во медицинската биофизика е позната под името *физиотерапија*. Под дејство на

приложеното електрично поле, позитивните јони (H^+ , Na^+ , K^+), се движат кон катодата, а негативните кон анодата.

Гальванизацијата - е дејство на дразнење и зголемување на пропустливоста на јоните од двете страни на клеточната мембрана со константна електрична струја. Струјата на местото на примената се носи со големи електроди обично од олово или спроводна гума.

При ист приложен електричен напон, кај електродата со помала површина, густината на силовите линии е поголема, и обратно. Од овие причини малите електроди се наречени *активни*, а поголемите *пасивни*.



Сл. 1. Трансверзално поставени електроди при гальванизација.

Поларитетот на електродите треба јасно да е назначен, воедно треба да се има и комутатор со кој може да се промени поларитетот на електродите. Електродите кои се користат при гальванизацијата се направени од материјал кој лесно се обликува, а на кожата се нанесуваат преку газа натопена со физиолошки раствор.

При гальванизацијата се користи извор на истонасочна електрична струја каде напонот може континуирано да се менува од 0-100 V во милиамперски вредности (до 100 mA) на јачината на електричната струја. Максималната густина на струјата е $0,2 \text{ mA cm}^{-2}$. Притоа, дозирањето на електричната струја зависи од времето на дејствување, геометријата на електродите и местото на нивното поставување.

Овој вид терапија се користи при разни видови реуматични заболувања, нарушувања на циркулацијата или болести на крвните садови. Се користи при разни видови парализи, трауматски лезии и др.

Фарадизација - Наместо константна еднонасочна струја, при фарадизацијата се користат еднонасочни импулси, кои може да се

подесуваат според амплитудата, фреквенцијата и паузата меѓу нив. Фарадеевите струии се импулсни со приближно триаголна форма и фреквенција од 50-100 Hz (сл.2). Се користи за електрогимнастика на неденервиран мускул.



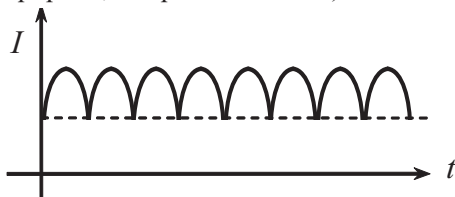
Сл. 2.

За разлика од електростимулацијата, тука не е цел да се предизвика мускулна контракција и акционен потенцијал, туку се користи стимулација под прагот на надразнување. Тоа се постигнува на тој начин што импулсите траат околу 1 ms. Кога импулсите би траеле подолго или непрекинато, наместо мускулот да тренира ќе се предизвика трајна контракција.

Правоаголни импулси со фреквенција 20-250 Hz со мало времетраење се користат за електроаналгетика (смалување на болките)

Физиотерапија со дијадинамични струи. При овој вид терапија едновременно се користат права и еднаш или двојно исправена наизменична струја (сл. 3). Фреквенцијата на наизменичната струја е меѓу 50 и 100 Hz.

Притоа се користат различни соодноси помеѓу правата и наизменичната струја (50/50%). Овој вид физиотерапија има за цел да ја намали болката при широк круг заболувања (невралгии, артрози, мигрена и слично).



Сл. 3.

2. Електротерапија со високофреквентни струи

Дијатермија (грчки дија - низ и термос - топлина). Таа претставува терапевтско ослободување на топлина во внатрешноста на организмот при пропуштање електрична струја. За

да не дојде до оштетување на организмите, се користи струја со висока фреквенција и определена јачина.

Според Џул-Ленцовиот закон ($Q=I^2Rt$) количеството топлина ослободено во спроводникот зависи, пред сè, од јачината на електричната струја I . До поголемо загревање на организмот ќе дојде само во случај кога би поминала појака струја (2 - 4 A). Меѓутоа, физиолошкото дејство на правата и нискофреквентната наизменична струја го оневозможува нивното користење во дијатермијата. На пример, наизменичната струја со фреквенција на градската мрежа ($f = 50$ Hz) при јачина од 10 mA, што не е ни најмалку доволно за загревање, предизвикува електростимулација на нервно-мускулното ткиво. Додека пак, со зголемување на фреквенцијата на наизменичната струја, практично се намалува стимулацијата на нервно-мускулното ткиво.

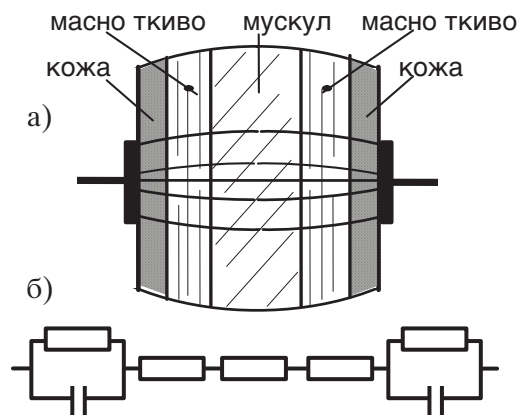
Зависно од фреквенцијата на високофреквентната струја, чиј интервал при дијатермијата е меѓу 0,5 и 3 000 MHz, може да се направи следната поделба: долгобранова, кратkobранова и микробранова.

а) **Долгобранова дијатермија.** - При овој вид терапија се користат *Теслини струи* (од околу 1 MHz и јачина 1-2 A). Електродите кои се користат при долгобрановата дијатермија се направени од метални фолии кои лесно се свиткуваат во саканата форма. Електродите се прицврстуваат директно на кожата. Односно, овде не е потребно електродите да се одвојат од кожата со хидровилна газа натопена со физиолошки раствор со цел да не се предизвикуваат штетни ефекти. Овој тип дијатермија се користи за згревање на внатрешните делови на ткивата.

Поради големиот специфичен електричен отпор струјата во овој случај не тече низ коските, па тие не се загреваат. Имено, коскениот дел при дијатермијата се загрева посредно, т.е. со загревање на околното мускулно ткиво. Затоа електричниот модел на овој систем може да се прикаже како на сл. 4. Имено, контактот електрода и кожа може да се прикаже со паралелна врска на омски отпор и капацитивен отпор (сл. 4.б.). На неа кожата претставува бариера со голем омски отпор.

11. Електрофизиологија

Кожата е лош спроводник што ја разделува електродата од внатрешните ткива, па овој систем потсетува на кондензатор. Затоа шемата за овој систем е прикажана со паралелна врска на отпорник (кој одговара на отпорот на кожата) и кондензатор и сериски поврзани три отпорници (кои одговараат на отпорите на масното ткиво и мускулното).

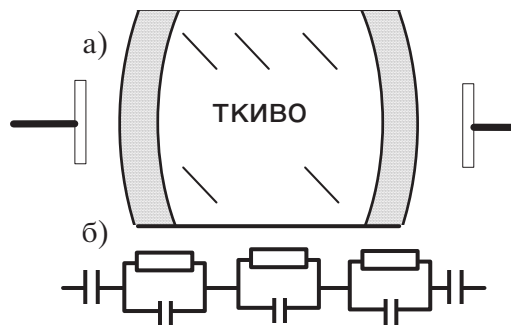


Сл. 4.

Кога низ системот би се пропуштила стационарна струја (која не може да помине низ кондензаторот) најмногу би се загреала кожата. Меѓутоа, за струите со високи фреквенции капацитивниот отпор е релативно мал ($R_c = 1/\omega C$), па, речиси целата струја ќе поминува низ гранката со кондензаторот, а со тоа и ослободената топлина на кожата ќе биде мала (кожата не може да се изгори). Така е исполнета основната цел на дијатермијата да се згреваат само внатрешните ткива и органи без загревање на кожата.

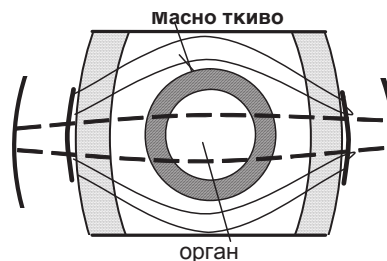
б) При **краткобрановата дијатермија** електродите се рамни метални плочи со релативно мали димензии, кои може да бидат обложени со изолатор чија дебелина е од 1-2 cm. Изолаторскиот слој спречува создавање изгореници на кожата. Ваквата електрода и кожата со изолаторскиот слој меѓу нив преставува кондензатор со релативно мал капацитет (сл.5). Од причини што за оваа дијатермија се користи струја со фреквенција 10-100 MHz, а капацитивниот отпор на овој кондензатор е мал струјата би можела да поминува низ организмот, иако електродите не се во директен контакт со кожата. Оваа дијатер-

мија е позната и под името дијатермија на електрично поле.



Сл.5.

При краткобрановата дијатермија ткивата може да се заменат со паралелна врска на омски и капацитивен отпор. Бидејќи овие два отпора се приближно еднакви низ двете гранки ќе поминува иста иста јачина на струја (сл.3б).

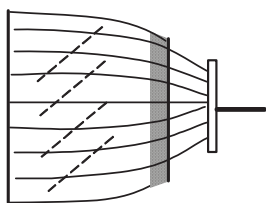


Сл. 6.

При загревање на некој орган кој е опколен со слој на масно ткиво (кое претставува диелектрик во однос на околните ткива, сл. 6) кога се користи долгобранова дијатермија со електроди на кожата електричните силиви линии поминуваат покрај овој орган (на сл.6) полните линии) бидејќи струјата бира пат со помал отпор. Од друга страна при краткобрановата дијатермија високофреквентната струја лесно поминува (испрекинати линии на сл.6) затоашто капацитивниот и омскиот отпор се врзани паралелно.

Бидејќи при краткобрановата дијатермија електродите не се во директен контакт со кожата, полето е хомогено (сл 7), а со тоа се постигнува и рамномерно загревање на пошироко подрачје на организмот.

в) **Микробрановата дијатермија** наместо електроди користи мала диполна антена која емитува електромагнетни бранови чија бранова должина е помала од 0,3 m, а фреквенцијата поголема 1000 MHz. Емитуваните бранови навлегуваат во површинските слоеви до длабочини од 6 cm до 8 cm, а притоа загревањето е за сметка на апсорбираната енергија од електромагнетното зрачење. Во внатрешноста на организмот под дејство на дијатермијата за 20-30 минути, доаѓа до затоплување на ткивата, а така затоплени се задржуваат повеќе часови. Притоа сите структури во организмот не се затоплуваат подеднакво. Најсилно се затоплуваат масните ткива, рбетниот мозок и кожата



Сл.7. Електродата за кратkobранова дијатермија.

Со дијатермијата се постигнува проширување на крвните садови; се намалува вискозноста на крвта со што се подобрува циркулацијата; се забрзуваат процесите на метаболизмот, односно, се подобрува здравствената состојба.

Одредени делови од организмот може да се изложени на загревање и под дејство на високо фреквентно магнетно поле, кое се генерира во спирален спроводник (обложен со дебел изолатор), поставен околу соодветен дел на телото што треба да се загрева. За таа цел се користат Теслини струи со фреквенција од 10 - 15 MHz. Притоа високофреквентните струи, кои поминуваат низ кабелот, создаваат во организмот променливо магнетно поле.

Високофреквентното магнетно поле во организмот е причина за создавање вртложни (*Фуколови*) струи кои својата енергија непосредно ја трансформираат во топлина и ги загреваат соодветните ткива. При повисока фреквенција на магнетното поле, ефикасноста на загревањето е поголема.

3. Примена на високофреквентните струи во електрохирургијата

Топлинското дејство на високофреквентните струи во електрохирургијата се користи при изведување на одредени хирушки зафати. Во електрохирургијата постојат повеќе методи, но заедничко за сите е разорување на ткивото.

Електрокоагулација - е запирање на крвање со високофреквентни струи. Се изведува со рамни или топчести електроди;

Електротомија - е изведување хирушки резови со користење на електроди во вид на тенки игли. При ваквиот хирушки зафат крвање нема, бидејќи со коагулација се затвораат крвните садови;

Фулгурација - е површинска деструкција на ткивото. При деструкција на ткивото се користат две електроди активни (електрода во облик на игла, нож или топче - електрода со мала површина) и пасивни (со голема контактна површина). При иста јачина на приложената електрична струја, кај електродата со помала површина, густината на струјата е поголема. Важи и обратно што може да се види и од следните равенки:

$$J_1 = \frac{I}{S_1}; \quad J_2 = \frac{I}{S_2}; \quad \frac{J_1}{J_2} = \frac{S_2}{S_1}.$$

Десикација - е површинско сушење на ткивото, при што подоцна клетките одумираат. За таа цел се користат иглести електроди.

Прашања, задачи, активности

1. Кои се основните методи на електро-терапија со права струја?
2. Што е тоа физиотерапија со дијадинамични струи ?
3. Што е тоа дијатермија и какви дијатермии постојат?
4. Посочи каде може да се користат високофреквентните струи во хирургијата и опиши го нивното дејство.

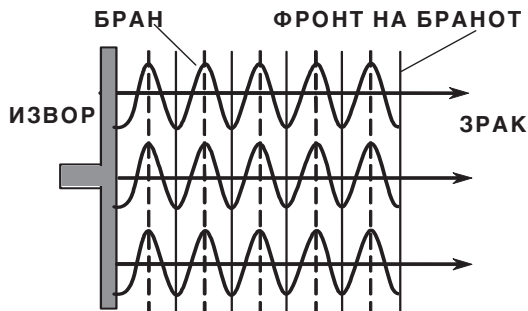
12.1. КОРПУСКУЛАРНО-БРАНОВА ПРИРОДА НА СВЕТЛИНАТА

Видливата светлина според својата физичка природа не се разликува од другите електромагнетни бранови, како на пример, радиобрановите, инфрацрвеното, ултравиолетовото, рендгенското и γ -зрачењето. Основната карактеристична величина на светлинските бранови е нивната фреквенција f . Таа е одредена од светлинскиот извор, не се менува при распространувањето или заемното дејство на брановите. Од друга страна, брановата должина λ се менува во зависност од брзината на простирање на светлината во дадената средина.

Ако светлината во вакуум има бранова должина λ_0 , во некоја средина со индекс на прекршување n , брановата должина е:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} . \quad (1)$$

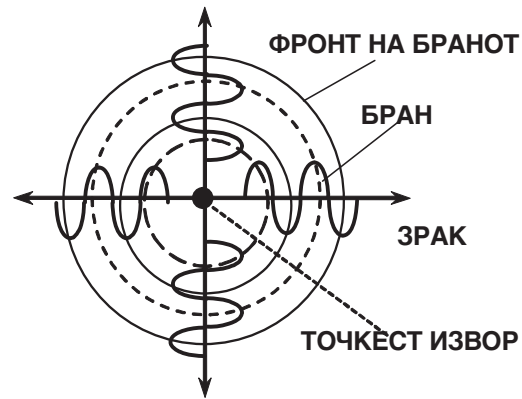
Брановите, како механичките така и електромагнетните, може да се прикажат со помош на **бранова површина**. Тоа е геометриско место на точки, кои во текот на брановиот процес осцилираат со еднакви фази. Брановата површина зависно од формата на изворот, може да биде рамна, сферна или цилиндрична.



Сл. 1. Рамен бран..

Според брановата теорија **зракот на светлината** се совпаѓа со насоката на ширење на бранот и секогаш е нормален на фронт на бранот. Зраците на рамните бранови се паралелни (сл.1), додека зраците, пак, на сферните бранови се шират од изворот радијално (сл.2).

Светлинските зраци со иста енергија, односно фреквенција се монохроматски. Белата светлина е полихроматска, таа е смеса на зраци од монохроматска светлина.



Сл. 2. Сферен бран.

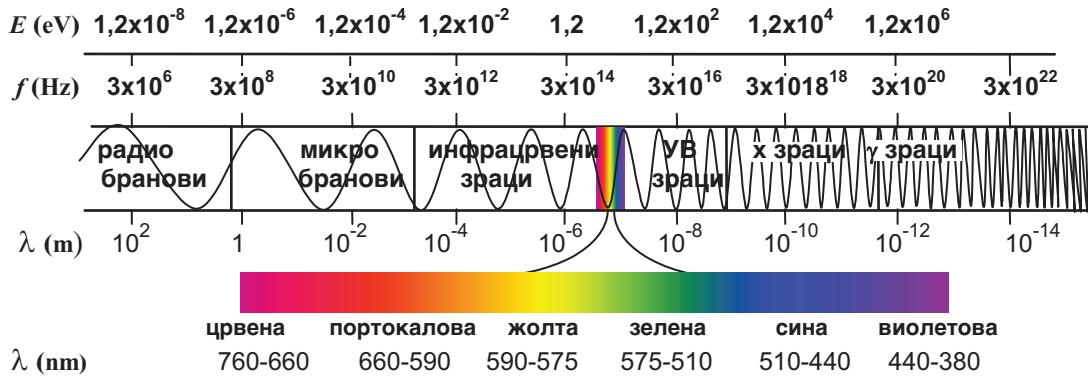
Еден дел на светлинските појави како што се: интерференција, дифракција и поларизација, доста лесно се објаснуваат врз основа на брановата претстава за светлината. Од друга страна, цела низа појави, како што се: зрачењето, апсорпцијата, фотоефектот, Комптоновиот ефект и други може да се објаснат само ако на светлината и се припишат особини на **корпускула - честица**. За да се објаснат овие двојни својства на светлината да се владее и како бран и како корпускула се развија претставите за квантна природа на светлината. Идејата за **корпускуларна претстава** на светлината потекнува уште од Њутн.

М. Планк, во 1901 година ја постави хипотезата за дисконтинуирано зрачење на енергијата. Според Планк, **електромагнетната енергија се зрачи дисконтинуирано во вид на определени порции, наречени КВАНТИ**. Енергијата E на секој квант и неговата фреквенција f се поврзани со равенката:

$$E = hf, \quad (2)$$

каде што $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js е Планкова константа. Брзината на простирање на светлината (или на кое и да било електромагнетно зрачење) е најголема во вакуум и изнесува $c = 3,0 \cdot 10^8$ ms⁻¹.

12. Оптиката



Сл. 3. Електромагнетен спектар.

За секој електромагнетен бран, па и за светлината, врската меѓу фреквенцијата f , брзината на простирање на бранот c и неговата бранова должина λ , е:

$$f\lambda = c. \quad (3)$$

Според тоа, равенката (2) може да се напише:

$$E = \frac{hc}{\lambda}. \quad (4)$$

А. Ајнштајн во 1905 година ја проширил Планковата идеја со тоа што не само зрачењето на светлината туку и нејзиното распространување и апсорпција настануваат во вид на поток на светлински кванти - **фотони**. Фотоните располагаат со своја енергија, маса и импулс. Масата на фотонот е зададена со:

$$m_f = \frac{E}{c^2} = \frac{hf}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}. \quad (5)$$

Односно, масата на фотонот е поголема колку што неговата фреквенција е поголема. На пример, масата на фотонот на видливата светлина со фреквенција $5,4 \cdot 10^{14}$ Hz е $4 \cdot 10^{-36}$ kg, а масата на рендгенските фотони со фреквенција $8 \cdot 10^{18}$ Hz е $4 \cdot 10^{-32}$ kg. Едноставна претстава за фотонот е дека тоа е пакет од бранови чија енергија е толку поголема, колку што е помала брановата должина. Според тоа се дојде до поимот за дуалност на светлината. Имено, **светлината поседува и корпускуларни и бранови карактеристики**.

Ваквиот корпускуларно-бранов дуализам на

светлината денес е познат и кај електроните, неутроните и други микрочестици. Овие својства на честиците и светлината не може да се објаснат преку класичната физика, тие се опишуваат во рамките на **квантната механика**.

Светлинските бранови, радио-брановите, X-зраците и γ -зраците се електромагнетски бранови кои се разликуваат само по фреквенцијата и начинот на добивање. ЕМ бранови се трансверзални бранови и се опишуваат со векторот на јачината на електричното поле \vec{E} кој осцилира по синусен закон во текот на времето и просторот и векторот на магнетната индукција \vec{B} што осцилира со истата фреквенција како електричното поле. Кај ЕМ бранови електричното и магнетното поле осцилираат со еднакви фази. Промената на електричното поле \vec{E} создава промена на магнетната индукција \vec{B} , што доведува до промена на \vec{E} .

Како што е денес познато постојат ЕМ бранови со фреквенција од 10^4 Hz до 10^{21} Hz. Дијапазонот од сите бранови должини претставува **спектар на ЕМЗ**, односно во електромагнетниот спектар се опфатени електромагнетни бранови почнувајќи од радиобрановите ($\lambda \approx 10^3$ m) до γ -зраците ($\lambda \approx 10^{-12}$ m). Од овој широк дијапазон на фреквенции на електромагнетните бранови, само тесен дел имаат способност, паѓајќи врз мрежницата на окото да предизвикуваат осет за вид. Тие одговараат на бранови должини од 400 до 760 nm.

12.2. ИНФРАЦРВЕНО И УЛТРАВИОЛЕТОВО ЗРАЧЕЊЕ

Инфрацрвено зрачење

Во електромагнетниот спектар инфрацрвеното зрачење е меѓу црвената граница на видливата светлина (со бранова должина околу 760 nm) и микробрановите (околу 350 μ m). Инфрацрвените зраци се невидливи за окото на човекот затоа што, како што кажавме, немаат доволно енергија да стигнат до мрежницата на окото и да предизвикаат светлински впечаток. Инфрацрвеното зрачење има силно изразено топлотно дејство.

Постојат разни извори на инфрацрвено зрачење. Околу 50% од електромагнетниот спектар на Сонцето е во оваа област. Еден од изворите кои најчесто се користат е вжарената волфрамова жичка.

Практично сите тела, без разлика на нивната природа, на температура повисока од апсолутната нула целосно зрачат во инфрацрвената област. Разбирливо, на пониска температура зрачењето има поголема бранова должина отколку на повисоките температури.

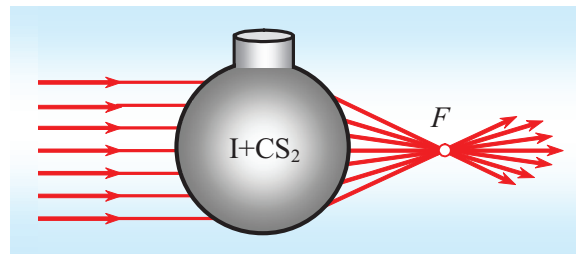
Некои супстанции силно го апсорбираат инфрацрвеното зрачење, а други се напивно провидни за ова зрачење. На пример, водата која е провидна за видливиот дел од спектарот како и за ултравиолетовите зраци скоро напивно го апсорбира инфрацрвеното зрачење. Кварцот ги апсорбира овие зраци со бранова должина над 3000 nm, а солта ги пропушта до 15000 nm. Напивно провидни за ова зрачење се германиумот и силициумот.

За животот на Земјата од посебно значење е способноста на инфрацрвените зраци да поминуваат низ атмосферата. Поминувајќи низ атмосферата, поради процесот на расејување и апсорпција инфрацрвеното зрачење слабеа. Тоа во голема мерка зависи и од нечистотиите во атмосферата. Поради апсорпцијата од водената пареа само мал дел од инфрацрвеното зрачење што го зрачи Земјата ја напушта атмосферата. На тој начин таа игра улога на топлотна изолација која не дозволува ноќе Земјата брзо да се лади.

Инфрацрвените зраци се покоруваат на законите што важат и за свелинските зраци (се прекршуваат, рефлектираат), интерферираат,

трпат дифракција од соодветни препреки). Тоа значи, инфрацрвените зраци може да се фокусираат со огледала или леќи изработени од соодветни материјали. Затоа грејачите на електричните греалки се поставени во фокусот на параболични огледала од полиран лим.

Класичен експеримент, кој ги потврдува овие својства на инфрацрвените зраци, како и тоа, дека средините кои се непровидни за видливите зраци може да се провидни за инфрацрвените зраци, е експериментот на Тиндал, прикажан на сл. 1.



Сл. 1. Експериментот на Тиндал.

Стаклена колба е наполнета со раствор на јод во јаглероден дисулфид. Овој раствор е напивно црн и непровиден за видливата светлина, меѓутоа, го пропушта инфрацрвеното зрачење во широк интервал. Кога колбата е поставена на патот на паралелен сноп светлина добиена од лачна лампа позади колбата на местото F каде се фокусирани инфрацрвените зраци парче црна хартија доста лесно се запалува. Во овој експеримент стаклената колба дејствува како собирана леќа во чиј фокус по законите на геометриската оптика треба да се најде црната хартија за да се запали.

Инфрацрвеното зрачење се користи за испитување структурата на атомите и молекулите. Инфрацрвените апсорпциони спектри се користат за идентификација на супстанции, испитување на молекули како и за проучување на разни интеракции на молекулите. Во прв ред тоа се молекули од органска природа.

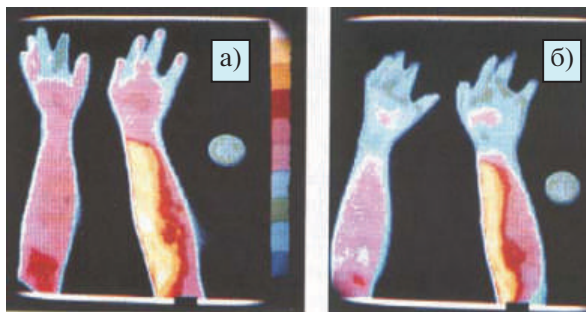
Инфрацрвените зраци наоѓаат широка примена во инфрацрвената фотографска техника. Со нив може да се добијат многу по контрастни фотографии на објекти кои се на големи растојанија. Затоа тие се користат при изучување на планетите, ѕвездите, маглините.



Сл. 2. Инфрацрвена фотографија на атмосферата на Земјата. Потемните облаци се позагреани од посветлите.

Овие својства се користат и во медицината, криминалистиката, астрономијата, техниката, за воени цели итн. Фотографиите со специјална техника може да се прават во целосна темнина (ноќно гледање).

Инфрацрвените ласери се користат за комуникациски врски на Земјата и во Космосот. Инфрацрвените зраци се применуваат за сушење на бои, керамички и други предмети; во прехранбената индустрија за сушење земјоделски производи.



Сл. 3. Термограм на рацете. а) пред, б) по пушење. По пушењето се гледа дека рацете се поладни.

Во медицината инфрацрвените зраци се користат во дијагностиката и терапијата.

Како детектори на инфрацрвеното зрачење не се користат филмови (тие се осетливи за $\lambda < 900 \text{ nm}$), туку термистори, полупроводници чиј отпор силно се намалува со зголемување на температурата, фотодиоди, термоелементи и др. За фотодиодите обично се ко-

ришти InSb или HgCdTe (жива-кадмиум-телур).

Регистрирањето на температурата од даден објект врз база на прецизна детекција на инфрацрвеното зрачење се вика **термографија**. Притоа се добива слика наречена **термограм** (сл.3). Термографијата се користи во воената техника ("ноќно гледање", симање во магла и ноќе на предмети и нивна околина) медицината и други области од науката и техниката.

Инфрацрвено зрачење се користи во инфрацрвена миктоскопија и при изработка на интегрални кола.

Инфрацрвената конверторска цевка или инфрацрвениот телескоп овозможува директно претварање на инфрацрвеното зрачење во видливо. Со него може да се гледаат предмети со висока температура (мотори при работа, предмети на висока температура, загреани цевки на оружје).

Ултравиолетово зрачење

Во електромагнетниот спектар на страната кон помалите бранови должини од 400 nm, па сè до 10 nm е ултравиолетовото зрачење.



Сл. 4. Ултравиолетова слика на површината на Земјата.

Окото го апсорбира ова зрачење кое, иако има енергија поголема од инфрацрвеното зрачење, не може да стаса до мрежницата и да предизвика светлински впечаток. Веќе блискиот ултравиолет е невидлив за поголем број луѓе. Оваа област може да се регистрира со

помош на флуоресцентен екран (од цинк сулфид). Екранот и по виолетовиот дел свети со зелено-синкава боја.

Извори на ултравиолетово зрачење се лачните ламби, високо загреани метали при бело светење, а постои и ласерско зрачење во оваа област. Исто така, поголемиот дел од спектарот на живата е во оваа област, па затоа живините лампи се користат во медицината за дезинфекција на простории.

Обичното стакло ја апсорбира ултравиолетовата светлина со бранова должина под 315 nm, додека кварцното стакло ја пропушта до 180 nm. Под дејство на ултравиолетово зрачење флуоресциот и ураниумовото стакло флуоресцираат со карактеристична зелена боја. Раствор од кинин сулфат и петролејот флуоресцираат со сина боја. Затоа се користат во флуоресцентната микроскопија. Ултравиолетовото зрачење се користи во криминологијата (за утврдување лажни банкноти) во археологијата (слабо видливи текстови премачкани со луминисцентни материјали кога ќе се осветлат со ова зрачење се читаат). Ултравиолетово зрачење се користи кај луминисцентни ламби со кои се добива "дневна" светлина. Со луминисцентна анализа се определува содржината на некои супстанции.

При спектроскопските проучувања со ултравиолетовото зрачење бидејќи тоа се апсорбира од воздухот и стаклото се користат вакуум спектрографи со призми од флуорит или дифракциони мрежички.

Законите на апсорпција важат и за ултравиолетовите зраци. Преку ултравиолетовите спектри на атомите и молекулите се добиваат сознанија за градбата на надворешните електронски слоеви на атомите, како и сознанија за хемиските врски и структурата на молекулите. Ултравиолетовата апсорпциона спектроскопија во медицината и биологијата се користи често затоа што е брза и прецизна.

Ултравиолетовото зрачење има фотохемиското дејство, може да предизвика големи промени на фотографската емулзија. При апсорпција на ова зрачење кај молекулот на ДНК настанува кинење на водородните врски и цепање на двојната спирала. Под дејство на интензивно ултравиолетово зрачење може да дојде до разорување на ткивата. Затоа ултра-

виолетовите зраци се користат за стерилизација. Меѓутоа, малите дози од блискиот ултравиолет предизвикуваат само пигментација на кожата и се корисни. Така лекувањето на рахитичните заболувања со ова зрачење е како резултат на создавање D-витамин. Треба да се знае дека најпогодно време за сончање е кога атмосферата не е презагреана и презаситена со водени пари.

ФИЗИКАТА И ЕКОЛОГИЈАТА

За живиот свет главен извор на ултравиолетово зрачење е Сонцето. Од Сонцето на површината на Земјата иде ултравиолетово зрачење со бранова должина $\lambda > 290$ nm, а помалите бранови должини се апсорбирани од атмосферата. Затоа ова зрачење е поголемо на високите планини.

При заемнодејство на ултравиолетовото зрачење со кислородот од горните слоеви на атмосферата (стратосферата) се создава озон (O_3). Озонот силно го апсорбира штетното ултравиолетово зрачење од Сонцето и е заштита на живиот свет на Земјата.

Последниве години, како резултат на преголемо користење на супстанции кои го уништуваат стратосферскиот озон, на пример, фреонот кој се користи во разладни уреди и за некои спрејови, не само што се намали дебелината на озонскиот слој туку и се создадоа "озонски дупки" (особено над Антарктикот).

Прашања, задачи и активности

1. Зошто помеѓу дневната и ноќната температура на Месечината постои голема разлика?
2. Која е разликата помеѓу ултравиолетовото и инфрацрвеното зрачење?
3. Дали инфрацрвените и ултравиолетовите зраци се покоруваат на законите на геометриската оптика што важат и за светлинските зраци. Наведете некои примери.
4. Зошто не може да поцрните ако се сончате зад прозорско стакло?
5. Каде интензитетот на ултравиолетовите зраци од сончевото зрачење е најголем: на морската шир, на планинските врвови, во Космосот?

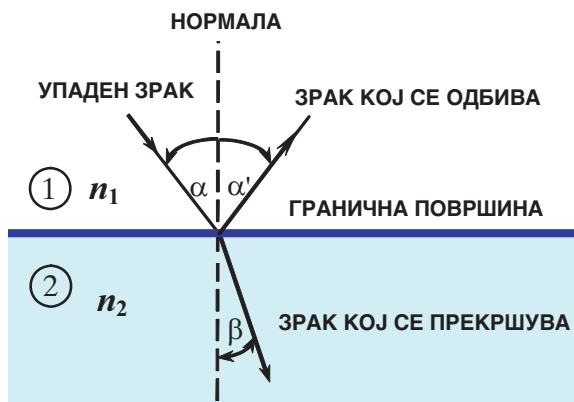
12.3. ОСНОВНИ ЗАКОНИ НА ГЕОМЕТРИСКАТА ОПТИКА

Геометриската оптика е изградена врз следниве основни закони и принципи: закон за праволиниско ширење на светлината во оптички хомогена средина, закон за независно ширење на светлинските зраци, закон за прекршување и рефлексија на светлината и принцип за обратен од или инверзија на светлинските зраци.

Законот за праволиниско ширење на светлината гласи: светлината низ хомогена и изотропна средина се шири праволиниски. Овој закон важи, само ако димензиите на отворите или препреките се многу поголеми или неспоредливи со брановата должина на светлината. Ако тоа не е случај, светлината се отклонува од праволиниското ширење.

Законот за независно ширење на светлинските зраци гласи: ако во дел од просторот истовремено се шират повеќе зраци, ширењето на секој од нив не му пречи на ширењето на другиот зрак и обратно.

Закон за рефлексија и прекршување. - Ако светлински сноп од паралелна и монохроматска светлина паѓа под агол α во однос на нормалата, издигната од точката на паѓање врз граничната површина на две различни оптички средини, средина 1 и средина 2, дел од упадната светлина се рефлектира во средината 1 под агол α' , а дел поминувајќи во средината 2 се прекршува (рефрактира) под агол β , (сл. 1).



Сл. 1.

Аголот α под кој зракот паѓа е еднаков со аголот α' што светлинскиот зрак што се рефлектира го гради со нормалата издигната од точката на паѓање врз граничната површина:

$$\alpha = \alpha', \quad (1)$$

Кога светлината поминува низ две средини со различна природа, на границата меѓу двете средини се менува правецот на светлинскиот зрак. Се вели дека при премин од една во друга средина светлината се прекршува (сл. 1).

Законот за рефлексија и прекршување гласи: *зракот под кој светлината паѓа врз разделната површина меѓу две различни по природа средини, зракот под кој се одбива, зракот кој поминува во втората средина и нормалата на граничната површина издигната од точката во која зракот паѓа, лежат во иста рамнина.*

Аголот (α) под кој зракот паѓа и аголот (β) под кој зракот се прекршува и навлегува во втората средина, мерени од нормалата во точката на паѓањето, се сврзани со т.н. Снелиус-Декартов закон:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \text{const}. \quad (2)$$

каде што со v_1 и v_2 се означени брзините на светлината во средината 1, односно во средината 2. Количникот од брзината на светлината во вакуум и брзината низ произволна оптичка средина се вика **апсолутен индекс на прекршување**. Ако брзината на ширење на светлината во вакуум се означи со c , во тој случај за двете средини, кои имаат апсолутен индекс на прекршување n_1 и n_2 , соодветно може да се напише: $n_1 = c/v_1$, $n_2 = c/v_2$. Со делење на последните две равенки, се добива:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (3)$$

каде што $n_{2,1}$ е **релативен индекс на прекршување на втората средина во однос на првата**. На пример, апсолутниот индекс на прекршување на водата за бранова должина $\lambda = 589$ nm (жолта натриумова линија) е 1,33.

Средина со повисоки вредности на апсолутниот индекс на прекршување е **оптички погуста**. Според тоа, при прекршување на свет-

линскиот сноп од оптички поретка во оптички погуста средина ($n_2 > n_1$) доаѓа до приближување на зракот кон нормалата $\beta < \alpha$ што следува и од равенката (3), а кога $n_2 < n_1$ зракот се оддалечува од нормалата $\alpha < \beta$.

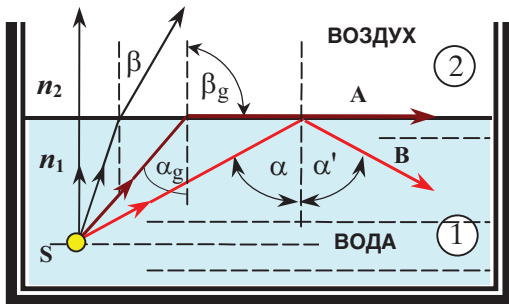
Принципот за обратен од или инверзија на светлинските зраци гласи: ако се промени насоката на распространување на светлинските зраци, тие ја следат истата траекторија.

12.4. ТОТАЛНА РЕФЛЕКСИЈА Ендоскоп

Тотална рефлексција на светлината настанува при нејзиното простирање од оптички погуста во оптички поретка средина кога упадниот агол е поголем од определена вредност. На пример, за вода-воздух тотална рефлексција настанува кога упадниот агол ќе надмине вредност од $48^\circ 35'$.

Кога врз граничната површина меѓу оптички погуста и оптички поретка средина паѓа дивергентен сноп од зраци, како што е прикажано на сл. 1, еден дел од зраците за кои $\alpha < \alpha_g$, се прекршуваат и во поретката средина, притоа оддалечувајќи се од нормалата.

Ако упадниот агол α расте, аголот на прекршување β расте побрзо. Во такви услови најголема можна вредност што може да ја добие аголот β е 90° . Упадниот агол, за кој прекршениот зрак се лизга по граничната површина, (зракот А), се вика граничен агол или **агол на тотална рефлексција** α_g (сл.1).



Сл. 1. Тотална рефлексција настанува за агли

поголеми од граничниот агол $\alpha > \alpha_g$.

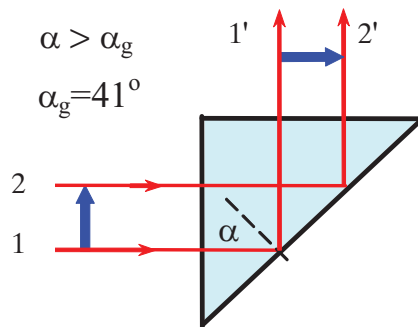
За агли $\alpha > \alpha_g$ упадната светлина целосно се рефлектира (зракот В, сл. 1). За такви агли нема поминување на светлината во оптички поретката средина. Таа појава е наречена **тотална рефлексција**.

Вредноста на граничниот агол α_g зависи од индексот на прекршување на двете средини. Граничниот агол α_g се определува од Снелиус-Декартовиот закон ако во него се $\beta_g = 90^\circ$, односно $\sin \beta_g = \sin 90^\circ = 1$:

$$\frac{\sin \alpha_g}{\sin \beta_g} = \frac{\sin \alpha_g}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}; \sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

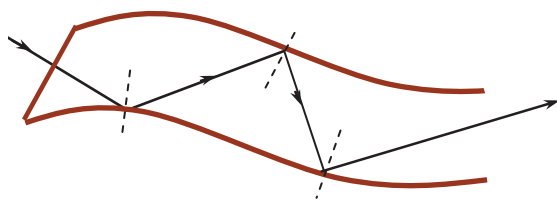
На пример, ако средината 1 е стакло со индекс на прекршување 1.52, средината 2 воздух со индекс на прекршување 1.00, тогаш граничниот агол за границата стакло-воздух изнесува $\alpha_g = 41^\circ$.

Затоа при упаден агол $\alpha > 41^\circ$ на границата стакло-воздух секогаш има тотална рефлексција. Појавата тотална рефлексција на светлината, е искористена кај различни призми чија намена е да ги отклонат зраците за 90° (сл. 2), 180° или други износи на агли, како што се, на пример перископите.



Сл. 2. Правоаголна призма за тотална рефлексција

Тотална рефлексција може да се набљудува ако светлински зрак се издвои со кружна дијафрагма и се упати да паѓа во оската на отворот на еден сад низ кој истекува водата зракот го продолжува патот во млазот следејќи ја неговата кривина.



Сл. 3. Распространување на светлински зраци низ оптичко (фибер) влакно

Тоталната рефлексija на светлината се користи кај имерзионите микроскопи, при конструкционата изведба на некои оптички инструменти, како на пример, кај Абеовиот рефрактометар со кој се мери индексот на прекршување на течности итн.

Кај **оптичките влакна** (фибер), (сл. 3) настанува тотална рефлексija на светлината. Тие претставуваат тенки влакна (дијаметар од околу $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$), направени од оптички просирен материјал (некој диелектрик, на пример стакло, полимер и др.) низ кој може да се распространува светлината. Внатрешноста на оптичкото влакно, обично, е направена од кварцно стакло или некој полимер, а површината им е прекриена со тенок слој од друг вид стакло со помал индекс на прекршување.



Сл. 4. Сноп од оптички влакна.

Оптичките влакна се користат исклучиво во снопови (сл. 4), притоа секое поединечно влакно ја пренесува сликата од мал дел на предметот што се набљудува.

Кога светлината паѓа во оптичкото влакно под агол поголем од α_g претрпува многукратни рефлексии и така се распространува по

неговата должина (сл.3). Притоа со оптичките влакна може да се искривува патот на светлинскиот сноп.



Сл. 5. Ендоскоп.

Во медицината оптичките влакна се користат за конструкција на *ендоскопи*.

Ендоскопот (сл. 5) е специјален прибор кој овозможува визуелен пристап до внатрешните органи (дишните патишта-бронхоскоп, дигестивниот тракт - гастроскоп, ларингоскоп, делови од крвотокот). Тој се состои од извор на светлина (He-Ne ласер) и два снопа од рамномерно распоредени оптички влакна поставени во заедничка цевка. Обично едниот сноп служи за осветлување на испитуваниот орган и се состои од околу 6 000 влакна, додека другиот сноп е за пренос на сликата и е изграден од околу 8 000 влакна.

Оптичките влакна наоѓаат широка примена кај интегралната оптика за кодирање и пренос на информации, за поврзување на компјутерските терминали итн. Се смета дека ретината на окото е најсложената високоорганизирана влакнооптичка структура, составена е од 10^8 просирни влакна.

ПРАШАЊА И ЗАДАЧИ

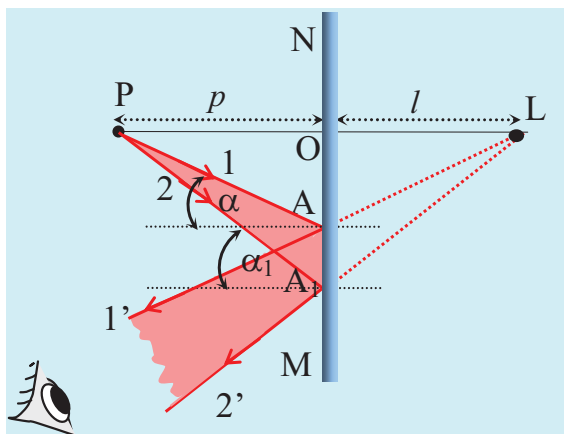
1. Кога настанува тотална рефлексija?
2. Дали сте забележале тотална рефлексija во природата околу нас?
3. Што се тоа фибер влакна и каде наоѓаат примена?

12.5. РАМНО ОГЛЕДАЛО

Лик на рамно огледало

Од големиот број оптички елементи кои нашле многу широка примена во обичниот живот и во науката, наједноставен е рамното огледало.

Рамното огледало претставува идеално рамна (полирана) површина на некои метали (сребро, алуминиум, хром или никел) која поголемиот дел од упадната светлина ја рефлектира (до 96%). Се остварува и со нанесување на тенок слој на погоре спомнатите метали врз рамна стаклена плочка, што е и најчест случај на фабрикација на рамните огледала,



Сл.1.

Да претпоставиме дека површината MN претставува рамно огледало (сл. 1). Нека пред огледалото се наоѓа некој точкест извор на светлина (предмет) означен со P од кој паѓаат повеќе зраци врз огледалото. Одделуваме радијален сноп светлина чии гранични зраци ги означивме со 1 и 2. Секој од зраците на снопот при паѓањето на огледалната површина се рефлектира според законот за рефлексија. Лесно може да се уочи дека и рефлектираниот сноп кој граничи со зраците 1' и 2' исто така е радијален и тоа така како да излегува од точката L која се наоѓа зад огледалото. Оваа точка во која се сечат продолженијата на рефлектираните зраци претставува **лик на предметот** P. Ликот не може да се фати на екран, и е добиен со продолженија на реалните реф-

лектирани зраци. Така добиениот *лик е имагинарен*.

Напоменуваме дека ние на цртежот нацртавме само дел од зраците кои тргнуваат од точкестиот извор P. Се разбира од него на огледалото паѓа бесконечен број зраци. За добивање на ликот на точкестиот предмет, доволно е да се нацрта патот на само два зрака.

Од сликата јасно се гледа дека оддалеченоста на предметот до огледалото p е еднакво на оддалеченоста на ликот до огледалото l .

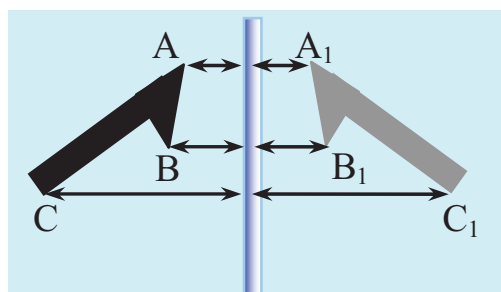
Ова тврдење го потврдува и следнава анализа: триаголникот POA е складен со триаголникот OLA. Ако е така тогаш е:

$$\frac{|PO|}{|OA|} = \frac{|OL|}{|OA|} \quad \text{или} \quad |PO| = |OL|$$

што укажува дека

$$p = l \quad (1)$$

Ако знаеме како се добива лик на една точка, лесно може да се конструира и лик на положен предмет. Кај геометриски правилни тела доволно е да се определат ликовите на карактеристичните точки на предметот. При тоа се користи фактот дека оддалеченоста на ликот на која и да било точка од огледалото, е еднаква со нејзината оддалечност од огледалото. Еден пример на така добиен лик е даден на сл. 2.



Сл. 2

Преку овој, и многу други примери, може да се заклучи дека *големината на ликот кај рамното огледало е еднаква на големината на предметот*.

Пример на рамно огледало претставува и мирната површина на водата (сл. 3).



Сл. 3

Сликата во рамното огледало се разликува од предметот само во една особеност: левата страна на предметот станува десна страна на ликот. Тоа убаво се гледа кога некој што стои пред огледалото ќе ја крене раката. Оваа појава, левата страна во огледалото да стане десна, се вика **огледална симетрија**.

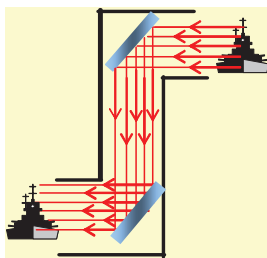


Сл. 4

Занимливо е дека во градбата на некои биолошки молекули во живите организми може да се најде огледална симетрија.

Тој факт науката сè уште не го објаснила.

Примена на рамно огледало



Сл.5.

Покрај вообичаената домашна примена, рамното огледало наоѓа голема примена во низа оптички уреди, односно секаде каде што со помош на рефлексija треба да се заврти даден

светлински сноп за определен агол. Еден од таквите уреди е и перископот (сл.5)

Рамните огледала исто така се користат кај уредите кај кои треба да се измерат мали агли. Такви се, на пример, галванометрите со огледала или торзионите терезии за прецизно мерење на сили. При мерењето на мали агли се користи светлосен зрак (денес е за тоа погоден лазерот) кој се пушта да паѓа врз огледалото. Зракот по рефлексijата се набљудува на големо растојание. При мало завртување на огледалото насочениот сноп на екранот се рефлектира за значајни поместувања. Тука доаѓа до израз и фактот дека кога огледалото ќе се заврти за одреден агол ϕ аголот на рефлектираниот сноп е 2ϕ . Значи *аголот на свртување на рефлектираниот зрак два пати е поголем од аголот на свртување на огледалото*.

Прашања, задачи, активности

1. Свртете една страница на некоја книга кон рамното огледало, дали можете да го читате текстот?
2. Објаснете зошто аголот на свртување на рефлектираниот зрак е два пати поголем од аголот на свртување на огледалото.
3. Вие сакате да направите фотографија додека стоите пред рамното огледало. На кое растојание треба да ја подесите острината на вашиот фотоапарат за да добите добра слика?
4. Поставете две рамни огледала под прав агол а меѓу нив поставете свеќа, Колку ликови добивате? Колку ликови на свеќа ќе добиете ако двете огледала ви се паралелни, а свеќата е меѓу нив?
5. Ако дете се доближува до огледалото со брзина $0,5 \text{ m/s}$, колкава е брзината на неговиот лик: а) во однос на огледалото; б) во однос на детето?

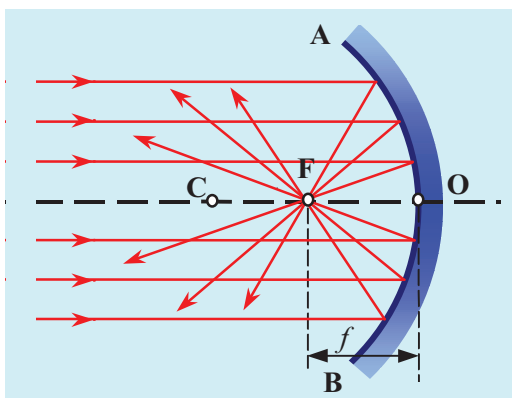
Кратко резиме

- Рамна глатка површина од која светлината се одбива претставува рамно огледало.
- Ликот кај рамното огледало е имагинарен, поставен на еднакво растојание како и предметот и еднаков на неговата големина.
- Кај ликот на огледалото и предметот важи огледалната симетрија

12.6. СФЕРНИ ОГЛЕДАЛА

Сферните огледала се делови од сферни површини кои правилно ги рефлектираат светлинските зраци. Според обликот на сферната површина од која се рефлектираат зраците, огледалата може да бидат вдлабнати (**конкавни**) и испупчени (**конвексни**).

На секое сферно огледало (сл.1), се разликува: **оптички центар на огледалото** C - тоа е центарот на сферата од која е добиено огледалото; **отвор на огледалото** - тоа е тетивата AB ; **теме на огледалото** O - тоа е највдлабнатата, односно најиспупчената точка на сферната површина (тоа е и средината на огледалото); **главна оптичка оска** - тоа е правата што минува низ оптичкиот центар и темето на огледалото.

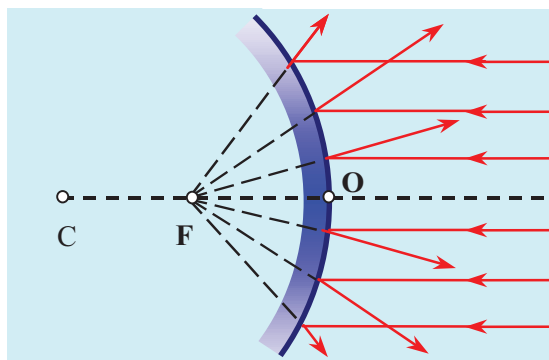


Сл. 1. Конкавно огледало

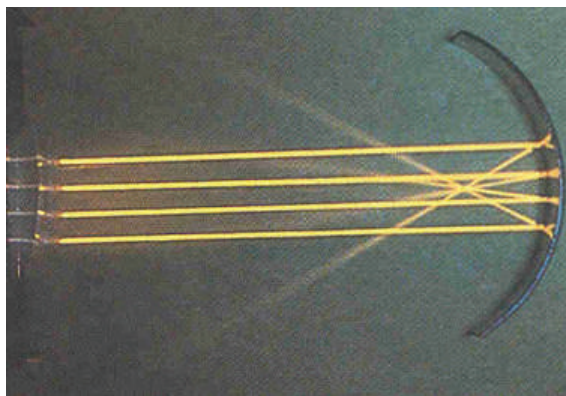
Ако на **конкавно** огледало паѓа сноп од зраци паралелни со оптичката оска, тие се рефлектираат така што сите поминуваат низ точката F . Оваа точка лежи на оптичката оска и го дефинира **фокусот** F на огледалото. Растојанието $f = FO$ е **фокусното растојание** на огледалото.

Кај **конвексните** огледала фокус е точката во која се сечат геометриските продолженија на рефлектираните зраци. Имено, сноп од зраци паралелни со оптичката оска, по рефлексијата од конвексно огледало дивергираат. Продолженијата на сите зраци од дивергентниот сноп се сечат во фокусот што

се наоѓа зад конвексното огледало (сл.2).



Сл. 2 Конвексно огледало



Сл. 3. Слика на паралелен сноп зраци што се сечат во фокусот.

За сферно огледало, кога зраците паѓаат близу до темето O , фокусното растојание е:

$$f = \frac{R}{2}, \quad (1)$$

односно фокусот е на средина помеѓу темето и центарот на кривината на огледалото.

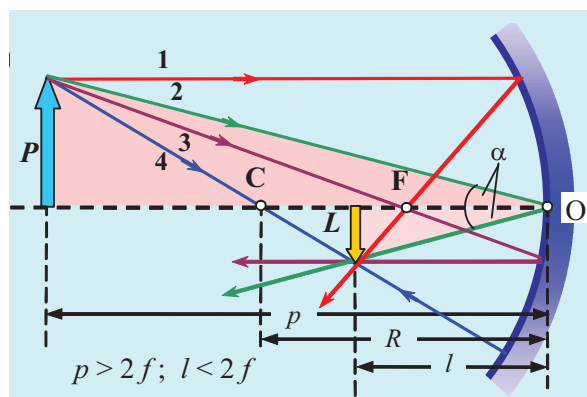
Формирање ликови кај сферно огледало. Равенка на огледало

При конструкцијата на ликови со помош на сферно огледало, најчесто се доволни два зрака со познат пат кои поминуваат низ иста

точка. Ликот на таа точка се добива во пресечната точка на тие два зрака. Ако ликот се добива во пресек на рефлектираните зраци, тогаш тој е реален, а кога се добива во геометриско продолжение на одбиените зраци, ликот е имагинарен.

Секогаш е познат патот на следниве карактеристични зраци (види сл.4).

1. Зракот што паѓа кон огледалото паралелно со оптичката оска по одбивањето поминува низ фокусот.
2. Зракот што паѓа под агол α на темето O на огледалото се одбива под ист таков агол.
3. Зракот што поминува низ фокусот по одбивањето е паралелен со оптичката оска.
4. Зракот што поминува низ оптичкиот центар C , бидејќи е нормален на површината на сферата, по одбивањето, се враќа по истиот пат.



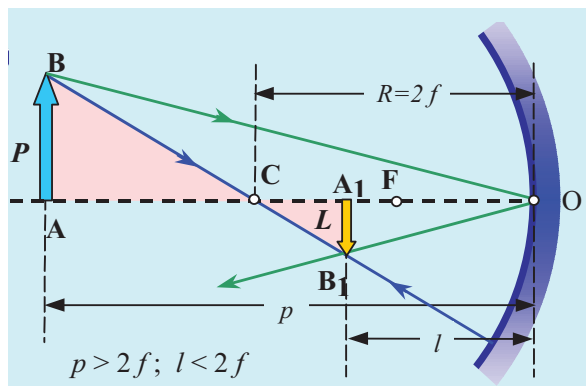
Сл. 4.

Зголемувањето M на огледалото се добива како количник од линеарните димензии на ликот L и линеарните димензии на предметот P . Од сличноста на триаголниците $\triangle OAB$ и $\triangle OA_1B_1$ на сл. 5. следува дека:

$$M = \frac{L}{P} = \left| \frac{l}{p} \right|, \quad (2)$$

каде што l и p соодветно се одалеченоста на ликот и предметот од темето на огледалото.

Врската помеѓу фокусното растојание f , растојанието на предметот и ликот од огледалото е зададена со **равенката на огледалото**. За да се добие аналитички израз на спомнатата равенка, да се послужи́ме со сл, 5.



Сл. 5. Добивање реален лик со конкавно огледало

Од сличноста на триаголниците $\triangle OAB$ и $\triangle OA_1B_1$ следува:

$$\frac{L}{P} = \frac{l}{p}. \quad (3)$$

а од сличноста на триаголниците $\triangle CAB$ и $\triangle A_1B_1C$ следува:

$$\frac{L}{P} = \frac{2f - l}{p - 2f}. \quad (4)$$

Со изедначување на десните страни на равенките (3) и (4) и по средувањето се добива:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f}, \quad (5)$$

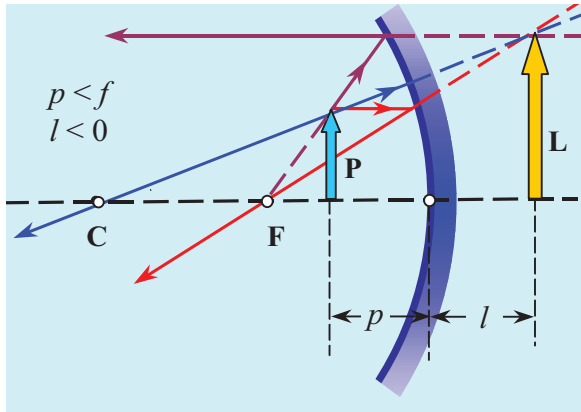
или имајќи ја предвид равенката (1), се добива:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{l} = \frac{2}{R}. \quad (6)$$

Со формулите (5) и (6) е прикажана **равенката на сферно огледало**.

Кај сферните огледала по договор ќе земеме:

- p и l - **ПОЗИТИВНО** (+) предметот е пред огледалото (реален предмет- слика);
- l е **НЕГАТИВНО** (-) ликот е зад огледалото (имагинарна слика);

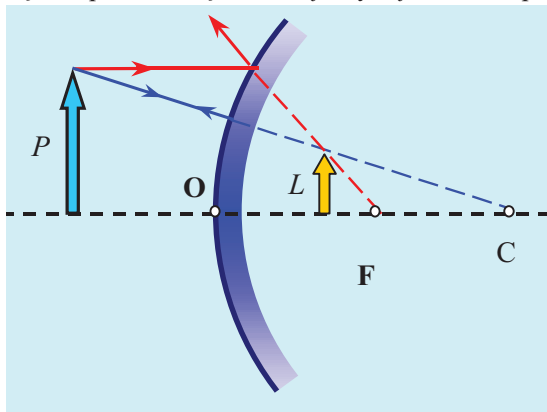


Сл. 6. Добивање зголемен лик на предмет со вдлабнато (конкавно) огледало

- f и R се **ПОЗИТИВНИ** (+) центарот на кривината е пред огледалната површина (конкавно огледало);
- f и R се **НЕГАТИВНИ** (-) центарот на кривината е зад огледалната површина (конвексно огледало).

Анализирајќи ги растојанијата p и l , се добиваат следниве заклучоци:

1. предметот е на растојание поголемо од R , односно $2f$. Од равенката (5) следува: штом $p > 2f$, мора и $l < 2f$. Во тој случај, ше-



матски прикажан на сл.5, ликот е реален, превртен и намален и на помало растојание од огледалото во однос на предметот ;

2. предметот е во центарот на огледалото ($p = 2f$). Од равенката (5) следува дека и $l = 2f$. Ликот во однос на предметот е реален превртен, еднаков по големина (зголемувањето е $M=1$) ;

3. ако $p < 2f$ од равенката (5) следува дека $l > 2f$, а со тоа и $M > 1$. Во тој случај ликот е зголемен, реален и превртен;

4. предметот е во фокусот ($p = f$), Од равенките (5) и (2) се добива $l = \infty$ и $M = \infty$. Од овие податоци се заклучува дека кога предметот е во фокусот на огледалото, ликот е бескрајно далеку, што значи не се добива лик;

5. предметот е помеѓу фокусот и темето на огледалото, $p < f$ (така стоматологот ќе го постави огледалцето со кое ги прегледува забите). Од равенката (5) следува дека l е со негативен предзнак, што значи дека ликот е на спротивната страна на огледалото во однос на предметот. Од сликата 6 и шематскиот приказ се гледа дека во таков случај ликот е зголемен, испрвен и имагинарен;

6. на сликата 7 е прикажана конструкцијата на имагинарен лик на предметот, добиен со конвексно огледало. Кај овие огледала, кога предметот е пред огледалото, независно од тоа каде е поставен, ликот секогаш е имагинарен, испрвен, намален и се наоѓа меѓу фокусот и темето на конвексното огледало.

Сферните огледала се користат кај направи за осветлување, како на пример, кај



Сл. 7. Оптичка шема и фотографија за добивање на лик на предмет со испакнато сферно огледало.

микроскопот: во медицината за набљудување грло, нос, уво и око; за конструкција на оптички инструменти; кај рефлекторите и фаровите за да се добие паралелен сноп светлина. Бидејќи на малата површина од испупченото огледало може едновременно да се видат намалени ликови на голем број предмети, тие се поставени на кривините на сообраќајниците, на автомобилите и други транспортни средства за постигнување подобра безбедност во сообраќајот.

ПРИМЕР 1. Конкавно огледало има фокусно растојание 10 cm. Каде ќе биде ликот на предмет кој од темето на огледалото е поставен (а) 25 cm, (б) 10 cm, (в) 5 cm.

Да се определи зголемување на огледалото.

Решение: а) Според условот $f=10$ cm и $p=25$ cm од равенката за сферно огледало $\frac{1}{p} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f}$

$$\text{се добива: } \frac{1}{25,0} + \frac{1}{l} = \frac{1}{10,0}$$

$$l = 16,7 \text{ cm}$$

Зголемувањето според (2) изнесува:

$$M = \frac{l}{p} = \frac{16,7}{25,0} = 0,668$$

Ликот е намален и превртен во однос на предметот.

б) Според условот $f=10$ cm и $p=25$ cm од равенката за сферно огледало (5) се добива:

$$\frac{1}{10,0} + \frac{1}{l} = \frac{1}{10,0}$$

$$l = \infty$$

в) $\frac{1}{5,0 \text{ cm}} + \frac{1}{l} = \frac{1}{10,0 \text{ cm}}$

$$l = -10,7 \text{ cm}$$

Знакот минус покажува дека ликот е имагинарен и е од иста страна со предметот. Зголемувањето изнесува:

$$M = \frac{l}{p} = \left| \frac{-10,0}{5,0} \right| = 2$$

M покажува дека ликот е два пати поголем од предметот.

Прашања, задачи, активности

1. Како предмет земете еден квадрат и поставете го помеѓу фокусот и оптичкиот центар. Дали повторно ќе добивте квадрат. (Тоа ви покажува зошто ликовите на фотографијата 7 е деформиран).

2. Свеќа се наоѓа на 60 cm од темето на вдлабнато сферно огледало. Кога свеќата ќе се помести за 20 cm кон огледалото, растојанието на ликот до огледалото ќе се зголеми за 10 cm. Да се определи фокусното растојание и радиусот на кривината на огледалото R .

(Одговор: $f=20$ cm, $R=20$ cm)

3. Сноп од сончева светлина паѓа на конкавно огледало и одбивајќи сè, се собира во точка која е на растојание 35 cm од огледалото. Колкав е радиусот на кривината на огледалото?

(Одговор: 70 cm)

4. Предмет со висина 3 cm е поставен на растојание 8 cm од темето на конвексно огледало. Да се определи: а) каде ќе биде имагинарниот лик; б) зголемување и големината на ликот. Фокусното растојание на огледалото е 20 cm.

$$(l = -5,71 \text{ cm}, M = 0,286, L = 3 \cdot M = 0,858 \text{ cm})$$

5. Хартловата плоча (веќе опишана во учебникот за VIII одделение) може да ја искористите за добивање дивергентен или конвергентен сноп на светлински зраци со помош на сферни огледала.

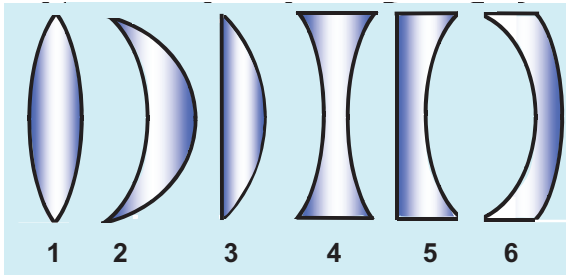
1. Со користење на упатството на програмата PEARLS и упатството изработено од членовите на Темпус проектот - Скопје, 2001 од Институтот за физика во одделот Оптика, проучете ги "Сферни огледала".

2. Побарајте ги соодветните содржини и во програмата "OPTICS PHENOMENA"

12.7. ОПТИЧКИ ЛЕЌИ

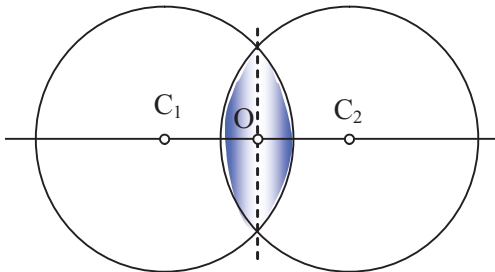
Оптичките леќи се провидни тела ограничени со две, најчесто сферни површини или едната од двете површини е сферна или цилиндрична, а втората сферна или рамна.

Леќите се делат на **собирни** и **растурни**. Според надворешната форма леќите може да бидат: 1) двојно испупчени, 2) испупчено-вдлабнати, 3) рамноиспупчени, 4) двојно-вдлабнати, 5) рамновдлабнати и 6) вдлабнато-испупчени (сл.1).



Сл. 1. Видови собирни и растурни леќи.

Ако дебелината на леќата е многу помала во споредба со радиусите на кривина на површините кои ја ограничуваат, таа претставува модел за **тенка леќа**. Замислената права која ги поврзува центрите на кривина на леќата се вика **главна оптичка оска** (C_1OC_2). За секоја тенка леќа постои **оптички центар на леќата** O (сл.2). Тоа е точка која лежи на главната оптичка оска, и низ неа светлинските зраци поминуваат без прекршување.



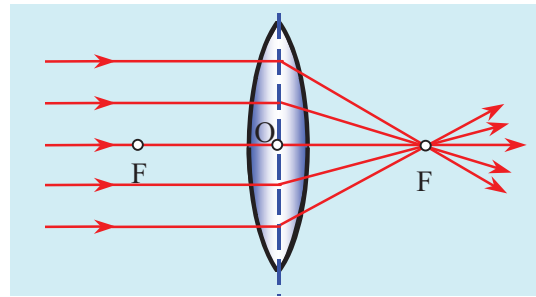
Сл.2.

Нека со p и l соодветно е означено растојанието од предметот до оптичкиот центар на леќата и од ликот до оптичкиот центар; R_1 и R_2 се радиуси на кривина на предната и задната

сферна површина на леќата, n е индекс на прекршување на материјалот од кој е направена леќата.

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{l} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (1)$$

Од оваа равенка може да се заклучи дека фокусното растојание зависи од релативниот индекс на прекршување на леќата како и од радиусите на кривина на нејзините сферни површини. Равенката (1) се однесува за случај кога леќата со индекс на прекршување n е опкружена со вакуум или воздух.



Сл. 3.

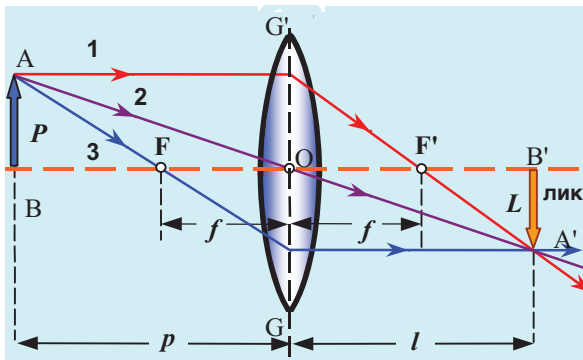
Ако се земе изворот да е бесконечно далеку, зраците паѓаат паралелно со оптичката оска на леќата I по прекршувањето од леќата минуваат низ точката F ($p = \infty, l = f$). Во овој случај растојанието $OF=f$ се вика **фокусно растојание на леќата** (сл.3). Точките кои лежат од двете страни на леќата, на растојание еднакво на фокусното, се викаат **фокуси на леќата**. Важи и обратното ако изворот е во фокусот по прекршувањето од леќата зраците се паралелни, ликот се наоѓа во бескрајност ($p=OF=f$ и $l = \infty$). Земајќи го тоа предвид, од равенката (1) се добива:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2)$$

Бидејќи десните страни на равенките (1) и (2) се еднакви, **равенката за тенка леќа гласи:**

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f}. \quad (3)$$

12. Оптичка



Сл. 4. Формирање лик со собирана леќа.

Кај леќите како и кај сферните огледала по договор ќе земеме:

p е позитивно (+) ако предметот е пред леќата,

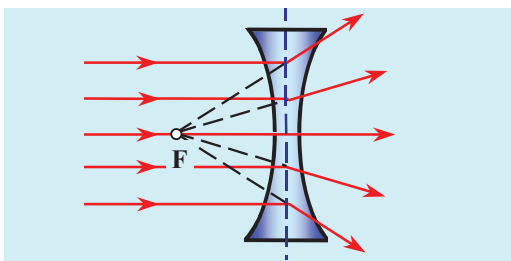
l е позитивно (+), ликот е реален и е зад леќата (од различна страна со предметот),

l е негативно (-) ликот е од истата страна со предметот.

Од сличноста на триаголниците ABO и $A'B'O$ (сл.4), следува:

$$M = \frac{L}{P} = \frac{|l|}{p} . \quad (4)$$

Количникот од линиските димензии на ликот L и линиските димензии на предметот P се вика **линиско зголемување на леќата M** .



Сл. 5.

Сноп од паралелни зраци којшто е паралелен со оптичката оска по поминување низ растурната леќа дивергира (сл. 5). Во продолжението на зраците од дивергентниот сноп се добива пресечна точка F која лежи на оптичката оска. Оваа точка го дефинира има-

гинарниот (нереален) фокус на растурната леќа. **Растурните леќи имаат негативно фокусно растојание.**

ПРИМЕР 1. Колкаво е фокусното растојание на планконвексната леќа со $n = 1,5$ и се наоѓа во воздух.

Решение: Кај планконвексна леќа едната страна е рамна, радиусот на кривина на таа страна е $R = \infty$. За фокусното растојание на тенка леќа се добива:

$$\frac{1}{f} = (1,5 - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\infty} \right) = \frac{1}{2R} ,$$

или $f = 2R$. Тоа значи помеѓу f и R нема постојан однос што не е случај и за огледалата.

Без разлика дали радиусите на кривина се еднакви или не, двете фокусни растојанија еднакво се оддалечени од леќата. Меѓутоа, ако леќата е опкружена со две различни средини, на пример, едната сферна површина се граничи со воздух, а другата со вода, тогаш фокусните растојанија на леќата се различни. Помалото фокусно растојание одговара на страната со која леќата се граничи со воздухот. Таков пример е леќата во нашето око.

Покрај фокусното растојание, карактеристична величина на секоја леќа е и нејзината **оптичка јачина**. Таа е зададена со равенката:

$$\frac{1}{f} = J . \quad (5)$$

Единицата за оптичка јачина на леќата е **диоптер** dpt. Оптичка јачина од еден диоптер има леќа чие фокусно растојание изнесува еден метар: $1 \text{ dpt} = \text{m}^{-1}$. Леќа што има позитивна оптичка јачина ($J > 0$) е собирана, а растурната леќа има негативна јачина ($J < 0$).

Кај сложените оптички инструменти, како што се дурбинот, микроскопот, фотографскиот апарат и др. со цел да се избегнат недостатоците (аберациите), се комбинираат две или повеќе леќи заедно.

Кај системи составени од повеќе собирали и растурни леќи оптичката јачината се изразува со

$$J = J_1 + J_2 + J_3 + \dots + J_n ;$$

$J_1, J_2, J_3 \dots J_n$ се јачините на одделните леќи.

Конструкција на ликови кај леќите

Светлинскиот зрак кој поминува низ леќата, според законите за прекршување, се прекршува на двете гранични површини Меѓутоа, ако леќата е тенка, при конструкција на ликови е допуштено поедноставување. Имено, прекршувањето на двете гранични површини е заменето со прекршување на една рамнина која поминува низ оптичкиот центар на леќата, а е нормална на главната оптичка оска. Оваа рамнина се вика **главна рамнина на прекршување** (GG' на сл. 4). Оддалеченоста на предметот и ликот како и фокусните растојанија, се мерат од оваа рамнина.

Со цел да се определи положбата и природата на ликот наједноставно е да се користат следниве зраци (сл. 4):

1. зракот што е паралелен со главната оптичка оска, по прекршувањето низ леќата поминува низ вториот фокус на леќата;

2. зракот што поминува низ оптичкиот центар O не се прекршува.

3. зракот што поминува низ првиот фокус, по прекршувањето низ леќата излегува паралелно на главната оптичка оска.

Анализирајќи ги растојанијата p и l , како и соодветното зголемување, за собирарна леќа се добиваат следните заклучоци:

1. Ако предметот се наоѓа на растојание поголемо од $2f$, тогаш ликот се наоѓа меѓу $2f$ и f од другата страна на леќата. Ликот е реален, превртен и намален.

2. Предметот е на растојание меѓу $2f$ и f , ликот се формира на растојание поголемо од $2f$. Ликот е реален, превртен и зголемен.

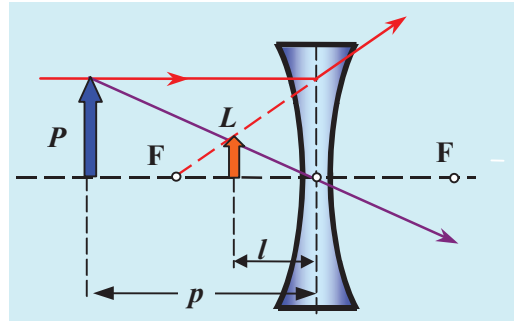
3. Предметот е на растојание $2f$, ликот е на растојание $2f$. Ликот е реален, превртен и еднаков по големина со предметот.

4. Ако предметот е во фокусот, ликот е во бесконечност, не се добива лик, зраците се паралелни.

5. Предметот се наоѓа помеѓу фокусот и леќата ($p < f$), ликот се формира од иста страна на леќата со предметот. Тој е имагинерен, исправен и зголемен (види лупа). Имагинерниот лик не може да се добие на екран, но може да се гледа со око.

Независно од положбата на предметот,

сите ликови што се формираат со растурилата леќа, се имагинерни, исправени и се од иста страна на која се наоѓа и предметот и тоа помеѓу фокусот и леќата (сл.6).



Сл. 6. Формирање лик кај растурилата леќа.

ПРИМЕР 2. Предметот е поставен 10 cm пред собирарна леќа со фокусно растојание 15 cm. Определете каде се наоѓа ликот и колкаво е зголемувањето на леќата?

Решение. Да ја земеме равенката (7) и во неа $p=10$ cm и $f=15$ cm, притоа се добива:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{l}; \quad \frac{1}{15} = \frac{1}{10} + \frac{1}{l} = -\frac{1}{30}; \quad l = -30 \text{ cm}.$$

Негативниот знак покажува дека ликот е од иста страна со предметот и е имагинерен. Зголемувањето на леќата изнесува:

$$M = \left| \frac{l}{p} \right| = \left| \frac{-30}{10} \right| = 3,0.$$

M покажува дека ликот е 3 пати зголемен.

Прашања, задачи и активности

1. Пред собирарна леќа со фокусно растојание 10 cm е поставен предмет на растојание: а) 30,0 cm, б) 10,0 cm, в) 5,0 cm од леќата. Да се определи за секој пример на кое растојание од леќата е ликот и соодветното зголемување.

[Одговор: а) $l = 15,0$ cm; $M = 0,5$; б) ликот е во бесконечност; в) $l = -10,0$ cm; $M = 2,0$]

2. Плунконвексна леќа има индекс на прекршување 1,6. Радиусот на конвексната површина е 30 cm. Ако ликот е на растојание 1 m, колкаво е фокусното растојание и зголемувањето на леќата? (Одговор: $f=0,2$ m; $M=4$)

12.8. ДИСПЕРЗИЈА НА СВЕТЛИНАТА.

Дисперзија на светлината

Според Максвеловата теорија светлината се простира во вакуум со брзина c определена со релацијата

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1)$$

(ϵ_0 е електрична константа, а μ_0 магнетна константа) додека во која било диелектрична средина се простира со брзина v која зависи од својствата на средината, во прв ред нејзината релативна диелектрична константа ϵ_r . Поради тоа на граница помеѓу две средини и доаѓа до појавата на прекршување на светлината. Какво е прекршувањето на границата зависи од односот на апсолутните индекси на прекршувањето. А, да се потсетиме, апсолутен индекс на прекршување n за дадена супстанција е

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Уште Њутн установил дека индексот на прекршувањето не зависи од аголот под кој упаѓа светлината врз граничната површина, туку од бојата на светлината. *Зависноста на индексот*

на прекршување на светлината од нејзината боја, (поточно од нејзината бранова должина), се вика *дисперзија на светлината*.

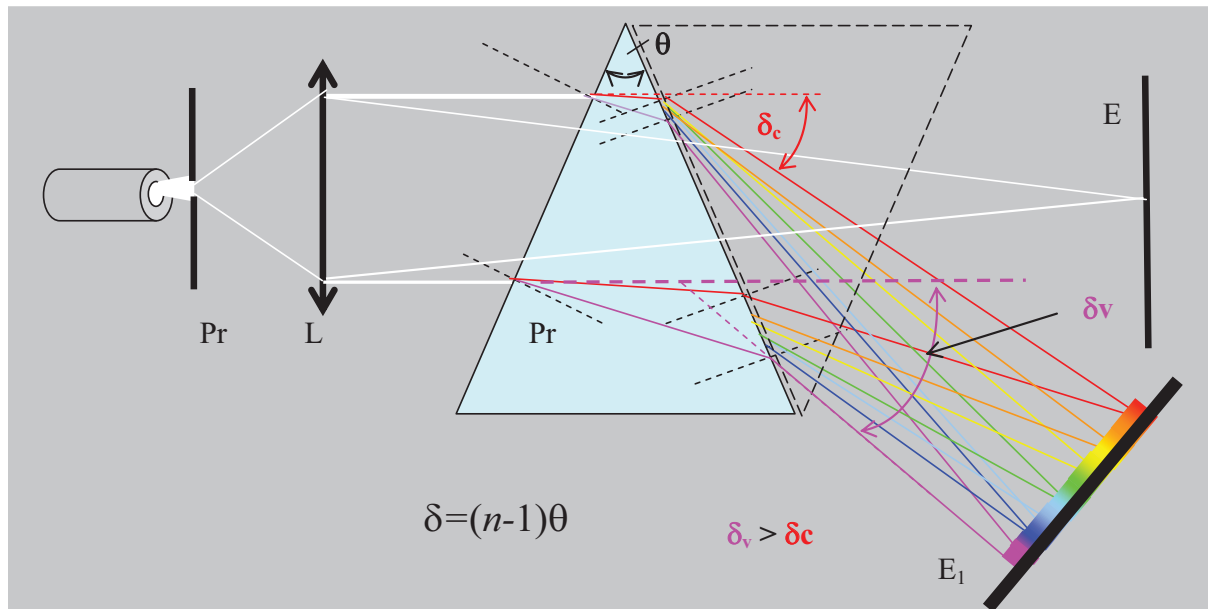
Белата светлина се состои од спектар од бранови со различни бранови должини.

Во стаклото светлинските зраци со различни бранови должини имаат различни брзини на ширење, па поради тоа и различен индекс на прекршување. Тоа значи дека тие различно се прекршуваат. Така, светлината која има најкуса бранова должина (виолетовата) најмногу се прекршува, а тие со подолгите бранови должини се прекршуваат помалку. Црвената светлина има најголема бранова должина и таа најмалку се прекршува.

Њутн ова го потврдил со познатиот експеримент на прекршување на бела (сончева) светлина низ стаклена призма. Њутн покажал дека сончевата светлина има сложен карактер. Подоцна се покажало дека белата светлина добиена од различните видови ламби, исто така, е сложена.

Ќе опишеме експеримент сличен на Њутновиот. Пред една ламба се поставува вертикален процеп Pr и леќа L . На даден екран E се бара остар лик на процепот (сл.1).

Откако тоа ќе се постигне, на патот на зраците се поставува призмата. На призмата



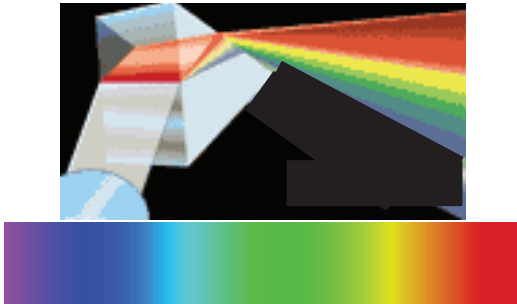
Сл.1. Прекршување на бела светлина низ призма

светлината два пати се прекршува, поради што таа ќе ги отклони зраците и тоа кон поширокиот дел на призмата. Но, наместо добиениот лик да биде повторно бел, ние на екранот E_1 добиваме лик кој е обоен.

Се добива **спектар** кој, всушност, претставува *сèвкупност на голем број ликови на процепот, а со различни бранови должини*. Виолетовата светлина е со најкуса бранова должина, таа најмногу се прекршува низ призмата, тоа значи дека оваа светлина најмногу ја менува својата брзина. Најмалку се прекршува црвената светлина.

Бидејќи при премин воздух – стакло најголема промена во брзината настанува кај виолетовата светлина, таа има најголем индекс на прекршување, па затоа и аголот на девијацијата ѝ е најголем.

Белата светлина од лабораториската ламба или од Сонцето дава **континуиран спектар** (сл.2). Не постои остра граница меѓу боите.



Сл.2

Со вртење на призмата се дотерува условот на минимум девијација. Тоа е моментот кога спектарот почнува да се враќа; во тој момент спектарот е најостар.

Ако на патот на зраците се постави уште една превртена призма, наполоно еднаква на првата, во положба дадена на сликата 3 со црни испрекинати линии, спектарот ќе исчезне, а белиот лик на процепот се добива во истата насока во која што и упаѓа светлинскиот сноп врз првата призма, на екранот E .

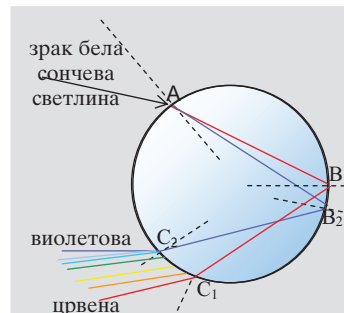
Овде треба да се напомене дека континуираните спектри од различните видови ламби не се исти. На пример, ако се направи спектар од обична свеќа, овој е пожолт, или дури поцрвен

од спектарот на лабораториската ламба. Спектарот, пак, на лачната ламба е богат со покусите бранови должини. Денешните светилки се прават такви, нивниот спектар многу малку да се разликува од спектарот на сончевата светлина.



Сл.3

Појава на континуиран природен спектар е **виножитото**. Виножито се појавува во услови кога на една страна од небото помеѓу раскинати облаци свети Сонцето, а на спротивна страна паѓа дожд. Така водените дождовни ситни капки се осветлени од сончевите зраци. Прекрасните бои на виножитото (сл. 3) се добиени со дисперзија на илјадници сферни ситни водени капки кои се однесуваат како призми (Сл. 4).



Сл.4

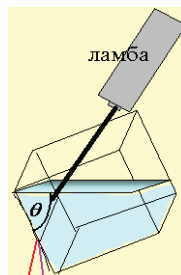
Бела светлина упаѓа во точката A , каде делумно се рефлектира (што не е прикажано) и делумно се прекршува, разложувајќи се во спектрални бои. Во точките B_1 и B_2 зраците тотално се рефлектираат, а во точките C_1 и C_2

повторно се прекршуваат создавајќи спектар од бои.

Фраунхофер уште на почетокот на деветнаесетиот век, пручувајќи го спектарот на Сонцето со помош на дифракциона решетка забележал дека во континуираниот спектар на Сонцето на повеќе места има темни линии. Наречени се **Фраунхоферови линии**. Денес е јасно дека овие линии се должат на апсорпција на супстанции кои се наоѓаат помеѓу изворот на континуиран спектар (сјајна површина на Сонцето) и спектралниот апарат. Така се испитани парите во атмосферата на Сонцето. Така така наречените апсорпционите спектри на Сонцето и другите ѕвезди овозможуваат да бидат испитувани составите на парите кои се наоѓаат во близина на ѕвездите. За апсорпционите спектри ќе стане збор подоцна пошироко.

Прашања, задачи, активности

1. Спектар може да се добие и во домашни услови, со т. н. “водена призма”. Во сад со паралелни страни налејте вода и потоа, наведнете ја (сл. 5),
2. На сликата 6 дадени се Фраунхоферовите линии на спектраот на Сонцето. Што мислите дали овие линии се менуваат при промена на составот на нашата атмосфера?
3. Што мислите ако во експериментот 1 употребите кружен отвор ќе добиете ли континуиран спектар?



Сл. 5

4. Побарајте ги на интернет веб страниците:

- [Light Dispersion t](#)

www.vjc.moe.edu.sg/academics/dept/physics/applet/disprizm/disprizm.htm - 2к и

www.physics.ubc.ca/~rieger/SpecialtyLecture/sld015.htm - 3к и други слични, како и

- [The physics of a rainbow](#)

www.phy.ntnu.edu.tw/java/Rainbow/rainbow.htm

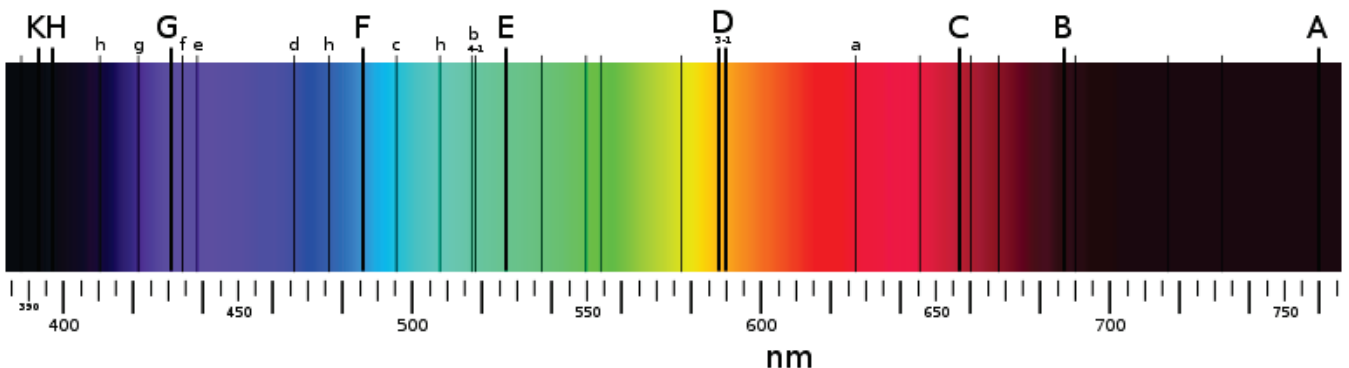
1 - 6к и проширете ги своите знаења

Кратко резиме

Светлината со различни бранови должини ја викаме бела. Брзината на светлината на бранови со различна бранова должина во една оптичка средина зависи од брановата должина. При навлегување во друга оптичка средина најголема промена во брзината има кај виолетовата светлина, а најмала кај црвената. Затоа при прекршување низ тенка призма доаѓа до одвојување на светлината според нејзините бранови должини и до создавање на спектар.

Спектарот претставува сèвкупност на голем број ликови на процепот, а со различни бранови должини.

Бидејќи во белата светлина има бесконечно многу светлини со различни бранови должини, спектарот што се добива е континуиран.



Сл.6. Фраунхоферови линии во спектарот на Сонцето

12.9. ОПТИЧКИ ИНСТРУМЕНТИ

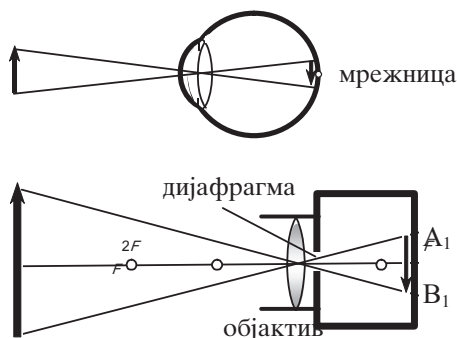
1. Фотографскиот апарат е направа со која се добиваат реални и намалени ликови кои трајно се задржуваат на фотоемулзија или каков било друг детектор на зрачење.

Основни делови на секој фотографски апарат се: темната комора и објективот.

- *Темната комора* претставува кутија во чија задна страна се поставува фотоосетлив филм или каков било друг детектор за траен запис на светлината што паѓа во темната кутија.

- *Објективот*, во најопшт случај, е собирна леќа или систем од повеќе леќи за да се избегнат аберациите. Во близина на задната страна на комората објективот создава реален и превртен A_1B_1 лик на фотографираниот предмет AB (сл.1).

Објектот најчесто се поставува на растојание поголемо од двојното фокусно растојание, поради што ликот е намален и превртен.



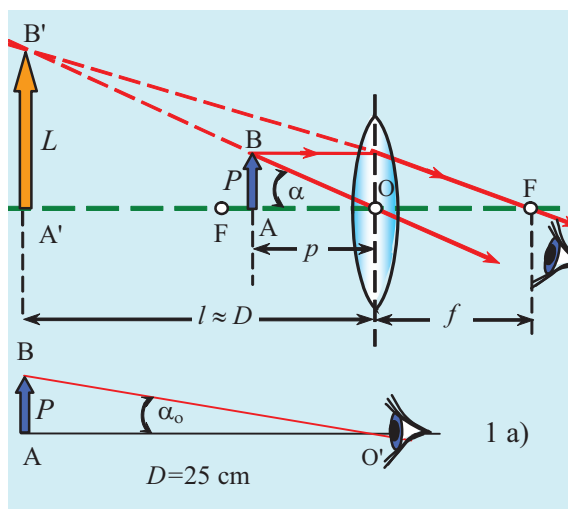
Сл.1. Оптика шема на фотографскиот апарат

2. Лупа. Како лупа може да се искористи секоја собирна леќа или систем од повеќе леќи со мало фокусно растојание.

Кога предметот се гледа со голо око големината на сликата зависи од аголот под кој се гледа предметот. Кога предметот се приближува кон окото, аголот под кој се гледа предметот расте и врз мрежницата се создава поголема слика. Аголот достигнува максимална вредност α_0 кога предметот од окото е на **растојание на јасно гледање**. Тоа изнесува

$D=25$ cm. Ако предметот е на помало растојание од ова, окото не може да се фокусира. Меѓутоа, кога пред окото ќе се постави **лупа**, предметот може да се приближи повеќе и аголот под кој се гледа ќе стане поголем од α_0 .

Ако предметот е меѓу фокусот и лупата, но поблиску до фокусот F , се добива зголемен, исправен и имагинарен лик кој е од истата страна со предметот (сл.2). При поместување на предметот од фокусот F кон лупата, имагинарниот лик, исто така, се приближува кон леќата. Аголот α е максимален кога имагинарниот лик е на растојание на јасно гледање. Предметот и неговиот имагинарен лик повеќе не може да се приближуваат затоа што окото не може да се фокусира.



Сл.2.

Аголното зголемување m на лупата се дефинира како количник од аголот α под кој предметот се гледа со лупа и видниот агол α_0 под кој предметот, поставен на растојание на јасно гледање D , се гледа со голо око

$$m = \frac{\alpha}{\alpha_0} \quad (1)$$

$$m = \frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{AB/p}{AB/D} = \frac{D}{p}; \quad (3)$$

$$m = \frac{D}{p} = \frac{D+f}{f} = 1 + \frac{D}{f}. \quad (4)$$

$$m = \frac{25}{f} = \frac{25}{10} = 2,5.$$

Кога имагинарниот лик е на растојание на јасно гледање, зголемувањето е максимално.

Здравото око може да го фокусира ликот кога тој се наоѓа на растојание на јасно гледање па сè до бесконечност. Кога предметот е близу до фокусот ($p \approx f$), ликот е во бесконечност, па окото не се напрега:

$$\alpha_o \approx \frac{AB}{D}; \quad \alpha \approx \frac{AB}{f}; \quad m = \frac{\alpha}{\alpha_o} = \frac{D}{f}. \quad (5)$$

Бидејќи ликот може да се види помеѓу растојание на јасно гледање и бесконечност зголемувањето на лупата се движи во границите определени со равенките (4) и (5).

ПРИМЕР 1. Колкаво е максималното зголемување на лупа со фокусно растојание $f=10$ cm, а колкаво е зголемувањето на истата лупа кога окото е ненапрегнато?

Решение. Зголемувањето на лупата ако $f=10$ cm, изнесува:

$$m = 1 + \frac{25}{f} = 1 + \frac{25}{10} = 3,5.$$

Ако окото е ненапрегнато сликата е во бесконечност и важи равенката (5):

Зголемувањето на оваа лупа се движи во границите меѓу 3,5 и 2,5 пати.

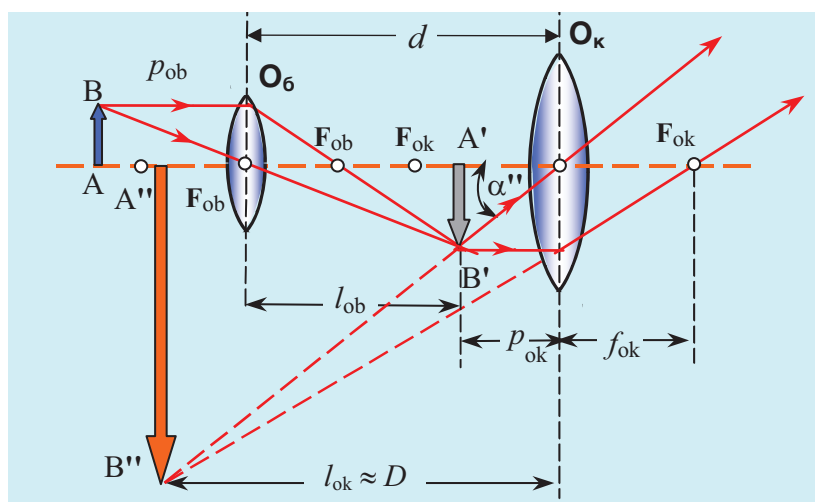
Прашања и задачи

1. Што претставува фотографскиот апарат?
2. Дали има разлика во принципот на работа меѓу дигиталниот и фотографскиот апарат со фотографски филм?
3. Што претставува лупата? Нацртајте ја оптичката шема на лупата.

12. 10. ОПТИЧКИ МИКРОСКОП

За да се добие поголемо зголемување отколку со лупата се користи оптичкиот микроскоп. Оптички делови на микроскопот се: окуларот, објективот и системот за осветлување на предметот.

Објективот (леќа близу до предметот) е со мало фокусно растојание f_{ob} , а окуларот (леќата близу до окото) е со поголемо фокусно растојание f_{ok} . Двете лиќи имаат заедничка оптичка оска и се поставени на растојание d .



Сл.3. Шема за добивање на слика со оптички микроскоп

Принципот на формирање зголемен лик кај микроскопот, прикажан на сл.3, е следниов: набљудуваниот предмет АВ е поставен на растојание малку поголемо од фокусното растојание на објективот и притоа се формира зголемен, реален и превртен лик А'В' на предметот. Овој лик служи како предмет за окуларот кој се користи како лупа. Ликот А'В' треба да се формира меѓу окуларот и неговиот фокус и тоа поблиску до фокусот F_{ok} . Притоа се формира имагинарен, зголемен и превртен лик А"В" во однос на предметот.

Зголемувањето на микроскопот е производ од зголемувањето на објективот и окуларот. Ликот А'В' што се добива од објективот има линеарно зголемување:

$$m_{ob} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{l_{ob}}{p_{ob}}. \quad (1)$$

Според сликата 3 може да се земе $p_{ob} \approx f_{ob}$ и $l_{ob} \approx d - f_{ok}$. За линеарното зголемување на објективот се добива:

$$m_{ob} = \frac{d - f_{ok}}{f_{ob}}. \quad (2)$$

Растојанието d меѓу објективот и окуларот може да се избере така што ликот А"В" се наоѓа на растојание на јасно гледање или во бесконечност (како и кај лупата). Кога А"В" е во бесконечност, окуларот работи како лупа

со. $m_{ok} = \frac{D}{f_{ok}}$ каде што D е растојание на јасно гледање. Па за вкупното зголемување на микроскопот се добива:

$$M = m_{ob} m_{ok} = \frac{d - f_{ok}}{f_{ob}} \frac{D}{f_{ok}}. \quad (3)$$

Кога фокусното растојание на окуларот и објективот се многу помали во споредба со растојанието d меѓу објективот и окуларот, може да се земе:

$$M \approx \frac{d}{f_{ob}} \frac{D}{f_{ok}}. \quad (4)$$

Вкупното зголемување на микроскопот M , кога окоето е ненапрегнато, е производ од зголемувањето на објективот и окуларот.

Од равенката (4) може да се заклучи дека колку фокусното растојание на објективот и окуларот се помали, и должината d поголема, зголемувањето на микроскопот е поголемо.

Вредноста на зголемувањето на окуларот и објективот е назначена на нив. Зголемувањето се движи во граници од 4 до 100 пати за објективот и од 4 до 25 пати - за окуларот. *Меѓутоа, големото зголемување е бескорисно ако разделната моќ на микроскопот е несоодветна.*

Кога структурните елементи на објектот што се набљудува и апертурата на објективот (радиус на отворот на леќата) се споредливи со брановата должина на светлината што го осветлува препаратот доаѓа до израз брановата природа на светлината. Ако две светли точки се многу блиску една до друга, соодветните дифракциони слики се препокриваат, па сликата е нејасна (види разделна моќ).

Способноста на секој оптички инструмент да ги покажува јасно деталите на предметот ја опишува **разделната моќ**.

За да се зголеми разделната моќ на микроскопот неопходно е да се користи светлина со помала бранова должина, или да се користат имерзиони и електронски микроскопи.

Кога наместо воздух меѓу препаратот и објективот има некоја течност, станува збор за **имерзиони објективи**.

При изборот на зголемувањето кое го одредува бројната апертура значајна улога има објективот. Затоа **правило е јак објектив а слаб окулар** - никако обратно.

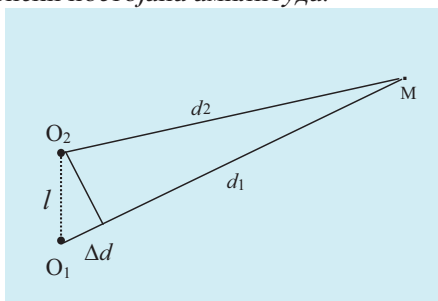
Пршањз и задачи

1. Колкаво е вкупното зголемување на микроскопот?
2. При изборот на зголемувањето на микроскопот на што треба да се внимава?
3. Колкаво е максималното зголемување на лупа и зголемувањето на истата лупа кога окоето е ненапрегнато?
4. Кога големото зголемување е бескорисно?

12.11. ИНТЕРФЕРЕНЦИЈА НА СВЕТЛИНА

Нелокализирана интерференција

Од порано е познато дека при суперпозиција на два брана со еднаква фреквенција, кои имаат еднаква бранова должина, може да настане **интерференција на брановите**. Тоа е е појава која е резултат на сложување на два (или повеќе бранови) при којашто во секоја точка од просторот, во кој брановита се распространуваат, се создаваат бранови со временски постојана амплитуда.



Сл.1.

Да се потсетиме, во кои услови може да настане интерференција на брановите. За таа цел ќе се послужиме со цртежот од сл. 1. Се прашуваме: каква ќе биде амплитудата на осцилирањето во точката М која од изворите O_1 и O_2 се наоѓа на соодветни растојанија d_1 и d_2 ?

Резултатот на сложувањето на брановите во точката М ќе зависи од разликата во фазата која е предизвикана со разликата во одот на зраците Δd . Во услови кога е растојанието меѓу изворите многу помало од растојанијата до точката М, $\Delta d = d_2 - d_1$. Ако ова растојание е λ , или 2, 3, 4 пати по λ ,

$$\Delta d = k\lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

брановита се во фаза. На тие места ќе биде исполнет условот за **максимални** амплитуди на осцилирањето.

Ако растојанието Δd е $\lambda/2$, или непарен број $\lambda/2$, тогаш помеѓу елонгациите y_1 и y_2 во кој и да било момент постои фазна разлика π . Осцилирањето во точките каде што е тоа исполнето се со елонгација 0, поточно, таму осцилирање нема Тоа е **услов за минимум**:

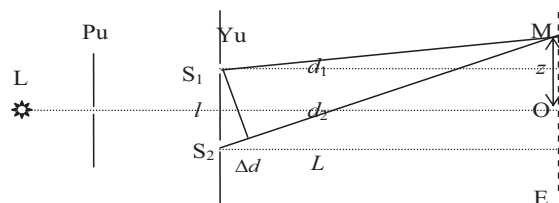
$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

За да се добие мирна, стационарна интерференциона слика, неопходен услов е изворите на брановите да имаат еднаква фреквенција и *фазата на нивното осцилирање да биде или еднаква, или да се разликува за некоја временски непроменлива големина*. Со други зборови, разликата во фазите на осцилирањето на двата извора треба да **не се менува** со текот на времето. Изворите на брановите кои го исполнуваат овој услов се викаат **кохерентни извори**, а брановите што тие ги создаваат - **кохерентни бранови**

Само кохерентни бранови може да интерферираат.

Интерференција на светлина. Јунгов експеримент

Да се обидеме да побараме интерферентна слика од два какви и да било светлински извора, на пример од две светилки. На екранот на кој ќе паѓа светлината од двата извора никогаш не може да се добијат интерферентни пруги. Причината лежи во фактот што обичните светлински извори не се кохерентни. Денес постојат извори на кохерентна светлина. Тоа се ласерите. Од обичните светлински извори може да се добијат кохерентни, само во случај кохерентните извори да потекнуваат од ист извор. Таква интерференција добил Јунг.



Сл. 2. Шема на Јунговиот експеримент. Од натриумова ламба L (монохроматски светлински извор) бранот паѓа врз една пукнатина Pu, а потоа врз препрека со два паралелелни праволиниски отвора Yu. На екранот E се добива интерферентна слика која се состои од паралелни еквиливантни темни и светли пруги.

Јунг успеал да добие интерферентна слика со помош на обичен светлински извор со шема дадена на сл. 2.

Треба да се напомене дека растојанието помеѓу пукнатините l на Јунговата плочка (Y_1) е многу мало во однос на растојанијата од неа до екранот и изворот L ,

Со помош на сликата 2 може да се определат растојанијата d_1 и d_2 од кохерентните извори до точката M во која нè интересира резултатот на интерференцијата. Ако со z се означи растојанието на оваа точка од точката O која е на средината на интерферентната слика се гледа дека

$$d_1^2 = L^2 + \left(z - \frac{l}{2}\right)^2 \quad d_2^2 = L^2 + \left(z + \frac{l}{2}\right)^2$$

одкаде:

$$d_2^2 - d_1^2 = (d_2 - d_1)(d_2 + d_1) = 2zl$$

Со оглед на тоа што $L \gg d_1$ и $L \gg d_2$ може да се смета дека $d_1 + d_2 = 2L$, па $d_2 - d_1 = \Delta d$ е:

$$\Delta d = \frac{2zl}{2L} = \frac{zl}{L}$$

Според условот (1) во точката M ќе биде максимум од k -ти ред кога е:

$$\Delta d = k\lambda \quad ; \quad \frac{z_k l}{L} = k\lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

а максимум од $(k+1)$ ред за:

$$\Delta d = (k+1)\lambda \quad ; \quad \frac{z_{k+1} l}{L} = (k+1)\lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

Растојанието помеѓу два максимума ќе биде:

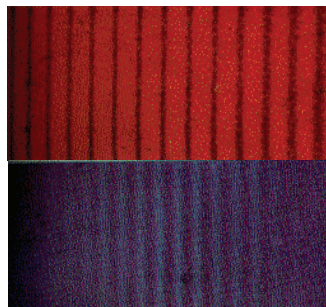
$$\Delta z = z_{k+1} - z_k = \frac{L\lambda}{l}$$

Се покажува дека растојанието Δz помеѓу светлите пруги за светлина со бранова должина λ зависи од растојанието помеѓу Јунговата препрека Y_1 и екранот E (L) и растојанието помеѓу двете пукнатини l :

$$\Delta z = \frac{L\lambda}{l} \quad (6)$$

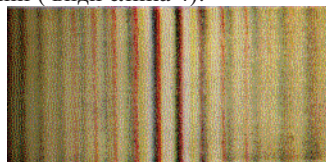
Подоцна се покажало дека и во други случаи кога од даден светлински извор се добиваат два, кои потекнуваат од тој единствен извор, се добива интерференција на светлината. Ќе дадеме само увид во ваквите шеми на нелокализираната интерференција.

Екранот во Јунговата шема може да се носи на кое и да било доволно големо растојание. Секаде се добива интерферентна слика дадена на сликата 3.



Сл. 3. Интерферентна слика добиена со Јунгов опит; голе со црвена светлина, долу со сина. Се гледа зависноста на меѓурастојанието од брановата должина.

Ако изворот не е монохроматски, сликата е со обоени линии (види слика 4).



Сл. 4. Интерферентна слика добиена со бела светлина.

Фактот што интерференцијата може да се добие на кое сакаме големо растојание укажува дека интерференцијата не е локализирана.

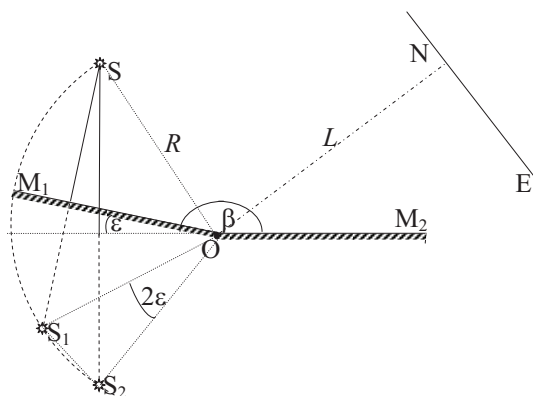
Други шеми на нелокализирана интерференција

Френелови огледала претставуваат исто така шема со која се добива нелокализирана интерференција.

Претставуваат две рамни полирани црни стакла поставени под агол близок до 180° . Врз огледалата паѓа светлина од линиски светлински извор S кој е паралелен со реброто на огледалата O (сл.5). Растојанието меѓу реброто и изворот S е $SO = R$. Аголот меѓу огледалата $\beta = 180 - \epsilon$, а аголот под кој од O се гледаат двата имагинарни лика на изворот S , S_1 и S_2 е 2ϵ . Екранот E е поставен на растојание L од реброто на огледалата O .

Во полето на прекривање на двата снопа кои се формираат по рефлексијата од двете огледала, кои потекнуваат од имагинарните извори S_1 и S_2 (а кои се кохерентни), се набљудува интерферентна слика.

Екранот E врз кого се набљудува интерферентната слика е паралелен со правата S_1S_2 . На екранот се гледаат еквидистантни црно бели пруги, во колку е изворот монохроматски, а ако изворот не е монохроматски пругите се обоени.



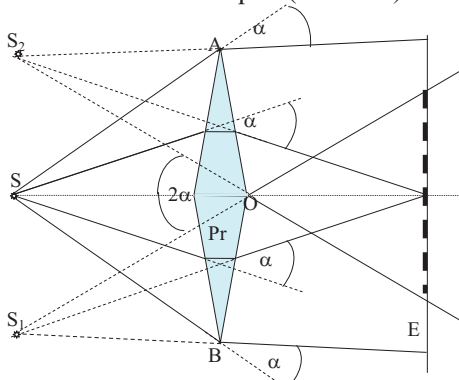
Сл.5. Оптика шема за Френелови огледала

Може да се покаже дека и во овој случај растојанието меѓу пругите е дадено со релацијата (6) која овде поминува во:

$$\Delta z = \frac{R+L}{2\epsilon R} \lambda \quad (7)$$

каде што $2\epsilon R$ е должината на лакот S_1S_2 .

Бипризма на Френел претставува двојна тенка призма Pr на која се насочува светлина од линиски светлински извор S (слика 6)



Сл.6 Бипризма на Френел.

Во полето на прекривањето на двата снопа кои доаѓаат од кохерентните извори S_1 и S_2 се добива интерферентната слика. Девијацијата кај тенката призма е дадена со релацијата:

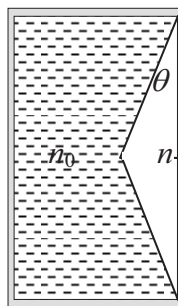
$$\alpha = (n-1) \theta \quad (8)$$

каде што θ е аголот при врвот на тенките призми, а n е индексот на прекршување на стаклото од кое е направена бипризмата. Интерферентната слика претставува пак еквидистантни паралелни пруги, како и во случајот на Јунговиот опит, само што сликата не е многу добра бидејќи поради малиот врвен агол просторот на прекривањето на сноповите е релативно мал. Меѓурастојанието во овој случај е :

$$\Delta z = \frac{r+L}{2(n-1)\theta \cdot r} \lambda \quad (9)$$

каде што $r=SO$.

Подобра интерферентна слика дава една модификација на Френелова бипризма позната како *Винкелман-Абеова бипризма*, чиј пресек е даден на сликата 7.



Сл. 7

Тоа е стаклена кивета чија една страна е бипризма со поголем агол на врвот θ . Киветата се полни со течност со индекс на прекршување n_0 близок со индексот на прекршување на стаклото n од кое е изработена бипризмата. Во овој случај аголот на девијацијата е даден со :

$$\alpha = (n-n_0) \theta \quad (10)$$

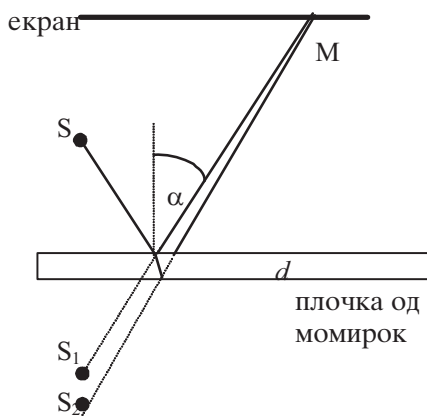
Така со намалување на врвниот агол се добива значително подобра интерферентна слика.

Експеримент на Пол е исто така вид на нелокализирана интерференција.

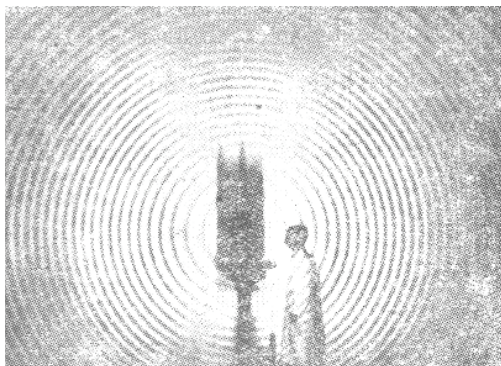
Шемата на експериментот, дадена на сликата 8, овозможува да се даде и објаснение на појавата.

Од ламбата, чијшто отвор може да биде доста широк, од секоја нејзина точка S , под одреден агол α , со рефлексија од двете површини на плочката од момирок, како од два виртуелни извора ΓS_1 и S_2 се шират зраци на два кохерентни извора кои може да интерферираат (точка M , на екранот). Бидејќи

фазната разлика зависи од аголот α , и од дебелината на плочката, ако плочката е планпаралелна, како резултат на интерференција, се добиваат обоени кружници, како на сликата 8 а. Како екран во овој експеримент се користи собата.



Сл. 8. Полов експеримент



Сл.9. Интерферентна слика добиена со Половиот опит

Интерферентната шема на Пол се разликува од претходните бидејќи екранот се поставува нормално на спојницата замислена помеѓу двата кохерентни извора.

Прашања, задачи, активности

1. ПРИМЕР. Во Јунговиот експеримент процепите S_1 и S_2 се осветлени со монохроматска светлина од 600 нм. Растојание меѓу процепите $l = 1$

мм, а оддалеченоста на процепите до екранот е 3,0 м. Да се најде положбата на првите три ленти. Дадено: $\lambda = 600 \text{ nm} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$; $l = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $L = 3,0 \text{ m}$

Решение: Од формулата (4) за положбата на K -тиот максимум следува

$$z_k = k\lambda \frac{L}{l} \quad k = 0, 1, 2, \dots \text{ па за } k=1 \text{ се добива}$$

првиот максимум, за $k=2$ вториот, а за $k=3$ третиот максимум: $z_1 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$; $z_2 = 2 z_1 = 2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ а $z_3 = 3z_1 = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

2. Пред Јунговата плочка при изведување на експериментот на Јунг се поставува прво црвен, а потоа виолетов филтер. Кои пруги ќе бидат пошироки, црвените или виолетовите и зошто? Колкава ќе биде таа разлика, имајќи предвид дека црвената светлина има бранова должина 800 нм, а виолетовата 400 нм?

3. Како изгледа сликата на екранот ако при изведување на Јунговиот експеримент се употреби бела светлина?

4. Светлински извор емитува светлина со две бранови должини: $\lambda_1 = 430 \text{ nm}$ и $\lambda_2 = 510 \text{ nm}$. Изворот е употребен за Јунгов експеримент, при што растојанието меѓу Јунговата плочка и екранот било 1,5 m, а растојанието помеѓу пукнатините на Јунговата плочка 0,025 mm. Најдете го растојанието помеѓу максимумите од трет ред на соодветните бранови должини.

$$(\text{Одговор: } z_{3,\lambda_1} - z_{3,\lambda_2} = 1,44 \text{ cm})$$

5. Побарајте на интернет веб страница :

Young's experiment

[www. Physicsclassroom.com/class/light/u1211b](http://www.Physicsclassroom.com/class/light/u1211b)

и симулирајте што станува кога ќе се промени растојанието помеѓу пукнатините на Јунговата плочка, или како се менува сликата кога ќе се промени брановата должина.

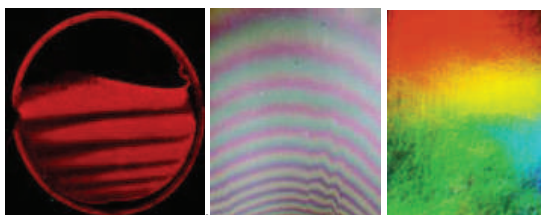
Дајте објаснение на следните поими, ако е потребно дајте и примери

- Интерференција на светлина
- кохерентни извори
- Јунгов опит за интерференција
- Френелови огледала
- Френелова бипризма
- Призма на Винкелман-Абе
- Полов експеримент за интерференција на светлината

12.12. ЛОКАЛИЗИРАНА ИНТЕРФЕРЕНЦИЈА

Криви на еднаква дебелина

Интерференција на светлината се добива и при рефлексija од тенки филмови со ред на големина од $1\mu\text{m}$. Тенок слој на масло врз вода, меур на сапуница (сл.1а), оксидирана тенка површина на метален предмет (сл.1б), или тенок метален филм врз стакло (сл.1в) во бела светлина покажуваат обоени криви, кои се резултат на интерференција на светлината. Во монохроматска светлина тие изгледаат светло темни (сл.1а). Ваквите пруги се викаат *криви на еднаква дебелина*



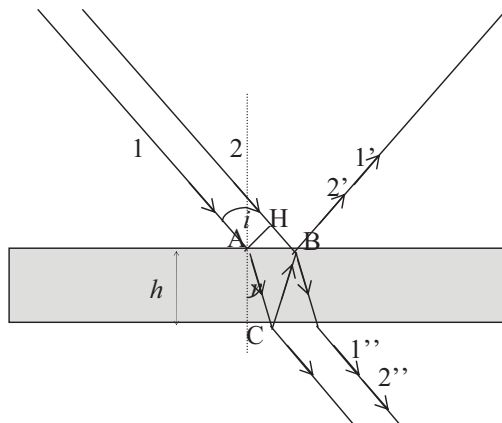
Сл.1а

Сл.1б

Сл.1в

Како се објаснуваат овие појави?

При осветлувањето на тенкиот филм дел од бранот се рефлектира од предната површина, а дел од задната, поради што брановите се сретнуваат со некоја оптичка разлика на одот. Не е тешко да се види (слика 2) дека таа разлика во одот зависи од *дебелината* на слојот, определена со должината на патот во внатрешноста на филмот.



Сл.2. Разликата во одот на зраците 1 и 2 предизвикуваат интерференција во рефлектирана и во поминувачка светлина.

На оние места, каде што таа оптичка разлика во одот е еднаква на парен број по $\lambda/2$, двата брана се засилуваат и настанува максимум, а таму каде што оптичката фазна разлика е непарен број $\lambda/2$, настанува минимум. Бидејќи филмот има различна дебелина на слојот, тогаш областите на минимумот и максимумот даваат на *површината* на слојот слика на криви со еднаква дебелина, во монохроматска светлина, или обоени криви во бела светлина. За да се гледаат овие криви *треба да се набљудува површината на филмот, т.е. да се акомодира окоото на површината на филмот*. Затоа овие криви и се викаат криви на *локализирана* интерференција. Така интерферентните слики на вакви тенки филмови зборуваат за дебелината на тенкиот филм, или за негова нехомогеност.

Њутнови прстенови

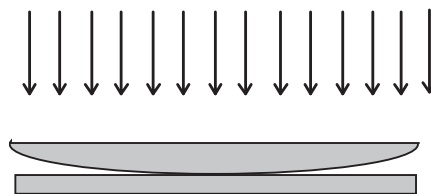
Еден очигледен пример на криви на еднаква дебелина се Њутновите прстени. Њутн ги набљудувал 1675 година како криви на воздушен слој помеѓу рамно стакло и испакнатата површина на астрономски рефрактометар.

Ќе објасниме прво како може да се гледаат Њутнови прстени.

За демонстрација на Њутнови прстени се потребни една многу слаба план-конвексна леќа и план-паралелна плочка (слика 3). Доколку леќата не е доволно слаба, тогаш Њутновите прстени треба да се набљудуваат со лупа или под микроскоп.

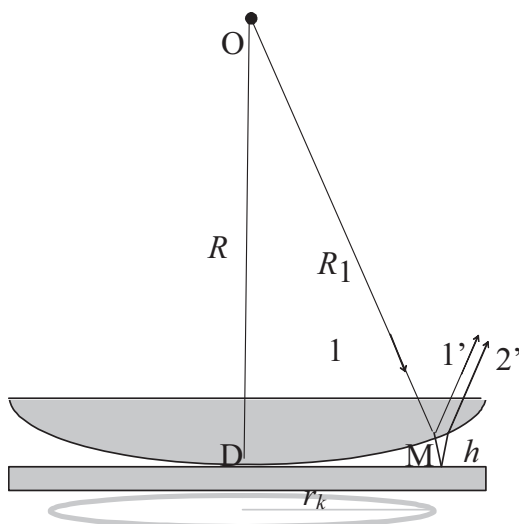
Прстените се гледаат и во рефлектираната и во проодната светлина.

Њутновите прстени се криви на еднаква дебелина на слојот воздух, кој се наоѓа помеѓу леќата и планпаралелната плочка.



Сл.3. За да се гледаат прстените, радиусот на закривеноста на леќата треба да биде многу голем

Ќе ја изведеме релацијата за добивање на максимумот и минимумот кај оваа оптичка шема. За таа цел ќе се послужи́ме со сликата 4. На сликата е нацртана поголема закривеност на леќата, од таа што реално постои заради надгледност.



Сл. 4.

За да се набљудуваат Њутновите прстени (види слика 5), основен услов е висината на воздшниот столб да е многу мала, а тоа значи радиусот на закривеноста на леќата да е многу голем, $R \gg h$. Ако е тоа исполнето :

$R_1 = OM = R + h$: а од триаголникот ODM следува:

$$r_k^2 = R_1^2 - R^2 = R^2 - 2Rh + h^2 - R^2 \cong 2Rh$$

бидејќи h^2 може да се занемари. Оттука:

$$h_{1,k} \cong \frac{r_k^2}{2R} \quad (1)$$

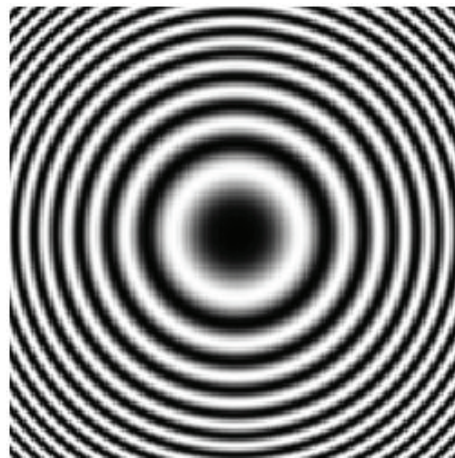
Зракот 2 поминува $2h_k$ подолг пат од зракот 1. Освен тоа, поради одбивање од оптички погуста средина тој зрак губи во фазата $\lambda/2$. Сопред тоа услов за минимум на интерференцијата (видете ја релацијата 2 од претходната лекција) е:

$$2h_k + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

одкаде, ако се искористи изразот (1) за h_k , ќе го определиме радиусот на темниот прстен во рефлектираната светлина со:

$$r_k = \sqrt{k \cdot \lambda \cdot R}. \quad (2)$$

каде што $k = 0, 1, 2, \dots$



Сл. 5. Њутнови прстени

Напоменуваме дека прстените се видливи (послабо) и во поминувачка светлина, но условот за минимум одговара на условот за максимум и спротивно.

Ако се измери радиусот на кој и да било прстен може едноставно да се определи брановата должина на светлината која е употребена. Така, интерференцијата на светлината може да послужи за определување на брановата должина на светлината.

Прашања, задачи, активности

1. Ако просторот помеѓу леќата и планпаралелната плочка со која се добиваат Њутнови прстени се наполни со вода, прстените се намалуваат. Објаснете зошто?
2. Колкава е брановата должина на употребената светлина ако радиусот на третиот темен прстен во рефлектирана светлина изнесувал 0.63 mm, а употребената леѓа имала радиус 1m. (Одг. 400 nm)

Дајте објаснение на следните поими, ако е потребно дајте и примери

- локализирана интерференција
- криви на еднаква дебелина
- Њутнови прстени

12.13. ПРИМЕНА НА ИНТЕРФЕРЕНЦИЈАТА. ИНТЕРФЕРОМЕТРИ

Примена на интерференцијата

Примената на интерференцијата е опсежна и важна. Постојат посебни уреди-интерферометри, чие основно дејство базира на појавата интерференција. Нивната намена е различна: Точно мерење на брановата должина на светлината, мерење на индексот на прекршување на светлината во гасови, мерење на растојанија, мерење на густини и др. Постојат и интерферометри со посебна намена.

Ние ќе се осврнеме само на некои примени на интерференцијата.

Проверка на квалитетот на обработка на површини. Со помош на интерференцијата може да се оцени квалитетот на обработката на површина на дадена површина со точноста и до 1/10 од брановата должина на употребената светлина, т.е. со точноста од 10^{-6} cm. За таа цел треба да се создаде тенок воздушен клинообразен слој помеѓу испитуваната површина и дадена еталонска површина. Тогаш нерамнините на површината доведуваат до искривување на интерференционите пруги во рефлектираната површина. На сличен начин се контролира и површината на разни сверни огледала или леќи, каде што доаѓа до формирање на Њутнови прстени, и според деформација на истите се суди за квалитетот на површината.

Приборот за прецизно мерење на дилатација на телата се вика интерференционен дилатометар, уред за мерење на индексот на прекршување се вика интерференционен рефрактометар, а за прецизно мерење на густини интерференционен дензитометар.

Така на пример, ако на патот на интерферентните зраци во рефрактометарот поставиме две кивети со иста дебелина h на супстанција со познат индекс на прекршување n и супстанција со непознат индекс на прекршување n_x , меѓу зраците се воспоставува оптичка патна разлика:

$$\delta = 2h(n - n_x) \quad (1)$$

а интерферентната слика се поместува за m интерферентни црти. Непознатиот индекс на прекршување се определува од релацијата:

$$m\lambda = 2h(n - n_x) \quad (2)$$

одкаде:

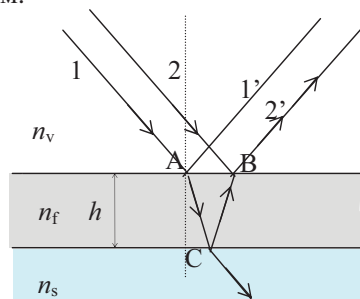
$$n_x = n + \frac{m\lambda}{2h} \quad (3)$$

Точноста за мерење на индексот на прекршување на индексот на прекршување на материјалите е и до 10^{-4} %.

Просветлување на оптичките детали е зголемување на прозачноста на оптичките детали и намалување на рефлексивност на нивните површини со прекривање на оптичките елементи со тенки филмови.

Имено, објективите на современите оптички уреди: кинокамери, фотоапарати, перископи и многу други имаат во нивната градба многу стаклени елементи: леќи, призми и др. Поминувајќи низ таквите елементи, светлината многукратно се рефлектира од нив. Така, при паѓање на светлината нормално на површината 5-9 % од неа се рефлектира. Затоа на крајот кадешто светлината треба да создава лик, светлината учествува често со само 10 до 20 % од енергијата. Како резултат на тоа ликот е со мал интензитет и неквалитетен. За да се намалат губитоците на енергијата при премин на светлината низ елементите на оптичката шема се прави обложување на оптичките елементи со антирефлексионни тенки филмови.

На површината на оптичкото стакло (сл.1), на пример на некоја леќа, се нанесува тенок филм.



Сл.1

Индексот на прекршување на филмот нека е n_f и нека е тој помал од индексот на прекршување на стаклото n_s . За да ја упростиме дискусијата ќе претпоставиме дека имаме нормално упѓање на светлината. Разлика на брановите 1 и 2, рефлектирани од горната и долната површина на филмот, еднаква на $2x$. Брановата должина во филмот е помала од брановата должина во вакуум n_f пати:

$$\lambda_f = \frac{\lambda}{n_f} \quad (2)$$

за да се ослабуваат еден со друг брановите 1 и 2, треба разликата на одот во внатрешноста на филмот да биде половина бранова должина во филмот:

$$2h = \frac{\lambda}{2n_f} \quad (3)$$

Ако се амплитудите на двата рефлектирани брана блиски една на друга, тогаш гаснењето ќе биде полно.

Тука треба нешто да се напомене, Имено, *кога е индекс на прекршување во воздух $n_v < n_f$, а $n_f < n_s$, прирефлексија од површината на филмот и од површината на стаклото доаѓа до губење во фаза за π . Бидејќи и кај двата брана доаѓа до истиот губиток во фаза, тоа не влијае врз конечниот резултат.*

На леќата обично паѓа бела светлина. Изразот (3) гледаме зависи од брановата должина. Затоа не е можно да се постигне гаснење на сите рефлектирани бранови должини. Дебелината на филмот се избира така да гаснењето станува за некоја светлина со бранова должина од средината на видливото подрачје (зелена светлина со $\lambda_z = 5,5 \cdot 10^{-5}$ cm; таа треба да биде еднаква на:

$$h = \frac{\lambda_z}{4n_f} \quad (4)$$

Рефлексија на деловите на светлина од виолетовиот и црвениот дел на спектарот, со вакум филм се ослабнува многу малку. Затоа објектив со ваква оптика во рефлектирана светлина има јоргован боја.

Денес, дури и наједноставни фотоапарати имаат ваква просветлувачка оптика.

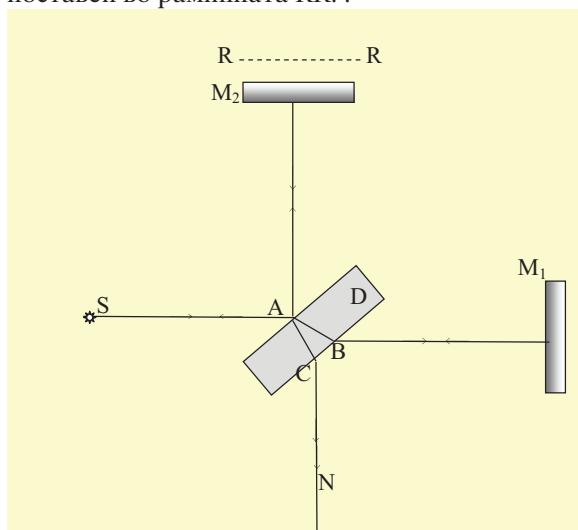
На крајот треба да кажеме дека ваквото гаснење на рефлектираната светлина не значи

претворање на светлинската енергија во други видови енергија. Како и во случајот на сите видови интерференција, гаснење на бранување во било која точка значи дека во таа точка едноставно енергија нема. Гаснење на рефлексијата значи едноставно дека целата енергија поминува низ објективот.

Интерферометри

Има повеќе видови интерферометри. Овде ќе биде објаснета градбата само на еден тип, тоа е **Мајкелсонов интерферометар**.

Шема на таков интерферометар е дадена на сликата 2. Тоа се две рамни огледала M_1 и M_2 кои се поставени нормално едно на друго. Меѓу огледал под агол од 45° е поставена полупропустлина плочка – делач на зраци која зраците ги насочува кон огледалата. Секој зрак кој доаѓа од изворот паѓа врз делачот и по рефлексијата доаѓаат кон околот на набљудувачот N. Набљудувачот гледа интерферентни пруги на двата зрака кои се кохерентни, а се резултат на интерференција на станати на тенкиот слој воздух меѓу огледалото M_2 и ликот на огледалото M_1 поставен во рамнината RR. .

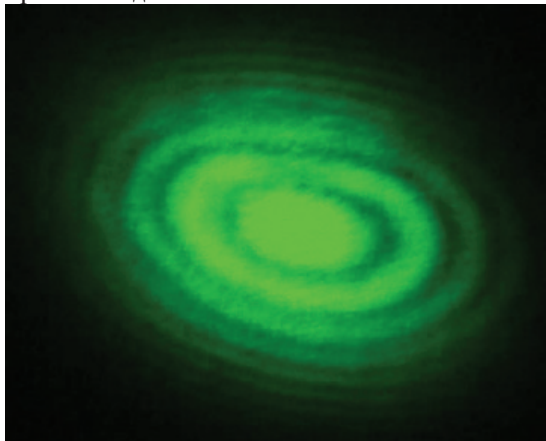


Сл. 2. Мајкелсонов интерферометар

Може да се проследи одот на секој зрак што од изворот S паѓа врз делачот D. Првиот зрак во точката A се рефлектира и оди кон огледалото

M_2 каде по рефлектирањето паѓа во точката А во внатрешноста на плочката се прекршува и оди кон окоото N. Вториот зрак во точката А се прекршува низ плочката и излегувајќи од точката В се упатува кон огледалото M_1 каде се рефлектира. По рефлексјата од огледалото M_1 зракот повторно паѓа во точката В, се прекршува во плочката на делачот, се рефлектира во точката А и по повторното прекршување во точката С излегува во ист правец како и зракот 1 кон окоото. Така во окоото на набљудувачот доаѓаат два брана кои се кохерентни и можат да интерферираат.

Ако огледалото M_1 се оддалечува или приближува во однос на делачот, паралелно на себе, дебелината на тенкиот воздушен слој меѓу огледалото M_2 и рамнината RR. Во рамнината на ова “ливче”, кога е тоа доволно тенко се набљудуваат криви на еднаква дебелина, ако огледалото M_2 и рамнината RR не се строго паралелни, а ако се паралелни се набљудува друга интерферентна слика на т. н. криви на еднаков наклон.



Сл. 4. Интерферентна слика добиена со Мајкелсонов интерферометар и ласер кој работи во зеленото подрачје

Овие интерферентни слики се менуваат ако на патот на еден од зраците се постави некој провиден фазен објект. Така овој инструмент служи за мерења на најфини промени на дебелина или на индексот на прекршување на материјалот што таму е поставен.

Треба да се спомне дека овој инструмент од Мајкелсон и Морли бил употребен во 1881 година со кој преку интерференција на светлината сакале да го регистрираат апсолутното движење на Земјата во однос на т.н. етер. Неочекуваниот негативен резултат укажувал или дека Земјата мирува, што сигурно не е случај или дека етер не постои.

Таквиот исход на експериментот е објаснет од Алберт Ајнштајн со неговата специјална теорија на релативноста.

Има и повеќе други видови интерфрометри: Жаменов, Мах-Зендер ов, интерферометар Фабри –Перо и други кои нашле широка употреба во науката и техниката за многу фини оптички мерења на бранови должини, индекси на прекршувања, нехомогености од секаков вид (густина, напргање, топлински и друг вид деформации и сл)

Прашања, задачи, активности

1. Набројте повеќе можности за примена на интерференцијата на светлината.
2. Што значи просветлување на оптичките елементи? Објаснете го методот.
3. Објаснете ги боите на меурите од сапуница на сликата 5.



Сл.5.

Дајте објаснение на следните поими, ако е потребно дајте и примери

- Просветлување на оптиката
- Примена на интерференцијата
- Мајкелсонов интерферометар

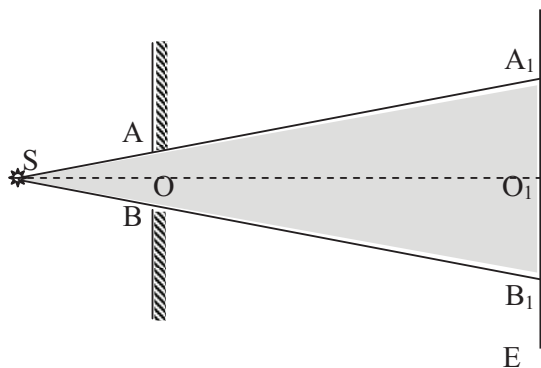
12. 14. ДИФРАКЦИЈА НА СВЕТЛИНАТА. ФРЕНЕЛОВИ ЗОНИ. ФРЕНЕЛОВА ДИФРАКЦИЈА НА КРУЖЕН ОТВОР

Праволиниско движење на светлината и појава на дифракција на сенките

Светлината се движи праволиниски. Ако посматраме сенка на една кружна пукнатина, таа ни изгледа остра и кружна. Сенката ја добиваме со геометриско проектирање врз екранот (види сл.1), при што :

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{SO}{SO_1} \quad (1)$$

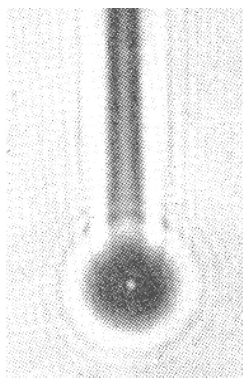
при што AB и A_1B_1 се пречниците на кружниот отвор и на сенката на екранот E .



Сл.1. Сенката на кружниот отвор ни изгледа остра.

Меѓутоа ако внимателно ја погледаме границата ќе видиме дека таа не е така остра. Преминот меѓу сенката и осветленото поле се врши преку низа пруги. Оваа појава е особено видлива кога препреките на патот на светлината се од точкестиот извор се мали во споредба со растојанијата од изворот.

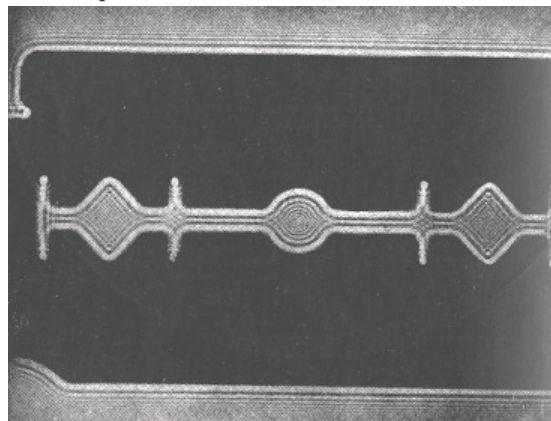
На сликата 2 е дадена сенка на топче обесено на конец. И двете сенки, сенката на топчето, како и сенката на конецот, воопшто не се остри. И во осветлениот дел има темни места, но и во сенката има



Сл.2.

светли пруги. Појавата на искривување на брановиот фронт при премин низ отвори со мали димензии, споредливи со брановата должина на бранот, или кај рабовите, се вика **дифракција на бранот**. Оваа појава се јавува кај сите видови бранови, а ја има и кај светлината.

На сликата 3 е дадена фотографија на сенката на еден жилет. И тука се гледа дека рабовите не се остри



Сл.3.

Велиме при дифракција зракот не се шири праволиниски, туку доаѓа до негово свивање. Појавата дифракција на брановите се објаснува со Хајгенс-Френеловиот принцип. Дифракција на брановите, исто како и интерференцијата се својствени за сите видови на бранови. Но, основен услов за да се набљудува овој феномен е дека отворот, или препреката на кој наидува бранот треба да бидат со големина споредлива, или помала од брановата должина на бранот кој упаѓа.

Дифракција на светлина

Веќе покажавме дека светлината има бранова природа. Појавата дифракција на светлината потешко може да се забележи во природата. Ова се објаснува со многу малата бранова должина на светлината. Во видливиот дел на спектарот брановата должина на светлината има големина помеѓу 400-760 nm.

Сепак појавата дифракција на светлината може да се посматра и во случаи кога се димензиите на препреката, односно отворот значително поголеми од брановата должина на светлината. За да може ова да се оствари треба

резултатот на дифракција да се посматра на многу големо растојание. На сликата 4 е дадена појавата дифракција на остар раб.



Сл 4. Дифракција на остар раб.

Поавата дифракција на светлината за прв пат била забележана од Грималди 1665 година но објаснета е од Огист Френел 1816 година. Френел се послучил со Хајгенсовиот принцип, кој тој и го дополнил, па денес тој принцип се вика Хагенс-Френелов.

Појавата се објаснува преку Хајгенс_Френеловиот принцип. Сите точки од слободниот дел на отворот или препреката претставуваат секундарни светлински извори кои се кохерентни. Сликата што се добива на екранот поставен на извесно растојание од препреката (отворот) ја викаме **дифрактограм**. Оваа слика е резултат на интерференција на секундарните извори од делот на брановиот фронт кој е слободен за светлината.

Вообичаено е дифракционите појави да се делат на Френелова и Фраунхоферова дифракција.

Дифракција од Френелов тип се оние случаи на појавата кога светлинскиот извор и екранот на кој се набљудува резултатот на дифракција од дадена препрека се на конечно растојание од неа. Во овој случај светлинските зраци се дивергентни, а брановите фронтови се закривени површини.

Ако растојанието на изворот и растојанието на екранот до препреката што ја предизвикува дифракцијата се бесконечно големи, велиме станува збор за **дифракција од Фраунхоферов тип**.

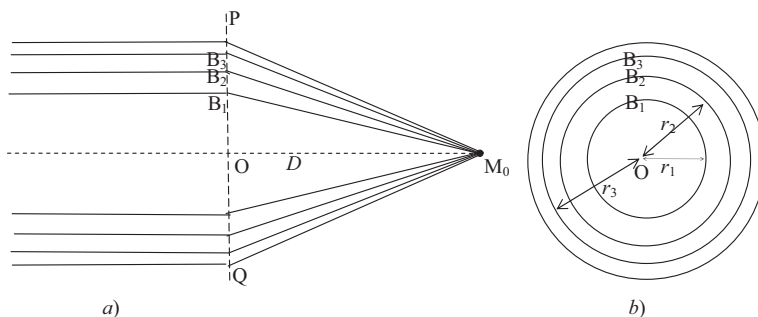
Ваков услов се постигнува со поставување на точкест светлински извор во фокусот на

собирана леќа, така се добива рамен светлински бран чии зраци се паралелни, значи изворот е бескрајно далеку. Исто така и набљудувањето се прави во фокалната рамнина на друга леќа поставена зад препреката со што се постигнува да е екранот бескрајно оддалечен.. Мора да се подвлече дека суштинска разлика во објаснувањето на појавите од овие два типа дифракција нема. Разлика постои само во тежината на строгото теориско математичко решение на феноменот. Појавите на дифракција од Фраунхоферов тип математички поедноставно се решаваат, затоа тие и нашле поголема примена.

Френелови зони

Нека замислиме дека до една рамнина PQ допира бран кој потекнува од многу оддалечен светлински извор. Бранот може да го сметаме за рамен бидејќи е изворот многу далеку. Тргувајќи од оваа моментална положба на бранот треба преку интерференција на секундарните бранови чии извори се распоредени врз PQ да се пресмета светлосниот интензитет во произволно одбрана точка M_0 , која лежи на нормалата на рамнината PQ (види слика 4). Врз брановиот фронт ПЛЈ се замислуваат зони во вид на концентрични прстени со центар во точката O, т.н, **Френелови зони**.

Радиусите r_1, r_2, \dots се менуваат на следниот начин:



Сл. 9. а) Кон методот на Френел за пресметување на интензитетот на светлината во точката M_0 . Разделните полупречници (б) се избрани така што растојанијата од M_0 до соодветните точки B_1, B_2, \dots се r_1, r_2, \dots

$$D + \frac{\lambda}{2}, D + 2\frac{\lambda}{2}, D + 3\frac{\lambda}{2} + \dots + D + k\frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

каде што $D=PM_0$, λ е брановата должина на светлината. Полуоречниците r_1, r_2, \dots се полупречници на зоните од кои само првата е кружна зона, другите се прстени.

Се покажува дека плоштината на секоја од зоните е еднаква на плоштината на првата кружна зона. Тоа се покажува на следниот начин:

Плоштината на k -тата зона е:

$$S_k = r_k^2 \cdot \pi - r_{k-1}^2 \cdot \pi \quad (3)$$

што со оглед на тоа што е

$$r_k^2 = \left(D + k \frac{\lambda}{2} \right)^2 = D^2 + k\lambda D + k^2 \frac{\lambda^2}{4}$$

и

$$r_{k-1}^2 = \left(D + (k-1) \frac{\lambda}{2} \right)^2 = D^2 + (k-1)\lambda D + (k-1)^2 \frac{\lambda^2}{4}$$

па ако се занемари членот со λ^2 плоштината на k -тиот прстен со замена во (3) е:

$$S_k = D \cdot \lambda \cdot \pi \quad (4)$$

колку што се добива и за плоштината на кружната прва зона (треба прво да се пресмета r_1 според Питагорина теорема OB_1).

Ако површините на зоните ги сметаме за севкупност на елементарни сферни извори, тогаш на секоја i -та точка од k -та зона и одговара некоја друга точка од претходната ($k-1$) зона, така што меѓу нив постои фазна разлика $\lambda/2$, што би значело дека тие се бранувања се поништуваат. Сумарното дејство на неограничен светлински бран има амплитуда E , која може да се прикаже како бескраен ред:

$$E = E_1 - E_2 + E_3 - E_4 + \dots \quad (5)$$

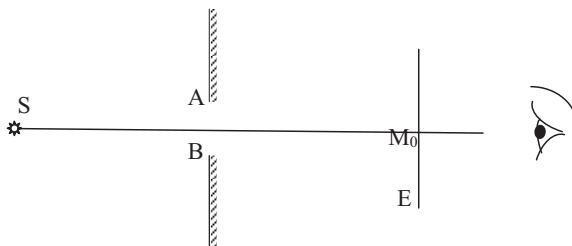
а за да се најде конечната амплитуда треба овој ред да го прикажеме како:

$$E = \frac{E_1}{2} + \left[\frac{E_1}{2} - \frac{E_2}{2} \right] + \left[\frac{E_3}{2} - \frac{E_2}{2} \right] + \dots + \left[\frac{E_k}{2} - \frac{E_{k-1}}{2} \right] \quad (6)$$

Поради фактот што членовите во средните загради сите се поништуваат (тоа произлегува од претходниот заклучок), останува дека резултантната амплитуда што го испраќа точкестият извор е еднаква на $\frac{1}{2}$ по дејството на централната зона.

Френелова дифракција на кружен отвор и кружна препрека.

Френеловите зони може многу лесно да нипослужат да ја објасниме дифракцијата на кружен отвор (сл. 10).

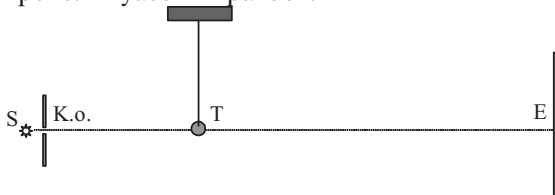


Сл.10. Оптичка шема на дифракција на кружен отвор

Дифракционата слика се набљудува низ полупропустлив екран E чија рамнина е поставена нормално на симетралата на кружниот отвор.

Ако растојанието меѓу точката M_0 и рамнината на отворот е D , и тогаш кружниот отвор опфаќа парен број Френелови зони, бидејќи секоја i -та точка од k -та зона и одговара некоја друга точка од претходната ($k-1$) зона, така што меѓу нив постои фазна разлика $\lambda/2$, бранувањата се поништуваат и во точката M_0 имаме минимум интензитет. Ако пак отворот е од точката M_0 на такво растојание, што тој опфаќа непарен број Френелови зони во точката M_0 ќе имаме максимум. Тоа значи, во монохроматска светлина, ако екранот го движиме во точката M_0 на некои места ќе има светлина, а на некои места темно петно. Во бела светлина минимумите и максимумите за различните бранови должини се на разни растојанија, па така M_0 стално ја менува бојата.

Сосема аналогна дифракција, на кружниот отвор е дифракцијата на кружна препрека. Станува збор за експеримент познат како Френел-Пуасон-Арагоов.



Сл. 11. Оптичка шема на Френел-Пуасон-Арагоов опит

Така, во сенката на топчето се гледа светла точка, дифракционата слика е дадена како слика². Експериментот во бела светлина има светла, различно обоена точка на кое и да било растојание на екранот.

Експериментот исто се објаснува со Хајгенс -Френелов принцип на интерференција на отворените Френелови зони. Ако нивниот број е парен имаме минимум, а ако е непарен максимум. Опитот го носи називот на Френел, Пуасон и Араго бидејќи, оспорувајќи ја Френеловата теорија Пуасон тврдел дека во сенката на кружна препрека треба да се јави светла точка, а Араго го извел експериментот и ја докажал исправноста на Френеловата теорија.

Прашања, задачи, активности

1. Изведете ја релацијата (4) за плоштината на првата Френелова зона.
2. Теоријата на Френелови зони е актуелна и во доменот на радиотелекомуникациите. Дали разбирате зошто?
3. Светлото петно во сенката на топчето во бела светлина секаде се гледа, дали разбирате зошто е тоа така? Објаснете.
4. Дали дифракцијата како појава ја има и кај другите видови бранови? Посочете примери каде бранот се шири и во местата на таканатечената „геометриска сенка“.

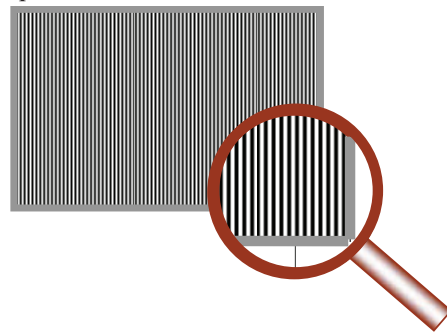
Дајте објаснение на следните поими, ако е потребно дајте и примери

- дифракција на светлина
- дифракција од Френелов тип,
- Фраунhoferова дифракција,
- дифрактограм
- Френелова зона
- Френел-Пуасон-Араго ов опит

12.15. ДИФРАКЦИОНА РЕШЕТКА

Дифракциона (оптичка) решетка е оптички уред кој се состои од голем број N , многу тесни прозрачни пукнатини помеѓу кои се наоѓаат непрозрачни делови (сл. 1). Добрите дифракциони решетки се добиваат со специ-

јални резачки машини со кои на стакло се нанесуваат зарези. Таму каде што стаклото е зарезано, светлината не поминува. Денес многу добри дифракциони решетки се добиваат холографски како интерферограм на два рамни брана. Бројот на процепите може да биде и до неколку илјади процепи на еден милиметар растојание. Постојат и рефлексивни дифракциони решетки (обично метални) кај кои прволиниски пруги ја рефлектираат светлината, а “непропусни” ја расејуваат. Техниката и на вака добиените решетки, со развојот на ласерската технологија, е многу унапредена.



Сл.1

Ако е ширината на просирните (или рефлектирачките) пруги a , а ширината на непрозрачните делови b , под **константа на решетката** d се подразбира :

$$d = a + b \quad (1)$$

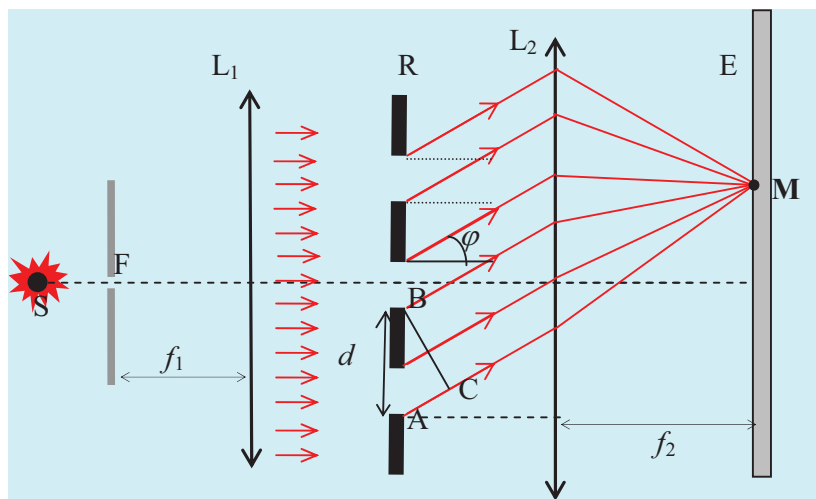
За да ја ги дадеме основите на елементарната теорија на дифракција на оптичката решетка ќе претпоставиме дека на неа паѓа рамен светлински бран со напдно определена бранова должина λ . Веќе објаснивме дека за да се добие рамен бран, треба точкест светлински извор S да се постави во фокусот F на дадена тенка собира леќа L_1 (сл. 2)

Секундарните извори од точките на отворите создаваат светлински бранови кои ќе се простираат под најразлични агли во однос на упадните зраци. Брановите кои се меѓусебно паралелни и се отклонуваат за ист агол φ со помош на додатна леќа L_2 се суперпонираат во една точка M и таму како резултат на нивната интерференција ќе се појави одреден интензитет.

Да го пронајдеме условот при кој брановите во точката M ќе дадат максимален интензитет. Разликата на одот на зраците помеѓу крајните зраци на секој од отворите, на пример зраците кои паѓаат во точките A и B , е дадена со отсечката AC . Ако ова растојание е цел број пати поголемо од брановата должина на упадната светлина, тогаш не само овие туку и сите други зраци од отворите во точката M ќе предизвикаат осцилирање во фаза, па тука светлинските бранувања ќе се засилуваат. Од триаголникот ABC може да се најде дека:

$$|AC| = |AB| \sin \varphi = d \sin \varphi . \quad (2)$$

Максимуми ќе се набљудуваат под аголот φ , определен со:



Сл. 2.

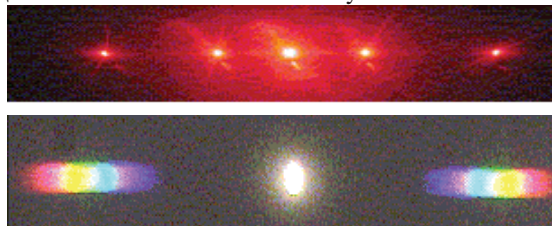
$$d \sin \varphi = k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (3)$$

Овие максимуми се викаат **главни максимуми**.

Треба да се подвлече дека кога условот даден со релацијата (3) е исполнет за точките A и B кои се наоѓаат на најниските делови од отворите, тој е тогаш исполнет и за сите други точки од отворот. На секоја точка од првиот отвор одговара соодветна точка од вториот отвор која се наоѓа на растојание d .

Условот (3) укажува дека положбата на максимумите за сите k , освен за централниот кога е $k=0$, зависи од брановата должина на

светлината. Колку е поголема брановата должина на светлината толку е поголем аголот



Сл.3. Дифрактограми добиени со оптичка мрежица: со монохроматска светлина (горе); бел кружен отвор, на средина и спектарот од прв ред

на отклонувањето на таквата светлина. Ова укажува дека ако врз дифракциона решетка падне бела светлина таа ќе создаде обоени ликови на пукнатината, бидејќи разните бои ќе се отклонат различно. Така се добива спектар.

Основната примена на оптичката решетка, го користи токму тоа нејзино својство. Таа претставува уред за испитување на спектрите на светлината што упаѓа врз неа. При тоа за секоја вредност на бројот k , одговара соодветен ред на спектарот.

На фотографијата од сликата 3 горе дадена е дифракциона слика на монохроматска, ласерска светлина, а на фотографијата подолу, добиениот спектар на бела

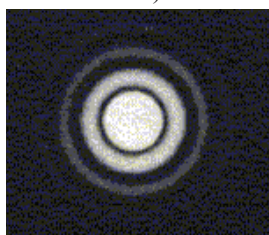
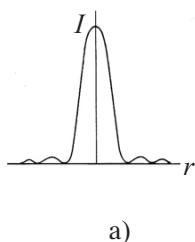
светлина.

12.16. ДИФРАКЦИЈА НА КРУЖЕН ОТВОР. РАЗДЕЛНА МОЌ НА ОПТИЧКИТЕ ИНСТРУМЕНТИ

Појавата дифракција игра многу важна улога во можностите на добивањето на сликата кај оптичките уреди: микроскопот, телескопот, окоето и сл. Дифракцијата е причина поради која не може да се добијат разделени ликови на две блиски точки на некој предмет

во микроскопот, или на две оддалечени ѕвезди со помош на телескопот .

На сл. 4 е даден дифрактограм добиен од кружен отвор со дијаметар D . Тоа е изразен кружен светол максимум **Ериев диск** (Airy) со светли и темни кружни пруги околу него. На сликата 4а е даден график на зависноста на интензитетот од растојанието, а на 4б негова негова фотографија.



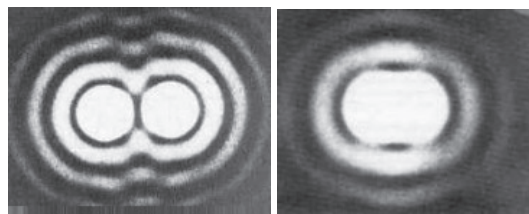
а)
б)
Сл. 4

Поради појавата на дифракција на кружните отвори на оптичките уреди, ликот на точкест предмет во фокалната рамнина на леќата која е поставена во отворот, не е точка, како што тоа го предвидува геометриската оптика, туку тоа е Ериев диск – дифрактограм на кружниот отвор. Положбата на првиот минимум на овој дифрактограм е определена со аголот φ . Оваа величина зависи од дијаметарот на кружниот отвор D и брановата должина на употребената светлина λ :

$$\sin \varphi = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

Во релацијата се јавува и факторот 1,22 кој се добива со строгото решавање на проблемот при што се користат специјални математички функции.

За да може ликовите на две блиски точки (два објекта, две ѕвезди) да бидат видени како одделени, треба нивните дифрактограми да го исполнат следниот услов: *централниот максимум од дифрактограмот на едниот лик да се поклопи со првиот минимум од дифрактограмот на вториот*. Овој услов е познат како **Рејлиев критериум**.

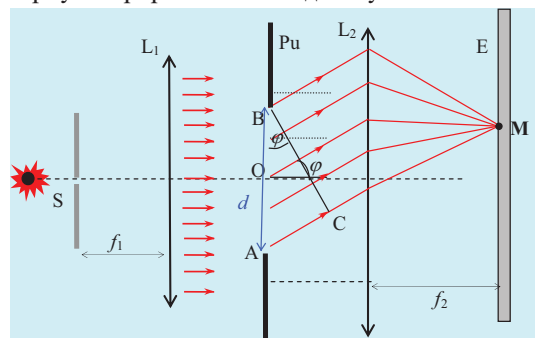


Сл. 5. Кога радиусот на централниот максимум на првиот лик е поголем од радиусот на првиот минимум на вториот, двата објекта нема да бидат видени одвоено (слика десно)

Разделната моќ е определена со релацијата (4). Колку е аголот на **раздвојување** φ помал, толку е, велиме, разделната моќ на оптичкиот инструмент поголема. Тоа значи, за да се зголеми разделната моќ на некој уред треба да се намали аголот на раздвојување. Како што покажува (4), тоа може да се постигне или со намалување на брановата должина на употребената светлина, или со зголемување на радиусот на кружниот отвор во кој се поставува леќата.

Кај микроскопите се користи намалувањето на брановата должина, а кај телескопите зголемување на дијаметарот на уредите – леќите или огледалата.

ПРИМЕР 1. Да се определи условот за добивање на минимумите при дифракција од Фраунхоферов тип на една пукнатина.



Сл.6

Решение: Зад пукнатината (сл.6) светлинските зраци се свиваат и резултатот на интерференцијата во точката M ќе зависи од тоа каква е фазната разлика на сите зраци кои се отклонети за агол φ во однос на оптичката оска. Ако е патната разлика AC помеѓу

зракот кој почнува во А и зракот кој почнува во В еднаква на λ или цел број пати поголем, тогаш долж пукнатината со растојание d за секој зрак помеѓу точките А и О ќе има и соодветен зрак меѓу точките О и В помеѓу кои постои патна разлика $\lambda/2$ или непарен број $(2k + 1) \lambda/2$, па тие зраци се противфазни и се поништуваат.

Според тоа условот :

$$|AC| = d \sin \varphi = k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, 3..)$$

е услов за *постојење на минимум*. Внимавајте, релацијата е иста со релацијата (3), но таа се однесува на минимум!

ПРИМЕР 2. Дифракциона мрежица има $1,26 \cdot 10^4$ пукнатини рамномерно распределени врз површина со ширина од 25,4 mm. Таа е осветлена прво со монохроматска светлина со бранова должина од 450 nm (сина), а потоа со црвена светлина со бранова должина 625 nm. Под кои агли ќе се појават максимумите од втор ред за овие бранови должини?

Решение: Константата на решетката d ја добиваме :

$$d = \frac{L}{N} = \frac{23,4 \cdot 10^{-3}}{1,26 \cdot 10^4} = 2,016 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 2016 \text{ nm}$$

Максимумот од втор ред е определен со $k=2$.

Значи според (3)

$$\sin \varphi_1 = \frac{2\lambda}{d} = \frac{2 \cdot 450 \text{ nm}}{2016 \text{ nm}} = 0,446 \quad ; \quad \varphi_1 \cong 26^\circ 30'$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{2\lambda}{d} = \frac{2 \cdot 625 \text{ nm}}{2016 \text{ nm}} = 0,62 \quad ; \quad \varphi_2 \cong 38^\circ 20'$$

ПРИМЕР 3. Од какво максимално растојание човекот може да види одвоено двата фара на на автомобил, ако растојанието меѓу фаровите е $d=1,5 \text{ m}$, а дијаметарот на зеницата на окото е 5 mm. За светлината да се земе средната бранова должина 555 nm. Човечкото око го сметаме за оптички уред, на кој во ефектите на дифракцијата доаѓа до израз отворот на зеницата.

Решение Според релацијата (4), бидејќи брановата должина на светлината е многу пати помала од величината D , може да се земе $\sin \varphi \approx \varphi$, па аголот на разделување е

$$: \varphi = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad \text{Аголот под кој се гледаат}$$

фаровите α , е исто така мал и даден со: $\alpha = \frac{d}{x}$

каде што x е непознатото растојание. За да се гледаат двата фара треба $\alpha \geq \varphi$, значи

$$: \frac{d}{x} = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad \text{па следува}$$

$$x = \frac{dD}{1,22\lambda} = \frac{1,5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{1,22 \cdot 555 \cdot 10^{-9}} = 11,1 \cdot 10^3 \text{ m} = 11,1 \text{ km}$$

Прашања, задачи и активности

1.Објаснете зошто во спектарот од 0-ти ред кај оптичката решетка нема бои.

2. На дифракциона решетка со константа 10 μm паѓа паралелен сноп на зелена светлина. Со помош на спектрален апарат е измерено дека максимумот од прв ред (првата лента) се гледа под агол $\varphi_1 = 3^{\circ} 7'$ во однос на лентата од нулти ред. Колкава е брановата должина на оваа светлина?

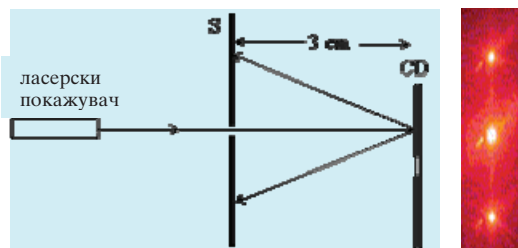


Сл.7

(Одговор: 550 nm)

3. Секој компакт диск претставува извесна рефлексиона дифракциона решетка (сл. 7).

Со ласерски покажувач, чија што бранова должина сте ја определите експериментирајќи со Соач интерферјсот), секој од вас може да го определи средното растојание помеѓу зарезите на дискот. За таа цел направете експериментална шема како на сл.8.



Сл.8

На екранот S при рефлексција на светлината Од компакт дискот CD, поставен како на сликата, се добива нултиот и плус и минус првиот максимум на диграктограмот. Со мерење на растојанието меѓу CD и екранот (околу 3 cm)

како и растојанието помеѓу нултиот и првиот максимум ќе го определите аголот α , а со користење на равенката (3) и константата d .

4. Побарајте на интернет веб страна

Diffraction ; diffraction grating

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/c1>

и симулирајте што станува кога ќе се промени константата на мрежичката, или како се менува сликата кога ќе се промени брановата должина.

Дајте објаснение на следните поими, ако е потребно дајте и примери

- дифракциона решетка
- дифракција на кружен отвор
- разделна моќ на оптички унструмент
- Рејлиев критериум

12.17. ПОЛАРИЗАЦИЈА НА СВЕТИНАТА

Трансферзалност на светлинските бранови

Долго време најголемите поборници на брановата природа на светлината Јунг и Френел сметале дека светлината е бран, сличен на звучниот, значи лонгитудинален.

Со Максвеловата теорија за електромагнетната природа на светлината се укажува дека светлинските бранови се трансверзални. Светлината претставува бран кој се состои од пренос на електромагнетен импулс во просторот. Тоа значи, векторот на електричното поле осцилира само во една рамнина, таа во којашто лежи антената, а векторот во магнетното поле осцилира исто така во една рамнина, која е нормална на рамнината на осцилирањето на електричниот вектор, Насоката на ширењето на бранот е нормална на начината на електричното и магнетното поле

Но, се покажува дека светлината емитирана од кој и да било извор, не е поларизирана.

Како да го објасниме тоа?

Природна (неполаризирана) светлина.

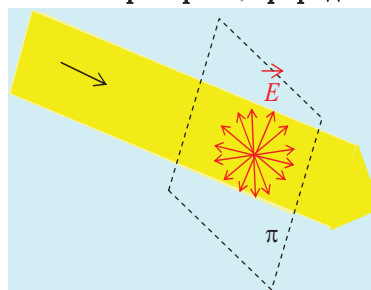
Линиски поларизирана светлина

Светлинските извори се места каде што доаѓа до возбуждавање на електроните од огромниот број атоми на изворот. Секој

електрон, кој емитира бран секако претставува нешто како “антена” за електромагнетен бран кој ги има сите својства како и бранот емитиран кај антените на радиобрановите. Но, во изворот бројот на возбудените атоми е огромен, тие осцилираат потполно независно и во сосема случајни рамнини.

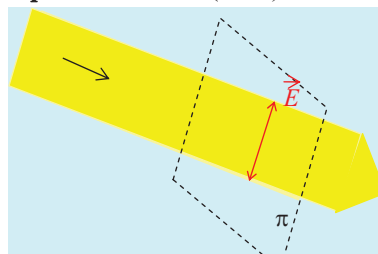
Значи ако се набљудува светлински зрак во рамнина π нормална на неговото ширење, векторот на електричното поле во рамнината осцилира во сите можни насоки (сл. 1).

Се разбира и на векторот на магнетната индукција исто така осцилира во повеќе рамнини, но рамнини кои се нормални на тие во кои осцилира електричното поле. Таквата светлина е **неполаризирана, природна**.



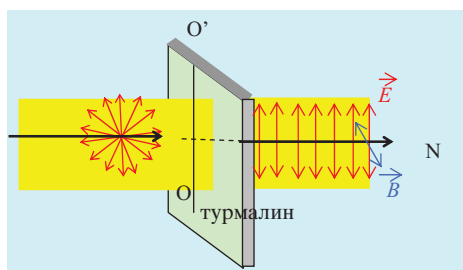
Сл.1

Ако на било кој начин се постигне светлинскиот зрак да биде таков што електричниот вектор да осцилира само во една рамнина, таквата светлина ја викаме **линиски поларизирана светлина** (сл. 2).



Сл. 2

Некои кристални тела, како, на пример, турмалинот имаат таква особина да ги пропуштаат осцилирањата на јачината на електричното поле \vec{E} само во една рамнина. Осцилирањата на светлината во други рамнини се апсорбираат, или тотално или делумно. Затоа разликуваме **тотално поларизирана линиска светлина** или, **делумно поларизирана**.



Сл.3 Векторот \vec{E} и осцилира во една рамнина, а нормално на неа осцилира \vec{B}

Турмалинот е т.н. едноосен кристал. Тој има една оска на симетрија. Ако се земе правоаголна плочка од тој кристал, при што тој е така изрежан што нејзините страни да се поклопуваат со оската на кристалот OO' , и ако светлината од некоја лампа се пушти да паѓа нормално на таквата плочка, светлината зад плочката ќе биде поларизирана. Таа ќе осцилира така што нејзиниот електричен вектор \vec{E} ќе осцилира во рамнината во која лежи оската на кристалот (сл.3).

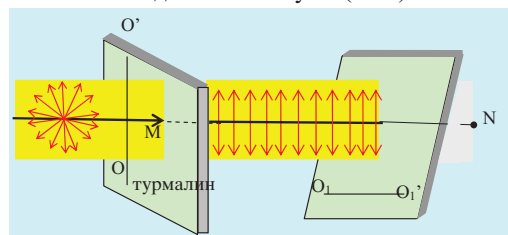
Како ќе заклучиме дека е тоа така? Ако во точката N се наоѓа нашето око, светлината што поминала низ турмалинската плочка ќе ни изгледа иста како и природната. Малку ќе биде обоена зелено и делумно апсорбирана, но ако плочката од турмалин ја вртиме, стално низ неа ќе набљудуваме ист интензитет. И би заклучиле, поларизираната светлина не се разликува од природната. Меѓутоа, тој заклучок е погрешен.

Ако на патот на веќе поларизираниот зрак се постави друга турмалинска плочка и почнеме истата да ја вртиме, светлинскиот интензитет се намалува. Кога оптичката оска на втората плочка O_1O_1' ќе стане нормална на OO' , низ плочката нема воопшто да се набљудува светлина (сл. 4).

Велиме двете турмалински плочки се во **вкрстена положба**. Ваквите турмалински плочки ги викаме **поларизатори**, а ако се употребуваат во пар, обично втората ја викаме **анализатор**. Насоката на осцилирање на електричниот вектор (кој понекогаш се вика светлосен) обично е означена на поларизаторите.

Може да се покаже дека интензитетот на светлината која поминала низ два полариза-

тора зависи од тоа каков е аголот помеѓу нивните оптички оски. Ако се оптичките оски паралелни, аголот е 0° светлината има несмален интензитет, додека ако е тој агол 90° , интензитетот е еднаков на нула (сл.4).



Сл.4

Општо, светлината која поминала низ двата поларизатора, и излегла од анализаторот има интензитет I :

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (1)$$

при што I_0 е интензитетот што упаѓа на поларизаторот, а α е аголот помеѓу поларизаторот и анализаторот. Оваа релација е позната како **закон на Мали** (Malus).

Освен турмалинот постојат и други супстанции од кои се прават поларизаторите. Такви својства има и **полароид**. Откриен е од Ленд (E.H.Land) во 1938 година. Тоа претставува тенок слој (0,1 mm) од органска супстанција чии молекули се подредени во долг ланец. Таков слој се нанесува врз стаклена или целулоидна плочка. Ваквите поларизатори можат да се направат во значително поголеми димензии.

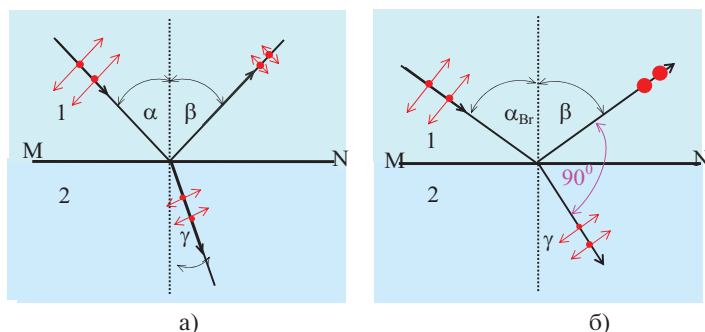
Други начини за добивање поларизирана светлина

Поларизирана светлина може да се добие и при премин на светлината од една оптичка средина во друга.

Знаеме дека на таква граница светлината делумно се рефлектира, а делумно се прекршува. Ако се анализира рефлектираната и светлината што се прекршила може да се уочи дека светлината е поларизирана.

Во општ случај таа е делумно поларизирана, така што, кај рефлектираната светлина преовладива светлина која е поларизирана нормално на упадната рамнина, додека светли-

ната која се прекршила е делумно поларизирана, но во упадната рамнина, определена со



Сл.5. Поларизација при рефлексија и прекршување. Со црвено е означена насоката на осцилирање на електричниот вектор. Должината на стрелката или големината на точката укажува на степенот на поларизација, во рамнината на упаѓање или во рамнина нормална на таа.

светлосниот зрак и нормалата. Тоа е прикажано на сл. 5а.

Брустер покажал дека е можно добивање и на тотално линиски поларизирана светлина. Таква е рефлектираната светлина за која е исполнет условот - аголот помеѓу рефлектираниот зрак и зракот кој се прекршил да изнесува 90° . Упадниот агол тогаш се вика **Брустеров агол** и тој зависи од релативниот индекс на прекршување. Имено, ако е аголот меѓу рефлектираниот зрак и зракотот на прекршувањето еднаков на 90° , тогаш од Снелиусовите закони следи :

$$\beta + \gamma = 90^\circ \quad ; \quad \alpha + \gamma = 90^\circ \quad ; \quad \gamma = 90^\circ - \alpha \quad ; \quad \text{или}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = n_{21}$$

т.е.
$$\text{tg} \alpha = n_{21} \quad (2)$$

Ова е релацијата според која се определува Брустеровиот агол. На пример, за стаклото, кое во однос на воздухот има индекс на прекршување 1,54, Брустеровиот агол изнесува 57° . Тоа значи, *ако светлината паѓа под Брустеров агол, тогаш рефлектираната светлина е линиски поларизирана и тоа во рамнина нормална на упадната*. Прекршената светлина е секогаш само делумно поларизирана, но при Брустеров агол степенот на нејзината поларизација е најголем и тоа во рамнината на упаѓањето.

Најдобри поларизатори се добиваат со помош на појавата на **двојно прекршување на светлината**.

Таа настанува кај посебен вид кристали (на пр. исландски калцит) кај кои при прекршувањето се добиваат два поларизирани зрака. Со посебна обработка на таквите кристални тела може да се добијат квалитетни поларизатори .

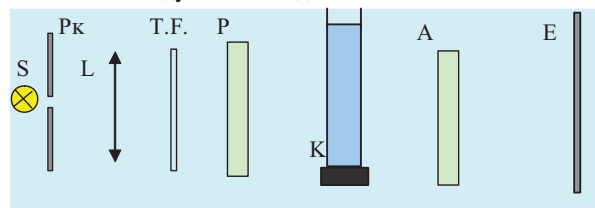
Поларизацијата на светлината нашла голема примена во денешната технологија на дисплеите на калкулаторите или LCD – екраните кај лаптоп компјутерите (сл.6).

Примена. Вртење на рамнина на поларизација

Постојат супстанции кои покажуваат интересно својство кога на нив паѓа поларизирана светлина. Ако светлината е поларизирана при премин низ ваквите супстанции доаѓа до вртење на нејзината рамнина на поларизација.,

*Супстанциите кои ја вртат рамнината на поларизацијата на светлината се викаат **оптички активни супстанции***. Такви се на пример плочка од кварц или раствор на шеќер.

Експериментотална демонстрација на појавата се изведува на следниот начин:



Сл.7

Се поставува шема како на сл. 7. Светлината од дадена ламба интензивно осветлува една пукнатина Pк. Зад пукнатината е поставена леќа L, топлински филтер T.F (со кој се заштитува поларизаторот), поларизатор P и анализатор A. Со леќата L се дотерува да се добие остар лик на оваа пукнатина на екранот E, поставен на извесно растојание зад анализаторот. При тоа поларизаторот и анализаторот се поставени во паралелна положба. Потоа постапуваме вака: Ги поставуваме пола-

ризаторот и анализаторот во вкрстена положба. Ликот на екранот се губи. Ако сега, меѓу поларизаторот и анализаторот се постави кивета со раствор на шеќер К, рамнината на поларизацијата на светлината што доаѓа од поларизаторот ќе се заврти за некој агол. Поради тоа, светлината од поларизаторот (и киветата) не е во вкрстена положба во однос на анализаторот. На екранот ќе се појави светлина. Ако сакаме да го измериме аголот за којшто дошло до свртување на рамнината на поларизацијата, ќе треба рамнината на осцилирање на анализаторот да ја завртиме за некој агол така што повторно да го снеса ликот на пукнатината Рк.

Кај оптички активните раствори аголот на вртење на рамнината на поларизацијата α зависи од концентрацијата на растворот c , и должината на слојот на растворот l . Законот се испишува на следниот начин:

$$\alpha = [\alpha_0]cl, \quad (3)$$

каде што $[\alpha_0]$ е **специфичен агол на вртење на рамнината на поларизацијата**. Тој зависи од природата на растворената оптички активна супстанција и од брановата должина на употребената светлина. Овој агол е дефиниран со големината на аголот на вртење на рамнината на поларизација на раствор со 100% концентрација, ако неговата должината изнесува 1 dm.

Токму тоа и нашло голема примена кај **полариметрите**. Најпознат таков инструмент се вика **сахариметар**, каде што според аголот на вртењето на рамнината на поларизација се определува концентрацијата на шеќерот во даден раствор.

Вртењето на рамнината на поларизацијата зависи од брановата должина на светлината. Затоа за изведување на експериментот најдобро е да се користи монохроматска светлина.

Пример 1. Колкав е односот на интензитетот на светлината која поминува низ два поларизатора чии оски се поставени под агол α , и интензитетот на упадната светлина I_0 , ако а) $\alpha = 45^\circ$ б) $\alpha = 60^\circ$

Решение: Според законот на Мали, рав.(1) :
 $I = I_0 \cos^2 \alpha$ значи во случајот а)

$$I = I_0 \cos^2 45^\circ = I_0 \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right)^2 = \frac{I_0}{2} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = \frac{1}{2},$$

а во случајот б) на ист начин со оглед на тоа што $\cos 60^\circ = 1/2$, за I/I_0 се добива $1/4$.

Пример 2. Под кој агол во однос на хоризонтот треба да паѓаат Сончевите зраци за да рефлектираната светлина од езерска вода биде тотално поларизирана?

Решение: Според Брустеровиот закон рав.2, ако светлината паѓа под агол α_{Br} за кој важи релацијата:

$\operatorname{tg} \alpha_{Br} = n_{21}$ што овде е $\operatorname{tg} \alpha_{Br} = n$, каде што n е апсолутен индекс на прекршување на водата, бидејќи светлината паѓа од воздух, ќе биде:

$\operatorname{tg} \alpha_{Br} = n = 1.33 \Rightarrow \alpha_{Br} \cong 53^\circ$, а бараниот агол е тогаш $\varphi = 90^\circ - \alpha_{Br} = 37^\circ$.

Пример 3. Определете го $[\alpha_0]$ за шеќер ако е измерено дека 10% раствор на шеќер со должина 5cm ја врти рамнината на поларизацијата на монохроматската светлина за агол $\alpha = 3.3^\circ$.

Решение: Според релацијата (3)

$$\alpha = [\alpha_0]cl ; [\alpha_0] = \frac{\alpha}{\frac{c}{100}l} = \frac{100 \cdot 3.3}{10 \cdot 0.5} = 66^\circ.$$

Прашања, задачи и активности

- Некои рибари користат поларизациони очила за сонце. Зошто?
- Колкав е Брустеровиот агол на стакло со индекс на прекршување $n=1.7$? (Одг. $59^\circ 30'$).
- Колкав е Брустеровиот агол за дијамантот со $n=2.42$? (Одг. $67^\circ 40'$).
- Побарајте на интернет веб страна : Polarization of light**
<http://www.colorado.edu/physics/2000/polarization/> прочитајте повеќе за оваа појава и набљудувајте ја симулацијата на феноменот.

Кратко резиме

Светлината претставува трансверзален бран, има електромагнетна природа, меѓутоа обичните извори на светлина емитираат неполаризирана светлина.

Поларизирана светлина може да се добие, со поминување низ специјални кристални телополаризатори (пр. турмалин), со рефлексија и прекршување ако паѓа под Брустеров агол и со двојно прекршување. Оптички активна супстанца ја врти рамнината на поларизација за агол кој е пропорционален на нејзината должина и концентрација, Тоа е искористено кај полариметрите.

12.18. СПЕКТРАЛНИ АПАРАТИ

Добивањето на спектар на електромагнетните зрачења од оптичката област наоѓа широка примена во научни и практични задачи. Во најопшт случај се користи за:

- анализа на зрачењето од непознат извор;
- добивање на монохроматски извор на светлина.

И во двата случаи е потребен *спектрален апарат* за разложување на светлината. За разложување на електромагнетните бранови од оптичката област, т.е. за добивање на спектар се користи *оптичката призма и дифракционата мрежичка*. (Принципот за добивање на спектарот на белата светлина со оптичка призма и дифракциона мрежичка веќе се запознавте. Со цел спектарот да биде што е можно појасен, т.е. различните спектрални делови да бидат што подобро разделени, спектралните апарати имаат сложена конструкција.

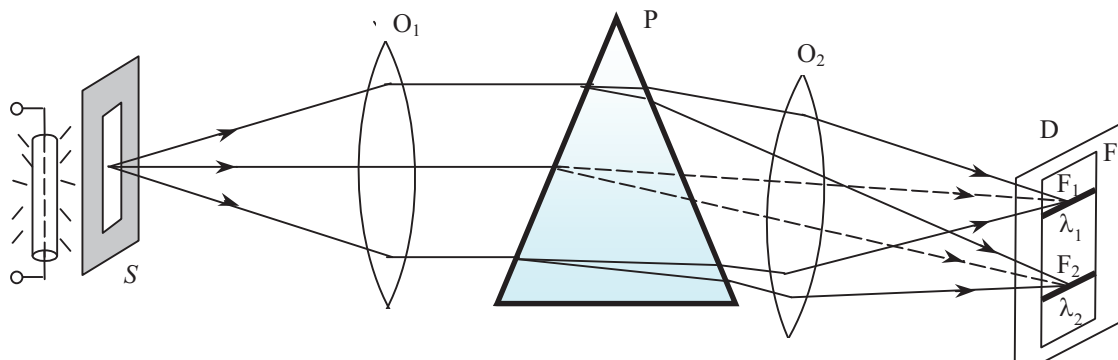
Спектралниот апарат (сл. 1) е изграден од следните главни делови: *процеп S, дисперзионен елемент P, фокусирачки дел*, што го содржи *објективите O₁ и O₂ и детектор на светлината D*. Фокусирачкиот дел се состои од: 1. *колиматор K* - што го содржи *колиматорниот објектив O₁* и *процепот S* и 2. *камера* - што го содржи *камерениот објектив O₂*.

Оваа шема дејствува оптички на следниов начин: Испитуваната сложена светлина се пропушта преку тесниот процеп S, поставен во фокалната рамнина на објективот O₁, кој дава паралелен сноп што паѓа на дисперзионит

елемент P (сл. 1). При минувањето низ P снопот од сложената светлина се разложува на толку паралелни снопови колку што различни бранови должини се содржат во него. Овие снопови зафаќаат определен агол помеѓу себе, зависно од својствата на дисперзионит елемент. Објективот O₂ поставен на нивниот пат ги собира во неговата фокална рамнина F. Секој сноп паѓа на местото F₁, F₂, ..., што одговара на аголот под кој неговите зраци паѓаат на камерниот објектив и од брановата должина. Разложената светлина се регистрира од детекторот D, поставен со неговата светлински осетлива површина во фокалната рамнина на објективот O₂. Според тоа, ако на процепот од спектралниот апарат паѓа сноп од сложена светлина, тогаш во фокалната рамнина од објективот O₂ ќе се појават толку монохроматски ликови на процепот колку што различни бранови должини се наоѓаат во снопот. *Секој монохроматски лик претставува една спектрална линија со определена бранова должина, што одговара на една од фреквенциите застапени во сложената светлина.*

Севкупноста од сите монохроматски ликови на процепот, добиени во фокалната рамнина на камерниот објектив, претставува спектар на сложената светлина. Ако во фокалната рамнина F поставиме матово стакло или фотографска плоча, тогаш на нив добиваме јасна слика на спектарот.

Во зависност од типот на детекторот на светлината се разликуваат следните видови на спектралните апарати. Спектралните апарати кај кои спектарот се добива на соодветно избрана фотоплоча или план филм се познати



Сл. 1. Оптичка шема на спектрален апарат.

како **спектрофотографи**. Кај спектралните апарати што се употребуваат во *видливиот дел од оптичката спектрална област*, камерата е заменета со дурбин, а спектарот се набљудува со голо око. Ваквите спектрални апарати наменети за визуелна спектроскопија се познати како **спектроскопи**.

Некои спектроскопи се снабдени со скала на која директно може да се прочита брановата должина на спектралните линии и нивните интензитети. Спектралните апарати, пак, во кои директно се регистрираат спектрите со детектори што го користат фотоелектричното дејство - фотомултипликатори и фотодиоди или топлинското дејство - болометри и термоелементи, на електромагнетните зрачења се познати како **спектрометри** или **спектрофотометри**, а во атомската спектроскопија - **квантометри**.

При спектрометрите може во фокалната рамнина на камерниот објектив да се постави втор процеп - *излезен* и служи да оддели од спектарот само една бранова должина, т.е. само една спектрална линија. Таквиот спектрален апарат е наречен **монохроматор**, односно **полихроматор**, ако има повеќе излезни процепи. Ваквиот спектрален апарат – монохроматор може да служи како извор на монохроматски зрачење.

Детекторот, поставен позади излезниот процеп, ги претвора светлинските сигнали во електрични, кои се мерат со соодветен прибор. Така се добива распределба на интензитетот на светлината во зависност од брановата должина, т.е. спектар на изворот на светлината.

Според типот на дисперзниот елемент спектралните апарати, главно, се делат на:

- **призмени**, при кои за разложување на светлината се користи призма или систем од призми;

- **дифракциони**, кои користат дифракциони мрежички.

За зрачењата во далечната инфрацрвена област (50000 nm - 400000 nm), како и во далечната ултравиолетова област, под 121 nm, не постојат познати прозачни оптички материјали. Поради тоа во овие области за разложување на зрачењата, како дисперзни елементи, во спектралните апарати се користат дифракциони мрежички. Кај спектралните апарати

најчесто се користат *рамни* или *вдлабнати* рефлексивни мрежички. За различни спектрални области се користат дифракциони мрежички со различни константи.

Спектралните апарати имаат свои карактеристики кои зависат, пред сè, од дисперзниот елемент (призмата и дифракционата мрежичка), како и од останатите елементи што влегуваат во нивниот состав. Постојат спектрални апарати со мала и голема разделна моќ.

Спектралниот апарат има голема разделна моќ кога две блиски спектрални линии чии бранови должини се разликуваат само за $\Delta\lambda=0,01$ nm може да ги раздвои една од друга.

За проучување на инфрацрвената област постои експериментална техника наречена **инфрацрвена спектроскопија**. За регистрирање на инфрацрвените зраци се користат детектори на слаби топлински ефекти (термоелементи, болометри и разни други радиометри).

Како интензивни извори за инфрацрвено зрачење во инфрацрвената спектроскопија се користат загреани тела до црвена или бела боја, Оптичките стакла (флинт и крон) не ги пропуштаат инфрацрвените зраци, поради тоа оптичките елементи (призма, леќи), кај спектралните апарати се изработуваат од сафир (Al_2O_3) или сол (MgCl, KCl).

Денес за проучување на ултравиолетовата област постои експериментална техника наречена **ултравиолетова спектроскопија**.

Бидејќи оптичките стакла (крон и флинт) не ги пропуштаат UV зраците при нивната анализа, оптичките елементи (призма, леќи) во спектралните апарати се од кварц (SiO_2) и флуорид (CaF_2) или специјални стакла.

Проучувањето на зрачење во бранов интервал од 200 nm до 125 nm се прави во вакуум, поради што оваа област се нарекува **вакуумна ултравиолетова област**.

Извори на UV зрачење претставуваат гасните ламби. Водородната гасна ламба емитува ултравиолетово зрачење со бранова должина до 190 nm. Извори на UV зрачење со пократки бранови должини се ламбите со инертни гасови, на пример, ксенонова ламба.

Како детектори на UV зрачење се користат само фотографски материјали, фотомултипликатори, како и фотодиоди.

12.19. ВИДОВИ СПЕКТРИ И СПЕКТРАЛНА АНАЛИЗА

Емисиони спектри

Кога супстанциите ќе се загреат или озрачат со електромагнетно зрачење, нивните атоми или молекули апсорбираат енергија и се возбудуваат. Тогаш атомите и молекулите стануваат извори на електромагнетни бранови, поконкретно на светлина.

Спектрите што се добиваат при непосредно разложување на светлината емитувана од супстанциите (телата) се нарекуваат *емисиони спектри*. Емисионите спектри можат да бидат од три типа и одговараат на различните состојби на супстанцијата: *линиски*; *лентести*, *континуирани (непрекинати)*.

Испитувањата покажуваат дека типот на спектарот е определен од карактеристиките на телото што свети, односно што апсорбира светлина.

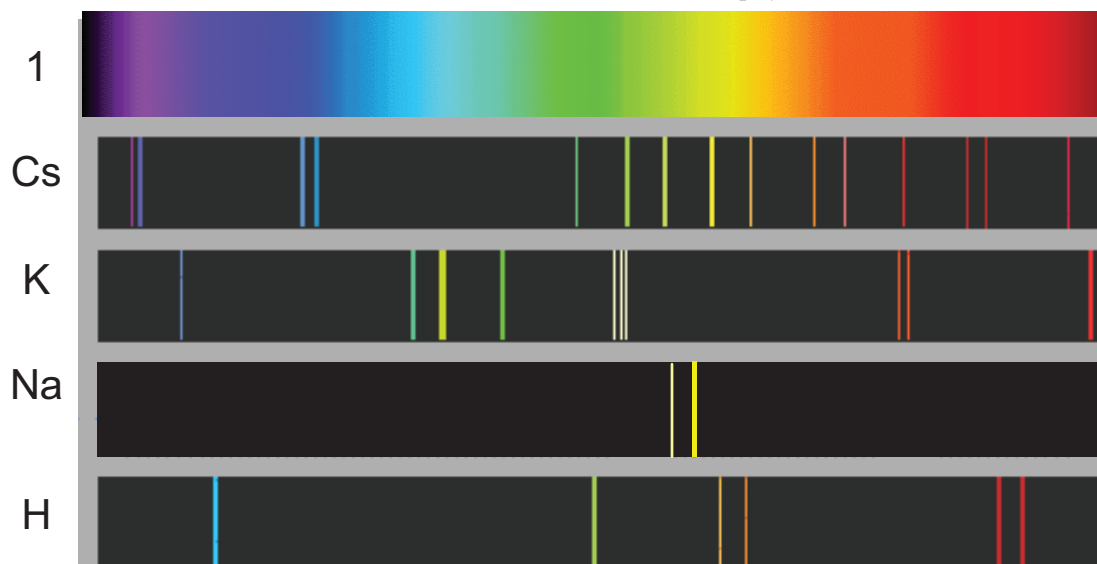
Линиски спектри (сл. 2). Кога на електродите на стаклена цевка (гајслерова цевка) полна со атомарен гас, при низок притисок се приклучи прав напон, во неа протекува електрично празнење низ гасот и притоа се емитира светлина. При анализа на светлината со спектроскоп се набљудуваат одделни тесни линии со различна боја и интензитет, разделени

со темни меѓурастојанија. Односно, се набљудува линиски спектар на атомите на супстанцијата во гасна состојба.

Линиските спектри се карактеристични за светењето на гасови или пари од метали и течности со мала густина. Линиските спектри потекнуваат од атоми или јони на атоми што се наоѓаат на такви растојанија од своите соседи да можат да зрачат како единки. Многу гасови се состојат од одделни атоми, на пример, такви се парите од метали и инертни гасови – хелиум, неон, аргон, и др. Гасовите што се состојат од молекули на пример, водород, кислород, пари од јод и др. при возбудување можат да се распадат на атоми (да дисоцираат). Таквите атоми на гасови даваат линиски спектар.

Светење на атоми во гасови и пари може да се предизвика и при нивно загревање, на пример, во гасен пламеник. На пример, за смеса водород-воздух температурата на пламенот е околу 2400 К. При определена температура внесената супстанција во пламенот испарува, нејзините атоми термички се возбудуваат и ја испуштаат апсорбираната енергија преку емисија на светлина - даваат линиски спектар.

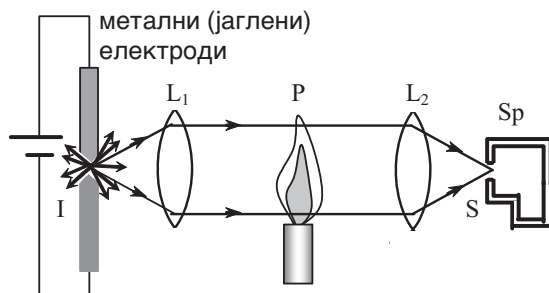
Експеримент. Со платинска игла се внесуваат кристали од готварска сол (NaCl) или фитил од азбест наквасен во раствор од готварска сол во пламеникот Р (возбудување на атомите од натриум е можно и во пламенот на



Сл. 2. Континуиран спектар (1) и линиски спектри на Cs, K, Na, H.

обична шпиртусна ламба), чија светлина паѓа на процепот S од спектроскопот Sp (сл. 3).

Пламенот се обојува со интензивна жолта боја и во спектроскопот се набљудуваат, во жолтиот дел на спектарот, две сосема блиски жолти линии (сл.2), со бранови должини $\lambda_1 = 589 \text{ nm}$ и $\lambda_2 = 589,6 \text{ nm}$. Тоа покажува дека во пламеникот молекулите на натриумхлоридот се распаднале на атоми на натриум и хлор. Притоа светењето на атомите од натриумот лесно се набљудува, но на атомите на хлорот не е лесно, обично е сосема слабо.



Сл. 3. Принцилна шема за добивање на емисионен (апсорционен) спектар

За добивање на линиските спектри на металите, како и на нивните легури најчесто од нив се подготвуваат електроди во вид на прачка со конусна форма на едниот крај, меѓу нив се создава празнење преку електрична искра или лак (сл. 3). Притоа во меѓуелектродното растојание од неколку милиметри, температурата достигнува 3000-10000 K, дел од супстанцијата на површината од електродите испарува. Испарените атоми по термички пат се возбуждаат и светат. Спектарот на емитираната светлина се анализира со спектрален апарат.

Проучувањето на линиските (атомските) спектри од разни супстанции покажало дека **секој хемиски елемент има свој строго определен линиски спектар**. Линиските (дисконтинуираните) спектри на хемиските елементи се разликуваат по бојата, интензитетот, положбата, т.е. по нивната бранова должина, бројот на одделните спектрални линии и нивната распределба.

Лентестите спектри се состојат од поодделни ленти, со различна боја, разделени со темни меѓурастојанија. Тие настануваат при зрачењето на јонизирани и недисоцирани мо-

лекули, што се наоѓаат на такви растојанија од своите соседи да можат да зрачат како единки. Лентестите спектри исто така се карактеристични за светењето на гасови или пари со мала густина.

При внимателно испитување се покажува дека лентите се составени од голем број на одделни линии. Лентестите спектри, исто така, се **дисконтинуирани**, т.е. во нив спектралните ленти се разликуваат по положбата (т.е. по нивната бранова должина), по бројот и нивната распределба во спектарот. Тие спектри се карактеристични за супстанциите со молекуларна градба.

Денес за проучување на емисионите линиски и лентести спектри е развиена експериментална техника **емисиона спектроскопија**.

Континуиран спектар. Ако врз процепот од спектроскопот паѓа светлина од ламба со загреана жичка, свеќа итн., се добива континуиран спектар, во кој има континуиран премин на една боја во друга (сл. 2 означен со 1). Со овој вид спектри ние веќе се запознавме (види поглавје Дисперзија на светлината)

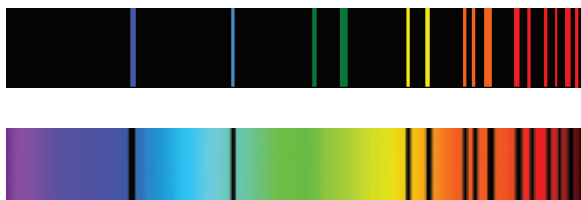
Континуираните спектри се добиваат како резултат на светењето на тврдите и течните тела при нивното загревање. Овие спектри не даваат никаква информација за структурата на честиците (атоми и молекули) што светат.

Апсорпциони спектри. По минувањето на бела светлина низ обоена супстанција (на пример, раствор од CuSO_4 во вода), нејзината боја се променува. Испитувањата на спектарот од таква "профилтрирана" светлина, низ таква супстанција, покажуваат дека во неа некои бои исчезнуваат, т.е. се појавуваат **темни линии** или **апсорпциони ленти**. Тие одговараат на бранови должини или бранови подрачја што ги апсорбирала обоената супстанција. Таквиот спектар е наречен **апсорционен спектар**.

Како емисионите така и апсорпционите спектри можат да бидат линиски (атомски) и лентести (молекуларни). Од голем интерес е проучувањето на апсорпционите спектри на едноатомните гасови, како и на пареите од металите, составени од поодделни атоми.

Кои светлински зраци ќе бидат апсорбирани од едноатомните гасови ако низ нив се пропушти бела светлина? Пропуштаме бела

светлина од електричниот лак I (сл. 3), поставен пред пламеникот P во кој се наоѓаат пари од елементот што се проучува. Белата светлина преку собирните леќи L_1 и L_2 , по минувањето низ парите, паѓа на процепот од спектралниот апарат S_p - спектроскопот. Притоа се добива континуирираниот спектар на белата светлина прорежан со темни линии, поставени точно таму каде се наоѓаат светлите линии во емисиониот спектар (сл. 5).



Сл. 5. Емисионен и апсорпционен спектар на бариум

Молекуларните апсорпциони спектри, при минувањето на светлината низ хемиските соединенија, се должат на енергетските промени, и тоа: при движењето на атомите околу нивната рамнотежна положба, при ротацијата на молекулот и при електронските премини во молекулот.

Сите видови на атомски и молекуларни спектри се проучуваат во оптичката спектроскопија која се дели на *атомска и молекуларна*.

Спектрална анализа е физички метод за квалитативно и квантитативно проучување на хемискиот состав и хемиската структура на супстанциите преку користење на нивниот оптички спектар. Може да биде: **атомска и молекуларна спектрална анализа**.

Атомската спектрална анализа е физички метод за квалитативно и квантитативно изучување на хемискиот состав на супстанцииите според атомските спектри на елементите.

Во зависност од задачите што се решаваат при спектралната анализа се разликува *квалитативна и квантитативна спектрална анализа*. При квалитативната спектрална анализа се определува хемискиот состав, односно кои хемиски елементи влегуваат во составот на супстанцијата. Со квалитативната спектрална анализа се определува количинскиот износ на хемиските елементи во супстанцијата.

Спектралната анализа се користи во ас-

трономијата за определување на хемискиот состав и температурата на Сонцето и ѕвездите, како и нивното движење во просторот.

Со спектралната анализа се откриени некои елементи од периодниот систем, што биле предвидени од Д. Менделеев.

Во 1895 година во спектарот на Сонцето биле утврдени нови спектрални линии што биле препишани на нов гас, кој добил име хелиум (грчки *Хелиос* - Сонце). Нешто подоцна на Земјата бил откриен гас чиј спектар се покажало дека е идентичен со спектарот на хипотетичкиот хелиум. Така, претпоставката дека во составот на Сонцето постои нов елемент била потврдена.

Квантитативната спектрална анализа овозможува преку интензитетот на спектралните линии на хемискиот елемент да се определи неговиот процентен износ во испитуваниот примерок. Така, со овој метод во даден примерок (легура, минерал и др.) може да се открие присуство на даден елемент (примеса) дури и кога масата е од ред на големина 10^{-10} g. Со тоа спектралната анализа по својата осетливост ги надминува сите аналитички методи. Притоа интензитетот на светењето на спектралните линии се зголемува со зголемувањето на концентрацијата на елементот во пробата.

Молекуларната спектрална анализа ги користи пред сè молекуларните апсорпциони спектри како и појавата луминисценција.

Спектралната анализа (атомска и молекулска) денес се повеќе се користи во науката и техниката. Така многу високата осетливост го прават овој метод погоден за користење во металургијата и машиноградбата, хемијата и геологијата, медицината и биологијата и во многу други области од науката и техниката.

Прашања, задачи, активности

1. Што се тоа монохроматори?
2. Опишете ги разликите во градбата на спектроскоп, спектрограф и спектрометар. Која е нивната намена?
3. По што се разликуваат атомските спектри на различните хемиски елементи

За да видите спектрите на елементи од Менделеевиот периоден систем отворете:

<http://onsager.bd.psu.edu/~jircitano/periodic4.html>

13.1. СПЕЦИЈАЛНИ ОПТИЧКИ МИКРОСКОПИ

Микроскопите кои се користат за визуализација на биолошките структури, зависно од нивните димензии, се прикажани во табела 1.

Табела 1.

примерок	протозои	крвни зрнца	бактерии	вируси
големина	10^{-3} m		10^{-7} m	
вид на микроскоп со	видлива светлина			UV
	електрони			

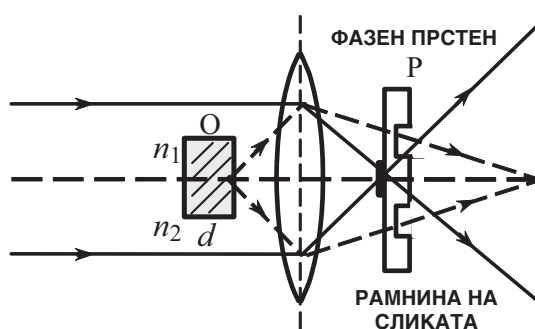
Деталите на препаратот видливи како резултат од различните бои или од различните интензитети на светлина што ги има сликата е познато како **контраст**. Кај обичниот светлински микроскоп контрастот се јавува како резултат на различната апсорпција на светлината. Различната апсорпција го менува интензитетот на светлината (т.е. амплитудата) која поминува низ разните делови на препаратот и сликата е видлива поради амплитудната контрастност. При испитувањето на тенки проѕирни пресеци на биолошки препарати, како што се необоените ткива и клетки, не може да се добие видлива слика, бидејќи не постои разлика во апсорпцијата. Кај таквите препарати постои патна разлика на светлинските бранови кои минат низ разни делови од препаратот. Ако патните разлики (еднакви се на фазните разлики) се претворат во амплитудни разлики, сликата може да биде видлива. Тоа се постигнува со помош на фазноконтрастни, интерферентни, флуоросцентни, поларизациони и други видови микроскопи.

ФАЗНОКОНТРАСТЕН МИКРОСКОП

Принципот на работа на микроскопот со фазен контраст е прикажан на сл.1.

Кај овој микроскоп препаратот О се осветлува со паралелен сноп на светлина чија бранова должина е λ . Ако димензиите на деталите од испитуваниот препарат се споредливи со брановата должина на светлината, дел од светлинските зраци по дифракцијата низ препаратот се собираат во рамнината на сликата. Дифрактираните зраци се прикажани со испрекинати линии. Останатите зраци (полна линија)

се собираат во рамнината Р. Тие потоа дивергираат и рамномерно ја осветлуваат позадината во рамнината на сликата.



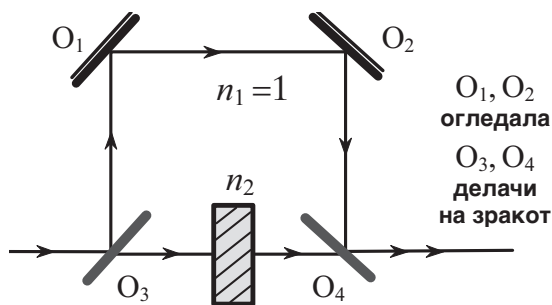
Сл. 1. Фазноконтрастен микроскоп

Ако објектот и околната средина, или разни делови на објектот, имаат различен индекс на прекршување (n_2 , односно n_1), помеѓу дифрактираните и недифрактираните зраци доаѓа до промена на оптичката должина $d(n_2 - n_1)$, каде што d е дебелина на препаратот О. Така меѓу овие зраци постои патна, а според тоа и фазна разлика, која приближно е $\lambda/4$.

За да се добие видлива слика, треба да се предизвика нова патна разлика од $\lambda/4$ се со цел да се намали интензитетот на брановите кои не се дифрактирани. Тоа се постигнува со фазен прстен оставен во рамнината Р. Така дифрактираните и недифрактираните зраци сега имаат патна разлика $\lambda/2$ (се во противфаза) и по суперпозицијата во фокусната рамнина на окуларот наполно се гасат, што

овозможува регистрирање на деталите како светли делови во темно поле. Интензитетот на недифрактираните зраци се редуира на тој начин што централниот дел на фазниот прстен се покрива со тенок метален слој.

Контрастот на создадената слика со интерференција ќе зависи од патната разлика која е резултат од постоењето на препаратот. Разликата во интензитетот на светлината (т.е. амплитуден контраст) може да биде резултат од различниот индекс на прекршување или од различната дебелина на одделни делови на препаратот. Контрастноста на сликата е поголема, доколку индексот на прекршување се менува побрзо. Тие недостатоци се отстранети кај интерференционите микроскопи. Како фазноконтрастен микроскоп може да се користи обичен микроскоп со соодветна замена на кондензорот и објективот.

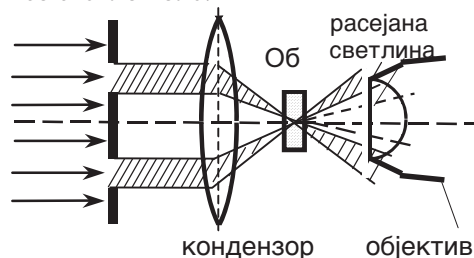


Сл. 2. Интерференционен микроскоп

ИНТЕРФЕРЕНЦИОНЕН МИКРОСКОП – Кај овој микроскоп (сл. 2) постојат два кохерентни светлински снопа добиени со делење на упадниот снап од полупропустливо огледало O_3 . Едниот снап поминува низ препаратот кој има индекс на прекршување n_2 и должина L , а другиот поминува низ воздух чиј индекс на прекршување е $n_1=1$. Двата снопа меѓу кои постои патна разлика позади полупропустливото огледало O_4 интерферираат. Овие снопови не се раздвоени со дифракција, како кај микроскопот со фазен контраст, па деталите на сликата не се пренагласени.

МИКРОСКОП СО ТЕМНО ПОЛЕ (сл.3). – Кај овој микроскоп препаратот се осветлува со дивергентен снап на светлина, кој се добива од процепот пред кондензорот. Притоа, дирек-

тните зраци не влегуваат во објективот, а сликата се добива со расејување на светлината од малите структурни нееднакости на препаратот. Тоа на сл. 3 е прикажано се испрекинати линии. Овие микроскопи во медицината се користат за набљудување на колоидни честичи и бактерии кои не се видливи со микроскоп со светло поле.



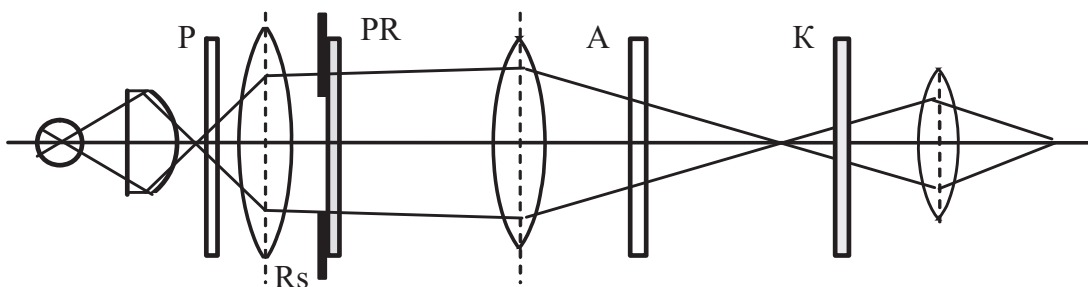
Сл.3. Микроскоп со темно поле

ФЛУОРЕСЦЕНТНА МИКРОСКОПИЈА. –

Некои супстанции, ако се озрачат со ултравиолетова светлина, X-зраци или електрони, емитуваат видлива светлина, значи флуоресцираат. Покрај органските и неорганските супстанции флуоресценција покажуваат и некои биолошки материјали.

Биолошките материјали флуоресцираат со различни бои, на пример, 'рскавицата флуоресцира со светло сина боја, а липидите со жолта. Освен примарна постои и секундарна флуоресценција. Таква флуоресценција даваат одредени бои – *флуорохроми* со кои може да се бојат биолошките препарати (клетки, ткива).

При флуоресцентната микроскопија, кога макромолекуларните супстанции самите не флуоресцираат, во молекулот се внесуваат молекули кои се флуоресцентни. На пример, за проучување на нуклеински киселини, се користат разни акридини. Имено, акридин оранж ако е врзан за ДНК при осветлување со УВ светлина флуоресцира зелено или жолто, а при сврзување со РНК молекулот – кафено-црвено. Флуоресцентната микроскопија дава можност за квалитативна анализа на РНК во клетките. На пример, заболени клетки од рак содржат повеќе РНК од здравите. Со овие постапки се откриваат трагови од некоја супстанција, која може да биде застапена од ред на големина 10^{-9} од вкупниот износ на испитуваниот примерок.



Сл. 4. Поларизационен микроскоп

ПОЛАРИЗАЦИОНЕН МИКРОСКОП. – Структурните детали на некои препарати осветлени со неполаризирана светлина се транспарентни, а со тоа и невидливи. Меѓутоа, ако се осветлат со поларизирана светлина, се добива разлика во интензитетот на светлината што поминува низ препаратот Pr.

Кај поларизациониот микроскоп (сл. 4) поларизаторот P (полароиден филтер или т.н. Николова призма) е поставен во системот за осветлување, додека анализаторот A е позади објективот. Освен тоа, во состав на овој микроскоп влегува и компензаторот K кој, всушност, е плочка од анизотропна супстанција која воведува промена на фазата за $\lambda/4$.

Кога главната рамнина на поларизација на поларизаторот и анализаторот се заемно нормални, видното поле на микроскопот е темно. Врз основа на оптичката активноат на некои структури во препаратот кои имаат способност за вртење на рамнината на поларизација, се овозможува нивна видливост.

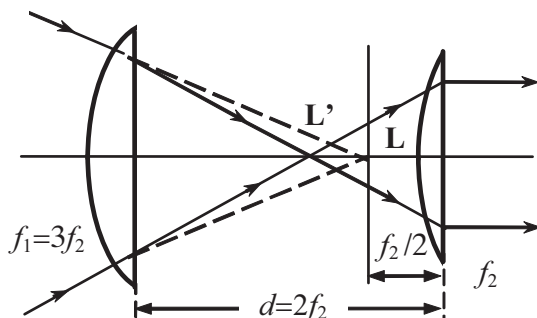
13.2. ОКУЛАРИ И ОБЈЕКТИВИ

Окуларот е дел на оптичкиот микроскоп кој се состои од метален цилиндар во кој се сместени две леќи. Улогата на окуларот е да му овозможи на набљудувачот да ја види сликата на предметот кој се набљудува.

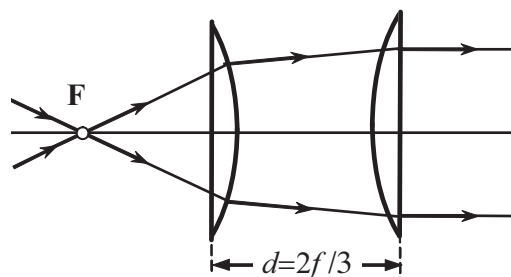
Хајгенсовиот окулар е комбинација од две план-конвексни леќи кои со конвексните страни се свртени кон објективот (сл. 1).

Со цел да се намали хроматската аберација фокусните растојанија на леќите се однесуваат од 3:1 до 1,5:1.

Рамсденовиот окулар (сл. 2), се состои од две еднакви план-конвексни леќи чии испакнати страни се свртени една кон друга. Двете леќи имаат еднакво фокусно растојание, а се поставени на меѓусебно растојание $2/3$ од нивното фокусно растојание ($d = 2f / 3$ – каде што со f е означено фокусното растојание на леќите).



Сл. 1.



Сл. 2.

13.3. ЕЛЕКТРОНСКИ МИКРОСКОП

Примената на оптичкиот микроскоп за откривање на детални структури на препарати е ограничена на разделна моќ, дадена со равенката (за мали агли $\sin \varphi \approx \varphi$)

$$\varphi = 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (1)$$

каде што φ – агол под којшто се гледаат две најблиски точки од препаратот разделени на определено растојание; λ – бранова должина на видливата светлина; D – дијаметар на отворот на објективот. Од релацијата (1) следува дека не е можно да се конструира оптички микроскоп, со којшто ќе може да се набљудуваат детали на објекти, чии димензии се споредливи или помали од брановата должина на видливата светлина λ . Со оптички микроскоп се набљудуваат детали на препарат што се на минимално растојание 200 nm, т.е. неговата максимална разделна моќ е 200 nm, а максималното корисно зголемување е околу 1500 пати.

Меѓу електромагнетните зрачења за таа цел, секако, одговараат рендгенските зраци со бранова должина и тоа од 10 до 10^{-4} nm. Но, при конструирање на рендгенски микроскоп, сличен на оптичкиот, се појавуваат засега непремостиви тешкотии. Проблемот е во тоа што индексот на прекршување на сите материјали за рендгенските зраци е многу близок до единица. Ете затоа рендгенските зраци не се прекршуваат и рефлектираат на границата меѓу две средини. Како последица на тоа не е можно да се изработат неопходните леќи за рендгенски микроскоп.

Затоа место рендгенските зраци се користат снопови на електрони, т.е. корпускуларни зраци со соодветни Де Бролиеве бранови должини (помали од 0,1 nm). Тие имаат двојна природа. Според Луј Де Броли секоја честича, па и електронот со маса $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg, кој се движи со брзина v поседува и бранови својства. Брановата должина е зададена со равенката

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} \quad (1)$$

каде што $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Js е Планковата константа.

При поминување на електрон со маса m_e и полнеж e низ потенцијална разлика U , потенцијалната енергија се менува за eU . Притоа важи:

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU \quad (2)$$

Од тука за брзината на електронот се добива

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}, \quad (3)$$

односно, кага равенката (3) ќе се внесе во (1) за брановата должина се добива:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2eUm_e}} \quad (4)$$

Со замена на константите во равенка (4) за брановата должина на електронот забрзан со потенцијална разлика U се добива:

$$\lambda = \frac{6,625 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31}}} \frac{1}{\sqrt{U}}$$

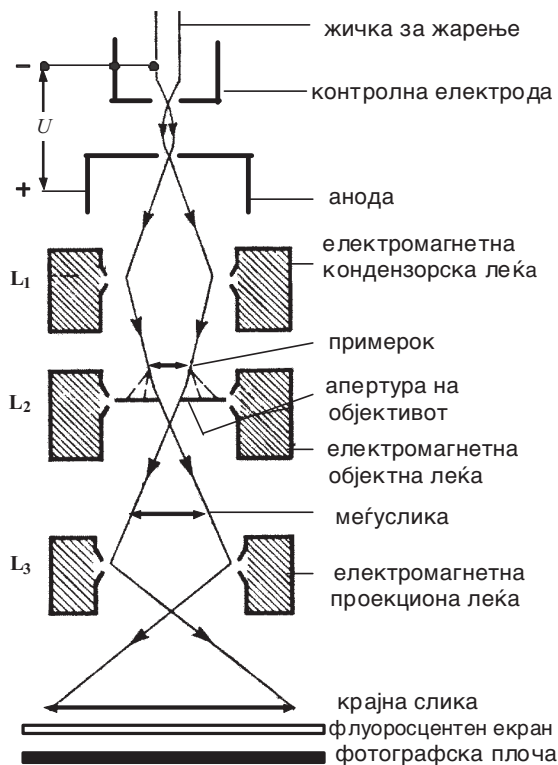
$$\lambda = \frac{1,227 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{U}} \text{ m} \quad (5)$$

Според тоа, за електрон кој поминал, на пример, низ потенцијална разлика од 50 kV брановата должина е $\lambda = 0,0056$ nm, што е за околу 100 000 пати помала од брановата должина на видливата светлина. Бидејќи брановата должина на електронските снопови е 10^5 пати помала од брановата должина на видливата светлина, следува дека разделната способност на електронскиот микроскоп, при еднаква бројна апертура со оптичкиот, е 1000 пати поголема.

Така брановите својства на снап од електрони се користат во **електронскиот микроскоп** како замена за видливата светлина. Електронскиот снап се насочува и фокусира со електрични и магнетни полиња. Првите се електростатски леќи, а вторите се магнетни леќи. Фокусот на леќите се регулира со електричното или магнетното поле.

Електронските микроскопи, како и оптичките, може да бидат трансмисиони (*Transmission electrom microscope*), скенирачки (*Scanning electrom microscope*) рефлектирачки, емисиони и др.

Шемата на трансмисиониот електронски микроскоп е аналогна на оптичкиот и е прикажана на сл. 1. Накратко ќе се задржиме само на првите два, бидејќи тие се користат најповеќе.



Сл.1. Шема на трансмисионен електронски микроскоп

Електронскиот микроскоп преставува евакуирана комора, Високиот вакуум овозможува намалување на енергетските загуби на електроните. Во спротивен случај електроните се забрзуваат со различни енергии, кое предизвикува искривување на ликот. Овој ефект е аналоген на хроматската аберација при оптичкиот микроскоп.

Електроните кои се добиваат со термоелектронска емисија се забрзуваат до енергии од 30

до 100 keV и повеќе. Потоа со потенцијална разлика се забрзуваат и формираат т.н. моноенергетски електронски сноп.

На слика 1 е прикажана шема на **трансмисионен** електронски микроскоп, со којшто се добива рамен (дводимензионален), лик на предметот. Тој лик се набљудува на флуоресцентен екран или се фиксира врз фотографска плоча.

За фокусирање на електронскиот сноп се користат т.н. магнетни, електростатски и електромагнетни леќи. Притоа, врз електронскиот сноп се дејствува со електрично или магнетно поле.

Фокусното растојание на електронските леќи не е константно како кај оптичките. Тоа се регулира со промена на електричното или магнетното поле (види наелектризирана честица во електрично и магнетно поле) кое од своја страна може да се менува со промена на потенцијалната разлика меѓу електродите или јачината на струјата во намотките. На тој начин постои можност за регулирање и на зголемувањето на електронскиот микроскоп.

Најпрво со таквите леќи електронскиот сноп се обликува и се насочува на примерокот што се проучува (тоа е кондензорската леќа L_1). Со помош на електромагнетната леќа L_2 се создава првото зголемување, а конечното зголемување е со помош на леќата L_3 . Ликот на предметот се добива на флуоросцентен екран или на фотографска плоча.

Ликот на предметот се добива на следниот начин. Преку магнетни леќи се формира електронски сноп со потребниот интензитет и се фокусира врз примерокот. Магнетната леќа (објектив) го создава првото зголемување на ликот. Второто, крајно зголемување, го создава, проекционата леќа. Магнетните леќи претставуваат калемии со навивки низ кои тече еднонасочна струја. Ликот во трансмисиониот микроскоп се добива како резултат на нееднаквото расејување на електроните од одделни делови на предметот, каде што има разлика во нивната дебелина, маса и структура. Поради големата апсорпција електроните можат да преминуваат само преку многу тенки примероци. Поради тоа методот е соодветен за испитување на тенки слоеви или специјално подготвени отпечатоци (реплики) од површината на волуменски материјали.

13. Оптички методи во медицината

Скенирачкиот електронски микроскоп се користи, главно, за испитување на површини на материјалите. Во него многу тесен сноп од електрони ја скенира точка по точка површината на испитуваниот предмет. Притоа расејаните електрони од одделните точки се собираат во колектор. Добиените сигнали од расејаните електрони се обработуваат и се формира тродимензионален лик на површината од предметот. Максималната разделна моќ постигната со скенирачкиот електронски микроскоп е околу 5-10 nm што дава принципна можност да бидат регистрирани одделни атоми.

Електронските микроскопи се незаменливо средство како во научните испитувања (во биологијата, при испитување структурата на супстанциите и др.) и високите технологии.

Со електронскиот микроскоп се добива зголемување 10^6 пати поголемо од оптичкиот микроскоп, што дозволува да се набљудуваат структури со димензии од ред на 0,1 nm. Електронскиот микроскоп има голем придонес за развојот на молекуларната биологија, односно за добивање појасна претстава за некои макромолекули, градбата на бактериите и многу вируси. Меѓутоа поради сложените подготовки на препаратот со него не може да се набљудуваат живи клетки (*in vivo*).

Кај оптичкиот микроскоп недостатоците, што се резултат од погрешките на оптичките леќи, се отклонуваат со користење комбинации од леќи со различна јачина и од различни материјали. Кај електронските леќи, пак, тоа е невозможно. Затоа, кај електронскиот микроскоп се користи педесетина пати помала апертура отколку кај оптичките микроскопи.

Интензитетот на осветлувањето на разни делови на сликата, т.е. контрастноста кај електронскиот микроскоп зависи од расејувањето на електроните. Подрачјата кои се просирни за електроните, на сликата се светли. Во подрачјата со поголема густина, расејувањето на електроните е поголемо, па тие места на сликата се темни. Поголема контрастност на биолошките препарати се постигнува при нивната обработка со соли на некои метали (на пример, осмиум, олово, ураниум и др.), затоа што тешките атоми имаат поголема способност за расејување на електроните.



Сл. 2. Електронски микроскоп

Припремата на препаратите за електронска микроскопија е важна задача. Тие мора да бидат екстремно тенки за да не настане апсорпција на електроните во нив, туку само *расејување* што ќе даде информации за структурата на препаратот. За припрема на препаратите постои специјална технологија при што се запазува автентичноста на структурата. Материјалот се сече со уред *микротоом* (слоевите имаат дебелина од ред на микрометри). Таквиот препарат има надворешни димензии $2 \times 2 \text{ mm}^2$ и се поставува на тенка метална мрежичка на која се наоѓа тенок слој (филм со дебелина до 10 nm) од колодиум или јаглерод кој не дозволува пропаѓање на препаратот. Ако препаратите се од колоиди, суспензии од бактерии или вируси тие директно се поставуваат на мрежичката со тенок слој. Во зависност од препаратот и методот на микроскопирање, понатаму се врши обработка за поголем контраст: инкорпорирање на тешки атоми, вакуумско напарување со Pt, Au итн.

13.4. РАЗДЕЛНА МОЌ НА МИКРОСКОПИТЕ

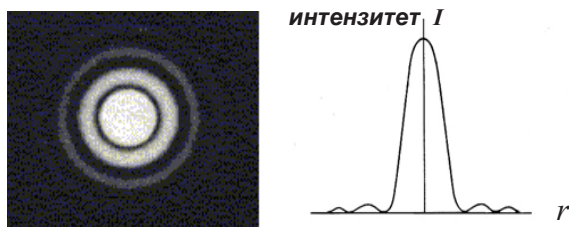
Кога структурните елементи на објектот што се набљудува и апертурата на објективот (радиус на отворот на леќата) се споредливи со брановата должина на светлината што се користи иде до израз брановата природа на светлината.

Бидејќи леќите се со конечни димензии, тие дејствуваат како кружни отвори, па сликата на секој точкест објект е дифракциона слика (сл.1) Ако две светли точки се многу блиску една до друга, како кај препаратот кој се гледа со микроскоп, соодветните дифракциони слики се прекриваат, па сликата е нејасна (сл.2).

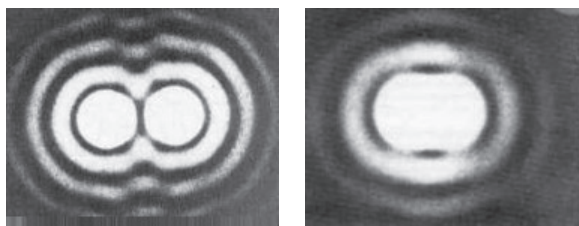
Способноста на секој оптички инструмент да ги покажува јасно деталите на предметот се опишува со **разделната моќ** S_r .

Разделната моќ S_r на оптичкиот систем е зададена со реципрочната вредност на **најмалото растојание** δ меѓу две точки на објектот, чии ликови сè уште се набљудуваат без да бидат прекривани еден со друг:

$$S_r = \frac{1}{\delta} \quad (1)$$

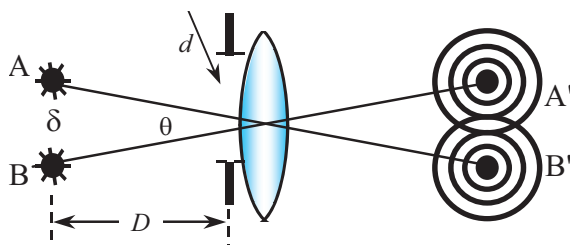


Сл. 1. Дифракциона слика од кружен отвор



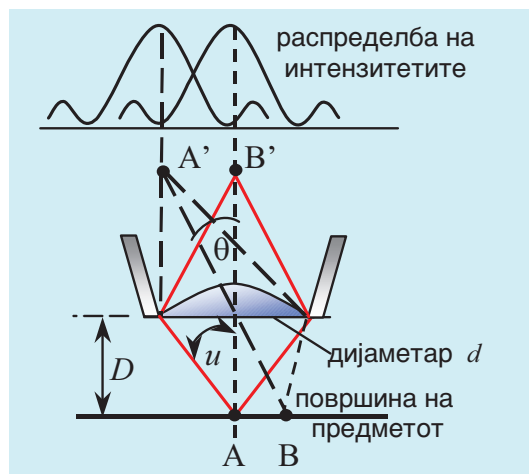
Сл. 2. Изглед на слика на два објекта

кога се гледаат раздвоени и не се раздвоени
Колку растојанието δ е помало, толку е подобра разделната моќ на оптичкиот систем. Според Аббе разделната способност на микроскопот зависи, пред сè, од разделната способност на објективот во кој непосредно влегуваат светлинските зраци, дифрактирајќи од деталите на предметот.



Сл. 3.

Според **Рејлевиот критериум**, две точки A и B (сл. 3) кои се на меѓусебно растојание δ се раздвоени, ако растојанието $A'B'$ меѓу нивните ликови од нулти ред е такво што првиот дифракционен минимум околу точката A' се совпаѓа со централниот максимум околу точката B'. Ако δ е помало не се раздвоени (се гледа само една точка).



Сл. 4. Две точки A и B видени раздвоено со објективот

13. Оптички методи во медицината

Да ги разгледаме точките А и В на препаратот кои се меѓусебно растојание δ и според Релевиот критериум се раздвоени (сл. 4). Аголот на раздвојување е зададен со равенката

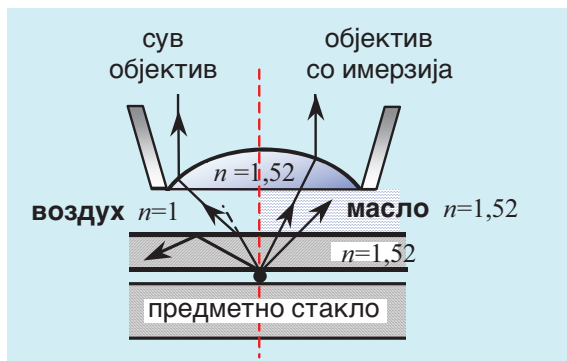
$$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (2)$$

каде што d е дијаметарот на апертурата на објективот, λ брановата должина на светлината со која се осветлува објектот. Кога две точки од предметот се наоѓаат на аголно растојание зададено со равенката (2), нивните слики кои, всушност, се дифракциони слики, сè уште може да се смета дека се една од друга раздвоени.

Во случај меѓу објектот и објективот на микроскопот да има средина со индекс на прекршување n за најмалото растојание δ меѓу две точки од објектот кои сè уште може да се видат раздвоени, теориските пресметувања го даваат изразот:

$$\delta = 1,22 \frac{\lambda}{2n \sin u} \quad (3)$$

каде што со u е означен аголот што го зафаќа оптичката оска на микроскопот со крајните зраци од конусниот сноп на светлина што навлегува во објективот, односно тоа е половина од аголот на отворот на објективот, D е растојание помеѓу објективот и објектот (види сл.5).



Сл. 5.

Имајќи ги предвид равенките (2) и (3) за

разделната моќ на микроскопот се добива

$$S_r = \frac{1}{\delta} = 1,64 \frac{2n \sin u}{\lambda} \quad (4)$$

Производот $n \sin u = A$ се вика *бројна апертура на објективот* на микроскопот.

Од равенката (4) произлегува дека разделната способност на микроскопот се зголемува (δ е помало) со намалување на брановата должина λ на светлината или со зголемување на бројната апертура на објективот A .

На пример, од равенката (5) може да се определи најмалото растојание меѓу две точки кои може да се видат одвоени една од друга со објектив кој има бројна апертура $A=0,6$ и се користи бранова должина $\lambda=546 \text{ nm}$.

$$\delta = 1,22 \frac{\lambda}{2n \sin u} = 0,61 \frac{\lambda}{A}$$

$$\delta = \frac{0,61 \cdot 546 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{0,6} = 560 \text{ nm} .$$

Поголема разделна способност се постигнува со користење монохроматска светлина со помала бранова должина, но тоа е ограничено со ултравиолетната граница ($\approx 380 \text{ nm}$). Со користење на ултравиолетова светлина, разделната способност може двојно да се зголеми. Во случај да се користи ултравиолетова светлина, сликата се снима на фотографска плоча.

Поради брановите особини на светлината разделната способност не може да се зголемува неограничено. За одредена бранова должина на светлина, вредноста на разделната способност S може да се зголеми или со зголемување на аголот u или со зголемување на индексот на прекршување n . Бидејќи вредноста на $\sin u$ може да биде најмногу 1,0, за суви објективи, кога меѓу препаратот и објективот се наоѓа воздух (сл. 5), максималната теориска вредност на бројната апертура е 1,0. Меѓутоа, во практиката бројната апертура е помала и најмногу може да изнесува 0,95.

Ако воздухот меѓу објективот и препаратот се замени со некоја течност - *имерзија*, која има индекс на прекршување $n > 1$, тогаш ќе се зголеми и бројната апертура, а со тоа и раздел-

ната способност на микроскопот. Објективите кои притоа се користат, се **имерзиони објективи**. Тие може да имаат бројна апертура од 1,2 за вода до 1,6 за монобромнафталин кога тоа се користи како имерзионо средство. Ако имерзионото средство и покривното стакло имаат еднаков индекс на прекршување, светлинскиот зрак, практично, поминува без прекршување, па во имерзиониот објектив поминува поширок светлински сноп (сл.5), а со тоа и сликата е посветла. Интензитетот на осветлувањето на сликата приближно е пропорционален со квадратот од бројната апертура. При изборот на зголемувањето кое го одредува бројната апертура значајна улога има објективот. Затоа правило е **јак објектив а слаб окулар** - никако обратно.

Максималното и минималното корисно зголемување на микроскопот за дадена бројна апертура A изнесува:

$$M_{\max} = 1000 A \quad M_{\min} = 500 A \quad (5)$$

Ако зголемувањето на микроскопот е преголемо, окото не може добро да ја гледа сликата на препаратот, а воедно и деталите на сликата нема да бидат добри.

Оптичките инструменти кои на било каков начин даваат некој зголемен лик, мора структурните величини да ги раздвојат најмалку до разделната способност на окото.

Ако се земе дека дијаметарот на зеницата е околу 4,0 mm, а брановата должина на светлината е $\lambda = 500 \text{ nm}$, според равенката (3) може да се определи најмалото меѓусебно растојание δ меѓу две точки кои се раздвоени со оптичкиот систем на окото, а се поставени на растојание на јасно гледање $D=0,25 \text{ m}$. Притоа се има предвид дека видниот агол θ е мал, па може да се земе дека $\sin \theta_1 \approx \text{tg } \theta \approx \theta$.

$$\tan \theta \approx \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

$$\theta = \frac{1,22 \cdot 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{4,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 1,5 \cdot 10^{-4} \quad (6)$$

$$\delta = D \theta = 0,25 \cdot \text{m} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 38 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (7)$$

Разделната способност на окото зависи од два фактора и тоа: од оптичкиот систем на

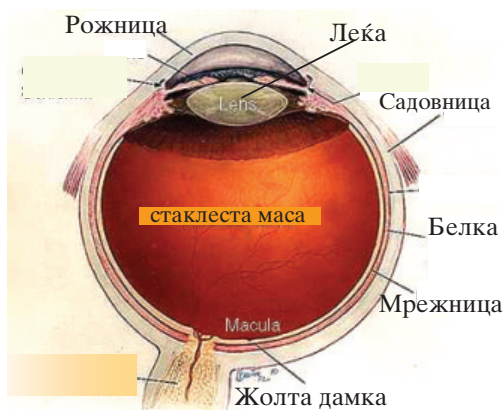
окото и од пакувањето на рецепторите на мрежницата. Обично се смета дека максималното меѓусебно растојание δ меѓу две точки кои се раздвоени со окото, а се на далечина на јасно гледање е нешто поголемо од погоре пресметаното, и приближно изнесува околу $100 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, односно $100 \mu\text{m}$.

За разделна моќ на електронскиот микроскоп важат скоро истите равенки како и за оптичкиот микроскоп. Бидејќи индексот на прекршување на вакуумот е единица, тогаш: За споменатата вредност на брановата должина од $4 \cdot 10^{-12} \text{ m}$, и за нумеричка апертура $\approx 10^{-2}$, разделната моќ е $\approx 10^{10} \text{ m}$ што е за скоро 1000 пати подобра од онаа на оптичкиот микроскоп, како и корисното зголемување кое што исто така е за 1.000 пати поголем од зголемувањето на оптичкиот микроскоп.

Прашања и задачи

1. Што е тоа флуоресцентна микроскопија и кога се користи?
2. Какви објективи и окулари постојат?
3. Кога се пористи поларизациониот микроскоп?
4. Што е тоа разделна моќ на микроскопот?
5. Како се зголемува разделна моќ на микроскопот?
6. Напишете ја релацијата за разделната моќ на оптичкиот микроскоп и објаснете ја.
7. Кои се потешкотиите при конструирање на рандгенски микроскопи?
8. Кои својства на електроните се искористени во електронскиот микроскоп?
9. Што претставува електронскиот микроскоп и како се насочуваат и фокусираат електроните во него?
10. Какви типови на електронски микроскопи постојат?
11. Како се формира ликот на предметот во електронскиот микроскоп и како се набљудува?
12. Колкава е разделната моќ и зголемувањето на трансмисионен и сканирачки електронски микроскоп?

13.5. ОПТИЧКИ СИСТЕМ НА ОКОТО



Сл.1. Основни делови на окото како оптички систем

Окото е најсовршениот оптички систем. Тоа има функција да формира коректна слика на предметите и појавите кои потоа се пренесуваат како информации во мозокот. Според начинот на формирање на ликот окото со голема приближност може да се каже дека одговара на фотоапаратот. Очното јаболко кај човекот има приближно сферна форма (сл. 1).

Сидот на окото е изграден од три слоја. Надворешниот слој, **белката**, му дава цврстина на окото. Таа во предната страна преминува во провидната **рожница**. Средниот слој е **садовницата**. Третиот слој е **мрежницата** која се состои од нерви и фотоосетливи рецептори **стапчиња и чепчиња**.

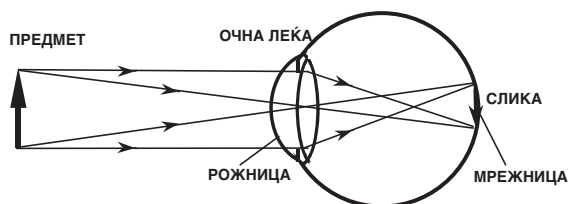
Светлината што паѓа на окото најпрво се прекршува од предниот просирен дел на очното јаболко - рожницата. Низ рожницата се гледа дијафрагмата која е обоена и се вика **шареница**. Во нејзиниот центар е **зеницата**.

Светлинските сигнали во окото влегуваат низ зеницата која има улога на дијафрагма. Дијаметарот на зеницата може да се менува, а со тоа се регулира големината на светлинскиот флукс што навлегува во окото. Тој процес на ограничување на светлинскиот флукс кој паѓа на мрежницата се вика **адаптација**. Окото е најосетливо во **жолтото петно**, чиј централен

дел има само чепчиња, тука се добива најјасна слика и најдобро се разликуваат боите.

Позади зеницата се наоѓа **очната леќа**. Таа е биконвексна леќа составена од повеќе слоеви со различен индекс на прекршување и различен радиус на закривеност. Оваа нехомогеност овозможува корекција на сферната аберација.

Окото е центриран оптички систем кој дејствува како собирна леќа чија **оптичка оска** е определена од оптичките центри на рожницата и очната леќа. Меѓутоа за поедноставна конструкција на ликовите се зема само една рамнина на прекршување. Така моделираното око се вика **редуцирано око** (сл.2).



Сл.2. Шематски приказ на редуцирано око

Правата што минува низ оптичкиот центар на очната леќа и најчувствителниот дел на светлината - жолтата точка се вика **права на директно гледање**. Таа зафаќа мал агол со оптичката оска на окото.

Некој предмет за да се види јасно потребно е да се создаде остра слика врз мрежницата. Кај нормално око, поради неговото променливо фокусно растојание, ликот што се формира секогаш паѓа на мрежницата. Ненапрегнато око, паралелните зраци кои доаѓаат од бесконечно далечните предмети ги фокусира на мрежницата. Фокусот на ненапрегнато око е во жолтата точка.

Местото на мрежницата каде влегува очниот нерв е неосетливо на светлина. Тоа се вика **слепа дамка**. Способноста на окото да формира остри и јасни ликови на исто место, при најразлични положби на предметот се вика **акомодација**. Оддалеченоста од која окото може да гледа мали предмети подолго време без напрегање се вика **далечина на јасно гледање D**. Меѓутоа, јачината на окото не е

доволна да создаде слика на мрежницата за предмети кои се на растојанија помали од ова.

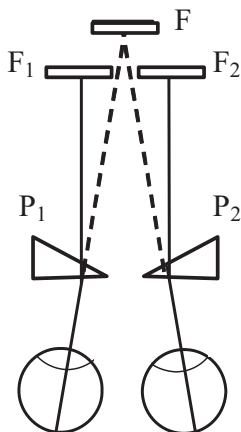
За просечно око далечината на јасно гледање D е приближно 25 cm.

За нејзиното постоење може лесно да се увериме со Мариотовиот опит (сл.3). Левото око се затвора, а цртежот се поставува на 30 cm од окото. Со десното око се фиксира погледот на кругот, воедно се гледа и крстот. Движејќи го цртежот кон окото за некое растојание крстот наполно исчезнува. Тоа се постигнува кога неговиот лик се формира во слепата дамка.



Сл. 3. Цртеж за Мариотовиот опит

Гледање со две очи. - При набљудување на подалечните предмети оптичките оски на двете очи се паралелни. Кога предметот е близу, очното јаболко се придвижува и оските конвергираат кон предметот што се набљудува. Аголот што тие го зафаќаат толку е поголем, колку предметот е поблизу. Според стекнатата престава, од големината на тој агол ние можеме да судиме за растојанието на предметот од очите.



Сл. 4.

Гледањето со двете очи обезбедува тродимензионална претстава за набљудуваните

објекти. Впечатокот за единствена престава за сликата се добива само тогаш, кога одделните слики на секое око се добиваат во соодветни коресподентни точки на окото. Такви се центрите на жолтата точка. Но тие не се единствените коресподентни точки, туку на секоја точка на мрежницата од едното око одговара соодветна точка на мрежницата од другото око. Кога би се добиле слики на различните точки од некој предмет во точки кои не се коресподентни, предметот се гледа двојно (diplopia).

Стереоскоп е апарат со кој се гледаат две слики на ист предмет, снимени од исто растојание, но под различни агли. Притоа се добива впечаток за рељефна слика на предметите. Такви слики може да се добијат, на пример, со фотографски апарат кој има два објектива поставени на растојание колку пупиларното. Светлината добиена од двете слики F_1 и F_2 поминува низ призмите P_1 и P_2 , кои имаат мал агол на прекршување и паѓа во очите (сл. 6.60). Набљудувачот гледа една виртуална рељефна слика која е во положбата F . Стереоскопот се користи во радиографијата за испитување локацијата на некои повреди или страни тела во организмот.

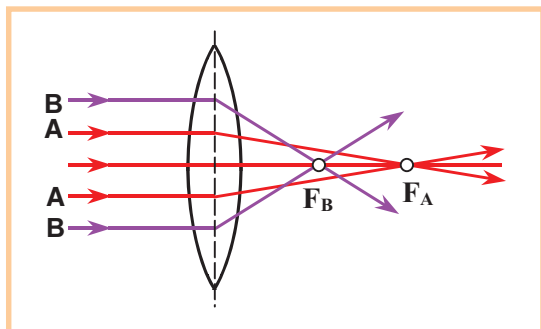
13.6. ОПТИЧКИ НЕДОСТАТОЦИ НА ЛЕЌИТЕ И ОКОТО

Човечкото око, иако како орган достигнува највисок еволутивен развој, не е наполно совршен оптички систем. Оптичкиот систем на окото подлежи на низа недостатоци карактеристични за леќите. Такви се, на пример, сферна аберација, хроматска аберација, астигматизам итн.

СФЕРНАТА АБЕРАЦИЈА е резултат од дебелината на леќата која, практично, никогаш не е идеално тенка.

Кога постои сферна аберација, зраците паралелни со оптичката оска по поминувањето низ леќата, не се фокусираат во една точка. Зраците кои се близу до оптичката оска по прекршувањето се фокусираат во F_A , а периферните зраци, кои се подалеку од оптичката

оска, се прекршуваат повеќе и се фокусираат во точка која лежи поблиску до оптичката леќа F_B (сл.1). На тој начин зад леќата се образува систем од фокуси ограничен меѓу два крајни фокуса F_A и F_B .



Сл. 1. Сферна аберација

Ако во фокусот се постави екран, нормално на оптичката оска, ликот на точка нема да биде во вид на точка, туку кружна површина - ликот на предметот е нејасен.

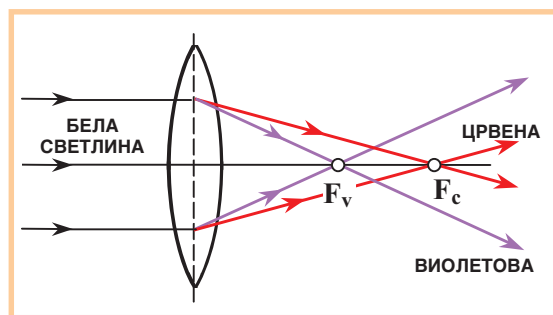
Сферната аберација се намалува со комбинација од леќи. Намалувањето на сферната аберација се постигнува и со примена на дијафрагма која ќе ги опфати само зраците што се близу до оптичката оска, но притоа се намалува и интензитетот на светлината.

Кај окото сферната аберација е мала и се регулира со промена на дијаметарот на зеницата. Кога со лекови ќе се рашири зеницата, во окото влегува широк сноп на светлина, па окото не може да гледа јасно.

ХРОМАТСКАТА АБЕРАЦИЈА е резултат од зависнос на индексот на прекршување од брановата должина на упадна светлина.

Поради различното прекршување, при дисперзијата на светлината доаѓа до добивање на различни фокуси за разни бранови должини на светлината. Ликот добиен со ваква оптичка леќа има обоени рабови (дисперзија на светлината).

Бидејќи индексот на прекршување на супстанциите зависи од брановата должина на светлината, и фокусното растојание на леќата ќе зависи од индексот на прекршување.



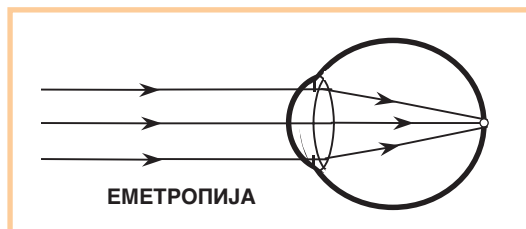
Сл. 2. Хроматска аберација

Кога на леќата ќе падне паралелен сноп на полихроматска светлина, поради различното прекршување на одделните бранови должини на светлината, се добиваат повеќе фокуси. Бидејќи виолетовата светлина најмногу се прекршува, најмалото фокусно растојание ќе биде за виолетовата, а најголемото - за црвената бранова должина која најмалку и се прекршува (сл. 2).

Хроматската аберација се отстранува со комбинација на две или повеќе леќи од материјали со различен индекс на прекршување - **ахроматски леќи**.

Бидејќи окото е различно осетливо на различните бранови должини на белата светлина, хроматската аберација, е незначителна. За тоа придонесува и структурата на очната леќа. Окото е најчувствително на жолто-зелената боја, па црвените и виолетовите рабови на сликата кои се резултат од хроматската аберација не ги забележува.

Грешките кај окото, кои се резултат на дифракција на светлината, најмногу доаѓаат до израз кога зеницата на окото ќе се намали како точка.

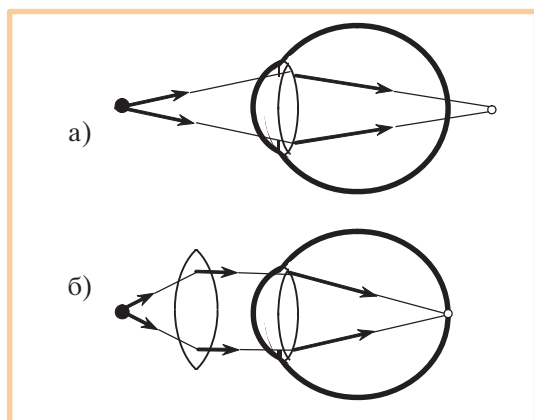


Сл. 3. Нормално (еметропно) око.

Доколку окото може да се акомодира на гледање блиски и далечни објекти, станува збор за нормално (*еметропно*) око. Нормалното око на бесконечно оддалечените предмети создава слика на мрежницата (сл. 3).

Ако најоддалечената точка на јасно гледање не е во бесконечност, и оптичкиот систем на окото поседува грешки, велиме дека окото е *аметропно*. Разликуваме два вида аметропија: *далекугледост* и *краткогледост*.

Далекугледост (хиперметропија). Кога окото подобро ги гледа далечените објекти се вели дека тоа е хиперметропно.



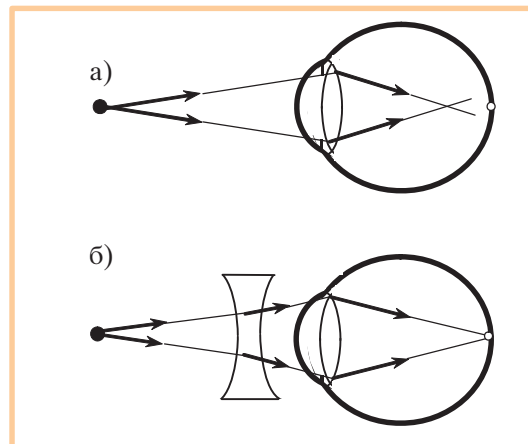
Сл. 4. Око со далекугледост.

Неговата најоддалечена точка на јасно гледање, наместо во бесконечност, лежи на конечно растојание. Окото е прекратко, па во акомодационен мир кај таквото око зраците се фокусираат зад мрежницата (сл. 4а). Кај ова око најблиската точка на јасно гледање е многу подалеку отколку кај нормално око за кое таа е $D=25$ cm.

За корекција на видот на такво око се користат собирајни леќи (сл.4б).

Краткогледост (миопија). - Окото е предолго, па во акомодационен мир зраците ги фокусира пред мрежницата (сл. 5а). Затоа, окото во акомодационен мир ги гледа само блиските предмети. Најблиската точка на јасно гледање е на помала оддалеченост отколку кај нормалното око, ($D < 25$ cm). За корекција на видот кај вакво око се користат растурни леќи (сл. 5б).

Очилата со собирајни леќи имаат јачина изразена со позитивни диоптри (на пример: $J = +0,5$ D; $+2$ D итн.), а очилата со растурни леќи имаат јачина со негативни диоптри (на пример: -5 D; -3 D итн.)



Сл. 5. Око со краткогледост.

Астигматизам. - Секое око помалку или повеќе е астигматично. Тоа е појава кога точкест предмет не создава во мрежницата точкеста слика. Причината е различната закривеност на површината на леќата и рожницата во различни рамнини (рожницата не е ротационо симетрична).

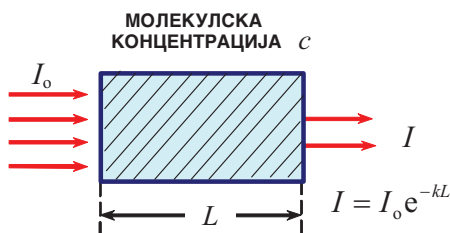
Погрешките на таквото око се корегираат со цилиндрични леќи. Цилиндричната леќа, која може да биде собирајна или растурна, е поставена така што ја променува јачината на окото во меридијалната рамнина на аномалија.

Прашања и задачи

1. Кои недостатоци може да ги има окото?
2. Што е тоа хроматска аберација и како се отстранува?
3. Што е тоа сферна аберација и како се отстранува?
4. Кои леќи имаат позитивен, а кои негативен диоптер и за какви корекции се користат?
5. Како наједноставно сами ќе проверите колкаво е фокусното растојание (јачината) на собирајна леќа?

13.7. БЕР-ЛАМБЕРТОВ ЗАКОН ЗА АПСОРПЦИЈА НА СВЕТЛИНАТА

Ако на изотропна средина со дебелина L падне паралелен сноп од монохроматска светлина (зрачење со еднаква бранова должина) чиј интензитет е I_0 , како последица од апсорпција на светлината во средината, интензитетот на светлината по минувањето опаѓа, како што покажува и сл.1. Брановата должина на апсорбираното зрачење е карактеристична за даден вид молекули или атоми, а степенот на апсорпцијата овозможува проценка на бројот на молекулите во примерокот.



Интензитетот на светлината I , после поминување низ изотропната средина со дебелина L , е зададен со равенката:

$$I = I_0 e^{-kL} \quad \text{или} \quad I/I_0 = e^{-kL}, \quad (1)$$

каде што k е *коэффициент на апсорпција*. Релацијата (1) е математичка формулација на Бер-Ламбертов закон (Во литературата е познат и како Ламберт-Беров закон)

За раствори каде што растворувачот не ја апсорбира светлината со дадена бранова должина λ , коэффициентот k е пропорционален со концентрацијата c на растворот:

$$k(\lambda, c) = a(\lambda) c,$$

каде што a е *коэффициент на апсорбанција* за дадена средина и зависи само од брановата должина на светлината.

Количникот $I/I_0 = T$ се дефинира како *транспаренција* (пропустливост). За видливата светлина вообичаено е да се воведо *апсорбанцијата* A или оптичката густина (мислам не), дефинирана со равенката:

$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I} = -\log T. \quad (2)$$

Кога примерокот апсорбира 50% од упадното зрачење, $I_0/I=2$, во тој случај апсорбанцијата е $A = \log_{10} 2 = 0,301$.

Апсорбанцијата зависи од бројот на молекулите во примерокот низ кој минува светлината. Ако молекулската концентрација се означи со c , должината на примерокот со L , тогаш $A \propto cL$, или

$$A = acL \log e \quad (3)$$

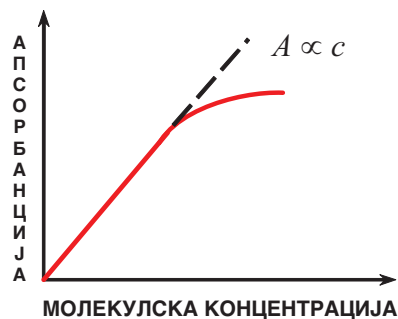
Единицата за коэффициентот на апсорбанција a е $\text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$, во случај кога концентрацијата е изразена во $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$, а дебелината - во метри. Равенката (3) покажува дека апсорбанцијата расте линеарно со должината на примерокот. Со компарација на равенките (2) и (3), се добива:

$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I} = acL \log e; \log e = 0,43429. \quad (4)$$

$$A = 0,4a \cdot c \cdot L \quad (5)$$

Односно апсорбанцијата или екстинкцијата директно е пропорционална со дебелината L .

Тоа е математички израз на Beer-Lambertовиот закон за апсорпција кој го дава односот помеѓу апсорбанцијата, молекулската концентрација и должината на примерокот.



Равенката (4) дава можност да се определи концентрацијата на некој примерок. На пример, кога некој стандарден раствор со концентрација c_0 има апсорбанција A_0 , во тој

случај од мерење на апсорбанцијата A на примерокот, кој има еднаква должина, концентрацијата што му одговара изнесува:

$$c = c_0 A / A_0.$$

Беер-Ламбертовиот закон за апсорпција важи за мали концентрации. За големите концентрации односот меѓу A и c не е повеќе линеарен, што може, впрочем, да се види и од сл 2. Таа тешкотија се отстранува со цртање на калибрациона крива на апсорбанцијата за раствори со позната концентрација. Оваа графичка зависност овозможува да се определи концентрација на било кој раствор.

13.8. КОЛОРИМЕТРИЈА. КОЛОРИМЕТРИ

Колориметриската анализа ги опфаќа оптичките методи кои се користат за определување на концентрацијата на обоени супстанции со користење на соодветни стандарди. Интензитетот на обоеноста на растворот на непознатата концентрација се споредува со интензитетот на обоеноста на растворот од иста природа со позната концентрација која се користи како стандард. Кај колориметрите промената на интензитетот на светлината која поминува низ растворот се постигнува со промена на дебелината на растворот.

Ако два раствора на иста растворена супстанција се со концентрации C_1 и C_2 при дебелина x_1 и x_2 ја апсорбираат светлината подеднакво (т.е. апсорбанцијата- екстинцијата им се еднакви $A_1 = A_2$) според Ламбер-Беровиот закон можеме да напишеме:

$$I_{x_1} = I_0 e^{-aCx_1}, \quad I_{x_2} = I_0 e^{-aCx_2} \quad (6)$$

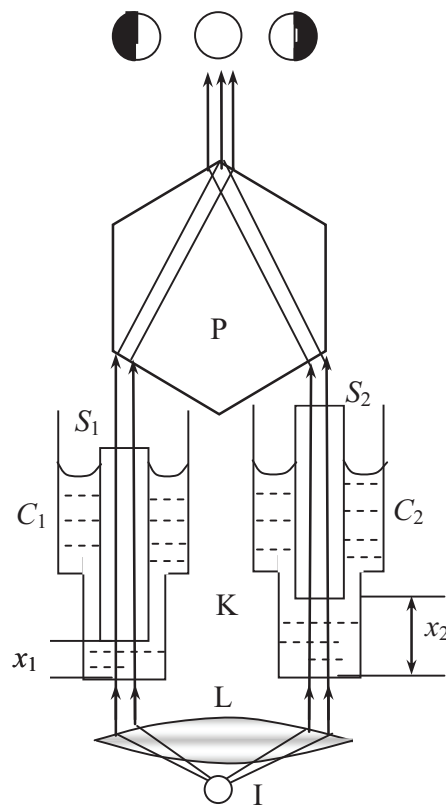
ако $I_{x_1} = I_{x_2}$, коефициентите на екстинција им се еднакви следува дека $C_1 x_1 = C_2 x_2$ или

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{x_2}{x_1} \quad (7)$$

од последната равенка може да се определи едната концентрација ако е позната стандар-

дната концентрација, а се измерат дебелините x_1 и x_2 .

Визуелната направа за колориметриско определување на концентрацијата е прикажана на сл.3.



Сл. 3. Колориметар за определување на концентрација

Изворот на светлина I со цел да се добие паралелен сноп на светлина е во фокусот на леќата L . Изворот ги осветлува киветите K во кои се растворите. Во киветите има идентични стаклени стапиња S_1 и S_1 и кои се потопуваат во растворот и на тој начин ја променуваат дебелината на слојот на растворот кој ја апсорбира светлината. Светлината која поминува низ стаклените стапчиња се собира во призмата P . Со менување на дебелините (што се постигнува со вовлекување и извлекување на стаклените стапчиња) на растворите се изедначуваат интензитетот на светлината во двете видни полиња, и со тоа и

валидноста на равенката (7).

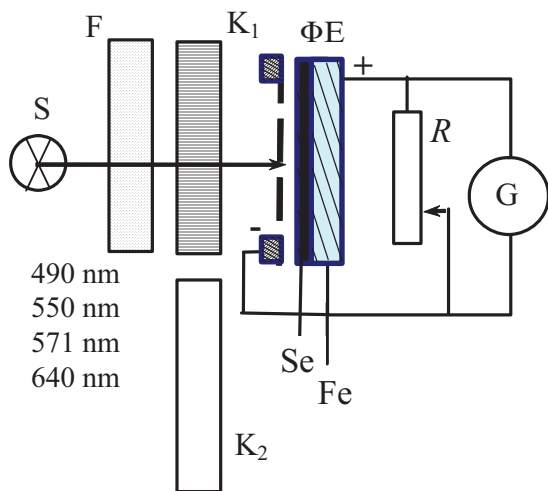
ФОТОЕЛЕКТРИЧЕН КОЛОРИМЕТАР

Инструментите за објективно определување на концентрацијата на растворот најчесто врз основа на фотоелектричен ефект (фотоелементи, фотокели, фотодиоди, фотоотпорници и фотомултипликатори) и се познати како *фотоелектрични колориметри*.

Јачината на струјата (i) пропорционална е со интензитетот на светлината така што може да се запише:

$$\frac{I_0}{I} = \frac{i_0}{i} \quad (8)$$

па апсорбанцијата односно концентрацијата се добива со читање на фотостријата. Фотостријатана упадната светлина i_0 одговара на поминување на светлината низ чист растворувач.



Сл. 4. Фотоелектричен колориметар

На сл. 4. е прикажана оптичката шема на фотоелектричниот колориметар со сден фотоелемент (Fe). За фотоелементот не е потребен посебен извор на струја, и најчесто е слој кој емитува електрони под влијание на упадна светлина од полупроводникот селен (Se). Селенот е напарен во вакуум на тенка плоча

од железо која служи како одводна позитивна електрода. Негативната електрода која ги прифаќа фотоелектроните исто така е многу тенок транспарентен слој (обележан со испрекинат линија на сликата сл.4). Изворот на светлина е нисконапонска сијалица S, филтерот е F, а со K_1 и K_2 се означени променливите кивати со растворот и растворувачот. Галванометарот G има логаритамска скала за апсорбанцијата и линеарната транспаренција.

Овој фотоелектричен колориметар се користи во биохемиските лаборатории за определување со голема точност на течности кои се многу значајни за клиничката дијагноза: беланчевини, билирубини, фибриноген, хемоглобин, холестерол и др.

ПРАШАЊА И ЗАДАЧИ

1. Со кои методи се определува концентрацијата на обоени раствори
2. На кој принцип функционира фотоелектричниот колориметар

КРАТКО РЕЗИМЕ

- ако I е интензитет на светлина што поминува, а I_0 интензитет на упадната светлина, тогаш $I/I_0 = T$ се дефинира како *транспаренција* (пропустливост).

- Апсорбанцијата A или оптичката густина, е дефинирана со равенката:

$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I} = -\log T.$$

-Единицата за коефициентот на апсорбанција a е $\text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$, во случај кога концентрацијата е изразена во $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$, а дебелината - во метри.

- Ламерт-Беров закон за апсорпција на светлината е даден со равенката:

$$I = I_0 e^{-kL}$$

каде што L е должината низ која поминува светлината а k коефициент на апсорпција

12.1. СПЕКТРАЛНА ОСЕТЛИВОСТ НА ОКОТО

Електромагнетното зрачење кое потекнува од било каков и да е извор се катактеризира со одредена енергија на зрачење. Мерењето на таа енергија за кој и да било бранов интервал, како и на други величини поврзани со пренос на енергијата во околниот простор, се реализира со радиометрички методи кои се проучуваат во *радиометријата*. Посебен дел од радиометријата познат како *фотометрија* го проучува електромагнетното зрачење од видливиот дел на спектарот, каде што за енергетските карактеристики на зрачењето се суди според осетливоста на човечкото око.

Кога станува збор за светлината, посебна улога на апсорбер има окото, кое примената светлинска енергија по пат на психофизиолошки процеси ја претвора во светлински впечаток, и врз основа на тој интензитет се мери, односно проценува.

Тоа електромагнетно зрачење кое во човечкото око може да оствари светлински впечаток се вика *видлива светлина*. За просечно око таа се протега од 400 nm до 760 nm. Осетливоста на окото не е подеднаква за сите бранови должини што може да се види од сл.1. Окото е најосетливо на светлина со бранова должина 555 nm. Коэффициент на видливост v_λ (релативна осетливост на окото) е величина со која се определува осетливоста за произволна бранова должина. Дефиниран е како однос меѓу енергијата на монохроматската светлина $\lambda_{\max} = 555 \text{ nm}$ (зелен дел од спектарот) (E_{555}) и енергијата на монохроматската светлина со дадена бранова должина λ , (E_λ) која во окото предизвикува ист осет за светлина како и зелената светлина:

$$v_\lambda = \frac{E_{555}}{E_\lambda} \quad (1)$$

Обликот на кривата на спектрална распределба на различните бранови должини зависи од условите под кои се врши набљудувањето. Кривата А одговара на луминанција на околината поголема од 3 cd/m^2 (гледање во текот на денот, или *фотопско гледање*), а кривата Б одговара на адаптирано око на луми-

нанција помала од $0,05 \text{ cd/m}^2$ (што одговара на гледање ноќе или *скотопско гледање*).

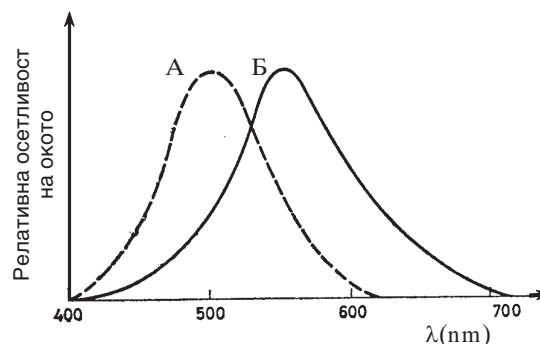
Светлинскиот впечаток го овозможуваат т.н. *стапчиња* и *чепчиња*.

Распределбата на *стапчиња* и *чепчиња* на мрежницата е нехомогена. Концентрацијата на *стапчињата* е најголема околу жолтата точка, а околу нив се распоредени *чепчињата*. Средната големина на *стапчињата* е $2\text{-}3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, што преставува $1/4$ од големината на сликата на светла точка. *Чепчињата* се нешто помали.

Стапчињата се почувствителни на интензитетот на светлината и не можат да реагираат на различните бранови должини.

Чепчињата се осетливи на бојата. Благодарение на нив човекот ги разликува боите и разликите во обоеноста на објектите.

Од сл. 1. каде е прикажана спектралната осетливост на мрежницата од брановата должина на видливата светлина кога околината е нормално осветлена (*фотопско гледање*) и за недоволна осветленост (*скотопско гледање*) се гледа дека при недоволна осветленост спектралната распределба се поместува кон виолетниот дел од спектарот кој е со поголеми енергии.



Сл.1. Спектрална осетливост на окото во зависност од брановата должина

Додека на дневна светлина окото е најосетливо за жолто-зелената светлина ($\lambda \approx 555 \text{ nm}$) во примрак поголема е осетливоста кон помалите бранови должини околу 500 nm. Во услови на слаба осветленост, престанува функцијата на *чепчињата* и осетливоста на окото се припишува само на *стапчињата*, па предметите се гледаат во сите нијанси на сивата боја ("ноќе сите мачки се црни"). Гледање при средни светлосни интензитети се вика *мезопско гледање* или гледање со самрак.

12. Фотометрија

Поместување на кривата на спектрална распределба на осетливост на окото кај човекот при намалување на светлосните интензитети на видното поле кон виолетниот дел на спектарот на видливата светлина, е познат како *Пуркинсов ефект*. Тоа е причината што црвените бои во примрак тешко се забележуваат (се гледаат во нијанси на сиво).

12.2. РАДИОМЕТРИСКИ И ФОТОМЕТРИСКИ ВЕЛИЧИНИ И НИВНИ ЕДИНИЦИ

Делот од оптиката кој ги изучува методите на мерење на интензитетот на светлината и нејзините извори и енергетски карактеристики може да има два приода кон величините:

1. *Енергетски (радиометриски)* - кои ги карактеризираат енергетските параметри на оптичкото зрачење. Тоа се објективни мерења на енергетските величини, на пример, со фотокели, термоелементи, фотографски плочи и др.

2. *Визуелни (фотометриски)* - кои ги карактеризираат физиолошките дејства на светлината и се оценуваат според субјективните влијанија врз окото.

Во оптичките мерења се користат разни приемници на зрачење (на пример, окото, фотоелементи, фотомултипликатори, фотографска плоча и др.), кои не поседуваат еднаква чувствителност на енергијата за различни бранови должини, односно тие се селективни. На пример, како што наведовме, за око адаптирано на светло, спектралната осетливост е максимална за $\lambda=555 \text{ nm}$, а за око адаптирано на темно е $\lambda=500 \text{ nm}$.

Во фотометријата дефинирањето на одредени единици се однесува на точкести извори на светлина, кои во идеални услови зрачат енергија во сите насоки еднакво. Таквите извори на светлина се викаат *изотропни извори*. Точкест извор е таков светлински извор чии димензии во споредба со растојанието до местото на набљудување може да се занемарат. Како точкест извор на светлина може да се земе Сонцето, кое иако има големи димензии е на големо растојание од Земјата.

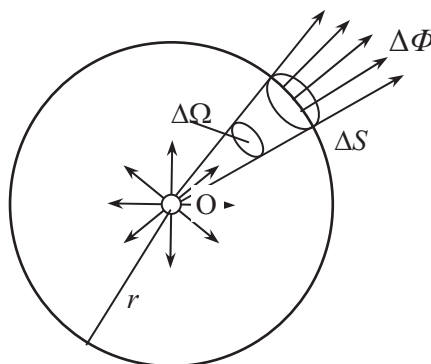
Секој приемник на зрачење се карактеризира со своја крива на спектрална распре-

делба, за светлина со различни бранови должини. Затоа светлинските мерења се субјективни, кои се разликуваат од објективните - енергетските, и за нив се воведени *фотометриски* единици кои се користат само за видливата светлина.

Овде најпрво ќе ја дефинираме една од основните фотометриски величини, а тоа е:

1. **СВЕТЛИНСКИОТ ФЛУКС Φ** . Ако точкест извор на светлина за временски интервал Δt во дадена насока на просторот зрачи светлинска енергија ΔW , тогаш светлинскиот флукс $\Delta \Phi$, со таа енергија која паѓа на елементарна површина ΔS (сл.2), ја претставува брзината на пренесување на енергијата на бранот, т.е. моќноста на зрачењето во дадена насока

$$\Delta \Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (1)$$



Сл.2. Осветленост на елементарна површина при нормално паѓање на светлински флукс

Енергетска (радиометриска) единица за светлински флукс е 1W (ват) $1W=J/s$, а фотометриската единицата во SI е 1 lm (лумен),

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot 1 \text{ sr}.$$

Лумен се дефинира како интензитет на светлина од една кандела (cd) што се зрачи од точкест извор во просторен агол од еден (sr) стерадијан (при рамномерно поле на зрачење во просторниот агол). Бидејќи осетливоста на окото зависи од брановата должина, а таа е максимална за зелената светлина $\lambda=555 \text{ nm}$, во овој случај флуксот на енергетското радиомет-

12. Фотометрија

риски мерено зрачење од $\Phi_{\lambda r} = 1 \text{ W}$ предизвикува осет на светлосен фотометриски флуks од 683 lm , т.е.

$$1 \text{ W} = 683 \text{ lm} \text{ или } 1 \text{ lm} = 1/683 \text{ W} = 0,0015 \text{ W}.$$

Односот помеѓу светлосниот (фотометрискиот) флуks на зрачење Φ_{λ} и радиометрискиот флуks на зрачење $\Phi_{\lambda r}$ за светлина со бранова должина 555 nm се вика **фотометриски еквивалент на зрачната енергија** (k_{555}) и е еднаков на $k_{555} = 683 \text{ lm/W}$, додека за светлина со друга бранова должина тој однос (k_{λ}) треба да се множи со коефициентот на видливоста v_{λ} :

$$k_{\lambda} = v_{\lambda} k_{555}.$$

Според тоа односот лумен - ват зависи од брановата должина, односно од спектралниот состав на светлината, па во фотометријата се користи релацијата

$$\Phi_{\lambda} = k(\lambda) \Phi_{\lambda r}, \quad (2)$$

која ја дава врската на флуksот на светлинското зрачење Φ_{λ} за која и да било бранова должина мерен визуелно во лумени и мерен радиометриски (енергетски во вати) $\Phi_{\lambda r}$. Во равенката (2) коефициентот на пропорционалноста $k(\lambda)$ е функција на коефициентот на видливоста (спектрална осетливост на окото) v_{λ} , се изразува во единици lm/W и има свои определени вредности.

2. ИНТЕНЗИТЕТ НА СВЕТЛИНАТА. Под радиометриска величина интензитет на светлината се подразбира онаа израчена енергија од точкест извор за единица време низ единица просторен агол, т.е. светлински флуks $\Delta\Phi$ низ просторен агол $\Delta\Omega$

$$\Delta I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}, \quad (3)$$

Светлинскиот флуks за изотропен извор е еднаков во сите насоки за целиот просторен агол Ω , па интензитетот на светлината е

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}, \quad (4)$$

Основната единица за интензитет (јачина) на светлина во SI е 1 cd (кандела). Една cd е еднак-

ва на интензитетот на светлина во даден правец од изворот, кој емитува монохроматска светлина со фреквенција $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$, чиј енергетски интензитет во тој правец изнесува $1/683 \text{ W/sr}$.

$$1 \text{ lm/sr} = 1/683 \text{ W/sr}.$$

Според тоа следува дека 1 lm светлински флуks кој во просторен агол од 1 sr го праќа светлинскиот извор чиј интензитет на светлина во сите насоки на просторот е еднаков 1 cd . Односно $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd sr}$

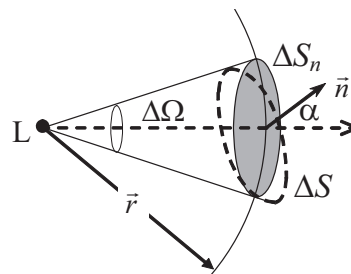
3. ОСВЕТЛЕНОСТ. Осветленоста е мерка за интензитетот на светлина која во единица време паѓа на единица плоштина

$$E = R = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}, \quad (5)$$

$$\text{односно } E = I \frac{\Delta\Omega}{\Delta S}. \quad (6)$$

Ако изворот на светлина е изотропен, вкупниот флуks низ целиот просторен агол $\Omega = 4\pi$ осветлува површина на сфера $S = 4\pi r^2$, па во тој случај осветленоста на таа површина (случај кога изворот на светлина е во средиштето на сферата) е:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{I}{r^2} \quad (7)$$



Сл. 3.

Ако флуksот на зрачење не паѓа нормално на површината што ја осветлува, туку зафаќа некој агол α со нормалата на таа површина (сл. 3), во тој случај осветленоста изнесува:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} = \frac{I \Delta S \cos \alpha / r^2}{\Delta S} = \frac{I \cos \alpha}{r^2} \quad (8)$$

каде што според сликата 3

12. Фотометрија

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta S_n}{r^2} = \frac{\Delta S \cos \alpha}{r^2},$$

каде што $\Delta S_n = \Delta S \cos \alpha$ е елемент на површина во насока на простирање на упадниот флуks

Равенката (8) е основниот закон во фотометријата познат како Ламберт-Беров закон кој ја дава јачината на осветленоста на искошена површина. α е агол меѓу радиус векторот \vec{r} од изворот на светлината до разгледуваната елементарна површина и нормалата на разгледуваната површина. Се разбира дека осветленоста на површината е најголема ако $\alpha=0$. Растојанието од осветлената површина е многу поголемо во споредба со димензиите на осветлената површина. Фотометриска единица во SI е лукс (сл. 3).

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$$

Лукс е осветленост на површина од 1 m^2 на која паѓа рамномерно распределен светлосен флуks од 1 lm .

Енергетска, радиометриска единица за осветленост е W/m^2 . Врската меѓу фотометриската и енергетската единица е:

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2 = 1/683 \text{ W/m}^2.$$

Ламберт-Беровиот закон (8) може да се користи за определување на интензитетот на светлината на некој извор.

Ако на некоја површина од два извора паѓа светлина и предизвикува еднаква осветленост, тогаш од претходната равенка се добива дека

$$E_1 = E_2 \quad (9)$$

односно
$$\frac{I_1^2}{I_2^2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad (10)$$

т.е. јачините на два светлински извора кои еднакво осветлуваат некоја површина се однесуваат како квадратите на нивните растојанија од таа површина. Врз основа на равенката (10) функционира Бунзеновиот фотометар.

Точкест извор на светлина е математичка апроксимација. Реалните извори на светлина се светли тела со конечни димензии. Кај вакви извори поимот интензитет на светлински извор е недоволен бидејќи различни точки од површината на светлинскиот извор даваат раз-

лични флуksови. За вакви извори е воведен поимот ЛУМИНАНЦИЈА- L или СЈАЈ на светлинската површина, во некоја насока α ,

ЛУМИНАНЦИЈА- L е величина еднаква на количникот од интензитетот на светлината I во таа насока и плоштината S на светлинската површина на рамнина нормална на дадениот правец.

$$L_\phi = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S \cos \alpha \Delta\Omega}$$

или
$$L_\phi = \frac{I}{S \cos \alpha} \quad (9)$$

Според последната равенка, L_ϕ на даден светлински извор зависи од светлинскиот флуks што го израчува единица плоштина од светлинскиот извор во единица просторен агол. Енергетска единица е $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$, а визуелна единицата во SI е 1 nt (нит),

$$1 \text{ nt} = 1 \text{ cd/m}^2 = 1 \text{ lm}/(\text{m}^2 \text{ sr}) = 1 \text{ lx/sr}.$$

Минималниот сјај што го регистрира околото изнесува 10^{-6} nt , а сјај од $1,6 \cdot 10^5 \text{ nt}$ во окото предизвикува осет на болка.

12. 3. МЕРЕЊЕ НА ФОТОМЕТРИСКИТЕ ВЕЛИЧИНИ. ФОТОМЕТРИ

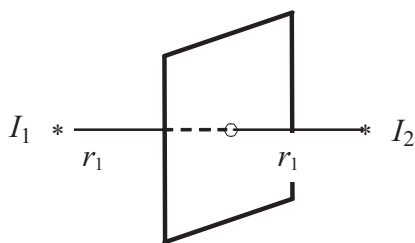
За определување на фотометриските величини треба да е познат интензитетот на светлината на даден светлински извор. За да се определи интензитетот на светлината на даден светлински извор се прави споредување на осветленоста што ја создава тој извор и осветленоста што ја создава друг извор со познат интензитет на светлината. Споредувањето на осветленоста може да се изврши на два начина: со помош на окото (визуелен или субјективен метод) или со помош на фотоелементи или термоелементи (објективен метод).

Уредите со кои се врши споредувањето на интензитетот на светлината се **фотометри**. Нив ги има повеќе видови, но најчесто заедничко им е користењето на равенката (7). Такви се фотометарот со сенка (Румфорд, 1794), Бунзеновиот фотометар со масна дамка, Ричевиот фотометар итн.

12. Фотометрија

Визуелните методи се засноваат на својството на окото да може точно да ги распознава различно осветлените површини. Затоа кај визуелните методи улогата на окото се сведува на тоа да укаже кога настанува изедначување на осветленоста на две различни површини кои се осветлени од споредуваните светлински извори.

Бунзенов фотометар се состои од лист бела хртија кој на средината има масна дамка. Фотометарот и изворите I_1 и I_2 што се споредуваат се поставени на јавачи на иста висина и од спротивни страни со масната дамка. Тие може да се поместуваат по должината на оптичката шина. Светината од изворот I_1 ја осветлува хартијата, така што дамката гледана од страната на тој извор ќе биде потемна во споредба со неговата околина, бидејќи дамката повеќе ја пропушта светлината. Од истата причина, дамката ќе биде посветла кога тоа се набљудува од спротивната страна, од страната на изворот I_2 . Истото тоа се случува и при осветлување на дамката со изворот I_2 . Со менување на растојанијата r_1 и r_2 на светлинските извори до фотометарот, може да се постигне дамката да исчезне при што осветленоста на хартијата од двете страни ќе биде еднаква.



Сл.1.

Кај два светлински извора со јачина I_1 и I_2 , кои се наоѓаат на растојание r_1 и r_2 од една иста површина, при нормално паѓање на светлинските зраци, осветленоста што ќе ја предизвикаат ќе биде:

$$E_1 = \frac{I_1}{r_1^2} \quad \text{и} \quad E_2 = \frac{I_2}{r_2^2} \quad (1)$$

При згодно избрани растојанија r_1 и r_2 може да се постигне осветленоста на површините што ја даваат двата извора да биде иста. Притоа се внимава изворите да бидат под ист агол во однос на полето што се осветлува.

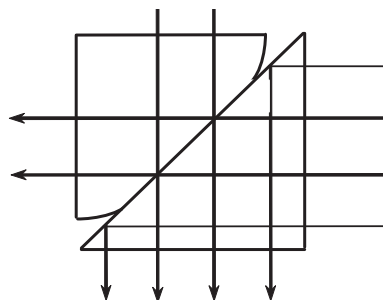
$$E_1 = E_2 \quad (2)$$

$$\text{од каде следува } \frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}; \text{ или } \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad (3)$$

т.е. јачините на два светлински извора кои еднакво осветлуваат некоја површина се однесуваа како квадратите на нивните растојанија до фотометарот.

Од равенката (3) е јасно дека кога се користи еталон - светлосен извор може да се одреди јачината на непознат светлосен извор при мерење на растојанијата r_1 и r_2 . Впрочем, тоа е и основата на фотометријата.

Фотометрите ја користат равенката (3). Во секој фотометар се набљудува некое поле чиј еден дел е осветлен само од едниот, а другиот дел од другиот светлински извор. Притоа, се внимава изворите да бидат под ист агол во однос на полето што се осветлува.

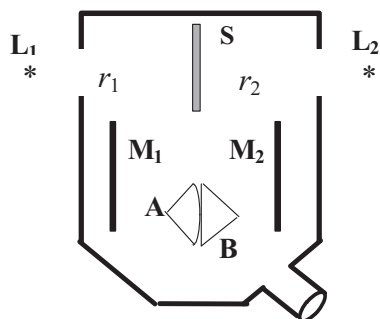


Сл. 2.

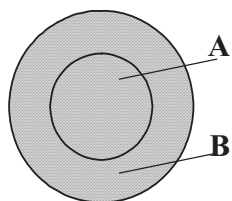
Еден од посовршените визуелни фотомети е Лумер-Бродиновиот. Негов најважен дел е Лумеровата коцка која влегува како составен дел и кај многу други фотометри. Коцката се состои од две правоаголни призми (сл.2). Страната на едната од нив е шлифувана на краевите. Призмите се добро полирани и на местото на допирот се како еден елемент за да се однесуваат како прозрачно тело. Шемата и обликот на Лумер-Бродиновиот фотометар се дадени на сл. 3. L_1 и L_2 се светлосни извори што треба да се споредат. S е бел екран што дифузно ја расејува светлината. Оваа расејана светлина се рефлектира од еднакви огледала M_1 и M_2 на Лумеровата коцка. На призмата A паѓа светлина од изворот L_1 (во видното поле тоа е светол круг), а на призмата B од изворот L_2 (во

12. Фотометрија

видното поле тоа е простор околу светлиот круг). Светлината од А може да дојде во далекодгледот само преку допирната површина од хипотенузата, а пак од призмата В само по рефлексија од краевите на хипотенузата.



Сл. 3.



Сл. 4.

Набљудувачот гледа полиња кои се различно осветлени (сл.4). Придвигувајќи го едниот извор, се постигнува да исчезне границата меѓу двете полиња и целиот простор да биде еднакво осветлен. Тоа е случај за $E_1 = E_2$. Од равенката (3) се наоѓа непознатата јачина на светлинскиот извор, претходно мерејќи ги растојанијата r_1 и r_2 .

Визуелните фотометри даваат добри резултати само кога двата извора на светлина зрачат со иста бранова должина. Кога тоа не е исполнето, добиените резултати не се коректни поради нееднаквата осетливост на окото кон различните бранови должини. Затоа се користат објактивните фотометри кои, исто така, овозможуваат мерења на интензитетот на еден светлински извор ако е познат интензитетот на друг светлински извор. Тие даваат поточни резултати и за таа цел најчесто се користат **луксметри**. Кај нив измерената осветленост директно се чита.

Ваквите фотометри се состојат од фотокелија која е споена во струјно коло со галванометар. Светлината што паѓа на фотоелементот директно се претвора во електрична енергија. Под дејство на светлината, фотоелементот дава електрична струја чија јачина е дотол-

ку поголема доколку е поголема осветленоста на неговата површина. Имено, струјата низ галванометарот е пропорционална со осветленоста. Скалата на галванометарот наместо во ампери е градуирана во лукси. При мерењето фотокелијата е поставена на површината чија осветленост се мери и се чита соодветната осветленост на скалата на галванометарот.

Такви луксметри, познати како експонетри, се вградени во подобрите фотографски апарати и со нивна помош се определува експозицијата при сликањето на објекти во зависност од нивната осветленост.

ЗАДАЧА. Со помош на Бунзеновиот фотометар да се определи јачината на светлински извор, ако е позната јачината на еден стандарден извор. За секој светлински извор се прават повеќе мерења при различни растојанија. Резултатите се средуваат во табела и се прикажуваат преку грешките при мерењето.

ПРИМЕР 1. Луминисцентна цилиндрична светилка со дијаметар 3 cm и должина 30 cm (неонка), на растојание од 6 m во насока нормална на оската на светилката, создава осветленост од 1 lx. Да се определи: а. јачината на светлинскиот извор во насока нормална на оската на светилката. б. луминанција (сјај).

Решение. Бидејќи должината на светилката е 20 пати помала од растојанието 6 m каде што се мери осветленоста, светилката може да се разгладува како точкест извор, па ја користиме равенката (3), од каде за јачината на светлосен извор се добива:

$$I = E r^2; I = 1 \text{ lx} \cdot 6^2; I = 36 \text{ cd}$$

Луминанцијата L_ϕ се определува од равенката

$$(9) : L_\phi = \frac{I}{S}; \text{ каде што } S \text{ е површината на светилката набљудувана од местото на осветлување. Поради нејзината цилиндрична форма видливата површина има форма на правоаголник со должина еднаква на должината на светилката и ширина еднаква на дијаметарот на светилката. Затоа } S = ld, \text{ каде што } l = 0,3 \text{ m}, \text{ а } d = 0,03 \text{ m. Со замена се добива:}$$

$$L_\phi = \frac{I}{ld} = \frac{36 \text{ cd}}{0,3 \cdot 0,03} = 4 \cdot 10^3 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} .$$

15.1. ЗАКОНИ ЗА ТОПЛИНСКО ЗРАЧЕЊЕ. КВАНТИ

По Херцовите опити со кои била потврдена Максвеловата теорија се чинело дека сите појави поврзани со оптиката и општо зрачењето биле објаснети. Но, два “мали” проблема останале нејасни. Електромагнетната теорија не можела да го објасни однесувањето на телата кои зрачат топлинско зрачење. Исто така, нејасно било како може со осветлување да се добие разелектризација на метална негативно наелектризирана плоча. Оваа втора појава, за која подетално ќе зборуваме во следното поглавје, е наречена фотоэффект. Решението на овие два проблема довело до промени на нашето сфаќање за градбата на материјата, како и процесите на зрачење и за апсорпцијата на енергијата воопшто.

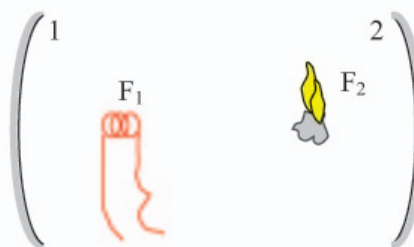
Топлинско зрачење

Секое загреано тело зрачи. Железна жица загреана до температура околу 1000 К свети со црвена боја. Ако го прекратиме загревањето на жицата, таа постепено ќе се олади. Ова укажува на тоа дека зрачењето на жицата станува на сметка внатрешната енергија на телото.

*Зрачењето на електромагнетните бранови кое настанува на сметка на внатрешната енергија на телото, се вика **ТОПЛИНСКО**.* Притоа, не треба да се смета дека тој вид зрачење е својствен само на телата кои се загреани на повисоки температури. Топлинско зрачење се јавува и при собни и при пониски температури. Разликата е само во интензитетот на зрачењето и во неговиот спектрален состав. Тоа јасно може да се види при постапно загревање на железната жица. Ако таквата жица постепено ја грееме (на пример со појачување на струјата што тече низ неа), таа прво свети црвено, па побело, а дури при многу повисоки температури светлината добива изразито бела боја. Значи, *спектарот на*

енергијата на топлинското зрачење зависи од температурата на телото.

Инфрацрвеното, за нас невидливо зрачење, е исто така топлинско зрачење. Тоа едноставно се проверува со следниов опит. Во фокусот на сферно огледало се поставува спирала која може да се загрее до многу висока температура. Ако во фокусот на друго такво огледало се постави малку памук, тој може да се запали.



Сл. 1

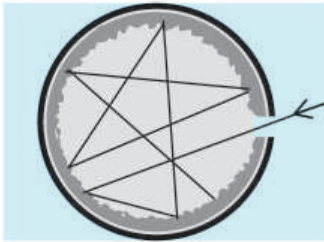
Секое тело не само што емитура топлинско зрачење, туку тоа и апсорбира топлина од околните тела. Инаку, како би објасниле зошто памукот од опитот од сл. 1 се запалил. Ако едно тело има температура повисока од температурата на околината, тоа повеќе емитура енергија отколку што апсорбира. Всушност, видлива емисија на телото станува сè дури постои разлика на температурите помеѓу него и околината.

Опитите покажале дека колку едно тело повеќе емитура зраци со одредена бранова должина толку повеќе таквите зраци и ги апсорбира. Апсорпциониот спектар на даден елемент има темни линии во спектарот на исто место на кое што во емисиониот спектар има светла линиини.

За количинско објаснување на зрачењето на телата се воведува физичката величина **спектрална емисиона моќ на телото**. Тоа е енергијата на зрачење со дадена фреквенција f (односно дадена бранова должина λ) која телото ја зрачи од единица плоштина на неговата површина во единица време. Ќе ја бележиме со $W_{T,\lambda}$. **Вкупната емисиона моќ**, W_T на телото е сèвкупност на емисионата моќ на сите бранови должини.

15. Зрачење

Карактеристична величина на апсорпционата способност на дадено тело е неговата **спектрална апсорпциона моќ**, $A_{T,\lambda}$, која укажува на тоа кој дел од енергијата што упаѓа врз телото на зрачење со определена бранова должина се апсорбира од единица плоштина во единица време.



Сл. 2

Црните тела многу добро го апсорбираат зрачењето.

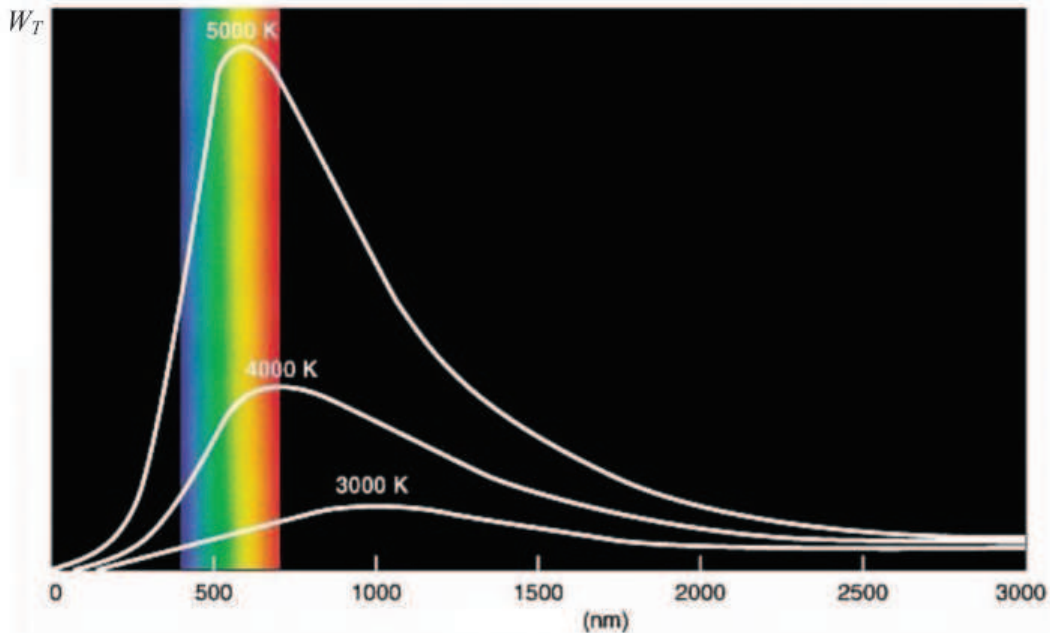
Тело кое на која било температура целата енергија на електромагнетно зрачење што ќе падне врз него ја апсорбира (со која и да било бранова должина) се вика **апсолутно црно тело**. Се разбира, такво тело не постои, но затоа мал отвор на едно шупливо тело со рапави темни внатрешни ѕидови има својства

блиски до таквото тело (сл. 2). Имено, ако некој зрак влезе во отворот, тој во внатрешноста многу пати се рефлектира, губејќи при рефлексивјата дел од својата енергија. Така, по повеќекратна рефлексивја целокупната енергија на зракот е апсорбирана. Пример на апсолутно црно тело е Сонцето. (Внимавајте, едно тело е апсолутно црно не поради тоа што не зрачи, туку затоа што целокупната енергија што ќе падне врз него ја апсорбира). **Кај црното тело $A_T=1$, а секако и $A_{T,\lambda} = 1$.**

Фактот дека телата го емитуираат она зрачење кое и го апсорбираат уште во средината на XIX век го има искажано **Кирхоф** со законот даден со релацијата:

$$\frac{W_{T,\lambda}}{A_{T,\lambda}} = \text{const} = W_{T,\lambda}^{\text{crnotelo}} \quad (1)$$

Односот меѓу спектралната емисиона моќ и апсорпционата моќ на некое тело е константа, еднаква на спектралната емисиона моќ на апсолутно црно тело.



Сл. 3

Стефан- Болцманов закон

Вкупната енергија емитирана во единица време од единица плоштина на апсолутно црно тело е пропорционална со четвртиот степен на неговата апсолутна температура:

$$W_T = \sigma T^4 \quad (2)$$

Овој закон експериментално го открил Словенецот Јожеф Стефан, а неговото теориско толкување го има дадено Болцман. Затоа е и познат како **Стефан-Болцманов закон**. Константата σ се вика Стефан-Болцманова константа. Таа инесува $\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$. Од овој закон се гледа дека зрачењето на апсолутното црно тело многу зависи од неговата апсолутна температура. Затоа е јасно зошто позагреаните тела зрачат значително повеќе електромагнетно зрачење од постудените (сл. 3).

Кривата од сл. 3 ја дава зависноста на спектралната емисиона моќ на зрачењето $W_{T,\lambda}$ од брановата должина при три различни температури.

Винов закон

Од кривата на сликата 3 се гледа дека со зголемување на температурата максимумот на кривата се поместува кон покусите бранови должини. Вилхелм Вин установил дека производот од брановата должина кој одговара на максимумот од кривата λ_m на спектарот и апсолутната температура T на црното тело е константна вредност:

$$\lambda_m T = \text{const} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (2)$$

Релацијава го искажува Виновиот закон за поместувањето на спектралниот максимум.

Меѓутоа, истаржувањата искажани со релациите (1) и (2) не ја даваат функционалната зависност на кривата дадена со сликата 3. Голем број научници во периодот меѓу 1887 и 1900 год се обидуваа да ја решат оваа задача тргнувајќи од гледиштето

на класичната Максвелова теорија, но без успех.



9.8.4. Планкова идеја за постоење на кванти

Зошто кривата на спектралната зависност на зрачењето на апсолутното црно тело ја има формата дадена со сликата 3, објаснил во 1900 година германскиот физичар Макс Планк. Тој задачата ја решил искажувајќи една револуционерно нова хипотеза според која, зрачењето на атомите и молекулите не е непрекинато, туку на одредени порции, кои тој ги нарекува **кванти**. **Планк претпоставува дека енергијата на осцилирање на атомите може да има само специфични големини кои се дадени со релацијата:**

$$E = nhf \quad (3)$$

каде што f е фреквенција на осцилирањето на атомот, h е константа а n е цел број 0,1,2,3..... Тоа значи енергијата на зрачењето E може да има само вредности hf , $2 hf$, $3 hf$, ит.н. Енергијата се зрачи дисконтинуирано, велиме таа е квантизирана.

Величината h која се нарекува **Планкова константа** има големина:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

и таа претставува една од универзалните константи во физиката. На ова ние веќе укажавме во поглавјето 9.1.

1. **Пример.** Пресметајте ја температурата на Сонцето, ако се знае дека кривата на зрачењето на Сонцето има максимум при 500 nm.

Решение. Според Виновиот закон:

$$T = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{500 \cdot 10^{-9}} = 5800 \text{ K}$$

Прашања, задачи, активности

1. Познато е дека хелиумот за прв пат бил откриен со испитувања на апсорпционен спектар на Сонцето. На кои места биле црните линии во континуираниот сончев спектар кои се должат на хелиумот. (Погледнете го емисиониот спектар на хелиумот- поглавје 1.)
2. Зошто велите дека светилките со вжарена жичка не се економични. Нели и кај нив не доаѓа до губење на енергијата?
3. Ако го набљудувате пламенот на свеќа и пламенот од плинска бутан боца, тие имаат различни бои. Во кој пламен плазмата е на повисока температура?
4. Температурата на црно тело е 27°C . Колку пати ќе порасне вкупната емисиона моќ на зрачењето на телото ако температурата му се покачи на 327°C ?

(Одговор : 16 пати)

Кратко резиме

Секое тело што се наоѓа на температура различна од апсолутна нула, зрачи електромагнетни, т.н. топлински бранови. Секое тело го емитува она зрачење што и го апсорбира. Тоа е Кирхофов закон.

Вкупната енергија емитирана во единица време од единица плоштина на апсолутно црно тело е пропорционална со четвртиот степен на неговата апсолутна температура. (Стефан-Болцманов закон)

Производот од брановата должина која одговара на максимумот од кривата $W_T = f(\lambda)$, λ_m и апсолутната температура T на црното тело е константна. Тоа е Винов закон.

Енергијата на емитирање или апсорбирање е целоброен мултипл на енергијата на еден квант:

$$E = hf.$$

15.2. ПЛАНКОВ ЗАКОН ЗА ЗРАЧЕЊЕ

Планковата квантна хипотеза се појави во 1900 година, а својата кулминација ја достигна во

средината на 1920 година со квантната механика на Шредингер и Хајзенберг.

Законите дадени врз основа на термодинамички разгледувања: Кирхофов закон, Стефан – Болцманов закон, Винов закон, се однесуваат на карактеристиките на спектралната емисиона моќ и спектралната апсорпциона моќ на апсолутно црно тело.

Веднаш по добивањето на експерименталните криви за распределбата на енергијата, што ја зрачи апсолутното црно тело по бранови должини, повеќе научници се зафатиле со проблемот за изнаоѓање на аналитички израз за функцијата $W_{(\lambda,T)}$, кој би одговарал на експерименталните криви. При тоа апсолутното црно тело е разгледувано како систем од голем број на електромагнетни осцилатори, коишто осцилираат со различни фреквенции.

Тргувајќи од класичните претстави за континуирано зрачење на енергијата и законот за рамномерна распределба на енергијата по степени на слобода на линеарниот осцилатор, 1896 година В. Вин изведе аналитички израз за функцијата $W_{(\lambda,T)}$ во овој облик:

$$W_{(\lambda,T)} = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-c_2/\lambda T}, \quad (1)$$

каде што c_1 и c_2 - константи (нивното значење ќе биде дадено понатаму), λ – брановата должина на емитираните електромагнетни бранови при определена температура T на апсолутното црно тело и e - Неперовиот број (основа на природен логаритам). Релацијата (1) добро се согласува со податоците добиени од експериментите само во областите на зрачењето од апсолутното црно тело со мали бранови должини (големи фреквенции).

Англиските физичари Л. Релеј и Џ. Џинс, исто така, врз основа на сфаќањето за континуираноста на енергијата при зрачењето, кон крајот на 19 век извеле аналитички израз за функцијата $W_{(\lambda,T)}$.

Тргувајќи од наведените класични претстави за рамномерна распределба на енергијата по степени на слобода во даден систем, Л. Релеј и Џ. Џинс за спектралната емисиона моќ на

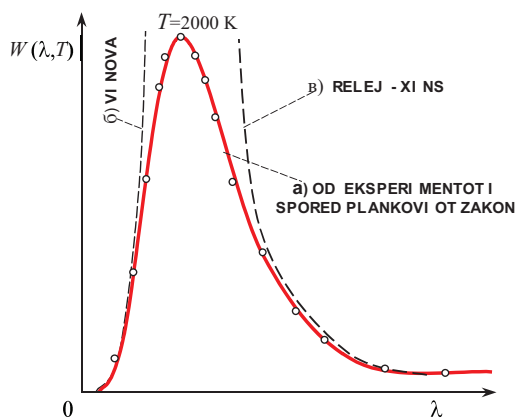
15. Зрачење

апсолутното црно тело $W_{(\lambda,T)}$ ја изведе следнава:

$$W_{(\lambda,T)} = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT, \quad (2)$$

каде што c - брзината на светлината во вакуум; k - Болцманова константа ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

Производот kT е средната енергија на линеарниот осцилатор за определена фреквенција на осцилирање и температура. Да се потсетиме дека средната енергија на хармонски осцилатор е збир од неговата средна кинетичка енергија и неговата средна потенцијална енергија.



Сл.1. Криви за распределбата на спектралната емисиона моќ добиена врз основа на: а) експерименталните резултати и Планковата релација, б) Виновата, в) Релеј-Џинсовата

Релацијата (2) е позната како Релеј-Џинсова, и таа добро се согласува со податоците добиени од експериментите само во областите на зрачењето од апсолутното црно тело со големи бранови должини, односно со мали фреквенции. Значи, проблемот на топлинското зрачење би бил успешно решен кога би се напишала таква теориска релација за $W_{(\lambda,T)}$ чиј график би се совпаѓал со експерименталните криви на сл. 1. Добиените вредности за $W_{(\lambda,T)}$, според релациите (2) и (3) графички се претставени на сл. 1.

Може да се вочи дека само на делови се

поклопуваат со експерименталната крива. И тоа, релацијата на Вин правилно го опишува зрачењето на апсолутното црно тело само во спектарот на малите бранови должини (големи фреквенции), во ултравиолетовата област, а релацијата на Релеј-Џинс, само во спектарот на големите бранови должини (мали фреквенции) - во инфрацрвената област.

Според релацијата (3) $W_{(\lambda,T)}$ монотонно расте со намалувањето на брановата должина на зрачењето, нема максимум, а вкупната емисиона моќ на апсолутното црно тело при која било температура станува бесконечна ($W_T = \infty$). Меѓутоа, според Штефан-Болцмановиот W_T закон треба да биде пропорционална со четвртиот степен од апсолутната температура, т.е. треба да биде - конечна величина. Тоа, впрочем, се гледа и од графикот на сл. 1: плоштината што се наоѓа помеѓу апсцисната оска и кривата добиена по релацијата (3) на Релеј-Џинс е бесконечно голема во областа на ултравиолетовото зрачење. Овој резултат е наречен "**ултравиолетова катастрофа**".

Значи работите на Л. Релеј и Џ. Џинс јасно покажаа дека примената на класичната физика за испитување на распределбата на израчената енергија по бранови должини од апсолутното црно тело дава апсурдни резултати коишто се противречни на експерименталните резултати..

Во 1900 година М. Планк нашол релација, во почетокот чисто по емпириски пат, според којашто добиените резултати за спектралната емисиона моќ на апсолутното црно тело се во согласност со експерименталните податоци, и која во двата гранични случаи (за долгите и кратките бранови на зрачењето) поминува соодветно во Релеј-Џинсовата и Виновата релација.

Планковата релација за спектралната емисиона моќ на апсолутното црно тело $W_{(\lambda,T)}$ е:

$$W_{(\lambda,T)} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (3)$$

каде што c_1 и c_2 се истите константи како во Виновата релација (1).

15. Зрачење

М. Планк анализирајќи го методот по кој Л. Релеј и Ц. Цинс дошле до релацијата (2), дошол до заклучок дека при тоа не е во прашање начинот на нејзиното изведување, туку една од основните претпоставки врз која се заснова класичната физика, а тоа е хипотезата за **континуирано (непрекинато) емитување на енергијата**, т.е. емитување во какви било произволни мали или големи количини (износи) на енергија. Меѓутоа, според класичната физика енергијата на кој било систем може да се менува континуирано (непрекинато) и при тоа тој може да прима какви било вредности.

На своето предавање во Берлинската Академија на 14 декември 1900 година М. Планк ја отфрлил хипотезата за континуирано емитување на енергијата и место неа ја вовел смелата хипотеза за **дисконтинуирано емитување на енергијата**.

Планк претпоставил, како што веќе веќе кажано во претходната лекција, дека енергијата E на зрачењето на атомите може да има само одредени големини кои се дадени со релацијата:

$$E = nhf, \quad n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots \quad (4)$$

каде што f е фреквенцијата на осцилирањето на атомот, h е константа, а n е цел број.

Енергијата се зрачи дисконтинуирано, велиме дека таа е квантувана.

Тоа значи дека енергиите на осцилаторот – атомот можат да бидат $E=hf$, или $2hf$, или $3hf$, итн; но не може да постојат осцилации со енергии меѓу овие вредности. Имено, енергијата не може да биде во какви било износи, како што се верувало дотогаш, туку е квантувана во одредени износи. Најмалиот можен износ на енергија (hf) е наречен **квант енергија**. Средната енергија \bar{E} за систем составен од такви осцилатори (атоми), наместо $\bar{E} = kT$ е:

$$\bar{E} = \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1} = \frac{hc}{\lambda e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (5)$$

Во релацијата (4) фреквенцијата f е заменета со брановата должина λ на зрачењето ($f=c/\lambda$), c - брзина на светлината во вакуум. Од релацијата (3) и (5) се добива Планковата релација за спектралната емисиона моќ на апсолутно црно тело:

$$W_{(\lambda,T)} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (6)$$

Величината h која за првпат ја вовел Планк, и прв по експериментален пат ја определил нејзината вредност, наречена **Планкова константа**. Таа има димензии на производ на енергија по време. Според современите податоци $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js

Врз основа на својата хипотеза за дисконтинуирано емитување на енергијата М. Планк на емпириска релација (3) ѝ даде свое ново објаснување, ги определи константите c_1 и c_2 , чии вредности се:

$$c_1 = 2\pi hc^2; \quad c_2 = \frac{hc}{k},$$

во кои h - Планковата константа; c - брзината на светлината во вакуум; k - Болцманова константа.

Планковата релација (6) дава теориски резултати кои прекрасно се совпаѓаат со експерименталните резултати за распределбата на енергијата на апсолутното црно тело при која било температура.

На сл. 2, исто така, графички се претставени добиените вредности за $W_{(\lambda,T)}$ по Планковата релација (7).

Од Планковата релација лесно се добиваат, веќе познатите, Штефан-Болцмановиот и Виновиот закон за поместување, исто така од неа се добиваат и теориските вредности за константите σ , и b .

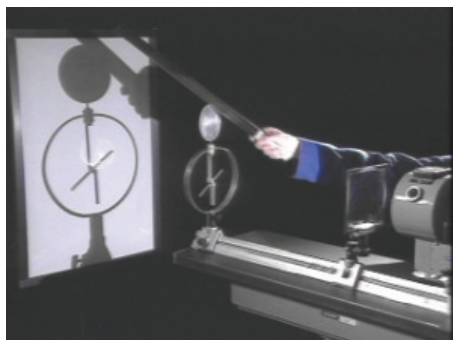
15.3. ФОТОЕЛЕКТРИЧЕН ЕФЕКТ

Надворешен фотоэффект кај металите

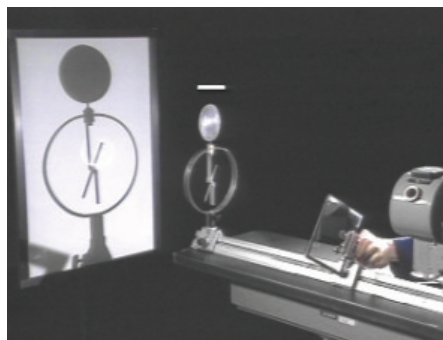
При осветлување на некои метали со светлина од нивната површина се избиваат електрони. Таа појава е вика **фотоелектричен ефект**, или кратко **фотоэффект**. Фотоэффектот за прв пат бил забележан од Хајнрих Херц 1897 г, но поподробни експериментални истражувања правеле и други научници меѓу кои значајно место завзема рускиот научник А.Г. Столетов.

Ќе опишеме експеримент со кој многу нагледно се демонстрира овој важен ефект. На оптичка клупа се поставува лачна ламба (или која било друга, што емитура ултравиолетово зрачење) и електроскоп што го електризираме негативно (сл.1а). На главата на електроскопот е поставена добро исчистена цинкова плоча. Меѓу ламбата и цинковата плоча, прво е поставено стаклена плочка. При осветлување на Zn- плочката, ништо не се менува, бидејќи стаклото ги впира ултравиолетовите зраци.

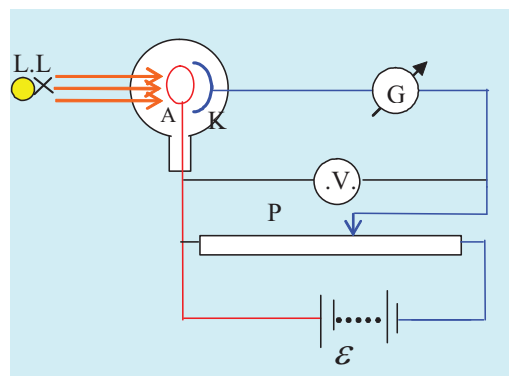
Ако негативно наелектризирана цинкова плоча се осветли со лачната ламба, но во услови кога стаклената плоча не ги попречува ултравиолетовите зраци, отклонот на електроскопот брзо паѓа (сл.1б). Значи светлината го елиминирала вишокот електрони. Ваквото избивање на електрони под влијание на светлина се вика **надворешен фотоэффект**. Опитите покажуваат дека надворешниот фотоэффект многу зависи од условите под кои металната плоча се осветлува.



Сл. 1а Електризација на цинканата плоча (помеѓу ламбата и плочата е стакло)



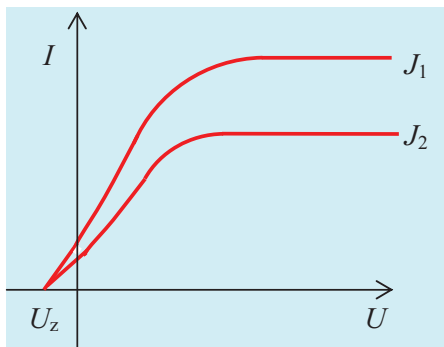
Сл. 1б Под влијание на светлината отклонот се намалува



Сл.2

Затоа експериментите се прават така што металната плоча К што се осветлува се поставува во кварцен или стаклен балон во кој е извлечен воздух. (сл. 2). Таков уред се вика **вакуум фотокелија**. Катодата на оваа цевка е поврзана со негативен крај на извор со висок напон, а анодата А, која претставува жица со форма на прстен со позитивниот дел на изворот. Ако катодата не е осветлена, галванометарот не покажува никаков отклон. Помеѓу катодата и анодата е вакуум и нема полнежи. Но кога катодата ќе се осветли, галванометарот ќе покаже течење на струја. Оваа струја ја викаме **фотоструја**. Ако се менува напонот U помеѓу електродите (што се постигнува преку потенциометарот P) се менува и струјата I . На сл. 3 е дадена т.н. волтамперска карактеристика на фотострујата, при два различни интензитета на осветлување J_1 и J_2 . Од графикот се гледа дека фотострујата во почетокот расте со приложениот напон, но за одредена вредност на напонот, кога сите избиеени електрони се привлечени од анодата се

постигнува заситување. При натамошно зголемување на напонот струјата останува константна. Таа струја ја викаме **струја на заситување**. При поголеми интензитети на осветлување ($J_1 > J_2$) струјата на заситување постигнува поголема вредност.



Сл. 3

Ако се донесе напон со спротивна насока, т.е. ако катодата ја поврземе за позитивниот пол на изворот, а анодата за негативен, електричното поле меѓу електродите има спротивна насока и тоа тежнее електроните да ги врати кон катодата. Кога електронот го помине растојанието од катодата до анодата, електричната сила на полето врши негативна работа чија што големина е еднаква на eU , а кинетичката енергија на електронот се намалува. Фотострујата исто така се намалува. бидејќи само електроните, чија кинетичка енергија е поголема од вредноста eU , успеваат да ја достигнат анодата, сите други под дејство на силите на полето се враќаат кон катодата. При определена големина на напонот во обратната насока еднаква на U_z фотострујата станува еднаква на нула. Овој напон се вика **закочен напон**. Според тоа, како последица на законот за запазување на енергијата:

$$eU_z = E_{k,\max} \quad (1)$$

каде што $E_{k,\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}$ е максималната вредност на кинетичката енергија на фотоелектроните (m е масата на електронот, а v_{\max} е максималната брзина со која електроните ја напуштаат катодата).

Испитувањата покажале дека за фотоефектот важат следниве основни закономерности:

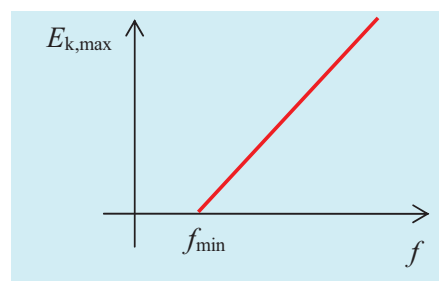
1. При осветлување на катодата со монохроматска светлина, бројот на избиените електрони од дадена површина во единица вре-

ме е право пропорционална со интензитетот на упадната светлина.

2. За секој метал постои т. н. **црвена граница за фотоефект**. Тоа е максималната бранова должина на светлината λ_{\max} (или, соодветно, нејзина минимална фреквенција ($f_{\min} = c/\lambda_{\max}$)) при којашто сè уште има

одделување на фотоелектрони. Ако врз катодата паѓа светлина, дури и со многу голем интензитет, но бранова должина ѝ е $\lambda > \lambda_{\max}$ не настанува фотоефект.

3. Максималната кинетичка енергија на фотоелектроните не зависи од интензитетот на



Сл. 4

светлината. Максималната кинетичка енергија на електроните $E_{k,\max}$ расте линеарно со порастот на фреквенцијата на упадната светлина (сл. 4).

4. Фотоелектроните се избиваат практично истовремено кога настанува осветлувањето (времето помеѓу двата акта е покусо од 10^{-9} s). Тоа е така и во случај кога интензитетот на упадната светлина е многу мал.

Максвеловата електромагнетна теорија само делумно може да ја објасни појавата фотоефект. Со таа теорија не можат да бидат објаснети закономерностите означени со 2, 3, и 4.

ФОТНИ

Како што покажавме во претходната лекција, Макс Планк успеал да го објасни зрачењето на апсолутното црно тело со поставување на претпоставка дека енергијата на зрачењето е дисконтинуирана. Таа се зрачи во кванти. Енергијата на еден квант е определена со релацијата:

$$E = hf \quad (2)$$

каде што f е фреквенцијата на зрачењето, а h Планкова константа.

Алберт Ајнштајн ја прифаќа Планковата идеја за светлински кванти и ја доразвива, тврдејќи дека *светлината не само што се емитура во вид на кванти, туку таа така и се апсорбира*. Светлинските кванти се викаат **фотони**. Фотоните имаат својства на честици кои секогаш се движат со брзина на светлината. Монохроматска светлина (или друг вид електромагнетен бран) со фреквенција f може да се разгледа како поток на фотони. Енергијата на фотонот е дадена со релацијата (2). Значи на светлина со различна бранова должина (различна фреквенција) им одговараат фотони со различни износи на енергија.

Фотоните се истовремено и бран и честица. Бран се бидејќи се карактеризираат со фреквенцијата и брановата должина на светлината: $c = \lambda f$. Но, од друга страна, слично на честиците, тие се локализирани во просторот со точно определена енергија. **Може да се емитураат и апсорбираат само цели фотони**. Фотоните не може да бидат емитувани, ниту апсорбирани на делови.

Ајнштајнова равенка за фотоефект

Кога еден фотон ќе навлезе во внатрешноста на металот тој целокупната своја енергија hf ја предава на еден од слободните електрони на металот. За да ја напушти површината на металот, електронот треба да ги совлада електростатските привлечни сили од јоните во металот, т. е. треба да изврши определена работа A . Таа работа е карактеристика за секој метал и се вика **излезна работа на металот**. Преостанатата енергија електронот ја носи како негова кинетичка енергија. Според тоа, имајќи го предвид законот за запазување на енергијата:

$$hf = A + \frac{mv^2}{2} \quad (3)$$

Равенката (3) се вика **Ајнштајнова равенка за фотоефект**.

Вредностите за излезната работа на металите се мали. Затоа е погодно нив, наместо во цули, да ги искажуваме во единицата **електрон-**

волт. Еден електронволт е работа што ја врши електрон при совладување на потенцијална разлика од еден волт. Според тоа :

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

За различните метали излезната работа е различна, и е со големина од неколку електрон волти. На пример, излезна работа на цезиумот е 1,8 eV, на натриумот е 2,3 eV, на златото 4,5 eV и т. н. За видливата светлина енергијата на фотоните е од ист ред на големина.

Ќе ги појасниме закономерностите според редоследот што веќе го дадовме.

1. Бројот на фотоните, паднати во единица време врз единица плоштина од површината на металот е правопрпорционален со интензитетот на светлината. Колку повеќе фотони паѓаат толку, толку е поголем бројот на избиените електрони. Така се објаснува зошто е бројот на одделените фотоелектрони во единица време правопрпорционален со интензитетот на светлината.

2. Ако е $hf < A$ фотоефект не може да има, бидејќи енергијата на фотонот не е доволна за да електронот ја напушти површината на металот. Минималната енергија на фотонот при кој е сè уште можно електронот да ја напушти површината на металот е:

$$hf_{\min} = A \quad f_{\min} = \frac{A}{h} \quad \text{или}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}} = \frac{ch}{A} \quad (4)$$

Релацијата (4) ја дава црвената гранична бранова должина.

3. Фактот дека максималната кинетичка енергија на електроните не зависи од интензитетот на светлината исто го објаснува Ајнштајновата равенка. Имено од (3) следува:

$$E_{k,\max} = hf - A \quad (5)$$

значи $E_{k,\max}$ зависи само од енергијата на фотонот и излезната работа. Од равенката (5) е јасна и линеарна зависност меѓу $E_{k,\max}$ и f (графичката зависност дадена на сликата 4),

4. Заемнодејството меѓу фотонот и електронот е слично на судир меѓу две честици. Енергијата на фотонот е сконцентрирана во многу мал простор, за разлика од

електромагнетен бран, која според Максвел е распоредена рамномерно во целиот простор опфатен со бранот. Поради тоа, електронот во многу кус временски интервал ја прима енергијата на фотонот. Фотоелектронот ја напушта површината на металот практично истовремено со осветлувањето на металната плоча.

Пример 1. Колкава е енергијата на фотонот кој одговара на светлина со бранова должина 600 nm? Анализирајте кога е можен фотоелектрон при осветлување со таа светлина на цезиумова или натриумова катода.

Решение: Дадено: $\lambda=600 \text{ nm}$, $A_{\text{Cs}} = 1,8 \text{ eV}$,
 $A_{\text{Na}} = 2,3 \text{ eV}$ $E=?$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{600 \cdot 10^{-9}} = 3,32 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,08 \text{ eV}$$

Фотоелектрон е можен кај цезиумова катода, а не е можен кај натриумовата,

Пример 2. Определете ја излезната работа на среброто, ако знаете дека црвената гранична бранова должина за него е $\lambda_{\text{max}} = 261 \text{ nm}$.

Решение: Дадено $\lambda_{\text{max}} = 261 \text{ nm}$, $A=?$

Според релацијата (4)

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{A} \Rightarrow A = \frac{hc}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{261 \cdot 10^{-9}} = 7,62 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,01 \text{ eV}.$$

Пример 3. Со колкава максимална брзина може да ја напушти површината на катодата од литиум фотоелектронот, ако катодата е осветлена со монохроматска светлина со бранова должина 440 nm? Излезна работа на литиумот е 2,48 eV, а масата на електронот $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Решение: Дадено : $A=2,48 \text{ eV}$; $\lambda=440 \text{ nm}$; $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. $v=?$

Од Ајнштајновата равенка (3) за бараната максимална брзина се добива:

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2(hf - A)}{m}} = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{hc}{\lambda} - A \right)}{m}} = \sqrt{\frac{2}{9,1 \cdot 10^{-31}} \left(\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{440 \cdot 10^{-9}} - 2,48 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \right)} = 3,3 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Прашања, задачи, активности

1. Објаснете зошто закочниот напон за дадена фотокелија зависи од брановата должина на упадната светлина, а не од интензитетот на светлината.

2. Колкава е енергијата на фотоните на светлината од граничните вредности на видливото подрачје ($\lambda_1=400 \text{ nm}$ и $\lambda_2=760 \text{ nm}$)?

(Одговор: $E_1=3,1 \text{ eV}$; $E_2=1,63 \text{ eV}$)

3. Излезната работа на калиумот е 2,24 eV. Колкава е брановата должина на црвената граница на фотоелектрот?

(Одговор: 554 nm)

4. Побарајте на интернет веб страна :

Photoelectric effect

http://www.physicscurriculum.com/exploration_of_physics_sical_science.htm и симулирајте ја појавата.

Кратко резиме

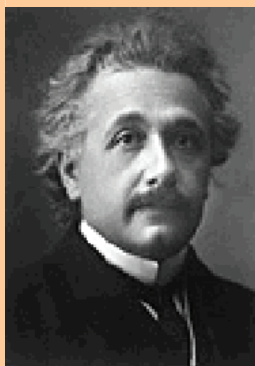
Појава при осветлување со светлина од метална површина да се избиваат електрони се вика надворешен фотоелектрон. При тоа: 1) бројот на избиените електрони зависи од интензитетот на упадната светлина; 2) за секој метал постои т.н. црвена граница, максимална бранова должина за која се уште постои фотоелектрон (светлина со поголема бранова должина од таа не предизвикува фотоелектрон); 3) максималната кинетичка енергија на фотоелектроните не зависи од интензитетот на светлината и 4) избивањето електрони е практично истовремено со осветлувањето.

Фотоелектротот не можел да биде објаснет со класичната електромагнетна теорија.

Објаснение дал Ајнштајн со воведување на фотон како квант на светлината и со својот

закон според кој $hf = A + \frac{mv^2}{2}$, каде што се

користи законот за запазување на енергијата и се вели дека енергијата на фотонот се троши за совладување на силите со кои електронот е држан во внатрешноста на металот) излезна работа A) и за добивање на кинетичка енергија.



Albert Einstein (1875 - 1955) е роден во Улм, Германија на 14 март 1879 г. Според популарна легенда бил мирно дете кое доцна научило да зборува. Родителите дури се плашеле дека е можеби ментално заостанат. Но, веќе во основно школо покажувал забележителни резултати по математика, физика и свирење виолина.

По преселувањето на неговата фамилија во Италија, школувањето го продолжил во Швајцарија. Како студент се одликувал со изразита индивидуалност. По завршетокот на студиите кратко работел како предавач, а не поминале ни две години како добил постојана работа во Швајцарскиот патентен центар во Берн каде работел 7 години. Работата ја сметал за интересна, бидејќи ја стимулирала неговата научничка имагинација.

На 26 години во 1905 г. ја одбрал својата докторска дисертација. Оваа година е значајна за развојот на целокупната наука. Тоа е годината кога тој објавил три многу значајни публикации. Првата се однесувала на квантната теорија на светлината и објаснение на фотоэффектот, за која што ја добил Нобеловата награда за физика во 1921 год. Втората публикација се однесувала на статистичките аспекти на појавата Брауново движење, каде што укажува на брауновското движење на атомите. Неговата трета работа му донела најголем публицитет. Таа се однесувала на специјалната теорија на релативноста. Во 1915 година Ајнштајн ја дава својата општа теорија на релативноста во која што покажал дека класичната теорија за гравитација на Њутн е само специјален случај на неговата теорија. Релативистичките теории на Ајнштајн од корен го менуваат нашето сфаќање за просторот и времето како и за универзумот воопшто.

Внатрешен фотоэффект

Во обични услови полупроводниците имаат многу мал број на носители на струја – слободни електрони или шуплини. При осветлување на полупроводникот навлезените фотони им предаваат енергија на валентните електрони кои го напуштат атомот и стануваат слободни. Така со осветлувањето се зголемува бројот на слободните електрони, но и на шуплините, бидејќи по излегувањето на електронот од атомот, во него се создава шуплина.

Оваа појава на создавање на носители на струјата во полупроводникот при неговото осветлување се вика **внатрешен фотоэффект**.

Внатрешниот фотоэффект овозможува два важни феномена:

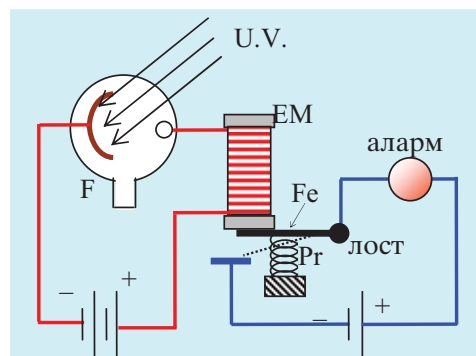
- со осветлување се зголемува спроводливоста на полупроводникот- наречена **фотоспроводливост** и

- со осветлување на p-n контактот на даден пар на полупроводници, или контакт на метал-полупроводник, на контактот се создава електромоторна сила, појавата е позната како **фотоволтаичен ефект**.

15.4. ПРИМЕНА НА ФОТООФЕКТОТ ФОТООЛЕМЕНТИ

Примена на фотоэффектот

Фотоэффектот наоѓа многубројна практична примена. Во основата на примената лежи можноста даден светлински сигнал, преку појавата фотоэффект, да се претвора во електричен сигнал. Ќе опишеме некои од примените.



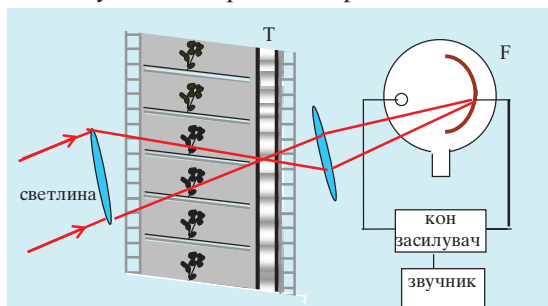
Сл.1

Сликата 1 илустрира примена на **фотоќелијата** во алармните уреди. Фотоќелијата F се

15. Зрачење

осветлува со ултравиолетова светлина (U.V), која, како што знаеме, е невидлива за човечкото око. Така низ колото на ќелијата (означено со црвени спроводници) протекува струја, поради која електромагнетот ЕМ ставува магнет. Тој ја привлекува железната котва Fe поставена на лостче кое е влечено со еластична пружина Pr. Кога помеѓу изворот на ултравиолетовото зрачење и фотоќелијата ќе помине крадец, електромагнетот престанува да биде магнетичен и железната котва влечена од еластичната пружина го затвора второто коло (означено со сини спроводници) во кое е вклучен електричен аларм.

Многу слично коло, на тоа дадено со сликата 1, е колото на уредот **фоторелеј**. Таму само обично се користи фотоќелија која може да биде чувствителна и на обичната видлива светлина. Бидејќи добиената фотоструја во тој случај е помала, таа се засилува со посебен засилувач. Така засилената струја може да прекине, или вклучи друго работно коло. Во работното коло можат да бидат вклучени различни механизми со кои се регулираат различни процеси на автоматско управување, палење и гасење на улично осветление, заштитни противпожарни уреди и сл. Со фотоќелија се поврзани и моторите кои автоматски при стапување на одредено место овозможуваат отворање на вратите.



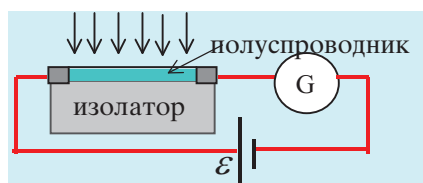
Сл.2

Фотоэффектот наоѓа примена и при филмска **регистрација на снимен звучен запис**. За да се гледа филм треба сликите на филмот да се движат така што за секоја секунда да изминат по 25 слики. Звучниот запис (сл.2) треба да биде истовремено регистриран. Звучниот запис е обично составен од трака Т во која со различен интензитетот на поцрнувањето во вид на црти е даден запис кој соодветствува на

звучните осцилации. Ако на тој дел од филмот се насочи светлина која паѓа на фотоќелија F, светлинскиот интензитет се модулира во ритмот на звучните осцилации. Поради тоа звучните осцилации се претвораат во променлива фотоструја која засилена предизвикува осцилирање на звучникот поврзан во струјното коло на фотоќелијата.

Фотоотпорници

Фотоотпорник претставува плочка од изолатор врз која е нанесен тенок слој од полупроводник со дебелина од ред на големина на микрометри. (сл. 3) Како полупроводници се користат материјали кои се многу фоточувствителни, на пример, силициум, селен, талиум сулфид, кадмиум сулфид.



Сл.3

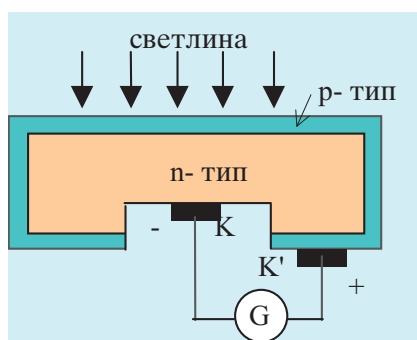
При собно осветлување таквиот тенок филм има многу мала спроводливост, која ја регистрира галванометарот како **темна струја**. При осветлувањето, струјата нагло расте пропорционално со осветленоста. Се користат во фотографијата и во електрониката за регулирање на излезните сигнали или при прекинување на одредени кола.

Фотоелементи

Како што напомниме со помош на светлина може да се добие електрична струја без присуство на надворешен извор на е.м.с.

Ако контактот на два полупроводника од p и n тип се осветли, тој светлинската енергија ја претвора во електрична струја, така што таквите уреди претставуваат електрични извори. Се викаат **фотоелементи**.

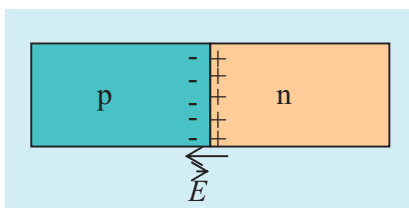
Најраспространети фотоелементи се т.н. **соларни ќелии**. Кај нив со користење на фотоволтаичниот ефект се овозможува директна претворба на сончева енергија во електрична.



Сл.4

На сликата 4 е даден шематски приказ на таква ќелија, градена од силициум од р и п тип. р-типот ја обвиткува плочката од п-тип. Дебелината на тенкиот слој на р-типот е од ред на големина на $1 \mu\text{m}$. Со контакти К и К' двата полупроводника се поврзани со надворешно коло во кое е поврзан галванометарот G.

Кога сончева светлина ќе падне врз р-слојот, доаѓа до нагло зголемување на носителите на полнежи: електроните и шуплините. Под влијание на полето на р-п преминот концентрацијата на електроните во п-полупроводникот се зголемува. Присетете се дека на р-п контактот се создава електрично поле (сл.5). Истовремено со зголемувањето на бројот на електроните се зголемува и концентрацијата на шуплините во р- полупроводникот.



Сл.5. Поради дифузија на електроните од п кон р полупроводник, и шуплините од р кон п полупроводникот се создава бариерно поле со јачина E

Така при осветлување на фотоќелијата меѓу двата полупроводника се појавува електромоторна сила. Уредот преставува извор на електрична струја, која може галванометарот да ја регистрира. Ваквиот фотоелемент создава напон од ред на големина на $0,5 \text{ V}$. Струјата што при тоа тече е од ред на големина на десетици

милиампери. Силициумовите соларни ќелии имаат најголема осетливост во интервалот помеѓу $540\text{-}560 \text{ nm}$, што одговара и на најголемата осетливост на човечкото око.

Фотоелементите се прават и од други материјали. Главно тоа се полупроводниците, или некои оксиди во комбинација со метали. Подрачјето на максималната осетливост на фотоелементите е различна и зависи од материјалите од кои се направени. На пример германиумови соларни ќелии се со максимална осетливост во подрачјето блиско до инфрацрвеното зрачење.

Денешната модерна технологија не може да се замисли без фотоелементи. Ќе споменеме само некои уреди каде што тие се користат. Во метеорологијата се користи фотометар со кој преку осветлувањето на небото се суди за временските промени во Земјината атмосфера.



Сл. 6

Во самопослугите секојдневно се користат **бар-код-читачи** на кодовите (сл.6) на различните производи. Секој производ има свој код. За да се прочита тој код се користи електронски уред со фотоелементи. При рефлексија на светлината од светлите и темните пруги на кодот се регистрира соодветниот производ. Читачот е поврзан со компјутер и доволно е само краткотрајно поминување на светлината за да се добие информацијата за цената, називот и др. податоци за производот.

Модерните скенери се градени од илјадници мали фотоелементи, при што секој фотоелемент е и дигитална единица.

Во науката, посебно во астрофизиката во широка употреба се п.н. СиСиДи –камери (CCD), кратенка од Charge Coupled Devices, кои претставуваат револуционерно откритие. Тоа се површини од десетици или илјадници милиони фотодетектори поставени во само еден микрочип. Ефикасноста им е многу голема и до 50% од упадната светлина се претвора во електричен импулс.

Во нуклеарната физика од големо значење се фотомултипликаторските цевки,кадешто преку фотоефектот се засилуваат зрачењата.

Користење на фотоволтаици – пат кон почиста животна околина



Сл.7 Фотоволтаична соларна централа од Вирџинија која дава моќност 15 kW

Фотоволтаична технологија е една од модерните преокупации на денешната физика. Може да се запрашаме зошто? Да ги набриоме некои ид предностите на фотоелементите:

-Фотоволтаичните соларни ќелии овозможуваат добивање на електрична енергија надвор од Земјината атмосфера, во сателитите и другите видови космички летала. Напојување на мерните уреди таму е главно со фотоелементни батерии;

- фотоволтаичните ќелии овозможуваат добивање на електрична енергија во населени места оддалечени од главните електрични постројки;

- во така оддалечените места е овозможено не само добивање на електрична енергија за најразлични намени, како што се осветлување, напојување на мотори за најразлична намена туку и за пренос на информациите до тие места;

- фотоволтаиците се извонредно погодни за напојување со енергија на уредите со мала моќност како што се калкулаторите, часовниците или камерите.

Но, еден од најголемите предности при директната претворба на Сончевата енергија во електрична лежи во добивањето на “чиста енергија” (сл.7). **Со соларните ќелии не постои**

никаква опасност за загадување на животната средина.

Затоа во голем број центри во светот, па и кај нас, се работи на добивање на фотоволтаични елементи со зголемена ефикасност.

До сега на тој план најмногу се успеало со монокристални силициумови ќелии кај кои е постигната ефикасност и до 25%. Но, процесот на добивањето на овие фотоќелии е многу скап и неисплатлив. Најдобрите поликристални фотоќелии имаат ефикасност до 19%, додека соларни фотоќелии добиени од аморфен силициум се со ефикасност до само 13%. Сепак направен е голем напредок на овој план кога ќе се спомне дека првите фотоќелии конструирани во педесетите години од минатото столетие, имале ефикасност само 4%.

Добивањето на поголеми моќности на фотоелементите се постигнува со зголемување на површината изложена на Сончевата светлина, со конструкција на специјални уреди кои површината на фотоќелиите ќе ја вртат така што светлинските зраци да паѓаат секогаш нормално на површините, но и со специјални светлински концентратори.

Прашања,задачи, активности

1. Проучете самостојно какви сè други примени има фотоефектот?
2. За надворешен фотоефект постои “црвена граница за фотоефектот”, што мислите постои ли таква граница и во случај на внатрешен фотоефект?
3. Побарајте на интернет веб страна:

Photovoltaic effect

<http://www.greenhouse.gov.au/renewable/technologies/pv/work#work> и

http://www.nrel.gov/clean_energy/farmer_pv.html

каде што ќе може да видите анимација на ефектот. Користете и други слични линкови.

Кратко резиме

Примената на фотоефектот е разноврсна. Од големо значење е и примената на внатрешниот фотоефект, кој се јавува кај полупроводниците кај кои со осветлувањето се зголемува бројот на слободните електрони и шуплините.

15.5. СВОЈСТВА НА ФОТОНИТЕ

Максвеловата електромагнетна теорија наиде на сериозни тешкотии при објаснувањето на законите за надворешниот фотоэффект. Овие тешкотии ги надмина А. Ајнштајн кој во 1905 година ја создаде **квантната теорија за светлината** и на законите за надворешниот фотоэффект им даде **квантно објаснување**.

А. Ајнштајн понатаму ја проширил Планковата идеја за квантен карактер на енергијата што ја зрачат атомите од телата како хармониски осцилатори. Тоа проширување се состои во тоа што тој претпостави дека *не само енергијата што ја зрачат телата е квантувана, туку и самото електромагнетно зрачење има дискретна структура*, т.е. се состои од одделни кванти на енергија:

$$E = hf, \quad (1)$$

каде што h е Планковата константа; f е фреквенцијата на определен квант.

Според А. Ајнштајн, светлината која има електромагнетна природа не само што се зрачи, но, исто така, и се распространува во просторот и се апсорбира од супстанциите во вид на одделни "порции" на енергија - кванти на електромагнетното зрачење. Според тоа, распространувањето на електромагнетното зрачење треба да се разгледува не како континуиран процес, но како поток од локализирани во просторот **дискретни кванти**, кои се движат со брзина c на светлината во вакуум. Тие кванти на електромагнетното зрачење (на светлината) се наречени **светлински кванти** или **фотони**. Ова значи дека светлината за која постојат непобитни докази (интерференција, дифракција, поларизација) има бранова природа, треба во дадени случаи да се разгледува и како поток од честици (корпускули) - наречени фотони.

Енергијата на секој фотон зависи од неговата фреквенција f и е определена со релацијата (1). За монохроматска светлина со фреквенција f сите фотони поседуваат иста енергија, еднаква на hf . Сега процесот на апсорпција на светлината од супстанциите се објаснува со тоа што фотоните ја предаваат **целата своја енергија** одеднаш на честицата од

супстанцијата. Тоа значи дека процесот на апсорпцијата на светлината протекува **дисконинуирано** како во просторот, така и во текот на времето. Со други зборови можат да се емитуваат и апсорбираат само цели фотони. **Фотоните не можат да бидат емитувани ниту апсорбирани на делови.**

Овие идеи на А. Ајнштајн влегоа во основата на т.н. **квантна теорија за светлината**, која овозможи успешно да се објаснат законите на надворешниот фотоэффект и многу други оптички појави.

При објаснувањето на квантните оптички појави досега е користена само една карактеристика на фотонот - неговата енергија $E_{\text{ф}} = hf$. Секако покрај **енергијата** фотонот, како корпускула од посебен вид, мора да има своја **маса** и **импулс**.

Релацијата за масата на фотонот може да биде добиена согласно специјалната теорија на релативноста, по релацијата $E = mc^2$, која ја дава заемната врска меѓу масата m и енергијата E за дадена честица. За фотонот имаме

$$E_{\text{ф}} = mc^2; \quad m = \frac{E_{\text{ф}}}{c^2} = \frac{hf}{c^2}, \quad (2)$$

Според тоа, **масата m на фотонот**, кој како корпускула се движи со брзина на светлината c во вакуум **зависи од фреквенцијата f** (брановата должина λ) на светлината. Масата на фотоните битно се разликува од масата на макроскопските тела и масата на другите елементарни честици. Таа разлика се состои во тоа што **фотонот нема маса на мирување m_0** , односно неговата маса на мирување е еднаква на нула ($m_0 = 0$). Во врска со тоа нека разгледаме фотон којшто се движи во вакуум со брзина на светлината ($v=c$). Ако, сега, ја примениме релацијата

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

за зависноста на масата m на дадена честица од нејзината брзина v при движењето, за фотонот доаѓаме до апсурд ($m = \infty$), ако се смета дека

15. Зрачења

фотонот има маса на мирување различна од нула. Тогаш очигледно е дека фотонот, како корпускула, во состојба на мирување не постои. На таков начин, врз основа на квантните претстави за светлината и општите принципи на теоријата на релативноста, произлегува дека:

1. Масата на мирување на фотонот е еднаква на нула.

2. Фотонот насекаде се движи со брзина c .

Вака кажаното означува дека фотонот претставува самиот честица (корпускула) од посебен вид, која се разликува од останатите честици, како што е електронот, протонот и други, кои можат да постојат при движење со брзини помали од c и при мирување.

Врската меѓу импулсот $\vec{p} = m\vec{v}$, на која било честица со маса m и при нејзиното движење со брзина v , и нејзината енергија, согласно на специјалната теорија на релативноста е дадена со релацијата:

$$E = c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}. \quad (3)$$

Ако станува збор за фотонот, како корпускула, тогаш $m_0 = 0$ и за импулсот на фотонот p_Φ , од релацијата (3) се добива:

$$p_\Phi = \frac{E_\Phi}{c} = \frac{hf}{c} = mc, \quad (4)$$

каде што $m = hf/c^2$ - маса на фотонот, а c - брзина на светлината во вакуум. Ако во релацијата (4) фреквенцијата на фотонот f се изрази преку брановата должина λ ($f = c/\lambda$),

а потоа се воведо *брановиот број* $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ на светлинскиот бран за импулсот на фотонот се

добива релацијата:

$$p_\Phi = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (5)$$

Фотонот како корпускула лета во насоката на распространувањето на електромагнетниот бран. Поради тоа насоката на импулсот на фотонот како векторска величина се совпаѓа со насоката на распространувањето на светлинскиот бран. *Брановиот вектор* \vec{k} , со правец нормален на фронтот на бранот, се поклопува со насоката на ширењето на бранот и има интензитет еднаков на брановиот број $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Имајќи го тоа предвид релацијата (5) може да ја напишеме во векторски облик:

$$\vec{p}_\Phi = \frac{h}{2\pi} \vec{k}. \quad (6)$$

На таков начин фотонот, како и секоја честица во движење, поседува енергија, маса и импулс. Сите овие **корпускуларни карактеристики на фотонот** преку релацијата (6) се поврзани со брановите карактеристики на светлината (потокот од фотони) со неговата фреквенција f (или брановата должина λ).

Во табелата 1 се дадени вредностите за енергијата, масата и импулсот на фотони од различни електромагнетни зрачења.

Според податоците, од табелата 1, се гледа дека со намалување на брановата должина на електромагнетното зрачење неговите корпускуларни карактеристики доаѓаат до сè поголем израз. Со други зборови, енергијата, масата и импулсот на фотоните во движење стануваат сè поголеми.

Табела 1.

ЕЛЕКТРОМАГНЕТНО ЗРАЧЕЊЕ	Бранова должина (λ)	Енергија на фотонот (eV)	Маса на фотонот (kg)	Импулс на фотонот (kgm/s)
Радиобранови	2 m	$6,25 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-45}$	$3,3 \cdot 10^{-37}$
Видлива светлина	600 nm	2	$3,6 \cdot 10^{-36}$	$1,1 \cdot 10^{-27}$
Рендгенски зраци	0,1 nm	$12,4 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^{-32}$	$6,6 \cdot 10^{-24}$

15.6. СВЕТЛИНСКИ ПРИТИСОК

Експериментална потврда дека фотонот поседува маса и импулс е измерениот **светлински притисок на површината на телата што се осветлени**.

Имајќи предвид дека фотоните имаат соодветен импулс, флуксот на тие фотони при ударот на некоја површина врши притисок.

Нека за единица време Δt на разгледуваниот елемент од површината ΔS нормално на неа паѓа монохроматска светлина со бранова должина λ .

Ако површината на телото потполно ја рефлектира упадната светлина (коэффициентот на рефлексивност $R=1$), тогаш промената на импулсот на фотонот изнесува:

$$\Delta p_{\text{ф}} = \frac{hf}{c} - \left(-\frac{hf}{c}\right) = 2\frac{hf}{c}. \quad (1)$$

Ако во текот на време Δt на разгледуваниот елемент на површината ΔS паднат n_0 фотони, тогаш вкупниот импулс на силата е:

$$F\Delta t = 2\frac{E}{c}, \quad (2)$$

каде што $F = P\Delta S$ е силата на притисок од сите n_0 фотони, а $E = n_0 hf$ е вкупната енергија на фотоните. Во тој случај релацијата (2) може да се напише во обликот:

$$P = \frac{2E}{\Delta S \Delta t c}, \quad (3)$$

каде што P е светлинскиот притисок од фотоните на таа површина.

Бидејќи интензитетот на светлината J е енергија на фотоните која во единица време паѓа на единица плоштина нормално на површината, $J = E / \Delta S \Delta t$, според релација (3) притисокот на светлината е:

$$P_r = \frac{2J}{c}, \quad (4)$$

каде што индексот r означува дека телото наполно ги рефлектира упадните фотони. Ако површината на која паѓа светлина наполно ги апсорбира сите упадни фотони, тогаш светлинскиот притисок на таа површина е:

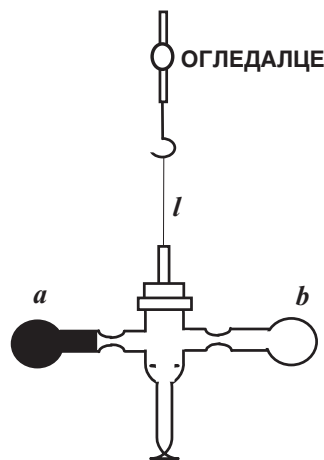
$$P_a = \frac{J}{c}. \quad (5)$$

Во случај разгледуваната површина делумно да ги апсорбира упадните фотони, тогаш дел од фотоните $n_0 R$ се рефлектира, а дел $(1-R)n_0$ се апсорбира, па светлинскиот притисок на светлината по единица површина е:

$$P = P_r + P_a = R\frac{2J}{c} + (1-R)\frac{J}{c} = \frac{J}{c}(1+R), \quad (6)$$

Имено, ако телото наполно рефлектира ($R=1$) светлинскиот притисок е $P = 2\frac{J}{c}$, а за апсолутно црно тело ($R=0$) светлинскиот притисок $P = \frac{J}{c}$ двапати е помал.

Релацијата (6) која го определува светлинскиот притисок добиена е врз основа на Планковата хипотеза. До истата релација може да се дојде и преку Максвеловата електромагнетна теорија за ширење на светлината. Светлинскиот притисок во однос на атмосферскиот притисок е 10^{10} пати помал, па неговото дејство е многу слабо изразено.



Сл. 1. Експеримент на Лебедев

Прв кој експериментално го потврдил постоењето на светлинскиот притисок во 1901 година бил рускиот физичар П. И. Лебедев. Така релацијата (6) беше потврдена.

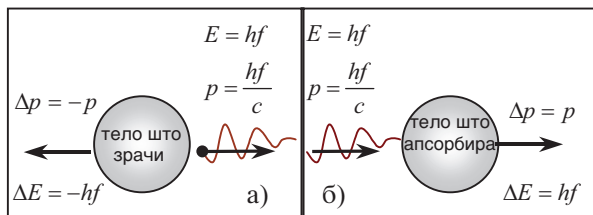
Главен дел од апаратурата на П. Лебедев

15. Зрачења

бил многу лесен висок на тенка нитка l , на кој биле прицврстени лесни крилца a и b (сл. 1), од коишто едното е (на пример a) поцрнето, а другото е светло. (Обидете се и Вие од алуминиска фолија да направите нешто слично.)

Поради светлинскиот притисок на крилцето, високот почнува да ротира, а со тоа ја усукува тенката нитка на која е обесен. Притоа усукувањето на нитката се набљудувало со дурбин и огледалце прицврстено за нитката. Со споредување на усукувањата, предизвикани при осветлувањата на поцрнетото и светлото крилце, П. Лебедев можел да утврди дека, во согласност со теоријата, притисокот врз поцрнетата површина е двапати помал од притисокот врз рефлектирачката (светлата) површина. Така по извршените мерења Лебедев покажал дека добиените вредности за светлинскиот притисок, во границите на експерименталните погрешки, се совпаѓале со вредностите добиени според теориската релација (6).

При многу мали димензии на честиците, какви што се молекулите од гасовите, силата на светлинскиот притисок врз нив може да ја надмине силата на гравитацијата што делува на нив. Имено, во 1908 П. Лебедев го измерил светлинскиот притисок врз гасови. Со тоа било потврдено дека при приближувањето на кометите кон Сонцето, во нив се формира опашка, секогаш насочена од Сонцето. Опашката се формира како резултат на силата од светлинскиот притисок, на Сончевата светлина, која ги турка честиците од кои се состои опашката на кометата.



Сл. 2.

ПРИМЕР 1: При процесите на емитување и апсорбирање на фотоните важат законите за запазување на енергијата и импулсот. Тоа значи дека при секој акт на емисија на фотон телото што зрачи добива дополнителен импулс $\Delta p = -p$ во насока спротивна на насоката на

распространување на емитуваната светлина, а енергијата на телото се намалува за $\Delta E = -hf$ (сл. 2a). Телото што апсорбира фотон добива енергија $\Delta E = hf$ и импулс $\Delta p = p$ (сл. 2б).

ПРИМЕР 2. Колкава е енергијата во електронволти, масата и импулсот на фотон, што припаѓа на електромагнетен бран со бранова должина 500 nm (зелена светлина)?

Решение: Енергијата на фотонот е:

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} = 3,39 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,48 \text{ eV}$$

$$1 \text{ J} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$

Масата на фотонот изнесува:

$$m = \frac{hf}{c^2} = \frac{E}{c^2} = \frac{3,97 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} = 4,4 \cdot 10^{-36} \text{ kg};$$

Импулсот на фотонот изнесува:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} = 1,32 \cdot 10^{-27} \text{ kg m s}^{-1}$$

ПРАШАЊА И ЗАДАЧИ

1. Кои се корпускуларните и брановите карактеристики на фотонот?

2. Ако сноп од црвена светлина и сноп од сина светлина имаат еднаква енергија, кој сноп има поголем број на фотони?

3. Што претставува експериментална потврда дека фотонот поседува маса и импулс?

4. Зборуваме за фотони од црвена светлина, зелена светлина итн. Објасни дали може да зборуваме за фотони на бела светлина.

5. Средната фреквенција на светлината од светилка со моќност $P=25 \text{ W}$ е $f=2,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Да се процени приближниот број фотони израчани за една секунда.

(Одговор: $N=1,5 \cdot 10^{20} / \text{s}$)

6. Човечко око е долго адаптирано на темнина, примајќи светлински сигнал од 100 фотони во секунда со бранова должина 550 nm. Колкаво количество енергија паѓа во окото во секоја секунда?

(Одговор: $P=3,6 \cdot 10^{17} \text{ W}$)

15.7. ДУАЛНА ПРИРОДА НА ЧЕСТИЦИТЕ

За објаснување на добиените експериментални резултати, при зрачењето на апсолутно црно тело и апсорпцијата на светлина при надворешниот фотоефект, неминовно беше потребна нова хипотеза: **светлината со фреквенција f се емитува и апсорбира во одредени порции**, кои при некои појави се пројавуваат како честици со енергија $E=hf$. Во физиката повторно се воспостави корпускуларната теорија на светлината, но преку новата, **квантна теорија**. Таа теорија се разликува и од старата, Њутнова корпускуларна теорија, и од брановата теорија.

Светлината има сложена природа и не може да се разгледува само како бран или само како сноп од подвижни честици.

Како што видовме во појавите интерференција и дифракција светлината ги манифестира брановите својства, т.е. се јавува како електромагнетен бран со определена фреквенција f , периодична во времето и просторот. Во процесите на зрачење и апсорпција на светлина се манифестираат нејзините корпускуларни својства - се зрачат и апсорбираат само кванти, "порции" со енергија $E=hf$ и импулс $p=hf/c$, а никако не се зрачат и апсорбираат делови од тие "порции".

Сите настојувања да се разгледува светлината само како класичен Максвелов електромагнетен бран или сноп од класични Њутнови честици беа безуспешни. Пројавувањето на светлината како бран или како честица во различни појави се израз на нејзината **дуална (двојна)** природа. Фотонот е првата проучена честица во физиката во која се пројавува таа дуалност.

Сè до создавањето на квантната теорија за природата на светлината се истакнувала брановата природа на светлината, а нејзината корпускуларна природа енергично се поттикнувала, дури била и сосема игнорирана. Додека, пак, честиците (како што се атомите, молекулите, електроните, протоните, т.е. честиците чија маса на мирување е различна од нула) биле третираны едноставно како класични

честици.

Во природата и во нејзините закони постои симетрија. Земајќи дека светлината поседува својство на бран и честица, не следува ли да се очекува дека слична дуалност им припаѓа на електроните и на другите микрочестици?

Во 1923 година францускиот физичар *Луј де Броли* постави смела хипотеза дека постои единство на природата и дуалната природа на светлината ја проширува и на сите материјални честици. Сите форми на материјата имаат својства како на честици, така и на бранови. Тие бранови се наречени **бранови на материјата или Де Бролиеви бранови**. Според хипотезата на Де Броли, **секоја честица со импулс p пројавува и бранови својства**.

Тоа значи дека сите форми на материјата, а не само светлината имаат својства како на честици, така и на бранови. Де Бролиевите бранови за честица со импулс p , се карактеризираат со бранова должина:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

каде што h -Планкова константа.

Релацијата (1) е позната како *Де Бролиева релација*. Де Бролиевата бранова должина по релацијата (1) важи како за релативистички, така и за нерелативистички честици. Бидејќи импулсот p на честицата со маса m , што се движи со брзина $v \ll c$, $p = mv$, имаме:

$$\lambda = \frac{h}{mv}. \quad (2)$$

Релацијата (2) ја дава брановата должина λ , т.е. ја определува нејзината вредност на таканаречените Де Бролиеви бранови или бранови на материјата.

Ако честицата има кинетичка енергија

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}, \quad (3)$$

каде што $p = mv$, тогаш, со замена на импулсот p со енергијата по релацијата $p = \sqrt{2mE}$, релацијата (2) станува:

15. Зрачења

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \quad (4)$$

Ќе ја определеме Де Бролиевата релација за брановата должина на електронот. Тргуваме од релацијата за енергијата на електронот E што се движи во електрично поле со потенцијална разлика U :

$$E = eU, \quad (5)$$

каде што e - полнежот на електронот. Ако во релацијата (4) се внесе изразот за E од релацијата (5) и вредностите за константите $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js; $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, тогаш се добива релација за брановата должина на електронот:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}} = \frac{h}{\sqrt{2me}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U}},$$

$$\lambda = \frac{1,23 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{U}} = \frac{1,23}{\sqrt{U}} \text{ nm} \quad (6)$$

Во релацијата (6) потенцијалната разлика U се мери во волти (V). Релацијата (6) покажува дека Де Бролиевите бран што го пројавува електронот кој се движи во електрично поле со потенцијална разлика од 1V има бранова должина 1,23 nm. Таа е од редот на бранови должини на рендгенските зраци и овие бранови својства на електронот можат експериментално да се регистрираат.

Природно, се појавува прашањето зошто брановите својства не се појавуваат кај макроскопските тела, на пример, кај куршумот што лета? Одговорот на ова прашање е поврзан со особените на Де Бролиевата релација (1) и сите други релации од квантната физика, што ја содржат Планковата константа. Ако во релациите од квантната физика не може да се занемари константата h , тогаш секогаш ќе се добиваат резултати што не се класични. И обратно, ако во релациите може да се смета дека $h \rightarrow 0$, тогаш резултатите од квантната физика се совпаѓаат со класичните. Посебно, за тело со маса m неспоредливо поголема од масата на атомите и молекулите, може да се смета дека $h \rightarrow 0$ и никакви бранови својства кај таквите тела не се појавуваат ($\lambda \rightarrow 0$).

ПРИМЕР 1. Куршумот со маса $m = 10^{-3}$ kg се движи со брзина $v = 10^2$ m/s. Колкава е неговата бранова должина?

Решение:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{10^{-3} \cdot 10^2} \text{ m} = 6,626 \cdot 10^{-33} \text{ m}.$$

Значи Де Бролиевата бранова должина е сосема мала, и таква бранова должина не може да биде регистрирана со никакви дифракциони експерименти. Според тоа брановите својства кај макроскопските тела практично не постојат.

Познато е дека дифракција на светлината од оптичка мрежичка може да се регистрира ако константата на мрежичката има димензии од ред на големина на брановата должина на монохроматската светлина што паѓа на неа.

Според релацијата (2) јасно е дека Де Бролиевата бранова должина за микрочестичите, поради нивната многу мала маса во споредба со масата на макроскопските тела, може да биде многу голема. Така постои можност како дифракциона мрежичка да се користат, кај кристалните супстанции, кристалните рамнини во кои растојанието меѓу нивните градивни елементи (атоми) е од ред на големина на Де Бролиевите бранови должини за микрочестичите.

Да го земеме електронот како една многу важна микрочестича. Тој во атомот на водородот, се движи со брзина $v = 2 \cdot 10^6$ m/s, и Де Бролиевата бранова должина за него е:

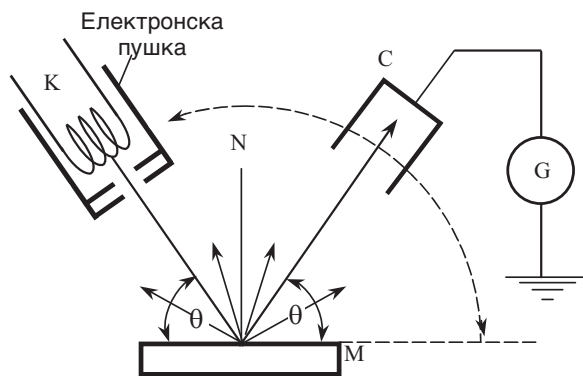
$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 2 \cdot 10^6} \text{ m} = 0,33 \text{ nm}.$$

За електронот, пак, што се движи во електрично поле со потенцијална разлика $U = 100$ V по релацијата (6) Де Бролиевата бранова должина е $\lambda = 0,123$ nm. Овие нумерички резултати покажуваат дека Де Бролиевата бранова должина на брзите електрони е споредлива со димензиите на константата на решетката од кристалите. Според тоа кристалната структура може да послужи како адекватна мрежичка за набљудување на појавите на дифракција на брановите од микрочестичите.

15.8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОТВРДА НА БРАНОВИТЕ СВОЈСТВА НА МАТЕРИЈАТА

Видовме дека де Бролиевската бранова должина на брзите електрони е во спектралното подрачје на рендгенските зраци затоа експерименталната потврда за брановите својства на микрочестиците, како и кај рендгенските зраци, треба да се бара во нивната интерференција и дифракција од кристали.

Хипотезата на Луј де Броли, дека секоја микрочестица, покрај корпускуларни, во одредени услови манифестира и бранови својства, експериментално е потврдена во 1927 год. од американските физичари К.Ц.Девисон и Л.Х.Цермер. Тие ја набљудувале дифракционата слика при пропуштање на тесен моноенергетски сноп од брзи електрони врз монокристал од никел. Познато е дека дифракционите појави во класичната физика се карактеристични за брановите. Шемата според која Девисон и Цермер го извеле експериментот е прикажана на сл. 1.



Сл. 1. Шема на апаратурата за дифракција на електроните

Тесен сноп на емитираните електрони од вжарената катода К на електронската пушка се насочува под определен агол θ на површината од монокристалот на никел М и се рефлектира од него. Конструкцијата на електронската пушка овозможува електроните што излегуваат од неа да добиваат определена брзина. Електроните расејани од монокристалот

паѓаат во колекторот С, кој се поместува во рамнината во која лежи упадниот и одбиените снопови на електрони. На тој начин колекторот С може да ги регистрира електроните расејани под различни агли во однос на нормалата N на површината од монокристалот. Електроните кои имаат каква било кинетичка енергија ќе се расејуваат под сите можни агли согласно на законите за одбивање на геометриската оптика. Количеството на електроните што паѓаат на колекторот се регистрира според јачината на струјата во осетливиот галванометар G. Јачината на струјата се менува зависно од промената на енергијата на електроните и од аголот на нивното расејување. Било покажано дека при кинетичка енергија на упадните електрони $E = 54 \text{ eV}$, т.е. при забрзување на упадните електрони во поле со потенцијална разлика $U = 54 \text{ V}$ и агол на паѓање $\theta = 65^\circ$, се регистрира максимален број на одбиени електрони, односно била регистрирана максимална јачина на струја во галванометарот G.

К. Девисон и Л.Цермер добиените резултати ги објасниле врз основа на Брег-Вулфовата релација за дифракција на рендгенските зраци од кристали:

$$m\lambda = 2d \sin \theta, \quad (1)$$

каде што d е константата на кристалната решетка од никел - растојание меѓу две кристалографски рамнини $d = 0,091 \text{ nm}$ и $m = 1, 2, 3, \dots$ - ред на дифракционите максимуми.

За Де Бролиевата бранова должина на електроните, при $U = 54 \text{ V}$ по релацијата (6), се добива $\lambda = 0,167 \text{ nm}$. По релацијата на Брег-Вулф (1) за $m = 1$ добиваме $\lambda = 2 \cdot 0,091 \cdot \sin 65^\circ$;

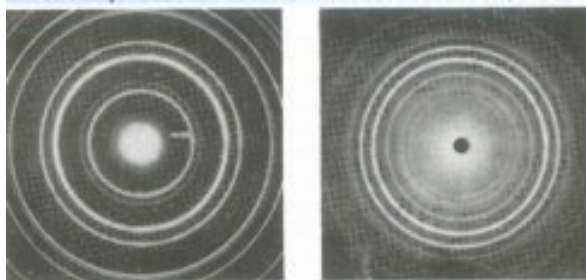
$$\lambda = 2 \cdot 0,091 \cdot 0,866 = 0,165 \text{ nm}.$$

Овој резултат се совпаѓа со брановата должина која се добива по Де Бролиевата релација (6). Слични резултати биле добиени и во ред други експерименти и на тој начин била потврдена дуалната природа на електронот.

После овие експерименти биле направени слични и со други честици кои ја потврдиле Де Бролиевата хипотеза. Така 1929 година И. Естерман и О. Штерн добиле дифракциона слика со помош на молекули од хелиум и водород.

15. Зрачења

За испитување на структурата на супстанциите, покрај рендгенструктурната анализа (која ги користи рендгенските зраци), широко се применува и методот на електронографија. Овој метод се заснова на дифракција на електроните при минувањето низ кристален прав или низ тенки метални фолии, кои претставуваат агрегат од микрокристали. Се разбира, меѓу овие ситни кристали ќе има и такви кои во однос на упадниот млаз од електрони ќе бидат ориентирани под таков агол θ кој ја задоволува Брег-Вулфовата релација (7). Сите оние електрони што се рефлектираат под еден ист агол, прават конусна површина чија заедничка оска се поклопува со упадниот млаз на електрони. Според тоа ако на патот од поминатите електрони низ тенката фолија (со дебелина 10^{-5} cm) се постави фотографска плоча, тогаш расејаните (дифрактираните) електрони ќе формираат на фотографската плоча систем од интерферентни прстени, во вид на серија од концентрични кружници. На сл. 2 е прикажан електрограм добиен од кристали на злато.



Сл. 2 Дифракција на: електрони со енергија 600 eV ($\lambda=0,05$ nm) од кристали на злато (лево); б) дифрактограм на рендгенски зраци од кристали на циркониум оксид ($\lambda=0,07$ nm) (десно).

Многу важен факт е дека секој електрон заемодејствува само со едно зрно на фотоемулзијата на негативот. Значи апсорпцијата на електроните во емулзијата се случува на ист начин како апсорпцијата на фотоните од металот при фотоэффектот: во определена точка се апсорбира само цела порција, цела честица. Светлите места на снимката се местата каде што паднале најмногу електрони.

Дифракционите експерименти не само со електрони, но со други микрочестици – протони, неутрони, јони и други, ја потвр-

дуваат исправноста на хипотезата на Де Броли. Така се утврдила симетријата во корпусуларно-брановиот дуализам: не само брановите пројавуваат својства на честици, туку и честиците пројавуваат бранови својства. Се разбира, тоа не значи откажување од моделот за честицата како локализиран објект, којашто зафаќа ограничен дел од просторот.

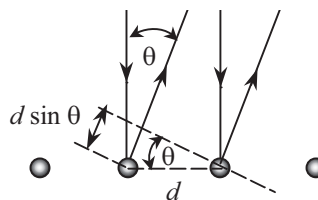
Дифракцијата на честиците објаснета преку Де Бролиевите бранови се смета за експериментална основа на современата квантна механика.

ПРИМЕР 1. Да се определи Де Бролиевата бранова должина на прашичка чија маса е $m=1 \cdot 10^{-10}$ kg, којашто се движи со брзина $v=1$ mm/s.

Решение: Брановата должина е

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{1 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{-3}} \text{ m} = 6,626 \cdot 10^{-21} \text{ m}.$$

Добиената вредност е околу еден милион помала од радиусот на атомското јадро. Затоа не постои дифракциона мрежичка, со која може да се набљудува дифракција на слични прашички.



Сл. 3.

ПРИМЕР 2. Електрони со мала кинетичка енергија $E_k=100$ eV удираат нормално на површината од тврдо тело (сл. 3). Притоа, тие заемодејствуваат само со атомите од површинскиот слој. Ако најмалиот агол, под кој дифракциониот максимум се појавува е 24° , да се определи растојанието d меѓу атомите во површината на тврдото тело.

Решение: За да биде задоволен условот за максимум, при интерференција на дифрактираните Де Бролиевите бранови на електроните од површината на тврдото тело, релацијата (7) гласи: $m\lambda = d \sin \theta$. За првиот дифракционен максимум $m=1$, и $\lambda = d \sin \theta$;

Врската помеѓу брановата должина λ на Де Бролиевите бранови за електроните и нивната нерелативистичка кинетичка енергија дадена со релацијата (4). По внесување на вредностите во (4) за $h=6,626 \cdot 10^{-34}$ Js; $E=100$ eV; $m=9,11 \cdot 10^{-31}$ kg; $1 \text{ eV}=1.6 \cdot 10^{-19}$ J, се добива:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = 0,123 \text{ nm}.$$

Растојанието меѓу атомите на површината од тврдото тело е

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta} = \frac{0,123 \text{ nm}}{\sin 24^\circ} = \frac{0,123 \text{ nm}}{0,41} = 0,30 \text{ nm}$$

ПРИМЕР 3. Колкава е Де Бролиевата бранова должина за електрон со енергија $E=1$ MeV?

Решение: Енергијата на електронот во овој случај е двапати поголема од неговата енергија во мирување $E_0=m_0 c^2 = 0,5$ MeV. Во овој случај важи релативистичката релација за врската меѓу импулсот и енергијата.

$$E = \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}; \quad E^2 = p^2 + m_0^2 c^2;$$

$$p^2 = \frac{E^2}{c^2} - E_0^2; \quad p = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - E_0^2}$$

По релацијата (1) се добива:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{E^2 - E_0^2}};$$

$$\lambda = 1,65 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 0,00165 \text{ nm}$$

Брановата должина на Де Бролиевите бранови за релативистички електрони е сто пати помала од димензиите на атомот, но сè уште е 1000 пати поголема од димензиите на атомското јадро.

ПРАШАЊА И ЗАДАЧИ

1. Како гласи Де Бролиевата хипотеза за дуалната природа на честиците?

2. Објасни ја Де Бролиевата релација. Која е нејзината смисла?

Побарајте ги следете сајтовите за новости:

<http://www.iop.org>

<http://www.nobelprize.org>

15.9. ХАЈЗЕНБЕРГОВ ПРИНЦИП

Знаеме дека секое мерење е поврзано со грешки, чии големини зависат од точноста на инструментот за мерење.

Во класичната физика, којашто ги проучува макроскопските тела, се претпоставува дека **во принцип сите физички величини може да се измерат со произволно голема точност.** Меѓутоа, при проучувањето на микросистемите состојбата не е таква. Таа разлика се должи на два фактора: на корпускуларно-брановиот дуализам на тие системи и на неизбежното заемнодејство меѓу набљудуваниот систем и апаратот со којшто го вршиме мерењето.

Вториот од овие фактори е присутен и во класичната физика, но таму неговото влијание е занемарливо мало. Навистина, во експериментот кога го фотографираме паѓањето на дадено топче и по фотографиите ја определуваме неговата местоположба, ние во стварност ја регистрираме одбиената светлина од топчето. Притоа воопшто не водиме сметка дека пред тоа светлината заемнодејствувала со топчето – се одбила од неговата површина, му предала определена енергија и импулс, и како последица на тоа телото го променило своето движење. Но таа промена е толку мала, така што се занемарува.

Во светот на микросистемите ситуацијата е многу поразлична.

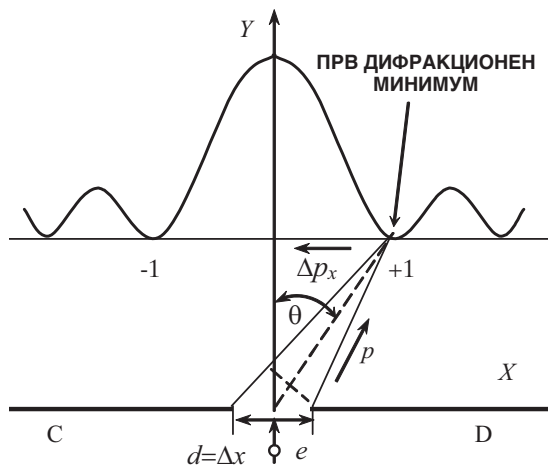
Видовме дека електронот како честица во низа случаи пројавува и бранови својства, односно приордата на микрочестиците (атоми, молекули, електрони) е слична како и кај светлината, сложена: корпускуларно бранова (дуална).

Познато ни е од класичната (Њутнова) механика дека состојбата на класичната (нерелативистичка) честица можеме да ја опишеме со помош на координатите $\vec{r}(x, y, z)$ и импулсот (брзината) на честицата $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$.

Овде е битно да истакнеме дека во класичната механика, грешките при определувањето на координатата Δx (на пример, X – координатата) и импулсот Δp_x , меѓусебно се независни и зависат само од експерименталните услови. Тоа значи дека во идеални експериментални услови може да биде $\Delta x=0$ и $\Delta p=0$

(слично важи и за останатите координати). Едноставно кажано, во класичната механика е можно истовремено, во секој момент, точно да се определи координатата и импулсот на честичката.

Во квантната механика вообичаено се поставува прашањето: како можеме да ја опишеме состојбата на микросистемот?



Сл. 1.

Да разгледаме електрон што се движи во правец на y -оската и паѓа на препрека со една пукнатина (слично како и кај фотоните дифракционата слика не зависи од бројот на честичките во упадниот сноп, таа се добива и кога електроните паѓаат поединечно). Ќе сметаме дека електронот заемнодејствува со пукнатината при поминувањето низ неа. Пред препреката состојбата на електронот се карактеризира со точно определена вредност на импулсот $p = p_y$, при што постои целосна негова делокализација. За да се определи положбата на некој електрон на x -оската, се поставува препреката CD која има пукнатина со ширина d (сл.1). Ако електронот помине низ пукнатината, бидејќи не може да се определи низ која точка од пукнатината поминал, тогаш неговата координата x е определена со неточност Δx . Нека ширината на пукнатината е од исти ред на големина или помала од брановата должина на де Бролиевските бранови. Во тој случај, при премин низ пукнатината, де Брол-

иевскиот рамен бран, со кој се прикажува движењето на слободниот електрон, претрпува дифракција.

Со намалување на ширината на пукнатината се намалува и неопределеноста на координатата x , но затоа се шири централниот дифракционен максимум, па правецот на движење на електронот, а со тоа и нивниот импулс станува понеопределен. На тој начин, промената на импулсот Δp_x , во правецот на x -оската што може да се припише на електронот што минува низ пукнатината, ќе биде:

$$\Delta p_x \approx p \sin \theta \approx \frac{h}{\lambda} \sin \theta \quad (1)$$

Ако неопределеноста на положбата, како што кажавме, е $\Delta x = d$, тогаш производот на неопределеноста е:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx d \frac{h}{\lambda} \sin \theta. \quad (2)$$

Според теоријата за дифракција на пукнатина, условот при кој ќе се појават дифракционите минимуми гласи:

$$\sin \theta = \pm m \frac{\lambda}{d}, \quad (3)$$

Ако се земе дека на првиот дифракционен минимум одговара за $m=1$, со замена на (2) во релацијата (3) може да се напише:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h \quad (4)$$

Сега може да ја напишеме познатата Хајзенбергова релација за неопределеност за која било координата и неопределеноста во компонентата на соодветниот импулс:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h, \quad (5)$$

Следува дека **производот од неопределеноста во координата и неопределеноста во соодветниот импулс не може да биде помал од Планковата константа.**

Најбитното што произлегува од Хајзенберговата релација за неопределеноста е тоа што неопределеноста за координатата Δx и

15. Зрачења

импулсот Δp меѓусебно се зависни за честиците од микросветот. Доколку е помала вредноста за Δx (т.е. што поточно ја определеме положбата на честицата), толку е поголемо Δp_x (т.е. грешката при определувањето на импулсот p_x на честицата станува поголема) и, обратно.

Имено, може да заклучиме едновременно не е можно зголемување на точноста на мерењето на двете физички величини, поради што не е можно по желба да се намали производот на несигурноста на координатата и импулсот.

Релацијата (3) е математички приказ на **Хајзенберговиот принцип на несигурност** или, како што е и понекогаш наречен, **принцип на неопределеност**. Овој битен принцип за несигурност за првпат беше искажан од германскиот физичар В. Хајзенберг 1927 година. Од релацијата (5) следува дека производот може да се намали само до големина од редот на Планковата константа.

Релацијата (5) важи за која било координата и соодветниот импулс, така имаме

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar; \quad \Delta y \Delta p_y \geq \hbar; \quad \Delta z \Delta p_z \geq \hbar \quad (6)$$

Овие релации ја претставуваат **Хајзенберговата релација на неопределеноста**. Од неа следува: **производот од неопределеноста на дадената координата и соодветниот импулс не може да биде помал од Планковата константа**.

Да се вратиме на хипотезата на Де Броли. Според неа на еден слободен електрон со импулс p и Де Бролиев бран со определена бранова должина, вредноста на импулсот е точно определена - неговата неопределеност е нула, но положбата на таков електрон е наполно неопределена – Де Бролиевиот бран го зазема целото пространство и има една иста амплитуда насекаде.

Хајзенберговата релација на неопределеноста вреди и за такви величини чиј производ има димензии на Планковата константа \hbar .

ПРИМЕР 1. Електронот со маса $m=9,11 \cdot 10^{-31}$ kg се движи праволиниски со константна брзина $v=1,10 \cdot 10^6$ m/s која може да биде измерена со точност 0,10%. Со која максимална точност може да биде едновременно измерена неговата

положба?

Решение: Импулсот на електронот е:

$$p = mv = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 1,10 \cdot 10^6 \text{ m/s} = 1,00 \cdot 10^{-24} \text{ kgm/s.}$$

Точност во брзината е $0,10\% = 10^{-3}$

Неопределеноста во импулсот е:

$$\Delta p = 1,00 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{-3} \text{ kgm/s} = 1 \cdot 10^{-27} \text{ kgm/s.}$$

По Хајзенберговата релација, неопределеноста на положбата е:

$$\Delta x = \frac{\hbar}{\Delta p} = \frac{1,06 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{1 \cdot 10^{-27} \text{ kgm/s}} = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 110 \text{ nm}$$

Добиената вредност е околу 1000 пати поголема од дијаметарот на атомот.

ПРАШАЊА И ЗАДАЧИ

1. Дали во класичната механика е можно истовремено, во секој момент, да се определи координатата и импулсот на честицата?

2. Положбата на еден електрон е определена со точност $1,2 \cdot 10^{-8}$ m. Со каква точност може да се определи неговата брзина? Масата на електронот е $m=9,11 \cdot 10^{-31}$ kg.

(Одговор: $\Delta v = 9600$ m/s)

3. Мерењето на брзината на протонот дава резултат со точност $(6,370 \pm 0,015) \cdot 10^5$ m/s. Со каква максимална точност може да се измери местоположбата на протонот? Масата на протонот е $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg.

(Одговор: $\Delta x = 4 \cdot 10^{11}$ m)

4. Електрон се наоѓа во возбудена состојба во атом за време $\Delta t = 10^{-8}$ s. Колкава е минималната неопределеност на енергијата ΔE во таа состојба?

(Одговор: $\Delta E = 0,7 \cdot 10^{-7}$ eV)

15.10. ТЕРМОГРАФИЈА И НЕЈЗИНАТА ПРИМЕНА

Секое тело, без разлика на неговата природа, на температура поголема од апсолутната нула, емитува топлинско зрачење, електромагнетни бранови, во континуиран спектрален интервал од неколку нанометри до околу 40 000 nm. Разбирливо е дека на пониска температура брановите имаат поголема бранова должина, а на повисоките помала.

Секое тело, што е способно за топлинско зрачење, истовремено е способно и за апсорпција на енергија што се емитува од околината.

Топлинското зрачење или пренесувањето на топлина со зрачење претставува електромагнетен процес. Како што знаеме во спектарот на топлинското зрачење почнувајќи од крајниот дел на црвената светлина т.е. 760 nm кон поголемите бранови должини, невидливи за човечкото око, се протега инфрацрвениот дел на спектарот на електромагнетно зрачење. Имено, областа на инфрацрвеното зрачење се протега од $\lambda_1=760$ nm до $\lambda_2=14\ 000$ nm.

Секое тело што зрачи на дадена температура T се карактеризира со своја **емисиона способност**. W Тоа е вкупното количество енергија (E) што телото ја зрачи во единица време (т.е. моќноста на зрачењето P) низ единица површина нормална на правецот на просвтање на зраците. Според тоа:

$$W_T = \frac{E}{tS} = \frac{P}{S},$$

каде што t е времето на емитување, S е плоштината на површината низ која телото зрачи. Единицата за емисионата способност во SI е $W \cdot m^{-2}$.

Друга величина, која ги карактеризира телата при термодинамичката рамнотежа со топлинското зрачење, е нивната **апсорпциона способност**. Секое тело кое при било која температура наполно ја апсорбира целата енергија од електромагнетните бранови што паѓаат на него независно од нивната бранова должина, се нарекува **апсолутно црно тело**.

Во природата апсолутно црни тела не постојат. Сепак некои од нив во ограничен интер-

вал на бранови должини се блиски по своите својства кон апсолутното црно тело. На пример, само во интервалот на бранови должини од видливата светлина, телата покриени со слој од саѓи или со слој од платинско црно, имаат апсорпциона способност блиска до единица.

Според Стефан - Болцман - овиот закон (види 15.1) вкупната емисиона способност на апсолутното црно тело W_0 е пропорционална на четвртиот степен на неговата апсолутна температура T

$$W_0 = \sigma T^4. \quad (1)$$

Во равенката (1) коефициентот на пропорционалност σ е **Стефан-Болцманова константа**:

$$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}. \quad (2)$$

Емисионата способност на било кое реално тело е помала од емисионата способност на апсолутно црното тело при таа температура.

Емисиона способност за реалното тело изнесува:

$$W = eW_0 = \sigma T^4 \quad (3)$$

Бездимензионалниот коефициент e е наречен **емисивност** на телото и зависи од температурата на телото, неговиот материјал и состојбата на површината. За апсолутното црно тело $e=1$. За непрозрачните тела, кои ниту зрачат ниту апсорбираат електромагнетното зрачење, туку наполно го рефлектираат зрачењето што паѓа, емисивноста е $e=0$.

Реалните тела за сите бранови должини имаат $e < 1$, затоа и нивната вкупна емисиона способност е помала од вкупната емисиона способност за апсолутно црно тело.

Телото зрачи топлина без разлика на евентуалната разлика во температурата меѓу него и околината. Кога околината има еднаква температура со телото, тоа зрачи толку колку што и апсорбира, па не се забележува разлика во температурата. Меѓутоа, кога температурата T на телото е поголема од температурата T_S на околината телото зрачи повеќе отколку што прима. Позитивниот биланс на енергијата што ја зрачи телото во единица време од единица површина е:

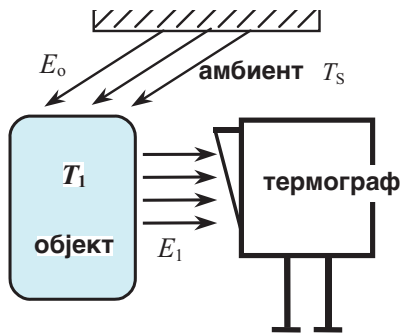
$$P_{tot} = S\sigma eT^4 - S\sigma eT_s^4 = S\sigma e(T^4 - T_s^4) \quad (4)$$

Регистрирање на температурата користејќи го Шефан-Болцмановиот при детекцијата на инфрацрвеното зрачење е **термографија**. Со термографијата истовремено се регистрира температура од голем број точки и нивната промена во текот на времето. Притоа може да се регистрираат мали разлики во температурата ($\Delta T \approx 0,03 \text{ K}$).

Инфрацрвеното зрачење на телата може да се користи за нивно откривање и мерење на температурата. Во 1959 година Р.Н. Лавсон, со термограм прв ја забележал зголемената температура од туморот на дојката. За развитокот на детекцијата на зрачењето од кожата придонесуваат и воените организации кои инфрацрвеното зрачење го користат во лоцирање на објекти за воени цели.

Промените во температурата на кожата, кои обично може да бидат и до неколку степени, покажуваат разлики во крвотокот и ткивата под кожата, и со тоа носат дијагностички информации. На пример, температурата на страничната градна артерија е $34 \text{ }^\circ\text{C}$, површинските вени имаат температура $35 \text{ }^\circ\text{C}$, туморот на дојката $36,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Освен тоа термографијата се користи за дијагностицирање на голем број заболувања.



Сл. 1. Шематски приказ на апаратурата за добивање на термограм

Обично телото на кое се прави термограмот се наоѓа во нормални услови се добива температурна распределба со точност од 1 %.



Сл. 2. Термограм на тумор на дојката

Целокупната температурна дистрибуција на одредено видно поле се регистрира со фотографија- **термограм**, или или на монитор - **термовизија**. На сл. 2 е прикажан термограм на тумор на дојката.

Како детектори на инфрацрвеното зрачење не се користат филмови (тие се осетливи на бранови должини помали од 900 nm), туку термистори, фотодиоди и др. За фотодиодите обично се користи InSb или HgCdTe .

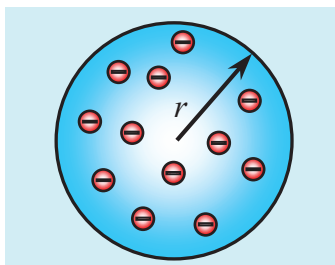
ПРИМЕР 1. Со користење на равенката (4) може да се определи ослободената топлина со зрачење во единица време од човекот. При претпоставка дека температурата на кожата изнесува $33 \text{ }^\circ\text{C} = 306 \text{ K}$, а температурата на околината $20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$, за ослободената топлина во единица време со зрачење се добива дека изнесува:

$$P_{tot} = 1,73 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (306^4 - 293^4) = 137 \text{ W},$$

каде што $e \approx 1$, кај возрасен човек површината на кожата е земено дека изнесува $S = 1,73 \text{ m}^2$. Ова покажува дека голото тело, чија температура е $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (293 K), зрачи повеќе топлина отколку што се ослободува при метаболичките процеси (ослободената топлина во единица време со метаболичките процеси изнесува околу 100 W). При овие услови, за да се одржи телесната температура, иако температурата на воздухот е на задоволително ниво, човекот треба да има зголемена физичка активност.

16.1. МОДЕЛИ НА АТОМОТ

До почетокот на XX, врз основа на многубројни експерименти се насобраа голем број сознанија дека атомот не е најмалата неделива честица на материјата и дека тој се состои од позитивно и негативно наелектризирани честици. На тоа укажуваат откријата како што се: катодните и каналните зраци како снопови од позитивни и негативни честици, јонизацијата, природната радиоактивност, рендгенските зраци, термоелектронската емисија, фотоелектричниот ефект. Затоа неминовно се поставува и прашањето: *Каква е градбата на самиот атом?*



Сл. 1. Модел на атомот според Томсон

Со цел да се определат физичките карактеристики на атомот (големината, структурата, полнежот, енергијата) и неговата градба изгледот на атомот се прикажува со помош на модели.

Еден од првите позабележани модели е *Томсоновиот модел на атомот* (сл.1), предложен во 1903 год од Ј. Томсон. Согласно со овој модел, атомот е сфера од позитивното количество електричество во која се расфрлени негативните електрони, слично како суво грозје во пудинг.

Според овој модел, електроните осцилираат околу своите рамнотежни положби. Со цел да се објасни механизмот на емисија на електромагнетното зрачење од страна на атомот, атомот се третира како линеарен хармониски осцилатор. Со овој модел може да се објасни електричното празнење низ гасовите, електролизата и др.

Меѓутоа, цврсти докази во расветлувањето на структурата на атомот се добиени со експериментите на Е. Радерфорд.

Планетарен модел на атомот. Врз основа на експерименталните резултати добие-

ни при расејување на α -честици (двојно јонизирани атоми на хелиум) од тенки ливчиња од злато, поткрепени со теориските пресметувања, Е. Радерфорд во 1911 година го предложил првиот експериментален модел на атомот. Во литературата овој модел на атомот се сретнува под името: *планетарен модел*, јадрен (*нуклеарен*) *модел на атомот* (бидејќи од него првпат се споменува атомското јадро).

Е. Радерфорд и неговите соработници Х. Гајгер и Е. Марсден, со цел да ја проверат распределбата на позитивниот полнеж во атомот ги бројат расејаните α -честиците од тенки ливчиња злато, односно сцинтилациите (светкања) кои ги создаваат α -честиците на еден луминисцентен екран. Од експериментите ги изведуваат следниве заклучоци:

- најголемиот број α -честици поминуваат низ ливчето од злато без отклонување. Тоа значи дека во атомите има големи празнини;
- многу е мал бројот на α -честиците кои при минувањето низ тенкото ливче се отклонуваат под агол од 90° или поголеми агли. Ваквото однесување е поврзано со просторниот распоред на електричните полнежи на атомот.

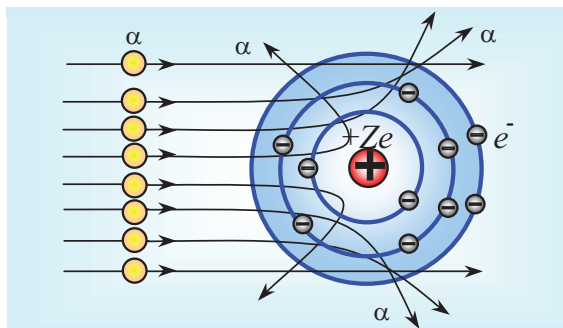
Нема сомнение дека промената на правецот на движењето на α -честиците е резултат на нивното заемнодејство со позитивните електрични полнежи во атомот.

Врз основа на експерименталните резултати, Е. Радерфорд дошол до сознание дека секој атом се состои од позитивно наелектризирано јадро, чиј полнеж е Ze (Z - реден број на елементот во Менделеевиот периоден систем, e - елементарниот електричен полнеж), а по затворени орбити се движат електроните,

Ако електроните влегуваат во составот на атомите, а атомот е електронеутрален, следува заклучокот дека *позитивното количество електричество во атомот треба да е еднакво со негативното количество електричество*, т.е. околу јадрото кружат Z електрони.

Според пресметките, радиусот на атомското јадро е $\sim 10^{-15}$ m (атомот има радиус $\sim 10^{-10}$ m). Бидејќи е мала веројатноста α -честиците на својот пат да го погодат малото атомско јадро (слично како да погодите оловни сачми во голем куп сено), најголемиот дел поминуваат низ тенкото ливче. Масата на електро-

ните претставува сосема мал дел од масата на јадрото. Тоа значи, може да се земе дека целокупната маса на атомот е сконцентрирана во неговото јадро.



Сл. 2. Патеците на расејаните α -честици при минување покрај еден од атомите на тенко метално ливче од злато.

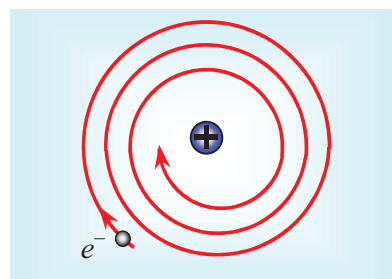
Според законите на класичната физика, Радерфордовиот модел на атомот може да биде стабилен само кога електронот со маса m_e и полнеж e се движи околу јадрото по кружни патека со радиус r . Центрипеталното забрзување што го има електронот е насочено кон центарот на кружницата, јадрото и електронот заемнодејствуваат со Кулоновата сила, така што Вториот Њутнов закон може да се запише:

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2}. \quad (1)$$

каде што v е линиската брзина на електронот; ϵ_0 е релативна диелектричната константа на вакуум, Ze е електричниот полнеж на јадрото. Во последната равенка двете непознати, радиусот r и линиската брзина v , може да имаат бесконечно многу вредности, односно r и v се менуваат континуирано, така што при премин на електронот од една на друга орбита може да се зрачи било која енергија, т.е. спектрите на атомите би требало да бидат континуирани. Но реално, експериментите покажуваат дека атомите имаат линиски спектри карактеристични за секој елемент.

Според законите на класичната електродинамика, електронот, движејќи се забрзано,

ќе мора да емитува електромагнетни бранови, а со тоа се намалува и неговата енергија. При губење на енергијата, електронот не би можел да се движи по орбита со константен радиус, така што радиусот постепено ќе се намалува и електронот би требало да падне врз атомското јадро, што противречи на опитите (сл. 3).



Сл. 3

Кога електронот би се приближувал кон атомското јадро ќе се зголемува бројот на завртувањата што ги прави електронот за единица време. Согласно класичните закони, треба континуирано да се зголемува и фреквенцијата на емитуваното електромагнетно зрачење.

Независно од тоа што моделот на Радерфорд е чекор напред во врска со идејата за градбата на атомот, сепак така замислениот модел има повеќе недостатоци. Тој не можел да се вклопи во рамките на класичната физика. Претпоставката за движење на електроните по кружни орбити Радерфорд ја дал само под таков услов тие може да се наоѓаат на определени растојанија од атомското јадро. Кога електроните би мирувале, би биле привлечени од јадрото, а со тоа атомот би престанал да постои како таков.

Иако според Радерфордовиот модел на атомот може да се оствари некоја стабилност на атомот, останале многу прашања на кои со овој модел не може да се даде одговор: со него не можеше да се објасни добивањето на линиските спектри, како и сите други појави во врска со емисијата и апсорпцијата на електромагнетното зрачење.

Овие противречности јасно покажуваат дека законите за микросветот не се исти со оние што важат за макросветот. Сето ова го поттикнува данскиот физичар Н.Бор во 1913 година радикално да отстапи од законите на класичната физика.

16.2. БОРОВ МОДЕЛ НА АТОМОТ

Н. Бор ја задржува основната идеја за планетарен модел на атомот, но во него воведува квантување. При формулирање на моделот Бор се раководи од квантните претстави за емисија и апсорпција на зрачењето, предложени од Планк и Ајнштајн но воведува и определени претпоставки кои немаат основа во класичната физика.

Боровата теорија се применува не само на најпростиот атом - атомот на водородот, но и на *водородно слични атоми* кои се состојат од атомско јадро со електричен полнеж Ze и еден електрон околу јадрото. Такви системи се јоните на He^+ , Li^{2+} , Be^{3+} и други.

Во основа на Боровата теорија се следниве квантни постулати:

Прв Борев постулат (постулат за стационарните состојби): од бесконечниот број електронски орбити, кои се можни според класичната физика, постојат само строго определени орбити со определени енергии.

Електронот кога се движи по стационарните орбити не емитува електромагнетно зрачење, без разлика што се движи забрзано. Атомот, чии електрони се во стационарните орбити, е стабилен. Таквите состојби на атомот се независни од времето и се наречени **стационарни состојби**,

Втор Борев постулат (правило за квантување на орбитите): постојат само оние стационарни орбити на електронот за кои моментот на импулсот на електронот, кој е рамен на производ од неговиот импулс $p=mv$ и радиус r е квантувана величина, т.е. добива само определени дискретни вредности:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad n=1, 2, 3, \dots (2)$$

каде што m_e е масата на електронот, v_n е брзината по n -та орбита со радиус r_n , h е Планковата константа, ($h/2\pi = \hbar$ - се чита ха прецртано), n е цел позитивен број подоцна наречен **главен квантен број**,

Трет Борев постулат (правило за

фреквенциите): при премин на атомот од една стационарна состојба со енергија E_n во друга стационарна состојба со енергија E_m тој емитува или апсорбира еден квант енергија hf , така што тој квант е еднаков на разликата на енергијата од овие две состојби.

При $E_n > E_m$ атомот емитува фотон со енергија

$$hf_{nm} = E_n - E_m, \quad (3)$$

Во оваа формула f_{nm} е фреквенција на емитуваниот фотон или, како уште се вели **фреквенција на преминот** од состојба n во состојба m . Ваквите премини се викаат **квантни премини**.

За да премине атомот од состојба со помала енергија E_m во состојба со поголема енергија E_n потребно е тој да апсорбира фотон со енергија $hf_{mn} = E_n - E_m$.

Боровата теорија лесно и достапно го опишува движењето на електроните околу атомското јадро и емисијата и апсорпцијата на енергијата кај атомите. Сепак, насобраните експериментални факти, особено кај атомите со сложена структура, не можеле да се објаснат со Боровата теорија. Една од основните причини за неуспехот на Боровата теорија е тоа што таа не е ниту доследно квантна, ниту доследно класична; од една страна се применуваат правилата за квантување, а од друга страна се смета дека движењето на електронот се покорува на класичните закони.

Прашања и задачи

1. Зошто се воведуваат моделите на атомот?
2. Кои својства на атомот може да се објаснат со планетарниот модел?
3. Дали законите на класичната физика важат и за микросветот?
4. Како Радерфорд ја објаснува стабилноста на атомот?
2. Кои се недостатоците на Радерфордовиот модел на атомот?
5. Како гласат Боровите постулати?

16.3. БРАНОВ МОДЕЛ НА АТОМОТ

На идејата за брановата природа на материјата де Броли доаѓа со цел да ги објасни стационарните состојби на атомот. Според де Броли стационарните состојби на атомот се резултат од брановата природа на материјата. Иако де Бролиевскиот бран не смее да се идентификува со некаков класичен бран, формално вториот Боров постулат може да се добие од условот според кој на секоја стационарна патека се сместени цел број де Бролиевски бранови должини (услов за формирање на стојни бранови). По сите други нестационарни патеки доаѓа до поништување на брановите поради нивната интерференција.

Значи, постоењето на стојни бранови е можно само на орбита $2\pi r_n$ на која има цел број бранови должини:

$$2\pi r_n = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

каде што r_n е радиусот на n -тата орбита. Според тоа, брановата должина на можните бранови е:

$$\lambda = \frac{h}{m_e v_n}. \quad (2)$$

каде што m_e е масата на електронот, v_n е неговата брзина и r_n радиусот на орбитата, n е цел број.

Последица од дисконтинуираност на брановата должина е и дисконтинуираноста на моментот на импулсот. Имајќи ја предвид релација (2), се добива:

$$2\pi r_n = n \frac{h}{m_e v}. \quad (3)$$

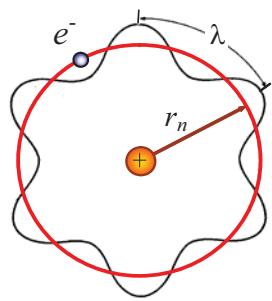
Односно, условот за квантување на моментот на импулсот гласи:

$$m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad (4)$$

што претставува идентичен облик на вториот Боров постулат кој сега има некакво физичко значење. Оваа груба интерпретација на стационарните состојби го означи и почетокот на строгата квантна механика со која се успеа природно да се вклопат сите тешкотии сврзани со однесувањето на микрочестиците.

Планк, Ајнштајн и Бор покажале дека принципот за непрекинатост е нарушен во светот на микрочестиците. Меѓутоа, признавајќи го принципот за квантување, електронот според Бор, сепак се движи по класична орбита.

Иако де Броли една хипотеза заменува со друга новата хипотеза – хипотезата за бранови својства на материјата е проширување на двојната природа на материјата. Ако електронот се разгледува како бран поимот "траекторија" е бесмислен, бидејќи за бранот не постои просторна локација, а според тоа и траекторија.



Сл. 1. На стационарната орбита со радиус r_n ($n=6$) се сместени 6 де Бролиевски бранови должини.

Но како во тој случај може да се опишат квантните состојби на тој систем?

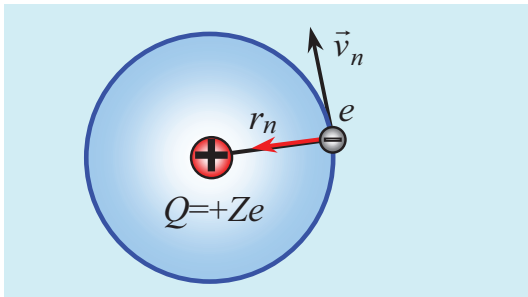
Одговорот на ова прашање се содржи во трудовите на Шредингер, Хајзенберг, Паули, Дирак, Борн и др. Може да кажеме дека последица на сложената корпускуларно-бранова природа на микрочестиците е и *неможноста за едновремено прецизно мерење на координатата Δx и импулсот Δp на микрочестиците* зададена со Хајзенберговата релација

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h \quad (5)$$

Неможноста за едновремено прецизно мерење на координатата и импулсот придонесуваат за неопределеност на траекторијата на микрочестиците. Тоа значи дека *во квантна та механика класичниот поим траекторија (орбита), кога се разгледува движењето на електронот во атомарни размери, го губи своето првобитно значење*. Така, согласно квантната механика, наместо за траектории по кои кружат електроните, се зборува за облак од веројатност.

16.4. БОРОВ МОДЕЛ НА АТОМОТ И ОБЈАСНУВАЊЕ НА СПЕКТРИТЕ

За објаснување на спектрите најпрво треба да се определат енергијата на атомот. Дали е можно со користење на Боровите постулати да ги определеме радиусите на стационарните орбити, линиската брзина на електроните и енергијата на водородниот атом?



Сл.1.

Да се потсетиме според овој модел, електронот околу атомското јадро на водородот и јоните слични со него се движат по стационарни орбити определени со два условия: еден класичен и еден квантен. Нека претпоставиме дека постои атом составен од јадро со полнеж Ze и еден електрон (сл.1). При рамномерното движење на електронот, по n -та стационарна орбита со радиус r_n е задоволен класичниот услов:

$$\frac{m_e v_n^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r_n^2}, \quad (1)$$

каде што m_e е масата на електронот, v_n е неговата линиска брзина, ϵ_0 е диелектричната константа на вакуумот.

Дозволените кружни орбити на електронот се определени со квантниот услов, даден со вториот Боров постулат:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}. \quad (2)$$

Бидејќи во равенките (1) и (2) постојат само две непознати величини, можно е од нив да се определат брзината v_n и радиусот r_n . Од

равенката (2) се добива:

$$v_n = \frac{nh}{2\pi m_e r_n}; \quad n = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Ако равенката (3) се квадрира и се внесе во (1), за радиусот на n -тата стационарна орбита се добива:

$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{Ze^2 m_e \pi}. \quad (4)$$

За атомот на водородот ($Z=1$) првата стационарна орбита ($n=1$) има најмал радиус. Тој изнесува:

$$a_0 = r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{e^2 m_e \pi}. \quad (5)$$

Величината a_0 е наречена **Боров радиус**. Според Боровиот модел, електронот кај атомот на водородот може да се движи по кружни орбити само со определени радиуси. Радиусите r_1, r_2, \dots, r_n претставуваат радиуси на првата, втората, третата, ..., n -тата Борова орбита. Радиусите на стационарните кружни орбити на електронот кај атомот на водородот меѓу себе се однесуваат како квадратите на природните цели броеви:

$$r_1 : r_2 : r_3 : \dots : r_n = 1^2 : 2^2 : 3^2 : 4^2 : \dots : n^2$$

Неминовно е прашањето колкава е големината на првиот, вториот итн, радиуси на електронот во атомот на водородот? Користејќи ја равенката (4) ќе го определеме радиусот на најблиската орбита на атомот на водородот, т.н. Боров радиус a_0 :

$$a_0 = r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{e^2 m_e \pi}$$

$$a_0 = \frac{8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ m}^{-2} \text{ N}^{-1} (6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})^2}{\pi \cdot (1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2 \cdot 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}$$

$$a_0 \approx 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m}.$$

Оваа големина е во согласност со тоа што го

знаеме за големината на радиусот на атомот. Вториот Боров радиус изнесува:

$$r_2 = 2^2 a_0 = 4a_0 = 2,12 \cdot 10^{-10} \text{ m}.$$

Радиусот на стационарните орбити на електронот е величина што тешко може да се измери. Меѓутоа, енергијата што ја апсорбира и емитува атомот експериментално може да се определи. Според првиот Боров постулат електронот се движи по стационарни орбити на кои одговара точно определена енергија. Енергијата E_n на електронот во атомот на водородот е определена со:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2} \quad n = 1, 2, \dots \quad (6)$$

Равенката (6) покажува дека енергијата на електронот (заедно со него и на атомот) е квантувана т.е. допуштени се само некои вредности на енергијата. Негативната вредност за енергијата покажува дека постои сврзан систем: јадрото и електронот формираат атом.

Атомот може да се најде во различни енергетски состојби кои се определуваат со целите (квантни) броеви n . Сè додека постои сврзана состојба помеѓу електронот и јадрото на атомот енергијата прима негативни вредности. **Енергијата на слободен електрон не е квантувана.**

Најмалата можна енергија на атомот одговара на **основната состојба** каде $n=1$. Состојбите со $n>1$ имаат поголема енергија, и тоа се **возбудени состојби на атомот.**

Во равенката (6) внесете ги вредностите за масата и полнежот на електронот, диелектричната константа ε_0 и Планковата константа, ќе се добие енергијата на n -тата Борова орбита која изнесува:

$$E_n = -2,18 \cdot 10^{-18} \frac{1}{n^2} \text{ J} = -13,598 \frac{1}{n^2} \text{ eV}$$

$E_1 = -13,6 \text{ eV}$, $n=1$, на првата Борова орбита,

$E_2 = -\frac{1}{4} 13,6 \text{ eV} = -3,39 \text{ eV}$, $n=2$, на втората.

Имено, енергијата расте со $1/n^2$ (бидејќи е

негативна) и за $n \rightarrow \infty$ тежи кон нула: тогаш електронот го напушта атомот, т.е. атомот се јонизира.

Да истакнеме дека на вкупната енергија што ја има електронот во една од стационарните орбити одговара едно **енергетско ниво** (квантна состојба на атомот). Според тоа, за секоја стационарна орбита на електронот, атомот има точно определено енергетско ниво.

При наголемувањето на n , енергетските нивоа се доближуваат кон една граница, која одговара за вредноста на $n \rightarrow \infty$.

Според третиот Боров постулат, при премин од едно енергетско ниво со енергија E_n на пониско енергетско ниво E_m ($n > m$) се емитува квант со енергија:

$$E_f = hf = E_n - E_m = \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Фреквенцијата f на емитираните фотони - спектрални линии при овој премин на атомите на водородот е:

$$f = \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad m < n \quad (7)$$

Притоа, изразот

$$R = \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^3 c}$$

е познат како Ридбергова константа R . Со замена на бројните вредности на константите: e , h , m_e , c , за Ридберговата константа се добива:

$$R = 1\,097\,373\,1,77 \text{ m}^{-1}.$$

Според тоа, равенката (7) станува:

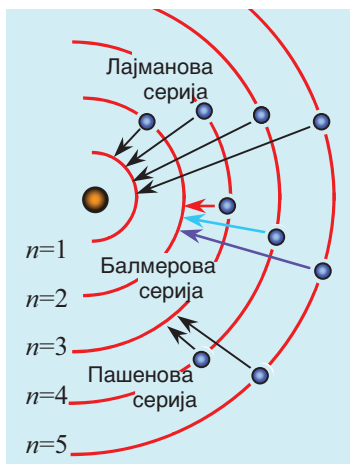
$$f = cR \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad m < n. \quad (8)$$

Пресметаните фреквенции, односно бранови должини, за спектралните линии во спектарот на атомот на водородот, според равенката (8), наполно се сложуваат со експериментално определените вредности. Тоа беше и сигурен доказ што ја потврдуваше исправноста и применливоста на Боровата теорија при објаснување на спектарот на водородот.

16. Физика на атомот

Наведената Борова релација овозможува едноставно графички да се прикаже настанувањето на спектралните линии и закономерноста на спектралните серии кај атомот на водородот.

На сл.2 шематски се прикажани можните кружни орбити на електронот кај атомот на водородот. Стрелките покажуваат од која на која орбита електронот прескокнува. Истовремено секоја стрелка симболизира и една спектрална линија. Овде јасно се гледа дека една спектрална серија ја сочинуваат сите линии што се добиваат при прескокнувањето на електронот од која било подалечна орбита на определена.

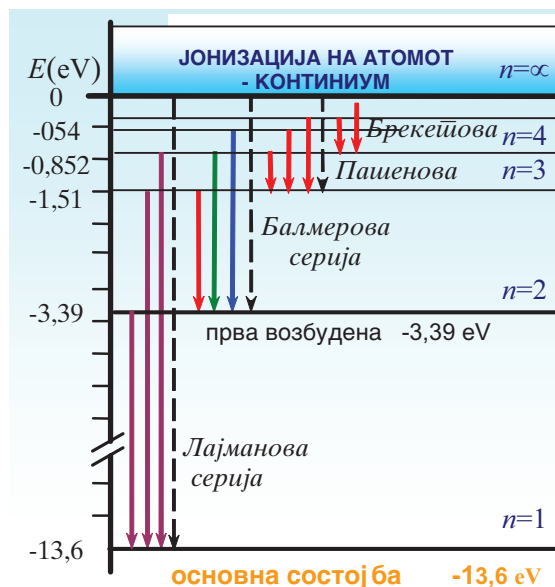


Сл.2.

Шематски приказ на добивањето на спектралните линии и серии во спектарот на водородот многу попрегледно се прикажува преку енергетските нивоа на атомот.

На сл. 3 со хоризонталните линии се прикажани енергетските нивоа на атомот на водородот, т.е. можните енергетски состојби (квантни состојби на атомот на водородот). Хоризонталната линија, означена со $n=1$, ја прикажува најниската енергетска состојба на атомот, односно основната енергетска состојба кога атомот не е возбуден. Најгорната линија, пак, означена со $n=\infty$, ја прикажува границата на дисконтинуираниот енергетски спектар на атомот, односно од таму електронот го напушта атомот и се емитува континуиран спектар. Секоја вертикална отсечка со стрелка симболизира по еден квантен премин на ато-

мот, а истовремено и по една спектрална линија што се појавува при тој премин.



Сл.3. Распоред на енергетските нивоа кај атомот на водородот и можните квантни премини

Кога електронот преминува од која било подалечна орбита ($n=2, 3, 4, \dots$) на првата ($m=1$) се добива *Лајмановата серија*. Таа е во ултравиолетовиот дел од спектарот. Фреквенцијата на спектралните линии се зададени со равенката:

$$f = Rc \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n=2, 3, 4, \dots \quad (9)$$

Балмеровата серија се добива кога електронот прескокнува од која било подалечна ($n=3, 4, 5, \dots$) на втората ($m=2$) орбита. Таа е во видливиот дел на спектарот.

$$f = Rc \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n=3, 4, 5, \dots \quad (10)$$

Слично со предходните и Пашеновата серија се добива кога електронот прескокнува од која било подалечна ($n=4, 5, 6, \dots$) на третата ($m=3$) орбита. Таа е во инфрацрвениот дел на спектарот. Во инфрацрвениот дел од спекта-

рот се и Брекетовата ($m=4$; $n= 5, 6, 7\dots$), и Пфундовата спектрална серија ($m=5$; $n= 6, 7\dots$)

Може да заклучиме дека со Боровиот модел на атомот на едноставен начин може да се објасни спектарот на водородот, но не и на послижените атоми.

ПРИМЕР 1. Колкава минимална енергија треба да апсорбира атомот на водородот за да се јонизира?

Решение. Таа енергија е еднаква со енергијата за "откинување" електрон од n - атомот:

$$E = E_{\infty} - E_1; \text{ каде што } E_1 = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2}; n=1$$

$$E_1 = -\frac{9,11 \cdot 10^{-34} \cdot 1,6^4 \cdot 10^{-76}}{8 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12})^2 \cdot (6,62 \cdot 10^{-34})^2}$$

$$E_1 = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = -13,598 \text{ eV}$$

$$E = 0 - (-13,6 \text{ eV}) = 13,6 \text{ eV.}$$

Истата енергија од 13,6 eV атомот на водородот ја емитува во форма на електромагнетно зрачење кога поминува од јонизирана во неутрална состојба, т.е. кога H^+ - јонот прима еден слободен електрон. Оваа енергија уште се вика **енергија на сврзување** на електрон во атомот.

ПРАШАЊА И ЗАДАЧИ

1. Што е тоа енергетско ниво?
2. Што е тоа спектрална линија? Кои спектрални серии ги има водородот. Како се прикажуваат шематски и како се добиваат?
3. Кога електронот прима негативни вредности на енергијата?
4. Определете ја брзината на електронот на првата Борова орбита и споредете ја со брзината на светлината. (Одговор: $2,19 \cdot 10^6$ m/s)
5. При апсорпција на фотон електронот во атомот на водородот преминува од втората во третата стационарна орбита. Да се определи енергијата и фреквенцијата на фотонот.

(Одговор: 1.88 eV; $1,78 \cdot 10^{14}$ Hz)

Побарајте ја на интернет веб страната :

<http://www.n-t.org/ri/br/sf05.htm>

16.5. ФРАНК - ХЕРЦОВ ОПИТ

Франк-Херцовиот опит е директна експериментална потврда и оправданост на Боровите постулати за постоење на стационарни состојби кај атомот и правилото за фреквенциите. Со овој опит се става крај во сомнежите на квантната хипотеза. Истата 1913 година, кога е поставена и Боровата теорија, германските физичари Ј.Франк и Г.Херц експериментално го потврдија постоењето на дискретните енергетски нивоа кај атомите, а со тоа и исправноста на Боровите постулати. Според Боровата теорија, енергијата се предава во согласност со Планк во определени кванти, а потоа се зрачи во облик на електромагнетни бранови кои имаат одредена бранова должина која може да се мери и да се пресмета. Притоа, атомот поминува од една во друга стационарна состојба.

Ј.Франк и Г.Херц ги проучувале судирите на електроните со атомите на разредена пара или гас. Првиот опит е изведен со атоми на жива, а подоцна се користени и други атоми. При опитот се врши мерење на загубената енергија на електроните при судирот со атомите на живата, а истовремено се набљудува и емисиониот спектар што се појавува.

Судирите на електроните со атомите на живата може да бидат **еластични** и **нееластични**. При еластичниот судир не се менува по големина ниту брзината, ниту енергијата на електроните, туку само правецот на нивното движење. При нееластичниот судир електронот ја предава својата енергија на атомот со кој се судира. Притоа, атомот се возбудува, а по време од околу 10^{-9} s повторно се враќа во својата основна состојба, со емисија на квант на светлина со определена бранова должина која може да се мери при самиот опит.

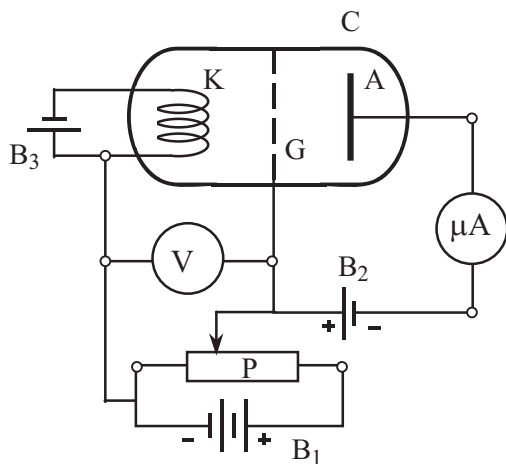
Кај тешките атоми, како што е, на пример, атомот на живата поради силното електростатичко привлекување од страна на јадрото, многу е тешко да се избие електронот од внатрешните слоеви. Енергијата на сврзување на тие електрони е неколку илјади електрон волти. Меѓутоа, кај надворешните (валентните) електрони, е само неколку електрон волти. Во експериментите на Франк и Херц токму валентните електрони земаат учество.

Атомот на живата има еден валентен

електрон чија енергија во основната состојба е $E_0 = -10,42 \text{ eV}$, а енергијата на првото возбудено ниво е $E_1 = -5,59 \text{ eV}$. Ако од некоја причина атомот на живата помине во првата возбудена енергетска состојба, при враќањето во основната состојба се емитува фотон со енергија:

$$hf = E_1 - E_0 = -5,59 - (-10,42) \text{ eV} = 4,83 \text{ eV}.$$

Франк-Херцовиот опит шематски е прикажан на сл. 1. Специјалната стаклена цевка C во која се наоѓаат живини пари е под низок притисок, околу 133 Pa . При овој притисок во цевката има доволен број атоми од жива кои се наоѓаат на големи растојанија еден од друг. Анодата A е под соодветен напон, така што електроните, емитувани со термоелектронската емисија од катодата K , се забрзуваат кон анодата. Пред анодата се наоѓа решетката електрода G . Меѓу катодата K и решетката G е приклучен забрзувачки напон за електроните кој може да се менува со потенциометарот P .

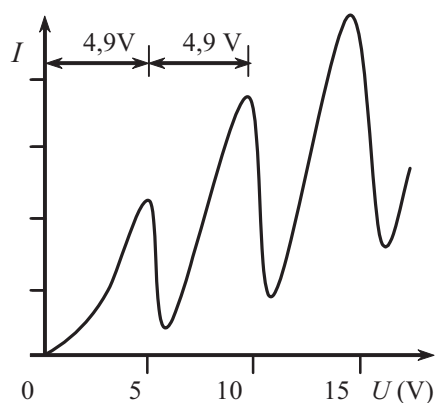


Сл. 1. Шематски приказ на Франк-Херцовиот опит

Решетката G е на нешто попозитивен потенцијал во однос на анодата и ги прифаќа електроните кои загубиле дел од енергијата при нееластичниот судир со атомите на живата. Така микроамперметарот μA ги регистрира само оние електрони кои не претрпеле нееластичен судир. Забрзувачкиот напон U_1 , добиен од батеријата B_1 , со потенциометарот P може да се менува континуирано од нула до околу 30

V . Приложениот закочен напон меѓу решетката G и анодата A од батеријата B_2 , со вредност од околу $0,5 \text{ V}$, во текот на опитот останува константен.

Франк-Херцовиот опит е изведен на следниов начин: при определена температура од вжарената катода, во единица време, се емитува константен број електрони кои под дејство на напонот U_1 се забрзуваат кон решетката. Кога со потенциометарот P постепено се зголемува напонот помеѓу катодата и решетката, се зголемува и кинетичката енергија на електроните, па сè поголем број електрони минуваат низ решетката G и го продолжуваат патот кон анодата A .



Сл. 2.

Како резултат на тоа микроамперметарот μA , како и кај сите термоелектронски уреди, покажува растење на јачината на анодната струја I . Вакво растење на јачината на анодната струја оди сè до напон приближно $4,9 \text{ V}$, односно кинетичка енергија на електроните од $4,86 \text{ eV}$. При овој напон јачината на струјата нагло опаѓа. Резултатите од мерењата графички се прикажани во вид на зависност на јачината на струјата од приложениот напон, (сл.2).

При анализа на кривата, прикажана на сл.2, се гледа дека јачината на струјата за напон од $4,9 \text{ V}$ нагло опаѓа, тоа е првиот минимум. Со понатамошното зголемување на напонот, јачината на струјата повторно расте сè до $9,8 \text{ V}$. При напон од $9,8 \text{ V}$ (или $2 \cdot 4,9 \text{ V}$), јачината на струјата повторно нагло паѓа, а на графикот се појавува вториот минимум.

На забележаните експериментални факти

Ј.Франк и Г.Херц им дале сосема правилно објаснување, т.е. атомите на живата ја примаат енергијата во строго определени износи - кванти. При напон до 4,9 V, односно при енергија на електроните помала од 4,9 eV, нивните судири со живините атоми се само еластични, без промена на енергијата, а како резултат на тоа јачината на анодната струја расте. Но при точно определен напон од 4,9 V, кога електроните се со кинетичка енергија од 4,9 eV, меѓу нив и атомите на живата настануваат нееластични судири. При овој нееластичен судир електроните ја предаваат својата енергија на атомите од живата, а со намалена енергија не може да стигнат до анодата, бидејќи ги враќа заковниот напон. Во тој момент анодната струја нагло паѓа. Според тоа, *живините атоми при судирите со електроните не примаат какви било количества енергија*. На атомот од живата му одговара најмал квант енергија од 4,9 eV. При енергии поголеми од 4,9 eV одново почнува зголемување на струјата.

Кога напонот е од 4,9 V до 9,8 V, повторно протекуваат само електрони кои претрпеле еластични судири. Меѓутоа, при напон меѓу катодата и решетката од 2-4,9V, повторно настануваат нееластични судири; атомите од живата трпат два последователни судира со електроните и примаат по два кванта енергија. Повторно е голем бројот на електроните кои ја предале енергијата на атомите од живата и не можат да се пробијат до анодата, при што јачината на струјата повторно нагло паѓа, тоа е вториот минимум на графикот. Нагло опаѓање на струјата има и при напон од 3-4,86 V=14,7 V.

Општо кажано, само при напони еднакви на целобројни износи од 4,9 V, електроните можат да претрпат 1, 2, 3 итн. нееластични судири со атомите на живата. При тие нееластични судири електроните ја губат целата своја енергија и не стигнуваат до анодата.

Енергијата од 4,9 eV е карактеристична за атомите на живата бидејќи таа е енергијата што припаѓа на премин од основната во првата возбуждена енергетска состојба. Додека, пак, според теориските пресметувања, првата возбуждена енергетска состојба на атомите од живата е 4,83 eV над основната (невозбудена состојба). Со тоа Франк-Херц-овиот опит го

потврди постоењето на дисконтинуираните енергетски состојби кај атомите.

Франк-Херц-овиот опит експериментално го потврдува дисконтинуираниот карактер на спектарот, за што е укажано и во третиот Боров постулат.

Франк-Херц-овиот опит е непосреден доказ за постоењето на дискретни енергетски нивоа во атомите. *Имено, внатрешната енергија на атомот не може да се менува континуирано*. Таа се менува во скокови со точно определени износи, својствени за секој атом.

16.6. ЗОМЕРФЕЛДОВА МОДИФИКАЦИЈА НА БОРОВАТА ТЕОРИЈА

Штарк во 1913 година во забележал дека спектралните линии на водородот во јако електрично поле се цепат на многу блиски линии. Појавата на *фина структура на спектарот* на водородот не можело да се објасни со Боровата теорија. Појавата цепење на спектралните линии во низа од многу блиски линии значи за иста вредност на главниот квантен број одговараат повеќе блиски енергетски состојби.

За да ги разјасни овие појави А.Зомерфилд во 1915 година ја усовршува Боровата теорија воведувајќи и елиптични патеки. Зомерфилд претпоставува дека за движење на електронот околу атомското јадро, покрај кружни стационарни орбити, се дозволени и елиптични стационарни орбити со определен ексцентрицитет, аналогно на движењето на планетите околу Сонцето. При ваквото движење на електронот во рамнината на неговата орбита му се припишуваат два степена на слобода, Квантниот услов зададен со Боровата теорија

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

не е доволен од сите можни елипси

да се одберат оние кои одговараат на стационарните состојби на атомот. Зомерфилд воведува универзални услови за квантување.

Бидејќи елиптичната орбита претставува движење со два степена на слобода, а нејзи-

ното опишување е зададено со две координати ќе постојат и два квантни броја: **радијален** n_r и **азимутен** n_ϕ . Според условите кои ги задава Зомерфилд стационарни ќе бидат само оние елиптични патеки кои задоволуваат два квантни услова, наместо еден како што беше во Боровата теорија. Така во Зомерфилдовата теорија важи:

$$n = n_\phi + n_r \quad (1)$$

$$n_\phi + n_r \geq n_\phi, \quad \text{односно} \quad n \geq n_\phi$$

Одовде се добиваат вредностите за радијалниот квантен број

$$n_r \geq 0; \quad n_r = 0, 1, 2, 3,$$

Значи, **радијалниот квантен број** n_r е цел позитивен број или нула. Според тоа, радијалниот квантен број може да биде и нула. Кога $n_r = 0$, ќе биде и $p_r = 0$, што значи $r = \text{const}$, т.е. орбитата е кружница.

За опишување на состојбата на електронот, на различните елипси, е воведен и азимутниот квантен број. Бидејќи малата полуоска не може да добие вредност еднаква на нула, кога $b > 0$, $n_\phi > 0$.

Според тоа, **азимутниот квантен број** n_ϕ ги добива следниве позитивни вредности:

$$n_\phi > 0; \quad n_\phi = 1, 2, 3, \dots n.$$

За елипсата важи дека големата полуоска е поголема или во краен случај еднаква со малата: $a = a_0 n^2$; $b = a_0 n n_\phi$

Орбитата има облик на кружница кога

$$n_r = 0, \quad \text{а} \quad n_\phi = n.$$

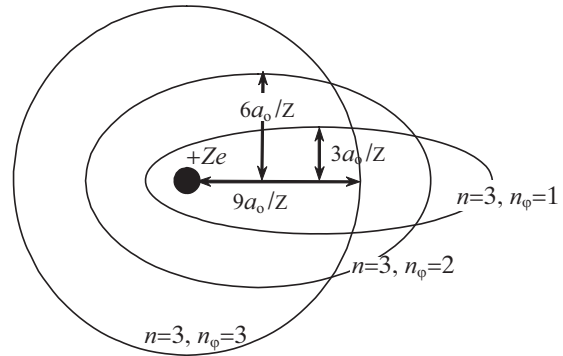
Бидејќи $\frac{b}{a} = \frac{n_\phi}{n}$ следува дека може да постојат само такви елиптични орбити кај кои количникот од малата и големата полуоска е еднаков на количник од два цели броја.

Главниот квантен број n ја определува големата полуоска на елипсата и таа е еднаква за сите состојби на едно енергетско ниво, а малата полуоска ги менува вредностите во скокови како и азимутниот квантен број n_ϕ . Кога на ист квантен број n припаѓаат различни вред-

ности на азимутниот квантен број, постојат низа елиптични орбити со еднаква голема полуоска и различни дискретни вредности на малата полуоска.

Врз основа на досега искажаното, произлегува дека квантната состојба, карактеризирана со главниот квантен број n , има една кружна орбита и $n-1$ елиптични орбити кои се разликуваат според ексцентрицитетот.

На сл.1 се прикажани можните орбити кои одговараат на $n=3$. Овде постојат три можности:



Сл. 1. Можните орбити кои одговараат на $n=3$.

1. $n_\phi = 3, n_r = 0, a = b = \frac{9a_0}{Z}$ (кружница)
2. $n_\phi = 2, n_r = 1, a = \frac{9a_0}{Z}, b = \frac{2}{3}a$ (елипса)
3. $n_\phi = 1, n_r = 2, a = \frac{9a_0}{Z}, b = \frac{1}{3}a$ (елипса)

Сега може да се наведат и сите можни вредности на n_ϕ и n_r за главниот квантен број n , почнувајќи од 1 па сè до 4. Притоа, треба да се има предвид дека $n_\phi + n_r = n$.

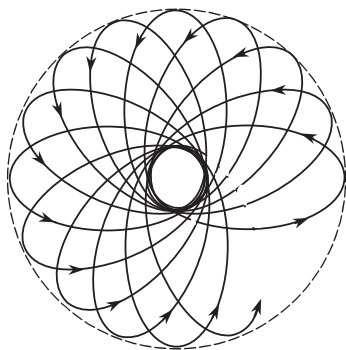
Електроните кои се движат по елиптични патеки, со еднаква голема полуоска, а различен ексцентрицитет, би требало, да имаат еднаква енергија но различни моменти на импулсот. Имено, елиптичните патеки не даваат нови енергетски нивоа. Различните состојби со еднаква вредност на енергијата се викаат *дегенерирани состојби*. На пример, ако на една вредност на енергијата одговараат две вредности на квантниот број n_ϕ , се вели дека таа

состојба е двојно дегенерирана. За случај на три вредности на n_ϕ се вели дека постои трикратна дегенерација итн.

Зомерфилд покажува дека поради релативистичките ефекти енергиите на таквите електрони не се еднакви. Така, на пример, електрон по елиптична патека со поголем ексцентрицитет ($b \ll a$) повеќе се приближува до јадрото, па неговата брзина се зголемува.

Движејќи се по елиптичните патеки електронот се забрзува кога е поблизу до јадрото (атомското јадро се најдува во еден од фокусите на елипсата), а ја намалува брзината кога е подалеку од него, што на кружната патека не се случуваше. Овие промени на брзината условуваат промена на масата на електронот, а со тоа промена и на енергијата. Електроните при елиптичните патеки со различна голема полуоска имаат различна енергија.

Промената на брзината, масата и енергијата при движење на електронот предизвикува и посебен вид движење наречен прецесија на рамнините на елипсата околу фокусот во кој е јадрото. Брзината на ротација на елипсата зависи од нејзиниот ексцентрицитет, а таа е поголема што е поголем ексцентрицитетот



Сл. 2. Прецесијата на рамнините на движење на електронот -розета.

А.Зомерфилд укажува на релативистичката промена на масата на електронот по елиптичните патеки и по теориски пат доби специјална орбита што настанува со ротација на рамнините на движење на електронот околу фокусот на елипсата. На тој начин, електронот наместо да се движи по елипса во рамнина,

електронот се движи во просторот по т.н. *розета*.

Прашања и задачи

1. Дали Франк Херцовиот експеримент освен со атоми на жива може да се изведе и со други атоми?
2. Опиши го експериментот кој го потврдува третиот Боров постулат и постоењето на квантите.
3. Кои услови ги воведува Зомерфилд во неговата теорија?
4. Колку квантни броја според оваа теорија постојат?
5. Каква енергија има електронот при движење по елипси со еднаква голема полуоска?

16.7. КВАНТНО-МЕХАНИЧКИ МОДЕЛ НА АТОМОТ

Паралелно со постигнатите први успеси на Боровата теорија сè појасно се воочувале нејзините недостатоци. И после сите нејзини усовршувања таа не била во состојба детално да ги објасни спектрите на посложените атоми. Особено тешкоти се појавиле при настојувањата правилата за квантување да се применат и за атоми со повеќе електрони во рамките на Боровата теорија.

Боровата теорија не била во состојба да ги објасни: на пример, структурата на стабилните орбити кај атомот од хелиум, кој има два електрона, интензитетот и фината структура на одделни спектрални линии, како и поврзувањето на атомите во молекулите или во тврдите тела и течностите. Сето ова го наметнало прашањето за исправноста на квантните постулати и на изградување посовршена теорија за процесите во атомот. Новата теорија беше создадена од австрискиот физичар Е. Шредингер, англискиот физичар П. Дирак и германскиот физичар В. Хајзенберг. Таа е наречена **квантна механика**.

Во квантната механика, како што обично се вели, состојбата на системот, т.е. положбата на некоја честица во движење во дадена точка во просторот и даден момент, може да се

опише со брановата функција* од координатите на радиус векторот $\vec{r}(x, y, z)$ и времето. Во општ случај брановата функција е комплексна величина која може да се напише во следнава форма:

$$\Psi(\vec{r}, t) = A(\vec{r}, t) e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}, \quad (1)$$

каде што $A(\vec{r}, t)$ - амплитуда на бранот, а $(\vec{k}\vec{r} - \omega t)$ - фаза на бранот. Тргувајќи од релацијата $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$ брановата функција може да ја напишеме (како збир од реален и имагинарен дел) во форма вообичаена за комплексните величини:

$$\Psi(\vec{r}, t) = A(\vec{r}, t) \cos(\vec{k}\vec{r} - \omega t) + iA(\vec{r}, t) \sin(\vec{k}\vec{r} - \omega t), \quad (2)$$

Модулот (интензитетот) на брановата функција може да се добие со множење на брановата функција (2) со нејзината коњугирано комплексна функција означена со $\Psi^*(\vec{r}, t)$:

$$|\Psi(\vec{r}, t)|^2 = \Psi(\vec{r}, t) \Psi^*(\vec{r}, t) = A^2 \cos^2(\vec{k}\vec{r} - \omega t) + A^2 \sin^2(\vec{k}\vec{r} - \omega t) = A^2(\vec{r}, t) \quad (3)$$

Според тоа, модулот на брановата функција е еднаков на квадратот од амплитудата, чиешто физичко значење е **веројатност** за наоѓање на честичката во дадена точка на просторот. Следува дека брановата функција Ψ во квантната механика има статистичка интерпретација.

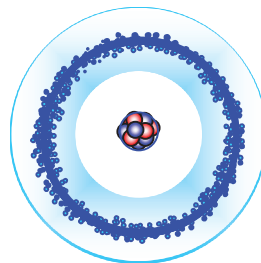
Врз основа на квантната механика во 1925 година беше создаден новиот, **квантно-механички модел на атомот**, овој пат верен модел кој адекватно ја вклучува идејата за

* Брановата функција $\Psi(\vec{r}, t)$ општо е комплексна величина, таа го вклучува $i = \sqrt{-1}$, и не е можно да се набљудува. Од друга страна $|\Psi|^2$, квадратот од апсолутната вредност на Ψ е секогаш реална величина затоа што на $|\Psi|^2$ можеме да дадеме реална физичка интерпретација.

квантување при опишувањето на атомот. Основна равенка во квантната механика е т.н. **Шредингерова равенка**. Таа е диференцијална равенка за опишување на состојбата на нерелативистички честички (брзини $v \ll c$) со бранови функции. Таа теориски не може да се изведе, исто како што не можат да се изведат Њутновите закони од механиката. Тие можат да се докажат само експериментално.

При движењето на електронот доаѓаат до израз неговите бранови својства. Состојбата на електронот во атомот ќе биде опишана со квадратот од модулот на брановата функција $|\Psi(\vec{r}, t)|^2$ кој ја претставува **густината на веројатноста електронот да се најде во даден момент во определена точка од просторот** – волуменот на атомот.

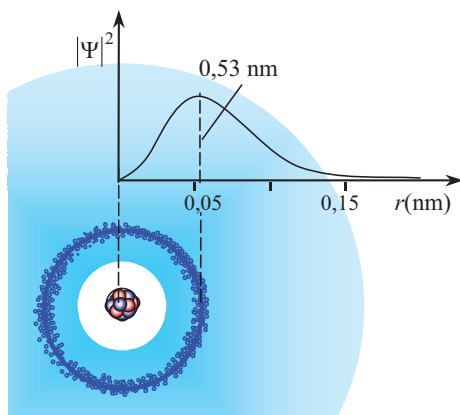
Според квантната механика, точната положба на електронот никогаш не може да биде определена. Но, може да се пресмета веројатноста дека еден електрон ќе се најде во оваа или онаа точка во волуменот на атомот. За дадена стационарна состојба (таква состојба имаат сите квантномеханички системи кај кои вкупната енергија не зависи од времето) таа веројатност е различна за различни точки околу јадрото. Кога атомот се наоѓа во невозбудена состојба, веројатноста зависи само од растојанието на електронот од атомското јадро. Од тоа, пак, произлегува дека во сите точки што се наоѓаат на една сфера со радиус r и центар во атомското јадро, веројатноста да се најде електронот е еднаква. На овој начин за да се создаде претпоставка за распределбата на веројатностите се вели дека различните положби на електронот во атомот формираат еден вид електронски облак околу атомското јадро (сл.1).



Сл.1. Електронски облак

Густината на овој електронски облак е различна во различни точки во волуменот на атомот. Електронскиот облак е погуст таму каде што е поголема веројатноста да се најде електронот, а формата на облакот зависи од стационарната состојба. Во која било точка во волуменот на атомот густината на електронскиот облак е пропорционална на веројатноста електронот да се најде во таа точка.

Согласно на Хајзенберговиот принцип за неопределеност, за некои определени орбити на електронот во атомот не може да се зборува. Тогаш, што во суштина претставуваат Боровите орбити на електронот кај атомот на водородот? На пример, кога тој се наоѓа во основната невозбудена состојба. Согласно на квантната механика, за стационарна состојба на атомот, густината на веројатноста $|\Psi|^2$ електронот да се најде на растојание r од атомското јадро е претставена со кривата на сл. 2.



Сл. 2.

Се гледа дека максимумот на кривата е на растојание r еднакво на радиусот од првата Борова орбита на електронот $r=a_0=0,53 \cdot 10^{-10}$ m. Што значи тоа? Овој резултат се јавува како специјален случај од општиот заклучок: *Боровите стационарни орбити на електронот претставуваат геометриско место на точки, во коишто електронот може да се најде со најголема веројатност.*

На овој начин согласно на квантномеханичкиот модел за атомот, движењето на електронот околу атомското јадро не се одвива по орбити, туку во подрачја каде што веро-

јатноста тој да се најде е најголема. На тој начин електронот околу атомското јадро опишува еден **електронски облак** - просторот околу атомското јадро во кој постои најголема веројатност да се најде електронот.

Боровите постулати, преформулирани според квантномеханичкиот модел на атомот, гласат:

1. Електроните во еден систем (атом, молекул, јон итн.) се наоѓаат во строго определени состојби коишто се наречени *стационарни состојби* и се карактеризираат со определени енергии.

2. При премин на електроните меѓу стационарните состојби се емитува или апсорбира фотон согласно на, веќе, познатата релација:

$$hf_{nm} = E_n - E_m \quad (4)$$

Според квантната механика секоја од можните стационарни состојби на електронот во атомот е определена со четири квантни броја.

16.8. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА СОСТОЈБАТА НА АТОМОТ СО ПОМОШ НА КВАНТНИТЕ БРОЕВИ

Според квантната механика секоја од можните стационарни состојби на електронот во атомот е определена со четири квантни броја.

1. **Главниот квантен број** n ја определува енергијата на состојбата на електронот во атомот и може да има целобројни вредности од 1 до бескрајност ($n = 1, 2, 3, \dots, \infty$).

Состојбата со пониска енергија, т.е. при помали вредности на n електронот посилно е врзан со јадрото и електронскиот облак е сконцентриран на помало растојание од него. Во основната состојба со $n=1$, електронскиот облак е најгуст на растојание $r=a_0=0,53 \cdot 10^{-10}$ m (сл. 2) наречено **Боров радиус**. Тоа растојание се совпаѓа со првата кружна орбита во Боровиот модел за атомот. Поголеми, но од истиот ред 10^{-10} m, се димензиите на електронскиот облак во состојбите со $n = 2, 3, \dots$

2. **Орбиталниот квантен број** l ја определува големината на орбиталниот момент на електронот - моментот на импулсот на електронот околу атомското јадро кој е наречен **орбитален момент** \vec{l} . Тој е векторска величина со определена насока и стои нормално на орбиталната рамнина на електронот. Орбиталниот момент \vec{l} може да има само определени вредности - е квантуван. Неговите дозволени бројни вредности се дадени со изразот:

$$|\vec{l}| = \sqrt{l(l+1)}\hbar = \sqrt{l(l+1)}\frac{h}{2\pi} \quad (1)$$

За дадена вредност на главниот квантен број n , орбиталниот квантен број l може да ги има следниве вредности:

$$l = 0, 1, 2, 3, \dots (n-1) \quad (2)$$

Значи орбиталниот квантен број l за даден n може да има n различни вредности. Според квантната механика, во кој и да било атом можни се состојби на електронот и за случај кога $l=0$. Во оваа состојба следува по релацијата (5), дека орбиталниот момент на електронот $|\vec{l}| = 0$.

Од релацијата (2) следува, на дадена квантна состојба, определена со главниот квантен број n , на атомот на водородот и нему слични атоми (јоните на He^+ , Li^{++} , Be^{+++} кои се состојат од атомско јадро со полнеж Ze и еден електрон околу јадрото, Z - реден број на атомот) припаѓаат повеќе состојби на електронот. Тие состојби се и состојби на атомот со еден електрон, како што е атомот на водородот и нему сличните атоми. За различни вредности на орбиталниот квантен број, состојбите се нарекуваат и означуваат на овој начин:

$n=1$	$l=0$	s -состојба, $1s$
$n=2$	$l=0$	s -состојба, $2s$
	$l=1$	p -состојба, $2p$
$n=3$	$l=0$	s -состојба, $3s$
	$l=1$	p -состојба, $3p$
	$l=2$	d -состојба, $3d$
$n=4$	$l=0$	s -состојба, $4s$
	$l=1$	p -состојба, $4p$
	$l=2$	d -состојба, $4d$
	$l=3$	f -состојба, $4f$

Гледаме дека состојбите на електронот за различни вредности на l се означуваат со буквите s, p, d, f и со ред понатаму со буквите од латинската азбука, но пред секоја се наоѓа главниот квантен број n на кој тие припаѓаат.

3. **Магнетниот квантен број** m_l ја определува големината на проекцијата на орбиталниот момент на електронот по определен правец во просторот кој е определен со насоката на надворешно магнетно поле. Во квантната механика овој правец се избира долж Z оската од правоаголниот координатен систем.

Магнетниот квантен број m_l , за даден орбитален квантен број l , може да има општо $2l+1$ различни вредности:

$$m_l = -l, -(l-1), -(l-2), \dots -1, 0, 1, 2, \dots (l-1), l \quad (3)$$

т.е. сите целобројни вредности, вклучувајќи ја нулата од $-l$ до $+l$.

Секоја наелектризирана честица кога ротира околу некој центар, па така и електронот во атомот, создава кружна струја. Тоа значи дека на електронот припаѓа и определен **орбитален магнетен магнетен** $\vec{\mu}_l$ кој е поврзан со орбиталниот момент \vec{l} на електронот преку релацијата:

$$\vec{\mu}_l = -\frac{e}{2m_e}\vec{l} \quad (4)$$

каде што e и m_e се електричниот полнеж и масата на електронот. Според релацијата (4) векторите $\vec{\mu}_l$ и \vec{l} се ориентирани во спротивна насока.

Ако се замени релацијата (1) за \vec{l} во релацијата (4), тогаш врската меѓу бројните вредности на моментите $\vec{\mu}_l$ и \vec{l} за електронот може да се запише вака:

$$\vec{\mu}_l = -\frac{e}{2m_e}\vec{l} = \sqrt{l(l+1)}\frac{e\hbar}{2m_e} = \mu_B\sqrt{l(l+1)} \quad (5)$$

Величината

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = \frac{eh}{4\pi m_e}$$

е наречена **Боров магнетон за електронот**. Бидејќи атомот на водородот има само еден електрон, тогаш Боровиот магнетон го дава

магнетниот диполен момент на атомот од водородот кога тој се наоѓа во основната невозбудена состојба. Експериментите покажуваат дека сите атоми имаат магнетни моменти од тој ред на големина.

Во квантната механика е докажано дека проекцијата l_z на векторот \vec{l} и проекцијата μ_{Lz} на векторот $\vec{\mu}_L$ по насоката на надворешно магнетно поле со индукција \vec{B} , може да прима само целобројни вредности на \hbar

$$l_z = m_l \hbar = m_l \frac{h}{2\pi} \quad (6)$$

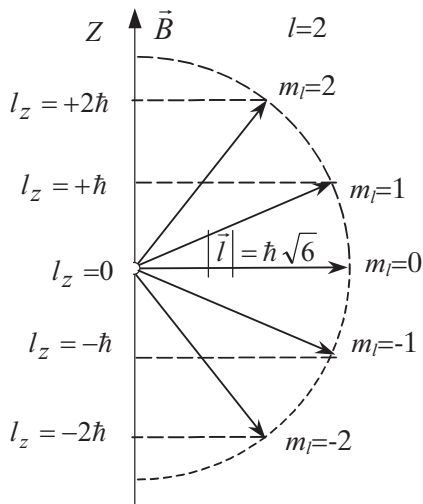
$$\mu_{Lz} = \frac{e}{2m_e} l_z = m_l \frac{e}{2m_e} \frac{h}{2\pi} = m_l \mu_B \quad (7)$$

каде што m_l е **магнетниот квантен број**.

На сл. 1 се дадени можните ориентации на векторот \vec{l} за $l=2$. Магнетниот квантен број за $l=2$ ги добива следниве $(2l+1)=5$ вредности:

$m_l = -2, -1, 0, +1, +2$, Проекциите на орбиталниот момент \vec{l} , пак, имаме: $l_z = -2\hbar, -\hbar, 0, +\hbar, +2\hbar$.

Во квантната механика не е квантуван само орбиталниот момент и орбиталниот магнетен момент на електронот, туку и нивните проекции долж оската Z , која се совпаѓа со насоката на надворешното магнетно поле.



Сл. 1. Можни ориентации на векторот \vec{l} во однос на избрана насока во просторот

Согласно на квантната механика енергијата на електронот во дадена состојба во атомот на водородот како и при Боровата теорија зависи само од главниот квантен број n . **Во состојбите со различни вредности на квантните броеви l, m_l , но со еднакви вредности на n електронот има една и иста енергија, т.е. се наоѓаат на едно и исто енергетско ниво. Таквите состојби се наречени дегенерирани.**

Во табелата 1 се дадени различните вредности на квантните броеви l и m_l за првите три вредности на главниот квантен број n . Табела 1

E_n	n	l	m_l	$\Psi_{n l m_l}$
E_1	1	0	0	Ψ_{100}
		0	0	Ψ_{200}
E_2	2	1	-1	Ψ_{21-1}
			0	Ψ_{210}
			1	Ψ_{211}
E_3	3	0	0	Ψ_{300}
			-1	Ψ_{31-1}
		1	0	Ψ_{310}
			1	Ψ_{311}
		2	-2	Ψ_{32-2}
			-1	Ψ_{32-1}
			0	Ψ_{320}
			1	Ψ_{321}
		2	Ψ_{322}	

Во табелата 1 можните вредности на енергијата на електронот за коишто постојат определени бранови функции се E_1, E_2, \dots, E_n ($E_1 < E_2 < E_3 < \dots < E_n$). Тоа значи дека во атомот на водородот електронот се наоѓа во точно определени енергетски нивоа. Овој резултат добиен во квантната механика се совпаѓа со оној што се добива според Боровата теорија. Но, од табелата се гледа дека електронот со една иста вредност на енергијата може да се најде во различни состојби определени со квантните броеви l и m_l .

Состојбата со $n=1$, наречена **основна**, има најмала енергија $E_1 = -hcR = -13,6 \text{ eV}$.

Во основната состојба орбиталниот и магнетниот квантен број имаат една единствена вредност $l=0, m_l=0$. Шредингеровата равенка има само едно решение, т.е. постои само една стационарна состојба на електронот во атомот на водородот, во која енергијата му е E_1 .

Брановата функција со која е опишана дадена состојба на електронот е Ψ_{100} .

Енергетското ниво определено со $n=2$, $E_2 = -E_1 / 4 = -3,4 \text{ eV}$ има четири состојби:

- а) $n=2, l=0, m_l=0, s$ – состојба;
 б) $n=2, l=1, m_l = -1, 0, +1, p$ – состојби.

При E_n ($n>1$) бројот на состојбите на електронот со една иста енергија се зголемува за $n=2$ тие се четири, за $n=3$ се 9 итн. Општо во состојбите со различни вредности на квантните броеви l и m_l , но при дадена вредност на главниот квантен број n постојат n^2 различни состојби,

Четвртиот квантен број е спинскиот, а за него поопширно ќе зборуваме во наредната лекција.

ПРИМЕР 1. Во водородниот атом: а) да се определи големината на орбиталниот момент \vec{l} за електронот во p -состојбата; б) да се дефинираат компонентите на орбиталниот момент \vec{l} долж Z -оската на електроните во p -состојбата.

Решение: а) орбиталниот квантен број за p – електроните $l=1$. Од релацијата (5) за големината на $|\vec{l}|$ се довива:

$$\sqrt{2} \hbar = \sqrt{2} \frac{h}{2\pi} = 1,49 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

б) големината на проекцијата е $l_z = m_l \frac{h}{2\pi}$

За $l=1, m_l = -1, 0, +1; l_z = -\frac{h}{2\pi}; 0; l_z = +\frac{h}{2\pi}$

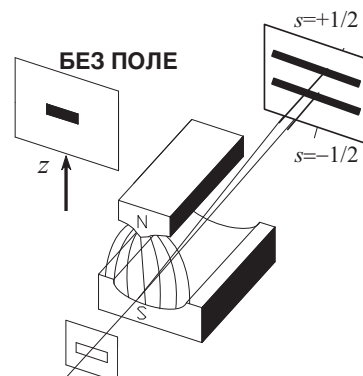
Прашања и задачи

1. Врз кои теории е создадена квантната механика?
2. Кои недостатоци на Боровиот модел на атомот ги надмина квантномеханичкиот модел?
3. Дајте објаснување на тврдењето "електронот во водородниот атом формира електронски одлак". Како овој облак се согласува со преставата за електронот како честица?
4. Кои се квантните броеви со кои е определена состојбата на електронот во атомот? Дајте ги нивните вредности.
5. Кој квантен број ја определува формата на електронскиот облак, а кој неговата ориентација во просторот?

16.9. СПИН НА ЕЛЕКТРОНОТ

Во 1924 година германските физичари О. Штерн и В. Гералах го извеле следниот експеримент: во евакуирана стаклена цевка атомите на сребро, добиени при испарување на загреано сребрено топче, се пуштаат да поминат низ една правоаголна пукнатина. Потоа, овие атоми наидуваат на силно нехомогено магнетно поле, добиено со специјално обликување на половите (сл. 1).

Ориентацијата на полето е нормална на движењето на атомите. При минувањето низ силното нехомогено магнетно поле снопот се дели на два дела, коишто се отклонуваат во спротивни насоки и формираат две црти врз фотоплочата поставена нормално на движењето (сл. 1).



Сл. 1. Шема на Штерн-Герлаховиот експеримент

Според нив, тоа значело дека орбиталниот магнетен момент на атомот од сребро (мерен при ваков експеримент) има две можни ориентации во магнетното поле. Атомот на сребро, како и на останатите елементи од првата група на периодниот систем на елементите, има валентен електрон кој се наоѓа во $5s$ – состојбата ($n=5, l=0$), кога атомот е во основната невозбудена состојба, а му одговара орбитален квантен број $l=0$. Според тоа во s состојба за $l=0$ електронот нема орбитален момент на импулсот ($|\vec{l}|=0$), како што следува од релацијата (1), во претходното поглавје, нема ни орбитален магнетен момент ($\mu_l=0$). Имено, едноелектронскиот атом би требало да биде дијамагнетичен во неговата основна сос-

тојба, кога има еден валентен електрон во надворешниот слој и сите други електрони се во пополнетите слоеви.

Поради тоа се појавиле сериозни тешкотии при објаснувањето на овој експеримент, бидејќи било сосема јасно дека не се работи за никакво просторно квантување на орбиталниот магнетен момент. Оваа тешкотија (а и многу други, покасно забележани) ја отстраниле во 1927 година С. Гаудсмит и Г. Уленбек со претпоставката за постоење на *сопствен момент на импулсот* на електронот \vec{s} , наречен **спин на електронот** (англиски to spin - се врти) и *сопствен магнетен момент* $\vec{\mu}_s$.

Но, овде веднаш ќе нагласиме дека ваквото објаснување за воведувањето на спинот на електронот не е во согласност со сфаќањето во современата физика. **Имено, спинот на електронот треба да се сфати како една карактеристична величина за секоја елементарна честица како што се масата, електричниот полнеж итн.**

П. Дирак 1928 година покажа дека спинот на електронот е неопходна последица на релативистичката квантна теорија.

Механичкиот модел за спинот како ротација на електронот околу некоја сопствена оска се покажа неодржлив. На пример, за да се добие магнетен момент еднаков на еден Боров магнетон, аголната брзина треба да е таква што линиската брзина на површината на електронот треба 300 пати да ја надминува брзината на светлината, или димензијата на електронот да е околу 10^{-12} m.

Спинот е физичка карактеристика не само на електроните, туку и на сите други честици, а и на цели атоми. Спинот може да прима полуцелобројни вредности (1/2, 3/2, 5/2...). Некои особини на честичите зависат од тоа дали нивниот спин е цел или полуцел број. Честиците со полуцелоброен спин (електрон, неутрон) се наречени **фермиони**.

Вкупниот момент \vec{j} на електронот, се состои од орбиталниот момент \vec{l} , кој доаѓа од движењето на електронот околу атомското јадро и од сопствениот момент или спинот \vec{s}

$$\vec{j} = \vec{l} + \vec{s} \quad (1)$$

Со спинот на електронот \vec{s} е поврзан и сопствен (спински) магнетен момент $\vec{\mu}_s$ на електронот.

Од квантната механика следува дека спинот мора да биде квантуван според законот:

$$|\vec{s}| = \sqrt{s(s+1)} \hbar = \sqrt{s(s+1)} \frac{h}{2\pi}, \quad (2)$$

каде што s е квантен број на спинот, кој за електронот е 1/2.

И векторот \vec{s} , аналогно на \vec{l} , може да има $(2s+1)$ ориентација во просторот. Значи во надворешно магнетно поле со индукција \vec{B} , ориентацијата на векторот \vec{s} може да биде само таква што неговата проекција s_z по Z -оската е квантувана величина, дадена со релацијата:

$$s_z = m_s \hbar = m_s \frac{h}{2\pi}, \quad (3)$$

каде што m_s - **магнетен квантен број на спинот**. Од експериментот на О. Штерн и В. Герлах следува, дека за спинот \vec{s} на електронот постојат само две можни ориентации, за кои што $2s+1=2$. Магнетниот квантен број на спинот може да ги има само следниве две вредности, и тоа: $m_s = \pm s = \pm \frac{1}{2}$. Оттука следу-

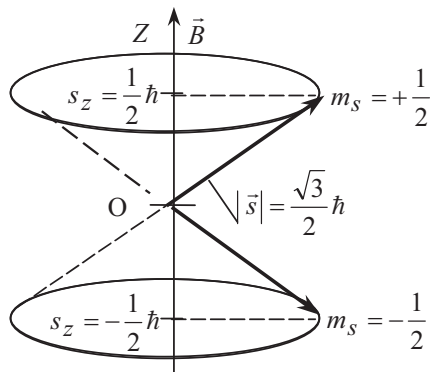
ва дека и проекцијата на спинот s_z во надворешното магнетно поле долж Z -оската може да има само две вредности:

$$s_z = \pm m_s \hbar = \pm \frac{1}{2} \hbar = \pm \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi} \quad (4)$$

На сл. 2 се претставени двете проекции на векторот \vec{s} , во насоката на полето $\frac{1}{2}\hbar$, и во спротивна насока на полето $-\frac{1}{2}\hbar$.

Бидејќи атомот на среброто има атомско јадро со позитивен електричен полнеж $+Ze$ и еден валентен електрон, како и атомот на водородот, вкупниот орбитален момент \vec{j} на електронот, според релацијата (1), е и **вкупен или внатрешен момент \vec{j} на атомот**. Според тоа, внатрешниот момент на атомите од среб-

рото во s - состојбата е само спински \vec{s} ($\vec{l} = 0$).



Сл. 2. Можните ориентации на векторот \vec{s} во просторот

На тој начин поради бројната вредност на внатрешниот момент на атомот, еднаква на проекциите од спинот s_z на електронот ($\pm \frac{1}{2} \hbar$), снопот од атоми на среброто во надворешно магнетно поле се разделува на два еднакви дела. Едната црта ја оставаат атомите на среброто со магнетен момент паралелен со магнетното поле, а другата атомите со анти-паралелен магнетен момент. Со тоа хипотезата за спинот наполно е разјаснета.

Врската меѓу спинскиот магнетен момент $\vec{\mu}_s$ и спинот \vec{s} на електронот со електричен полнеж e и маса m_e е дадена со:

$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{m_e} \vec{s}, \quad (5)$$

За можната вредност на проекцијата μ_{sz} при ориентацијата на спинскиот магнетен момент $\vec{\mu}_s$ на електронот во надворешно магнетно поле се добива:

$$\mu_{sz} = \frac{e}{m_e} s_z = \pm \frac{e}{m_e} \frac{1}{2} \hbar = \pm \frac{eh}{4\pi m_e} = \pm \mu_B \quad (6)$$

Проекцијата μ_{sz} на спинскиот магнетен момент на електронот е еднаква на Боровиот магнетон μ_B . Така, со воведувањето на спинот на електронот и неговиот спински магнетен момент биле создадени услови да се објасни фината структура на спектралните линии.

16.10. СОСТОЈБА НА ЕЛЕКТРОНИТЕ ОПРЕДЕЛЕНА СО ПАУЛИЕВИОТ ПРИНЦИП

Својствата на инертниот гас неон (Ne) и на алкалниот метал натриум (Na) многу се различни, независно од тоа што неонот ($Z=10$) и натриумот ($Z=11$) имаат редни броеви еден до друг во периодниот систем на елементите. Зошто атомите коишто сосема малку се разликуваат по бројот на електроните имаат толку големи разлики?

Физичките и хемиските својства на атомите се определени од начинот по којшто електроните се распределени во просторот околу атомското јадро. Квантната состојба на секој електрон во атомот со повеќе електрони се карактеризира со четирите квантни броја:

- главен квантен број n
- орбитален квантен број l
- магнетен квантен број m_l
- магнетен квантен број на спинот m_s .

Квантната состојба на атомот како целина и неговите својства се определени од тоа кои од можните електронски состојби се пополнети со електрони. Можно ли е два или повеќе електрони да се наоѓаат во една иста квантна состојба? Одговор на тоа исклучително важно прашање за физиката на микросветот даде швајцарскиот физичар В. Паули, кој во 1925 година го формулира *квантомеханичкиот принцип* наречен **Паулиев принцип**.

Паулиевите принцип гласи: **Во еден квантомеханички систем не можат да постојат две честици кои имаат исти квантни броеви (во една и иста квантна состојба).**

Овој принцип се нарекува, исто така, **принцип на забрана** или принцип на исклучување. Тој важи не само за електронот, туку и за другите елементарни честици со полуцело-броен спин - за сите т.н. **фермиони**.

Во однос на атомот, тоа значи дека сите четири квантни броеви: n , l , m_l , m_s за некој електрон во еден атом не можат да се совпаѓаат со сите четири квантни броеви со друг електрон во истиот атом. Значи, во атомот не можат да постојат два електрона за кои сите четири квантни броеви се еднакви. Со други зборови кажано, *во атомот сите квантни состојби на електроните се различни, во една*

16. Физика на атомот

иста состојба не може едновременно да се наоѓаат два електрона.

Знаеме дека за даден главен квантен број n , во атомот на водородот, одговараат повеќе можни состојби за електронот. Дадена состојба на електроните во атомот со повеќе електрони е определена со четирите квантни броја: n, l, m_l, m_s . Нека на сите електрони им се еднакви трите квантни броеви n, l, m_l . Тогаш електроните во дадената состојба ќе се разликуваат само по магнетниот квантен број на спинот m_s . Бидејќи m_s може да има само две вредности $m_s = 1/2$ и $m_s = -1/2$, според Паулиевият принцип, можниот број електрони $N(n, l, m_l)$ во дадената состојба, со различни сите три квантни броеви, ќе биде 2, односно:

$$N(n, l, m_l) = 2 \quad (1)$$

Магнетниот квантен број m_l може да има $(2l+1)$ вредности за дадена вредност на орбиталниот квантен број l , а магнетен квантен број на спинот m_s има 2 вредности. Според тоа, максималниот број електрони N_1 , во атомот чии состојби се определени со квантните броеви n и l , т.е. на кои им се еднакви овие два квантни броеви, согласно на Паулиевият принцип:

$$N_1(n, l) = 2(2l+1) \quad (2)$$

Максималниот број електрони $N_1(n, l)$, според релацијата (2), за состојбите: s, p, d, f, g , во атомот за дадени бројни вредности на орбиталниот квантен број l е:

L	0	1	2	3	4
СОСТОЈБИ НА ЕЛЕКТРОНИТЕ	s	p	d	f	g
БРОЈ НА ЕЛЕКТРОНИ $N_1(n, l)$	2	6	10	14	18

Ако се изврши сумирање на десната страна од релацијата (2) за вредностите на орбиталниот квантен број l од 0 до $(n-1)$, тогаш за максималниот број електрони $N_2(n)$ во состојбите на атомот определени само со главниот квантен број n се добива:

$$N_2(n) = \sum_{l=0}^{l=n-1} 2(2l+1) = 2 [n + (n-1)n] = 2n^2 \quad (3)$$

Според тоа во состојбите определени со вредностите на n можат да се наоѓаат во атомот не повеќе од $2n^2$ електрони:

$n=1$ може да има 2 електрони,
 $n=2$ може да има 8 електрони,
 $n=3$ може да има 18 електрони,
 $n=4$ може да има 32 електрони,
 $n=5$ може да има 50 електрони итн,

Максималниот број електрони $N_1(n, l)$, по релацијата (2), во состојбите (s, p, d, f, g) за дадени вредности на орбиталниот квантен број l и максималниот број електрони N_2 во состојбите определени со вредностите на главниот квантен број n се дадени во табела 1.

Севкупноста од електрони во квантните состојби на атомот кои имаат една иста вредност на главниот квантен број n прават една целина - **електронски слој**. Означувањето на електронските слоеви е поврзано со спектроскопијата на рендгенските зраци. Во зависност од вредноста на главниот квантен број n , електронските слоеви во атомот се означуваат на следниов начин:

ВРЕДНОСТИ НА	$n=1$	2	3	4	5	6	7
ОЗНАЧУВАЊЕ НА СЛОЈ	K	L	M	N	O	P	Q

Табела 1.

n	БРОЈ НА ЕЛЕКТРОНИ ВО ПОТСЛОЈ $2(2l+1)$					МАКСИМАЛЕН БРОЈ НА ЕЛЕКТРОНИ ВО СЛОЈ $2n^2$
	$s(l=0)$	$p(l=1)$	$d(l=2)$	$f(l=3)$	$g(l=4)$	$N_2(n)$
1	2	-	-	-	-	2
2	2	6	-	-	-	8
3	2	6	10	-	-	18
4	2	6	10	14	-	32
5	2	6	10	14	18	50

Електроните што припаѓаат на еден ист електронски слој во атомот се групираат и според вредноста на орбиталниот квантен број l . Сите електрони од еден слој, чија квантна состојба е определена со ист орбитален квантен број l , даваат еден **потслој** (исто n и l). Во зависност од орбиталниот квантен број l , потслоевите се означуваат на следниов начин:

ВРЕДНОСТИ НА	$l=$	0	1	2	3	4
ОЗНАЧУВАЊЕ НА		s	p	d	f	g
ПОТСЛОЈ						

Бројот на електроните во секој потслој со даден орбитален квантен број l , определен со релацијата (2) е еднаков со бројот на електроните во состојбите.

Максималниот број електрони во даден слој е еднаков на збирот од максималниот број електрони на сите потслоеви и според релацијата (3) изнесува $2n^2$.

Сите електронски слоеви, освен K -слојот, содржат потслоеви кои одговараат на различна вредност на орбиталниот квантен број l .

Првиот K слој ($n=1$), кој е најблизок до атомското јадро, има само еден потслој, односно едно $1s$ енергетско ниво со две различни состојби за електроните. Во него можат да се најдат само два електрона.

Вториот L слој ($n=2$) има два потслоја, и тоа $2s$ и $2p$. Слојот M ($n=3$) има $3s$, $3p$ и $3d$ потслоеви. Слојот N ($n=4$) има 4 потслоеви, и тоа: $4s$, $4p$, $4d$ и $4f$ итн.

Ако не важеше Паулиевит принцип тогаш би следувало дека во секој атом сите електрони би требало да се најдат во состојбата со најмала енергија. Со тоа би исчезнале различните својства на хемиските елементи. Природата немаше да постои во ваков вид, во којшто ја познаваме, но реално во повеќеелектронските атоми електроните ја пополнуваат не само состојбата со минимална енергија, но и дел од состојбите со поголема енергија при коишто строго се запазува Паулиевит принцип.

Состојбата во којашто енергијата на атомот е минимална е наречена **основна состојба**. Во неа електроните имаат најмала можна енергија, којашто ја дозволува Паули-

евиот принцип. Колку еден електрон се наоѓа поблизу до јадрото толку е помала неговата енергија (кинетичка + потенцијална). Средното растојание меѓу електроните и јадрото се зголемува со зголемувањето на вредностите на главниот квантен број n или, пак, на орбиталниот квантен број l (при зададен n – во даден слој). Следува дека енергијата на електроните се зголемува со зголемувањето на n и l . Најмала е енергијата на состојбата со најмали вредности на n и l , т.е. на состојбата со $n=1$ и $l=0$ ($1s$ - состојбата).

Енергетските нивоа на електроните во атомите со повеќе електрони, поради интеракцијата на електроните еден со друг како и со атомското јадро, зависат не само од главниот квантен број n , но и од орбиталниот квантен број l . Заемното одбивање меѓу електроните зависи од вредностите на l и тоа води до т.н. расцепување на енергетските нивоа, т.е. од едно ниво со определена вредност на n се добиваат неколку нивоа со различни енергии. При тоа бројот на состојбите останува непроменет. Поради зависност на енергијата од n и l (а не само од главниот квантен број n , како кај водородниот атом) и спектрите на атомите со повеќе електрони се посложени.

Со зголемувањето на полнежот на атомското јадро $+Ze$, каде што Z е атомскиот број, се зголемува по модул и енергијата на заемнодејството меѓу јадрото и електроните, којашто е пропорционална со Z^2 . Поради тоа во спектрите на атомите со голем атомски број Z премините со учество на електроните од внатрешните слоеви ($n=1, 2$) одговараат на фреквенции од ултравиолетовата и рендгенската спектрална област (карактеристични рендгенски зраци). Во исто време премините на електроните во надворешните слоеви водат до емитување на бранови со фреквенции во видливата и инфрацрвената област.

Електроните кои се наоѓаат во даден слој определен со n и потслој l го носат името на потслојот. На пример, електронот кој се наоѓа во L -слојот ($n=2$) и во s - потслојот ($l=0$) се означува со $2s$ (бројот го означува слојот, а буквата потслојот). Тоа значи дека електроните во атомот се наречени s, p, d, f, g, \dots електрони.

За бројот електрони кои се наоѓаат во

некој потслој, исто така, е воведен начин на означување, на пример, ознаката $3p^2$ означува дека во М - слојот ($n=3$), на p - потслојот ($l=1$), се наоѓаат два електрона.

Велиме дека со бројот на електрони во состојбите определени со квантните броеви n и l е дадена електронската структура на атомот, од даден елемент во основната состојба, наречена **електронска конфигурација**. Така електронската конфигурација за атомот на водородот во основната состојба е $1s^2$. За атомот на натриумот Na ($Z=11$) во основната состојба е – $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$.

ПРАШАЊА И ЗАДАЧИ

1. Со кои четири квантни броја се карактеризира состојбата на електронот во атомот и кои се нивните вредности?

2. Како гласи Паулиевiot принцип и за кои микрочестици важи?

3. Колку состојби има во слојот L определен со главниот квантен број $n=2$ и колкав е максималниот број на електрони во слојот?

4. Колку потслоеви има во слојот M и колку електрони може да се најдат во секој потслој?

5. Што е тоа електронска конфигурација на атомот?

6. Подреди ги според нивната енергија состојбите: $2s, 4p, 3d, 1s, 2p, 3s, 3p, 4s$.

16.11. ОБЈАСНУВАЊЕ НА МЕНДЕЛЕЕВИОТ ПЕРИОДЕН СИСТЕМ СИСТЕМ НА ЕЛЕМЕНТИТЕ СО ПОМОШ НА КВАНТНИТЕ БРОЕВИ

Квантната механика го објаснува периодниот систем на елементите врз основа на изградбата на електронската обвивка на атомите. Основните принципи, според кои се објаснува законитоста во изградбата на електронската обвивка на атомот, се следниве:

- редниот број Z на хемискиот елемент е еднаков на бројот на електрони во електронската обвивка на атомот;

- хемиските и некои физички својства на елементите се определени од однесувањето на најслабо сврзаните електрони - **валентните електрони**. Периодичноста е последица на нивниот распоред;

- состојбата на електронот во атомот е определена со вредностите на четирите квантни броеви: n, l, m, m_s , а енергетските состојби со електрони се пополнуваат во согласност со Паулиевiot принцип. Со зголемувањето на бројот на електроните во атомот, секој нареден електрон во атомот треба да заземе таква енергетска состојба на која ќе одговара најмала можна енергија на атомот.

Значи, со електрони најпрво се пополнуваат состојбите со најмали можни енергии, а потоа состојбите со сè поголема енергија. Тоа значи за атомите во почетокот на Менделеевиот систем на елементите најпрво се пополнува K -слојот, со најмал главен квантен број n , а потоа се пополнуваат слоевите со сè поголем n . Додека, пак, во границите на еден ист слој прво се пополнуваат состојбите со $l=0$, потоа состојбите со сè поголем l , сè до $l=n-1$. Но при реалниот Менделеев систем на елементите се јавуваат извесни отстапувања од ваков идеален систем. Разликата меѓу идеалниот систем на елементите и реалниот Менделеев систем на елементите, може да се објасни ако се земе предвид дека секој електрон се наоѓа во електричното поле на атомското јадро и во полето на преостанатите електрони кои меѓусебно заемно си дејствуваат.

За да се сфати како настанува распределбата на електроните во атомите на хемиските елементи според енергетските состојби, може приближно да се претпостави, дека атомот на секој последователен хемиски елемент во Менделеевиот систем како да настанува од нему претходниот атом со додавање на атомското јадро по еден протон (и потребен број неутрони, за нив ќе зборуваме понатаму) и по еден електрон на неговата периферија. Но ваквата претстава е само приближна.

Со порастот на главниот квантен број n , d – електроните во даден слој имаат повисока енергија од s – електроните во следниот слој. Затоа $4s$ – состојбата се пополнува пред $3d$ – состојбата, а $6s$ – состојбата е пополнета пред $4f$ – состојбата. Притоа, важи емпириското

прими повеќе од два електрона, третиот електрон мора да е во состојбата со најниска енергија во L -слојот ($n=2$). Тоа е состојбата $2s$. Со Li започнува вториот период од Менделеевиот систем на елементите. Електронската конфигурација за Li во основната состојба е $1s^2 2s$. Основната состојба на атомот на литиумот се карактеризира со $L=0$, $S=1/2$, $J=1/2$. Според тоа, основниот терм е ист како за водородот ${}^2S_{1/2}$.

За да се оддалечи последниот електрон од атомот на литиумот потребна е енергија на јонизација од 5,4 eV, додека за да се оддалечи електрон од атомот на хелиумот, потребна е енергија од 24,6 eV.

Четвртиот електрон во атомот на берилиум (Be) со $Z=4$ се наоѓа исто така, во потслојот $2s$. Електронската конфигурација на берилиумот во основната состојба е $1s^2 2s^2$. Има поголема енергија на јонизација од литиумот и таа изнесува 9,3 eV. Ова е последица на фактот дека јадрото на берилиумот има еден позитивен полнеж повеќе од литиумот.

16.12. ЛУМИНИСЦЕНЦИЈА

Луминисценцијата е процес на светење на телата при таква ниска температура кога во нивното температурно (топлинско) зрачење сè уште не постојат зраци на видливата светлина. Значи, луминисценцијата е процес на ладна емисија на електромагнетно зрачење (од ултравиолетовата област, преку видливата светлина, сè до инфрацрвеното зрачење).

Терминот *ладна* се употребува бидејќи енергијата на зрачењето при луминисценцијата не потекнува од претворање на топлинска енергија, туку од некој друг вид енергија. Од таа гледна точка луминисценцијата не подлежи на законите за топлинско зрачење, па може да се појави многу интензивно и на ниски температури.

Луминисцираат екраните на телевизорите и мониторите на компјутерите, луминисцентните ламби, светлинските диоди, вградени во сите современи електронски прибори, бројките на некои часовници, материјалите што гнијат, стомачињата на светулките. Според

тоа, луминисцентните извори се како вештачки, така и природни.

Зад големиот број на различни видови на луминисценција се крие еден и ист механизам на светење на телата.

При споредувањето на топлинските и луминисцентните извори, кои зрачат во една иста спектрална област, се покажува дека температурата на луминисцентните е изненадувачки ниска. Имено, навистина екранот на телевизорот, што емитува бела светлина, практично не е загреан. Додека, пак, од гледна точка на претставите за топлинското зрачење неговата температура би требало да му биде повисока од 1000 °C. Тој факт укажува дека луминисценцијата не настанува за сметка на внатрешната енергија на телата, т.е. од хаотичното топлинско движење на честиците (атоми, молекули, јони) на телата коешто, повеќе или помалку, зависи од температурата на телата.

За разлика од топлинското зрачење, луминисценцијата е нерамнотежен термодинамички процес на испуштање на некохерентно зрачење и се должи на **внатрешната енергија на поодделна честица**, било тоа да е атом, молекул или јон. Таа енергија не е поврзана со нивното топлинско движење. Секако постоењето на внатрешната енергија се објаснува со фактот дека споменатите честици имаат своја структура: атомите и јоните се изградени од јадра и електрони, а молекулите од атоми.

Внатрешната енергија за секој определен вид на честици се карактеризира со минимално можна големина, кога тие се наоѓаат во основната невозбудена состојба.

Ако честицата поседува внатрешна енергија поголема од минималната величина дека таа е возбудена. Честицата во возбудената состојба може да се најде во текот на определено време (во зависност од типот на супстанцијата од 10^{-8} s до неколку часови, денови, па и месеци). Возбудената честица се стреми да го оддаде преку една или друга форма вишокот енергија. Процесот на оддавање на таа внатрешна енергија при којшто честицата се враќа во основната состојба е наречен **релаксација**. Кога енергијата се оддава како светлина величина дека честицата **свети**, а добиената светлина се нарекува луминисцентна.

Според тоа, количеството на внатрешна

енергија на честицата и емитираната светлина се определени од структурата на конкретните атоми, молекули и јони. Важно во овој случај е дека изворот на енергија за тој вид на зрачење е внатрешната енергија на одделните честици и луминисценцијата се должи на претворувањето на дел од таа енергија во светлина. Оттука следува дека својствата на луминисцентното зрачење зависат силно од видот на честицата.

Очигледно, штом вишокот на количество на внатрешна енергија се потроши, т.е. честицата релаксира, емитирањето на луминисцентното зрачење престанува. Луминисцентното зрачење е со конечна должина на траење τ што значително го надминува периодот T на светлинските бранови ($\tau \gg T$ - за видливата светлина T е од редот 10^{-14} s).

Во зависност од начинот на настанувањето, т.е. од тоа од кој вид енергија се возбуждува луминисценцијата разликуваме:

Радиолуминисценција - настанува под дејство на високоенергетски честици или радиоактивни зраци (овој вид на луминисценција е значаен при детекција на јонизирачки зрачења).

Катодолуминисценција - настанува како резултат на енергијата која ја предаваат електроните (катодните зраци) при судир со дадена материјална препрека. Врз основа на примената на оваа појава работат најголем број екрани на различни катодни цевки (на пример, кај осцилоскопите, телевизорите, мониторот на компјутерите).

Електролуминисценција - настанува при директното претворување на електричната енергија во енергија на електромагнетно зрачење, и тоа обично при електрично празнење низ разредени гасови. Бојата на луминисценцијата зависи од природата на гасот. На овој принцип работат флуоресцентните светилки.

Во светлинските диоди приложениот прав еднонасочен електричен напон доведува до рекомбинација на електрони и празнини, при што се појавува т.н. **рекомбинациона луминисценција**.

Хемолуминисценција - се појавува како резултат на претворувањето на хемиската енергија во електромагнетно зрачење при определени хемиски реакции.

Биолуминисценција (хемолуминисценци-

ја на живите организми) - се јавува при протекување на хемиски реакции во живите организми. На пример, светењето на стомачето на светулката се должи на возбуждувањето на специфична супстанција како резултат на протекување на сложени биохемиски реакции.

Триболуминисценција - настанува како резултат на претворувањето на механичката енергија во електромагнетно зрачење при триење или деформација на тврдите тела.

Луминисценција може да предизвикаат и рендгенските зраци. Тоа е **рендгенолуминисценција**.

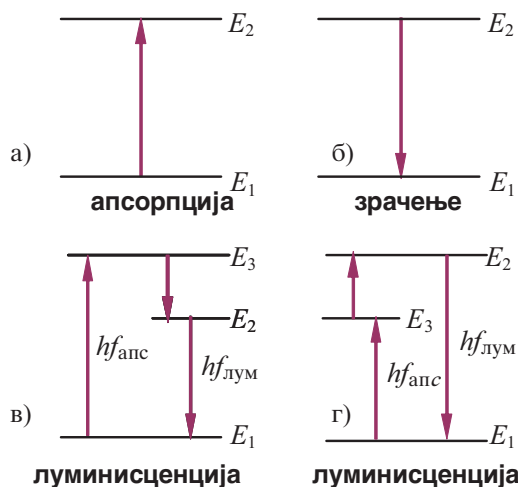
Фотолуминисценција - се појавува како резултат на апсорпција на светлинско зрачење од дадена супстанција. Како по правило при фотолуминисценцијата на тврдите и течните супстанции се емитира зрачење со поголема бранова должина во однос на апсорбираното зрачење. Обично за возбуждувања се користи ултравиолетова светлина, и се појавува фотолуминисцентно зрачење во видливиот дел од спектарот. Со други зборови, кога дадена супстанција се осветлува со светлина со бранова должина λ_1 , таа емитира светлина со поголема бранова должина λ_2 . На таков начин дадената супстанција врши трансформација на светлината со помала бранова должина во светлина со поголема бранова должина и се нарекува **фотолуминисцентна супстанција**.

Ова својство на фотолуминисценцијата било утврдено 1852 година од англискиот учен А. Стокс, а денес познато како Стоксово правило: **спектарот на фотолуминисценцијата е поместен на страната кон подолгите бранови должини во споредба со спектарот на апсорбираното зрачење**.

Кога возбуждувањето на повисоко енергетско ниво и зрачењето на фотон при луминисценцијата се случува во рамките на еден атом, тоа е поврзано со три или повеќе нивоа во него (сл. 1).

Процесите на апсорпција и зрачење се остваруваат само помеѓу две нивоа E_1 и E_2 (сл. 1а и б). Кога луминисценцијата настанува обично со апсорпција на фотон со енергија $hf_{\text{апс}}$, тогаш се остварува премин од нивото E_1 на нивото E_3 (сл. 1.в). При заемнодејството со соседните атоми или молекули, возбудениот атом може без да зрачи да им предаде дел од

својата енергија и да премине од нивото E_3 на нивото E_2 (енергијата $E_3 - E_2$ ја зголемува внатрешната енергија на средината). Очигледно, при преминот на возбудениот атом од енергетското ниво E_2 на E_1 фреквенцијата на луминисцентното зрачење $f_{\text{лум}}$, е помала од фреквенцијата на апсорбираниот фотон за возбудување $f_{\text{апс}}$,



Сл. 1. Процеси на апсорпција и зрачење и луминисценција на светлина

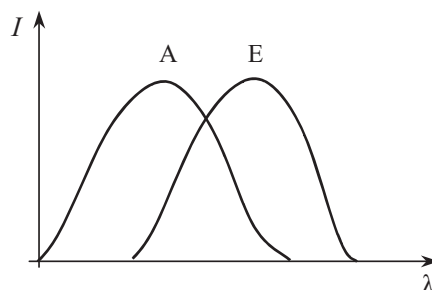
Енергетската шема на луминисценцијата може да биде и посложена, кога во некои малку веројатни случаи средината оддава дел од својата енергија на атомот и тогаш $f_{\text{лум}} > f_{\text{апс}}$, (сл. 1.г).

Енергетските нивоа E_1 , E_2 и E_3 се карактеристични за даден атом. Затоа набљудувањето на спектрални линии со фреквенции $f_{\text{лум}}$, е доказ за присуството на такви атоми во дадената средина, т.е. во примерокот којшто луминисцира. Исто така, и за процесите коишто протекуваат меѓу апсорпцијата и светењето при луминисценцијата.

За разлика од гасовите, тврдите и течните тела при фотолуминисценцијата емитуваат светлина која не се состои од одделни спектрални линии, туку од широки и тесни континуирани ленти.

Како илустрација на Стоксовото правило е даден графикот на сл. 2, на кој е прикажан интензитетот I на апсорбираната спектрална

лента (А) и емитуваната (Е) во зависност од брановата должина (λ). Од сл. 2 се гледа дека лентата (Е) на фотолуминисцентната светлина е поместена во однос на лентата (А) на апсорбираната светлина кон подолгите бранови должини.



Сл.2. Релативен распоред на апсорпционите и фотолуминисцентните ленти

Квантната теорија за зрачењето Стоксовото правило при луминисценцијата го објаснува според сл. 1в. Ако изгубениот дел од енергијата на молекулот го означиме со A , тогаш останатата енергија $hf_{\text{лум}}$ што ја емитува молекулот при враќање во основната невозбудена состојба што ја емитува во вид на луминисцентна светлина е

$$hf_{\text{лум}} = hf_{\text{апс}} - A. \quad (1)$$

Бидејќи $A \geq 0$, $f_{\text{лум}} \leq f_{\text{апс}}$, т.е. фреквенцијата на емитуваната светлина е еднаква или помала од фреквенцијата на возбудувачката (екситацисконата) светлина.

Времето за релаксирање на честиците (атоми, молекули и јони) по престанокот на осветлувањето на супстанцијата, т.е. по прекилот на доток на енергија, може да се менува во многу широки граници (од 10^{-12} s до цели денови) во зависност од видот на честиците и условите во кои се наоѓаат. Како резултат на тоа фотолуминисценцијата ќе има и различно **конечно време на гасење**.

Според конечното време на гасење фотолуминисценцијата се дели на **флуоросценција и фосфоресценција**. Ако конечното време на гасење е сосема мало, така што практично фотолуминисценцијата на супстанцијата исчезнува едновременно со престанувањето на нејзиното осветлување, тогаш таа е наречена

флуоресценција. Ако конечното време на гасење е значително големо (трае минути, часови или дури и денови), таа е наречена **фосфоресценција**.

Фотолуминисценцијата се набљудува во многу течности и гасови, а фосфоресценцијата во тврдите тела. На пример, ако со ултравиолетова светлина се осветли раствор од флуоресцин, ќе свети со карактеристична зелена боја; раствор од родамин ќе свети со портокалова боја, а раствор од хинин - со сина боја.

Кристалните супстанции, кои силно и долго фосфоресцираат, се наречени **кристалофори**. Тука спаѓаат различни соли, коишто содржат многу мал број на примесни атоми од определени супстанции, наречени **активатори**. Ваквите состави, во кои фосфоресценцијата е условена од присуството на активатори, често се нарекуваат **люминофори**. Така како најдобрилюминофори се: цинксулфид активиран со бакар силно фосфоресцира со зеленкаста светлина. Сулфиди на земноалкалните метали активирани со бакар или олово.

Како квалитетнилюминофори кај екраните на катодните цевки на осцилоскопот, телевизорот, и мониторот на компјутерот се користат кристалофори, што содржат смеса од цинксулфид и калиумсулфид активирани со сребро. Кај ТВ – приемниците во боја на екранот подредено се поставени зрна од три кристалнилюминофори, коишто светат со црвена, зелена и сина боја. Друг пример за примена на луминисценцијата се луминисцентните ламби за бела светлина. При тие ламби протекува тлеечко празнење низ разреден гас, притоа гасот емитува невидливо ултравиолетово зрачење. Луминофорот, со кој е покриен сидот однатре на ламбата, го апсорбира ултравиолетовото зрачење, фосфоресцира и притоа емитува видлива светлина. Хемискиот состав се избира така што светлината на ламбата да биде блиска по својот состав на дневната светлина. Луминисцентните ламби имаат поголем коефициент на полезно дејство од светилките со вжарена жичка.

Спектарот на фотолуминисценцијата не зависи од апсорбираното зрачење, но зависи само од структурата на супстанцијата. Значи, тој е карактеристичен за секоја супстанција. Тоа е искористено при луминисцентната спек-

трална анализа за определување на составот и чистотата на супстанциите, како и за откривање на присуството на дадено соединение во сложена смеса. Осетливоста на овој метод при анализата е многу голема. Луминисценцијата од даденлюминофор во раствор може да се набљудува при концентрации од 10^{-7} - 10^{-9} g/ml. Поради тоа фотолуминисцентните спектри се користат како во прехранбената индустрија, минерологијата, криминалистиката, медицината, така и во научните лаборатории.

ПРАШАЊА И ЗАДАЧИ

1. На кое зрачење (топлинско или луминисцентно) одговара светењето на: а) жар; б) рекламни цевки; в) свездите; г) стрелките на часовник; д) некои медузи?

2. Според што се разликуваат процесите на фосфоресценција и флуоресценција?

3. Дајте примери за различни видови луминисценција во зависност од начинот на возбудување на структурните честици од супстанцијата.

16.13. РЕНДГЕНСКИ ЗРАЦИ

Рендгенските зраците претставуваат електромагнетни бранови со многу мала бранова должина и тоа од 10 до 10^{-4} nm. Денес се примената на современи акцелератори на електрони областа на рендгенските зраци е проширена. Во спектарот на електромагнетно зрачење рендгенските зраци кон страната на поголемите бранови должини се граничат со ултравиолетовите зраци, додека кон страната на помалите бранови должини во голема мерка се прекриваат со γ - зраците.

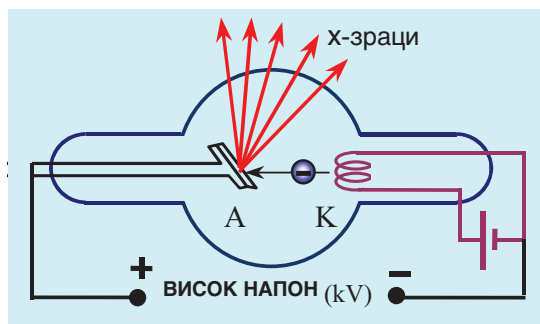
Изучувајќи ги појавите на електрично празнење, во 1895 год. В. Рентген забележал луминисцентно светење, иако цевката се наоѓала затворена во кутија, непрозрачна за видливата светлина.

Веднаш по откривањето на X - зраците, В.Рентген забележал дека зраците, освен што предизвикуваат луминисценција, имаат многу

слични особини со светлинските зраци. На пример: се шират праволиниски, фрлаат остри сенки на предметите поставени на нивниот пат, дејствуваат врз фотографската емулзија, одделуваат фотоелектрони од металните површини. Како и сите електромагнетни бранови, рендгенските зраци не се отклонуваат во електрично и магнетно поле. Но според некои особини, рендгенските зраци битно се разликуваат од светлинските зраци. Така, тие се невидливи, имаат голема пробивна способност, не може да се фокусираат со оптички леќи и огледала, имаат јонизирачка способност, покажуваат силно биолошко дејство врз живите клетки. Но ако дејството е подолго или се врши со поинтензивни зраци, изложените клетки можат да бидат и наполно уништени. Секако, најосетливи на рендгенско зрачење се клетките кои брзо растат и се размножуваат.

Подоцна биле направени експерименти за дифракција и интерференција на рендгенските зраци.

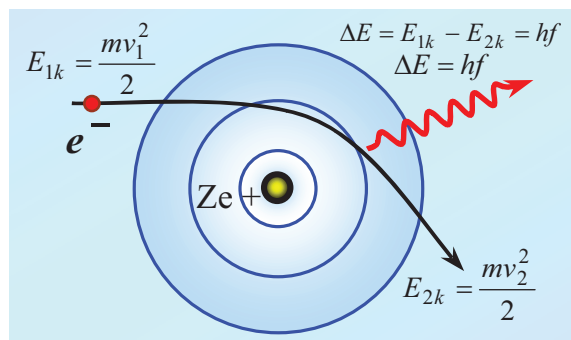
Една од најважните особини на рендгенските зраци е нивната голема пробивна способност. Таа низ различни супстанции е различна. Тие лесно поминуваат низ хартија, картон, обично стакло, дрвени плочи, тенки метални плочи. Но уште В. Рендген утврдил дека тие потешко поминуваат низ материјали со голема густина. Затоа оловото се користи за заштитни екрани, гумени престилки, ракавици и др.



Сл. 1. Рендгенска цевка

Добивање рендгенски зраци. - Наједноставен извор за добивање на рендгенските зраци, се рендгенските цевки, меѓу кои најприменета е Кулицовата рендгенска цевка прикажана на сл.1. Цевката се состои од еден високо

евакуиран стаклен или метален балон. Од катодата К, по пат на термоелектронска емисија, снопот електрони се насочува кон анодата А (антикатода). Таа е направена од метал со висока точка на топење. Поради високиот напон од 10 до 200 kV меѓу катодата и анодата, емитуваните електрони со голема брзина удираат на анодата. Нагло заочени од анодата електроните ја предаваат својата кинетичка енергија, при што дел од енергија се емитува како рендгенско зрачење (сл.2)



Сл. 2.

За подобро фокусирање на електроните, емитувани од катодата, анодата има сферен облик. Со промена на јачината на струјата на греење, се менува и бројот на електроните кои ја напуштаат катодата. Интензитетот на рендгенското зрачење притоа расте пропорционално со јачината на струјата. Интензитетот на рендгенското зрачење зависи и од редниот број Z на елементот од кој е направена анодата и напонот меѓу анодата и катодата U_a :

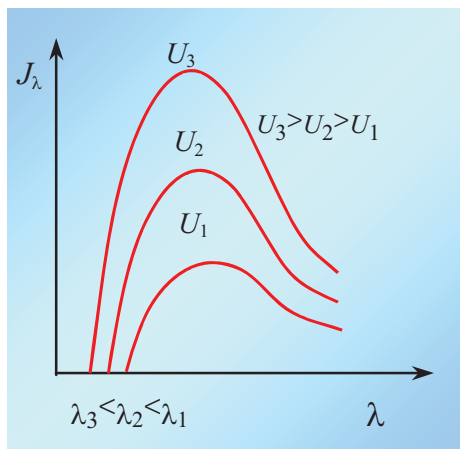
$$J \sim Z I U_a^2, \quad (1)$$

каде што I е јачината на струјата во анодното коло. Бидејќи околу 99% од енергијата на електроните кои паѓаат на анодата, направена од тешко топиви метали, се издвојува во топлина, таа мора интензивно да се лади.

Рендгенскиот спектар се состои од континуиран и линиски спектар. Континуирираниот спектар припаѓа на т.н. *заочно* зрачење, додека линискиот на *карактеристичното* рендгенско зрачење.

Закочно рендгенско зрачење

При закочување на брзите електрони или која било наелектризирана честица се емитува електромагнетно зрачење кое има *континуиран спектар*, т.е. опфатени се рендгенски зраци со сите можни бранови должини.



Сл.3. Зависност на интензитетот на закочното зрачење од брановата должина за различни вредности на анодниот напон

Од дијаграмите на сл.3 може да се уочи дека кривите за распределбата на интензитетот не минуваат низ координатниот почеток, а интензитетот станува еднаков на нула при конечни вредности на брановата должина на рендгенските зраци. Значи, постои краткобранова граница λ_{\min} на закочното рендгенско зрачење.

Кинетичката енергија на електроните забрзани од напонот помеѓу катодата и анодата U_a е:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_a, \quad (2)$$

каде што m_e , v и e соодветно се масата, брзината и полнежот на електронот.

Постоењето на краткобрановата граница во континуираниот спектар λ_{\min} непосредно следува од квантната природа на зрачењето.

Имено, ако рендгенското зрачење се појавува за сметка на енергијата што ја губи

електронот при неговото закочување, тогаш енергијата на еден квант од тоа зрачење hf не може да биде поголема од енергијата на електронот (eU_a). Тоа значи, така добиените фотони ги имаат сите можни фреквенции, почнувајќи од оние кои ја задоволуваат неравенката:

$$hf \leq eU_a. \quad (3)$$

Оттука следува дека максималната енергија, а со тоа и максималната фреквенција на континуираниот емисионен спектар се добива кога при еден судир електронот ја губи целокупната енергија. Таа енергија се емитува како фотон со енергија $hf_{\max} = eU_a$, односно:

$$f_{\max} = \frac{eU_a}{h}. \quad (4)$$

ако $f_{\max} = c/\lambda_{\min}$

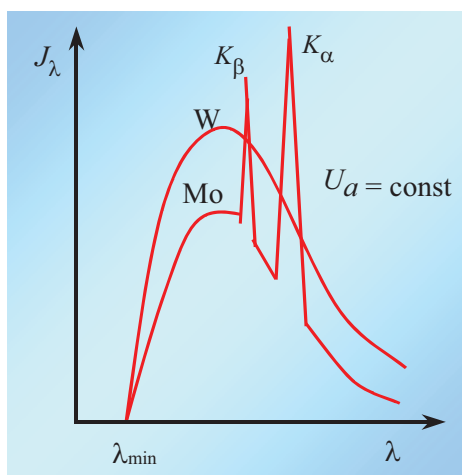
$$\lambda_{\min} = \frac{ch}{eU_a} \quad (5)$$

каде што c е брзина на светлината. Овој израз се покажал многу погоден за определување на Планковата константа.

16.14. КАРАКТЕРИСТИЧНИ РЕНДГЕНСКИ ЗРАЦИ

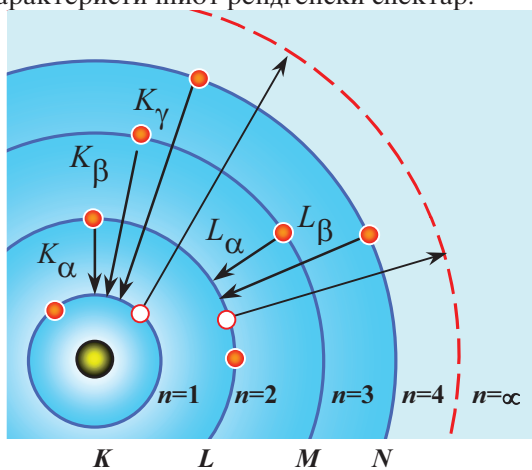
Ако напонот приложен на рендгенската цевка постепено се наголемува и достигнува определена критична вредност, карактеристична за супстанцијата од која е направена анодата, заедно со континуираното рендгенско зрачење се појавува и карактеристично рендгенско зрачење. Имено, во добиениот спектрограм има повеќе или помалку интензивни рески линии, кои се наоѓаат врз фонот од континуираниот спектар на закочното рендгенско зрачење.

На сл.4 е прикажан спектрограм на карактеристичните рендгенски зраци за молибденот. На истата слика за компарација е прикажан и континуираниот спектар на волфрамот кој има повисока критична вредност за напонот.



Сл. 4. Линиски спектар на рендгенско зрачење

Карактеристичниот линиски спектар на рендгенското зрачење се добива кога електроните забрзани во електричното поле меѓу катодата и анодата имаат доволно енергија да продрат во внатрешните слоеви од атомите на елементот од кој е направена анодата. Како резултат на тоа, во некој од внатрешните слоеви може да се создаде "шуплина" (испразнето место на електронот). Така создадената шуплина по 10^{-8} s, може да се пополни со електрон од повисоките слоеви, и притоа се емитува рендгенски квант со енергија еднаква на разликата на енергиите на двата слоја. На сл.5 шематски е прикажано добивање на карактеристичниот рендгенски спектар.



Сл. 5. Карактеристичен рендгенски спектар.

При премин на електроните од подалечните слоеви на K -слојот ($n=1$), се добиваат спектрални линии што ја даваат K -серијата; спектралните линии што се добиваат при пополнувањето на празно место во L -слојот ($n=2$) со електрон од подалечните слоеви ја даваат L -серијата. Аналогно се добиваат и останатите серии M , N , O , P . Секоја спектрална серија е составена од неколку спектрални линии означени со индексите α , β , γ ,

На пример, K_α спектралната линија се добива кога испразнетото место во K слојот се пополни со електрон од L слојот. Спектралните линии од K - серијата имаат најмала бранова должина (најголема енергија) и се најпродорни.

Англискиот физичар Х. Мозли утврдил дека за секоја спектрална серија постои определена закономерност, односно квадратниот корен од фреквенцијата на спектралната линија од карактеристичниот рендгенски спектар е пропорционален со редниот број Z на елементот:

$$\sqrt{f} = b(Z - \sigma) \quad (6)$$

каде што b е константа на пропорционалност која за различните спектрални линии има различни вредности, а константата σ за секоја серија е различна.

Според Мозлиев закон, при преминувањето од карактеристичниот рендгенски спектар на еден елемент со помал реден број кон таков спектар на друг елемент со поголем реден број, спектралните линии се поместуваат на страната кон пократките бранови должини.

Бидејќи секој хемиски елемент има свој карактеристичен спектар, овие спектри може да се користат за **рендгеноспектрална анализа**.

Карактеристичните рендгенски спектри на даден елемент се разликуваат од неговите оптички линиски спектри. Разликата е резултат на тоа што при оптичките линиски спектри учествуваат електроните од последниот непополнет слој, додека при добивање на карактеристичните рендгенски спектри учествуваат електроните од внатрешните слоеви на атомот за кои треба поголема енергија да се побудат. Важна особина на овие спектри е тоа што атомите од некој хемиски елемент, независно

од тоа во какво хемиско соединение се, секогаш даваат ист карактеристичен рендгенски спектар.

Прашања, задачи, активности

1. Може ли рендгенските зраци да предизвикаат фотоефект ако најдат на метална препрека?

2. Определете ја енергијата на рендгенски квант со бранова должина $\lambda = 0,01 \text{ nm}$.

(Одговор : $1,24 \cdot 10^5 \text{ eV}$)

3. Определете ја минималната бранова должина и максималната фреквенција на континуирираниот спектар на рендгенското зрачење ако енергијата на електроните кои удираат на анодата е 200 keV .

(Одговор: $\lambda_{\min} = 0,62 \cdot 10^{-2} \text{ nm}$; $f_{\max} = 4,8 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$)

4. Да се определи λ_{\min} на закочното рендгенско зрачење, ако напонот помеѓу анодата и катодата на рендгенската цевка е 100 kV ?

(Одговор: $\lambda = 0,0123 \text{ nm}$)

16.15. ПРИМЕНА НА РЕНДГЕНСКИТЕ ЗРАЦИ

Својствата на рендгенските зраци како што се: мала бранова должина, голема продорност, јонизациона способност и други, нашле широка примена. Во медицината рендгенските зраци се користат при рендген-дијагностиката и терапијата, а во техниката и индустријата се користат како сигурен метод за контрола и тестирање на материјалите. Овој метод е познат како **рендгенска дефектоскопија**. Со овој метод може да се откријат шуплини, пукнатини, дефекти на заварени споеви и други дефекти на разни машински делови или градежни елементи.

Дифракцијата, пак, на рендгенските зраци се користи за испитување на структурата на материјата позната како **рендгеноструктурна анализа**.

Овде ќе се запознаеме со некои основни својства на рендгенските зраци преку кои е остварена и примената.

Широката примена на рендгенското зрачење во техниката и медицината се базира на законите на апсорпција т.е. различната продорност на рендгенските зраци низ различните материјали.

Различната апсорпција на рендгенскиот сноп при негово поминување низ нехомогена средина, овозможува добивање слика на тој предмет. Имено, може да се видат недостатоци на некои материјали, на пример нехомогености или пукнатини.

Ако паралелен сноп на монохроматско рендгенско зрачење минува низ даден апсорбент со дебелина d , опитите покажуваат дека интензитетот I на рендгенските зраци експоненцијално опаѓа со наголемувањето на дебелината:

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \quad (1)$$

каде што I_0 е интензитетот на рендгенските зраци што паѓаат на материјалот; " e " е основа на природен логаритам еднаков на $e = 2,72$, μ е **линеарен коефициент на апсорпција** на рендгенските зраци. Линеарниот коефициент на апсорпција се изразува во m^{-1} . Тој зависи од природата на материјалот, односно од неговата густина ρ , брановата должина на рендгенското зрачење λ и редниот број на елементот Z . При константни вредности за густината и брановата должина линеарниот коефициент на апсорпција е:

$$\mu = \sim Z^4. \quad (2)$$

Големата разлика во апсорпцијата на РЗ во различните средини овозможи да се развие **рендгенска дефектоскопија** и повеќе медицински рендген дијагностички методи.

При **рендгенографија** ликот се фиксира на специјален филм.

ПРИМЕР 1. Имајќи ја предвид равенката (2) да се направи компарација на коефициентите на апсорпција на коските, кои, главно, содржат калциум фосфат ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) и меките ткива во чиј состав главно влегува водата.

Решение. Земајќи предвид дека редните броеви на Ca, P, O, и H, соодветно се 20, 15, 8, 1 и користејќи ја равенката (2), се добива:

$$\frac{\mu_m \text{ коска}}{\mu_m \text{ H}_2\text{O}} = \frac{3 \cdot 20^4 + 2 \cdot 15^4 + 8 \cdot 8^4}{2 \cdot 1^4 + 8^4} \approx 150$$

Имено, апсорпцијата на РЗ во калциум фосфатот е околу 150 пати поголема од апсорпцијата во водата.

ПРИМЕР 2. Да се определи дебелината за која интензитетот на рендгенското зрачење се преполовува. Таа дебелина се нарекува **полу-дебелина** и се означува со $d_{1/2}$.

Решение: Ако интензитетот е $I=I_0/2$ тогаш дебелината е $d=d_{1/2}$. Законот за апсорпција равенка (1) може да се напише:

$$\frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu d_{1/2}} .$$

Ако се изврши логаритмирање, се добива $\ln 2 = \mu d_{1/2}$, односно:

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} .$$

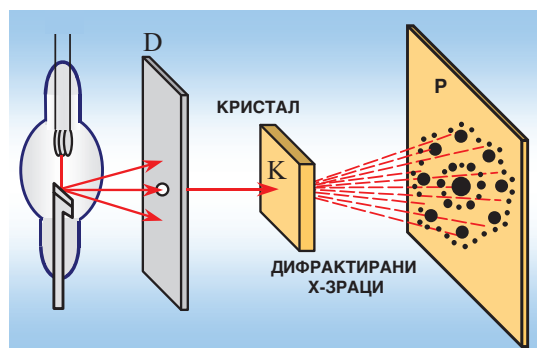
Од последната равенката следува дека полудебелината е толку помала, колку линеарниот коефициент на апсорпција на материјалот е поголем (големо Z). Оваа равенка се користи за да се определи дебелината на апсорбентот што се користи за заштита од зрачење.

Дифракција на рендгенски зраци

За да се набљудува дифракција на рендгенски зраци, неопходно е дифракциона решетка со константа, споредлива со нивната бранова должина. Оптичките дифракциони мрежички се премногу груби за да се добие дифракциона слика. Од друга страна е познато дека растојанието меѓу атомите на тврдите тела е од ред на големина на брановата должина на рендгенските зраци. Тоа го навело германскиот физичар М. Лауе на идеја како дифракциона мрежичка за рендгенските зраци да користи кристали.

При рамнотежна состојба, атомите, јоните или молекулите на кристалите се правилно распоредени. Тие лежат во јазлите на кристалната решетка и формираат *криста-*

лографски (атомарни) *рамнини*. Растојанието d (0,1 nm) помеѓу рамнините е наречено **константа на решетката на кристалот**. М. Лауе и соработниците успеале да добијат дифракциона слика со рендгенски зраци. Шемата на експериментот кој го потврдува добивањето на дифракциона слика е прикажана на сл. 4.



Сл. 4. Експериментална шема за дифракција на рендгенски зраци од кристал.

Рендгенско зрачење паѓа врз оловната плоча D која пропушта тесен сноп рендгенски зраци кои, по поминувањето низ кристалот K, паѓаат на фотоплочата P. На фотоплочата, освен интензивната централна темна дамка, што одговара на праволиниската насока на рендгенските зраци, се добиваат и многу помали темни дамки, правилно распоредени околу централната.

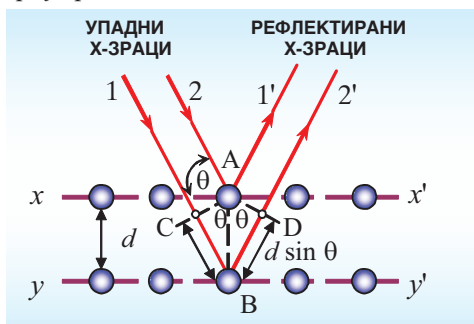
Темните дамки се на места каде дифрактираните рендгенски зраци со интерференција максимално се засилуваат. Тие насоки зависат од брановата должина на рендгенските зраци, распределбата на атомите, односно јоните во кристалната решетка и од аголот на паѓање на зраците.

Различните кристали даваат различни дифракциони слики, таканаречени **дијаграми на Лауе** (сл.5). Преку остварените дифракциони слики, не само што била докажана брановата природа на рендгенските зраци била измерена и нивната бранова должина.

Ако, пак, се пропуштат рендгенски зраци со позната бранова должина низ даден кристал, од добиената дифракциона слика може да се суди за кристалната структура.

Во 1913 година англиските физичари В.Х. Брег и В.Л. Брег, татко и син, го потврдија експериментот на Лауе и на неговата теорија и дадоа многу едноставна теориска релација за дифракцијата на рендгенските зраци, денес позната како **Брег-Вулфова равенка**. Тие на повеќе примери покажале дека откритието на Лауе може да се искористи за изучување на структурата на материјата.

Нека сноп од монохроматско рендгенско зрачење паѓа на кристал под агол θ во однос на паралелни рамнини кои поминуваат низ јазлите (атомите) на дводимензионална кристална решетка (сл. 6). Упадните зраци кои се рефлектираат од различни рамнини се кохерентни и може да интерферираат. Интерференцијата на рефлектираните зраци ќе даде засилување, ако патната разлика на двата зрака, рефлектирани од две соседни рамнини на кристалот, е цел број бранови должини.



Сл. 6. Дифракција на рендгенски зраци од дводимензионална кристална решетка.

Да ја пресметаме патната разлика на два соседни зрака кои ќе интерферираат. На сл.6 се прикажани две соседни рамнини на кристалот нормални на рамнината на цртежот во кои лежат јазлите на кристалната решетка, означени со кругчиња.

Зраците 1 и 2 од монохроматското рендгенско зрачење, што паѓаат под аголот θ кон површината на кристалот, се одбиваат од првата $x - x'$ и втората $y - y'$ – рамнина. Одбиените зраци 1' и 2' со атомарните рамнини на кристалот зафаќаат ист агол θ .

За да се определи патната разлика на двата одбиени зрака, од точката А се повлекуваат нормалите АС и АД на зраците 1 и 2'. Од сл.6 се гледа дека $\Delta = |BC| + |BD| = 2|BC|$.

Од правоаголниот триаголник АВС следува:

$$|BC| = d \sin \theta .$$

Апсолутниот индекс на прекршувањето за сите средини на рендгенските зраци е приближно еднаков на единица и бараната патна разлика изнесува $\Delta = 2d \sin \theta$.

Според тоа, условот за дифракционен максимум од m -ти ред е зададен со **Брег-Вулфовата равенка**:

$$2d \sin \theta = m\lambda , \quad (1)$$

каде што $m = 1, 2, 3, \dots$ е цел број и го дава редот на дифракцијата, λ е брановата должина на рендгенските зраци, d е константата на решетката на кристалот. Брег-Вулфовата равенка, при познати λ , θ и m , дава можност да се определи константата на кристалната решетка. Оваа равенка е основа на методот *рендгенструктурна анализа*.

Кога се знае константата на решетката на кристалот што се користи за дифракција на рендгенските зраци, а се измери аголот θ при кој се добива максимумот, според Брег-Вулфовата равенка може да се определи и брановата должина на рендгенските зраци.

Со дифракција на рендгенски зраци се испитува и структурата на многу вируси и макромолекули. Со дифракција на рендгенски зраци беше проучена структурата (двојната спирала) на ДНК.

ПРИМЕР. Рендгенски зраци со бранова должина $\lambda = 0,1 \text{ nm}$ паѓаат на кристал чија константа на решетката е $d = 0,5 \text{ nm}$. Под каков агол треба да паднат зраците во однос на рамнината на кристалот, за да се набљудува првиот дифракционен максимум?

Решение: Одговор на поставеното прашање ќе се добие од равенката (1) ако во неа се постави $m = 1$.

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{2d} = \frac{0,1}{2 \cdot 0,5} = 0,1, \quad \theta = 5^\circ 40'$$

На споменикот на Рендген во Минхенскиот музеј пишува: "Според него наречените зраци на лекарат му ја покажуваат внарешноста на живиот организам, на инженерот внатрешноста на неговите градби, а на истражувачот му даваат информации за градбата на атомот". Кои се методите со кои може да се извршат наведените истражувања.

17. 1. СТРУКТУРА НА АТОМСКОТО ЈАДРО

Атомското јадро е централниот дел на атомот. Во него е сконцентрирано позитивното количество електричество. Денес со сигурност се знае дека атомското јадро се состои од протони и неутрони кои под заедничко име се познати како **нуклеони**.

Протонот (p) има позитивен полнеж, еднаков со полнежот на електронот. Неутронот (n) е неутрална честица. Според тоа, само протоните придонесуваат за количеството електричество на јадрото.

Атомското јадро се карактеризира со електричен полнеж:

$$Q = Ze, \quad (1)$$

каде што со e е означен елементарниот електричен полнеж. Z е **атомскиот број на атомското јадро**, еднаков со бројот на протоните. Z се совпаѓа со **редниот број на елементот во Менделеевиот периоден систем**. Бидејќи атомот како целина е електро-неутрален, редниот број истовремено го определува и бројот на електроните.

Вкупниот број нуклеони A во атомското јадро се вика **масен број**. Масениот број на елементот претставува збир од бројот на протоните Z и бројот на неутроните N во јадрото на дадениот елемент, значи:

$$A = N + Z. \quad (2)$$

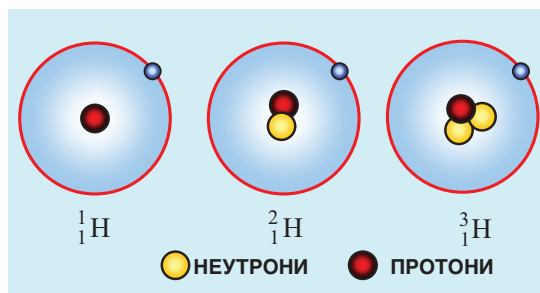
Јадрото се означува со истите симболи како и неутралниот атом. На пример, симболот



покажува дека станува збор за атом со реден број Z и масен број A . Така, на пример, пишувајќи ${}^7_3\text{Li}$, се означува јадрото на литиумот со реден број 3 и масен број 7. Тоа јадро е составено од вкупно 7 нуклеони, од кои 3 се протони и 4 неутрони. Исто така ${}^{238}_{92}\text{U}$ го означува јадрото на елементот ураниум кое содржи 238 нуклеони, од кои 92 се протони.

Во природата постојат голем број атомски јадра. Познати се околу 280 стабилни јадра

и повеќе од 700 (природни и вештачки добиени) нестабилни јадра. До денес се познати 118 елементи чиј реден број е од $Z=1$ до $Z=118$.



Сл. 1. Изотопи на водород.

Јадрата со еднаков атомски број Z , а различен масен број A (со различен број неутрони $N = A - Z$) се викаат **изотопи**. Повеќето од елементите се јавуваат во вид на стабилни и нестабилни изотопи. На пример, водородот ($Z=1$) се јавува во вид на три изотопи (сл.1): ${}^1_1\text{H}$ - протииумот ($Z=1, N=0$), ${}^2_1\text{H}$ - деутериумот ($Z=1, N=1$), ${}^3_1\text{H}$ - трициумот ($Z=1, N=2$); оловото има три стабилни изотопи ${}^{206}\text{Pb}$, ${}^{207}\text{Pb}$ и ${}^{208}\text{Pb}$, ураниумот има повеќе изотопи ${}^{233}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$.

Јадрата со ист масен број кои припаѓаат на различни елементи се викаат **изобари**. Јадрата на изобарите се градени од еднаков број нуклеони, но имаат различна распределба на протоните и неутроните.

Единица за маса во нуклеарната физика

Масата е карактеристична величина на атомското јадро. Заради малите маси на јадрата и честиците, нивните маси не е zgodно да се изразуваат, како што е вообичаено, во грамови или килограми. Во атомската и нуклеарната физика масите на честиците и јадрата се изразуваат преку **унифицираната единица за атомска маса** која се означува со u . Таа е еднаква на $1/12$ од масата на атомот на изотопот на јаглерод ${}^{12}\text{C}$ за кој масата е еднаква на 12 унифицирани единици за атомска маса

17. Нуклеарна физика

$$m({}^{12}_6\text{C}) = 12,000 \text{ u}; 1 \text{ u} = 1,660538 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Големина на атомското јадро. Јадрата како и сите квантни честици, за кои важат квантномеханичките закони, немаат строго определена граница, така што не е едноставно да се воведат поимот радиус на јадрото.

Првите информации за големината на атомското јадро потекнуваат од Е.Радерфорд кој ги анализира експериментите на Гајгер и Марзден. Имено, тој го проучува расејувањето на α -честици од тенки фолии од злато и заклучува дека најголем дел од масата на атомот е сконцентрирана во јадрото.

Минималното растојание до кое α -честицата во Радерфордовиот експеримент може да се приближи до јадрото, во одредена мерка, може да се смета за големина на атомското јадро. Познавајќи го Кулоновиот закон за интеракција на две позитивно наелектризираны честици, минималното растојание до кое α -честицата со позната енергија може најмногу да се приближи до јадрото е при челен судир (сл.2).

ПРИМЕР 1. Да се определи најмалото растојание до кое α -честицата може да се приближи до атомското јадро на златото ($Z = 79$). α -честиците што притоа се користат се добиени од природните радиоактивни изотопи и имаат енергија: $E = 7,7 \text{ MeV} = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ (или брзина $v = 2 \cdot 10^7 \text{ m/s}$). Масата на α -честицата е $m_\alpha = 4 \text{ u} = 4 \cdot 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Решение. Потсетете се, потенцијалната енергија на честица со полнеж Q_0 (во овој случај α -честицата - $2e$) од изворот на точкест полнеж Q (јадрото- Ze) е

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q Q_0}{R}$$

На растојание R , целокупната кинетичка енергија на α -честицата преминува во потенцијална енергија на таа честица во електростатичкото поле на јадрото - мета, т.е:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2eZe}{R}$$

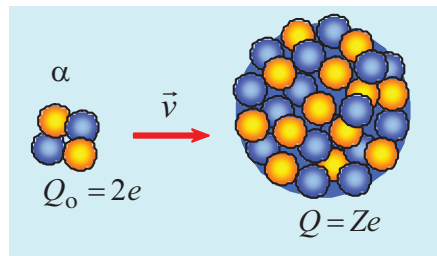
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \quad e = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Според тоа најмалото растојание до кое може да се приближи α -честица до атомското

јадро изнесува: $R = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4eZe}{mv^2}$

$$R = 9 \cdot 10^9 \frac{4 \cdot 79 \cdot (1,6022 \cdot 10^{-19})^2}{4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 4 \cdot 10^{14}} \text{ m}$$

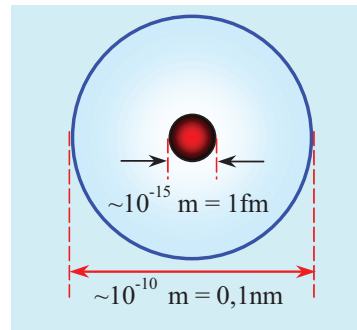
$$R \approx 27,5 \cdot 10^{-15} \text{ m} \quad 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$$



Сл. 2.

Овој податок покажува дека линиските димензии на јадрото не се поголеми од 10^{-14} m . Ако се земе дека радиусот на атомот е од ред на големина $0,05 - 0,1 \text{ nm}$, ова е една убедлива потврда на Радерфордовото сфаќање дека атомското јадро зазема неспоредливо мал дел од волуменот што го има атомот како целина.

Густината на атомското јадро не зависи од бројот на нуклеоните во јадрото. Просечната густина на јадрената материја е еднаква за сите јадра и изнесува околу $2 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$. Таа е огромна.



Сл. 3. Јадрен модел на атомот

17.2. ЈАДРЕНИ СИЛИ

Атомското јадро претставува релативно стабилен квантномеханички систем од протони и неутрони. Релативната стабилност на јадрото укажува на тоа дека меѓу нуклеоните кои влегуваат во состав на атомското јадро дејствуваат специфични сили кои ги надвладуваат Кулоновите одбивни сили меѓу протоните. Тие се нарекуваат **јадрени (нуклеарни) сили**.

Јадрените сили спаѓаат во т.н. **силно заемнодејство**, најинтензивното заемнодејство во природата. Тие се привлечни сили, но не се од електрична природа. Тие имаат посебни карактеристики:

1. **јадрените сили се сили на краток домет** и се ефикасни само за најблиските соседни нуклеони. *Радиусот на дејствување на јадрените сили* е од ред на големина колку и самото јадро ($2,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$).

Со порастот на растојанието меѓу нуклеоните, дејството на овие сили брзо опаѓа, и тоа со експоненцијална зависност. Просечно, јадрените сили се стотина пати посилни од електромагнетните кои го обезбедуваат постоењето на атомите и молекулите. Тие не дејствуваат меѓу електроните на атомот.

2. **јадрените сили имаат особини на заситување**, т.е. секој нуклеон во самото јадро заемнодејствува само со нај-блиските нуклеони до себе, а воопшто не дејствуваат на нуклеоните надвор од јадрото.

3. **јадрените сили не се централни** – како што се, на пример, гравитационите и електричните сили;

4. **јадрените сили се независни од електричните полнежи на нуклеоните што заемно дејствуваат**. Поради постоење на два вида нуклеони на јадрените сили не влијае електричниот полнеж и тие се исти меѓу два неутрона, меѓу два протона и меѓу неутрон и протон. Затоа овие честици се познати под општо име **нуклеони**.

Сложениот карактер на јадрените сили не овозможува тие да се прикажат со единствени математички релации како што е тоа случај со гравитационите и електромагнетните сили.

Каква е природата на јадрените сили? Јапонскиот физичар Х.Јукава во 1935 година претпоставил дека заемнотодејство меѓу два

нуклеона треба да го пренесува некоја честица што би била квант на јадреното поле. Таква честица е откриена во 1947 год. од Сесил Пауел и е наречена π -мезон или пион. Но за жал теорија од овој тип не е изградена. Во средината на шеесеттите години на xx век постепено се искристализира претставата за **кварковата** структура на нуклеоните.

Моделите за атомските јадра. Со цел да се опишат својствата на атомските јадра и нуклеарните реакции во кои тие учествуваат, досега биле создадени повеќе модели за атомските јадра. Такви се, на пример, моделот на капка, слоестиот модел, моделот на α -честица и др.

Изучувањето преку различните модели на атомските јадра е поради делумното познавање на јадрените сили и непостоењето на целосна и егзактна теорија за прикажување на структурата на атомското јадро и распоредот на нуклеоните во него. Ниту еден од досега поставените модели не е во состојба, од сите аспекти, комплетно да ги опише својствата на атомските јадра и нуклеарните реакции. Секој од моделите прикажува одреден број својства на јадрото и неговите составни делови, така што целосна слика за јадрото може да се добие со примена на повеќе модели. На пример, со *моделот на капка* успешно се објаснува фисијата (цепење) на тешките јадра. Со помош на моделот на капка, може да се објасни густината на атомското јадро. Како резултат од заситеноста на јадрените сили, нуклеоните во јадрото се распоредени рамномерно, па густината на јадрото е хомогена, освен на површината на јадрото.

Според *слоестиот модел*, јадрата со 2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126 (126 е само за неутроните) протони или неутрони имаат пополнети слоеви. Слично како што се најстабилни атомите со пополнети слоеви така се објаснува и стабилноста на овие јадра (*магични јадра*).

Прашања и задачи

1. Што е тоа масен број, реден број?
2. Што се тоа изотопи, а што изобари?
3. Дефинирај ја унифицираната единица за атомска маса
4. Колкав е радиус на атомското јадро?
5. Што се тоа јадрени сили?

17.3. ЕНЕРГИЈА НА СВРЗУВАЊЕ НА АТОМСКОТО ЈАДРО

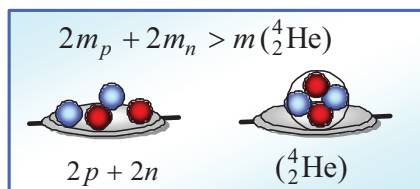
Атомското јадро, како што веќе видовме е изградено од протони и неутрони меѓу кои дејствуваат јадрени сили. За да се раздели едно јадро на составните нуклеони (независни протони и неутрони), треба да се совладаат силите што ги држат нуклеоните заедно.

Енергијата што е потребна да се предаде на јадрото за да се раздели на составните нуклеони се вика енергија на сврзување на јадрото.

Колкава е таа енергија? За да одговориме на ова прашање ќе се обидеме, најнапред, да одговориме на прашањето: колкава е масата на атомското јадро, ако тоа е изградено од Z протони и $N = A - Z$ неутрони.

Ако масата на мирување на слободниот неутрон е m_n , а на протонот m_p , тогаш би требало масата на атомското јадро m_j да биде $Zm_p + Nm_n$. Меѓутоа, прецизните мерења на масата на мирување на атомското јадро, како целина, покажуваат дека таа секогаш е помала од збирот на масите на слободните нуклеони кои влегуваат во составот на јадрото

$$m_j < Zm_p + Nm_n. \quad (1)$$



Сл.1. Илустрација на дефектот на маса кај јадрото на атомот на хелиумот.

При формирање на јадрото дел од масата на нуклеоните кои го градат јадрото се претвора во енергија. Тој дел од масата, што во вид на енергија се ослободува при формирање на атомско јадро, се вика **дефект на масата на јадрото** и е зададен со:

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_j(A, Z). \quad (2)$$

Дали постои некаква врска помеѓу

дефектот на масата Δm и енергијата на сврзување на јадрото?

За да ја разбереме причината за дефектот на масата треба да се знае врската меѓу масата и енергијата на едно тело. Таа е поставена од Ајнштајн во 1905 год. Формулата за еквивалентност на масата m и енергијата гласи:

$$E = mc^2. \quad (3)$$

Кога системот од состојба во која нуклеоните биле независни, поминал во состојба во која нуклеоните силно заемно дејствуваат енергијата на системот се променува. Таа промена на енергијата изнесува: $\Delta E = \Delta mc^2$

Енергијата на сврзување на јадрото сега може да ја определеме како енергија што се ослободува при формирање на јадрото од независни нуклеони:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = [Zm_p + Nm_n - m_j]c^2. \quad (4)$$

ПРИМЕР 1. Колкава енергија се ослободува при синтеза на деутеронот (јадрото на атомот деутериум) составено од еден протон и еден неутрон? Масата на деутеронот е 2,013 553 u .

Решение: Ако масата на протонот е $m_p = 1,007 276$ u , а масата на неутронот $m_n = 1,008 665$ u нивниот збир изнесува:

$$m_p + m_n = 2,015 941 \text{ u} .$$

Притоа, за дефектот на масата се добива:

$$\begin{aligned} \Delta m &= (m_p + m_n) - m({}_1^2\text{H}) \\ &= 2,015 941 \text{ u} - 2,013 553 \text{ u} = 0,002388 \text{ u} \end{aligned}$$

Енергијата на сврзување на јадрото на деутериумот изнесува:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = (0,002388 \text{ u}) (931,49 \text{ MeV/u})$$

$$\Delta E = 2,224 \text{ MeV}$$

Оваа енергија што се ослободува при формирање на јадрото се распределува меѓу новодобиеното јадро на деутериумот и γ - фотонот што се емитува притоа.

17. Нуклеарна физика

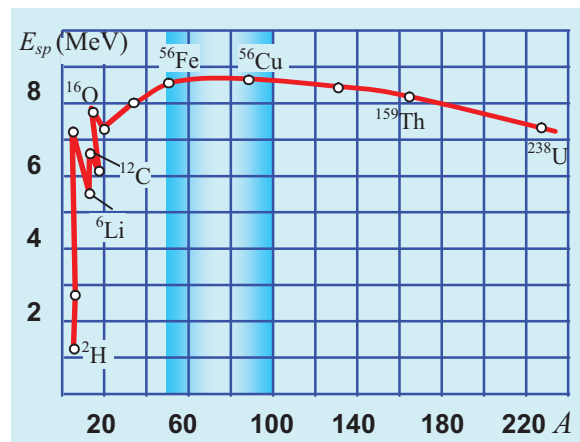
За компарација ќе одбележиме дека енергијата на сврзување на валентните електрони во атомот на водородот (јонизационен потенцијал) е околу 13,6 eV, што значи 10^6 пати помала од онаа на јадрото на деутериумот. Ваквата цврста врска наведува на заклучокот дека *јадрените сили се многу интензивни*.

Во нуклеарната физика стабилноста на јадрото се изразува со енергијата на сврзување по еден нуклеон во јадрото. Тоа е **специфичната енергија на сврзување** E_{sp} . За таа цел енергијата на сврзување ΔE се дели со масениот број A кој е еднаков со бројот на нуклеоните во јадрото:

$$E_{sp} = \frac{\Delta E}{A} \quad (5)$$

Специфичната енергија на сврзување дава информации за стабилноста на атомските јадра, и тоа колку е таа поголема, јадрото е постабилно.

Специфичната енергија на сврзување на јадрата е различна за различни јадра. Таа дава значајни податоци за својствата на јадрата.



Сл. 2. Специфичната енергија на сврзување во зависност од масениот број A

Зависноста на специфичната енергија на сврзување E_{sp} од масениот бројот A , е прикажана на сл.2. Од специфичната енергија на познатите јадра можат да се изведат следниве заклучоци:

За јадрата за кои $A < 12$ специфичната енергија на сврзување има мали вредности, а потоа со пораст на масениот број постепено се зголемува. На пример, јадрото на деутериумот има најмала специфична енергија од 1,11 MeV, а максималната вредност од 8,8 MeV ја достигнуваат јадрата од средината на периодниот систем (тоа е зона на стабилни јадра).

Кај јадрата со голем масен број специфичната енергија на сврзување опаѓа до 7,4 MeV, така што јадрото со масен број 208 е последното стабилно јадро. Сите јадра со $A > 208$ спонтано се распаѓаат. Имено, во природата не постојат стабилни јадра со $Z > 83$.

Од фактот дека графикот на специфичната енергија има максимум, следува дека *енергија се ослободува во оние јадрени реакции кај кои специфичната енергија на сврзување на продуктите на реакцијата е поголема од специфичната енергија на сврзување на почетните јадра*.

Овој општ услов може да се исполни на два начина: или при разбивање на масивни јадра од крајот на периодниот систем во полесни, или при синтеза на јадра од почетокот на периодниот систем во поголеми.

Прашања, задачи и активности

1. Да се определи специфичната енергија на сврзување на α -честицата, ако се дадени:

$$m({}_1^1\text{H}) = 1,007825 \text{ u}, \quad m_n = 1,008665 \text{ u}$$

$$m({}_2^4\text{He}) = 4,001523 \text{ u}$$

(Одговор: 28,3/4 MeV=7,1 MeV)

2. Ако масата на протонот и неутронот се познати, да се определи специфичната енергија на сврзување за јадрото на ${}_{6}^{12}\text{C}$.

$$\text{Неговата маса е: } m({}_6^{12}\text{C}) = 12,000 \text{ u}$$

(Одговор: 7,7 MeV)

3. Што е тоа дефект на масата на јадрото?

4. Што е тоа енергија на сврзување на јадрото?

5. Што е тоа специфична енергија на сврзување и каква е нејзината зависност од масениот број A ?

6. Зошто при фисијата и фузијата се ослободува енергија?

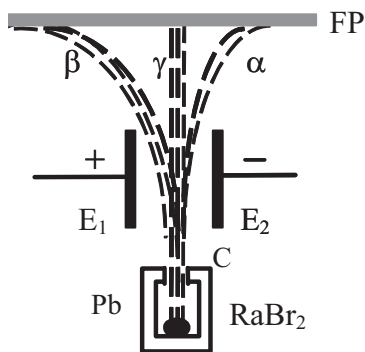
17.4. ПРИРОДНА РАДИОАКТИВНОСТ

Радиоактивноста е спонтан процес при кој атомското јадро, емитувајќи една или повеќе честици или кванти на електромагнетно зрачење, преминува во друго јадро.

Природната радиоактивност е откриена од Анри Бекерел во 1896 год. Тој, испитувајќи ја луминисценцијата, открил дека ураниумот и неговите соединенија спонтано емитуваат зрачење чија природа дотогаш не била позната.

Зрачењето, освен луминисценција предизвикува јонизација на средината каде што поминува; дејствува на фотоплоча; лесно проникнува низ тенки метални плочки, има голема продорност; покажува биолошко и хемиско дејство.

Подоцнежните испитувањата покажуваат дека радиоактивното зрачење не е еднородно. За да се изучи природата на радиоактивното зрачење се следи неговото однесување во јако електрично (сл.1) или магнетно поле. На пример, ако од оловна кутија С, во кој е сместен радиоактивен препарат (RaBr₂), излегува тесен сноп на радиоактивно зрачење. Кога снопот поминува низ хомогено електрично или магнетно поле, на фотографската плоча FP се добиваат три траги. Значи, првобитниот сноп се дели на три компоненти: 1) α-зрачење, кое претставува поток на позитивни честици кои слабо се отклонуваат во електрично или магнетно поле; 2) β-зрачење, кое претставува поток на негативни честици кои силно се отклонуваат во полето и 3) γ-зрачење, дел од снопот којшто не ја променил првобитната насока по дејство на полето.



Сл. 1.

Природно радиоактивните елементи чиј реден број е $Z \geq 83$, главно, се групирани во три радиоактивни фамилии. 1. *Фамилијата на ураниумот* започнува со изотопот на ураниумот ${}_{92}^{238}\text{U}$. По низа од α или β распаѓања, фамилијата завршува со стабилен изотоп на олово ${}_{82}^{206}\text{Pb}$; 2. *Фамилијата на торниумот* започнува со торниумот ${}_{90}^{232}\text{Th}$, а завршува со стабилен изотоп на оловото ${}_{82}^{208}\text{Pb}$; 3. *Фамилијата на актиниумот* започнува со ${}_{92}^{235}\text{U}$ завршува со третиот стабилен изотоп на олово ${}_{82}^{207}\text{Pb}$.

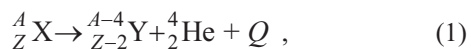
Природно радиоактивните елементи при своето распаѓање не поминуваат директно во стабилни елементи. При овој процес, почнувајќи од еден радиоактивен елемент со најдолг период на полураспаѓање, по низа α или β распаѓања, како краен продукт на распаѓањето се добива стабилен (нерадиоактивен) елемент.

За разлика од природно радиоактивните изотопи кај кои емисијата на алфа, бета или гама зрачењето, е спонтана, кај вештачки произведените радиоактивни елементи емисијата на овие зрачења е индуцирана. Помеѓу природната и вештачката радиоактивност нема никаква принципиелна разлика. Според тоа, својствата на радиоактивните изотопи се независни од начинот на којшто тие се добиени.

Својства на алфа, бета и гама - зраците

1. Радерфорд и Ројдс во 1908 година по експериментален пат утврдиле дека α-честиците се јадра на атомите на хелиумот. Тие се двојно позитивно јонизирани атоми на хелиумот. Нестабилност кон α-распаѓање покажуваат тешките јадра со масен број $A > 210$. Освен тоа, и некои полесни јадра спонтано емитуваат α-честици. Тоа се, на пример, елементите калиум, рубидиум, самариум и др.

При α-зрачењето, освен енергетски промени, јадрото претрпува и структурни промени. Атомскиот број Z на јадрото се намалува за две единици, а масениот број A за 4 единици. Шематски тоа може да се прикаже:

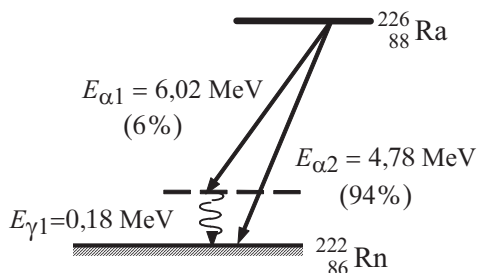


каде што ${}^4_2\text{He}$ е α-честицата - тоа се јадра на

хелиумот составени од два протона и два неутрина, со ${}^A_Z X$ е означено првобитното јадро, со ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ е означено новодобиеното јадро, Q е енергијата што се ослободува при овој процес. Стрелката означува дека процесот е неповратен. Како пример за α -распаѓање може да се земе изотопот на ${}^{226}_{88} \text{Ra}$ кој преминува во радон:



${}^{222}_{86} \text{Rn}$ е гас кој, исто така, е α -радиоактивен. α -честиците од јадрото излегуваат со брзини од ред на големина $(1,4-2) \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$ што одговара на енергија од 2 - 10 MeV. На сл. 2 е прикажана шема на α -распаѓање на ${}^{226}_{88} \text{Ra}$. При ова распаѓање се добиваат две групи α -честици, со различна енергија. Новодобиеното јадро на ${}^{226}_{88} \text{Ra}$ не е во основната состојба на туку во побудена. Преминот во пониската енергетска состојба е следен со емисија на γ -кванти.



Сл. 2.

Треба да се истакне дека некои од радиоактивните елементи не се т.н. чисти α -емитери, туку извесен процент од јадрата на дадениот радиоактивен елемент се распаѓа емитувајќи α -честици, а друг процент β честици.

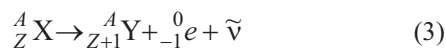
Поминувајќи низ материјалната средина, α -честиците вршат јонизација на атомите (молекулите) при што губат дел од својата енергија. Нивната јонизирачка способност е мошне голема. Должината на патот што α -честицата го минува низ материјална средина се вика **домет** (продорност). Поради големата маса на α -честицата дометот во воздух е од 2 до 8 cm. Во течните, а особено во тврдите средини е помал. При премин низ материјална средина, α -честицата губи дел од енергијата, најпрво преминува во хелиумов јон He^+ , а потоа,

примајќи уште еден електрон, се неутрализира.

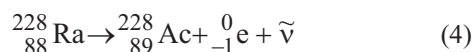
2. Кај β -зрачењето досега се забележани три вида јадрени претворања: бета минус распаѓање (β^-), бета плус зрачење (β^+) и електронски зафат или само K -зафат. Од трите, само првиот е карактеристичен за природната радиоактивност.

Јадрата кои имаат поголем број неутрони, за да бидат стабилни, под дејство на т.н. слаби заемодејства еден неутрон преминува во протон и се емитува електрон со голема енергија. Истовремено со електронот ${}^0_{-1} e$, за да се исполни законот за запазување на импулсот, се емитува и антинеутрино $\tilde{\nu}$. Антинеутрино нема полнеж, има маса на мирување приближно нула, а се емитува истовремено со електронот: ${}^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + {}^0_{-1} e + \tilde{\nu}$

При ова распаѓање не се менува бројот на нуклеоните, Z се зголемува за единица.



Како пример за β^- -распаѓање да го земеме радиумот. Тој е член од фамилијата на ториумот и преминува во актиниум:



Постоењето на честицата антинеутрино $\tilde{\nu}$ го разреши проблемот со енергетскиот спектар на β -распаѓањето. β -честиците се емитуваат со сите можни енергии, почнувајќи од некоја горна граница до нула. Според тоа, спектарот на β -зрачењето е континуиран.

Брзината на емитуваните β -честици е споредлива со брзината на светлината. Јонизационата способност на β -честиците е стотина пати помала од онаа која што ја поседуваат α -честиците. Но продорноста (дометот) е многу поголема, во воздух може да достигнат и неколку метри. Во зависност од енергијата β -честиците може да поминат низ оловен лист со дебелина од 1 mm, додека алуминиумот со дебелина 3-5 mm наполно ги апсорбира.

Патот што ќе го помина β -зрачењето во ткивата зависи од почетната енергија и од густината на ткивото. β -зрачењето со енергија од 1 MeV може да продре и до 3 mm.

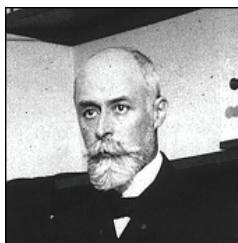
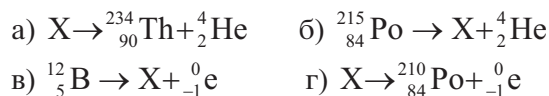
17. Нуклеарна физика

γ -зраците се електромагнетни бранови кои се појавуваат како резултат на преминот меѓу две возбудени енергетски нивоа на радиоактивното јадро. γ -зраците имаат голема енергија (мала бранова должина $0,5-40 \cdot 10^{-12}$ m). γ -зраците од природните радиоактивни елементи имаат енергија меѓу $0,04$ MeV и $3,2$ MeV. Експериментално е утврдено дека γ -зрачењето не е самостоен вид радиоактивност. Тоа ги следи α и β -распаѓањето, како и јадрените реакции. При поголем број радиоактивни елементи α и β распаѓањето не води кон основната состојба на новото јадро, туку во некоја од побудените состојби. Атомските јадра може да бидат во побудена состојба одредено време кое е од ред на големина 10^{-13} s. Потоа јадрото спонтано преминува во една од состојбите со помала енергија или во основната состојба.

γ -зрачењето има голема продорност и низ воздух може да помине големи растојанија без да се апсорбира.

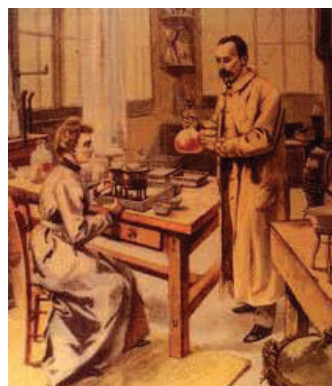
Прашања, задачи, активности

- Објаснете зошто закривувањето на β -честичката на сл.1 е поголемо, отколку на α -честичката.
- α -честичка и β -честичка имаат еднаква кинетичка енергија. Која од нив има поголема брзина и колку пати поголема?
- Колкава е фреквенцијата на γ -квант со енергија од $3,1$ MeV? (Одговор: $8,9 \cdot 10^{20}$ Hz)
- Со помош на периодичниот систем определете го јадрото X во следниве релации:



Henri Antoine Becquerel, (1852-1908) е роден во Париз, во фамилија на физичари. Во 1877 година тој го завршил образованието на Париска-

та политехничка школа како градежен инженер. Меѓутоа, неговиот интерес кон физиката не спласнувал, па затоа тој во понатамошниот дел од својот живот се посветил исклучително на неа. Од 1892 година Бекерелова научна преокупација станала луминисценцијата на светлината. Работејќи во лабораторијата на својот татко, тој набљудувал луминисценција на многу супстанции. Таму, во 1896 година го направил и најголемото откритие - зрачењето на урановата сол, кое било различно од рендгенското и имало дотогаш непознати својства.



Ова Бекерелово откритие побудило голем интерес кај **Marie Skłodowska-Curie (1867-1937)**, која заедно со нејзиниот сопруг **Pierre Curie (1859-1906)**, веќе угледен физичар, продолжиле со работа на проучувањето на ова зрачење коетие го нарекле радиоактивно. Тие ги откриле новите радиоактивни елементи радиумот и полониумот, работејќи макотрпно и во примитивни услови. За овие свои заслуги тие заедно со Бекерел во 1903 година ја добиле Нобеловата награда за физика.

Пјер Кири е роден во Париз во фамилија на лекар. Работел заедно со неговиот брат Жак и на полето на пиезоелектрицитетот, а ги проучувал и својствата на магнетиците со промена на температурата. Животот го изгубил во сообраќајна несреќа на улиците на Париз во 1906 година.

Марија Склодовска-Кири е родена во Варшава во фамилија на професори по математика и физика. Завршила студии во 1895 год. во Париз кога и стапила во брак со Пјер. Во 1906 год. станала прва жена професор на Сорбона, а во 1911 повторно е лауерат на Нобеловата награда, овој пат по хемија.

17.5. ЗАКОН ЗА РАДИОАКТИВНОТО РАСПАЃАЊЕ

Бројот на јадрата што радиоактивно се распаѓаат постепено се намалува со текот на времето. Бројот на распаднати јадра во единица време, т.е. *брзина на распаѓање* е различна за секоја супстанција.

Уште во своите рани експерименти Радерфорд утврдил дека за секоја радиоактивна супстанција постои карактеристичен временски период за бројот на нејзините нераспаднати јадра да се намали двапати.

Времето што е потребно бројот на нераспаднатите јадра да се намали двапати се вика **време на полураспаѓање** или **период на полураспаѓање** $T_{1/2}$. Период, на полураспаѓање не зависи од видот на распаѓањето, туку од природата на јадрото што се распаѓа. Така, на пример, α -радиоактивниот $^{238}_{92}\text{U}$ има период на полураспаѓање $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^{10}$ години, за изотопот $^{232}_{90}\text{Th}$ тој е $1,39 \cdot 10^{10}$ години. Додека еден од членовите на ураниумовата низа $^{212}_{84}\text{Po}$ кој е исто така α -радиоактивен, периодот на полураспаѓање е само $3 \cdot 10^{-7}$ s.

Нека во време $t = 0$ има N_0 јадра на дадена радиоактивна супстанција. По истекот на време $t = T_{1/2}$ бројот на овие јадра ќе биде $(1/2) N_0$, а по време $t = 2T_{1/2}$ ќе постојат

$$(1/2) \cdot N_0/2 = (N_0/2^2)$$

нераспаднати јадра. По истекот на време $t = 3T_{1/2}$ ќе има преполовување на претходниот износ, така што нераспаднати јадра ќе бидат

$$(1/2) \cdot (N_0/2^2) = (N_0/2^3)$$

од почетниот број. По истекот на време од $nT_{1/2}$, односно за време

$$t = nT_{1/2}, \quad (1)$$

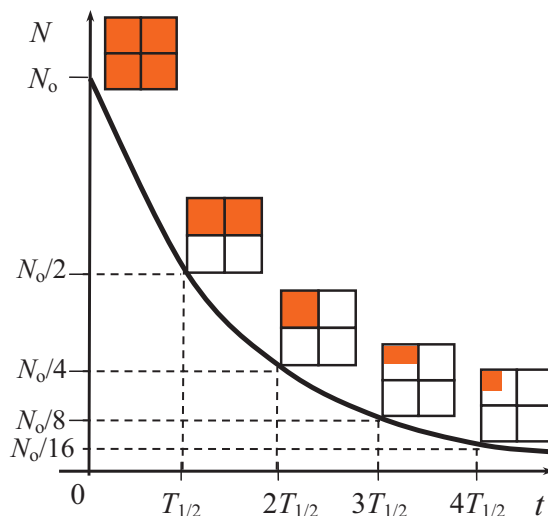
бројот на нераспаднати јадра ќе биде

$$N = N_0/2^n = N_0/2^n = N_0 \cdot 2^{-n} \quad (2)$$

Бидејќи од равенката (1) следува $n = t/T_{1/2}$, равенката (2) може да се напише и на следниов начин

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}} \quad (3)$$

Оваа равенка го прикажува **законот за радиоактивно распаѓање**. На сликата 1 е даден графички приказ на овој закон.



Сл. 1. Графички приказ на законот за радиоактивно распаѓање.

За дадена радиоактивна супстанција не е можно да се претскаже кое атомско јадро ќе се распадне. Можно е само да се претпостави колку од јадрата во дадено време се распадат. Нека, на пример, во интервалот еднаков на $T_{1/2}$ не дошол до половина процесот на распаѓање на едно јадро, туку тоа е време за кое половината од честичките на дадена радиоактивна супстанција ќе се распадат. Законот за радиоактивно распаѓање има статистички карактер, зашто преку него може да се предвиди само веројатноста дека некоја од честичките ќе се распадне. Времето на постоење на јадрата во супстанцијата е различен. Некоје од јадрата на ураниумот 238 може да се распадне уште во првата секунда на своето постоење, додека друго такво јадро може да биде нераспаднато милијарди години. Затоа се дефинира средно време на постоење на радиоактивните јадра. **Средното време** τ на постоење на радиоактивните јадра е пропорционално со периодот на полураспаѓање на дадената супстанција

$$\tau \approx 1,4T_{1/2} \quad (4)$$

Бројот на распади во единица време ($\Delta N/\Delta t$) претставува величина која се вика **активност A** или **брзинана распаѓање**:

17. Нуклеарна физика

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \quad (5)$$

λ е **константа на радиоактивното распаѓање** и ја карактеризира брзината на распаѓањето. Таа ја определува веројатноста со која некој радиоактивен нуклид ќе се распадне во единица време (Или λ е величина која покажува кој дел од почетниот број јадра се распаѓа во единица време.) λ е карактеристична величина кај сите атоми на даден радиоактивен изотоп и не зависи од масата и надворешните фактори како што се, на пример, притисокот, температурата итн. Опаѓањето е побрзо кај елементите со поголема константа на радиоактивно распаѓање λ .

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (6)$$

Од равенката (6) може да се пресмета константата на радиоактивното распаѓање λ за даден радиоактивен нуклид, ако е познат периодот на полураспаѓање $T_{1/2}$, а важи и обратното.

Од равенките (3) и (5) може да се определи активноста

$$A = \lambda N = \lambda N_0 2^{-t/T_{1/2}}, \quad (7)$$

каде што $A_0 = \lambda N_0$ е почетната активност.

Единицата за активност во SI е 1 Bq (бекерел). Еден бекерел означува еден распад за една секунда, 1 Bq = s⁻¹.

Определување на активноста (специфичната активност или масена активност A/m , каде што m е масата на радиоизотопот) Масената активност има широка примена во медицината (определување волумен на крв, хемоглобин во крвта), археологијата (определување староста на фосили, папируси и др. преку определување на активноста $^{14}_6\text{C}$ кој има период на полураспаѓање 5730 години) и многу други гранки од науката и техниката.

Ако радиоактивниот изотоп на кој и да било начин се внесе во организмот, тогаш станува збор за **биолошки период на полураспаѓање** или време на полуелиминација на радионуклидот T_b . Тоа е време за кое од организмот, орган или ткиво, физиолошки се елиминира половината од инкорпорираниот радионуклид независно од неговиот период на полураспаѓа-

ње. Имено, бројот на атомите на радиоактивниот препарат опаѓа, не само како резултат на радиоактивното распаѓање, туку и како резултат на физиолошката елиминација што се врши во живиот организам. Биолошкиот период на полураспаѓање зависи од состојбата на организмот, посебно од критичниот орган во кој избраниот радионуклид се натрупува.

Се претпоставува дека и биолошката елиминација на радиоактивниот препарат, внесен во организмот се одвива по експоненцијален закон. По аналогија со константата на радиоактивното распаѓање λ , како мерка на веројатност за биолошка елиминација на некој радиоактивен нуклид во единица време, се воведува **константа на биолошка елиминација** λ_b . Вкупното намалување на активноста на инкорпорираниот радионуклид се определува со константата на **ефективното намалување** λ_{ef} која претставува збир од две веројатности:

$$\lambda_{ef} = \lambda + \lambda_b \quad (8)$$

Од равенките (6) и (8), се добива:

$$\frac{1}{T_{ef}} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_b} \quad (9)$$

Равенката (9) дава можност да се пресмета ефективниот период на полуелиминација T_{ef} на радиоактивниот препарат кој бил внесен во биолошкиот систем со биолошки период полураспаѓање T_b и периодот на полураспаѓањето $T_{1/2}$:

$$T_{ef} = \frac{T_b \cdot T_{1/2}}{T_b + T_{1/2}} \quad (10)$$

На пример, за радиоактивниот јод ^{131}I чиј период на полураспаѓање е $T_{1/2} = 8$ дена и $T_b = 138$ дена, според равенката (8) се добива дека $T_{1/2} = 7,6$ дена.

Треба да се истакне дека во случај на големи разлики помеѓу $T_{1/2}$ и T_b , практично, се зема помалата вредност.

Прашања и задачи

1. Што е тоа период на полураспаѓање?
2. Од што зависи периодот на полураспаѓање?
4. Што е активност и како се менува со текот на времето кај дадена радиоактивна супстанција. Која е единицата за сктивност?

17.6. НУКЛЕАРНИ РЕАКЦИИ

Трансформациите на атомските јадра, предизвикани при заемнодејство со јадро или честици, се викаат *нуклеарни (јадрени) реакции*. Имено, при нуклеарните реакции јадрото е цел на бомбардирање со нуклеони (протони или неутрони), групи нуклеони или лесни јадра, како што се, на пример, деутериум ${}^2_1\text{H}$, трициум ${}^3_1\text{H}$, α -честици и др. Возможно е, исто така, од јадрото да се одвојат извесен број нуклеони или γ -кванти.

Нуклеарна реакција, од најопшт вид, може да се постигне со бомбардирање на јадрото цел со брзи честици (или лесно јадро). Честицата проектил **a** треба да има доволно енергија за да се уфрли во јадрото цел **A**. Како резултат од нуклеарната реакција се добива ново јадро **B** и лесна честица **b**. Тоа шематски може да се прикаже на следниов начин:



За исказување на нуклеарните реакции обично се користат и скратени ознаки:



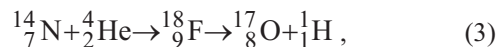
при што по симболот на јадрото цел во заградата се забележува честицата со која се бомбардира јадрото и сите други честици кои се појавуваат како резултат на нуклеарните реакции, а по заградата се става симболот на јадро то што настанало при реакцијата.

Во текот на нуклеарните реакции нуклеоните не се уништуваат и не им се менуваат особините, само настанува нивна прераспределба. Затоа, при нуклеарните реакции мора да бидат задоволени следниве закони:

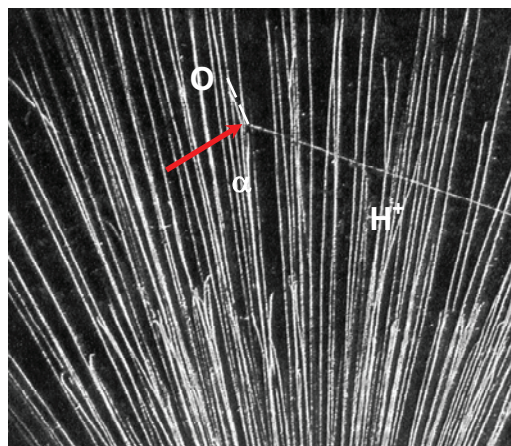
- закон за запазување на импулсот и моментот на импулсот,
- закон за запазување на енергијата,
- закон за запазување на количеството електричество,
- закон за запазување на бројот на нуклеоните, како и други закони својствени само за микрочестиците.

Една од првите нуклеарни реакции, проучена детално, е изведена од Радерфорд во 1919 год. Тој за прв пат успеа јадрото на азотот

да го трансформира во јадро на кислород. За таа цел во Вилсонова комора наполнета со азот, α -честици со енергија од околу 7,5 MeV, добиени од природен извор, го бомбардираат азотот. Реакцијата може да се прикаже на следниов начин:



или скратено ${}^{14}\text{N}(\alpha, p){}^{17}\text{O}$. Се гледа дека збирот од масените и редните броеви од обете страни на реакцијата не се менува.



Сл. 1. Судир на α -честица со јадро на азот. Фотографија направена од Blackett 1925 година.

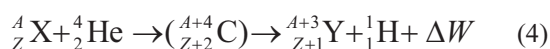
Фотографија (сл.1) на оваа нуклеарна реакција е направена во 1925 год. од англискиот физичар Блекет кој во 1948 год. *добил Нобелова награда за физика*.

Меѓу многубројните траги на α -честиците што се гледаат со Вилсонова комора наполнета со азот, на едно место трагата на α -честицата се прекинува и на тоа место почнуваат две нови траги. Тоа е местото каде што се случила споменатата нуклеарна реакција. Испитувањата на овие траги со магнетно поле покажуваат дека тенката и подолга трага е трагата на новодобиеното водородно јадро, т.е. протонот. Со примена на законите за запазување на импулсот и енергијата, се добива дека кратката подебела трага припаѓа на честица со количество електричество $+8e$ и $A=17$, што одговара на јадрото на кислородот.

17. Нуклеарна физика

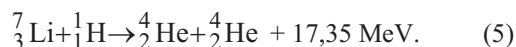
И покрај тоа што бројот на реакциите кога атомските јадра на азотот и α -честиците меѓусебно си дејствуваат е извонредно мал (приближно еднаш на 50 000 случаи), се направи цел пресврт во сознанието за составот на јадрото. Имено, се потврди дека *протонот е составен дел на атомското јадро*.

Во тек на неколку години по откривањето на првата трансформација на атомското јадро, Радерфорд и неговиот асистент Чедвик покажаа дека α -честиците, се разбира ако поседуваат соодветна енергија, може да исфрлат протони од речиси сите полесни елементи (B, F, Al, Si, S, K и др). Сите тие реакции се одвиваат според шемата:

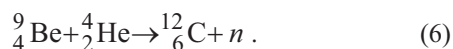


каде што ${}^{A+4}_{Z+2} \text{C}$ претставува нестабилно *сложено јадро*, а ΔW е разлика на енергија на честиците што постоеле до реакцијата и честиците што се резултат од реакцијата.

Едно од фундаменталните откритија што го направија Кокроф и Волтон, во 1932 година, работејќи во Кевендиш лабораторијата, се однесува на можноста за инверзна нуклеарна реакција од типот (4). Важноста на експериментот на Кокроф и Волтон лежи во тоа што тие први забрзуваат честици со електрично поле, па така и ја започнаа ерата за развој на акцелераторите. Како резултат од реакцијата изведена со забрзани протони до енергии од ред на големина 0,8 MeV, се добиени две α -честици, а се ослободува и енергија:



Во 1932 година Чедвик открил нова честица неутрон, за која набрзо ќе се покаже дека е составен дел на атомското јадро. Неутронот е добиен кога берилиумовото јадро е озрачено со α -честици :



Мерењата на брзината и дометот на јадрата добиени со реакцијата укажуваат на тоа дека неутралната честица има маса приближно еднаква со масата на протонот.

Нуклеарните реакции може да се класифицираат според енергијата на проектилите што ги предизвикуваат, карактерот на трансформацијата на јадрото, честиците кои настапуваат како резултат на реакцијата итн. Покрај тоа, нуклеарните реакции може да се предизвикани од упадни честици со висока, средна и мала енергија.

Во зависност од честиците-проектили што ги предизвикуваат реакциите, тие можат да се поделат на реакции предизвикани под дејство на: наектризирани честици, неутрони и γ -фотони. Утврдено е дека нуклеарните реакции предизвикани од честици со релативно мали брзини, се одвиваат преку создавање на сложено јадро кое спонтано се трансформира во ново (конечно) јадро со ослободување на една или повеќе елементарни честици.

Нуклеарните реакции предизвикани од неутрони со мали брзини обично имаат поголема веројатност да се остварат. Тоа може да се објасни со тоа колку што е помала брзината на неутроните толку е подолго времето за кое неутронот ќе остане во сферата на дејство на нуклеарните сили, а со тоа се зголемува и веројатноста за зафат на неутронот.

Со проучување на јадрените реакции се добиваат информации за својствата на јадрата (димензии, распределба на електричниот полнеж, природата на јадрените сили итн.). Тоа се постигнува така што прво се идентификува каналот на реакцијата, потоа новодобиеното јадро и честица, колкава е нивната енергија, аголната прераспределба, веројатноста на одвивање на реакцијата, ефективниот пресек.

Прашања и задачи

1. Што се тоа нуклеарни реакции и како е добиена првата нуклеарна реакција?
2. Како е добиена првата нуклеарната реакција со забрзани честици со акцелератор?

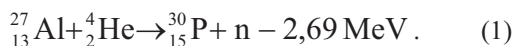
James Chodwick (1891-1974) е соработник на Радерфорд во Кевендиш лабораторијата во Кембриџ. Во 1935 година ја поделил Нобеловата награда за физика со сопрузите Фредерик и Ирена Жолио-Кири.

17.7. ВЕШТАЧКА РАДИОАКТИВНОСТ. ПОЗИТРОН

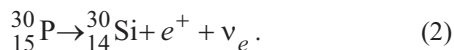
Во јануари во 1934 год. И. Кири и Ф. Жолио-Кири објавиле дека лесните елементи, како: борот, алуминиумот и магнезиумот, ако се бомбардирани со α -честици од полониум продолжуваат да зрачат и откако ќе се отстранат изворот на α -честици. Тоа значи дека се добиваат *радиоактивни изотопи од елементи што во природата се стабилни*. Појавата е наречена *вештачка радиоактивност*.

Тие утврдиле дека интензитетот на зрачењето опаѓа со текот на времето според експоненцијалниот закон за радиоактивно распаѓање што важи за природно радиоактивните елементи.

До ова големи откритие на вештачката радиоактивност И. Кири и Ф. Жолио дошле работејќи на експериментите за добивање на позитрони. Само две години пред тоа, Андерсен го открил позитронот како составен дел на космичкото зрачење. Првите реакции се од типот (α, n):

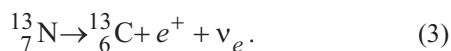
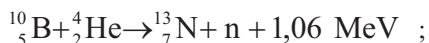


Добиениот изотоп на фосфорот ${}_{15}^{30}\text{P}$ (радиофосфор) го нема во природата. Тој има нестабилно јадро со период на полураспаѓање $T_{1/2}=2,5$ минути. Притоа следува следната трансформација:



Важна карактеристика на ова зрачење е тоа што нема емисија на α или β честици, туку се емитува нова честица-*позитрон* e^+ и неутрино.

На сличен начин од бор може да се добие радиоактивен изотоп на азотот:



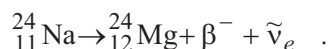
Добиениот изотоп на ${}_{7}^{13}\text{N}$ е радиоактивен со

период на полураспаѓање $T_{1/2}=14$ минути, и тука повторно се емитува позитрон.

Веднаш по откривањето на вештачката радиоактивност од страна на И. Кири и Ф. Жолио, Е. Ферми докажал дека за добивање вештачки радиоизотопи може многу погоден да биде неутронот. Во случај на бомбардирање на стабилен алуминиум со неутрони е забележана следнава реакција:



Од своја страна натриумот е β^- радиоактивен



Веројатноста за реакција се зголемува ако неутроните се задржуваат подолго време во близина на јадрото цел. Тоа се постигнува со ставање материјал богат со водород околу изворот и јадрото цел, како што е, на пример, парафинот. Да истакнеме дека процесите на забавување на неутроните се од особена важност при конструкција на системи каде се одвиваат верижни реакции.

Во тек на дваесет години по откритието што го направиле И. Кири и Ф. Жолио, новата област се развива со неверојатна брзина. Бројот на познати вештачки радиоактивни нуклиди во 1938 година достигнал 254, во 1944 околу 450, а во 1949 околу 650 и речиси 1000 во 1954 година. Денес вештачки радиоактивните нуклиди ја достигнаа бројката од околу 1800.

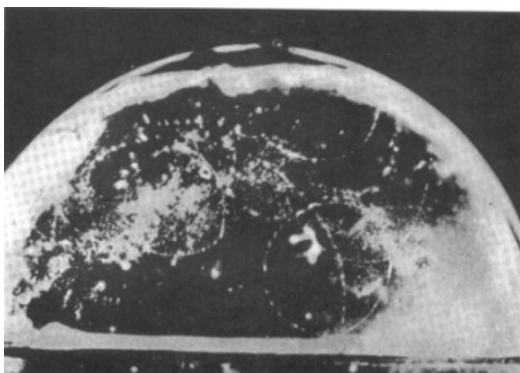
Со нуклеарните реакции не само што се произведени радиоактивни изотопи на речиси сите познати елементи туку се синтетизирани и извесен број елементи кои ги нема во природата. Најпознат синтетизиран елемент е плутониумот, кој за помалку од пет години од неговото откривање бил добиен во количина доволна да послужи како составен дел на атомската бомба. До 1954 година се добиени осум нови елементи, во периодниот систем, зад ураниумот, како и технициумот ($Z=43$) и прометеумот ($Z=61$) кои не се најдени во природата. Само да истекнеме дека во 1974 година е откриен 106-от, а во 1976 и 107-от елемент од периодниот систем. Денес периодниот систем го сочинуваат 118 елементи.

Добивање и аниhilација на парот електрон - позитрон

Позитронот како античестица на електронот е предвиден од Дирак во 1928 година. Експериментално е докажан четири години подоцна, кога Андерсен ги проучувал трагите на космичките зраци. Набрзо потоа е согледано дека и γ - фотоните може да се трансформираат во пар честици: електрон-позитрон ($e^- - e^+$). Тоа може да се потврди во Вилсоновата комора која се наоѓа во магнетно или електрично поле. Во тоа поле електронот и позитронот како спротивно наелектризирани честици се отклонуваат во спротивни насоки (сл.1).

Создавањето пар позитрон - електрон се одвива во согласност со законите за запазување на енергијата и импулсот. Законот за запазување на енергијата во извесна смисла го ограничува овој процес, така што γ - фотонот, кој во одредени услови преминува во пар позитрон - електрон, не може да има енергија помала од 1,022 MeV. Тоа е енергија која одговара на масата на мирување на позитронот и електронот, а која според Ајнштајновата релација е:

$$E = m_e c^2 + m_{e^+} c^2 = 2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV} .$$



Сл. 1. Однесување на позитрон и електрон во магнетно поле

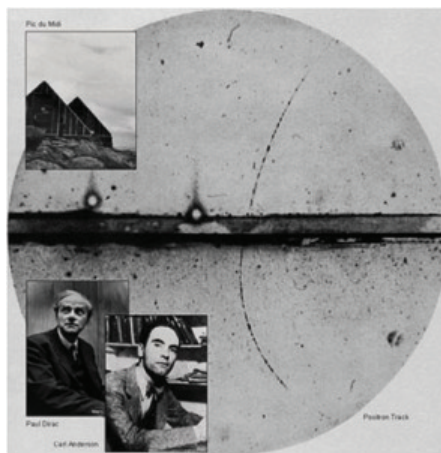
Импулсот на γ -фотонот се распоредува и на двете честици, како и на јадрото со кое е во интеракција, но притоа, вкупниот импулс пред и по процесот не се менува. Трансформацијата на γ - фотонот во електронско-позитронски

пар е реверзибилен процес. Тоа значи, при соединување на електрон - позитрон (аниhilација-уништување) може да се формираат два γ - кванта. Тој процес симболично се означува:

$${}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e \rightarrow 2\gamma . \quad (5)$$

Утврдено е дека позитронот во слободна состојба може да постои многу кратко време. Поминувајќи низ материјалната средина, тој се соединува со еден од електроните на атомот, а притоа се создаваат два γ - кванта кои се разлетуваат во две различни насоки (закон за запазување на импулсот).

Овие трансформации се добра илустрација на заемната поврзаност и условеност на квалитативно различни облици на материјата, како и нејзина општа единственост. Овде станува збор за трансформација на супстанцијата во електромагнетно поле (честица во γ - фотони) и, обратно. Се разбира, при овие трансформации важат сите закони за запазување.



Сл. 2. Трага на позитрон (преткажан од Дирак, а експериментално потврден 1932 од Андерсон) во Вилсонова комора при што тој влегува во комората (трагата од горена страна), се успорува во слој од олово (лента во центарот) и потоа влегува во простор каде делува магнетско поле,

Irene Kirie (1897-1956) и Frederic Joliot (1900-1958) во 1935 година за откривање на вештачката радиоактивност добиле Нобелова награда за физика.

17.8. ОТКРИВАЊЕ НА НЕУТРОНОТ

На вистинското откривање на неутронот претходат низа важни експерименти. Во 1930 година германските физичари Боте (W.Bothe) и Бекер (H.Becker) констатирале дека некои елементи, особено берилиумот ${}^9_4\text{Be}$, а во помала мера и Li, B, Mg и Al, изложени на α -честици од природниот радиоактивен полониум, покажуваат радиоактивно зрачење со голема пробивност, поголема и од најпробивните α -честици добиени од природно радиоактивните елементи. Нивните резултати укажувале дека при тие реакции се емитува некое, како што тогаш се мислело, електромагнетско зрачење со многу голема пробивност.

При повторувањето на овие експерименти, во 1932 год. И. Кири и Ф. Жолио истакнуваат дека кога на патот од "берилиумското зрачење" ќе се стави слој од олово (10-20 cm), зрачењето поминува. Наспроти тоа, парафинот, пак, во висок степен го апсорбира. Подоцна заклучиле дека тоа зрачење од материјалите богати со водород (како што е парафинот) избива протони чиј домет во воздух е 26 cm. За да се добијат протони со таков домет, би требало непознатото зрачење да има енергија поголема од околу 50 MeV.

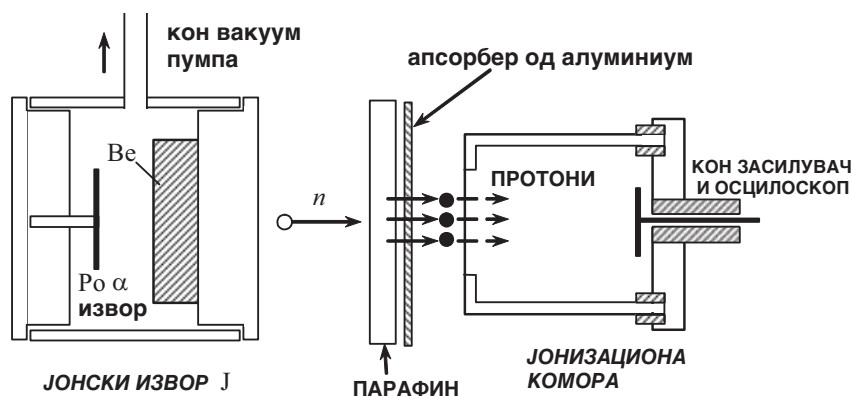
Излез од овој лавиринт на необјасливо големата енергија на непознатото зрачење добиено при овие опити направил Чедвик во 1932 год. Тој покажал дека дometот и брзините на

добиените јадра кај овие реакции се должат на поток на *неутрални честици* чија маса е блиска до масата на протонот. Бидејќи неутронот нема полнеж, тој на својот пат не создава примарна јонизација, па не остава видлива трага во Вилсоновата комора (што ја отежнува и неговата идентификација). Апаратурата што ја користел Чедвик, прикажана на сл. 1, е многу едноставна.

Тоа е јонизациона комора поставена во близина на полониумско-берилиумов извор. Кога јонизационата комора ќе се постави во близина на изворот, бројот на импулсите што ги покажува осцилографот се зголемува од $0,1 \text{ min}^{-1}$ на 4 min^{-1} . Овој број импулси и понатаму осетно се зголемува кога на патот на зрачењето ќе се постави тенка парафинска плоча. Последното зголемување на бројот на импулсите се објаснува со исфрлање на протони од парафинот. Протоните што се создадени имаат домет и до 40 cm во воздух. Мерењето на дometот на протоните се прави со помош на фолии од алуминиум со различна дебелина.

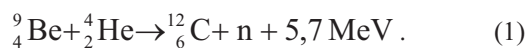
Обидите повторени и со фолии од други елементи поставени во близина на комората, како и кога комората е полнета со друг гас, покажале дека настануваат слични ефекти.

Мерењата на брзината и дometот на јадрата добиени со реакцијата укажуваат дека станува збор за неутрални честици чија маса е приближно еднаква на масата на протонот. Имено, во процесот на трансмутација на берилиумовото јадро се добива:

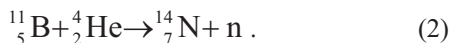


Сл. 1. Шема на експериментот на И. Кири и Ф. Ж. Кири за докажување на неутроните.

17. Нуклеарна физика



Бидејќи во 1932 година масата на берилиумот не била позната, се користела слична реакција со која се добиваат неутрони од борот:



Брзината и дометот на јадрата на кои дејствуваат неутроните се во согласност со законите за запазување. Имено, ако масата на неутронот е m_n , а неговата брзина пред и по еластичниот судир со неподвижното јадро е v_0 и v_n , тогаш неподвижното јадро со маса M , според законот за запазување на енергијата и импулсот, добива брзина:

$$v = \frac{2m_n}{m_n + M} v_0 . \quad (3)$$

Ако се пуштат неутроните еднаш да поминат низ азот со маса $M_N \approx 14u$ (u – унифицирана атомска единица за маса), а потоа низ водород со маса $M_H \approx 1u$, односот на брзините на јадрата, согласно со равенката (3), ќе биде:

$$\frac{v_H}{v_N} = \frac{m_n + M_N}{m_n + M_H} . \quad (4)$$

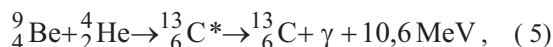
Експериментите покажуваат дека овој однос на брзините на јадрата на водородот и азотот изнесува

$$\frac{v_H}{v_N} = \frac{3,3 \cdot 10^7}{4,7 \cdot 10^6} = 0,13 .$$

Од последниот израз може да се определи масата на неутронот и таа е блиска до единица ($1,005 < m_n < 1,008$). Имено, резултатите што ги добил Чедвик добро се сложуваат со масата на неутронот која изнеува $1,00867 u$.

Успешната хипотеза за неутронот не го спречила Чедвик да ги разгледува и другите можни процеси кои може да се одвиваат при интеракција на α -честици со берилиумот. Сликите добиени со Вилсоновата комора јасно укажувале на тоа дека покрај постоење на неутрони постојат и γ -фотони. Чедвик претпоста-

вил дека тоа може да биде резултат од реакцијата:

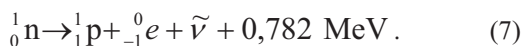


или на возбудени состојби на јадро ${}^{12}_6\text{C}^*$:

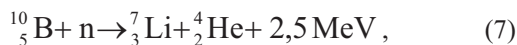


На вториот процес, како што кажавме на почетокот, укажуваат Боте и Бекер. Денес се познати и други нуклеарни реакции при кои се добиваат неутрони.

Слободниот неутрон е нестабилна честица со период на полураспаѓање 12 минути и се распаѓа на протон, електрон и антинутрино:



Неутронот како електронеутрална честица непосредно не предизвикува јонизација, затоа инструментите кои се користат за детекција на бавни неутрони се обложени со мали количини бор. Притоа се одвива реакцијата:



енергијата од 2,5 MeV ја понесуваат α честицата и јадрото на литиумот кои на својот пат вршат јонизација.

ПРАШАЊА И ЗАДАЧИ

1. Како може да се определи масата на неутронот?
2. Како може да се детектираат бавни неутрони?
3. Кои нуклеарни реакции се користат кај детекторите на неутрални честици?

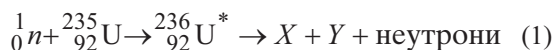
James Chodwick (1891-1974) студирал на Универзитетот во Манчестер и Кембрич како и на Шарлотенбургскиот институт во Берлин. Како соработник на Радерфорф во Кевендиш лабораторијата во Кембрич открил нова честица неутрон, за која набрзо ќе се покаже дека е составен дел на атомското јадро. Во 1935 година ја поделил Нобеловата награда за физика со сопрузите Ирена Кири и Фредерик Жолио-Кири.

17.9. НУКЛЕАРНА ФИСИЈА

Во почетокот на 1934 година од страна на Е.Ферми се направени низа опити со цел да се предизвика јадрена реакција помеѓу неутрони и атомските јадра на ураниум. Се сметало дека на таков начин ќе се добијат елементи со поголем реден број од ураниумот така наречни *трансураниумски елементи*. Наместо тоа, забележано е дека јадрото на ураниумот се дели на два дела, чии маси се во приближен однос 2:3, со истовремено ослободување на огромна количина енергија.

Фисијата под дејство на неутрони е откриена во 1938 год. од О.Хан, Л.Мајтнер и Штрасман. При откривањето и објаснувањето на јадрената фисија голем прилог имаат дадено И.Кири-Жолио, П.Савиќ, О.Фриш и др.

И покрај тоа што се покажа дека кај многу јадра може да се предизвика фисија, но за технички цели од најголемо значење е фисијата на ураниумот и плутониумот. Процесот на фисија кај ураниумот ^{235}U може да се прикаже со:



каде што ${}_0^1n$ е ознака за неутрон, ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ нестабилен изотоп на ураниумот, X и Y се новодобиените јадра при фисијата - **фисиони фрагменти**. Тие може да се нестабилни и да се рас-

паѓаат давајќи низа радиоактивни елементи - **продукти на фисијата**.

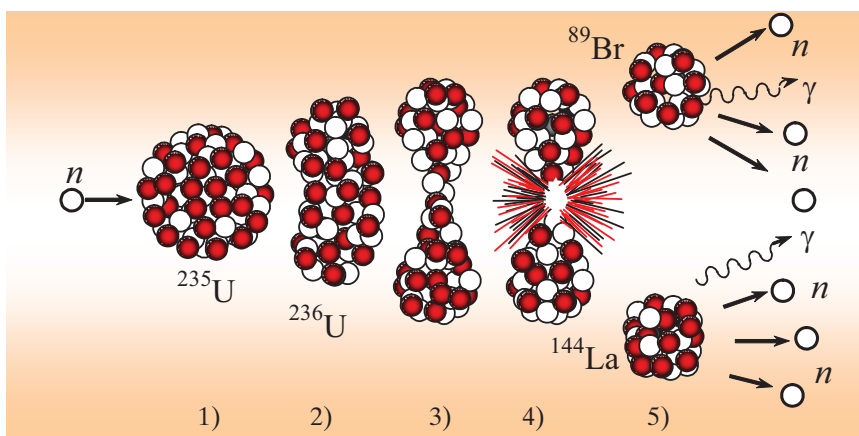
При фисија на јадрото на ^{235}U како пример може да се добијат следниве парови фисиони фрагменти:



каде што Q е издвоената енергија при реакцијата. Фисионите фрагменти се нестабилни и по низа распаѓања преминуваат во стабилни изотопи.

Се покажа дека кај ^{235}U преку фисија може да се добијат преку 40 различни парови фрагменти. Тие одат од најлесни со масен број 72 до најтешки за кои масениот број е 160. Кога фисијата би била симетрична, што е многу ретко, јадрото на ^{235}U би се делело на фрагменти со масени броеви 117 и 118. Меѓутоа, се покажа дека е многу мал број на јадрата што се делат на еднакви фрагменти.

Во основа на теоријата на нуклеарната фисија е земен моделот на *јадрена капка*. Според овој модел, атомското јадро во основната (невозбудена) состојба има приближно сферна форма. Штом неутронот се апсорбира од јадрото (сл.1. фаза 1) се добива сложено јадро, со масен број поголем за единица од почетното јадро, кое е нестабилно и се деформира (фаза 2). Кога тоа ќе се деформира, силите на површинскиот напон повеќе нема да бидат доволни да му ја вратат сферната форма на јадрото.



Сл. 1. Фисија на јадрото на ураниум-235 индуцирана со неутрони
Според моделот на капка фисијата протекнува низ повеќе фази.

17. Нуклеарна физика

Јадрото најнапред се издолжува, така што на средината станува тенко за да се растргне на крајот на два дела кои се разлетуваат со огромна енергија (фаза 4). На тој начин се добиваат фисионите фрагменти кои се нестабилни и емитуваат неутрони и зрачење (фаза 5).

Минималната енергија која треба да ја имаат честиците кои предизвикуваат фисија е наречена **енергија на активација**. За да настане фисија без додавање енергија, односот Z^2/A треба да има вредност 45. Бидејќи оваа вредност за ^{235}U е помала од 45 за активирање на процесот фисија е потребна дополнителна енергија.

Експериментите покажуваат дека фисија на ураниумовото јадро ^{238}U може да се предизвика само со брзи неутрони чија енергија на акривација ја надминува вредноста 1MeV. Од друга страна, фисија на ураниумовото јадро ^{235}U може да се предизвика како со брзи така и со бавни неутрони. Енергијата на бавните неутрони нешто е помала од 1MeV. Со толкава енергија располагаат молекулите на гасот при собна температура. Поради тоа бавните неутрони се наречени и термални неутрони.

Јадрата добиени при делбата се оптоварени со неутрони, па испуштаат дел од неутроните и на тој начин се добиваат **неутрони на делба**. Но сепак, неутроните на делба не ја елиминираат сосема преоптовареноста со неутрони, што условува јадрата добиени при делбата да се радиоактивни; така што по низа β -распаѓања се постигнува да се добие стабилен изотоп.

Колкав ќе биде бројот на неутроните на делба зависи од начинот на фисијата. Кај едни парови фрагменти може да се ослободи само еден неутрон, додека кај други бројот на ослободени неутрони може да биде два, три или повеќе.

Пресметувањата покажуваат дека при фисијата на јадрата се ослободува голема енергија, затоа што за јадрата со средна маса специфичната енергија на сврзување изнесува околу 8,7 MeV, додека за тешките јадра е помала и е околу 7,6 MeV. На пример, при фисија на тешко јадро на два дела се ослободува 1,1 MeV по нуклеон, што значи околу 200 MeV по јадро.

Аако со фисија на ^{235}U се создадат изотопите

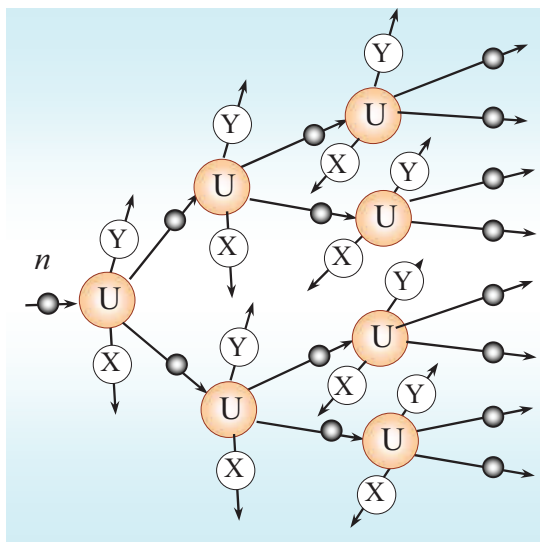
^{130}La и ^{103}Ag и три неутрони енергијата што се ослободува со фисија на 1 g ^{235}U може да се пресмета ако $\Delta m = 0,205214 u$

$$Q = \Delta m \cdot c^2 = 0,205214 \cdot 931,5 \text{ MeV} = 191 \text{ MeV} = 305,8 \cdot 10^{-13} \text{ J}.$$

Додека при фисија на сите јадра во 1 g ^{235}U се добива $7,8 \cdot 10^{10} \text{ J}$.

Верижни реакции

Фисијата на ураниумовото јадро е проследена со емисија на 2-3 неутрони, а тоа значи се добиваат честици кои ја предизвикуваат. Тие неутрони се способни да присилат други јадра на ураниумот да извршат фисија. Питоа, повторно се ослободуваат нови неутрони и на тој начин оваа низа реакции постојано се продолжува. Ова укажува на можност еднаш започнатата фисија сама од себе да продолжува и понатаму да се развива. Ваквата нуклеарна реакција, која самата си создава услови за проширување според гореопишаниот начин, се вика **верижна јадрена реакција**.



Сл. 2. Верижна реакција на ураниумот под дејство на неутрони.

Како пример да земеме дека при процесот фисија се ослободиле 2 неутрона. Во идеален случај тие може да предизвикаат други 2 процеса на фисија со ослободување на 4 неутрони. Овие 4 неутрони понатаму ќе предизвикаат 4 нови процеси на фисија и притоа ќе се ослободат 8 неутрони итн. На тој начин, почнувајќи само со еден неутрон, по низа последователни процеси на фисија се ослободуваат 2, 4, 8, 16, неутрони чиј број расте според законот на геометриска прогресија (сл..2).

Секоја верижна јадрена реакција се карактеризира со **коэффициент на размножување на неутроните** k , понекогаш наречен и **фактор на мултипликација**. Коэффициентот на размножување е зададен со количникот помеѓу бројот на ослободени неутрони во i – тата етапа на нуклеарната фисија и бројот на неутроните ослободени во претходната $i-1$ -та етапа:

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{N_3}{N_2} \dots = \frac{N_i}{N_{i-1}}. \quad (3)$$

Се покажало дека сите секундарни неутрони не предизвикуваат фисија на јадрата, што доведува до намалување на коэффициентот на размножување. Секундарните неутрони или ќе бидат исфрлени од активната зона (каде настанува верижната реакција) поради нејзините конечни димензии или поради големата брзина пред да бидат зафатени од јадрата ќе бидат подложни на фисија; можно е да бидат зафатени и од оние јадра кои припаѓаат на примесите што не се подложни на фисија.

Дали ќе дојде до верижна реакција, а ако дојде до неа, каков ќе биде нејзиниот карактер, зависи од вредноста на коэффициентот на размножување на неутроните k . **Неопходен услов да се развива верижната реакција** е $k > 1$. Да земеме, на пример, коэффициентот на размножување дека е $k=1,05$. Ако во првата генерација има 100 неутрони, тогаш нивниот број во втората генерација ќе биде $100 \cdot 1,05$, во третата $100 \cdot (1,05)^2$ итн. На тој начин верижната реакција отпрвин полека, а потоа сè посилено расте.

Наспроти тоа, кога $k < 1$, верижната реакција не може да се одржува. Да земеме, на пример, дека $k=0,95$. Тоа значи, од 100 неутро-

ни, во втората генерација ќе имаме 95, во третата $100 \cdot (0,95)^2$ итн. Во почетокот на стотата генерација ќе има помалку од еден неутрон, така што верижната реакција се прекинува.

Ако е вредноста на $k=1$, верижната нуклеарна реакција се одржува сама по себе и со константен интензитет. Во таков случај верижната реакција се одвива **контролирано**.

Коэффициентот на размножување зависи од природата на супстанцијата подложна на фисија, од масата, димензиите и формата на активната зона. **Минималната маса на фисионата супстанција, во која настанува верижна реакција, се вика критична маса**. За критичната маса коэффициентот на размножување е $k=1$, верижната реакција ќе тече, бидејќи со тек на времето бројот на неутроните не се менува. Наспроти тоа, кога масата на системот е помала од критичната маса не може да се одржува верижната реакција.

Верижните реакции се делат на **контролирани и неконтролирани**. Контролираните верижни реакции се одвиваат во **нуклеарните реактори**.

Експлозијата на **атомската бомба** претставува неконтролирана верижна јадрена реакција. За да не дојде до експлозија, фисионото гориво е поделено на два дела со еднакви маси, но помали од критичната. Околу фисиониот материјал е поставен рефлектор за да се намали загубата на неутрони и ефикасноста на фисијата да биде што е можно подобра. За да се развие верижна реакција со помош на обична експлозија, овие две маси се соединуваат и масата станува поголема од критичната маса.

При експлозивната верижна реакција се ослободува огромно количество енергија со разорна моќ. Притоа, до израз би дошле следниве дејства: **ударното (механичко), топлинското и радиоактивното**.

На пример, експлозијата на атомската бомба со 1 kg ^{235}U би била еднаква со експлозијата на 20000 тони класичен експлозив на тринитротолуол (TNT).

ПРИМЕР 1. Со користење на периодниот систем на елементите може да се пресмета точниот износ на ослободената енергија реакцијата дадена со (2).

17. Нуклеарна физика

Решение. Треба прво да го пресметаме дефектот на масата Δm :

$$\Delta m = [235,04395 + 1,008665] - [142,92054 + 89,91959 + 3(1,008665)] = 0,186 \text{ u}$$

Ослободената енергија $\Delta E = \Delta m c^2$, со оглед на фактот дека на 1 u одговара еквивалентна енергија $931,5 \text{ MeV}/c^2$ (видете поглавје 2.13) се добива:

$$\Delta E = 0,186 \cdot 931,5 = 173,3 \text{ MeV}.$$

Малку историја

За можноста за добивање корисна енергија од нуклеарните реакции било дискутирано во текот на триесеттите години на минатоот век.

Германските научници Ото Хан (Otto Hahn) и Ф. Штрасман (F. Strassman) направиле опстојна студија на резултатите на реакциите на бомбардирање на ураниумот со неутроните. Така, во 1939 година тие покажале дека како резултат на ова бомбардирање се добива бариумот, елемент со атомски број 56 и никако не можеле да објаснат како од ураниумот се добива овој елемент. Една недела по нивната анализа, Лиза Мајтнер (Lisa Meitner) и Ото Фриш (Otto Frisch) претпоставиле дека при бомбардирањето на ураниумот јадрото се дели на две помали јадра и притоа се ослободуваат големи износи енергија.

Ова откритие, направено непосредно пред Втората светска војна, веднаш укажувало и на можноста со помош на фисија да се добие корисна енергија, но и дека може да се добие бомба со огромна разорна моќ. За време на војната во САД се собрала цела плејада на врвни научници (најголем број емигранти од Европа) кои работеле засилено на развојот на јадрената технологија. Така, под раководство на Енрико Ферми во 1942 година во Чикаго е пуштен во погон првиот јадрен реактор. На 16 јули 1945 година во пустинскиот дел на Ново Мексико, САД е извршена првата експлозија на атомска бомба, а во почетокот на август истата година е фрлена атомската бомба на Хирошима и Нагасаки.

Прашања, задачи, активности

1. Напишете ги во развиена форма следниве две карактеристични реакции со деутерон:



2. Зошто неутроните се погодни како проектили за нуклеарните реакции?
3. Зошто термичките неутрони полесно се апсорбирани од јадрата од брзите?
4. Проверете ја валидноста на законите за запазување на електричниот полнеж и законот за запазувањето на нуклеоните кај сите реакции дадени како пример во последните две наставни единици

Побарајте на интернет веб страници:

- [Nuclear Reactions](#)

www.nidlink.com/~jfromm/history/nuclear2.htm - 26k - [Cached](#) - [Similar pages](#)

- [Matter-Antimatter Annihilation](#)

http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/known/gamma_generation.html

- [Nuclear Fission Concepts](#)

hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/fiscon.html - 5k -

и проширете ги вашите знаења

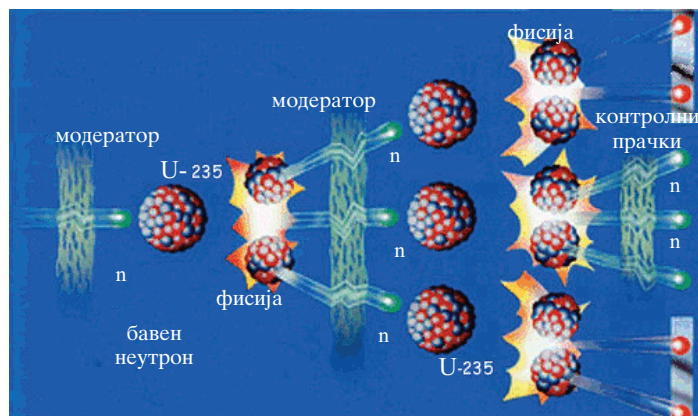
РЕЗИМЕ

- Коефициент на размножување на неутроните k , понекогаш наречен и *фактор на мултипликација*. Коефициентот на размножување е зададен со количникот помеѓу бројот на ослободени неутрони во i -тата етапа на нуклеарната фисија и бројот на неутроните ослободени во претходната $i-1$ -та етапа:

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{N_3}{N_2} \dots = \frac{N_i}{N_{i-1}}.$$

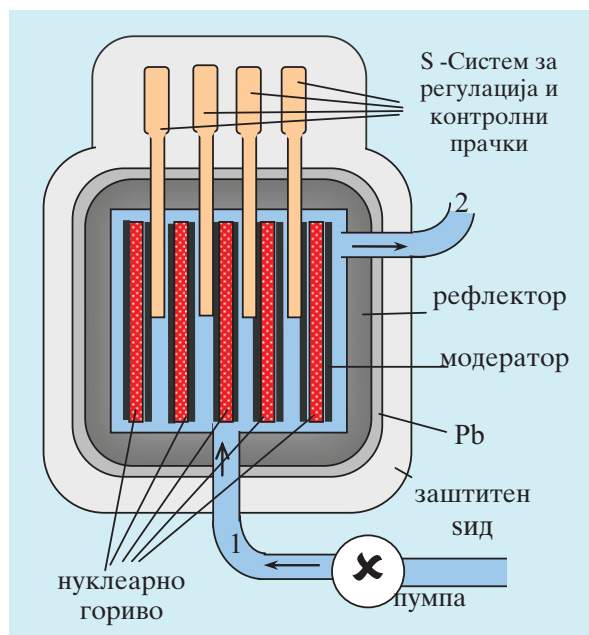
- Услов за да настане верижна реакција е коефициентот на размножување на неутроните k да биде еднаков или поголем од единица.

17.10. НУКЛЕАРНИ РЕАКТОРИ



Сл. 1. Контролирана верижна реакција

Нуклеарниот реактор претставува систем во кој се остварува процесот на контролирана верижна реакција, а со тоа и контролирано ослободување на нуклеарната енергија. Првиот нуклеарен реактор е изграден само три години по откривањето на фисијата во Чикаго во 1942 година, под раководство на Е.Ферми.



Сл. 2. Шематски приказ на реактор

Според тоа дали фисијата е предизвикана од брзи или бавни неутрони нуклеарните реактори може да се поделат на **термички, брзи и интермедијарни реактори**. Кај термичките реактори, за да се забават неутроните до термички, потребно е да има доволно количество модератор. Додека, пак, брзите реактори немаат модератори. Кај интермедијарните реактори неутроните се само делумно забавени. Секој нуклеарен реактор што работи на принцип на термички (бавни) неутрони, ги има следниве конструктивни елементи кои се прикажани на сл.2.

Материјалот во кој се одржува верижната реакција на фисија се вика **нуклеарно гориво** (фисионен материјал со наткритична маса). Како нуклеарно гориво може да се користат: изотопите на ураниумот ^{233}U , ^{235}U , природниот ураниум збогатен со изотопски јадра на ^{235}U , ^{239}Pu и смеса на изотопите ^{239}Pu со ^{238}U . Сепак, за најрентабилни нуклеарни горива се сметаат изотопите ^{239}Pu и ^{233}U . Тие се вештачки добиени елементи, а се добиваат како последица на заробување на неутрони од страна на јадрата на ^{238}U и ^{232}Th . Јадрата на ^{238}U и ^{232}Th се викаат **плодоносни материјали**. Од нив се добива нуклеарното гориво.

Просторот каде што е сместено горивото и модераторот се вика **активна зона на реакторот**. Според тоа каков фисионен материјал се користи, нуклеарните реактори се делат на: реактори што користат природен ураниум, слабо обогатен ураниум, обогатен ураниум, реактори што користат некои вештачки нуклиди итн.

Во средината на реакторот се сместени горивото и модераторот. Според начинот како се измешани горивото и модераторот, реакторите може да бидат: **хетерогени и хомогени**.

Во хетерогениот реактор нуклеарното гориво е во тврда состојба и обликувано во цилиндрични или призматични прачки или плочи. Тие се херметички затворени во метална обвивка (алуминиум, циркониум, челик кој не оксидира) која го заштитува горивото од

17. Нуклеарна физика

корозија и спречува продуктите на фисијата да се разнесат во околната средина .

Во хомогениот реактор нуклеарното гориво или е растворено во модераторската течност или во неа е присутно како дисперзен прашок.

Како **модератори** обично се користат материјали со мали редни броеви чии јадра не стапуваат во интеракција со неутроните. Такви се: обичната и тешката вода, берилиумот или неговиот оксид и графитот. Поради големиот коефициент на заробување неутрони, графитот, берилиумот и тешката вода, брзите неутрони ги претвораат во термални. Тешката вода е најдобар модератор. Но таа, како и берилиумот, е скапа. Графитот е најефикасен и затоа (особено во хетерогените реактори) најчесто се користи како модератор. Реакторите кои работат со збогатено нуклеарно гориво го користат најефикасниот модератор- обичната вода.

Секое одбегнување на неутроните од активната зона на реакторот има за последица смалување на нивната искористеност за фисија. Искористеноста на неутроните се зголемува така што активната зона е опкружена со **рефлектор за неутрони**. Со тоа се постигнува критичните димензии и критичната маса на јадрото на реакторот да бидат помали. Во реакторите што работат со бавни неутрони рефлекторите се направени од истите материјали што се користат за модератори.

Системот за автоматска регулација S врши обезбедување на реакторот постојано да работи во режим на контролирана верижна реакција. Во тој систем се вклучени во работа низа јонизациони комори кои вршат перманентно мерење на густината на неутронскиот флукс во активната зона на реакторот. Ако густината на неутронскиот флукс се промени од пропишаната вредност, стапуваат во дејство алармните уреди за автоматско вовлекување и извлекување на **контролните прачки**-апсорбери од активната зона. Прачките апсорбери се избработени од материјал кој силно апсорбира термални неутрони (како борен челик, боркарбид, кадмиум или хафниум). Ако од кои било причини коефициентот на размножување на неутроните ја надмине значително вредноста $k=1$, неконтролираната

верижна реакција се управува со вовлекување на прачките апсорбери во активната зона. Обратно, ако вредноста на k опадне под единица, со извлекување на прачките од активната зона, нуклеарната реакција се забрзува.

Покрај регулационите, постојат и **сигурносни прачки** со чие вовлекување во активната зона се запира верижната реакција.

За контролирана нуклеарна реакција во еден реактор се смета реакцијата кај која коефициентот на размножување на неутроните се движи во границите $1 < k < 1,01$.

Системот за ладење има двојна улога: да го заштити реакторот од прекумерно загревање, а вишокот топлина по пат на циркулација на вода, гас или пара да се пренесе на разменувачот на топлина, а оттаму да се пренесе и до турбинските генератори за производство на електрична енергија.

Во нуклеарните реактори со течно гориво, улогата на разменувач на топлина ја има горивото кое преку систем од пумпи се доведува во постојана циркулација. Разменувачи на топлина може да бидат: обична вода, воздух, компримиран CO_2 , а во последно време и некои течни метали, меѓу кои и течен Na .

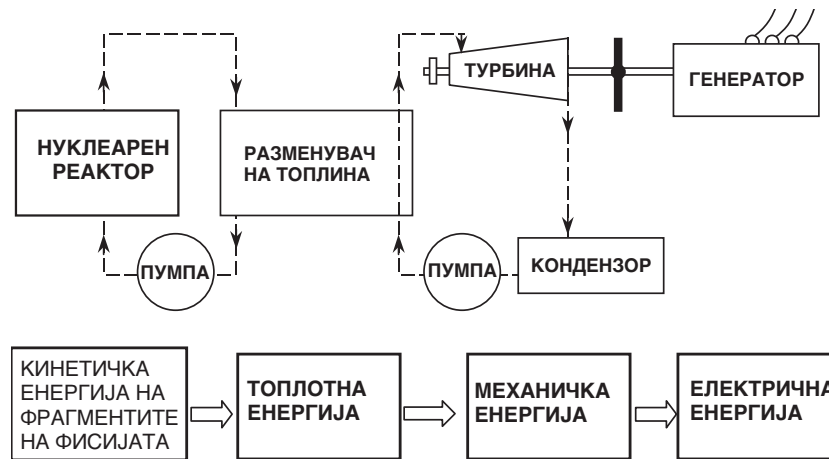
Систем за биолошка заштита. Нуклеарниот реактор е силен извор на радијација (особено опасно е неутронското и γ - зрачењето) и ги надминува дозволените дози на зрачење. Затоа, секој реактор има систем за заштита, а со него се управува од растојание. Околу реакторскиот блок има заштитен оклоп од бетон и железо (до 2 m дебелина), а околу активната зона има оловен слој. Системот, исто така, има задача да го спречи испуштањето на фисиони продукти и други радиоактивни материјали во случај на поголемо оштетување или хаварија.

Поделба на реакторите

Освен поделбата што досега беше кажана нуклеарните реактори според намената може да се поделат на:

1. **Енергетски реактори** кои се користат за добивање на полезна енергија што се користи за погон на електрични централи и транспортни објекти. Во овој случај реакторот ја има улогата на извор на топлина. Реак-

17. Нуклеарна физика



Сл. 3. Шематски приказ на нуклеарна централа. Кинетичката енергија на фрагментите на фисијата се претвора во топлинска која се одведува во разменувачот на топлина во кој се произведува пара за погон на турбината која, пак, го придвижува генераторот.

торите, всушност, се основен дел на **нуклеарните центри**. Шематски системот за производство на електрична енергија во нуклеарните центри е прикажан на сл.3 и сл.4.

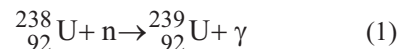


Сл. 4. Надворешен изглед на нуклеарна централа, со заштитните бетонски ѕидови

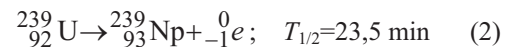
Првата примена на нуклеарната енергија за мирновременски цели е реализирана во 1954 година во СССР. Тогаш е пуштена првата нуклеарна електрична централа чија моќност била околу 5000 kW.

2. Реактори за научно-истражувачка работа во областа на физиката и другите гранки од науката; за вршење на експерименти со цел да се запознаат особините на

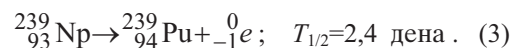
реакторите и да се определи во која насока треба да се усовршат нивните конструкции. Испитувањата на процесите кои се одвиваат во реакторите доведува до откривање на низа нови трансураниумски елементи. Јадрото на ^{238}U , најзастапено во природниот ураниум, не може да се доведе до фисија со термални неутрони. Меѓутоа, со зафат на термални неутрони се добива ^{239}Pu , и тоа според реакцијата:



Изотопот ^{239}U е β^- -нестабилан со период на полураспаѓање $T_{1/2}=23$ минути и со негово распаѓање се добива елементот со $Z=93$ - нептуниум:



Нептуниумот е, исто така, β^- -нестабилан ($T_{1/2}=2,3$ дна), и притоа се добива изотоп на плутониум:

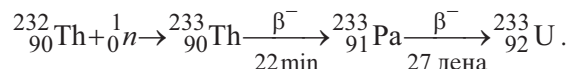


Така добиениот ^{239}Pu е α -нестабилан и има сребрено бел метал. Денес, освен Np и Pu, познати се уште седум трансураниумски елементи.

17. Нуклеарна физика

3. **Реактори за техничка примена.** Со реакторите се добиваат многу интензивни снопови на термички и брзи неутрони. Со нив се бомбардираат стабилните изотопи на елементите со цел да се добијат вештачки радиоактивни изотопи кои се користат во физиката, биохемијата, медицината, техниката и стопанството.

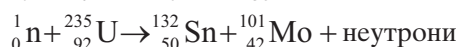
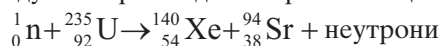
4. **Производни реактори за добивање ново фисионо гориво** (^{233}U и ^{239}Pu). Тој материјал се добива преку заробување на неутрони. Како извор на неутрони се ползуваат неутроните добиени со фисија во реакторите. Во ваквиот реактор неутроните се користат за одржување на верижната реакција и за производство на нуклеарно гориво според предходните релации или според:



Како производни се користат брзите реактори.

Прашања, задачи, активности

1. Определете го бројот на неутроните кои се ослободуваат при следниве фисиони цепања:



2. Посочете сличности и разлики помеѓу атомската бомба и нуклеарен реактор.

3. Дискутирајте ги предностите и недостатоците на користењето на јадрените реактори во електричните центри. Посочете ги еколошките проблеми поврзани со нуклеарните центри.

Екологија и физика

По Чернобилската хаварија која се случи во 1986 година, на заштитата на нуклеарните центри се посветува многу поголемо внимание.

Но, освен хавариите, од нуклеарните реактори се заканува уште една многу голема опасност. Тоа е т. н. **нуклеарен отпад**. Имено,

нуклеарното гориво во реакторот по подолго дејство се осиромашува и треба да се замени со ново. Меѓутоа, веќе употребеното гориво содржи големи количества на радиоактивни супстанции. Проблемот каде и како да се складира овој нуклеарен отпад е светски проблем. Засега, некои од употребените горива се користат за повторна употреба, но најголемиот дел од нив се складира во специјални контејнери, поставени во гранитни стени. Се настојува радиоактивните супстанции да не дојдат во допир со почвата или водата за многу векови.

Осиромашениот ураниум претставува специјален тип на нуклеарен отпад што се добива како нуспродукт во процесот на збогатување на ураниумот. Материјалот е во форма на многу тврда керамика, па затоа се користи во воени цели за обложување на проектилите заради зголемување на нивната продорност во метата.

Побарајте ги на интернет:

1. [Nuclear reactor- Wikipedia](http://www.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor) - 32k - www.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor - 32k -
 2. [How a Nuclear Reactor Works](http://zebu.uoregon.edu/1999/ph161/118.html) - 3k - zebu.uoregon.edu/1999/ph161/118.html - 3k -
 3. [Howstuffworks "How Nuclear Power Works"](http://science.howstuffworks.com/nuclear-power.htm) - 21k - science.howstuffworks.com/nuclear-power.htm - 21k
- и проширете ги вашите знаења



Enrico Fermi (1901-1954) е роден во Рим. На 21-годишна возраст станал доктор по физички науки. Независно од Дирак во 1925 год. ја формулирал статистиката на микрочестиците познати како фермиони. Работел на квантната теорија на β -распаѓањето. Во 1938 година му е доделена Нобелова награда. Во 1942 година тој раководел со тимот кој работел на конструкцијата на првиот нуклеарен реактор

17.11. ЈАДРЕНА ФУЗИЈА ТЕРМОЈАДРЕНИ РЕАКЦИИ

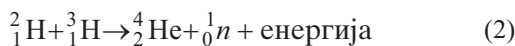
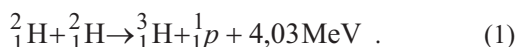
При фузијата се ослободува големо количество енергија, дури и поголема од енергијата ослободена при фисијата. *Од каде се добива толкава енергија?* Ако подетално се проучи зависноста на специфичната енергија на сврзување од масениот број (види сл. 2 од поглавје 12.3) може да се види дека таа кај јадрата од почетокот на периодниот систем е помала отколку кај тие од средината. Збирот на масите на двете лесни јадра е поголем од масата на новодобиеното јадро и евентуалната честица што би се добила, има голем дефект на маса, а тоа значи дека ќе се ослободи големо количество енергија.

Во принцип постојат две можности за остварување фузија:

- со забрзување на јадрата со помош на акцелератори, и

- со обезбедување високи температури (ред на големина 10^7 K и повисоки) при кои јадрата поседуваат голема енергија.

Експериментите покажуваат дека изотопите на водородот (деутериум и трициум) се најпогодни за остварување фузија. На пример, кога јадра од деутериум или трициум се бомбардираат со забрзани јадра на деутериум, може да протечат следниве реакции:



Енергијата што се ослободува при секој процес на фузија, многукратно ја надминува енергијата потрошена за забрзување на деутериумовите јадра. Меѓутоа, кога се има предвид дека само едно од милион забрзани јадра може да предизвика фузија, јасно е дека потрошената за забрзување на јадрата енергија е многу поголема од ослободената при фузијата.

Нуклеарната фузија на лесни јадра настанува и на супервисоки температури. Таа е наречена **термојадрена реакција**.

Колкава температура треба да се постигне за да се оствари фузија на деутериум и трициум?

Пресметките покажуваат дека нуклеарната фузија настанува при температури кои се два ред на големина повисоки од температурата во центарот на Сонцето. Сепак, се покажало дека за да тече реакцијата на синтеза на атомските јадра, доволна е температура од редот 10^7 K. При така високи температури материјата се наоѓа во специфична состојба што се вика **високотемпературна** плазма. Во оваа состојба на супстанцијата честиците се со висок степен на јонизација (не постојат атоми туку одделни јадра и електрони кои имаат голема енергија).

Колкава енергија се ослободува во процесот на термојадрена фузија на две јадра? Тоа може да се илустрира со следниот пример.

Фузијата помеѓу две лесни јадра може да се оствари само при услов јадрата да поминуваат едно покрај друго на растојание еднакво на радиусот на дејство на нуклеарните сили. Притоа, јадрата што учествуваат во процесот на фузија, за да се надминат силните одбивни сили на истоимено наелектризираните атомски јадра, треба да располагаат со голема кинетичка енергија. За таа цел, атомските јадра треба да се движат во средина во која владее висока температура.

ПРИМЕР 1. Колкава енергија се ослободува при фузија на еден грам деутериум во хелиум?

$$m_n = 1,008665 \text{ u} \quad m({}^1_1\text{H}) = 1,007825 \text{ u}$$

$$m({}^4_2\text{He}) = 4,002603 \text{ u}$$

Решение. Енергијата што се ослободува при фузија на два деутериума во хелиум е

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2, \text{ каде што дефектот на маса е:}$$

$$\Delta m = 2 [m_n + m({}^1_1\text{H})] - m({}^4_2\text{He}) = 0,03035 \text{ u} .$$

Во последната равенка првиот член се масите на учесниците пред реакцијата, а вториот е масата на продуктот од реакцијата. Ако се заменат соодветните вредности за масите ослободената енергија, изнесува:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 0,03035 \cdot 931,5 \text{ MeV} = 28,27 \text{ MeV}$$

Ако во 1 mol хелиум има N_A атоми, во 1 g има N_A / M , каде што $M = 4$ е моларната маса на хелиумот. Енергијата што се ослободува

при фузија на еден грам деутериум во хелиум изнесува:

$$\Delta E = \frac{6,022 \cdot 10^{23}}{4} \cdot 28,27 \text{ MeV}$$

$$\Delta E = 42,4 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$\Delta E = 67,8 \cdot 10^{10} \text{ J} .$$

Што е речиси десет пати повеќе од енергијата што може да се добие со фисија на 1 g ^{235}U .

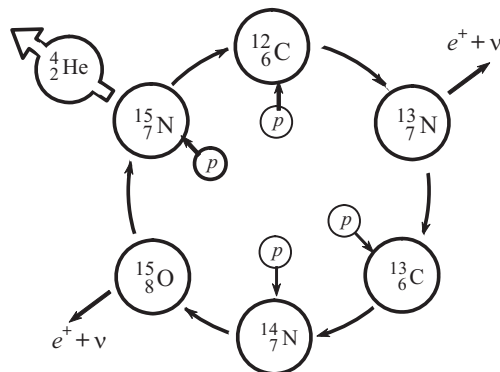
Термојадрени реакции на Сонцето и ѕвездите

Термојадрените реакции што се случуваат на Сонцето и ѕвездите се резултат од постоење на високотемпературна плазма. Во составот на Сонцето и ѕвездите се покажало дека има 80% водород и 20% хелиум, додека јаглерод, азот и кислород нема повеќе од 1%. Тоа придонесува Сонцето да е неисцрпен извор на термојадрена енергија. Бидејќи таму владеат температури од ред на големина 10^7 - 10^8 K постојат услови за термојадрена фузија.

Термојадрени реакции на Сонцето се одвиваат во етапи - *термојадрени циклуси*. Крајниот резултат е издвоена енергија за сметка на фузијата на водородни јадра во хелиум. На ѕвездите како што е Сонцето чија температура е пониска од $1,5 \cdot 10^7$ K се претпоставува дека протекува т.н. *протон-протон циклус*.

При поголемите ѕвезди чија температура во центарот се повисоки од $1,5 \cdot 10^7$ K повеќе е *јаглеродно-азотниот циклус (CNO-циклус)* (сл.1) предложен од Ханс Бете. И при двата циклуса се создаваат неутрина (ν) кои се шират во космосот.

При јаглеродниот циклус четири слободни протони преминуваат во ^4_2He . Почетниот атом на јаглеродот по завршување на циклусот е спремен со започнување на нареден циклус. Имено, количеството јаглерод не се променува, тој е само катализатор при реакцијата.



Сл. 1. Шематски приказ на CNO циклусот при кој се добива хелиум и 4 јадра на водород (4-протони)

Контролирана јадрена фузија

Дека термојадрените реакции може да се остварат и на Земјата, никој веќе не се сомнева. Првата вештачка термојадрена синтеза е остварена во 1953 год. во СССР, а по половина година и во САД, кај хидрогенската бомба. Таа всушност, претставува *неконтролирана термојадрена фузија*. Тука температурата потребна за одвивање на фузијата се остварува со експлозија на ураниумова или плутониумова атомска бомба.

Остварувањето на контролирана термојадрена реакција (фузија) на Земјата, што е од особен интерес, би обезбедило нов, практично, неисцрпчив извор на енергија. Засега, реализираните контролирани фузии сè уште се на ниво на научни истражувања. Фузијата има повеќе предности.

- Енергија што се ослободува во процесот термојадрена фузија е огромна. Тоа може да го илустрираме со примерот фузија на деутериумот што се содржи во еден литар обична вода. Се издвојува толку енергија, колку што би се ослободила при согорување на околу 350 литри бензин.

- Втора важна предност на фузијата е тоа што *новодобиените јадра не се радиоактивни. Нема радиоактивен отпад што од*

еколошки аспект е многу битно за човекот и животната средина.

- Исто така, при добивањето на јадрена енергија по пат на фузија, за разлика од јадрената фисија, почетокот и понатамошниот развој на термојадрената реакција не зависи од масата на елементите што земаат учество во термојадрената реакција, па кај нив не треба да се води сметка за критичната маса.

Проблемот на контролирана термојадрена фузија, не е решен. За да се оствари таквата фузија треба да бидат исполнети следните услови:

- **Голема густина.** Во внатрешноста на реакторот плазмата треба да достигне критична густина од ред на големина приближно 10^{13} чест./ cm^3 , Колку е поголема густината толку е поверојатно во единица време јадрата да претрпат судир;

- **Висока температура.** Иако во внатрешноста на фузиониот реактор се постигнати температури до 100 милиони степени контролирана фузија не е постигната. Основна пречка е третиот услов.

- **Доволно долго време** да се одржи високо-температурната плазмата.

Денес се конструирани системи во кои плазмата достигнува приближно густина $3,7 \cdot 10^{13}$ чест./ cm^3 и се задржува околу 1,1 s. Меѓутоа, кога би се постигнале високи температури, густината на плазмата би се намалила.

Во експериментите за добивање на контролирана фузија како основна тешкотија се појави проблемот, работната супстанција која е наполно јонизирана плазма да биде термоизолирана од ѕидовите на реакторот. Имено, и при најмал допир на плазмата со ѕидовите на садот во кој се чува, брзо се лади под температура на која е можна фузија. Практично тоа одвојување од ѕидовите на комората се остварува со силно магнетно поле во кое честичите од целосно јонизираната плазма се движат по кружни патеки чијшто радиус е помал колку што магнетното поле е посилено. На тој начин плазмата се изолира термички од ѕидовите на реакторот. Јаките магнетни полиња на тој начин ја задржуваат плазмата во ограничен волумен и на дистанца од ѕидовите на реакторот.



Сл.2. Внатрешноста од тороидалната комора на термојадрениот реактор ТОКАМАК

Во лабораториите денес практично се експериментира на два типа фузиони реактори. Првиот тип е познат под името ТОКАМАК (тороидална комора со магнетно поле сл.2) и СТЕЛАТОТОР (свезден реактор).

Прашања, задачи и активности

1. Како се објаснува фактот дека при фузијата на лесни јадра се ослободува енергија?
2. Зошто при јадрената фузија јадрата треба да имаат голема кинетичка енергија? Кои се условите за да се остварат вакви реакции?
3. Спорд современите сваќање, кои термојадрени реакции се одвиваат на Сонцето и ѕвездите?
4. Кои се предностите на термојадрените реактори од нуклеарните реактори?
5. Масата на трициумот е $m({}_2^3\text{He}) = 3,016049$ u, а на јадрото на хелиумот $m({}_2^4\text{He}) = 4,002603$ u.
6. Да се определи енергијата што се ослободува при фузијата на јадрата на деутериум и трициум во јадро на хелиум според јадрената реакција (2).

(Одговор: 17,8 MeV)

7. Денес практично во лабораториите се експериментира со два типа реактори, кои се?

17.12. ДЕТЕКТОРИ ЗА ЈОНИЗИРАЧКО ЗРАЧЕЊЕ

Регистрација на радиоактивното зрачење

Со развојот на науката за “микросветот”, во делот кој се однесува на радиоактивноста, особена улога одиграле приборите со кои можеле да се регистрираат дејствата на една единствена честица со димензии на атом, и помали, како и да се мери нејзината енергија, да се определи нејзиниот полнеж и другите својства.

Уредите со чија помош се регистрираат јонизирачките зрачења и се определуваат нивните карактеристики се викаат детектори на јонизирачки зрачења.

Детекцијата се заснова на основните својства на α , β , и γ - зрачењата: нивната јонизациона моќ, хемиското дејство врз фотографските плочи или способноста да предизвикуваат луминисценција.

Во принцип кај секој таков уред една микропричина, на пример, појава на електрон, предизвикува макроскопски ефект, на пример појава на трага на честица која може да биде видена со голо око. Тоа е можно само во услови, кога макросистемот во уредот се наоѓа во таква недоволно стабилна состојба што минимално дејство на микрочестица го доведува системот во постабилна состојба која може да биде регистрирана.

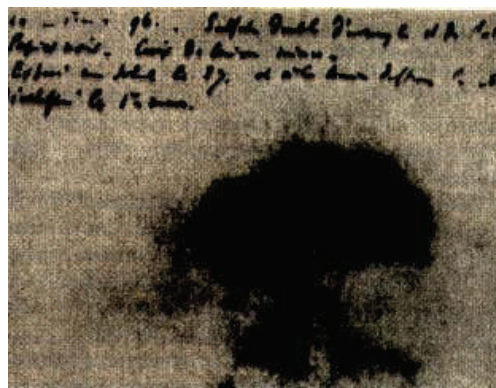
Важна карактеристика на секој детектор е неговото **мртво време**. Тоа е временски интервал кој настапува по регистрирањето на некоја честица, па до моментот кога системот повторно ќе се врати во нестабилна состојба, за да може да регистрира други честици.

Втора карактеристика на детекторите е нивната **ефикасност** која укажува кој дел од вкупно паднатите честици на него ќе бидат регистрирани од детекторот.

Ќе опишеме како функционираат некои од уредите за детекција на овие зрачења.

Фотоемулзија

Познато е дека Бекерел за прв пат го открил радиоактивното зрачење преку дејството врз фотографска плоча. На сликата 1 е дадена оригиналната слика на фотографска плоча изложена на зрачење од уранова сол.



Сл. 1 Првата регистрација на радиоактивното зрачење

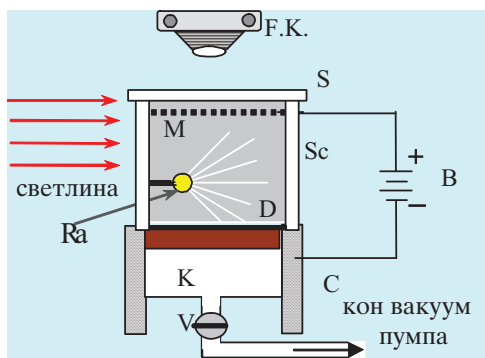
Методот на фотографската плоча е усовршуван, така што примената на фотографските емулзии послужиле за откривање на космичкото зрачење или други нуклеарни зрачења. Трагите на фотоемулзиите по фотографската обработка се анализираат со микроскоп или се прават микрофотографии.

Вилсонова комора. Меурчеста комора

Во развојот на нуклеарната физика **Вилсоновата комора** одиграла многу важна улога. Веднаш по Радерфордовото откритие на првата вештачка трансмутација на јадро, појавата била регистрирана и анализирана со овој детектор. Исто така, со Вилсоновата комора се откриени позитроните, мезоните и некои други честици.

Основниот принцип на кој работи и го регистрира присуството на јонизирачки зрачења е особината на создадените јони да бидат центри за кондензација кога се наоѓаат во средина презаситена со пара. Кога просторот во кој е сместен радиоактивниот препарат ќе се осветли, трагите на честиците стануваат видливи. Денешниот облик на Вилсоновата комора многу малку се разликува од првите модели.

Вилсоновата комора, шематски прикажана на сл.2, обично се состои од стаклен цилиндар Sc кој продолжува во метален цилиндар S. Стаклениот цилиндар одозгора херметички е затворен со рамна стаклена плоча С преку која се набљудува или фотографира појавата што се одвива во комората.



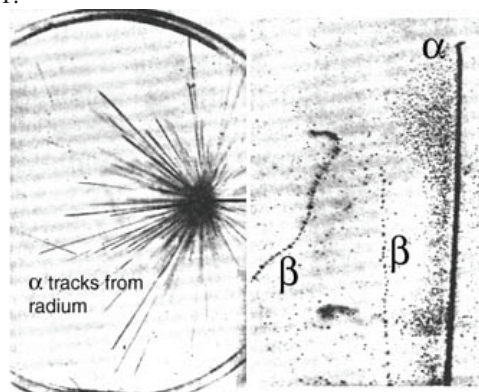
Сл. 2

По должината на металниот цилиндар може да се движи клип К. Во затворениот простор се создаваат заситени пари на некоја течност која, обично, е смеса на вода и етилалкохол. Тоа се постигнува со тоа што врз гумената дијафрагма D има мала количина течност. При отворање на вентилот V, под клипот К нагло се снижува притисокот и доаѓа до брзо спуштање на клипот К. Притоа, гасот адијабатски се шири и лади. Парите на течноста стануваат презаситени. И ако во оваа област се најдат честици од прашина, тие ќе послужат како центри на кондензација поради што на нив се кондензираат ситни капки на течност. Меѓутоа, ако во просторот нема прашина, до појавата кондензација нема да дојде.

Вилсон дошол до идеја дека и позитивни и негативни јони, слично како прашичките, можат да бидат центри на кондензација на заситените пари. Кога просторот во кој е сместен радиоактивниот препарат, на пример радиумот (Ra) ќе се осветли, трагите на честиците стануваат видливи.

За брзо неутрализирање на јоните што се создаваат во Вилсоновата комора, или јоните создадени од природното космичко зрачење, така што таа да биде доведена во состојба да регистрира, во внатрешноста на комората се создава силно електрично поле. Тоа се постигнува така што на внатрешната страна на стаклениот цилиндар се прицврстува метален прстен M кој на сл. 2 е прикажан со испрекинати цртички. Металниот прстен е сврзан со едниот пол на батеријата B чија електромоторна сила е неколку стотини волти, а другиот пол на батеријата е сврзан со металниот цилиндар C. Во зависност од знакот на јоните, електричното поле ги упатува

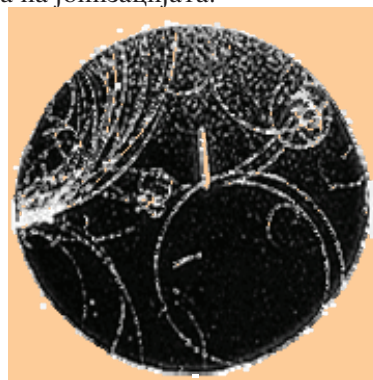
старите јони кон металниот прстен, односно металниот цилиндар и на нив се неутрализираат.



Сл. 3. Траги на α и β -честици, добиени од Вилсон во 1912 год.

Во Вилсоновата комора α -честиците оставаат подебели траги од трагите на β -честиците. Тоа е резултат што на единица должина од својот досег α -честицата создава поголем број јони отколку β -честиците (сл.3). Најдебела трага оставаат јоните на некој елемент.

За подетална анализа на јонизирачките честици нивните траги се снимаат со помош на фотографска камера F.K. Мерењето на должината на трагата на честиците овозможува мерење и на нивната енергија. Од друга страна, мерењето на бројот на центрите на кондензација овозможува да се суди и за природата на јонизацијата.



Сл. 4. Фотографија на јонизирачки честици во магнетно поле

Денес во поголема употреба од Вилсоновата комора е т.н. **меурчестата комора**, откриена во 1952 год. од страна на Д. Глејзер. Комо-

рата се користи за детекција на честици со висока енергија.

При работа со овие два типа комори може да се користи и магнетно поле (сл.4) кое овозможува да се определи како импулсот така и знакот на електричниот полнеж на честиците.

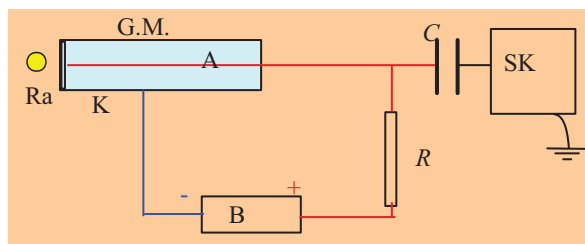
Гајгер-Милеров бројач

Помеѓу поголем број гасни детектори најпознат е Гајгер-Милеровиот бројач (сл.5). Кај него се користи својството на јонизирачките честици да вршат јонизација.



Сл.5. Гајгер-Милеров бројач (детектор и скалер)

Гајгер-Милеровиот бројач, всушност, е цилиндрична диода, каде што анодата (А) е волфрамова жица сместена по должината на оската на цилиндарот, а катодата (К) е неговата обвивка (сл.6). Цевката е исполнета со еден од инертните гасови, или смеса од инертен гас и алкохолни пари под снижен притисок, (околу 1 kPa). Овие гасови лесно се јонизираат.



Сл. 6. Упростена шема на ГМ бројач

Помеѓу анодата и катодата е донесен напон од околу 1,2 kV. На едниот базис на цилиндарот е направен многу тенок прозорец од диелектрик (момирок) за да може низ него

да влегуваат радиоактивните зрачења (алфа, бета и гама). Кога Г-М цевка не е во близина на радиоактивни зрачења, тогаш помеѓу анодата и катодата не протекува струја. Но, кога во цевката ќе навлезе α или β -честица, таа јонизира некои од молекулите на гасот, па добиените слободни електрони и јони се насочуваат кон електродите. Поради силното нехомогено поле помеѓу електродите полнежите добиваат дополнителна енергија и се способни за натамошна јонизација на нови молекули. Така бројот на тие полнежи лавинообразно се зголемува. Доаѓа до процесот на судирна јонизација. Кога електроните ќе стасаат до анодата тие го намалуваат нејзиниот потенцијал, поради што низ отпорникот ќе потече струја (тоа е макроефектот) која ја регистрира скалерот. Напонот на краевите на отпорникот е така поларизиран да ја компензира разликата на потенцијалот помеѓу анодата и катодата. Поради тоа, по кусо време потенцијалната разлика помеѓу електродите станува така мала што електричното поле не може да ги забрзува електроните до брзината потребна за создавање на јонската лавина. Од таа причина струјата во отпорникот слабее, а со тоа се намалува напонот на неговите краеве, така што сега повторно се воспоставува почетниот напон помеѓу анодата и катодата (тој што е добиен од изворот на струјата В). Сега повторно се создадени услови за создавање на јонска лавина, односно струен импулс. Гледаме дека отпорникот игра улога на елемент кој го гаси (прекинува) струјното коло. Мртвото време трае се дури не запре лавината и не се воспостави првобитната состојба. Покрај скалерот, постои и засилувач а кај некои видови и звучник кој на секој ваков импулс дава звук, сличен на пукање пуканки.

При регистрација на електрони (β -зрачење) ефикасноста на овие детектори е речиси 100 %. Бидејќи јонизационата моќ на γ -зраците е мала, за нивна регистрација се користи ефектот на создавање лавина од електрони кои се избиени од γ -квантите од катодата. Така ефикасноста на γ -квантите е мала, околу 1%. За да се регистрираат α -честиците мора влезниот базис да биде многу тенок, доволно просирен за ова зрачење.

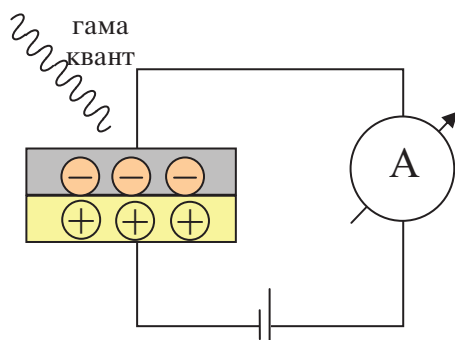
Современите Г-МБ можат да регистрираат и до 10000 честици во секунда.

Сцинтилациони методи

Има повеќе супстанции, наречени **сцинтилатори**, чии атоми се возбуждаат кога се озрачени со нуклеарни зрачења. Таков е на пример цинксулфидот со примеси на бакар. Кога таквите супстанции ќе се вратат во невозбудена состојба, тие емитураат фотони кои се регистрираат и даваат податоци за упадните честици.

Полупроводнички детектори

Во современата наука се користат и други видови детектори: пропорционални, полупроводнички, искра-комори и др. Од полупроводничките детектори најголема примена имаат детекторите со р-п – премин. Ако р-п контактот се поврзе со напон во инверзна (непропустлива) насока, така што р-полупроводникот се поврзе со негативниот пол на изворот на постојан напон, а п-полупроводникот со позитивниот пол, ширината на запириот слој на р-п преминот се зголемува, струја низ таков премин не тече.



Сл. 7. Упростена шема на полупроводнички детектор

Но, ако низ преминот помине некоја јонизирачка честица, таа создава нови носители на струја- електрони и шулини, и низ колото во кое е вклучен дадениот р-п систем протекува струен импулс. Значи при секој премин на јонизирачка честичка се создава струен импулс, па така ваквиот премин служи како одличен детектор на јонизирачки зрачења.

Прашања, задачи, активности

1. Објаснете кои физички процеси лежат во основата на функционирањето на Вилсоновата комора, Гајгер-Милеровиот бројач, сцинтилациониот бројач и полупроводничкиот бројач.
2. Колкаво е “мртвото време” на ГМ бројач кој регистрира до 10000 честици во секунда?

(Одговор: помало од 10 μ s)

3. Зошто α -честицата остава подебела трага од β - честицата
4. Ако сме далеку од каков и да било извор на јонизирачко зрачење, ГМ сепак брои импулси. На што се должи тоа?
5. Знаете ли дека вообичаената природна радиоактивност во најголема мерка се должи на радонот. Тоа е гас кој се добива со радиоактивно распаѓање. Во врска со него се поврзува задолжително проветрување на животните простории, зошто?
6. Ако до Гајгер Милеров бројач доближите часовник чии стрелки се обложени со флуоресцентен материјал за да можат да бидат видени и во темница, ГМ одбројува побрзо од вообичаено. Зошто?
- 7.. Ако сакате да го проширите своето знаење побарајте ја на интернет страницата: sr.wikibooks.org/sr-el/Детекција_радиоактивног_зрачења.

Кратко резиме

Детекцијата на јонизирачкото зрачење се прави, главно, преку основните својства на јонизирачките честици: нивната јонизациона моќ, нивното дејство врз фотоемулзија, нивното сцинтилационо дејството, можноста да станат центар на кондензација на презаситена пара и др.

Постојат повеќе видови детектори, меѓу кои се најпознати: Вилсоновата комора, меурчестата комора, фото-емулзиите, Гајгер- Милеровиот бројач, сцинтилациониот бројач, полупроводничкиот детектор.

17. 13. ДОЗИМЕТРИЈА НА ЈОНИЗИРАЧКО ЗРАЧЕЊЕ

α , β и γ радиоактивните зрачења, рендгенските зраци, потоа потоците од протони и неутрони зрачењата кои потекнуваат од Земјата и космосот, се наречени *јонизирачки зрачења*. Се поголемата примена на јонизирачките зрачења во радијационата медицина, радиобиологијата, во хемиската индустрија, за стерилизација на прехранбените продукти, фармацевтските препарати, медицинските инструменти итн. ја наметна потребата да бидат дефинирани одредени норми при заштитата. За таа цел, во нуклеарната физика е развиена посебна област *дозиметрија*. Таа ги проучува врските меѓу озрачувањето и ефектите што ги предизвикува, квантитативните законитости и методите за мерење на зрачењето.

Дозиметриски величини и нивни единици

За да може влијанието на зрачењето врз материјалната средина, особено на живите организми, квантитативно да се изрази, се воведува *апсорбирана доза и еквивалентна доза*.

Под поимот *апсорбирана доза* D се подразбира вкупната енергија која зрачењето (фотони, наелектризираны честици, неутрони) ја остава во материјата низ која поминува. Нека зрачењето поминува низ волумен на материјата ΔV , чија маса е Δm , и на тој волумен му предава енергија ΔW_D , т.е. зрачењето кое излегува од волуменот има за ΔW_D помала енергија од таа со која влегло. Тогаш апсорбираната доза е дадена со:

$$D = \frac{\Delta W_D}{\Delta m}. \quad (1)$$

Единицата за апсорбирана доза во SI е 1 Gy (*греј*). Тоа е апсорбирана енергија од 1 J на кој и да било вид јонизирачко зрачење, предадена на килограм маса од озрачената

средина

$$1 \text{ Gy} = \frac{\text{J}}{\text{kg}} \text{ (греј)}.$$

Иста енергија на зрачење, апсорбирана во биолошките системи од различни видови зрачења (α , β , γ и др.) не предизвикува исти биолошки ефекти. Биолошкото оштетување се карактеризира со *еквивалентната доза* H . Таа е дефинирана како производ од апсорбираната доза D и *биолошкиот фактор на квалитет* Q со кој се изразуваат разликите во биолошките ефекти од разни видови зрачење:

$$H = DQ. \quad (2)$$

Биолошкиот фактор на квалитет Q покажува колку пати радијационата осетливост од дадено зрачење е поголема од радијационата осетливост при иста апсорбирана доза рендгенско или γ -зрачење за кои $Q=1$.

Бидејќи Q е бездимензионална величина, димензиите на еквивалентната доза се еднакви со димензиите на апсорбираната доза. Меѓутоа, 1 J/kg апсорбирана доза и 1 J/kg еквивалентна доза квалитетно ќе се разликуваат: првиот ја карактеризира дозата енергетски, а вториот - биолошки. SI единица за еквивалентна доза е

$$1 \text{ Sv} = \frac{\text{J}}{\text{kg}} \text{ (сиверт)}.$$

Сиверт е еквивалентна доза предизвикана од апсорбирана доза 1 Gy и $Q = 1$ која создава определена специфична јонизација.

На пример, на апсорбирана доза од 10 Gy, предизвикана од брзи неутрони за кои факторот на квалитет е $Q=10$, одговара еквивалентна доза од 100 Sv. Што значи, неутроните предизвикуваат десет пати поголеми оштетувања отколку апсорбираната доза предизвикана од рендгенско или γ -зрачење за кои $Q=1$. Иако и во двата случаја е апсорбирана иста енергија, еквивалентната доза од неутронското зрачење е поголема и предизвикува поголеми оштетувања на ткивата. За α -честичите, тешките јадра и фисионите фрагменти $Q=20$.

Гранични вредности на дозволени дози

Граничната дозволена доза на озрачување е големина која се совпаѓа со **природниот радиоактивен фон** кој е резултат од космичкото зрачење и природната радиоактивност на почвата, водата и радиоактивниот радон. *Живиот свет во својот еволутивен развој се навикнал на тој природен радиоактивен фон.* Природното зрачење, кое е резултат од радиоактивните материјали во природата, во карпите и земјата е различно од место до место, но просечно изнесува $\sim 0,6$ mSv годишно. Најголем извор на природната радијација е радонот. Тој најчесто избива од земјата и најмногу го има во зтворени и непроветрени простории.

Придоносите на средна годишна доза од вештачки извори се прикажани во табелата 1. Од податоците се гледа дека вкупната годишна доза е многу помала од 1 mSv. Се разбира, овде не се земени предвид евентуалните хаварији.

Ако се работи во нормални услови за целата популација, максималната дозволена доза не треба да е поголема од 1,7·mSv (милисиверти) годишно.

Табела 1. Придонос на вештачките извори во средната годишна доза

ВЕШТАЧКИ ИЗВОР	средна годишна доза (mSv/год)
медицинска дијагностика и терапија	0,25
атмосферски талози	0,01
проф. изложеност	0,05
производи за широка потрошувачка	< 0,01
преостанато	< 0,04
Вкупно:	околу 0,35 mSv/god

За посебна група од населението кое престојувало во близина на извори на зрачење при рамномерно озрачување, максимално дозволена еквивалентна доза за целото тело е 5mSv годишно. За споредба, од космичкото зрачење организмот просечно годишно прима

доза од 0,45 mSv.

За професионално изложените лица максималната дозволена доза за една година при рамномерно озрачување на целото тело (за 40 часовна работна седмица) не треба да е поголема од 50 mSv.

При работа во вонредни услови (контаминирани простори) се дефинира **доза на оправдан ризик**. Таа треба да е помала од смртоносната доза и не смее да предизвика груби нарушувања на виталните функции на озраченото лице. Предложената граница за дозата на оправдан ризик во вонредни услови изнесува 0,5 Sv.

Еквивалентна доза до 1-2 Sv, примена за кратко време предизвикува радијациона болест. Доза поголема од 2 Sv претставува летална (смртна) доза за човекот.

Прашања, задачи и активности

1. Што е поопасно за човекот апсорбирана доза од 1Gy од α -зраци или иста апсорбирана доза од γ -зраци?
2. Колкава е апсорбираната доза од α -честици, ако еквивалентната доза е 2 Sv?
3. Колкава е еквивалентната доза од брзи неутрони ако апсорбираната доза е 1 Gy?
4. Кои се трите основни критериуми за заштита?
5. Колкава е максимално дозволена доза за една година за лица кои професионално се изложени на јонизирачки зрачења, а колкава за целата популација.
6. Што е тоа дозиметар и за што се користи?
7. Што е тоа апсорбирана доза и која е нејзијата единица?
8. Што е тоа еквивалентна доза и која е нејзијата единица?

Единицата Gy е наречена според англискиот физичар Луис Харолд Греј, а единицата Sv според шведскиот физичар Ролф Сиверт.

17.14. МАСЕН СПЕКТРОГРАФ

Масениот спектрограф е уред кој овозможува определување на масите на изотопите од зададен хемиски елемент. Првите масени спектроскопи, со доволно висока разделна способност, биле конструирани од Астон и Демпстер. Покрај нивната разновидност, масените спектроскопи може да се поделат во две групи:

а) **Масени спектрографи** кои според дефиницијата на Астон се "апарати што даваат фокусирани масени спектри на фотографска плоча" и

б) **Масени спектрометри** што претставуваат таков вид апарати "во кои фокусираниот сноп јони паѓа на пукнатина и тука се детектира и мери по електричен пат"

Постојат разни типови такви уреди, а еден од нив шематски е прикажан на сл.1.

Принципот на работа на масениот спектрограф се базира на тоа што секоја наелектризирана честица во магнетно поле се отклонува. Големината на отклонувањето зависи од електричниот полнеж, масата и брзината со која честицата влегува во просторот каде што дејствува магнетното поле.

Основните делови на масениот спектрограф се: **извор на јони, анализатор и детектор**. Тие се сместени во простор со висок вакуум. Атомите на елементот што се испитува дали има изотопи се јонизираат во посебен дел од уредот - јонски извор J. Тој се состои од јонска цевка во која електроните забрзани со електрично поле се судруваат со неутралните

атоми, притоа настанува судирна јонизација и создавање на позитивни јони. Меѓутоа, треба да се знае дека јонизацијата може да се постигне на повеќе начини.

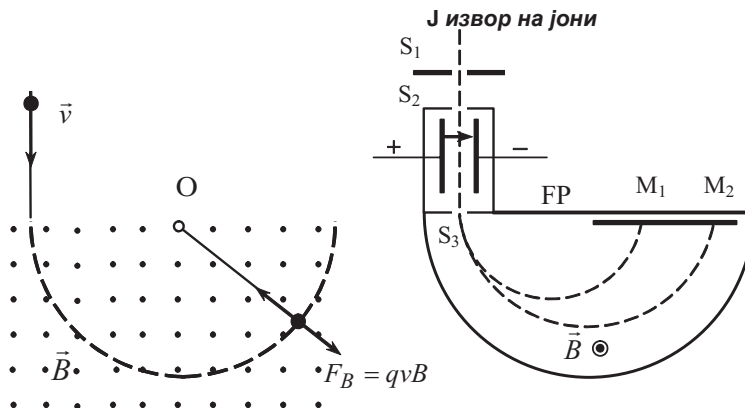
Со примена на големи потенцијални разлики создадените јони се забрзуваат кон евакуираната комора составена од два дела. Во првиот дел јоните поминуваат низ просторот каде што хомогеното магнетно поле со магнетна индукција \vec{B} и електрично поле со јачина \vec{E} заемно се нормални. Таквиот распоред на полето дејствува како **брзински филтер**. Низ излезната пукнатина S_3 може да поминат само јоните кои се со еднаква брзина, без оглед на нивната маса. Преостанатите, пак, ќе бидат привлечени од кондензаторските плочи или удираат на бочните ѕидови. На јоните, со количество електричество q , во првиот дел од вакуумската комора дејствуваат две сили: силата на електричното поле:

$$\vec{F}_E = q\vec{E} \quad (1)$$

и силата на магнетното поле Лоренцовата сила е по големина еднаква на (Види поглавје 9.2):

$$F_B = qvB \sin(\vec{v}, \vec{B}) . \quad (2)$$

$\alpha = \vec{v}, \vec{B}$ е агол меѓу векторот на брзината \vec{v} и векторот на магнетната индукција \vec{B} . Таа е нормална на рамнината определена со брзината на честицата \vec{v} и векторот на магнетната индукција \vec{B} . Овие сили се еднакви по



Сл.1. Шематски приказ на масен спектрограф

17. Нуклеарна физика

интензитет и го задоволуваат условот:

$$|\vec{F}_E| = |\vec{F}_B|, \quad (3)$$

односно

$$qE = qvB \sin \alpha. \quad (4)$$

каде што α е агол помеѓу брзината на јоните и магнетната индукција, обично $\alpha=90^\circ$. Од (4) следува дека линиската брзина на јоните во првиот дел од просторот зависи само од јачината на електричното и магнетното поле:

$$v = E/B. \quad (5)$$

Тоа значи, сите јони што поминуваат низ излезната пукнатина S_3 имаат еднаква брзина, без оглед на нивната маса.

Од излезната пукнатина S_3 понатаму јоните се движат со позната брзина \vec{v} во вториот дел од вакуумската комора каде има хомогено магнетно поле. Магнетното поле стои нормално на рамнината на сликата и има насока од сликата кон читателот. На сл.1 тоа е прикажано со точки.

Ако магнетното поле е во вакуум, тогаш честицата не претрпува никакви судири. Во магнетното поле, врз честицата дејствува Лоренцовата сила \vec{F}_B , чиј правец е нормален како на правецот на брзината така и на правецот на магнетното поле, а нејзината насока може да се определи според Флеминговото правило на лева рака. Оваа сила зададена со (2), не ја менува брзината по големина, туку само по насока. Бидејќи според земените услови на честицата не дејствуваат други сили, таа ќе се движи по кружница со радиус R , што лежи во рамнината нормална на правецот на магнетното поле, т.е. во рамнината на сликата.

Центрипеталното забрзување што го создава силата на магнетното поле на честицата е v^2/R . Според вториот Њутнов закон, за врската меѓу ова забрзување, масата m на честицата и силата, ќе важи равенката:

$$R = \frac{m}{q} \frac{v}{B}. \quad (6)$$

Значи, по минувањето низ електромагнетниот филтер, сите јони кои имаат еднакви вредности на брзината v , радиусот на кружната патека R , за јоните со еднаква маса (и

полнеж) што се движат во магнетното поле \vec{B} , ќе биде еднаков. Имено, врз фотоосетливиот слој на фотографската плоча FP или некој детектор (сл.1), поставен на местото каде јоните опишуваат половина кружница, се добиваат темни линии од честиците - јоните што имаат еднакви маси.

Ако во упадниот сноп има честици со различни маси на фотографската плоча ќе се добијат толку траги колку што има различни маси. **Значи, магнетното поле го разделува упадниот сноп според масите на присутните честици во снопот.**

Мерејќи го радиусот R од равенката (7), се пресметува масата m на изотопниот јон, а од познатиот производ $A=N_A m$ (N_A - Авогадров број), се пресметува и неговиот масен број.

Ако регистрацијата не се врши со фотографска плоча, туку се мери јачината на јонската струја на секој сноп одделно, тогаш уредите се викаат **масени спектрометри**.

Од равенката (7) се добива дека специфичниот електричен полнеж на јоните е:

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{BR} \quad (8)$$

Специфичниот електричен полнеж, т.е односот меѓу електричниот полнеж q на една наелектризирана честица и нејзината маса m е нејзина карактеристична физичка константа.

Како пример да ги разгледаме резултатите од првиот успешен експеримент направен од Астон. Јоните од неонот добиени од цевка за електрично празнење најпрво се одвоени според брзини, а потоа се анализираат во магнетно поле според големината q/m . На фотоплочата FP се добиваат три блиски, но добро одвоени линии. Со определување на односот q/m според релацијата (7), за трите линии се добиваат следниве вредности:

$$\frac{m_1}{q_1} : \frac{m_2}{q_2} : \frac{m_3}{q_3} = 20 : 21 : 22 \quad (9)$$

Ако линиите се резултат од јоните кои имаат еднаков полнеж, но различни маси следува заклучокот дека елементот неон е смеса од три вида атоми кои меѓусебно се разликуваат по масите. Атомите кои меѓусебно се разликуваат само по масите, Астон прв ги нарекол **ИЗОТОПИ**.

18.1. ФУНДАМЕНТАЛНИ ЧЕСТИЦИ

Уште старогрчките мислителите го поставиле прашањето дали материјата е неограничено делива или не. Тие дошле до ставот дека ако дел од материјата мисловно се уситнува на сè помали и помали делови, на крај се доаѓа до најмалите, неделиви честички *атоми-те*. Грчките атомисти верувале дека сета материја е изградена од атоми. Се разбира, тој поим не е истиот каков што денес го сфаќаме, но принципот е ист: и денес се смета дека материјата се состои од најситни структурни единици, *елементарни честници*.

Наполно точна дефиниција на овој поим не е едноставно да се искаже затоа што неговата смисла се менувала во текот на развојот на физиката. Една од поточните би била:

Честицата се смета дека е елементарна ако не може да се опише како систем составен од други единици. Значи, елементарната честичка нема делови (не е изградена од нешто друго, поелементарно).

Впрочем, да се потсетиме дека во 5 век пр. н.е. Емпедокле за прв пат поставил теорија дека целата Вселена се состои од *четири елементи: земја, вода, воздух и оган*. Неговите идеи биле популарни скоро две илјади години. Подоцна се сметаше дека атомот е елементарна честичка: *Демокрит* му го даде името *атом* што значи неделив). Кога се најде дека атомот е сложен систем се сметаше дека субатомските честници (помали од атомот) се елементарни.

Пред седумдесетина години се чинеше дека структурата на материјата е решена. Беа откриени четири основни честници: **електрон, протон, неутрон и фотон**, па физичарите се надеваа дека тие се доволни за комплетна теорија за составот на материјата. Нив ги нарекоа *елементарни честници* затоа што се сметаше дека тие се основните градбени единици на материјата што ги поседуваат типичните својства: **не се менуваат, немаат структура и не се распаѓаат**.

Развојот на физиката доведе до нови, продлабочени сознанија за елементарните честници. Нивната листа се прошири, а најголемиот број од нив се нестабилни, се распаѓаат, значи имаат одредено време на живот, се

трансформираат едни во други итн. Дури се утврди дека постојат и поелементарни делови, но честниците од нив не се состојат во вистинска смисла на зборот, туку тие се создаваат, се раѓаат во *моментот на нивните претворби*.

Дека нашите претстави од макросветот не може да ги примениме и во светот на елементарните честници ќе послужи ова расудување. Имено, што значи кога ќе се рече дека некоја честичка има средно време на живот од 10^{-8} s а сепак ја сметаме за елементарна? Ова време, иако изгледа многу кусо, на "нуклеарната временска скала" е неверојатно долго затоа што процесите во микросветот се одигруваат многу брзо. Споменатата честичка ако се смета дека има големина 10^{-15} m и брзина приближно еднаква на брзината на светлината, за време на својот "живот" изминува пат што е $4 \cdot 10^{15}$ пати поголем од нејзината димензија. Таков однос на изминатиот пат и сопствената димензија не може да се замисли за ниеден макроскопски предмет!

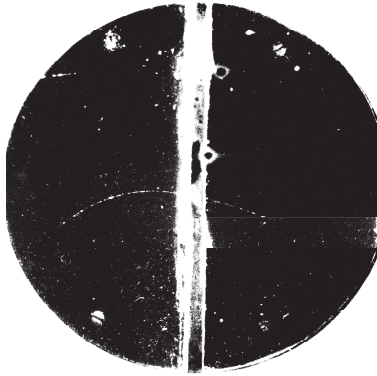
Во последниве години се покажа дека физиката на елементарните честници е тесно поврзана со современата астрофизика и космологија. На прв поглед тоа е чудно, најмалите делови на материјата да се поврзат толку тесно со бескрајната Вселена, но треба да се има на ум фактот што првите секунди од "животот" на Вселената по Големата експлозија (**Big Bang**) се исполнети со процесите што се случувале меѓу елементарните честници. Затоа, физиката на елементарните честници објаснува многу појави, набљудувања и процеси што настануваат во Вселената. Впрочем, и за бескрајно малите честници и за бескрајно големата Вселена важат исти *физички закони*.

Откривање на елементарните честници

Веќе ги набројивме *електронот, протонот, неутронот и фотонот*, а проучувањето на космичките зраци ја прошири листата на елементарните честници. Веќе во 1932 год. К. Андерсон го откри *позитронот*. На неговата историска фотографија (сл. 1) направена е снимка на трагата на позитронот во Вилсонова комора при што тој влегува во комората (трагата од десната страна), се успорува во слој од олово (бела лента во центарот) и потоа влегу-

18. Елементарни честици

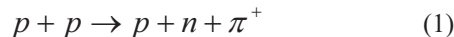
ва во простор каде делува магнетско поле, па според закривеноста на трагот (левата половина на сликата) се утврдува дека честицата има позитивен полнеж.



Сл. 1.

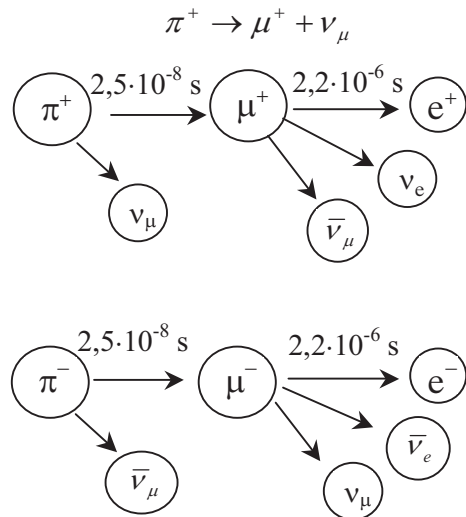
Во 1937 год. се откриени μ -мезоните, во 1947 π -мезоните, нешто подоцна К-мезоните и хипероните. Најмногу елементарни честици се откриени при многубројните реакции и претворби на јадрата. Во 1956 год. откриен е *антипротонот*, а потоа *антинейтронот*.

Во принцип, при судири на честици со доволно голема енергија, можат да се добијат голем број на нови честици и античестици. Така на пример, π -мезонот може да се добие во реакцијата:



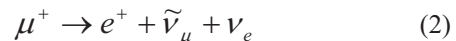
при што потребната енергија за "создавање" на π^+ -мезонот е околу 140MeV, а енергијата на протоните што се судираат треба да биде поголема од 290 MeV за да се обезбеди сите честици по судирот да имаат доволно кинетичка енергија. Така, за прв пат со бомбардирање на јадра со помош на забрзани честици добиени се нови, што дотогаш не постоеле.

Принципиелно, новодобиената честица се создава за сметка на енергијата што ја носат влезните честици, според релацијата $E = mc^2$ што е обратно од веќе проучениот процес на добивање на енергија за сметка на дефектот на масата. Добиеениот π^+ -мезон има многу кусо на живот: $\sim 2,5 \cdot 10^{-8}$ s при што се распаѓа на мион и мионско неутрино:



Сл. 2.

Од своја страна, пак, мионот е нестабилен, живее само кратко време и со распадат дава позитрон, мионско антинейтрино и електронско неутрино:



Горните распади се прикажани шематски на сл. 2 за да станат појасни процесите што настапуваат.

Бидејќи и овде се спомна *неутриното*, ќе кажеме неколку податоци и за него. Неутриното (и антинейтроното) се јавува како резултат на слабите заемнодејства. Колку што досега се знае, неутриното нема некоја посебна улога во процесите и заемнодејствата затоа што неверојатно малку заемнодејствува со материјата, многу слабо влегува во реакции. Но, со него се поврзани други загатки и проблеми кои сè уште не се разјаснети.

Во прв ред тоа е прашањето дали неутрината имаат или немаат маса во мирување. Најновите истражувања покажуваат дека неутриното, сепак, има некој износ на масата во мирување. Според резултатите добиени во последниве години, се смета дека масата на мирување на електронските неутрина е од ред величина (10-20) eV, а, пак, за мионските неутрина би била поголема. Ако ова се покаже точно, сликата за Вселената битно ќе се измени. Тогаш ќе биде решен проблемот со *"масата што недостасува во Вселената"*.

18. Елементарни честиси

Имено, Вселената се однесува како да има повеќе маса (небески тела, маглини итн.) отколку што може да се регистрира со сегашните набљудувања.

Ако неутрината имаат маса (макар и мала), заради нивниот огромен број, тие би сочинувале најголем дел од масата на Вселената. Имено, само од Сонцето се емитира флукс на неутрина чија големина е таква што на Земјата паѓаат $\sim 10^{11}$ неутрина/cm²/s. Пресметано е дека густината на неутрината во Вселената е 50 неутрина/m³ и при каква било маса на мирување различна од нула, нашата Вселена би била "неутринска", што би повлекло измена на теориите за ширење на Вселената и др.

Мионите спаѓаат во групата на лептони (лесни честиси). Во таа група е електронот, негативниот мион, негативниот τ (тау) лептон заедно со припадните античестиси.

K- мезоните (каони) се тешки мезони и тие се нестабилни. Нив ги има: позитивен K⁺, негативен K⁻ и неутрален K⁰ чија маса е околу 970 MeV. Нивниот распад е многу "таинствен"-се распаѓаат на повеќе начини при што се добиваат низа честиси: пиони, миони, електрони, позитрони итн. Стана јасно тврдењето дека посложените честиси не се состојат од поелементарни, туку овие се создаваат во моментот на претворба.

Досега споменатите елементарни честиси имаат маса на мирување помала од масата на **нуклеоните**. Но, постои една класа на честиси наречени **хиперони** со поголема маса. Тоа се хипероните Λ (ламбда), Σ (сигма), Ξ (кси), Ω (омега). Сите тие се нестабилни, имаат време на живот $\sim 10^{-10}$ s и се распаѓаат. Нуклеоните и хипероните како масивни честиси со заедничко име се викаат **бариони**. Хипероните обично се распаѓаат на нуклеони и пиони што покажува дека тие, всушност, се "возбудени нуклеони". Тоа е така очигледно, аналогно на атом кој вишокот енергија го емитира во вид на фотон. "Возбудениот нуклеон", пак, вишокот енергија го емитира во вид на квант на нуклеарното поле - π -мезонот. Долните распади се недвосмислена потврда на тоа. Имено, неутралниот ламбда хиперон се распаѓа на протон и неутрален пион,

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^- \quad (3)$$

но може да се распадне и на неутрон и неутрален пион:

$$\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0 \quad (4)$$

Овие распади не се напишани за ученикот да ги научи напамет, туку да ја сфати поврзаноста на процесите што се случуваат во микросветот и законите за зачувување. Имено, само ако се има предвид законот за зачувување на електричниот полнеж, лесно се проверува дека распадот на позитивниот Σ^+ хиперон може да биде:

$$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0 \quad (5)$$

или
$$\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+ \quad (6)$$

Најпрвин изгледа комплицирано, но потоа се гледа длабоката логика и смисла на сите овие процеси во микросветот; законите мора да важат. Да замислиме дека може да се случи хипероните да го заземат местото на нуклеоните во јадрата. Тоа би биле хиперјадра. И навистина, постоењето хиперјадра беше докажано во 1953 год.

Класификација на честисите

Засега, и покрај научните напори, не е создадена општа теорија со која би се објасниле сите својства на елементарните честиси и загатките што тие ги поставуваат.

Според некои својства, направен е обид тие да се класифицираат во некој општ систем, слично како периодниот систем на елементите. Користа од ваква систематизација, покрај другото, е да се претскаже постоењето и особините на некои честиси што, евентуално, не се досега откриени.

Според карактеристичните својства на честисите, тие се поделени на три групи (фотонот не влегува во овие групи и засебно се претставува):

1. Група на лептони (*најлесни честиси*).

Во оваа група припаѓаат електронот e^- , електронското неутрино ν_e , мионот μ^- , мионското неутрино ν_μ , τ^- -лептонот и неутрино ν_τ . Се разбира, во групата на лептоните припаѓаат и припадните античестиси на овие шест честиси.

Лептоните не учествуваат во силните заемнодејства, туку за нив се карактеристични т.н. слаби заемнодејства.

2. **Група на мезони** ("средни честици" со маси меѓу лептонските и потешките барионски).

Во групата на мезоните, како што видовме порано, спаѓаат пионите (π^+ , π^- и π^0), η мезонот, каоните K^+ , K^- и K^0 .

При нивниот распад се добиваат π -мезони и лептони или само лептони. Постојат и други мезони, но овде нема да ги споменеме. Тие имаат некои *необични*, "чудни" својства.

3. **Група на бариони** (*тешки честици*, честици со најголема маса).

За членовите на оваа група што ја сочинуваат нуклеоните и хипероните доволно е кажано во текстот.

Сите бариони освен протонот се нестабилни и притоа покрај другите честици се образуваат и бариони што е последица на законот за запазување на барионскиот полнеж. Тие учествуваат во силните заемнодејства.

18.2. АНТИЧЕСТИЦИ. АНТИМАТЕРИЈА

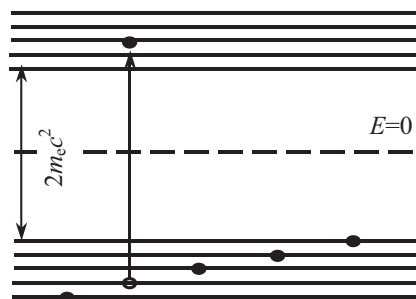
На англискиот физичар П. Дирак во 1928 год. му појде од рака да најде релативистичка квантно-механичка равенка за електронот. Таа имаше далекусежни последици. Од неа произлезе дека вкупната енергија E на електронот со импулс p е еднаква на:

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m_e^2 c^4} \quad (1)$$

може да има и негативна вредност (решение на квадратниот корен). Се разбира, енергијата на реална честица не може да биде негативна. Но, Дирак негативното решение го протолкува поинаку - како таа енергија да припаѓа на честичка со маса еднаква на електронот, но со спротивен (позитивен) полнеж. Меѓу најголемата негативна енергија $-m_e c^2$ и најмалата позитивна енергија $+m_e c^2$ постои интервал на енергии од $2m_e c^2$.

Според Дирак, честиците не можат да поседуваат енергија што е во тој интервал, туку сопствените вредности на енергијата можат да бидат од $+m_e c^2$ до $+\infty$ и од $-m_e c^2$ до $-\infty$. Дирак претпостави дека ако на

еден електрон што се наоѓа на пополнетите нивоа со негативна енергија (на цртежот долу) му се даде енергија $E \geq 2m_e c^2$, тој ќе премине на нивоата со позитивна енергија (на цртежот горе) и ќе се однесува како обична честица со позитивна маса и негативен полнеж (сл.1). Празнината што останала на неговото место кај нивоата со негативни енергии треба да се однесува како електрон што би имал позитивен полнеж. Така Дирак го претскажа "позитивниот електрон" што го доби името **позитрон**. Значи, електронот има своја античестица.



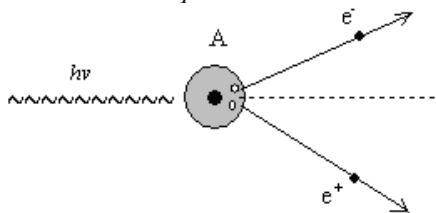
Сл. 1.

Подлабоките размисли доведоа до заклучок дека нема никаква причина зошто електронот би бил "повластен", туку и другите честици би требало да имаат своја античестица. Таа би имала иста маса како и честицата, иста вредност на електричниот полнеж, но со спротивен знак. Голем придонес во разјаснувањето на проблемите поврзани со постоењето на античестиците даде американскиот физичар Р. Фејнман. Стана јасно дека нивното постоење е директна последица на релативистичката врска меѓу енергијата и импулсот на честицата што, од друга страна, ги одразува својствата на просторно-временскиот континуум.

Во 1955 год. со бомбардирање на јадра со протони со голема енергија добиен е *антипротон* \bar{p} . Античестиците се обележуваат со истиот симбол како и честиците и знак над симболот. Во вакуум, ако не претрпува судири, тоа е стабилна честица, но при средба со протон веднаш настанува *процесот на анихилација*: честиците ги снемува, наместо нив се добива енергија според Ајнштајновата равенка за врска меѓу масата и енергијата. Но,

18. Елементарни честици

за разлика од анихилацијата на електрон-позитрон каде најчесто се добиваат γ -кванти, овде можат да се добијат најразлични честици (што е веројатно) што зависи од енергијата на протонот и антипротонот.



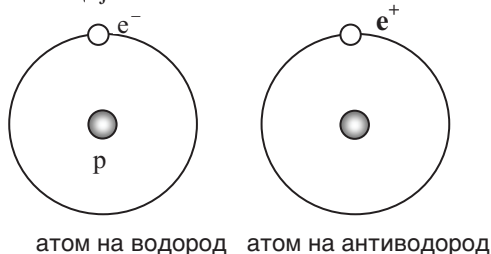
Сл. 2.

Но, можен е и обратен процес, создавање на пар честица-античестица (на пример пар електрон-позитрон (e^-e^+) за сметка на енергијата на гама фотоните $h\nu$. Овој процес е можен само во поле на јадрото A (сл. 2).

Така, двата процеси што се одвиваат меѓу честиците; нивната анихилација и создавањето пар честица-античестица се многу важни за иследување на нивната структура и заемнодејствата меѓу нив.

Добивањето на честици со големи енергии се прави со помош на *акцелератори на честиците*. Најмоќни уреди има во ЦЕРН, Станфорд и Батавија, Хамбург итн.

Како што протонот и електронот формираат стабилен систем - атом на водород, принципиелно може да сметаме дека и антипротонот \tilde{p} и позитронот e^+ можат да формираат **антиатом на водород** (сл. 3). Средбата со атом на обичниот водород би довела до анихилација.



Сл. 3.

Сега доаѓаме до прашањето: а што е со неутронот, дали тој има античестица. Со експериментите вршени во 1956 год. добиен е

антинеутрон при судири на протони и антипротони:

$$p + \tilde{p} \rightarrow \tilde{n} + n \text{ или:} \quad (2)$$

$$\tilde{p} + n \rightarrow \tilde{n} + n + \pi^- \quad (3)$$

Честицата π^- го однесува електричниот полнеж на антипротонот со знак минус.

Експериментите со кои се добија античестиците беа блескава потврда на Дираковата теорија. Од четирите први честици остана фотонот. *Фотонот нема своја античестица*, може да се рече дека тој е еднаков на својата античестица. Постојат и други честици што немаат свои античестици. Тоа се неутралниот пион π^0 и η (ета) мезонот.

Интересот за античестиците не се исцрпува само со откривање на нивното постоење, туку разоткрива и друг вид проблеми освен научните (филозофски, сознајни итн.). Имено, кога веќе постојат античестици, може да постои *антиматерија*, *антисвет* каде што атомите, молекулите, хемиските елементи би биле изградени од соодветните античестици. Во 1969 год. е синтетизирано јадро на антихелиум-3 што се состои од два антипротони и еден антинеутрон. Но, во космичкото пространство не е констатирано постоењето на антиматерија. Значи, не може да се смета дека паралелно со овој свет постои антисвет, антивселена.

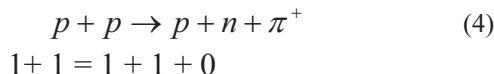
Стана јасно дека во природата владее некоја симетрија. Тоа не е само заради постоењето на честици и античестици, туку и заради природните закони и нивната универзална важност. Но, и покрај тоа, нашиот свет, онаков каков што го знаеме, не се наоѓа во симетрична состојба. Тој се состои од протони, електрони, неутрони... , а не и од антипротони, позитрони, антинеутрони. Земјата, Сонцето, сите познати небески тела не може да бидат изградени од мешавина на честици и античестици (заради нивната анихилација). Останува неразјаснето зошто постои свет само од материја, а отсутствува антиматеријата (иако природните закони се исти насекаде). Но, и кога во мислите би допуштиле да постои *антисвет*, тоа би било далеку, далеку од познатите ѕвездени системи заради фактот што при контакт на материја и антиматерија веднаш настанува анихилација со ослободување на огромна енергија. Со нашите претпоставки повеќе не може

да одиме. Дури и кога би настанала таква експлозија при средбата на материја и антиматерија, ние тоа не би го разликувале од обичните експлозии затоа што не постојат *антифотони* што би носеле информација за таков настан.

Барионски и лептонски број

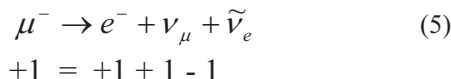
Во сите претворби на честичите при нивните заемнодејства исполнети се законите за запазување на енергијата, импулсот, моментот на импулсот, електричниот полнеж и другите закони познати од макросветот. Но, во светот на елементарните честиси има и други закони кои треба да бидат запазени. Така, по аналогија со електричниот полнеж, се воведуваат и други полнежи.

Многу е важен **барионскиот полнеж (број) В**. Имено, на секоја честича од групата на барионите ѝ се припишува барионски број $B = +1$, а на античестичите од оваа група, барионски број $B = -1$. На пример, во реакцијата кога се добива π^+ мезон:



Очигледно, барионскиот полнеж се сочувува при претворбите (колку бариони има на левата, толку се и на десната страна). Пионот π^+ не е барион, па нема барионски полнеж, а за исполнување на законот за одржување на електричниот полнеж е очигледно (два полнежи на лева, два на десна страна).

Лептонски полнеж (број). Каков е случајот со лептоните (најлесните честиси)? Електронот, позитронот, мионите, неутрината, сите имаат свој **лептонски полнеж (број) L**, еднаков на $+1$ за честичите и -1 за античестичите. На пример, да го провериме законот за лептонскиот полнеж кај распад на негативниот мион:



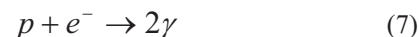
Негативниот мион, електронот и неутриното се честиси со лептонски број $+1$, а антинеутриното има лептонски број -1 .

Од горните закони за запазување е јасно

зошто, на пример, не е можен распадот на протонот на овој начин:



(не е исполнет законот за барионски полнеж). Не е можно да се случи ни претворбата на протонот и електронот во гама кванти:



затоа што на левата страна има барионски полнеж кај протонот ($+1$), на десната нема. Затоа нашиот свет е така стабилен, постојан, слободниот протон не се распаѓа. Замислете што би се случило ако беше можна горната трансформација!

Од текстот е јасно дека најголем број елементарни честиси се распаѓаат. *Фотонот и неутриното* се стабилни. Не е чудно што тие не се распаѓаат затоа што се помали, полесни и од најлесните честиси, па нема на што да се распадат. Зошто електронот е стабилен? Тој би можел да се распадне на фотон и неутрино, но тие немаат електричен полнеж, па законот за негово запазување не го допушта таквиот распад. А протонот? Тој е најлесен барион и ако би се распаѓал ќе се наруши законот за барионски полнеж. А законите се за тоа да не се нарушуваат!

18.3. ВИДОВИ ЗАЕМНОДЕЈСТВА МЕЃУ ЕЛЕМЕНТАРНИТЕ ЧЕСТИЦИ

Процесите во коишто учествуваат елементарните честиси се неброени, но сите тие процеси се последица на точно одредени видови заемнодејства меѓу нив. Дури, класификацијата на елементарните честиси покрај разликите во нивните маси и другите својства се прави и според заемнодејствата со кои тие си делуваат, макар што тоа не е строго разграничено.

Во природата постојат четири типа заемнодејства:

1. *Гравитационо заемнодејство*. Ова е *универзално заемнодејство* (интеракција) во која учествуваат *сите честиси*. Но, заради малите маси на честичите, оваа интеракција нема значајна улога во процесите во микросве-

18. Елементарни честици

тот, иако радиусот на дејството е неограничен. Преносител на заемнодејството меѓу масите m_1 и m_2 не е откриен, а се претпоставува дека тоа би била хипотетичка честица *гравитон*, квант на гравитационото поле, честица со нулта маса во мирување.

2. *Електромагнетско заемнодејство*. Во него учествуваат само наелектризираните честици (q_1 и q_2), значи, тоа не е универзално како гравитационото. Радиусот на дејството е неограничен. Ова заемнодејство е одговорно за градбата на атомите, молекулите, а со тоа и на сите тела. Интеракцијата се одвива преку електромагнетско поле а преносници на интеракцијата се *фотони* hf . Нивната маса во мирување е нула, немаат електричен полнеж, спинот е 1. Овие заемнодејства ги изучува *квантната електродинамика*, комплетна теорија во која сите физички величини можат да се пресметаат со висока точност и не се разликуваат од експериментално одредените вредности.

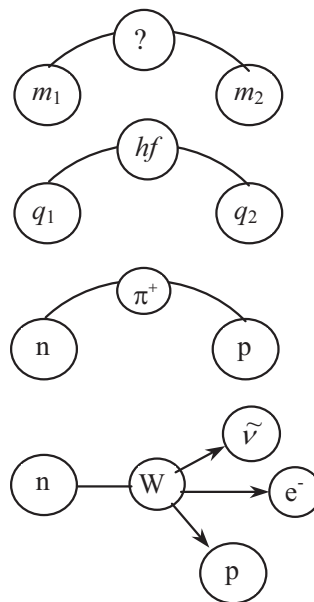
3. *Силни заемнодејства*. Тие се карактеристични за нуклеоните (n и p). Интеракцијата се одвива преку *нуклеонско поле* чии кванти се пионите (на нашата слика π^+) коишто имаат одредена маса на мирување, па затоа дејството брзо опаѓа со зголемување на растојанието меѓу нуклеоните. Силното заемнодејство е својствено на честичите од групата на хадрони. Тоа не е универзално затоа што во него не учествуваат лептоните и фотоните.

Важна карактеристика на силното заемнодејство е малиот радиус на дејството, т.е. *краток досег*. Според експерименталните резултати, нуклеарните сили делуваат на растојанија од редот на големина на јадрото $\approx 10^{-13}$ cm.

4. *Слаби заемнодејства*. Овој вид интеракции помалку се изучени затоа што електромагнетските и силните имаат многу поголемо дејство и го "покриваат" слабото. Иако се слаби во вистинска смисла на зборот (10^{14} пати послаби од силните интеракции и 10^{10} пати послаби од електромагнетските), тие се причина за распаѓањето на нестабилните честици. Значи, тие се "одговорни" за најголемиот број трансформации што настануваат (да се потсетиме дека β -распадот е последица на слабото заемнодејство). Слабите интеракции не се

ни привлечни, ни одбивни, слично како силните делуваат на многу мали растојанија.

На сл. 1. е прикажан распаѓот на неутронот под дејство на овие сили.



Сл. 1.

Слабите заемнодејства се универзални, во нив учествуваат сите честици.

Современите теории претскажаа дека како преносници на слабите заемнодејства треба да бидат честици коишто би имале голема маса и тешко е да се детектираат заради краткото време на живот. Тоа се т.н. *векторски бозони* W^+ , W^- и Z^0 . Потрагата по овие честички вроди со плод и тие експериментално се докажани кон крајот на 1983 год. (тим со кој раководеше К. Рубиа). Нивната маса беше во граници што ги претскажа теоријата. Наелектризираните векторски бозони W имаат маса 81 GeV, а неутралниот бозон Z^0 има маса 93 GeV. Нивната голема маса зборува дека досегот на слабото заемнодејство е многу мал.

Експерименталното откривање на векторските бозони претставуваше врвен дострел на експерименталната техника на високи енергии. Со техничко усовршување на еден до најголемите акцелератори во ЦЕРН (Европски центар за нуклеарни истражувања), Женева, достигнати се огромни енергии на снопови на

протони p и антипротони \bar{p} да се движат во спротивна насока и да се судираат. За да се добие доволен број антипротони, тие се "складираат" во специјални уреди и за 24 часа се акумулираат скоро 600 милијарди антипротони. Дури потоа се врши главното забрзување на сноповите до фантастичните 270 GeV! Кон крајот на 1983 год. математички се обработени скоро 40000 судири од кои само шест дале позитивен резултат (присутни векторски бозони).

Современите физички теории трагаат по заеднички основи за обединување на различните видови заемнодејства за да можат тие да се прикажат со една единствена теорија. Уште А. Ајнштајн долго време беше окупиран со идејата да најде начин да го постигне таквото обединување, но тогаш тоа не беше можно. Денес е постигнат значаен успех со обединувањето на слабите и електромагнетските заемнодејства во една единствена теорија на *електро-слабо заемнодејство*.

Овој успех им даде поттик на физичарите и натаму да бараат начин како може и силното заемнодејство да се прикаже заедно со другите. Такво обединување би било можно на растојанија помали од 10^{-31}m . Тоа би била *Голема обединета теорија* (GUT) на заемнодејствата што би значело повисоко ниво на сознание на структурата на материјата и во микро и макросветот.

18.4. ПОИМ ЗА КВАРКОВИ. КВАРК-ЛЕПТОНСКА СИМЕТРИЈА

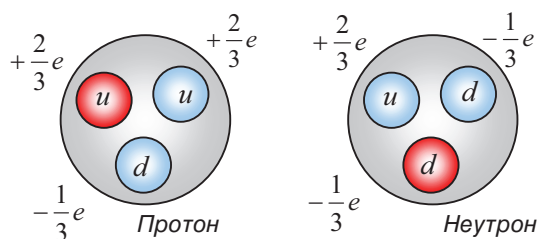
М. Гел-Ман и Ц. Цвајг во 1964 год. дојдоа на мисла дека е доста компликуван начинот на кој материјата е изградена со така голем број елементарни честиси (повеќе од стотина). Природата би требало да биде поеконична. Тие сметаа дека големиот број на елементарни честиси треба да се изградени од поедноставни, поелементарни честички.

Така се роди идејата за *кварковите*. Тие би имале мошне необични својства. Во прв ред нивниот електричен полнеж треба да биде дробен, нецел број. Електричниот полнеж на трите кварки (се разбира и антикварки) е $+2/3$,

$-1/3$ и $1/3$ од елементарниот полнеж. Дадени им се називи:

u (up), d (down) и s (strange).

Со нив лесно се претставуваат честичките: на пример, протонот има комбинација (uud), неутронот (udd), пионот е комбинација на кварк -антикварк ($u\bar{d}$), неутралниот пион π^0 има состав ($u\bar{u}$) итн. Не само електричниот полнеж, туку и другите својства (барионски број, спински број) се вклопуваат во шемата.



Сл. 1.

Откривањето на нови честиси ја наложи потребата од зголемување на бројот на кварковите. Денес се смета дека постојат шест вида кварки од кои се изградени сите бариони и мезони. Останатите три кваркови се:

c (charm), b (bottom) и t (top).

Сите кваркови имаат барионски број $+1/2$ и спински број $+1/2$. Квантните броеви на антикварковите се со обратен знак.

Со помош на кварковите направена е систематизација на честичките во одделни групи што се покажа мошне успешно. Дополнителните проблеми што се појавуваа при откривање на новите честиси се решаваа со дополнителни претпоставки. Така на пример, според систематизацијата, кога се откри хиперонот Ω^- , требаше да има кварков состав (sss), затоа што барионскиот број му е $+1$, електричниот полнеж -1 , а спинскиот број $3/2$. Но, Паулиевият принцип ја исклучува можноста три идентични честички да се најдат во иста квантна состојба (трите честички треба да имаат паралелни спинови за збирот да биде $1/2+1/2+1/2=3/2$). Затоа е претпоставено дека

18. Елементарни честици

кварковите се разликуваат и по додатен квантен број- **боја**.

Ова нема врска со бојата каква ја знаеме, туку тоа е само својство што така се опишува. Областа од физиката на честици што се занимава со "обоените" кваркови се вика **квантна хромодинамика** (грчки *chromos* - боја).

Шесте кваркови и шесте лептони прикажани на долната шема ја чинат шемата на т.н. *кварк-лептонска симетрија*. Тие се основа на *Стандардниот модел*, теорија со која физичарите ја опишуваат структурата на Вселената и сè што постои во неа. Од кварковите се изградени јадрата на атомите, а електроните се движат околу нив. Кварковите и лептоните (заедно) можат да се поделат на три фамилии, три генерации.

Во *првата генерација* се *u* и *d* кварковите заедно со електроните и електронските неутрина. Овие четири честици се доволни за се создаде светот каков го знаеме, со сета разнообразност на атоми, молекули и повиоки структури.

Ако природата можела комплетно да се изгради од честиците од првата генерација, каква е смислата на другите две? *Втората генерација* се состои од **чудниот s - кварк** и **шарм c-** кваркот заедно со мионот и мионското

неутрино. Тогаш кога ќе се добијат (обично лабораториски) овие честици под дејството на слабите интеракции брзо се распаѓаат на честиците од првата генерација.

Според *Големата обединета теорија* на заемнодејствата, би можело да дојде до претворби меѓу кварковите и лептоните. По аналогично, би постоел преносник на заемнодејството, честица со маса 10^{15} пати помасивна од протонот. Но, теоријата претпоставува обединување на заемнодејство на мали растојанија ($\sim 10^{-31}$ m) при огромни енергии што експериментално не може да се оствари.

Кварковите во лабораторија не може да се добијат одвоено, засебно. Тие се "заробени" во честиците. Што е најчудно, силата со која се држат во честиците расте со меѓусебната оддалеченост, слично кога се затегнува гумена лента. Се смета дека кварковите се така силно врзани во честиците што не може да се одделат. Докази за нивното постоење се изведуваат од однесувањето на честиците во кои се содржат. На пример, во 1974 година кога беше објавено откритието на нов кварк (*charm-кваркот*) фактички беше добиена нова честица која со своите особини не се вклопуваше во дотогашната слика на честици составени од кварковите **u**, **d** и **s**.

	Честица	Симбол	Полнеж	Маса (GeV/c ²)
Прва генерација				
Кваркови	up	u	+2/3	0.03
	down	d	-1/3	0.06
Лептони	electron	e⁻	-1	0.0005
	electron neutrino	ν_e	0	0?
Втора генерација				
Кваркови	charm	c	+2/3	1.3
	strange	s	-1/3	0.14
Лептони	muon	μ⁻	-1	0.106
	muon neutrino	ν_μ	0	0?
Трета генерација				
Кваркови	top	t	+2/3	174
	bottom	b	-1/3	4.3
Лептони	tau	τ⁻	-1	1.7
	tau neutrino	ν_τ	0	0?

18. Елементарни честиси

Прашања и задачи

1. Кои честиси се сметаат елементарни?
2. Колкаво е времето на живот на мионите? Како се распаѓаат?
3. Зошто од Сонцето се емитуира неутрински флуks? Каде одат тие неутрина?
4. Колкава е масата на каоните? Какви каони има?
5. Како може да се распадне неутралниот ламбда хиперон?
6. Како е извршена класификацијата на елементарните честиси?
7. Напиши ја Дираковата релативистичка равенка за електронот. Која е нејзината важност?
8. Која е првата откриена античестиса? Како е откриена?
9. Дали е можно да постои антифотон? Дали би се разликувал од фотонот?
10. Каква разлика постои меѓу неутронот и антинеутронот?
11. Зошто не е можен распадот на протонот на позитрон и на гама зрачење?
12. Радиусот на дејството на гравитационото и електромагнетското заемнодејство е бескраен, но за движењето на небеските тела важна е само гравитацијата. Зошто?
13. Слабите заемнодејства можат да се карактеризираат со познатата изрека: Тивка вода брег рони. Зошто?
14. Кои се преносителите на слабите заемнодејства? Како се откриени?
15. Колку кваркови постојат? Што е необичното кај нив?
16. Зошто беше потребно да се претпостави додатен квантен број “боја” за кварките?

За оние кои сакаат подетално да се запознаат со нови информации за елементарните честиси ја препорачуваме веб-страницата на CERN:

<http://www.cern.ch>

Подетално за носителите на Нобеловата награда од оваа област може да се најде на адресата:

<http://www.nobelprize.org>



Лево- Место каде подземно минуваат акцелераторите на европскиот нуклеарен центар, CERN под Женева (Големиот круг е познатиот LHC -Large Hadron Collider во кој се судираат материјата и антиматеријата). Република Македонија во 2009 година стана член на CERN.
Десно- Внатрешноста на LHC (Големиот хадронски колајдер). Тунелот е долг 27 km.

19.1. НЕКОИ ПРИМЕРИ И ИНФОРМАЦИИ ЗА ЗАШТИТА НА ЗДРАВАТА ЖИВОТНА СРЕДИНА ПРИ ИЗУЧУВАЊЕТО НА ФИЗИКАТА

Животната средина денес се подразбира пошироко, тоа не е само неживата природа, туку заедно со сите живи организми и човекот коишто комплексно делуваат и создаваат услови за опстанок, развој и размножување. Така, според некои автори, животната средина во себе ги содржи двата потсистеми: *природна средина (екосфера, геосфера)* и преобразениот дел од таа средина што може да се нарече *техносфера*. Оваа условна поделба зависи од кој аспект се проучува животната средина: географски, биолошки, медицински, урбан итн. Во најширока смисла, под животна средина може да се сфати *целокупната биосфера* како најголем и најсложен систем каде што сите живи организми имаат сопствена животна средина на различно организациско ниво.

Вкупниот простор на планетата Земја каде што постои живот ја претставува *биосферата*. Нејзините граници не се строго определени; над Земјината површина таа достигнува до 5000 m височина, а во морињата и океаните до 4000 m длабочина, а во *ледосферата* се забележува живот до неколку метри длабочина. Надвор од овие граници постои живот во редуциран обем: на Андите и Хималаите и над 6000 m височина се среќаваат некои видови лишаи, а во длабоките мориња се среќаваат риби, црви и мекотели кои се хранат со органската маса наталожена на дното. Веќе не е можно преку природни процеси да се поврати рамнотежата во биосферата.

Голем дел од човековата дејност ги менува еколошките системи на планетата Земја, планините, реките, морињата, поларните капи. Како резултат на таквата активност веќе исчезнале многу видови животни и растенија од лицето на земјата, а загрозен е опстанокот на други (се смета дека во последниве сто години исчезнале околу 200 видови од групата на птици и цицачи, а во опасност од исчезнување се околу 600 видови од таа група). Со еден збор, биодиверзитетот (богатството на различни видови живи организми) е загрозен.

Физиката и другите науки на човештво-

то му дале знаења, техники и технологии со кои од земјата се извлекуваат огромни количества сировини (руди, фосилни горива, градежен материјал) кои потоа се преработуваат за задоволување на потребите на населението. Но, најчесто, технологиите не водат сметка за она што останува по преработката на примарните сировини и затоа се создаваат *отпадни материи* кои не можат да се вклучат во природниот кружен ток на размена, во синџирот на исхрана итн. Како илустрација, според некои податоци, за покривање на енергетските потреби на човештвото во последните сто години, при преработката и употребата, испуштени се скоро 400 милијарди тони CO₂ во атмосферата (сл.1).



Сл. 1.

Многу од процесите што настануваат во биосферата како и нивната стабилност и одржливост, зависат од физичките својства на одделни елементи на биосферата коишто можат да бидат топлински, механички, електромагнетски, радиоактивни итн. Живиот свет опстојува во гравитационото поле на Земјата, добива енергија од Сонцето, размената меѓу единките се врши (покрај другото) и на молекуларно и атомско ниво, градбата на организмите мора да ги следи физичките законитости.

Може да се каже дека физиката има двојна улога во науката за животната средина. Од една страна, некои нејзини откритија довеле до деградација на животната средина, а од друга страна, физиката постојано бара и изнаоѓа нови методи и техники за детекција и смалување на загадувањето.

Но, задача на физиката во прв ред мора да биде заштитата и унапредувањето на животната средина, а тоа може да биде со:

19. Физика на животната средина

-изнаоѓање на алтернативни извори на енергија коишто нема да ја загадуваат човековата околина;

-рационално користење на природните ресурси;

-разумна примена и користење на топлинската, електричната и нуклеарната енергија;

-усовршување на методите за детекција на штетните зрачења;

-добивање на нови материјали за заштита;

-откривање методи за смалување на веќе направените штети (смалување на озонската дупка, смалување на концентра-цијата на CO₂ и другите полутанти итн.).

Некои законитости во физиката имаат своја директна примена во екологијата. Ќе наведеме некои од нив.

1. *Дифузијата и екологијата.* Процесот на дифузија игра голема улога при загадувањето на животната средина. Штетните гасови што се создале на некое место, отровните супстанции создадени во технолошките процеси и друго се распространуваат во атмосферата, водите и почвата во прв ред преку дифузија. Тоа е процес којшто е присутен во сите системи, а се должи на хаотичното движење на молекулите и атомите во еден систем.

Топлинската енергија во биосферата од едно до друго место се пренесува преку *конвекција*. Во полето на Земјината тежа настанува движење на воздушните маси, на водената пара, а со тоа и на различните загадувачи присутни во атмосферата. Да се потсетиме дека при несреќата на нуклеарната централа во Чернобил 1986 год. веќе по три дена радиоактивните облаци поради конвекција и воздушни струења стигнаа дури и над Балканскиот Полуостров и предизвикаа радиоактивна контаминација.

2. *Физиката и новите извори на енергија.* *Заштеда и рационално користење на енергетските ресурси.* Денес нужно се наметнува рационално користење на енергетските ресурси: нафтата, јагленот и природниот гас поради сè помалите ресурси, но и поради фактот што овие извори на енергија вршат загадување на биосферата (особено атмосферата). Исто така, и користењето на ураниумот како гориво во нуклеарните центри не е погодно, било поради смалените ресурси, било

поради нерешените проблеми со радиоактивниот отпад што настанува при неговата употреба. Физичарите имаат главна задача во изнаоѓањето на "чисти" извори на енергија. Во поглавјето 2.10. опишани се некои алтернативни, обновливи извори на енергија.

Кај луѓето полека се развива свеста за заштеда на енергијата затоа што е јасно дека со сегашново темпо на трошење на енергетските ресурси, за две-три децении ќе бидат потрошени сите резерви. Можности за штедење на ресурсите има многу. Така, на пример, во градежништвото се користат нови градежни материјали и врзивни средства коишто имаат многу помал *коэффициент на топлоспроводност* со што се смалува загубата на топлинската енергија. Добро изолирани градежни објекти можат да заштедат дури 30% енергија во зимскиот период.

3. *Физика на атмосферата.* Климата во кој било дел на светот е определена според движењето на атмосферските маси и присуството на водената пара, а изучувањето го врши *метеорологијата* којашто во прв ред е физичка дисциплина. Таму се мерат параметрите на атмосферата: температура, притисок, влажност, брзина на струењата итн. Физичките модели за атмосферата се засноваат на динамички систем во гравитационо поле кој добива енергија од Сонцето. Секоја секунда на 1m² на површината на Земјата паѓа средно 1370 J сончева енергија. Загреаниот воздух се движи нагоре, ладниот паѓа надолу. На овие движења ако се додаде и ротацијата на Земјата, дневно-ноќните разлики во температурите, температурните разлики на половите и екваторот, на морето и копното, влијанието на релјефот..., станува јасно дека настануваат сложени движења во атмосферата што ги условуваат климатските промени. Ете зошто е тешко, а можеби невозможно, да се прават долгорочни временски прогнози. Ова го потврдуваат новите *теории за детерминираниот хаос* каде што е покажано дека дури и мала промена во еден од параметрите на еден динамички систем (како што е атмосферата) може да предизвика многу големи климатски промени во некој регион ("*летот на пеперутка во Хонгконг може да предизвика бура во Њујорк*").

4. *Физиката во отстранување на*

загадувачите на животната и работната средина. Методите со кои се одредуваат параметрите на атмосферата, на водите и на почвата најчесто се *физичко-хемиски методи*. Така, на пример, ако сакаме да испитае загаденост на водата, треба да се мерат некои (или сите) од овие физички параметри: температура (термометрија), густина, вискозност, бистрина (ресејување на светлината), електричната спроводливост (кондуктометрија), присуство на радиоактивни материји (дозиметрија на јонизирачки зрачења). Наведените мерења можат да се дополнат со резултати од хемиски методи: киселост и базност, бигорливост, редокс-потенцијал итн.

Кога има потреба да се отстранат некои загадувачи присутни во средината, тоа може да се направи со дејство на некоја сила: *таложее под дејство на Земјината тежа*, со *центрифугирањето*, *под дејство на електричната сила* (ако честиците загадувачи се во јонизирана состојба), *механички сепаратори* (отпрашување) итн.

5. Физиката и електромагнетското зрачење. Заштита.

Спектарот на електромагнетско зрачење е мошне широк, од радиобрановите што имаат најголема бранова должина па сè до рендгенското и гама зрачењето со мала бранова должина. За влијанието на дел од тој спектар што спаѓа во *јонизирачки зрачења* се зборува во поглавјето 2.7. на оваа книга.

Овде ќе се задржиме на помалку познатите ефекти поврзани со дејството на зрачењето на телевизиските, компјутерските и други видови екрани и на мобилните телефони што спаѓа во доменот на радиобрановите. Имено, видеотерминалите емитураат зрачење во широк интервал на бранови должини. Отклонските системи на електронскиот сноп во катодната цевка работат во дијапазонот 15-40 kHz. Правени се испитувања за влијанието на овие фреквенции врз здравјето на луѓето, но освен констатациите дека такво влијание има, нема конечни научни докази за тоа.

Од друга страна, екраните на видеотерминалите емитураат светлина и долготрајната работа пред нив предизвикува не само замор на очите, туку се можни и воспаленија, катаракти. За одбегнување на несакани

ефекти, се препорачуваат специјални филтри кои покрај интензитетот на светлината, треба да го смалат и електромагнетското поле.

Радијацијата што ја емитураат станиците и апаратите во мобилната телефонија спаѓа во т.н. *нејонизирачко зрачење* чие дејство многу се разликува од јонизирачките зрачења (рендгенското зрачење, алфа, бета, гама зрачењето). Интеракцијата на зрачењата со биолошкото ткиво зависи од нивната енергија (односно, фреквенција). Фреквентното подрачје на мобилните телефони е сместено во доменот меѓу 800 MHz и 2200 MHz. Бидејќи и базната станица и мобилниот апарат се уреди со мала моќност, електромагнетската радијација од нив во општ случај е многу мала, нема толкава енергија да ги прекине хемиските врски, затоа ова зрачење е нејонизирачко. Со право велите дека нема сличност меѓу дејството на јонизирачкото и нејонизирачкото зрачење.

Заради потребата да се најде одговор за можните здравствени ризици за 700-800 милиони корисници на мобилната телефонија (толку се цени дека ги имало во светот на крајот на 2002) правени се истражувања кои имаат за цел да најдат евентуална врска меѓу електромагнетската радијација и ризикот по здравјето на популацијата. Заклучокот е:

"... Изложувањето на популацијата на ова зрачење под дозволената граница не предизвикува здравствени ефекти. Но, научните сознанија укажуваат дека се можни некои биолошки ефекти коишто не мора да водат кон развивање на болест..."

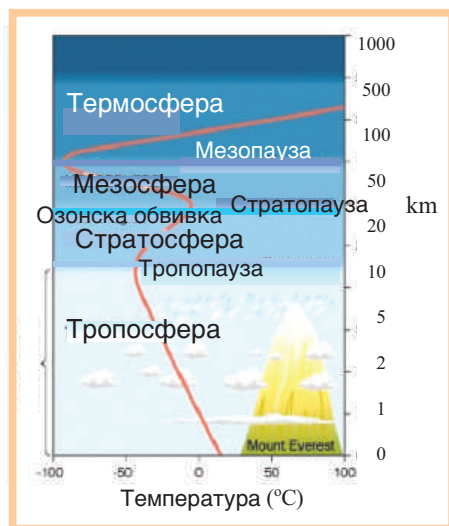
Прашања и задачи

1. Што е биосфера? Кои се нејзините граници?
2. Зошто настанува неминовно загадување на животната средина?
3. Зошто е загрозен биодиверзитетот на живите суштества на Земјата?
4. Со кои проблеми се занимава екологијата?
5. Каква е улогата на физиката во зачувување на животната средина? Што треба да се направи за заштита на животната средина?

19.2. ГЛОБАЛНИ КЛИМАТСКИ ПРОМЕНИ

Првите научни методи за **климатологијата** – наука што ја изучува климата и нејзините промени, се смета дека се појавиле во 1831 година со воведувањето на новата дефиниција на климата од страна на Александар Хумболт. Според него, терминот *клима* означува *некое специфично својство на атмосферата, кое зависи од непрекинатото заедничко дејство на подвижната површина на морињата и зрачењето на топлината од сувите предели на Земјата.*

Бидејќи карактеристиките на атмосферата се една од главните причини што ја определуваат климата во некој регион, да видиме некои нејзини карактеристики. Според теоријата, атмосферата може да се формира околу кое било небесно тело што има доволно јака гравитација.



Сл. 1. Земјината атмосфера

Земјината атмосфера е составена од пет слоја (сл. 1). Таа има динамика на процеси и температурен градиент. Густината и составот на атмосферата се менуваат со висината од површината на Земјата. Најниската обвивка во која живееме се нарекува **тропосфера** (и се простира од површината до 10 km висина). Гасовите во овој слој, се главно, молекуларен

кислород (21%) и молекуларен азот (78%), а во преостанатиот еден процент има аргон, јаглерод диоксид, водена пара и траги од водород, озон, метан, јагленмоноксид, хелиум, неон, криптон и ксенон. Во овој слој е 90 % од гасовите на Земјината атмосфера и 99% од водената пара. Кога станува збор за некои соединенија што денес постојат во атмосферата, но се поретки, како, на пример, водородсулфид или некои оксиди на сулфурот и азотот, се претпоставува дека тие најпрвин се појавиле во околината на вулканите или мучуриштата, а потоа преку струење на воздушните маси, водените или снежни врнежи се пренесувани на поголеми растојанија.

Сите временски промени се случуваат тука. Намалувањето на температурата со порастот на висината е резултат од намалувањето на притисокот. Кога дел од воздушната маса се движи нагоре, се шири за сметка на нискиот притисок, со што се лади. Горниот крај на овој слој е **тропопаузата**. Најниска е на половите, околу 5 km над површината, а највисока на екваторот - 16 km.

Слојот над тропосферата сè до 50-тиот километар се нарекува **стратосфера**. Тоа е место каде се формира **озонската обвивка**. До стратосферата пристигнува сончевото зрачење со бранова должина под 240 nm и ги раскинува кислородните молекули создавајќи озон (O_3). Озонот достигнува најголема концентрација на висина од 25 km. Озонската обвивка се простира на височина од 11 до 60 km. Таа го апсорбира штетното ултравиолетово зрачење и се загрева (со висината после опаѓање на температурата има пораст, сл. 1).

Слојот над стратосферата е **мезосфера**. Тука температурата опаѓа со висината, достигнувајќи го минимумот од $-90\text{ }^\circ\text{C}$.

Термосферата лежи над мезопаузата и е слој во кој повторно има пораст на температурите со висината, предизвикан од апсорпцијата на UV и X-зраците од Сонцето. На висина од 80 km гасовите се толку ретки што за краток временски период може да постојат слободни електрони пред да бидат заробени од позитивен јон. Постоенењето на наелектризирани честици на овие височини, и над нив, анализира за почетокот на **јоносферата**, слој кој има одлика на гас и плазма.

Регионот над 500 km од Земјата е **егзосфера**. Земјата се однесува како голем магнет. Земјиното магнетно поле ги концентрира наелектризираните честици кои идат од космосот во слоеви од околу 3000 и 16000 km од површината. Овој надворешен регион околу Земјата, каде честиците кружат покрај магнетните силиви линии е **магнетосфера** *Отклонување наелектризирана честица во магнетно поле* - Лоренцова сила).

Причини за глобалните климатски промени. Сончевото зрачење што влегува во климатскиот систем на Земјата и го напушта, враќајќи се во вселената како инфрацрвено зрачење. Притоа, климатскиот систем останува во рамнотежа ако не е присилен да се промени. За да се постигне стабилна температура на површината на Земјата, мора да се воспостави рамнотежа меѓу зрачењето што паѓа на Земјата и зрачењето што ја напушта. Во спротивно површината на Земјата би продолжила да се загрева (повеќе енергија влегува отколку што излегува) или обратно да се лади.

Логично е да се претпостави дека во минатото промените на климата, во најголема мерка, биле предизвикани од *природни влијанија*, а многу помалку како резултат од човековата активност – *антропогени влијанија* изразени преку ефектот на стаклена бавча и промена на озонскиот слој. За некои од овие влијанија ќе стане збор подолу.

1. Аеросоли. Во атмосферата заедно со водените капки и честиците мраз што се наоѓаат во облаците и маглата, постојат и поголема количина тврди и течни честици со најразличен хемиски состав. Тие со едно име се наречени **аеросоли**. Најголем дел од овие честици имаат дијаметар 10^{-4} до 10^{-5} cm. Тие во атмосферата може да се појават како резултат на природни процеси – вулкански ерупции или како резултат од човечката активност.

Во општ случај, влијанието на аеросолите врз климата се сведува на промени на температурата. Причината за тоа е промената на прозрачноста на атмосферата.

Поголемиот дел од атмосферските аеросоли е во ниските слоеви на тропосферата, каде животот им е релативно краток. Една од причините за тоа, секако, е гравитационата

сила која од атмосферата ги привлекува најтешките честици кон површината. Оние полесните, пак, до Земјата стигнуваат под дејство на воздушните струења и врнежите, што како процеси имаат голема улога во прочистувањето на атмосферата од аеросоли. Аеросолите во тропосферата имаат влијание на климата од локален карактер.



Сл. 2. Вулканските ерупции придонесуваат за прозрачноста на атмосферата

Значително помала е количината на аеросолите во стратосферата. Димензиите на овие честици се многу мали (од 10^{-4} до 10^{-5} cm), па затоа гравитацијата врз нив делува многу слабо. Од друга страна, вертикалното струење на воздухот во стратосферата отсуствува, а исто така, нема ни врнежи. Ова придонесува влијанието на стратосферните аеросоли, претежно оксиди на сулфурот (SO_2 , SO_3 , или SO_4), да биде присутно врз промените на климата.

2. Океани и криосфера. Ако се земе предвид дека масата на водата е поголема од масата на атмосферата, а покрај тоа и специфичниот топлински капацитет на водата е поголем од оној на атмосферата (за 4 пати), тогаш станува јасно дека морињата и океаните се огромен резервоар на топлина. Нивна основна физичка карактеристика е што имаат релативно голема топлинска инерција – бавно се затоплуваат, но и бавно се ладат, а слабо го

рефлектираат упадното зрачење. Тие бавно, но постојано ја загреваат атмосферата.

Океаните и морињата имаат улога и во прочистувањето на атмосферата од CO_2 . Посебно влијание врз климата имаат топлите и ладните водени струи.

Не помала улога во формирањето на климата има и *криосферата* (континенталните ледени покривки како Гренланд и Антарктикот, планинските ледници и снежни покривки.

Механизми со кои криосферата влијае врз климата има многу, но како најважни би ги спомнале: термичкото дејство врз воздушните и водените маси, зголеменото земјино алbedo и апсорпцијата на гасови.

3. Кисели дождови. Некои од гасовите на атмосферата (CO_2 , SO_2 , азотни оксиди NO_x , NH_3 и други), испарливите органски соединенија и алкалната прашина може да придонесат за киселоста на врнежите. Киселите дождови имаат $\text{pH} < 5$. Сè додека не се редуцира воздушното загадување дождовите ќе бидат проблем за човештвото.

Природни извори на сулфурните оксиди се вулканските ерупции, распаѓањето на разни организми. Природни извори на азотни оксиди се бактериите од почвата и хемиски реакции во погорните слоеви на атмосферата.

Меѓутоа, природните извори се само мал процент од загадувачите. Така, на пример, човекот е причина за 90% од емисијата на сулфурот и 95% од емисијата на азотот. Сулфур диоксидот се испушта при согорување на јагленот, рафинирање на нафтата. Азотните оксиди се создаваат при горење на горивата при ниска температура. Околу 40% од овие антропогени азотни оксиди се од автомобилите, камионите и возовите, 25% од термоелектраните и 35% од индустриски процеси на согорување, распаѓање на отпадот во депониите.

4. Космолошки влијанија врз климата.

Според денешните сознанија, активноста на Сонцето е само еден од таканаречените космолошки фактори. Познато е дека во Сонцето постојат 11, 22 и 80 - годишни циклуси од кои најдобро испитан е првиот. Кога станува збор за 11-годишниот циклус на сончевата активност, се знае дека таа влијае врз динамиката на процесите во стратосферата и јоносферата.

Тука спаѓаат, меѓу другите, и гравитационото влијание на соседните планети, промената на ексцентрицитетот и инклинацијата на Земјината орбита.

Климатските промени: претстојна глобална закана. Како што е познато, животот на планетата Земја е можен поради природниот ефект на стаклена бавча. Природното појавување на гасовите кои го предизвикуваат ефектот на стаклена бавча ("**стаклечки гасови**") - слично како стаклото што не дозволува топлината да излезе од стаклената бавча така и овие гасови придонесуваат за топлината на Земјата), пред сè **водена пара** (H_2O), **јаглерод диоксид** (CO_2), **метан** (CH_4), **азотен оксид** (N_2O) и **тропосферски озон** (O_3) овозможува сончевата енергија да дојде до Земјината површина како видлива светлина, за потоа да биде заробена од атмосферата како инфрацрвено зрачење. Овој феномен ја одржува топлината на нашата планета.



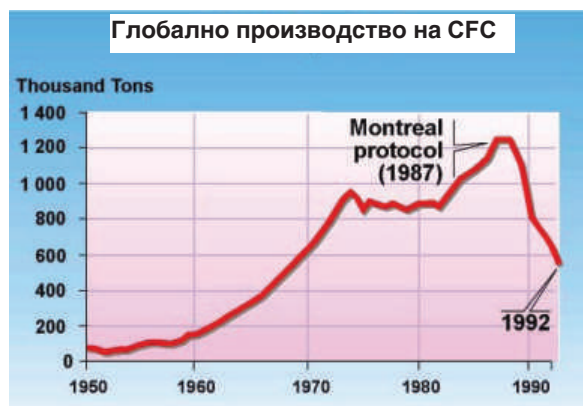
Сл. 3. Кружење на CO_2 во атмосферата

Зошто очекуваме дека климата ќе се промени? Со индустријализацијата емисијата на "стаклечки гасови" од согорување на фосилни горива, сечење на шуми и чистење на земјиштето за земјоделие, постојано се зголемува.

19. Физика на животната средина

Во последните 100 години стаклечките гасови се емитираа во атмосферата побрзо отколку што природните процеси можеа да ги отстранат. Дополнително емитирани се и нови синтетички гасови како што се **хлорофлуоројаглериоди (CFC)**. За жал, концентрацијата на овие гасови во атмосферата постојано се зголемува. Утврдено е дека и тие го поддржуваат ефектот на стаклената бавча.

Имено, зголеменото количество на сите овие гасови не дозволува топлината да излезе од тропосферата што придонесува за глобалното затоплување на Земјата и глобални промени во екосистемот (сл. 5).



Сл. 4. Глобално производство на CFC

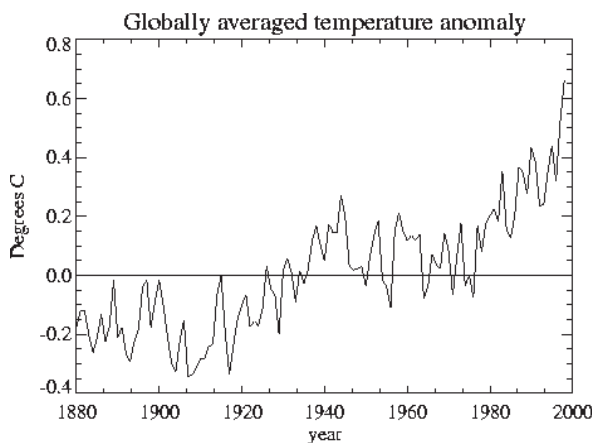
Податоците за климата пред 160 години укажуваат на тесна поврзаност меѓу концентрацијата на "стаклечки гасови" (пред сè водена пара, јаглерод диоксид, како и метан, азотен оксид и др.) во атмосферата и глобалните температури. Уште во 1896 година големиот шведски хемичар С. Арениус предвидувал дека со удвојување на концентрацијата на CO_2 во атмосферата преку согорување на фосилно гориво, можно е глобалната температура да порасне за $5,5^\circ\text{C}$. Ова не е далеку од вредностите $1,5^\circ\text{C}$ до $4,5^\circ\text{C}$ кои сега се добиваат од компјутерските симулации на климата за двојно зголемување на CO_2 во атмосферата.

Во 1995 година светската научна заедница извести дека промената е веќе присутна и дека планетата Земја во минатото столетие се затоплила за $0,5^\circ\text{C}$. Во јануари 2001 година Меѓувладиното тело за климатски промени при Обединетите нации изјави дека чове-

ковото влијание претставува главен фактор за денешното глобално затоплување.

Во 1995 година направени се процени дека глобалната температура на воздухот на Земјата ќе се зголеми за дополнителни 1°C - $3,5^\circ\text{C}$ до 2100 год. Тоа би било најбрзо менување на климата во последните 10000 години.

Затоплувањето во овие размери ќе влијае врз многу аспекти на нашите животи, бидејќи ќе предизвика промени на температурите во и промени во распределоата на свежа вода. Најверојатно значајни ќе бидат влијанијата врз здравјето на луѓето, виталноста на шумите и други природни подрачја, како и продуктивноста во земјоделството.



Сл. 5. Глобални промени на температурата од 1880 до 2000 година

Потоплата планета Земја го забрзува глобалниот циклус на водата: размената на вода помеѓу океаните, атмосферата и земјиштето. Повисоките температури предизвикуваат поголемо испарување и побрзо сушење на почвите. Зголеменото количество вода во атмосферата значи повеќе дожд или снег. Можеби во овој момент ги гледаме првите знаци на промени во циклусот на водата. Тие појави може да предизвикаат поплави, ерозија на земјиштето, па дури и губење на некои видови живи организми. Во некои други подрачја, пак, зголеменото испарување доведува до суши, бидејќи обилни дождови паѓаат на други места.

Во последните 100 години глобалното средно морско ниво порасна за 10 до 25 см,

делумно поради ширењето на водата кога таа се загрева. Топењето на глечерите во последното столетие, исто така, придонесува за пораст на морското ниво. Порано замрзнатото земјиште (вечен мраз) во арктичкиот предел на Алјаска и Сибир, исто така, почна да се топи, нарушувајќи ги екосистемите и инфраструктурата. Споменатото топење и затоплувањето на тундрите ќе доведе до распаѓање на органска материја и ослободување на заробените јаглерод и метан, создавајќи дополнителен извор на "стаклечки гасови". Како што ризиците од глобалните климатски промени стануваат сè повеќе очигледни, се јавува вистинска потреба од фокусирање на акции за намалување на емисиите на стаклечките гасови и минимизирање на штетните влијанија од климатските промени.

Иако невозможно е да се прават попрецизни предвидувања на глобалниот климатски систем, сепак е јасно дека треба добро да ја чуваме и да се грижиме за средината во која живееме.



Меѓународни иницијативи во врска со климатските промени. Во текот на 80-те години, заради научните докази за глобалните климатски промени и последиците од нив, се појави зголемена загриженост помеѓу научниците, политичарите и јавноста. Во 1992 година, во Рио де Женеиро беше усвоена **Рамковната конвенција за климатски промени** (United National Framework Convention on Climate Change-UNFCCC) чија крајна цел е: *...стабилизација на концентрацијата на "стаклечките гасови" на ниво кое ќе го спречи заканувачкиот антропоген удел во климатските промени...* Сепак, одзивот на развиените земји (кои се главните "произведувачи" на стаклечките гасови) се покажа недоволен и заради тоа во 1995 година воведен е Берлинскиот мандат, кој воспостави преговарачки процес за поголем ангажман во рамките на Конвенцијата во периодот по 2000 година. Овој процес, конечно, доведе до потпишување на Кјото протоколот (Kyoto protocol) во 1997 година.

Кјото протоколот претставува мошне важен чекор во ограничувањето на емисиите на "стаклечки гасови" (CO₂, CH₄, N₂O, HFC,

ClFC₄). Бидејќи атмосферата не знае за граници јасно е дека тоа е проблем на сите од планетата Земја.

Прашања и задачи

1. Каква е структурата на атмосферата?
2. Ако еден балон во 7 часот наутро го видите над Скопје, каде ќе биде во 19 часот вечерта? Зошто?
3. Зошто наелектризираните честичи од космосот не стигнуваат до Земјата?
4. Кои се причините за глобални климатски промени?
5. Што се тоа "стаклечки гасови" ?
6. Како човекот влијае врз промената на климата?
7. Какво влијание има озонската обвивка за животот на Земјата?
8. Како се уништува озонот и кои се последиците од сè поголемото уништување на озонската обвивка на Земјата?

Самиот термин **клима** буквално значи *наклон на сончевите зраци*, и за првпат е воведен од грчкиот астроном Хипаркус во II век п. н. е. Сè до XVIII век карактеристиките на климата биле објаснувани исклучиво преку наклонот, односно упадниот агол на сончевите зраци во дадена област.

Александар Хумболт (**Alexander Humboldt**) германски природонаучник и патописец.

Повеќе информации за глобалното затоплување (Climate Change), озонската обвивка (Ozone layer) и мерки за нивна заштита со Кјото протоколот (Kyoto protocol) побарајте на Интернет или друга литература.

Направете семинар на оваа тема со што и Вие би придонеле за заштитата на животната средина.

19.3. ЕФЕКТОТ НА СТАКЛЕНА БАВЧА



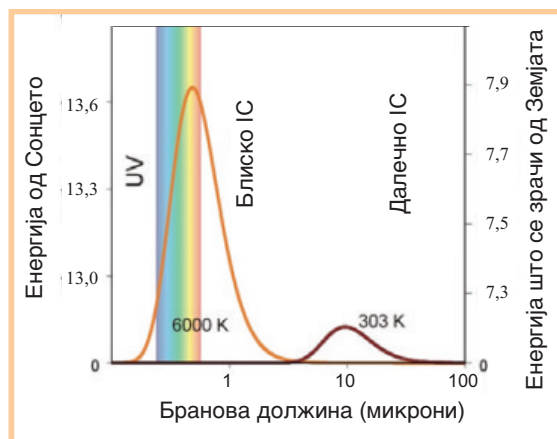
Дали сте си го поставиле прашањето: во кое спектрално подрачје зрачат телата околу нас? На пример, телата на температура 300 K и 6000 K имаат максимален интензитет на зрачење, првите во инфрацрвениот дел (IC), а другите во видливиот дел на спектарот. Оваа промена на брановата должина има големи последици од кои една е **ефектот на стаклена бавча**.

Брановата должина λ_{\max} за која емитираното зрачење има најголем интензитет е зададена со **Виновиот закон на поместување**

$$\lambda_{\max} = \frac{C}{T}, \quad (7)$$

каде што $C=2,89 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$ е **Винова константа**, T апсолутна температура. Според Виновиот закон со **поработ на температурата, максимумот на интензитетот во спектарот на зрачењето се поместува кон помалите бранови должини** (сл. 1).

Сончевото зрачење со максимален интензитет на 483 nm лесно поминува низ стаклото. Внатре во стаклената бавча него го апсорбираат телата кои потоа реемитираат енергија. Меѓутоа, нивната температура е пониска, па емисијата на нивното зрачење е со помала бранова должина (во IC дел на спектарот). Овие бранови должини не може да поминат низ стаклото, т.е. **стаклото ги апсорбира IC зраци**. Така внатрешноста на стаклената бавча се загрева. Исто како што стаклото ја задржува топлината од Сонцето во стаклената бавча, така и атмосферата ја одржува топлината на Земјата.



Сл. 1.

Дали сте знаеле дека и ние луѓето живееме во стаклена бавча? Ефектот на стаклена бавча е многу важен природен феномен и во Земјината атмосфера. Тој се одвива на следниов начин (види слика 2):



Сл. 2. Ефект на стаклена бавча

- Сончевото зрачење минува низ атмосферата на Земјата како зрачење со кратка бранова должина, најмногу во видливиот и блиското инфрацрвено подрачје од спектарот. Еден дел од ова зрачење пред да стигне до површината на Земјата се апсорбира од атмосферата, вклучувајќи ги облаците, а дел се рефлектира и се враќа назад во вселената. Сепак, најголем дел од зрачењето стасува до површината на Земјата.

19. Физика на животната средина

- Зрачењето кое стасува се апсорбира од површината на Земјата и според Виновиот закон се зрачи во инфрацрвената област (како топлинска енергија) во тропосферата на Земјата.

- Молекулите на водена пара- H_2O ; јаглерод диоксид- CO_2 ; метан- CH_4 , диазот оксид N_2O , озон - O_3 и др. ("стаклечките гасови") кои природно постојат во тропосферата, го апсорбираат долготрановото (топлинското) зрачење што паѓа врз нив на патот назад во вселената така што тропосферата се загрева. Зрачењето што ја напушта тропосферата е во блиското инфрацрвено подрачје ($8-12 \cdot 10^{-6} m$).

- Молекулите на гасовите во стаклената бавча ја оддаваат топлинската енергија што ја апсорбирале во тропосферата. *Имено, воздушната обвивка ја одржува температурата на Земјата.* Маѓутоа, отсуството на гасовите од стаклената бавча би ја намалило просечната температура на нашата планета за околу $33\text{ }^\circ C$, претворајќи ја Земјата во уште една безживотна планета на Сончевиот систем.

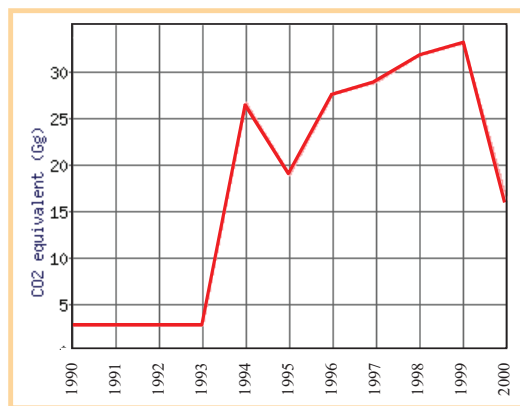
- Ограничено количество на гасови од стаклената бавча во тропопаузата дозволува дел од топлинското зрачење да излезе во стратосферата и надвор од неа.



Сл. 3. Загадувачи кои придонесуваат за зголемување на количеството гасови во атмосферата

Ефектот на стаклена бавча е природен феномен и на него се должи тоа што температурата на Земјата е погодна за живот. Докази за постоењето на ефектот на стаклена бавча доаѓаат и од други планети. На пример, планетата Венера каде 90% од атмосферата е

CO_2 температурата на површината е за $523\text{ }^\circ C$ поголема отколку кога не би била атмосферата.



Сл. 4. Пораст на количеството на јаглерод диоксид во атмосферата

Што е тоа ефект на засилена стаклена бавча? Се верува дека основниот состав на атмосферата не се менувал милиони години, иако некои ретки компоненти, како што е CO_2 варираше. Денес количеството на јаглерод диоксид, метан, диазот оксид во атмосферата растат многу побрзо отколку што тоа било случај во минатото (сл. 4). Овој факт предизвикува загриженост во врска со глобалната промена на климата. Освен CO_2 , во атмосферата се испуштаат и синтетички гасови како хлорофлуоројаглеродите (CFC) (фреоните), кои имаат капацитет за апсорпција на топлината 7000 пати поголем од оној на CO_2 . Имено, зголеменото количество на сите овие гасови не дозволува топлината да излезе од тропосферата што придонесува за глобалното затоплување на Земјата и глобални промени во екосистемот.

Видовме дека енергијата што влегува во климатскиот систем на Земјата и го напушта, враќајќи се во вселената како инфрацрвено зрачење. За да се постигне стабилна температура на површината на Земјата, мора да се воспостави рамнотежа меѓу зрачењето што доаѓа на Земјата и зрачењето што ја напушта. Во спротивно површината на Земјата би продолжила да се загрева (повеќе енергија влегува отколку што излегува).

Што може да се стори?

Во Рио де Женеиро 1992 год. на *Рамковната конвенција за климатски промени* беше објавен следниов заклучок: *извесно е дека зголемувањето на количеството испуштени гасови од страна на активностите на човекот ќе го засили ефектот на стаклена бавча, а како последица на тоа и дополнително загревање на Земјата.*

Ефектот на стаклена бавча кој милиони години беше благодет за Земјата, се чини дека во последното столетие се претвора во сериозна закана, засилен од човечките активности. Со индустријализацијата и порастот на населението, емисијата на дополнителните количества на гасови од согорување на фосилните горива, сечење на шумите и новите синтетички гасови, постојано се зголемува. Во последните 100 години дополнителното количество гасови на стаклената бавча се емитуваа побрзо отколку што природните процеси можеа да ги острат. Јаглерод диоксидот се разменува помеѓу целиот живот на Земјата, познат како биосфера, и атмосферата преку поголем број на процеси, од кои најважен е фотосинтезата и дишењето. Атмосферата, исто така, разменува CO_2 со океаните и реките. Еден дел од CO_2 , апсорбиран од површината на морето, на повеќе начини се транспортира во длабочините на океанот. Освен тоа CO_2 може да се претвори и во други соединенија.

На крајот, неминовно е и прашањето: какви промени може да се очекуваат како резултат од промените во стаклената бавча?

За да се одговори правилно треба да се знае дека врската помеѓу концентрацијата на гасовите во атмосферата и затоплувањето што тие го предизвикуваат не е воопшто едноставна. Од друга страна, и поврзаноста меѓу глобалното затоплување и глобалната промена на климата е уште посложена.

За разлика од многу други области во науката, експерименти во врска со ефектот на стаклена бавча во лабораториски услови не може да се прават. Затоа најдобриот начин за проучување на глобалното затоплување, предизвикано од засилениот ефект на стаклена бавча е преку нумерички модели кои се извршуваат со јаки компјутери.

Најновите процени за зголемувањето на температурата на воздухот е дека во 2100 година тоа ќе изнесува 1 и $3,5^\circ\text{C}$ во однос на денешната просечна температура. Според сценариото "status quo" во 2100 година како резултат на порастот на температурата морското ниво ќе се зголеми за 15 до 95 cm во однос на денешното ниво. Поранешните прогнози предвидуваа поголем пораст на морското ниво заради нарушувања на ледената карпа на Антарктикот, но денес се смета дека такви нарушувања се многу малку веројатни во милениумски размери. Иако невозможно е да се прават попрецизни предвидувања на глобалниот климатски систем, сепак е јасно дека треба добро да ја чуваме и да се грижиме за средината во која живееме.

Прашања и задачи

1. Како се објаснува ефектот на стаклена бавча и што придонесува за зголемување на температурата во стаклената бавча?

2. Ако температурата на телото е 30°C , колкава е брановата должина на зрачењето? Ако температурата на Сонцето е 6000 K, каде е максимумот на ова зрачење? Што заклучуваш? ($C=2,89 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$).

(Одговор: Телата на Земјата емитуваат ИС зрачење со бранова должина $\lambda = 9,5 \mu\text{m}$; а Сонцето зрачење со $\lambda = 480 \text{ nm}$. Како што се гледа и од графикот на сл. 1 првата е во ИС, а другата во видливиот дел на спектарот.)

3. Што е тоа ефект на засилена стаклена бавча?

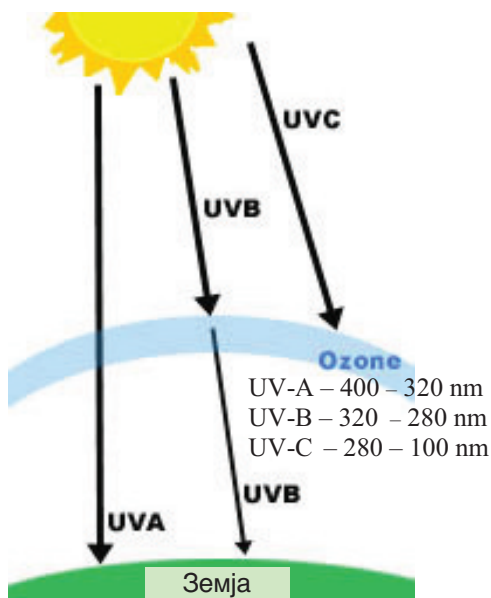
4. Какви промени може да се очекуваат како резултат од промените во стаклената бавча?

5. Зошто помеѓу дневната и ноќната температура на Месечината има голема разлика?

Повеќе информации за ефектот на стаклена бавча (Grynhous effect) побарајте на Интернет или друга литература. Направете проект на оваа тема.

19.4. ОЗОНСКАТА ОБВИВКА СЕ МЕНУВА

Озонот лоциран, главно, во стратосферата го апсорбира штетното ултравиолетово зрачење (UV) од Сонцето и е заштита на животот на Земјата. Но, последните години луѓето ја загрозија озонската обвивка испуштајќи во атмосферата супстанции кои го уништуваат стратосферскиот озон и ја нарушуваат рамнотежата воспоставена од природата. Неговата концентрација зависи од географската ширина, годишното време и надморската висина.

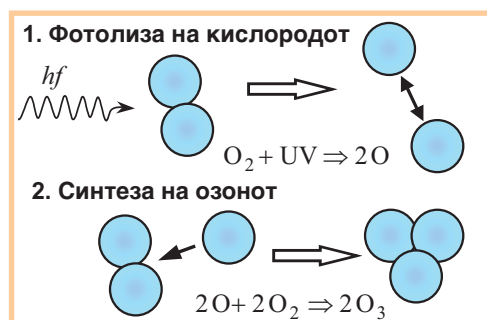


Сл. 1. Апсорпција на UV зрачењето со голема енергија од озонската обвивка

Озонот (O_3) е форма на елементарниот кислород кој има 3 атоми во секој молекул, наместо 2 како молекулот на кислородот (O_2). Озонот се создава во стратосферата (10-15 km од површината на Земјата) во реакција помеѓу молекулите на кислород и сончевото зрачење (UV) со бранова должина 176-244 nm во процесот наречен *фотолиза*. Притоа молекулите O_2 се распаѓаат во атоми кои со други O_2 молекули формираат озон O_3 (сл.2).

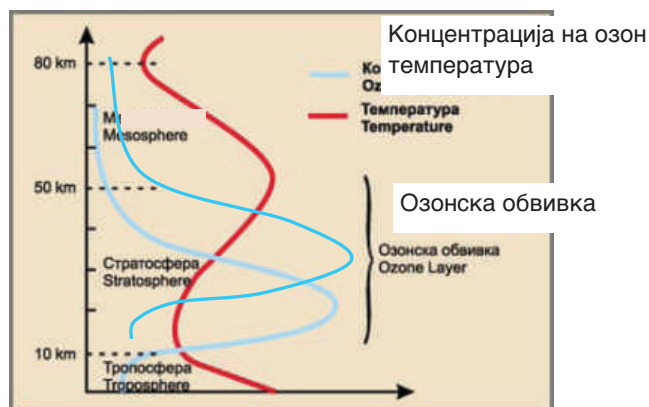
Иако сончевото ултравиолетово зрачење постојано произведува нов озон овие молекули на озон континуирано се уништуваат во

низа каталитички реакции од страна на природни соединенија кои содржат кислород, азот, водород, хлор и бром. Овие супстанции отсекогаш биле присутни во атмосферата, многу одамна пред да почне човекот да ја загадува атмосферата. Тие доаѓаат од почвата и океаните, во форма на метилхлорид, метилбромид, азот моноксид и ја воспоставуваат стабилната природна рамнотежа која многу малку е нарушена од цикличната активност на Сонцето.



Сл. 2. Фотосинтеза на озонот

Околу 90% од озонот е лоциран во стратосферата со максимална концентрација помеѓу 19 и 25-тиот километар гледано од површината на Земјата. Дното на стратосферскиот озонски резервоар е определено со висината на тропопаузата- изотермна гранична област меѓу тропосферата и стратосферата, со висина од 8 до 10 km над половите и скоро 18 km над екваторот.



Сл. 3. Озонот ја определува температурната структура на стратосферата

Бидејќи при процесот на фотолиза се ослободува топлина, озонот ја определува температурната структура на стратосферата. По опаѓањето во тропосферата, во стратосферата температурата расте (сл. 3). Од графикот се гледа дека таму каде што температурата е најниска озонската обвивка е најдебела.

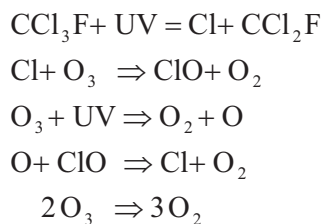
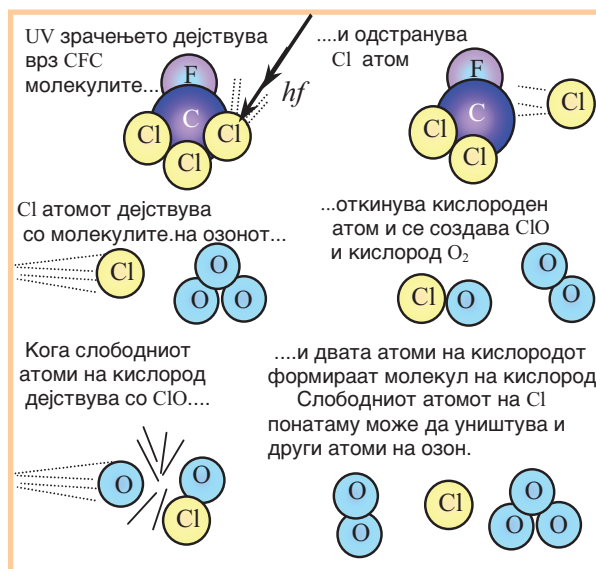
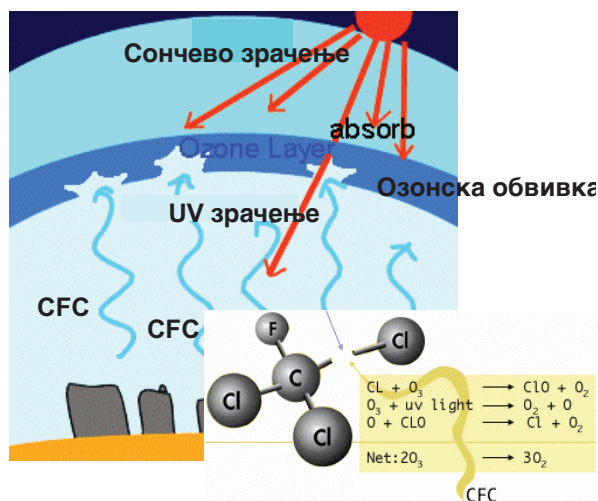
Каква е состојбата на глобалната озонска обвивка денес?

Денес повеќе од јасно е дека глобалното озонско ниво е значително пониско од нивото утврдено пред 1980 год. Закана за озонската обвивка се разни активности на човекот како што се, на пример, супстанциите кои се користат во ладилници и спрејови (хлорофлуоро јаглеродите-CFC). Тоа се многу инертни и нерастворливи во вода гасови, кои по пат на конвенција (струење) на воздухот се транспортираат во стратосферата. CFC во стратосферата апсорбираат високоенергетски фотони од Сончевото зрачење (230 nm) и се добива слободен хлор. Еднаш ослободениот хлор го уништува озонот (како катализатор) во серија каталитички реакции (сл. 4). Реакциите се одвиваат во стратосферата при екстремно ниски температури (-80°C).

Бромот од бромфлуоројаглеродите кои се користат за гасење пожари со UV зрачењето, исто така, може да биде ослободен во стратосферата. Бромот има 30 пати поголема способност за уништување на озонот од хлорот. Халогените деривати на јаглероводородите кои наместо флуор и хлор содржат друг халоген елемент како, на пример, бром, јод и др., може да опстојат повеќе од стотина години во стратосферата. Движени од воздушните струи CFC гасовите се закана за озонската обвивка и во наредните децении.

Закана за озонот е и N₂O од суперсоничните авиони кои летаат во ниските делови на стратосферата. Азотни оксиди се создаваат од транспортните средства, термоелектраните, индустриските процеси на согорување.

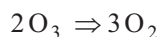
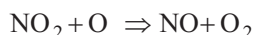
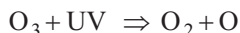
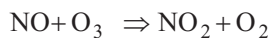
Количеството на овие гасови е многу пати поголемо од хлорот и бромот што прстигнува нормално од океаните во вид на метилхлорид и метил бромид. Овие синтетички гасови испуштени во атмосферата го уништуваат озонот со сериозни глобални последици.



Сл. 4. Уништување на озонот при реакција на CFC и UV зрачењето

Уништувањето на озонот што е резултат при реакцијата на азотмоксид (NO) како катализатор и UV зрачењето протекува вака:

19. Физика на животната средина



За создавање на NO влијание има и космичкото зрачење (космичките зраци на половите влегуваат скоро паралелно со магнетните силиви линии). Просторната распределба при формирањето на NO покажува дека Земјиното магнетно поле има индиректно влијание на концентрацијата на NO, а според тоа и озонот. Истражувањата покажуваат дека продукцијата на NO е најголема на половите, а логично следува дека и озонските дупки се токму таму. Воедно за уништување на озонот над половите придонесува и присуството на големи количини реактивен хлор и бром.

Озонот се создава преку целата година во стратосферата над екваторијалниот појас. Преку воздушните струења тој се транспортира кон поларните географски широчини.

Загубите на озонот посебно се големи над Антарктикот. За тоа придонесуваат и поларните стратосферски облаци кои ја привлекуваат водената пареа и ги апсорбираат азотните соединенија. Со доаѓањето на на т.н. антарктичка пролет во септември (појава на сонцето и UV зраците), стабилните резервоари преминуваат во активни видови на хлорот и бромот на површината на поларните стратосферски облаци и со голема ефикасност го уништуваат озонот. Резултатите од тоа се: загуба на повеќе од 40% озон за време на септември и октомври (кога поларниот виор – силни западни ветрови го носи озонот) и најголемата досега озонска дупка со површина од 24 милиони km^2 (види слика 5, 6, 7).

Меѓутоа, уништувањето на озонот над Арктикот не е толку големо, поради две причини: температурата во стратосферата ретко достигнува вредности под -80°C поради редовната обилна измена на воздушните маси од средните географски ширини; струењето над Арктикот престанува пред крај на зимата пред Сончевата светлина да предизвика процеси како над Антарктикот.

Глобално од 1970, вкупниот озон има тенденција на опаѓање насекаде освен над екваторот (озонската обвивка денес изгледа

како стара излитена крпа). Ако се исклучи екваторијалниот појас, каде нема значителни промени во озонот, опаѓањето над средните и поларните географски широчини во периодот 1984-1993 во однос на 1964 година е повеќе од 2 пати.

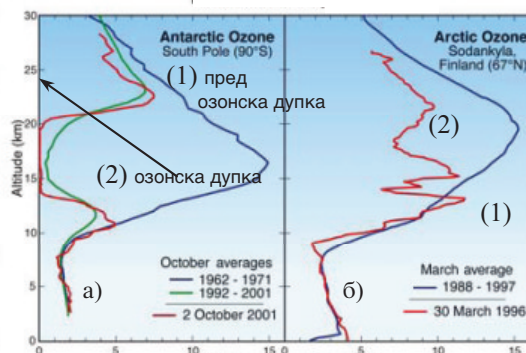
Озонска дупка
24 милиони km^2



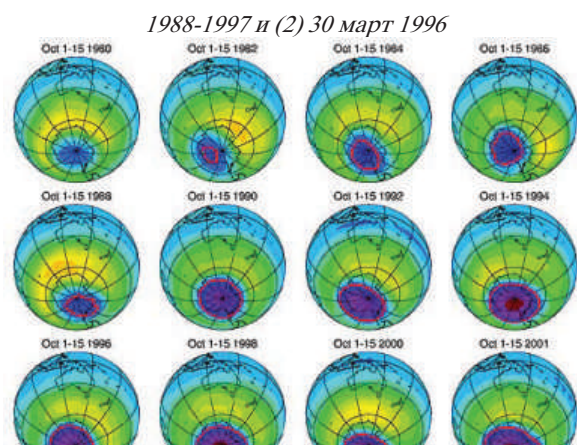
Сл. 5. Озонската дупка над Антарктикот.

Во тропосферата, напротив, концентрациите на озонот во северните средни географски ширини, во последните 100 години се зголемиле за повеќе од 2 пати и се со тенденција на растење. Овој озон не може да ги компензира загубите во стратосферата.

За разлика од озонот во стратосферата, кој има позитивна филтерна улога на UV зрачењето, тропосферскиот озон, иако хемиски идентичен, има сосема поинакви, деструктивни својства. Тој е силно реактивен со другите молекули и неговите високи концентрации се токсични за живите системи и ги оштетуваат нивните ткива.



Сл. 6. Вертикален профил на озонот во стратосферата а) над Антарктикот (1) октомври 1962-1971 и (2) 2 октомври 2001; б) над Арктикот - (1) март



Сл.7. Ширење на озонската дупка над Антарктикот во 1980, 82, 84, 86, 88, 90, 92, 94, 96, 98, 2000, 2001 год.

Последици од уништувањето на озонот.

Озонот влијае врз рамнотежата на примање и враќање на топлината од системот Земја-атмосфера со непредвидливи последици. Озонот го рефлектира инфрацрвеното зрачење кое се реемитира од Земјата и го враќа назад кон неа, помагајќи во загревањето на пониските слоеви (ефект на стаклена бавча). Така зголемувањето на озонот во тропосферата, посебно во близина на тропопаузата, предизвикува затоплување, додека намалувањето на стратосферскиот озон предизвикува ладење.

Бидејќи озонот силно го апсорбира UV-зрачењето од Сончевиот спектар со бранови должини пократки од 280 nm дозволува само мал негов дел да дојде до површината на Земјата. Уништувањето на озонот предизвикува зголемено ниво на UV-B зрачењето на површината на Земјата кое е со големи последици за живиот свет: рак на кожата, катаракта на очите (заматеност на очната леќа), оштетување на ДНК, намалување на ефикасноста на имунолошкиот систем, нарушување на некои екосистеми, посебно на морскиот фитопланктон кој е главен одвод на CO₂ и последици од промена на климата.

Што може да се стори за заштита на озонската обвивка? Загрижувачкото уништување на озонската обвивка ги ангажира прво научниците и стручњаците, а потоа и светските организации. За да се најде излез од настана-

тата состојба во врска со озонската обвивка Владиниот совет на UNEP- United National Environmental Programme - организација за животна средина при ООН, во 1977 година ги постави основите на меѓународната акција за заштита на озонската обвивка. Во 1985 година со Виенската конвенција се задолжуваат земјите да го штитат здравјето на луѓето и животната средина и да подготват конкретни мерки.

Со Монреалскиот протокол од 1987 дадени се конкретните мерки и бара CFC до крајот на 1994 да се намали за 20 % , а до 1998 за 50 %. И покрај ваквите мерки тешко е да се предвиди кога озонската обвивка ќе се обнови и врати во првобитната состојба.



Paul Crutzen Mario Molina Sherwood Rowland

За придонесите во расветлувањето на хемиските реакции при уништувањето на озонот Нобеловата награда за хемија во 1995 ја поделија Paul Crutzen (1933-) од Макс Планк институтот, Mario J. Molina (1943 -) од Масачусет, Институт за технологија и F. Sherwood Rowland (1927-) од Калифорнија универзитетот.

Прашања и задачи

1. Како се објаснува создавањето на озонот и каде се случува тоа?
2. Какво влијание има озонската обвивка за животот на Земјата?
3. Како се уништува озонот и кои се последиците од сè поголемото уништување на озонската обвивка на Земјата?

Повеќе информации за озонската обвивка (Ozone layer) побарајте и на Интернет.

Напишете проект за заштита на озонската обвивка.

19.5. ВЛИЈАНИЕТО НА БУЧАВАТА ВРЗ ЖИВИТЕ ОРГАНИЗМИ

Под бучава се подразбира звук со голем интензитет и долготрајно дејство. Звучните бранови кои дејствуваат како бучава може да ги имаат сите можни фреквенции во областа на чујниот звук.

Бучавата е еден од факторите на околната средина кои имаат негативно влијание врз работата и животот на човекот. Бучавата е сериозен проблем во урбаните средини. Истражувањата покажуваат дека транспортните средства имаат најголемо влијание во создавањето на бучавата, околу 90 %.

Бучавата може да биде: **урбана**, што ја предизвикуваат, пред сè, моторните возила низ сообраќајниците, и **индустриска**, што се создава од разните машини и мотори при нивната работа.

Интензивната, а особено долготрајната бучава штетно дејствува врз човечкиот организам: *предизвикува нервни растројства и заболувања, го покачува крвниот притисок и го ослабува слухот. Големата бучава може да предизвика аритмија на срцето и напнатост на мускулите.*

Во согласност со резонантната теорија, одделни влакненца од базиларната мембрана (таа е одговорна за тоа што човечкото уво ги разликува одделните тонови), присилени да осцилираат долготрајно, атрофираат, а со тоа ги губат еластичните особини и способноста за осцилирање. На пример, луѓето кои изработуваат казани обично страдаат од делумна глувост за опсегот на фреквенции на звукот кој одговара на бучавата создадена од ударите на чеканот во сидовите на казанот.

Да се потсетиме само на некои физички карактеристики на звучните бранови.

Јачината или интензитетот I на звучниот бран како енергетска карактеристика е пропорционален со квадратот на амплитудата на акустичкиот притисок p_{\max} и обратно пропорционален со акустичкиот отпор на средината $R_a = \rho v$. За рамен лонгитудинален бран

важи:

$$I = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 v = \frac{p_{\max}^2}{2\rho v} = \frac{p_{\max}^2}{2R_a}, \quad (1)$$

каде што A е амплитудата на звучниот бран, ω е кружната фреквенција, v е брзината на простирање на бранот. Значи, мерејќи ја амплитудата на акустичкиот притисок лесно се определува интензитетот на звукот.

Ниво на гласност. Човечкото уво е осетливо на широк интервал на фреквенции ($20 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$) кои имаат и определен интензитет. Звукот чиј интензитет е земено дека е единица $I_{\max} = 1 \text{ W/m}^2$ предизвикува болка. Овој максимален интензитет на звукот што увото го регистрира со осет на болка се вика **граница на болка** или **горна граница на чујност**.

Минималната вредност на интензитетот на звучниот бран кој предизвикува осет за звук е **праг на чујност**. Тој при фреквенција од $f=1000 \text{ Hz}$ изнесува $I_{\min} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Поради големиот опсег на интензитети на звук во чујната област, се користи **ниво на гласност на звукот**. Нивото на гласност L со произволен интензитет I се определува со:

$$L = k \log \frac{I}{I_{\min}} \quad (2)$$

каде што k е константа; I интензитет на звукот; I_{\min} интензитет на референтниот звук - праг на чујност за $f=1000 \text{ Hz}$. Кога во равенката (2) ќе се земе $k=1$ нивото на гласност се изразува со единицата бел (B), а кога $k=10$, ова ниво се изразува со децибели (dB).

Меѓутоа, овие нивоа најчесто се изразуваат со десет пати помалата единица, т.н. децибел (dB), па изразени во децибели минималниот и максималниот интензитет на звукот соодветно се 0 и 120 dB.

Намалувањето на бучавата се базира на два основни закони кои во широки граници се валидни и за другите потоци на енергија – механичките бранови, електромагнетните бранови (светлински, ренгенски и γ -зраци).

Првиот закон е намалување на интензитетот на звукот I со **квадратот од растојанието**

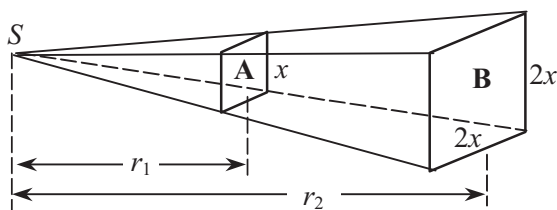
r :

$$I \sim \frac{1}{r^2} \quad (3)$$

Како може да го провериме тој закон?

Нека на растојание $r_1 = 1\text{ m}$ од изворот S нормално на простирање на звукот се постави површината A (сл.1). Површината A е квадрат со страни x и плоштина x^2 . Ако за време од 1 s звучниот бран низ површината A пренесува енергија 1J, согласно дефиницијата интензитетот на звукот низ A ќе биде $I_1 = \frac{1}{x^2} \text{ W m}^2$.

На истиот начин, да разгледаме на двојно поголемо растојание ($r_2 = 2\text{ m}$) квадрат B со страна $2x$. Низ него за 1 s се пренесува истата енергија на звучниот бран. По дефиниција интензитетот на звукот низ површината $4x^2$ ќе биде $I_2 = \frac{1}{4x^2} \text{ W m}^2$.



Сл. 1. Намалување на интензитетот на звукот I со квадратот на растојанието r од изворот

При споредување на интензитетите I_1 и I_2 се гледа дека ако растојанието од изворот се зголеми два пати, интензитетот на звукот ќе се намали четири пати:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (4)$$

Законот кој го дава влијанието на интензитетот од геометрискиот фактор (растојанието) е валиден ако звукот не се намалува од други фактори.

Кога звучен бран поминува низ еластична средина поради звучниот отпор на средината еден дел од неговата енергија се претвора во топлинска, а другиот дел е за совладување

на внатрешното триење. Бидејќи интензитетот на звучниот бран е пропорционален со квадратот на амплитудата, при поминувањето низ средина со дебелина x , поради апсорпцијата на енергијата опаѓањето на интензитетот на звучниот бран е зададен со:

$$I_x = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (5)$$

каде што I_0 е интензитет на упадниот бран, I_x е интензитет на бранот по поминување низ материјалната средина со дебелина x , α е **коефициент на апсорпција**. Коефициентот на апсорпција за различни материјални средини има различни вредности, а зависи од фреквенцијата.

Најдобри звучни изолациони својства имаат порозните материјали, како стиропорот, памукот, сунѓерот и др. Притоа треба да се има предвид дека звучните прегради или екрани кои се користат како заштита од звук треба да имаат димензии поголеми од брановата должина на звучниот бран. Во спротивен случај би дошло до дифракција, па звукот би се распространувал и зад екранот. За звукот во областа на слушањето, големината на брановата должина во воздух е од 1,7 cm до 17 m.

Заштита од штетното дејство на бучавата се реализира и така што во близина на аеродромите се прават високи ѕидови, на кои најчесто се садат растенија кои со повеќекратна рефлекција (реверберација) на звучните бранови го намалуваат нивниот интензитет. Таква заштита се прави и покрај сообраќајниците, во чија близина има големи тревници.

Човекот најдобро ќе се заштити од бучавата ако живеалиштето го избере далеку од големите сообраќајници и аеродроми. Наедно при градење на домовите треба да се користат материјали кои имаат добра звучна изолација.

Со законот за заштита допуштено ниво на гласност за **повисоките фреквенции** е од 70 до 80 dB, а за **ниски фреквенции** 90-100 dB. За определени простории каде што е нужна поголема тишина пропишани се и построги нивоа на гласност. Така, на пример, во болниците е до 15 dB, во библиотеките до 20 dB, а во спалните соби од 20 dB до 30 dB.

Нивото на гласност на звукот од разните предизвикувачи на бучавата е прикажано во

табелата 1.
Табела 1.

Извори на звук	L (dB)
праг на чујност	0
шепетење на растојание од 1 m	20
обичен разговор	40
просечно прометна улица	60
гласно зборување, сообраќај	70
прометна улица, поминување на воз	90
мотор на млазен авион (20 m)	120

За да се заштитат луѓето од бучавата во урбаните средини се вршат мерења на бучавата. Мерењето на бучавата се прави со уред кој се вика **сонометар** односно фонометар (сл.2). Со него се определува нивото на гласност и неговата висина.



Сл. 2. Сонометар.

ПРИМЕР 1. Колкаво е нивото на гласност на звукот на растојание 500 m од моторот на реактивен авион ако на 50 m гласноста е $L_1=140$ dB, а интензитетот на звукот $I_1=100$ W/m²?

Решение: Интензитетот на растојание 500 m според равенката (4) изнесува:

$$I_2 = I_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 = 100 \text{ W/m}^2 \left(\frac{50 \text{ m}}{500 \text{ m}} \right)^2 = 1 \text{ W/m}^2$$

Нивото на гласност на звукот соодветно:

$$L_2 = 10 \log \left(\frac{I_2}{I_{\min}} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{10^{-12}} \right) = 120 \text{ dB}$$

Добиената вредност одговара на прагот на болка. Оттука се заклучува дека 500 m е најмалото растојание на кое работниците може да се приближат до реактивниот авион без ризик дека ќе го оштетат слухот.

ПРОШИРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

Механичките осцилации чија фреквенција ги опфаќа инфразвуците ($f < 16$ Hz) и дел од звучната област припаѓаат на потресите или **вибрации**.

Човечкото тело како целина може да се смета како сложен осцилаторен систем со своја маса, еластичност и придушување. Секој елемент од телото има своја сопствена фреквенција. Побудувањето на тие фреквенции обично настанува во превозните средства, преку осцилаторните машини со кои работи, или преку подлогата на која се стои.

Сепак, резонантните појави при умерени надворешни влијанија, бидејќи коефициентот на придушување за организмот е многу голем, многу тешко се остваруваат. Овие вибрации, дејствувајќи на резонантен начин, можат да предизвикаат оштетување на организмот. На пример, при резонанција на очното јаболко се намалува острината на видот. Наедно, долготрајните и интензивните вибрации може да доведат до деструкција на ткивата и одделни органи или други заболувања.

Заштитата од инфразвуците и вибрациите многу тешко се остварува.

Прашања и задачи

1. Точките А и В лежат на иста права со точкест извор на звук. Во точката А нивото на гласноста на звукот е 60 dB, а во В – 50dB . Растојанието меѓу точките е АВ=5 m. Колкаво е растојанието од изворот до точката А? (Одговор: 2,3 m)

2. За колку се разликува гласноста на звукот во две точки кои соодветно се на растојание 1 m и 10 m од точкест извор на звук? (Одговор: 20 dB)

3. На растојание 5 m од извор на звук нивото на гласноста на звукот е 100 dB. Колкава е гласноста на звукот на растојание 10 m од изворот на звукот? (Одговор: ≈94 dB)

19.6. ВЛИЈАНИЕТО НА ЈОНИЗИРАЧКИТЕ ЗРАЧЕЊА ВРЗ ЖИВИТЕ ОРГАНИЗМИ

Јонизирачките зрачења имаат силно дејство на сите живи организми почнувајќи од бактериите и вирусите сè до цицачите. Карактерот и последиците од тоа дејство зависат од дозата и од видот на зрачењето. Едно исто зрачење различно делува врз различни органи.

Врз живата материја делуваат јонизирачки зрачења коишто се добиваат од најразлични извори:

- **Космички зраци.** Космичкото зрачење е присутно насекаде и се смета дека е еден од најважните фактори кои предизвикуваат *спонтани мутации* кои се важни за еволуцијата на животот. Бидејќи интензитетот на космичкото зрачење расте со порастот на висината, се зголемува ризикот од радијациони оштетувања кај патниците во воздушниот сообраќај. Така, на пример, за време на летот Њујорк-Париз просечната доза што ја прима еден патник е околу 30 μSv .

Доза од космичко зрачење при суперсоничен лет на висина од 19 km

Патека	Време (часови)	Доза (μGy)
Сиднеј-Акапулко	6.2	21
Њујорк-Парис	2.6	24
Лос Анџелес-Парис	3.8	37
Чикаго-Парис	2.8	26
Њујорк-Лондон	2.4	22
Лос Анџелес- Њујорк	1.9	13

- **Природни радиоактивни извори.** Овие се широко распространети во земјината кора. Најчесто се среќаваат ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra и продуктите на нивните распади, од коишто најчест е радонот Rn. Тој во вид на гас излегува од земјата и се концентрира во затворени простории. Освен споменатите радионуклиди, во природата го има радиоактивниот ^{40}K и радиоактивните изотопи на ^{14}C и ^3H коишто настануваат при бомбардирање со космичко зрачење.

- **Радиоактивност во храна и вода.** Од храната и водата во организмот се внесуваат многу радионуклиди и добар дел од нив се депонираат во ткивата на организмот. Тоа се најчесто радионуклиди од фамилијата на ураниум и ториум, калиум и јаглород. По II светска војна заради нуклеарните проби во атмосферата, големата количина радиоактивен цезиум ^{137}Cs беше ја контаминирала земјата и речиси целиот биолошки свет. Радиоактивниот ^{90}Sr во организмот се депонира во скелетот слично како и калциумот каде што останува повеќе години озрачувајќи го не само ткивото на коските, туку и клетките од кои настанува крвта. ^{137}Cs во организмот се задржува многу пократко и се депонира рамномерно. ^{131}I е краткоживечки изотоп кој селективно се акумулира во тироидната жлезда.

Секој прехранбен продукт има повеќе или помалку радионуклиди. Најмногу се среќава ^{40}K , ^{226}Ra и ^{238}U и соодветните продукти на нивните распаѓања. Во табелата 2 е дадено количеството на ^{40}K и ^{226}Ra во некои прехранбени продукти.

Храна	^{40}K (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)
банана	134	0.038
бразилско кафе	213	38-268
морков	130	0.022 - 0.08
бел кромпир	130	0.038 - 0.1
пиво	15,0	0.02
црвено месо	115	0.038
грав	178	0.076 - 0.2
вода за пиење	/	0 - 0.006

- **Професионално изложување на зрачење.** При користењето на радиоактивни препарати во различни дејности, добар дел од луѓето кои професионално работат се изложени на зрачење. Тоа е најчесто случај при работа со уредите за радиографија, X-зраци, неутронски извори, акцелератори итн. Тоа се однесува и за луѓето вработени во нуклеарните центри.

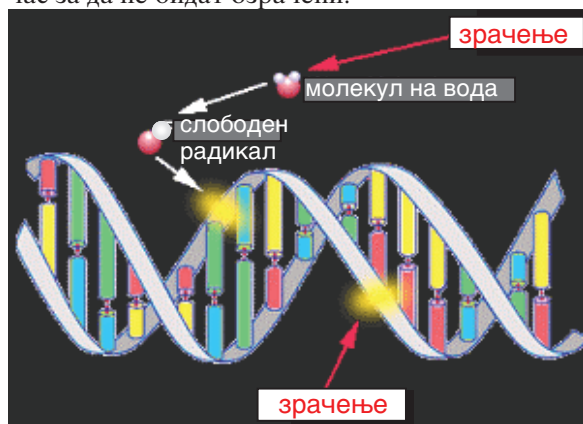
- **Озрачување при медицинска дијагностика и терапија.** Радијацијата се користи за дијагностицирање и за терапија на некои болести. Медицинското зрачење во целина е

корисно: дијагностичките рендгенски прегледи се најраспространет облик на медицинско зрачење. Податоците зборуваат дека во развиените земји годишните стапки се движат од 300 до 900 прегледи на секои 1000 жители, во кои не се вклучени податоците за снимањето на забите и масовната радиографија на белите дробови. Тераписките дози се многу поголеми но, во тој случај се проценува колку тоа изложување на зрачење е корисно за пациентот, без оглед на споредните ефекти што притоа ќе се појават.

Како резултат на нуклеарните експлозии, покрај другите, животната средина ја контаминираат и ^{137}Cs , кој е сличен со ^{90}Sr , потоа изотопите на плутониумот ^{239}Pu и ^{240}Pu .

Како извори на јонизирачко зрачење се вбројуваат и експерименталните нуклеарни проби и експлозии, евентуални хаварии од нуклеарни постројки (нуклеарни центри).

Нуклеарните проби се изведуваат за да се тестира разорувачка способност на нуклеарното оружје. Тие се изведуваат во атмосферата, подземно и подводно. Во секој случај, во средината во која тие се прават, предизвикуваат уништување на животната средина за наредните илјадници години. Така, на пример, во пустината близу Лас Вегас во Невада (САД), биле изведувани подземни нуклеарни проби кои направиле радиоактивно загадување што тој регион сè уште ноќе свети, а посетителите не смеат да престојуваат повеќе од половина час за да не бидат озрачени.



Сл. 1. Можни начини на оштетување на молекулот ДНК со зрачење.

Биолошките промени што се резултат

на зрачењето во прв ред се должат на јонизирачкото дејство. Формирањето на јонските парови и настанувањето на реактивните слободни радикали е причина за претворбите и настанување на конечни хемиски продукти.

Под дејство на зрачењето молекулата на водата се разложува, т.е. настанува *радиолиза* при што се формираат реактивни слободни радикали H^\cdot , OH^\cdot и HO_2 како и H_2O_2 . Овие радикали реагираат со другите молекули на биолошкиот систем, при што се добиваат нови видови на молекули. Радикалите во воден раствор реагираат со органските молекули така што од нив ги одземаат атомите на H дури и цели делови од молекулата (преостанатиот дел од молекулата се вика органски радикал) кинетички ги молекуларните врски. За биолошкиот ефект значајно е токму однесувањето на таквите органски радикали коишто обично стапуваат во реакција со други радикали или со молекуларен кислород при што се добиваат нови видови на молекули.

Последици од зрачењето

По својата природа, зрачењето е штетно за човечкиот организам. Дури и при мали дози, зрачењето може да индуцира промени коишто со тек на времето можат да доведат до генетски промени или, пак, до развивање на рак. При високи дози, зрачењето ги уништува клетките, ги оштетува органите и може да предизвика смрт. Се разбира, оштетувањата при високи дози стануваат видливи само по неколку часови, но за да се развие рак, треба да помине подолго време. Наследните деформации и болести предизвикани од генетски оштетувања поради зрачењето настануваат кај генерациите што следат.

Генетските последици на радијацијата се делат на: *хромозомски аберации* и *мутации на генот*.

Хромозомски аберации. Зрачењето создава хромозомски аберации со кинетичко настанување на едно или повеќе места при што настануваат фрагменти коишто можат да се рекомбинираат на повеќе начини.

Мутации. Зрачењето може да индуцира мутации на два начина: *непосредно* со предизвикување на хемиски промени на базните парови на ДНК и *посредно* со предизвикување

19. Физика на животната средина

на поголеми оштетувања како, на пример, прекини на ДНК веригата.

Акутните ефекти најдобро се проучени кај цицачите озрачени со X- или γ -зрачење. Кога целото тело на возрасно животно се изложи на радијација, се појавуваат низа специфични промени (*синдроми*) во ткивата и органите.

Дози поголеми од 100 Gy го оштетуваат централниот нервен систем и смртта настапува ден-два по озрачувањето. Болеста се манифестира преку респираторни тегоби, губење на координација, губење на свест итн. Дозите од 9-100 Gy исто така се *летални*. Смртта настапува 3-5 дена по озрачувањето поради повреда во гастроинтестиналниот систем, губење на апетит, мачнина, повраќање, дијареја, депресија. Дозите од 3-9 Gy се *сублетални* и предизвикуваат карактеристични промени во крвните клетки и во хематопоетските органи што се појавуваат 10-15 дена по озрачувањето проследени со малаксаност, крварење, тресење, пад на бројот на леукоцитите итн.

Вкупната акутна радијациона повреда е резултат на ефектот на озрачување на повеќе ткива и органи. Овој здружен ефект се вика *акутен радијационен синдром*. Дали тој синдром ќе биде летален, зависи и од индивидуалната радиосензитивност на организмот.

Одложени (подоцнежни) ефекти. Кај организмите кои се опоравиле од акутните повреди од зрачењето, како и по подолготрајно изложување на зрачење, со тек на времето можат да се појават патолошки промени на ткивата и органите.

Канцерогениот ефект предизвикан од јонизационите зрачења е познат уште од првите денови на радиобиологијата, а подоцна е потврден со многу примери кај луѓе и кај експериментални животни. Заклучок е дека зрачењето може да индуцира разни видови рак.

Тератогени ефекти. Ембрионот и фетусот се многу поосетливи на зрачење во однос на возрасен организам. Зрачењето *in utero* предизвикува ембриогенеза. Овие промени можат да бидат летални како за ембрионот или фетусот, така и за новороденчето. По раѓањето можат да се појават: абнормалност на скелетот, деформација на екстремитетите, деформација кај очите и лицето итн.

Поради зависноста на штетното дејство од примената доза на јонизирачки зрачења постојат мошне строги прописи со кои се утврдени т.н. *максимални дозволени дози* кои можат да се примаат во одредено време: година, месец, недела, час. Всушност, тие се гранични дози под кои штетните биолошки влијанија од зрачењето не се достапни за мерење. За луѓе кои професионално се изложени на јонизирачко зрачење (за 40-часовна работна седмица) годишната дозволена доза е 50 mSv, за непрофесионално изложување на зрачење (населението, пациентите) годишната доза е 1mSv. Со така ниски вредности на дозволените дози се обезбедува мал "радијационен ризик", мала веројатност човекот да настрада од јонизирачко зрачење. Денес во заштитата од јонизирачко зрачење постојат доста строги прописи кои ако се почитуваат, гарантираат максимална сигурност.

Осетливоста на зрачење на некоја врста обично се изразува со *средната летална доза* (смртна) $LD_{50/30}$. Тоа е еднократна летална доза при зрачење на целото тело, предизвикува смрт кај 50% од озрачените експериментални животни во рок од 30 дена. Таа за некој видови е прикажана на следната табела

Вид	ЛЕТАЛНА ДОЗА $LD_{50/30}$ (Sv)
куче	3,5
глушец	4-6
мајмун	6
човек	6-7
стаорец	6-10
жаба	7
дождовник	30
полжав	80-200



Сл. 2. Знакот предупредува на опасност од јонизирачко зрачење и треба да стои во сите простории до уредите каде што е присутно зрачење.

19.7. РАДИОАКТИВЕН ОТПАД

Проблемот со радиоактивниот отпад (РАО) е само еден сегмент од поширокиот проблем на загадувањето на животната средина. Видовме дека изворите на јонизирачки зрачења наоѓаат широка примена во науката, техниката, медицината, индустријата, земјоделството, истражувањата итн. Како при нивното добивање, така и при нивното користење се добива материјал кој може да се карактеризира како радиоактивен отпад - по дефиниција тоа е *непотребен нуспроизвод кој што и натаму е помалку или повеќе радиоактивен (над дозволеното ниво) и треба на соодветен начин да се отстрани, транспортира, депонира и складира.*

Радиоактивниот отпад е материјал чија специфична активност (Bq/m^3) е поголема од со закон пропишана граница. Поради неговото штетно влијание не смее ни најмал дел да дојде во биосферата. Со него треба внимателно да се ракува. Згрижувањето на радиоактивниот отпад веќе не е работа со која се занимаваат физичарите и нуклеарните технолози. Денес за нуклеарните центри и радиоактивниот отпад се заинтересирани законодавната власт, невладини организации, индустријата, и секако јавноста. Целта на сите е единствена: глобална заштита на околината од сите можни влијанија на радиоактивниот отпад кој го произведува нуклеарната индустрија.

Радиоактивниот отпад се класифицира во зависност од преостанатата активност, видот на зрачењето што се емитува, агрегатната состојба, како и од времето за кое ќе продолжи да се емитува зрачењето (периодот на полураспаѓање на присутните изотопи) итн. Ваквата поделба на радиоактивниот отпад се прави за да се превземат мерки за правилно ракување, транспортирање и безбедно складирање.

Во зависност од активноста на радиоактивниот отпад, тој се дели на: 1. ниско; 2. средно; 3. високорадиоактивен.

Според времето за кое продолжува да се емитува зрачењето, тој се дели на отпад со мал период на полураспаѓање (под 30 години) и отпад со долг период на полураспаѓање (над 30 години);

Врз основа на времето на полураспаѓа-

ње, нивото на преостаната активност како и енергијата што се ослободува РАО согласно препораките од Меѓународната Агенција за атомска енергија (ИАЕА) се класифицира во следниве категории:

I. Радиоактивен отпад со високо ниво на радиоактивност и голем период на полураспаѓање;

II. Радиоактивен отпад со средно ниво на радиоактивност и голем период на полураспаѓање;

III. Радиоактивен отпад со ниско ниво на радиоактивност и голем период на полураспаѓање;

IV. Радиоактивен отпад со средно ниво на радиоактивност и мал период на полураспаѓање;

V. РАО со ниско ниво на радиоактивност и мал период на полураспаѓање.

Радиоактивен отпад со високо ниво на радиоактивност содржи голема концентрација на радиоактивен материјал како со голем така и со мал период на полураспаѓање кои имаат голема активност. Овој вид отпад генерира повеќе од 2 kW топлина на m^3 поради што бара превземање на посебни мерки при негово транспортирање и складирање, како и ладење поради големата топлинска дисипација. Овој отпад најчесто доаѓа од постројките за репроцесирање, има потреба за ладење, голема заштитна површина и далечинско управување. Тука спаѓаат високо радиоактивните искористени извори на зрачење како и искористено нуклеарно гориво кое не е репроцесирано.

Високо радиоактивниот отпад се создава при работата на нуклеарните реактори на централите. Еден 100 MW реактор за една година работа "произведува" стотина тони високорадиоактивен отпад, истрошено гориво (spent fuel) кое што треба да се извади од реакторот и да се замени. Но, тоа гориво се уште содржи збогатен ураниум, неколку десетини килограми плутониум, 20-30 kg елементите од актидната група, до 1000 kg други фисиони продукти. Некои од овие радиоизотопи имаат долг период на полураспаѓање.

Радиоактивен отпад со средно ниво на радиоактивност. Овој отпад може да има како мал така и голем период на полураспаѓање. Дел од овој отпад се создава во нуклеарните

централи, потоа од разни средства во технолошкиот процес кои се контаминираат, во индустријата, во медицината итн. Овој орпад се создава и при годишен ремонт на нуклеарната централа. Тука се употребени алати, крпи, филтри за прочистување, талози на дното од резервоарот итн. Овој орпад се складира во лимени буриња кои се редат во бункер на бетонска подлога (или подземни бетонски контејнери). Кога ќе се исполни резервоарот се прелива со бетон.

Радиоактивен отпад со ниско ниво на радиоактивност содржи доволно радиоактивен материјал за да биде потребна мерка за заштита. За негово транспортирање и складирање не се потребни посебни мерки за заштита. Овој отпад најчесто се создава од радиоаконтраминирани заштитни средства (ракавици, штитници, хартија, лабораториска опрема) што се користат во технолошките процеси поврзани со добивање на радиоизотопи, потоа при користењето на радиоизотопите во медицински цели, истражувачките центри.

При ракувањето со овој отпад не е потребна специјална заштита. Порано за овој отпад не се водело посебна грижа и се одлагал заедно со обичниот отпадно денес за овој отпад се пропишани специјални процедури за негово складирање.

Радиоактивниот отпад со средна и ниска активност пред да се складира во пропишани складишта подлежи на разни постапки со кои се компактира (се смалува по волумен), витрифицира, упарува итн.

Радиоактивниот отпад се селектира и според периодот на полураспаѓање на кратковечен и долговечен отпад. Кратковечен е оној отпад кој нема да биде радиоактивен подолго од 100 до 3000 години. Дали некој отпад ќе го задоволи овој критериум, можеда се процени по радионуклидите кои ги содржи. Во кратковечен отпад се вбројуваат радионуклиди чиј период на полураспаѓање не преминува 30 години (колку што е период на полураспаѓање на Cs-137).

Што е целта на згрижување на РАО и дали може да се оствари?

Ако ризикот што радиоактивниот отпад го предизвикува се настојува да се намали до прифатлива големина, тој мора да се изолира

од околината и надворешни влијанија за доволно долг период.

Целосно решавање на проблемот со радиоактивниот отпад досега не е изнајдено (комплетно отстранување од биосферата или трансформирање во нерадиоактивни елементи).

Организациите што создаваат радиоактивен отпад од било кој вид се должни да имаат безбедни временски или трајни складишта, како на пример, армирани бетонски контејнери што се вкопуваат во геолошки формации со погоден состав имкаде да нема протоци на подземни води.

Засега постојат неколку алтернативни постапки за релативно отстранување од кои најважни се:

- складирање во непропусни садови и оставање на дното на океаните;
- длабоко закопување во некои геолошки стабилни формации.

Ова е особено важно за складирањето на високорадиоактивниот отпад кој долго време ќе биде активен. Искористеното гориво од реакторите може да се подложи на постапка за издвојување на отпадните радиоактивни материјали од ураниумот и создадениот плутониум (процес наречен *репроцесирање*). Овој процес е доста сложен и скап. Без оглед каква постапка се користи за одвојување на ураниумот од плутониумот Овој отпад најпрво ќе одлежи во кругот на нуклеарната централа за да изгуби добар дел од топлината и радиоактивноста.

Скоро сите земји што имаат нуклеарни централи имаат изградено подземни или подводни складишта за радиоактивен отпад. Така, САД кои имаат најголем број нуклеарни централи кои создаваат радиоактивен отпад (но и отпадот од воени нуклеарни постројки) имаат складиште со капацитет од 70.000 тони потрошено гориво и 8.000 тони радиоактивен воен отпад).

Прашања и задачи

1. Каква е поделбата на радиоактивниот отпад?
2. Како се решава проблемот со него во емјите што имаат нуклеарни централи?

19. 8. АЛТЕРНАТИВНИ ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈАТА

Се проценува дека фосилните горива (јаглен и нафта) што денес во најголема мерка се користат како извори на енергија ќе бидат исцрпени за 20-30 години. Светската популација има огромен прираст, а со тоа и потребите за енергија, така што цената на енергијата добиена од тие извори е во постојан пораст. Но, и цената на енергијата добиена од нуклеарното гориво, исто така, е во пораст поради сè поголемите барања за сигурност и безбедност на нуклеарните постројки.

Но, како што беше кажано порано, користењето на овие видови горива создава отпад којшто ја загадува животната и работната околина и создава еколошки проблеми. Еден од најсериозните проблеми е т.н. ефект на "стаклена бавча" што го изучивме во овој курс. Сите тие проблеми наведуваат на потреба од барање на нови, алтернативни видови енергија коишто треба да исполнуваат неколку битни критериуми:

- да не се трошат неконтролирано достапните ресурси;

- да не ја загадуваат животната средина;

- цената на добивање на енергијата да биде прифатлива.

Во алтернативните извори на енергија во прв ред спаѓаат:

- геотермалната енергија;

- сончевата енергија;

- енергијата на нуклеарна фузија.

Во овие извори може да се вклучи и *еолската енергија* (ветерот).

Геотермалната енергија се добива од топлината на земјината кора и се користи во оние земји каде што има природни извори на топла вода и пара. Така, во Исланд каде што има голем број вакви извори, топлата вода служи за загревање на домовите и други потреби. Има земји каде геотермалната енергија се користи за добивање на електрична струја.

Сончевата енергија е основен извор на енергија што стигнува до Земјата и ја загрева, обезбедува одвивање на сите процеси, ја овозможила појавата на живот на планетата. Ако не е Сонцето, Земјата би била обична безживотна вселенска материја. Од широкиот

спектар на сончевото електромагнетско зрачење до Земјата стигнува зрачењето во видливиот и блискиот инфрацрвен дел на спектарот.

Енергијата што ја добива Земјата од Сонцето се конвертира во енергија на водите (механичка, а потоа се добива електрична енергија), енергија на ветерот, енергија за одвивање на фотосинтезата итн. Така, во основата на сите енергетски извори лежи сончевата енергија (цврстите, течните и гасните горива се создале поради сончевата енергија).

Кога се зборува за сончевата енергија како алтернативна енергија се мисли на нејзиното директно непосредно користење:

1. *Топлотна енергија* за загревање на просторот. Системите за оваа намена се составени од повеќе делови од кои најважни се:

- колектор* каде што настанува зафаќање (апсорпција) на сончевата енергија и се добива топлотна енергија (сл.1);

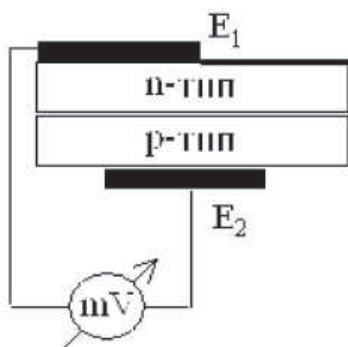
- резервоар* за зачувување (стокирање) на непотрошената енергија за користење преку ноќта или во облачни денови;

- преносен систем* од местото на добивање до местото на користење на енергијата. Како средство-флуид за пренос на топлината најчесто се користи вода.



Сл. 1.

2. *Електрична енергија* добиена во соларните системи за директна конверзија на сончевата енергија во електрична. Тоа се постигнува со *фотонапонски ќелии* коишто се направени од полупроводнички материјали, Si, Ge, Se, односно соединенијата CdS, GaAs и други. Шематскиот приказ на фотонапонска ќелија врз база на p-тип и r-тип на полупроводник е даден на сл. 2.



Сл. 2.

Кога врз системот паѓа светлина, се појавува напон кој се доведува на милivolтметар со електродите E_1 и E_2 . Ваквите ќелии имаат широка употреба како извори на електрична енергија за станбени објекти. Но, мора да се признае дека досега конструираните системи имаат мала ефикасност на конверзија на соларната енергија во електрична $\approx 20\%$ што се смета за недоволно, а згора на тоа се големи и трошоците за сторирање на енергијата (батерији и слично) за преку ноќ.

Ако имате калкулатор или рачен часовник за кого не треба да купувате батерија, тогаш вашиот уред има соларна ќелија. Погледајте внимателно, тоа е онаа врамена темна површина на предната страна.



Сл. 3.

И **енергијата на ветерот** може да се користи. Уредите - **ветерници** (сл. 3) за ваков вид енергија ги има ги во многу земји, но нив-

ната енергија е само за задоволување на потребите за енергија на мали објекти. Засега, учеството на оваа енергија во вкупните потреби е занемарливо мало.

Нуклеарна фузија. Нуклеарната фузија (синтеза на јадрата) е процес обратен на фисијата. При нуклеарната фузија две многу *лесни јадра* се комбинираат за да формираат *потешко јадро*. Притоа се ослободува енергија. Енергијата што се зрачи од Сонцето и другите ѕвезди е резултат на реакции на фузија што се одвиваат во внатрешноста каде што владеат многу високи температури ($\approx 10^7$ K). Реакциите што се одвиваат со помош на многу високи температури се наречени *термонуклеарни реакции*. Тие се опишани во поглавјето 3.18.

Процес на фузија што може да се искористи е спојувањето на *деутеронот* и *тритонот* во јадро на хелиум при што се ослободува многу голема енергија. Во хидросферата на Земјата има доволно термонуклеарно гориво; се проценува дека има околу $4 \cdot 10^{13}$ тони деутериум. Но, проблемите што треба да се надминат за да може да се реализира *контролирана фузија* за добивање на енергија се мошне големи. Треба да се создадат високи температури од ред 10^8 K и да се одржува загреаната плазма (јадра на деутериум и трициум) одредено време τ во даден волумен. Најдено е дека интензитетот на фузионите реакции многу зависи од концентрацијата на јоните во плазмата n : колку поголема е концентрацијата, за покусо време ќе се изврши фузија на одредено количество јадра. Овој услов е т.н. *критериум на Лоусон*, кој дава врска меѓу концентрацијата и времето τ при дадена температура T

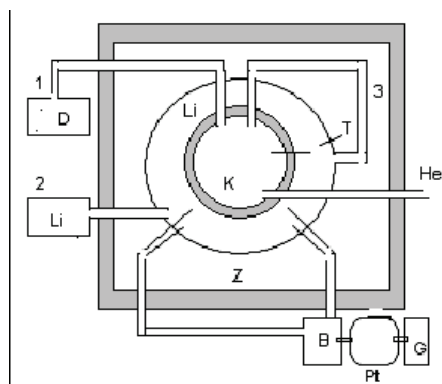
$$n\tau = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ s}; \quad T = 10^9 \text{ K}$$

Повнимателните веднаш ќе постават прашање зошто е потребно да се достигнува толку висока температура кога се знае дека фузионите процеси во внатрешноста на Сонцето се одвиваат на пониска температура ($\approx 10^7$ K). Одговорот е во фактот што поради огромните притисоци во внатрешноста на Сонцето концентрацијата на плазмата е скоро

10^{26} чест./ cm^3 што во Земјини услови е невозможно да се постигне.

Стабилни услови во плазмата многу тешко се одржуваат и тоа е главниот технички проблем за остварување на контролирана фузија. За да се запали "фузионото кибритче" потребно е високотемпературната плазма да се одржи во тек на време најмалку една секунда, што досега не е достигнато.

Задржувањето на високотемпературната плазма да не допира до ѕидовите на садот се врши со помош на магнети од суперспроводни материјали со кои се создаваат магнетски полиња со одреден профил (магнетна термоизолација).



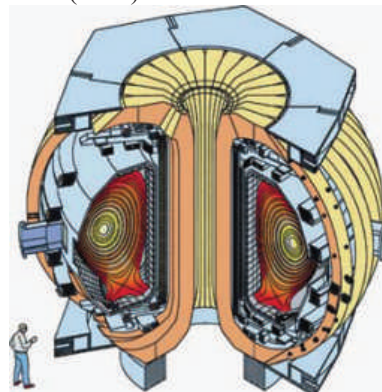
Сл. 4.

Типична шема на еден фузионен реактор е како на сл. 4. Во комората К се наоѓа плазма од деутерони D и тритони T, а околу се наоѓа литиумот Li. Од левата страна преку системите (1) и (2) се внесуваат деутериумот и литиумот. При реакцијата на деутерон и тритон се добива ^4He и високоенергетски неутрони.

Неутроните преку ѕидот на комората преминуваат во просторот каде што има литиум и со реакција се добива трициум кој се внесува во комората преку системот (3). Ослободената енергија во комората преку топлоизменувач Z и парогенератор B се носи во парна турбина Pt поврзана со генератор на струја G.

Во поново време интересот на научниците од оваа област особено е свртен кон еден тип на фузиони реактори наречени ТОКАМАК (тороидална комора со магнетно поле) за коишто се мисли дека имаат особена

перспектива (сл. 5).



Сл. 5

Прашања и задачи

1. Колкави се процените за резервите на фосилните горива ако се трошат со денешно темпо? Кои се алтернативни извори на енергија?

2. Како се изградени фотонапонските ќелии? За што се користат?

3. Која е предноста на добивање енергија со помош на фузија на лесни јадра во однос на фисијата?

4. Кое би било основното гориво за процесите на контролирана фузија?

5. Кои величини ги поврзува критериумот на Лоусон за одвивање на фузија?

6. Кој тип на фузиони реактори се смета дека имаат добри перспективи за употреба?

7. Колкава температура е потребна за термојадрена фузија на водородот?

Одговор: два протона и два неутрона да формираат He потребно е кинетичката енергија на

протоните ($E_k = \frac{3}{2}kT$) да го надмине нивното

кулоново одбивање ($E_p = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R}$) каде што

$R=10^{-15}\text{m}$, $k=1,38 \cdot 10^{-23}\text{J/K}$. Се добива:

$T \geq \frac{1}{6k\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{R}$, односно $T > 10^{10}\text{K}$. Оваа T е скоро

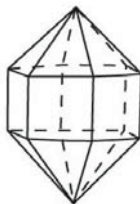
1000 пати поголема од T во внатрешноста на Сонцето, а сепак, таму се одвиваат термонуклеарни процеси. Зошто е можно тоа?

20. 1. КРИСТАЛНА СТРУКТУРА НА ТВРДОТО ТЕЛА

Физиката на тврдо тело се занимава со проучување на својствата на тврдите материјали и појавите, причинети од феномените што во нив се случуваат на атомско ниво. Основниот предмет на изучување на физиката на тврдото тело се физичките појави кај кристалите. **Кристалот** или, поточно тврдото тело во кристална фаза е цврст материјал чии што честици (атоми, молекули или јони) се правилно распоредени во просторот, а таквиот поредок се повторува во сите три димензии од просторот. Науката што се занимава со проучување на кристалите и нивното формирање се нарекува **кристалографија**.



Кристал на кварц

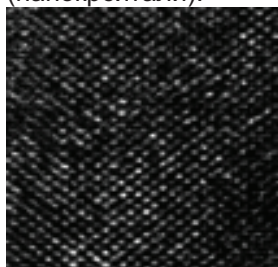


Хексагонална симетрија

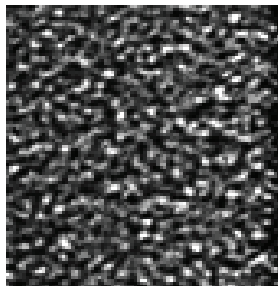
Идеалниот кристал е составен од еднакви, симетрично распоредени во просторот структурни елементи. Најмалиот можен елемент со чиешто многукратно повторување во просторот се образува кристалот се нарекува **елементарна ќелија**.

Познато е дека кристална структура може да се појави кај сите класи материјали, независно од хемиските врски. Така, речиси, сите материјали постојат во кристална фаза, поточно поликристална. Процесот на формирање на кристални тела се нарекува “растење на кристалите” солидификација или кристализација. Инаку, зборот кристал потекнува од старогрчкиот збор $\kappa\rho\upsilon\sigma\tau\alpha\lambda\lambda\omicron\varsigma$ (*кристалос*) што го има истото значење. Коренот на значењето се однесува на нешто

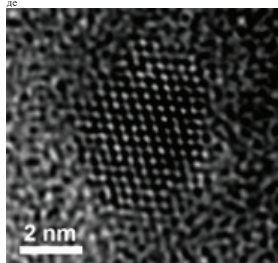
што се замрзвало како мраз. Цврстите тела постојат и во аморфна (безоблична, стаклеста) фаза. До неодамна се мислеше дека во оваа фаза постои целосно безредие на градбените честици во просторот. Денеска, со развојот на електронската микроскопија со висока резолуција е овозможено да се види дека дури и во аморфната фаза можат да се видат многу мали делови од просторот во кои постои ред. Нивните димензии можат да бидат микрометарски па дури и нанометарски, па во тој случај зборуваме за микро и нано кристали. На сликата 1 се дадени фотографиите на атомите на силициумот кога тој е добиен во: а) кристална фаза, б) аморфна фаза и (в) кога во аморфната фаза постојат мали просторни елементи со нанометарски димензии во кои атомите се подредени како мали кристалчиња (нанокристали).



Сл.1(а) Кристал на силициум (c-Si)

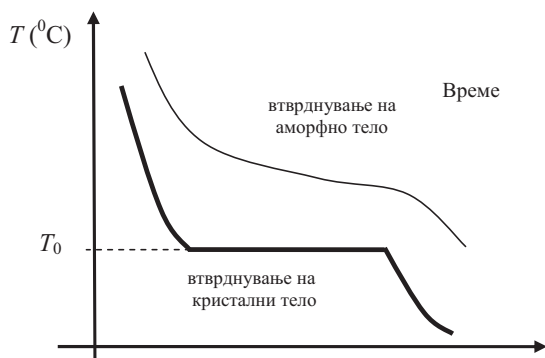


Сл.1(б). Аморфен силициум (a-Si)

Сл.1(в)
Нанокристал во аморфен силициум (n-Si)

Кристална и аморфна фаза

Во основа кристалната фаза се разликува од аморфната во многу нешта, но најкарактеристична разлика се јавува при формирањето на цврстото тело од течност при нејзино ладење. Имено, при рамномерно ладење на една течност (сл. 2), кај кристалните тела температурата постепено паѓа со времето на ладењето, сè додека не достигне карактеристична вредност која се нарекува **точка на топење (T_0)** или точка на втврднување.



Сл. 2. Фазен дијаграм на втврднување на течност во кристална и во аморфна фаза.

Штом ќе започне втврднувањето, а тоа е моментот на појавата на првите мали кристалчиња, тогаш паѓањето на температурата престанува. Се додека и последните составни честици од течноста не се подредат во кристалчиња, сè дотогаш температурата останува иста T_0 . Кога ќе заврши втврднувањето, тогаш повторно доаѓа до паѓање на температурата. Кај аморфните тела вакво нешто не се набљудува. Кривата на ладењето (сл.1) нема **плато**, како кај кристалите. Температурата при втврднувањето непрекинато опаѓа со времето. Дали при втврднувањето на една течност ќе се добие аморфна или кристална фаза зависи

од условите на втврднувањето (брзината, притисокот и други услови).

Друга битна разлика во однесувањето помеѓу кристалните и аморфните тела е тоа што аморфните тела се **изотропни**, т.е. нивните физички својства се исти во сите правци во просторот, слично како и течностите. Кај кристалните тела, пак, постои **анизотропија**, т.е. физичките својства зависат од правецот во кристалот долж кој се набљудуваат. Тие можат да трпат драстични промени во различните правци.

Монокристал

Доколку редот на составните честици на цврстото тело во сите три димензии е далечен, поточно редот постои во целиот негов волумен, тогаш таквиот кристал се нарекува монокристал. Така, од монокристален силициум се прават интегрираните кола (чиповите) во микроелектронската индустрија.

Покрај тоа што монокристалите можат да се најдат во природата, постои и начин за нивното вештачко производство. Така, најпознат е методот за вештачко добивање монокристали од метали што го изумил Чохралски за правење на монокристал се состои од стопен метал во кој со ротација (како винт) се извлекува прачка на чиј крај е закачен зародиш од истиот материјал од кој сакаме да израснеме кристал. На зародишот, кој е центар на кристализација, растат кристали со истиот ред и ориентација. На крајот се добива дебела цилиндрична шипка (сл.2а) која е монокристална. Шипката се сече на дискови (како на сликата 2б). Од нив се прават интегрираните кола (чипови). Со помош на електронската микроскопија со висока резолуција биле добиени слики на атомите и нивниот распоред во

дводимензионалниот простор. На сликата 3 е дадена таква фотографија добиена од монокристален силициум. Од силициумови монокристали (засечени од сите 4 страни па споени во матрица) се прават монокристалните фотоволтаичните ќелии (сл.4).

Поликристали

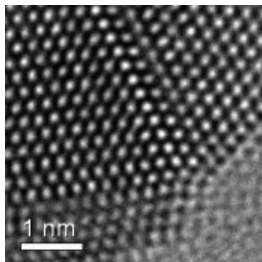
Поликристалните материјали се цврсти тела кои се составени од голем број кристални зрна или **кристалити** (региони во кои цврстото тело кои има карактеристики на монокристал) со различна големина и ориентација. Промената на правецот на ориентацијата на зрната може да биде сосем произволна (рандомна текстура) или ориентирана. Речиси сите обични метали и повеќето ќерамички материјали се поликристалични.



Сл. 2(а). Монокристален цилиндар од Si.



Сл. 2(б). Монокристален диск (пресек од монокристален цилиндар).



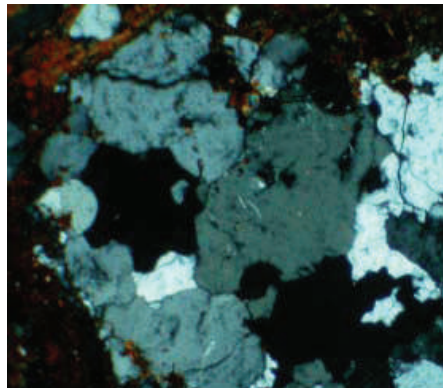
Сл. 3. Подреденост на атомите во сите 3 димензии.



Сл 4. Од ваквите дискови се прават фотоволтаичните ќелии.

Микрокристали и нанокристали

Микро и нанокристалите обично се однесуваат на аморфна матрица во која се всадени малите кристалчиња. Во зависност од димензиите на кристалитите, постојат микрокристални (кристалити со микрометарски димензии) и нанокристали (кристалити со нанометарски димензии). Некои својства на материјалите, како на пример, електричната и топлотната спроводливост, можат драстично да се менуваат во зависност од големината на кристалните зрна.

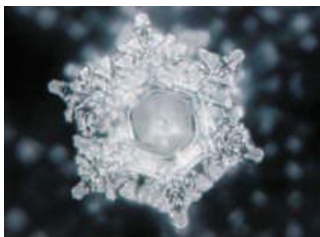


Поликристал на кварц (SiO_2) под микроскоп. Различните региони во поликристалот се монокристали со различна ориентација.

Дајте значење на следниве физички поими:

- кристал и кристалографија,
- елементарна ќелија,
- монокристали,
- аморфна фаза,
- поликристали,
- микро и нанокристали.

20. 2. ПРИРОДАТА НА ХЕМИСКИ ВРСКИ ВО КРИСТАЛИТЕ



Кристал на вода



Дијамант

Огромната разновидност на тврдите тела и нивните кристални структури се должи на сложениот карактер на силите што ги држат во заедница нивните основни составни делови (атоми или молекули) во кристалот. Независно од многу различното поведение, својствата на кристалите може да се доведат во директна врска со електричното заемнодејство меѓу електроните и јоните (соодветно наелектризираните атомски јадра). Улогата на магнетото заемнодејство е значително помала, а улогата на гравитацијата може сосем да се занемари. За повеќето теоретски задачи доволно е едноставно да се смета на заемнодејството помеѓу валентните електрони и остатокот од атомот (јадрот со преостанатите електронски обвивки).

Енергија на врска

Познато е дека силите помеѓу градбените честици на кристалот се конзервативни. Да се потсетиме, системот во којшто дејствуваат конзервативни сили се карактеризира со потенцијална енергија која зависи од положбата на честиците во системот. За да биде еднозначно дефинирана, се смета дека при некоја определена положба на честиците, потенцијалната енергија на системот е еднаква на нула. Ако се земе дека силата на замнодејството помеѓу две честици се намалува со зголемување на меѓусебното растојание (како кај тврдите тела), тогаш се зема дека на бескрајно големо растојание, потенцијалната енергија е еднаква на нула. Тогаш на конзервативните сили на

привлечност им соодветствува негативна потенцијална енергија, а на конзервативните сили на одбивност им соодветствува позитивна потенцијална енергија.

Од енергетска гледна точка можно е постоење на кристалот како стабилна севкупност од правилно распоредени атоми или молекули само доколку потенцијалната енергија при $T=0$ K на сите честици е помала од вкупната енергија на истиот број слободни атоми. Ако беше поголема, тогаш кристалот ќе се самораспаднеше.

Енергијата на врската (E_v) на даден кристал е еднаква на енергијата што треба да ја додадеме (или работата што треба да ја извршиме) за да го растуриме кристалот на атоми кои се наоѓаат на бесконечно растојание и мируваат. Вообичаено е таа да се дефинира за еден мол супстанца или за еден атом. Се мери соодветно со J/mol (џули на мол) или со eV/atom (електронволти по атом).

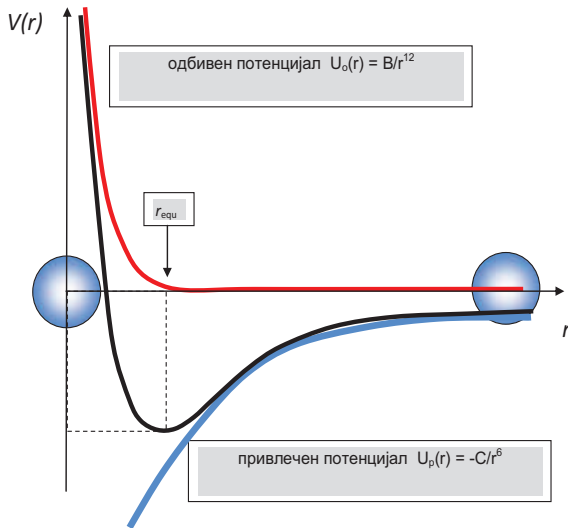
Кристали на инертните гасови

На ниски температури атомите на инертните гасови слабо си замнодејствуваат. Тие со ладењето образуваат просирни диелектрични кристали со многу мала енергија на врската (од десетинка од електронволт до неколку стотини електронволти по атом). Особено е слабо заемнодејството помеѓу атомите на хелиумот кои при нормален атмосферски притисок би останале во течна агрегатна состојба сè до температура од апсолутна нула (0 K). Да разгледаме молекул од хелиум кој се состои од 2 атома на меѓусебно растојание r . Системот од две спротивно наелектризирани честички $+q$ и $-q$ можеме да го сметаме за електричен дипол. Така, секој атом од хелиумот може да се смета како електричен дипол. Се докажало дека јачината на електричното поле кај електричниот дипол зависи од растојанието како $1/r^3$. Потенцијалната енергија што ја има еден дипол што би се нашол во електричното поле на друг дипол зависи од оддалеченоста на диполите (атомите) како

$$U_p(r) = -C/r^6,$$

20. Физика на тврдо тело

каде што C е позитивна константа што се определува експериментално. Електричните сили на заемнодејство помеѓу диполите се нарекуваат Вандервалсови сили во чест на Холандскиот физичар Ван дер Валс. На овој



Сл. 1. Ван дер Валсовиот потенцијал е сума од одбивниот и привлечниот електричен потенцијал.

вид привлечни сили се должи привлекувањето не само на кристалите од инертните гасови, туку и на многу молекуларни кристали од органските материи. Зависноста на енергијата од реципрочната вредност на радиусот на δ -ти степен кажува дека привлечните сили брзо растат со зближување на атомите. За да се ископензира нивното силно заемнодејство на мали растојанија почнуваат да дејствуваат одбивни сили. Нивната големина уште побрзо расте со намалување на растојанието. Иако тие имаат електрична природа, сепак, нивното постоење не може да се објасни со класичните закони, туку со квантните, т.е. со помош на принципот на Паули, според кој електроните од една орбитала мораат да имаат различен спин. Во тој случај, при приближувањето на двата атома од инертен гас (хелиум) се случува преклопување на нивните орбитали. Бидејќи хелиумот во последната орбитала има два спарени електрона, тогаш тие ќе се поклопат со други два електрона со исти квантни броеви (два по два ќе имаат ист спин). Последново се коси со

Паулиевiot принцип, па затоа двата електрона неминовно поминуваат во повисоко енергетско ниво. На тој начин, при преклопување на електронските обвивки енергијата расте, што значи дека се појавуваат одбивни сили. Било установено дека големината на таквиот одбивен потенцијал е даден со

$$U_o(r) = B/r^{12}.$$

каде што B е позитивна константа. Следува дека севкупното заемнодејство од привлечниот и одбивниот потенцијал помеѓу диполите може да се опише со релацијата

$$U(r) = U_o(r) + U_p(r) = B/r^{12} - C/r^6.$$

Оваа сложена математичка функција е дадена на сликата 1. Функцијата има минимум кој го определува рамнотежното растојание помеѓу двата атома во молекулот (r_{equ}).

Јонски кристали

Карактеристично кај јонските кристали е тоа што се составени од елементи од периодниот систем кои се со најекстремно спротивни својства (типични метали и неметали). Електростатичката врска се формира со тоа што еден од атомите го дава електронот а другиот го прифаќа и притоа постигнува стабилна конфигурација на благороден гас. Трансферот на електронот доведува до формирање на спротивно наелектризирани јони кои меѓусебе се привлекуваат со електростатски сили кои се носители на јонската хемиска врска која е многу силна. Типични претставници на јонските кристали се NaJ , NaF , NaCl , NaBr или која и да било друга комбинација од јоните на алкалните метали, Na , Li , Cs (цезиум), Rb (рубидиум) со јоните на халогените елементи, F , Cl , Br , J .

јонски кристали NaCl

Периоден систем на елементите

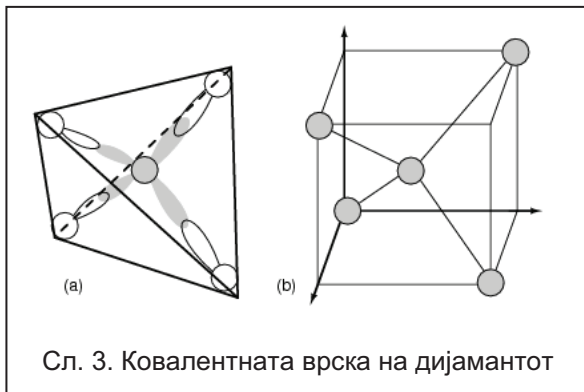
1	IA	H	IA	He	0													
2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113	114	115	116	117	118

* Lanthanide Series
Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu

+ Actinide Series
Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr

Ковалентни кристали

Ковалентните кристали се друг пример на кристали со силна хемиска врска. Таа се реализира помеѓу неутрални атоми од елементите што имаат делумно пополнети електронски обвивки (C, Si, Ge и други). За разлика од случајот со кристалите на инертните гасови, кај овие кога доаѓа до препокривање на орбиталите, за да се запази Паулиевит принцип не е потребно преминување на електрони во повисоки



Сл. 3. Ковалентната врска на дијамантот

енергетски нивои, па не се појавува одбивното заемнодејствие. Всушност, двата електрона (по еден од секој атом) имаат спротивни спинови, така што, кога ќе се сретнат формираат електронски пар кој ќе орбитира околу двата атома. Карактеристика на ковалентната врска е формирањето на општи (заеднички) електронски парови. Така, типичен пример за ковалентен кристал е дијамантот кој е, всушност, јаглерод (C). Тој е четири-валентен, т.е. во последната орбитала има четири неспарени електрони. Хемиската врска се остварува со тоа што секој атом си остварува по една заедничка електронска двојка со четирите соседни атоми (сл.3.а) кои се распоредени во темињата на правилен тетраедар. Ковалентните врски се насочени од центарот на тетраедарот кон неговите врвови под точно определени агли (сл. 3б).

Во природата само мај број кристали се карактеризираат со чисто јонска или чисто ковалентна врска. Повеќето кристали се карактеризираат со мешана (делумно јонски и делумно ковалентна врска).

Метална врска

При формирање на кристалот, валентните електрони од атомите ги напуштаат матичните атоми и стануваат колективна “сопственост”. Така, еден електрон им припаѓа на сите атоми во кристалот, или поточно, сите валентни електрони наликуваат на електронски гас кој им припаѓа на сите кристални атоми. Хемиската врска кај кристалите од чистите метали се остварува преку електростатичкото привлекување помеѓу електронскиот гас и позитивните јони (остатокот од атомите).

Дајте значење на следниве физички поими:

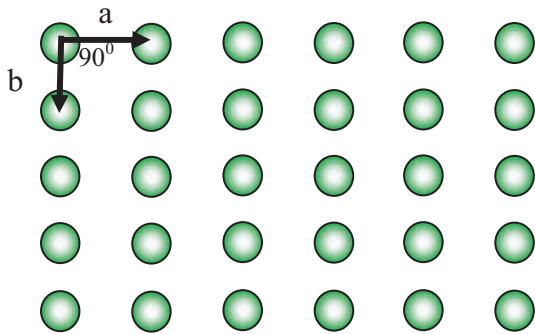
- енергија на хемиската врска,
- Ван дер Валсов потенцијал за кристалите на инертните гасови,
- јонски кристали,
- ковалентни кристали,
- ковалентните врски на дијамантот.

Активности со компјутер

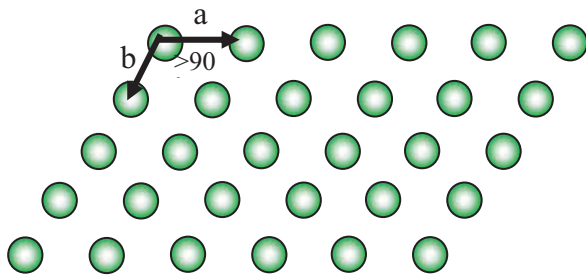
Во Microsoft excell табела внесете за r од 1 до 100. Потоа внесете ги $1/r^{12}$ и $-1/r^6$. Нацртајте ги посебно на график и потоа соберете ги на истиот график.

20. 3. СИМЕТРИЈА НА КРИСТАЛИТЕ

Симетријата што се набљудува кај кристалите е последица на внатрешната подреденост на атомите во кристалната структура. Оваа подреденост се нарекува **кристална решетка**. Кристалната решетка во дводимензионална рамнина е систем од низи од точки. Низите имаат точно дефинирано растојание помеѓу точките и меѓусебе зафаќаат точно определени агли (или насоки). Така, низите ќе можат да се дефинираат преку специфичните растојанија и аголот на поместување од една точка во друга.



Сл. 1. Аголот на трансляцијата е 90° .



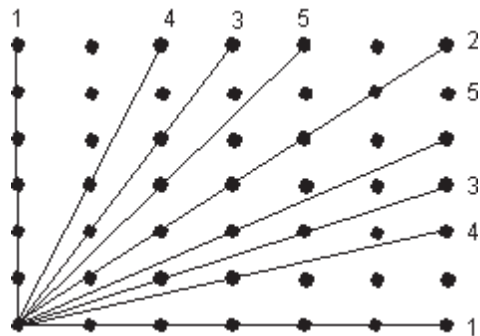
Сл. 2. Аголот на трансляцијата е поголем од 90° .

Ова се однесува на **транслационата симетрија**. Во примерот на сликата 1 се гледа дека редот може да се повтори со трансляција (поместување) надесно за растојание **a** и надолу за растојание **b**. Аголот на трансляцијата во овој случај е 90° .

На сликата 2 се гледа дека растојанијата на трансляција **a** и **b** се различни, и аголот на трансляција е различен од 90° . Секако дека кристалите се направени од тродимензионални низи од атоми, наречени **просторна решетка**. Сето она што важи за дводимензионалните решетки, ќе важи и за тродимензионалните (просторните) решетки.

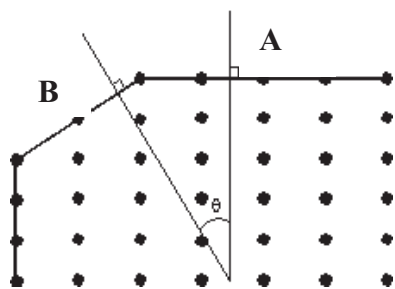
Постојат законitosti кои се однесуваат на надворешната форма на кристалите (морфологијата), кои биле утврдени и пред воопшто да се знае нешто за нивната внатрешна структура, а кои се всушност последица на таа структура. Тргувајќи од самата структура многу феномени кај тврдите тела можат лесно да бидат објаснети. Постојат 3 поважни карактеристики на кристалните решетки кои се неопходни за изучувањето на кристалите:

1. Во дводимензионалната решетка прикажана на сликата 3, страните на кристалот најчесто се појавуваат по должината на **кристалните рамнини** по правецот 1, помалку често по должината на правецот 2, а сè поретко и поретко по правците 3, 4 и 5. Со други зборови кажано, надворешните страни на кристалот одговараат на кристалните рамнини кои имаат најголема површинска густина на атомите.

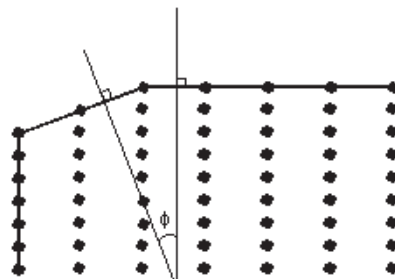


Сл.3

2. Аголот што меѓусебно го зафаќаат страните на кристалот е определен со растојанието меѓу јазлите точки. Треба да се нагласи дека аголот помеѓу две рамнини се мери со аголот што го зафаќаат нормалите на рамнините. Од сликата 4а се гледа дека промената на решеткините растојанија доведува до промена на аглиите меѓу страните на кристалот.



Сл.4а.
Страните
А и В од
кристалот
зафаќаат
агол θ .

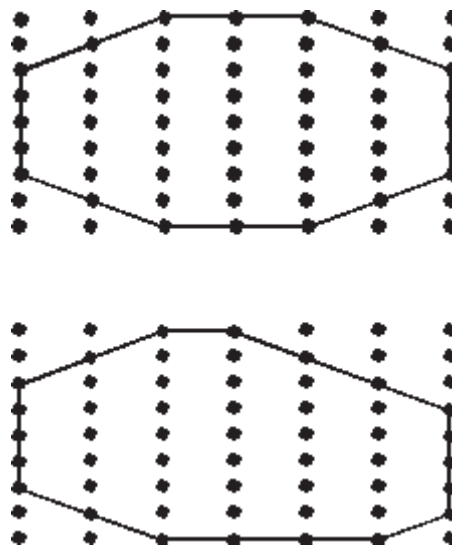


Сл. 4б.

Од сликата 4б се гледа дека хоризонталното растојание меѓу решетчините јазли останало исто како на сликата 4а, а верикалното се намалило. Исто така и аголот меѓу страните на кристалот соодветно се намалил.

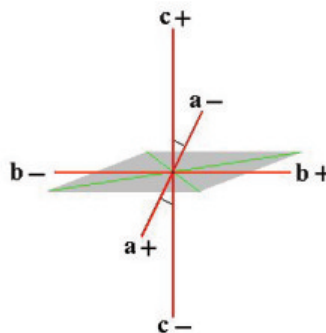
- Сите кристали од една иста супстанција имаат исти растојанија помеѓу јазлите на решетката. Според тоа и аглите помеѓу соодветните страни на кристалот ќе им бидат исти. Ова е познато како закон за постојаност на аглите меѓу страните на кристалот. Инаку, симетријата на решетката ги определува односите на аглите на различните страни на кристалот. Дури и во неидеални кристали во кои не може лесно да се определат должините на рабовите и страниците не се сосем еднакви, симетријата еднозначно да може да се определи преку аглите помеѓу страниците. На горниот пример на сликата 5 може да се забележи дека кај перфектниот кристал со идеална симетрија, паровите од страници имаат иста должина. Кај кристалот од долниот пример на сликата 5 се гледа дека иако со асиметрични страни, сепак

аглите помеѓу нив останале исти како кај перфектниот.



Сл. 5. Забележи дека меѓусебните агли помеѓу страните на кристалите горе и долу се сосем исти.

За да дознаеме дадена надворешна страна страница од кристалот на која кристална рамнина одговара потребно е дефинирање на



Сл. 6. Кристалографски оски.

некаков стандарден координатен систем во којшто ние можеме на погоден начин да ги оријентираме кристалите по должината на различните правци и рамнини. Ваквиот координатен систем е заснован на принципот на кристалографските оски.

отсликуваат симетријата на кристалот, тогаш се избира таа.

Кристалографски оски

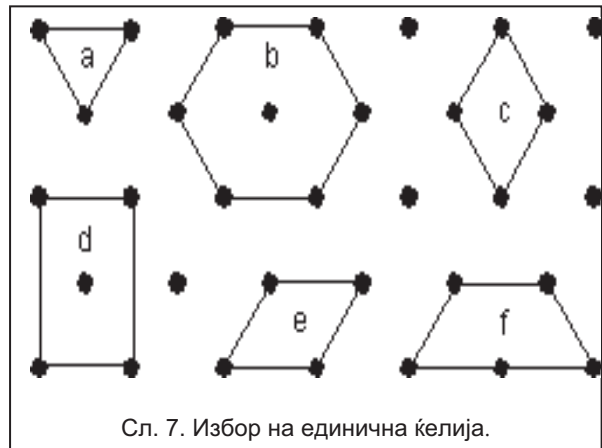
Кристалографските оски се имагинарни прави што можат да се исцртаат низ јазлите на кристалната решетка. Во тридимензионалниот простор е потребно да се дефинираат трите кристалографски оски што ги дефинираат димензиите на кристалот. Во зависност од симетријата на кристалот, кристалографските оски можат но и не мораат да бидат нормални една на друга. Исто така, и скалата не секоја од оските може, но не мора да биде иста. Единичните интервали на оските се пропорционални на решеткините растојанија по должината на една оска. На сликата 6 е даден пример на кристалографски оски за кристалите од моноклинскиот систем, за кој ќе стане збор подоцна.

Елементарна ќелија

Кога една група атомите може да се ниже по должината на кристалографските оски, притоа исполнувајќи го тридимензионалниот простор и правејќи просторната решетка, тогаш таквата група атоми се дефинира како **елементарна ќелија**. Инаку, единичната ќелија ги содржи сите неопходни точки од решетката кои можат да се транслираат за да се повторат самите себе во бесконечен ред. Со други зборови, единичната ќелија го дефинира основниот градивен блок (тула) на кристалот, така што целиот кристал е изграден со негово повторување во просторот. Дефинирањето на единичната ќелија може да биде произволно. Сепак, најдобриот избор е оној којшто ги задоволува следниве барања:

1. Единичната ќелија треба да ја отсликува симетријата на кристалот, односно, треба да содржи што е можно повеќе елементи на симетрија, карактеристични за дадената решетка.
2. Најдобро е да се избере најмалата можна ќелија. Доколку поголемата или посложената ќелија подобро ја

На сликата 7 е даден пример на дводимензионална решетка со 6 можни единични ќелии.



Сл. 7. Избор на единична ќелија.

Решетката има ротациона симетрија околу оска што е нормална на рамнината на цртање. Бидејќи решетката нема трикратна или шестократна ротациона симетрија, тогаш можностите (a) и (b) не се подобни. Ќелиите под a) и f) не се елементарни ќелии – со нивна трансплација не е можно да се репродуцира решетката. Изборот (f) може да се елиминира бидејќи е една половина од изборот (b). Рабовите на можните ќелии (c) и (e) ниту се совпаѓаат ниту се паралелни со некоја двојна оска што лежи на рамнината на цртање. Поради тоа, нашиот најдобар избор е ќелијата под (d).

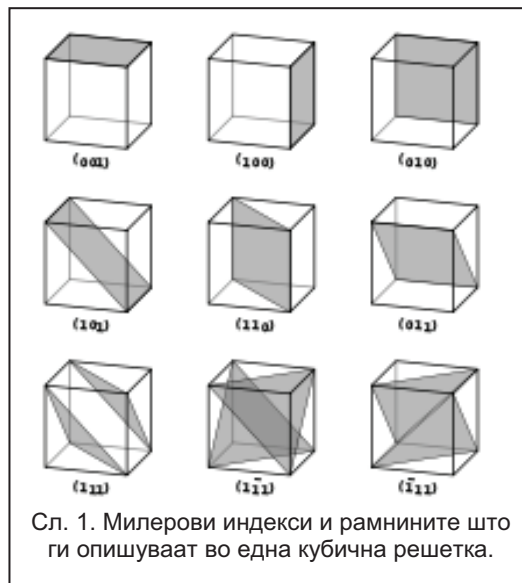
Дајте значење на следниве физички поими:

- кристална решетка,
- кристални рамнини,
- страни на кристалот,
- кристалографски оски,
- единична ќелија.

20. 4. КРИСТАЛОГРАФСКИ СИСТЕМИ

Уште во минатото било забележано дека ако се скрши еден монокристал, деловите, иако различни по големина имаат слична правилна форма. Малите парчиња можат и понатаму да се кршат на делови, и ефектот ќе биде сличен - ситните делови според формата личат на претходните. Тоа наведува на мислењето дека големите кристали се составени од множество помали, правилно распордени, кристалчиња. Но, и покрај тоа, страните на кристалите имаат сосема мазни површини, што пак наведува на тоа дека малите кристалчиња се многу мали. Дека ова тврдење било точно, се потврдило со помош на анализите со рендгенската дифракција во почетокот на 20-иот век. Од експерименталните анализи сега веќе со сигурност се знае дека гравидните честици на кристалот (атоми, молекули) правилно се распоредени во просторот, заземајќи непроменливи положби кои се редат во низа еден до друг по должината на три просторни правци. Свкупноста од тие положби ја сочинува кристалната решетка, чијшто основен градбен елемент е елементарната ќелија која има форма на паралелолипед. Со редување на тие елементарни ќелии во просторот се добива целата кристална решетка. Најважната особина на решетката е нејзината просторна периодичност, што ја прави подреденоста на просторот од “повисок поредок”.

Кристалната структура на материјалите, всушност, го претставува распоредот на атомите во просторот. Кристалот може да се разгледува во смисла на единична ќелија којашто можеме да си ја претставиме како малечко кутивче што содржи еден и повеќе атоми распоредени во просторот. Единичната ќелија може целосно да се претстави со помош на **параметрите на решетката**: должините на страниците и аглиите помеѓу нив, а притоа положбите на атомите се целосно опишани преку позициите на секој атом во



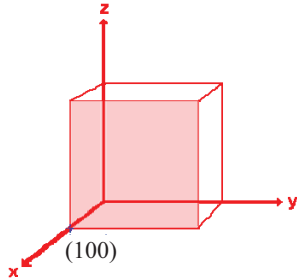
Сл. 1. Милерови индекси и рамнините што ги опишуваат во една кубична решетка.

просторот (x_i , y_i и z_i) мерени од некоја јазолна точка избрана за координатен почеток.

Милерови индекси

Положбата на атомските рамнини во кристалите може целосно да се опише со помош на Милеровите индекси: нотација со комплет од три броја (hkl). Милеровите индекси се симболичен векторски приказ за ориентацијата на една атомска рамнина во кристалната решетка. Тие се дефинираат како реципрочни вредности од пресеците што ги прави со кристалографските оски. Ако еден или повеќе Милерови индекси се еднакви на нула тоа значи дека таа рамнина едноставно не се сече со соодветните оски. Со помош на Милеровите индекси и кристалните параметри можат лесно да се определуваат растојанијата меѓу атомските рамнини. Така, ако е даден кристалниот параметар на кубната решетка a и милеровите индекси на кристалната рамнина (hkl), тогаш може да се определи растојанието помеѓу рамнините со:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + l^2 + k^2}}$$



Сл. 2. Кристална рамнина со Милеров индекс (100)

Означувањето на кристалните рамнини со помош на Милерови индекси може најдобро да се објасни со конкретни примери. На пример, рамнината со Милеров индекс (100) претставува ортогонална рамнина што се поклопува со обоената страната од квадратот на сликата 2.

7-те основни кристални системи

Преку параметрите на решетката, во кристалографијата се дефинираат кристални системи или кристални семејства. Може да се каже дека два кристала можат да припаѓаат на исто семејство доколку имаат слична симетрија. Во тродимензионалниот простор постојат седум кристални системи, и тоа: триклинична, моноклинична, орторомбична, тетрагонална, тригонална, хексагонална и кубична. Седумте системи содржат подсистеми, па така чинат севкупност од 14 Брависови решетки. Потсистемите произлегуваат од распоредот на атомите во единичната ќелија. Како пример може да се посочи орторомбичниот систем којшто има 4 подсистеми. Кај последниов може да постои обична клетка, кај која атомите се сместени само по темињата на геометриското тело.

A. Примитивна или проста

B. Базно центрирана

C. Странично центрирана

D. Волуменски центрирана

Во табелата подолу се дадени сите 7-те главни решеткини системи заедно со можните потсистеми. Како пример ќе го дадеме орторомбичниот систем кој ги содржи четирите можни потсистеми и сочинува 4 брависови решетки. Кај орторомбичен систем решеткини константи се само a, b и c бидејќи аглиите се сите прави.

- Кај простиот потсистем атомите се сместени само во темињата на паралелопипедот
- Кај базно-центрираниот потсистем атоми има на базисите на квадратот во пресекот на дијагоналите.
- Кај волуменски центрираниот, освен во темињата, атоми има и во внатрешноста на паралелопиперот на пресекот на неговите просторни дијагонали.
- Кај странично центрираниот, покрај во темињата атоми на решетката има и на во пресеците на дијагоналите на страните на паралелопипедот.



A. Проста



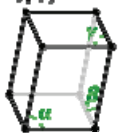

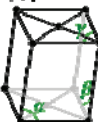

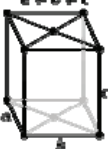
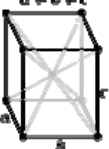





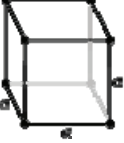


B. Базно центрирана



C. Странично центрирана



D. Волуменски центрирана

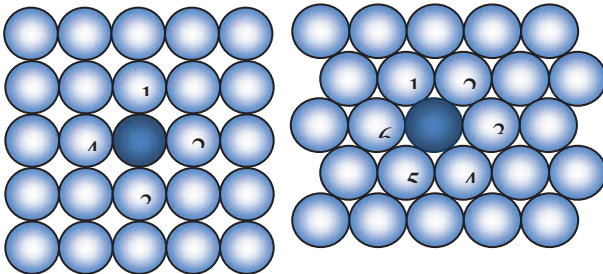
7 системи	14 Брависови решетки			
Триклинчен (паралелопипед)	$\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$ 			
Моноклинчен	обичен	Базно центриран		
	$\alpha \neq 90^\circ$ $\beta, \gamma = 90^\circ$ 	$\alpha \neq 90^\circ$ $\beta, \gamma = 90^\circ$ 		
Орторомбичен	обичен	базно центриран	Волуменски центриран	странично центриран
	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 
тетрагонален	обичен	базно центриран		
	$a \neq c$ 	$a \neq c$ 		
Тригонален	$\alpha = \beta = \gamma$ $a \neq b \neq c$ 			
Хексагонален				
Кубичен	обичен	BC	FC	
				

20. 5. МОДЕЛИ НА ГУСТО ПАКУВАЊЕ

За кристалот, чишто честици се така распоредени што пополнуваат најголем дел од расположливиот простор, се вели дека се со густо пакувана решетка. Ова прашање ќе го разгледаме со модел кај кој честиците ќе си ги претставиме како тврди топчиња со еднаков или нееднаков радиус.

Густо пакувани топчиња со ист радиус

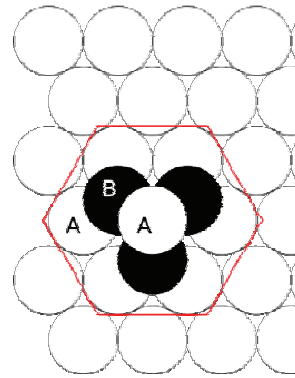
Да разгледаме најпрво густо пакување на идентични топчиња во рамнина. Најголем дел од просторот е исполнет ако едно топче е во контакт со 6 свои соседи (што е најголем број соседи во една рамнина).



Сл. 1. Квадратно пакување на топчиња. Секое топче е во контакт со само 4 соседи. Само 74,5% од просторот е исполнет.

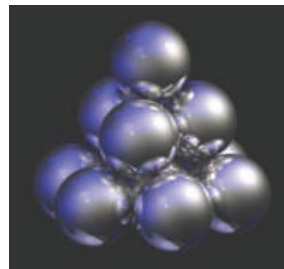
Сл. 2. хексагонално пакување на топчиња. Секое топче е во контакт со 6 соседи. 91% од просторот е исполнет.

За да се добие тродимензионално спакувана структура, слоевите се пакуваат еден над друг. Притоа, постојат две можности. Слојот со поредок А (сл.3) да се повтори над А, или, пак, над слојот А да дојде слој В. Во вториов случај структурата е најгусто спакувана, и тоа хексагонално еден над друг. Топчињата од В (наредниот слој) се редат во лежиштето што го создаваат три соседни топчиња од претходниот слој (А). Вака структура поседуваат кристалите на некои метали (Zn, Co, Mg и дуги).

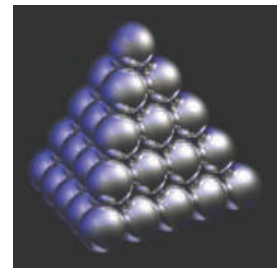


Сл. 3. Густо спакувана хексагонална структура во просторот. Топчињата од првиот ред се во положбите А. Вториот ред во В. Топчињата од третиот ред, повторно се во положбите А.

Ако топче од третиот слој се постави во вдлабнатините што ги сочинуваат три соседи од слојот В, тогаш се добива слој С (сл. 4).

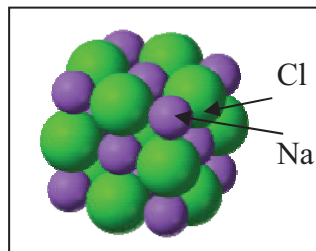


Сл. 4. Просторна, густо спакувана структура што одговара на хексагонална решетка со слоеви А и В. Слојот С претставува повторување на слојот А.



Сл. 5. Редување на топчиња како топовски гулиња. Се совпаѓа со странично центрирана кубична решетка (FCC).

Густо пакување кај топчиња со различен радиус

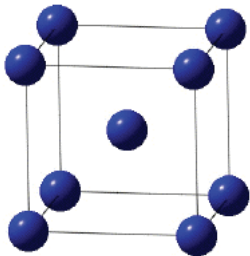


Во празните простори на густо спакуваните топчиња (атоми) со ист радиус може да се вметнат помали топчиња. На овој начин се распоредени атомите на најголемиот број неоргански соединенија. Вака се спакувани атомите на готварската сол (NaCl). Структурата на кристалот на NaCl може да се разгледува како

густо пакувана странично центрирана кубна решетка, составена од јони на Cl, кај која во октаедарските шуплини се вметнати јоните на Na.

Решетки кои не се толкуваат со моделот на густо пакување

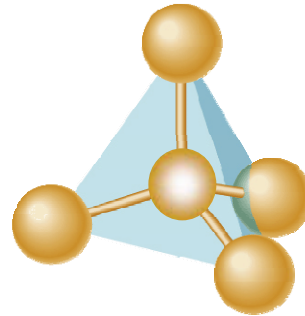
Сите кристали не можат да се претстават преку моделот на густо пакување. Така, на пример, честиците на кристалите на натриум, литиум (сл. 7), калиум и цезиум се распоредени така што секоја има по 8 најблиски соседи наместо 12 како што беше случајот со густо пакуваната хексагонална структура. Во овој случај распоредот исполнува само 68% од севкупниот расположлив простор.



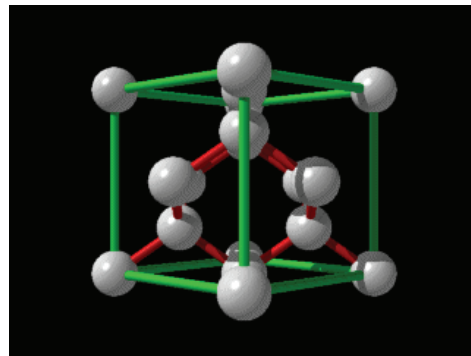
Сл. 7. Атомот на литиумот е во центарот на коцката. Во аглите се сместени 8-те негови најблиски соседи.

Од голема важност за науката и електрониката се кристалите на четиривалентните елементи (јаглерод, силициум и германиум) кои се распоредени така што имаат само по 4 најблиски соседи, па зафаќаат само 34% од расположливиот простор.

Имајќи предвид дека еден од најтврдите материјали во природата е дијамантот, којшто се користи во металургијата за режење, нема густо пакувана решетка (сл. 8), тогаш може да се залучи дека тврдоста на материјалите не зависи од густината на пакувањето туку од јачината на хемиските врски што ги држат во заедница одделните атоми во кристалната решетка.



Сл. 8. Еден атом на јаглерод формира тетраедар со 4-те најблиски соседи, формирајќи ја кубичната решетка на дијамантот од сликата 9.



Сл. 9. Геометријата од сликата 8 резултира во странично центрирана кубична решетка. Истата решетка ја имат силициумот и дијамантот.

Дајте значење на следниве физички поими:

- густо спакувани атоми со ист пречник,
- густо спакувани атоми со различен пречник,
- решетки на атоми со 8 најблиски соседи,
- решетки со само 4 најблиски соседи.



Дијамантско ноже за режење стакло.

20. 6. ТОПЛИНСКИ КАПАЦИТЕТ И ЕНЕРГЕТСКИ ЗОНИ

Топлинските и електричните својства на тврдите тела зависат од многу фактори и феномени. Ние во оваа лекција ќе начнеме само 2 класични теории кои ќе ни дадат мала претстава за сложените процеси во нив: теоријата за распределба на енергијата според степените на слобода и теоријата за енергетските зони.

Осцилаторно движење на атомите во кристалната решетка

Градбените честици на кристалот учествуваат во топлинско движење така што се отклонуваат од рамнотежната положба, т.е. од јазлите на кристалната решетка. Во услови на собна температура отклонувањата на атомите од рамнотежата x е мало (само неколку проценти од меѓуатомското растојание. Притоа се создаваат еластични сили кои се стремат кон рамнотежата $F = -kx$, каде што k е константа зависна од еластичните својства на тврдото тело. Таквите сили предизвикуваат осцилаторно движење околу рамнотежната положба на честиците од кристалната решетка. Оттука следува дека топлинското движење на градивните честици во кристалот претставува хармонично движење на атомите околу рамнотежните положби во кристалната решетка.

Потребно е да се востанови врската помеѓу **енергијата на осцилаторното движење** и **температурата на кристалот**, а за тоа се потребни дополнителни познавања на молекуларно-кинетичката теорија.

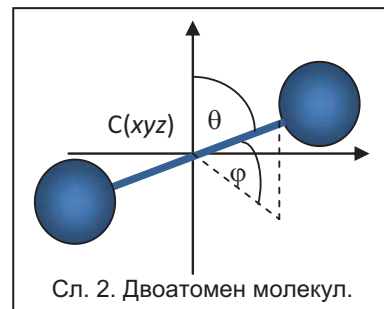
Степени на слобода

Бројот на степени на слобода на едно тело се нарекува минималниот број координати со кои еднозначно се определува положбата на едно тело. Ова може да се објасни низ неколку примери.

1. **Материјална точка.** Положбата на материјалната точка во просторот се задава со трите нејзини Декартови

координати (x, y, z) . Според ова, материјалната точка поседува 3 степени на слобода, што значи дека нејзиното движење може да се претстави со три независни еднодимензионални движења во правецот на трите координатни оски.

2. **Двоатомен молекул.** Положбата на двоатомниот молекул во просторот е определена со положбата на центарот на масата на молекулот (C), аглите φ и θ коишто ги зафаќа оската на молекулот со два заемно нормални правца. Затоа, трите Декартови координати на тежиштето $C(x,y,z)$ и аглите φ и θ ги сочинуваат петте степени на слобода на двоатомниот молекул.



Сл. 2. Двоатомен молекул.

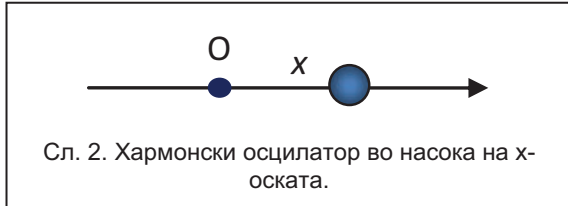
Рамномерна распределба на енергијата според степените на слобода

Во класичната статистичка физика постои теорема која ја дава распределбата на енергијата во еден затворен термодинамички систем. Според оваа теорија, на секој степен на слобода му следува по еднаква средна енергија, еднаква на $\frac{1}{2} kT$. Тука T е апсолутната температура а k е Болцмановата константа. Со помош на теоремата за рамномерна распределба на енергијата според степените на слобода, лесно може да се определи средната енергија на топлинското движење на честиците на еден гас или тврдо тело ако е позната температурата T и степените на слобода.

Така, на пример, честиците на едноатомен гас (Ne, He, Ar) можат да бидат разгледувани како материјални точки со 3 степени на слобода. Следува дека за овие секој атом има средна енергија од по $3kT/2$. Средната енергија на двоатомните молекули е $5kT/2$.

Закон на Дилонг и Пти

Нека некоја материјална точка врши хармонично движење во насока на x -оската, околу рамнотежната положба O (сл. 2). За да се определи положбата на точката во секој момент е доволно да се знае една нејзина координата, па таквата материјална точка има само еден степен на слобода. Како што



Сл. 2. Хармонски осцилатор во насока на x -оската.

ни е познато од механиката на осцилаторните движења, осцилаторот има потенцијална и кинетичка енергија. Притоа, средната кинетичка енергија му е еднаква на средната потенцијална енергија. За разлика од ротационото движење, кај осцилаторното движење на секој степен на слобода ќе му припаѓа $\frac{1}{2} kT$ за средната потенцијална и $\frac{1}{2} kT$ за средната кинетичка енергија, што заедно чинат kT .

Сега да се навратиме повторно на треперењата на кристалот. Осцилирањето на една честица од кристалот може да се претстави како 3 независни осцилаторни движења, од кои им соодветствува вкупна средна енергија $3kT$.

Да разгледаме кристал на проста хемиска супстанца составена од еднакви атоми. Знаејќи дека во еден mol материја има N_A (Авогадров број) атоми, следува дека во секој mol материја средната енергија изнесува

$$U_m = 3 N_A kT.$$

Знаејќи дека Боцмановата константа $k = R/N_A$ каде што R е универзалната гасна константа, тогаш за енергијата може да се запише:

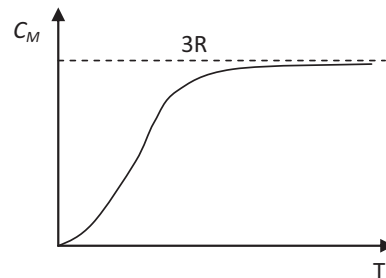
$$U_m = 3 RT.$$

Оваа равенка кажува дека за да се покачи температурата на еден mol материја за ΔT , потребно е да се доведе топлина $\Delta U_m = 3 R \Delta T$. Топлина што треба да се доведе на 1 mol материја за да порасне неговата температура

за еден 1 степен (1 K) се нарекува моларен топлински капацитет. Од горната равенка може да се пресмета дека моларниот топлотен капацитет на кристалот изнесува

$$C_M = \Delta U_m / \Delta T = 3 R.$$

Равенкава го изразува законот на Дилонг и Пти, добиен по експериментален пат, којшто вели дека моларниот топлински капацитет на сите прости хемиски материи во кристална состојба е еднаков на $3R$, каде што R е универзалната гасна константа ($R=8,314 \text{ J/(mol K)}$). За собна температура, законот на Дилонг и Пти важи за повеќето кристали, но не за сите. На пример, на собна температура ($T=300 \text{ K}$) $C_M = 0,7 R$. Неговата зависност графички е дадена на сликата 3, од која се гледа дека

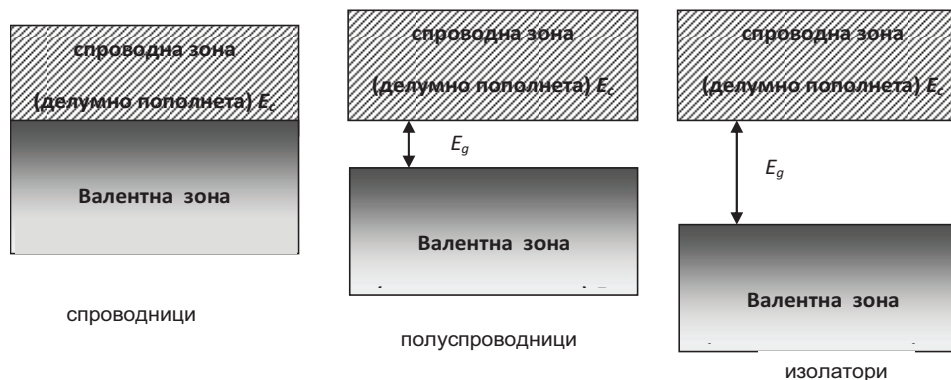


Сл. 3. Моларниот топлотен капацитет зависи од температурата.

законот Дилонг и Пти се исполнува само за високи температури. Така, за дијамантот на 1300 K, било најдено дека C_M е приближно $3R$. Подоцнежните испитувања, при кои моларниот топлински капацитет е мерен за пониски температури од собната, покажале отстапување од законот на Дилонг-Пти. Ова укажало на тоа дека моларниот топлински капацитет е зависен од температурата. При ниски температури блиски до апсолутната нула законот воопшто не важи. Зависоста во температурниот интервал близок до нулата може да се опише како

$$C_M \sim T^3.$$

Причините за овие несложувања лежат во занемарувањето на квантномеханичките ефекти врз осцилаторните движења кои се доминантни при многу ниски температури.



Сл. 4. Претстава за енергетските зони кај спроводниците, полупроводниците и изолаторите.

Валентна, спроводна и забранета зона

Електроните од електронските обвивки на изолираните атоми се распоредени во дискретни нивоа. Поради близината на соседите во кристалот овие енергетски нивоа си заемнодејствуваат, поради што доаѓа до цепање на енергетски поднивои. Бидејќи кристалот е систем од огромен број честички, ваквото цепање доведува до појава на огромен број енергетски поднивои кои имаат многу блиски енергии и кои формираат енергетски зони.

Во внатрешноста на една зона има блиски една до друга, дозволени за населување енергетски состојби. Дозволените зони се меѓусебе одвоени со забранети зони (E_g) кои се, всушност, енергетски интервали во кои електроните не можат да престојуваат. Пополнувањето на населените зони настанува на сличен начин како што се пополнуваат атомските нивоа: според принципот на Паули. Тоа значи дека само по два електрона може да зафаќаат едно енергетско ниво. Бидејќи бројот на електроните во кристалот е ограничен, тогаш се пополнуваат само неколку зони, и тоа оние што се најниски, според енергијата. Последната целосно пополниета зона се нарекува **валентна зона**. Следната населена зона којашто е делумно пополнета со електрони се нарекува **спроводна зона**. Овие две зони се разделени со интервалот на недозволен енергетски нивоа, т.е. **забранета зона E_g** . Ширината на забранетата зона во најголема мерка го определува електричното поведение на кристалот. Другите внатрешни зони коишто се целосно пополнети и се

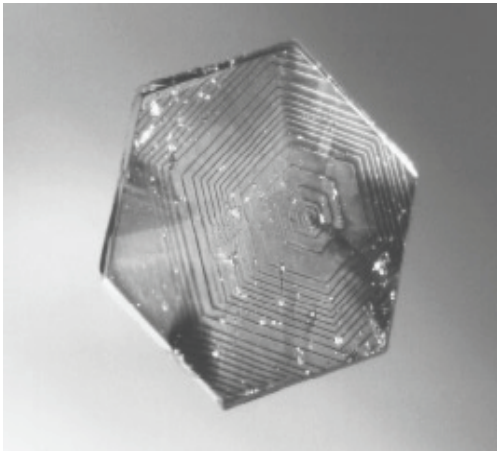
наоѓаат поблиски до атомското јадро не влијаат битно на севкупното поведение, па затоа нема се разгледуваат. Во зависност од меѓусебната положба на валентната, спроводната и големината на забранетата зона, материјалите можат да имаат различна електрична спроводливост и да се поделат на **спроводници, полупроводници и изолатори**. На сликата 4 е дадена скица на зоните кај споменатите материјали. Од сликата се гледа суштинската разлика помеѓу енергетските дијаграми на спроводниците, од една страна и полупроводниците и изолаторите, од друга страна. Имено, кај спроводниците има преклопување на валентната и спроводната зона, што значи дека електроните можат да бидат и спроводни и валентни едновременно, па оттаму и големата електрична спроводливост на овие материјали. Кај полупроводниците и изолаторите единствената разлика е во ширината на забранетата зона. Иако нема резка граница помеѓу овие два вида супстанции, сепак вообичаено да се смета дека кај полупроводниците таа изнесува до околу 3 eV, додека, пак, кај изолаторите, таа е поголема.

Дајте значење на следниве физички поими:

- степени на слобода на двоатомен молекул,
- закон на Дилонг и Пти.
- Моларен топлински капацитет
- Валентна, спроводна и забранета зона,
- Зонски дијаграми на спроводници, полупроводници и изолатори.

20. 7. МЕТОДИ ЗА ИСТРАЖУВАЊЕ НА СТРУКТУРАТА НА ТВРДИТЕ ТЕЛА

Методите за испитување на структурата на материјалите на атомско ниво се засновани на заемнодејството на материјата со зраци од различна природа. Постојат микроскопски и дифракциони методи за истражување на структурата на тврдото тело.



Сл. 1. Хексагоналан графитен кристал од 1 mm.

Оптичка микроскопија

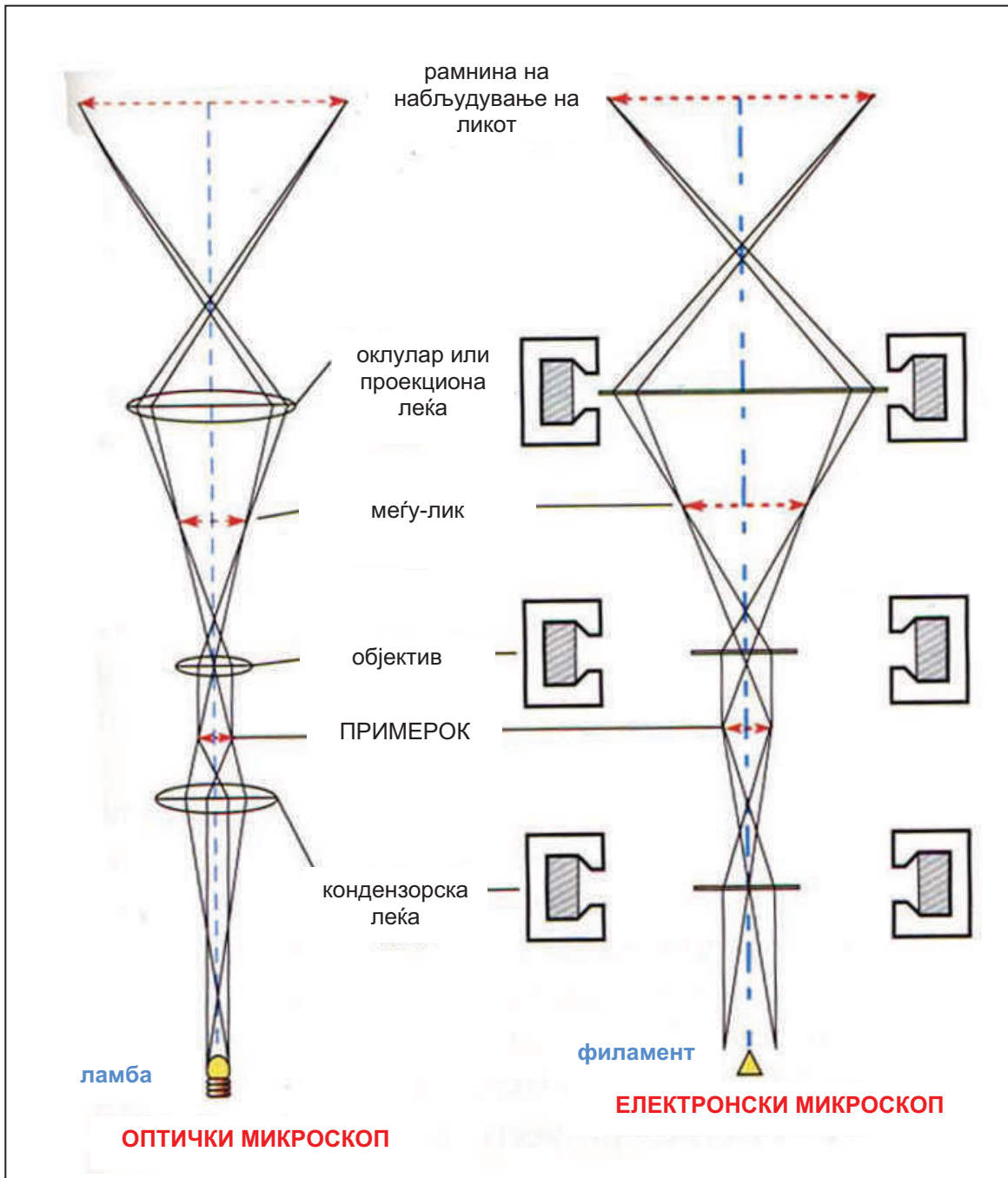
За некои металуршки, геолошки, минеролошки и некои други истражувачки намени доволно е испитување на структурата со помош на оптички микроскоп. Геометријата на кристалите може да се види на оптички микроскоп. Доколку микроскопот е опремен со извор со поларизирана светлина (поларизационен микроскоп) тогаш со оптичката микроскопска метода можат да се истражуваат поликристалите и да се измери големината на микрометарските кристални зрна. Оптичката микроскопија се користи и во металургијата за откривање на дефектите на металите.

Но, уште во XIX-тиот век, германскиот физичар Абе (Abbe) покажал дека теориски е невозможно со микроскоп да се набљудуваат детали помали од брановата должина на

употребуваната светлина (околу 400 -800 nm за видливата светлина). Поради тоа, оптичките микроскопи не се погодни за истражувања на атомско ниво. Имајќи предвид дека дијаметарот на атомите е од редот големина на десетинки од нанометар, тогаш логично е дека само зраци со бранови должини од десетинки од нанометар можат да дадат слика на кристалот на атомско ниво. Вакви зраци со електромагнетна природа се рендгенските зраци (X-зраци) во распонот од бранови должини од 0,01 до 0,1 nm. Освен електромагнетни бранови за добивање слики на материјата на атомско ниво можат да се искористат и честици кои според Де-Бролевата релација може да им се припише и бранова природа со бранова должина еднаква на $\lambda = h/mv$, каде што mv е импулсот на честицата а h е Планковата константа. Најширока примена за оваа намена имаат електроните и неутроните. Електроните лесно можат да се забрзуваат во електрично поле до брзини соодветни на брановата должина од редот големина на делови од нанометар. Проблемот со електроните е тоа што тие силно заемнодејствуваат со електростатичко заемнодејство со материјата, па нивната енергија ослабува и тие имаат мала продорност, па можат да носат информација само од тенок површински слој. Неутроните, пак, слабо заемнодејствуваат со материјата и можат да донесат и длабински информации. Сепак најпогоден метод за истражување на површини и тенки слоеви е електронската микроскопија.

Електронска микроскопија

Електронскиот микроскоп во принципот на работа е сличен на оптичкиот микроскоп (сл. 2), само што наместо светлински извор тој содржи извор на електронски сноп (филамент или угорена жичка), и наместо оптички систем на леќи тој има електронски леќи (електрични и магнетни полиња кои дејствуваат како собирни леќи). Биле конструирани повеќе видови електронски микроскопи за различни намени: трансмисиони, скенирачки, емисиони и некои други подвидови, но ние ќе ги разгледаме само првите два.



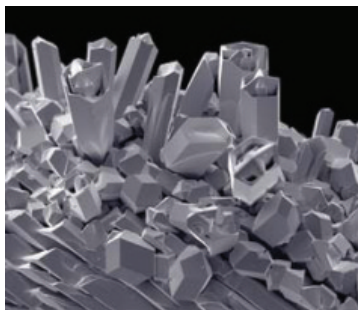
Сл. 2. Споредба на оптички и електронски микроскоп (ТЕМ).

Трансмисиона електронска микроскопија (TEM)

Ликот кај TEM-от се создава на сличен но, сепак, различен начин отколку кај оптичкиот микроскоп. Тој наместо светилка има усвитена волфрамова жичка на 2700°C (катода) од којашто се емитираат електрони, коишто се забрзуваат со помош на високиот напон на анодата во однос на катодата. Со помош на магнетната леќа-кондензор се формира сноп со неопходната енергија кој се фокусира на површината на примерокот (сл. 2).



Сл. 3. Скенирачки електронски микроскоп (SEM) на Институтот за физика на Природно-математичкиот факултет во Скопје. Дава зголемување до 200 000 пати.



Сл. 4. SEM имиџ на метални кристали.

Магнетната леќа што ја игра улогата на ОБЈЕКТИОТ го прави првото зголемување. Втората, проекционата леќа, го создава крајното зглемување.

Инаку магнетните леќи претставуваат намотка со точно определена геометрија што создаваат магнетно поле кое има својство да го фокусира електронскиот сноп кон дадена оска.

Ликот во електронскиот микроскоп се формира поради нееднаквото расејување на одделните делови од структурата на материјалот (тврдото тело што се набљудува). Поради силното заемнодејство со материјата, електроните можат да поминуваат само низ тенки примероци. Затоа за TEM микроскопијата е потребна посебна подготовка - ласерско сечење на примероците на многу тенки слоеви

Зголемувањето на електронскиот микроскоп е до милион пати, а најјасните делови што можат да се видат како посебни ликови се со димензии од 0,2 до 0.5 nm.

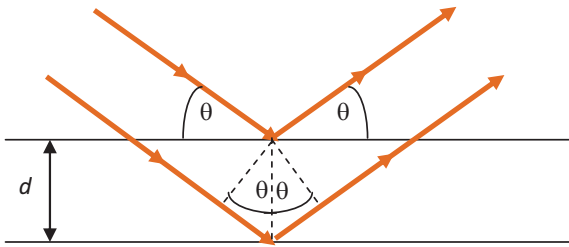
Скенирачки електронски микроскоп (SEM)

Скенирачкиот електронски микроскоп (SEM) се користи, главно, за истражување на површините. Принципот на работа е следниот: многу тенок електронски сноп поминува од точка во точка (скенира над образецот) удирајќи врз секоја точка од површината, посебно. Расејаните електрони од одделните точки се собираат со еден колектор и дават струја. Таа струја е многу мала, па е потребно да се засилува со засилувач. Овој сигнал, сличен на телевизискиот, се предава на електронски систем кој формира слика.

Закон на Брег

Дифракцијата на рендгенските зраци, електроните и неутроните од кристалните рамнини се покорува на некои општи закономерности кои не зависат од видот на зрачењето, туку само од нивната бранова должина. За многу видови зрачења кристалот претставува просторна кристална решетка со паралално поставени кристални рамнини, како

на сликата 5. Положбата на дифракционите максимуми се определува со познатата формула од оптика за дифракциона решетка, само што е оваа во три димензии.



Сл. 5. Дифракција на два рендгенски зрака од две соседни атомски рамнини. Зраците зафаќаат агол θ со атомските рамнини.

Објаснувањето за дифракцијата на кристалот го дале таткото и синот Брег, за што ја добиле и Нобеловата награда за физика.

Да го разгледаме кристалот како систем од паралелни слоеви според кои се поредени атомите (атомски рамнини). Овие слоеви се слични на рамни огледала кои делумно ги рефлектираат а делимно ги пропуштаат упадните рендгенски зраци. Така секоја атомска рамнина огледално рефлектира по еден дел од зраците, па целото упадно зрачење огледално се рефлектира од голем број атомски рамнини. Рефлектираните зраци може да се разгледуваат како секундарни зраци (според Хајгенсовиот принцип) кои како да извираат од атомските рамнини. Овие интерферираат помеѓу себе и создаваат дифракциона слика. Интензитетот на дифракцијата е голем само таму каде што е задоволен условот за појава на дифракциони максимуми (одбиените зраци заемно се засилуваат).

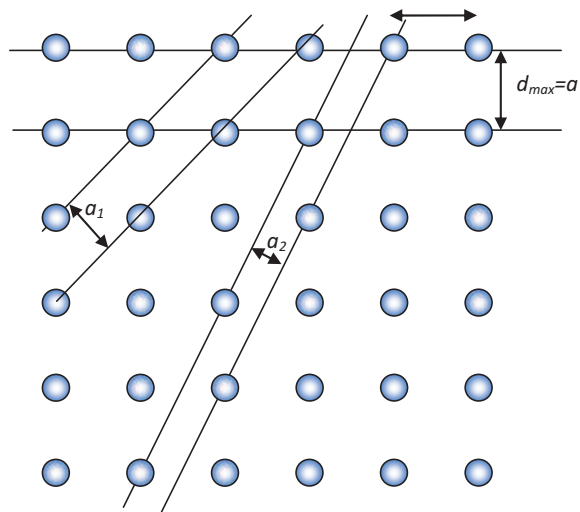
Да земеме, на пример, дека d е растојанието помеѓу атомските рамнини. Одот на два соседни зрака кои што се рефлектирале од две соседни атомски рамнини е дадена на сликата 5. Патната разлика во одовите на двата зрака е $\Delta = d \sin \theta + d \sin \theta = 2 d \sin \theta$. Тука со θ е означен аголот што го зафаќаат зраците со атомската рамнина а не со нејзината нормала. За да интерферираат и

дадат засилување двата одбиени зрака потребно е патната разлика да биде еднаква на цел број ($m = 0, 1, 2, 3 \dots$) бранови должини (λ).

Така, условот на Брег за појава на дифракционен максимум е даден со равенката:

$$2 d \sin \theta = m \lambda \quad \text{за } (m = 0, 1, 2, 3 \dots),$$

која ја дава положбата на дифракционите максимуми. Бијејќи Бреговото одбивање се случува од голем број атомски рамнини па засилениот интензитет се случува само при точно определени упадни агли врз површината на кристалот што се истражува, кои го задоволуваат законот на Брег.

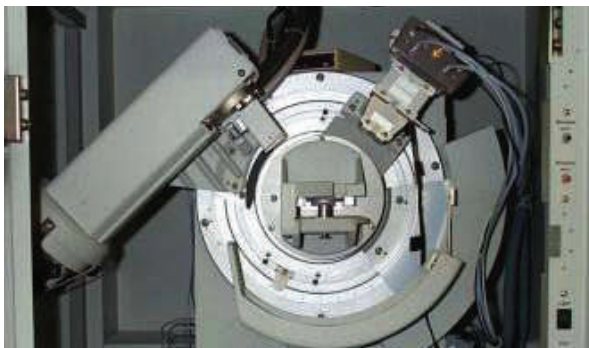


Сл. 6. Различни атомски рамнини во дводимензионална кубична решетка.

На сликата 6 се дадени 3 семејства од паралелни атомски рамнини од една кубична решетка. Од сликата може да се види дека максималното растојание меѓу атомските рамнини (d_{\max}) е всушност константата на кристалната решетка a . Константата на решетката секогаш може да се определи преку дифракционите максимуми од кои и да било две од различните семејства рамнини.

Дифрактометар на рендгенски зраци (XRD)

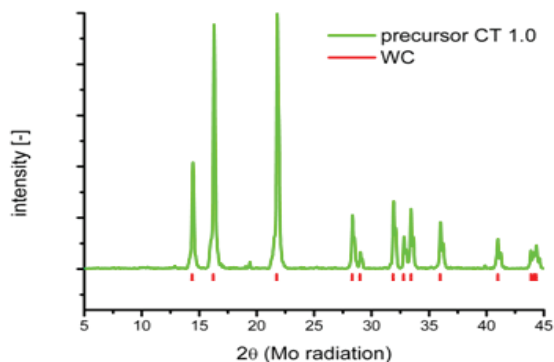
Дифракцијата на рендгенските зраци од кристалните рамнини била искористена за конструкцијата на дифрактометар за истражување на кристалната структура на материјалите. Дифрактометарот ја користи појавата на дифракција на рендгенски зраци од рендгенските рамнини. Ако патната разлика помеѓу рефлектираните зраци изнесува цел број бранови должини, тогаш се појавува дифракционен максимум. Постојат дифрактометри за ротирачки кристал и дифрактометри за прашочни кристали. Вториот е со многу широка примена во науката и техниката. Научните истражувања за развојот на металургијата, електрониката, науката за тенките филмови и други, не може да се замисли без оваа корисна алатка за определување на кристалната структура на испитуваниот материјал преку истражување на положбата на дифракционите максимуми. Од нив лесно се добиваат константите на кристалната решетка, па еднозначно се идентификува структурата. Инструментот дифрактометар - XRD е даден на сл. 7.



Сл. 7. Дифрактометар на рендгенски зраци. Лево е цевката за X-зраци. Во центарот е примерокот. Десно е детекторот (Гајгер-Милерова цевка). Со релативна ротација може да менува уадниот агол θ .

Како резултат на снимањето со овој инструмент се добива дифрактограм (сл. 8) кој треба да се анализира. Ако инструментот е опремен со соодветен софтвер, можно е од интензитетите на дифракционите максимуми

автоматско добивање на параметрите на решетката. Преку последниве може да се идентификува кристалот и неговиот хемиски состав.



Сл. 8. Дифрактограм. По x-оската се прикажува промената на аголот 2θ . По y-оската е даден интензитетот на рефлектираните зраци под дадениот упаден агол. Максимумите укажуваат на положбите (аглите) под кои се задоволува условот на Брег за појава на максимуми

Дајте значење на следниве физички поими:

- Електронска микроскопија,
- скенирачки електронски микроскоп (СЕМ),
- трансмисионен електронски микроскоп (ТЕМ),
- закон на Брег
- дифракција на рендгенски зраци,

21. 1. СТРУКТУРА НА МАТЕРИЈАТА

Досега изучивте и самите имате спознаено дека супстанцијата (материјата) може да постои во три агрегатни состојби: **цврста, течна и гасовита**. Најверојатно овие состојби ги натерале древните филозофи да ги дефинираат основните елементи: вода, воздух и земја. Но, интуицијата на филозофите кажувала дека постои уште еден елемент (облик на постоење) –огнот кој, пак, може да се доведе во врска со најраспространетиот облик на постоење на материјата во Вселената, а тоа е **плазмата**.

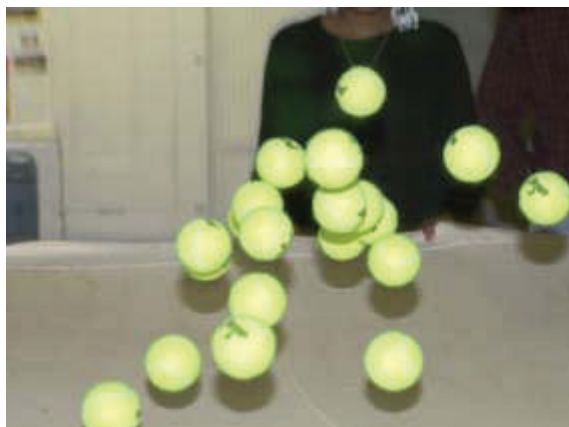
Задачата на научниците од XIX век па сè до денес е да ги откријат тајните на тоа како се врзуваат атомите или молекулите во разните состојби на материјата, и како овие врски влијаат на електричните, оптичките, механичките, магнетните и другите својства. Потоа ваквите истражувања се ползуваат за да се создаваат материјали што имаат својства погодни за нивна практична примена.

Модел на структура на материјата

Светот на материјата е многу разнообразен. Дури и една иста материја покажува најразлични својства во зависност од условите (температура, притисок и др.). Основните модели на материјата во современата физика се: моделот на гас, моделот на плазма, моделот на кондензирана материја.

Модел на гас

Кај овој модел за градбените честици се сметаат само неутралните атоми и молекули кои се сместени на големи растојанија едни од други, многу поголеми од нивните димензии. Така може да се смета дека тие меѓусебе не си заемнодејствуваат. Градбените честици се во непрекинато хаотично движење, па поради тоа доаѓа до чести меѓусебни судири. Притоа тие си заемнодејствуваат. На сликата 1 е даден приказ на модел на гас изведен со пинг-понг топчиња што се движат хаотично кога оддолу ги дуваме со фен.



Сл. 1. Моделот на гас: хаотично движење на пинг-понг топчиња во мрежеста корпа, дувани од долу со фен.

Во многу случаи судирите можат да се разгледуваат како еластични, при што важат законите за запазување на импулсот и кинетичката енергија. Во изучувањето на поведението на гасовите многу се користи грубиот модел на идеален гас, кај кој се занемарени потенцијалната енергија на заемнодејството и димензиите на честиците. Класичната механика и молекуларно-кинетичката теорија се често пати се доволни за да се изучи поведението на гасот. Инаку, земјината атмосфера според своето поведење во пониските слоеви може да се смета за идеален гас.

Модел на плазма

Плазмата е најраспространетата состојба на материјата, гледано во космички размери. Во ова состојба са наоѓа околу 99% од материјата во целата Вселена. Се покажало дека ѕвездите се, всушност, плазмени топки, а во плазмена состојба се наоѓа и материјата во меѓузвездниот простор. Но, во земските размери состојбата плазма се сретнува сосем ретко, т.е. ја има кај некои атипични природни појави како што е поларната светлина (сл.2) или во светлечкиот канал на молњата.

Инаку плазмата може да се разгледува како гас, но суштествено е тоа што во него постојат како наелектризирани честици, јони и електрони, така и неутрални атоми. Во

21. Физика на материјалите

целина плазмата е електронеутрална, но во неа на одредени места може да дојде до локално нарушување на електронеутралноста и тоа да предизвика движење на наелектризираните честици од околината. Така може да дојде до натрупување на спротивни полнежи на определено растојание околу местото на нарушувањето.



Сл. 2. Плазма: поларна светлина.

Модел на кондензирана материја

Со исклучок на воздухот, сите други материи на Земјата се наоѓаат во кондензирана состојба. Структурата во кондензираната средина е таква што честиците на градбата се распоредени толку блиску, што нивните електронски облаци се преклопуваат па поради тоа валентните електрони силно си заемнодествуваат.

Структурата и својствата на кондензираната средина тешко можат да се објаснат и разберат без да се искористат законите на квантната механика.

Во кондензирани средини спаѓаат:

- кристалите кои се најдобро проучениот облик на кондензирана материја со правилно подредени градбени честици; (сл. 3 и 4) кај кои постои подреденост на далечина или таканаречен **далечен поредок**
- аморфните материјали (на пр. стаклата);
- течностите (вклучувајќи ја и водата-насушна течност за опстојување на животот на Земјата),
- течните кристали,



Сл. 3 .Кристал на кварц

- биолошките структури кои влегуваат во составот на живите организми (белковини, нуклеински киселини).

Како кондензирана средина се третираат и полимерите кои се создаваат по вештачки пат.



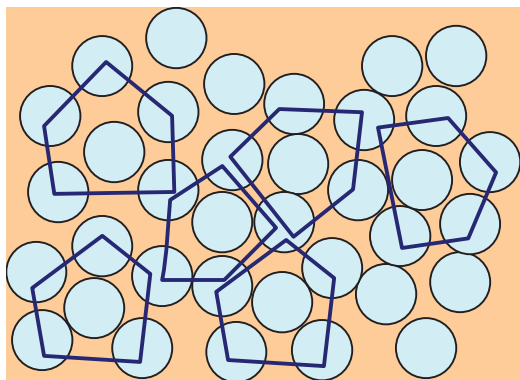
Сл. 4. Кристал од снегулка со таканаречена фрактална геометрија

Течности

Течноста е агрегатна меѓусостојба помеѓу гасната и цврстата фаза. Од тие причини течноста има некои својства еднакви со тие на гасовите, но и својства кои се слични со својствата на цврстите тела. На пример, течноста, како и цврстото тело, при константна температура има постојан волумен, а слично на гасовите ја има формата на садот во кој се наоѓа.

21. Физика на материјалите

Некои експерименти покажале дека молекулите на течноста се поставени според одреден ред кој се воспоставува само во непосредната близина на некој молекул, додека подалеку од него, тој се губи. Таквото својство на подреденост се нарекува **близок поредок**, кој е илустриран на сликата 5.



Сл. 5. Близок поредок на подреденост на молекулите кај течностите.

Од сликата може да се види дека кај течностите не постои далечен поредок кој би значел повторување на молекуларниот ред, кој е својствен за целото тело. Ваков поредок е својствен за цврстото тело.

Инаку, топлинското движење на молекулите во течноста може да се претстави со осцилирање околу рамнотежната положба, со повремено прескокнување во нова рамнотежна положба на некое растојание што е ред големина на димензиите на молекулите на течноста. На тој начин молекулите многу бавно се преместуваат и се движат низ целиот волумен на течноста. Времетраењето на осцилирањето на еден молекул од течноста околу рамнотежната положба е различно и зависи од составот на течноста и температурата.

Со зголемување на температурата молекулите од течноста добиваат повисока кинетичка енергија, стануваат поподвижни, па почесто ја напуштаат рамнотежната положба околу која осцилираат.

Подвижноста на молекулите на течноста се манифестираат при појавата дифузија или вискозност на течноста. Експериментите укажуваат на тоа дека со зголемување на температурата, поради поизразено топлинско движење, дифузијата на течноста е сè побрза. При зголемување на температурата, и вискозноста на течноста, поради сè помалите меѓумолекуларни врски, станува помала.

При доволно висока температура, кинетичката енергија на молекулите ќе порасне, ќе го наруши блискиот поредок на подреденост и ќе помине во гасна сосема неподредена, хаотична состојба.

Кратко резиме

- агрегатни состојби (фази)
- модел на гас
- модел на плазма
- модел на кондензирана материја
- течност
- близок поредок
- далечен поредок

Прашања, задачи и активности

1. Дали се разликува молекулот на мраз и молекулот на вода?
2. Кои се основните разлики меѓу трите агрегатни состојби на супстанцијата?
3. Зошто плазмата може да се смета за четврта агрегатна фаза?
4. Побарајте во библиотека некоја книга, или на интернет веб страница, и прочитајте пошироко за плазмата во земски услови и плазмата во вселената.



плазма (грч. $\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$) = создавам, обликувам, оформувам, уметничко дело

21. 2. АТОМСКИ И МОЛЕКУЛАРНИ ВРСКИ

Природата на хемиските врски

Основните сили што ја определуваат структурата на цврстите материи се електричните сили на заемнодејство помеѓу валентните електрони.

Нека вкупниот број честици што ја сочинуваат кондензираната материја го означиме со N . Работата што треба да ја изврши некоја надворешна сила за да ја разгради целата таа кондензирана средина, т.е. градивните честици да се донесат на растојанија на кои повеќе нема да си заемнодејствуваат, да ја означиме со A .

Тогаш се воведува поим **енергија на врската** (W) еднаква на:

$$W = \frac{A}{N} . \quad (1)$$

Оваа величина се мери во eV/атом.

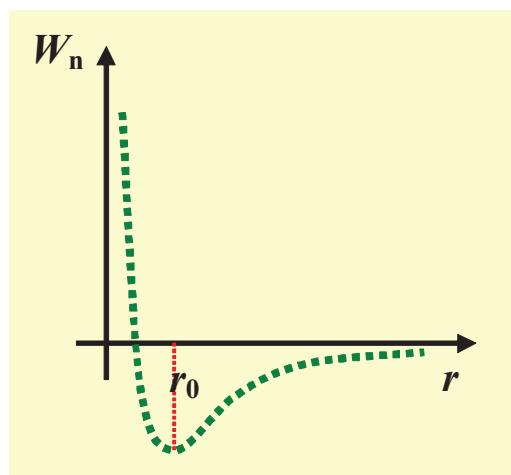
Во зависност од видот на честиците што си заемнодејствуваат во кондензираната средина (јони, неутрални атоми или молекули) а исто така и во зависност од тоа дали секој валентен електрон е сврзан со еден, два или повеќе атоми од околината, можат да се појават неколку вида врски. Тие врски во чиста материја или во смеса ја определуваат структурата на кондензираната средина.

Постојат три основни модели на врзување на атомите во формирањето на цврстата материја, и тоа: **јонска, ковалентна и метална врска**. Послаби врски од типот **на Ван-дер Валс** или **водородната врска** се, исто така, важни, каде што механизмите на цврсто врзување не се доминантни.

Јонска врска

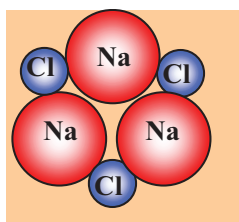
При формирањето на некои молекули или кристали доаѓа до комплетно преоѓање на еден или повеќе електрони од еден атом на друг. Притоа, атомот што изгубил електрон станал позитивно наелектризиран, додека, пак, атомот што добил електрон станал електро-

негативен јон. На тој начин овие два атома се држат заедно со помош на привлечната електрична сила. Инаку, јонската врска обично настанува помеѓу атоми, од кои едниот има еден електрон во последната електронска обвивка, а другиот има речиси целосно исполнета електронска обвивка. Така, на пример, алкалните метали, како што се калиумот (K) и натриумот (Na), кои имаат само еден валентен електрон, лесно влегуваат во јонска врска со халогените елементи, на пример хлорот (Cl) или флуорот (F) кои имаат по едно непополнето место во последната електронска лушпа. Создадените јони во случајот на NaCl се привлекуваат со Кулоновите сили, па потенцијалната енергија (W_n) на заемнодејство на јоните изгледа како на сликата 1.



Сл. 1. Потенцијална енергија кај Кулоновото заемнодејство.

На сликата 1 r претставува растојанието меѓу јадрата на двата јона. Може да се види дека зависноста има минимум вредност на меѓујонското растојание r_0 при кое силата на заемнодејствие меѓу јоните станува еднаква на нула (сл. 1). Во многу случаи можеме да сметаме дека јоните си заемнодејствуваат како тврди сфери распоредени толку густо колку што овозможуваат надворешните електронски обвивки.

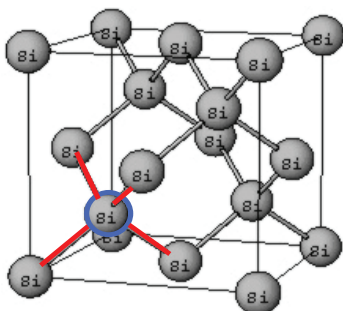


Сл. 2. Модел на NaCl.

На сликата 2 е даден моделот на распоредот на јоните кај кристалот на NaCl. Кај него валентниот електрон од натриумот како да му припаѓа на хлорниот јон.

врска, т. е. и таа изнесува неколку eV/атом. Имено, толкава е енергијата што треба да се предаде на еден електрон од електронскиот пар, за да се разруши спарувањето, а електронот може слободно да се придвижи низ кондензираната средина. Местото од каде што си заминал еден електрон се однесува како место што има потреба да зафати еден електрон, т.е. како позитивен полнеж и се вика **шуплина**.

Ковалентна врска

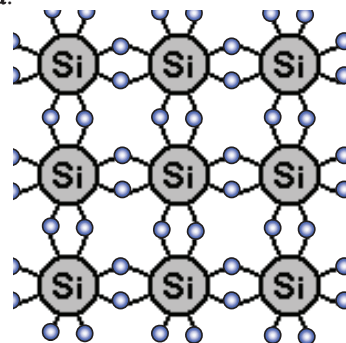


Сл. 3. Ковалентна врска помеѓу силициумов атом во кристалната решетка и четирите најблиски соседи.

Најтипичните цврстотелни средини со ковалентна врска се оние што се изградени од атоми од четвртата група на периодниот систем: јаглерод (C), силициум (Si) и германиум (Ge). Во кристалите на силициумот и германиумот, еден атом се наоѓа во центарот на еден тетраедар, а други четири атоми се сместени во аглиите на тетраедарот (сл. 3). Кај силициумот и кај другите претставници, секој од четирите валентни електрони се сврзува со по еден од валентните електрони на своите соседи (сл. 4) и формираат електронски парови кај **ковалентната врска**. Врските се јавуваат како резултат на сили што имаат електрична природа, но имаат квантен карактер. Спарувањето помеѓу електроните настанува само помеѓу електронски парови кои имаат спротивни спинови (+1/2 и -1/2).

Густијата на електронскиот облак е најголема некаде на средината од отсечката што ги сврзува соседните атоми.

Енергијата на ковалентната врска не се разликува многу од енергијата на јонската



Сл. 4. Спарување на електроните од соседните Si - атоми.

Инаку сите соединенија со добро изразени полупроводни својства се врзани со ковалентна врска: GaAs, InSb, и други соединенија од групата III-V од преиодниот систем на елементите.

Метална врска

Кај металите доаѓа до колективизација на електронските облаци од валентните електрони, т.е. веројатноста за наоѓање на еден електрон околу определен јон е иста за сите јони во металот. Густијата на електричниот полнеж е голема, па јоните се однесуваат како да се нурнати во "електронско море". Валентните електрони се движат слободно низ целиот волумен на металот, слично како молекулите на еден гас. Затоа зборуваме, за електроните низ металот како за електронски гас.

Енергијата на врската кај металите, всушност, претставува сума од:

- енергијата на електричното привлекување меѓу позитивните јони и електронскиот гас кој го сочинуваат заедничките валентни електрони;

- енергијата што се должи на дејството на силите на замена (хибридизација). Овој вид сили има квантномеханички карактер и произлегува од спарувањето на електроните со спротивни спинови (хибридизација);
- кинетичката енергија на електроните. Поради сите овие фактори, енергијата на еден слободен електрон во металот е неколку електронволти помала од енергијата на еден електрон во вакуум во близината на металот. Енергијата што му е потребна на електронот да ја напушти металната површина и да отиде во вакуум) се вика **излезна работа**. Со оваа величина веќе се запознавте (видете поглавје Фотоефект). Поради тоа со додавање енергија однадвор (со осветлување или загревање на металот) што е еднаква или поголема од излезната работа на електронот, може да се добие емисија на слободен електрон. Инаку, постоењето слободни електрони е причина за големата електрична и топлинска спроводливост кај металите.

Ван дер Валсово врзување

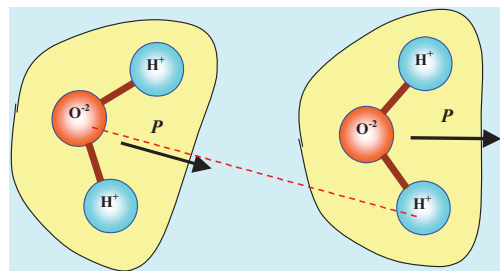
Секои два раздвоени молекула се привлекуваат еден со друг со помош на електростатички сили, наречени Ван дер Валсови сили. Така ќе се привлечат и кои да било два атома што не формираат јонска или ковалентна врска. Ван дер Валсовите врски што се формираат помеѓу ваквите атоми се многу послаби од они што претходно ги опишавме. При доволно високи температури овие сили не се доволно големи за да го надминат топлинското движење и растурање на атомите. Но при доволно ниски температури, силите од термичкото движење на атомите (молекулите) се занемарливо мали во однос на Ван дер Валсовите сили, па тоа овозможува молекулите при ладење на гасот да кондензираат во течност а потоа во цврсто тело. Инаку, хелиумот е единствениот елемент што не поминува во цврста состојба на атмосферски притисок. Ван дер Валсовите сили произлегуваат од заемнодејството на **диполните моменти** на молекулите. Ваквите молекули се **поларни**. Кај нив молекулот нема симетрична распределба на полнежите, туку на една страна преовладува негативен, а на друга

позитивен полнеж, па молекулот претставува **електричен дипол** (сл.5).

Основна нивна карактеристика е **диполен момент** на молекулот. *Под диполен момент се подразбира вектор чија големина е еднаква на производот од едниот од еднаквите полнежи на диполот и нивното меѓусебно растојание.*

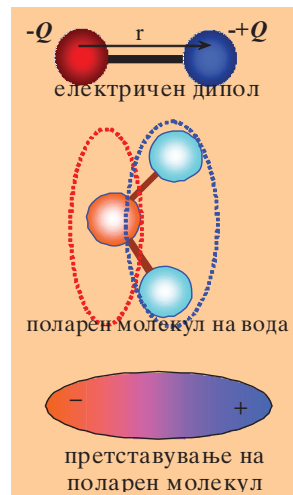
Правецот се поклопува со правата што ги поврзува полнежите, а насоката е од негативниот кон позитивниот полнеж, $\vec{P} = Q\vec{r}$.

На сликата 6 е прикажано како два поларни молекула (диполи) со еднакви диполни моменти (на пример, двз водени молекула) се врзуваат.



Сл. 6. Меѓусебно врзување на два H_2O молекула поради замнодејство на диполните моменти. Диполните моменти на секоја од молекулите се означени со P .

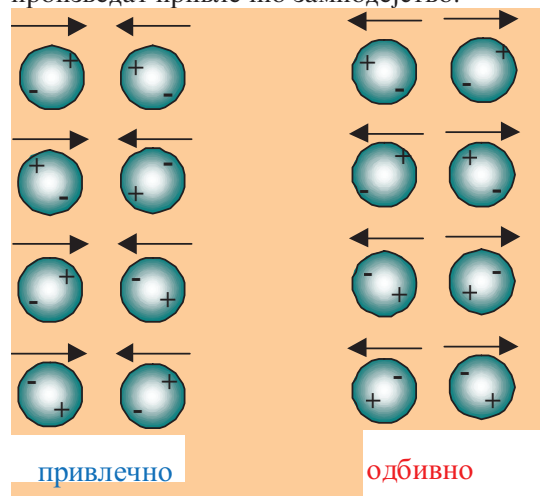
Еден неполарен молекул, исто така, привлекува друг неполарен молекул со **Ван дер Валсова сила**. Иако електричниот диполен момент на неполарните молекули во просек е еднаков на нула, кај нив, сепак, се случуваат некакви внатрешни промени на заемната местоположба на полнежите, па во даден момент тие, сепак, имаат диполен момент



Сл.5. Диполни молекули *Правецот се поклопува со правата што ги поврзува полнежите, а насоката е од негативниот кон позитивниот полнеж, $\vec{P} = Q\vec{r}$.*

21. Физика на материјалите

различен од нула. Така, кога два неполярни молекула ќе дојдат близу еден до друг, брзите промени во диполните моменти тежат да произведат привлечно замнодејство.



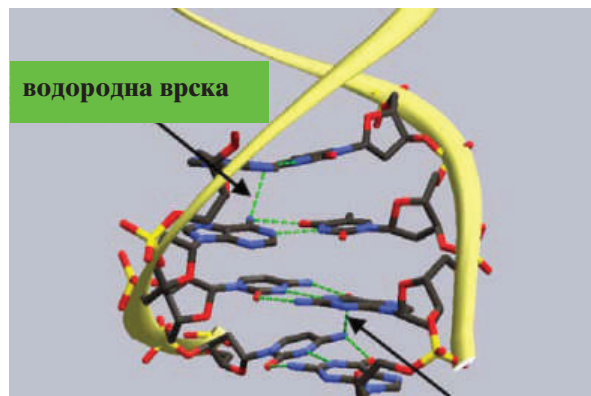
Сл. 7. Ван дер Валсово привлекување на молекулите што имаат среден диполен момент еднаков на нула.

Возможна е повремена ориентација на молекулите што доведува до привлечно заемнодејство. Ваквите ориентации за привлечно заемнодејство се случуваат со поголема веројатност отколку оние за одбивните, молекулите се привлекуваат (сл. 7).

Водородна врска

Водородната врска е уште еден механизам на врзување кој има огромно значење. Тој механизам за држење на групи молекули во заедница е најчесто одговорен за меѓусебно поврзување на гигантски молекули и полимери за да си ја запазат својата фиксна форма. Така, за врзаноста на добропознатата двојно-спирална структура на молекулот на ДНК е одговорна водородната врска помеѓу страничните гранки кои се составени од наизменично наредените јаглехидрати и фосфатни групи помеѓу спиралите (сл. 8). Водородната врска се формира поради тоа што еден протон (водородното јадро) го делат два атома (обично два кислородни атома). Ова делење на еден ист протон е слично како

делењето на еден ист електрон при формирањето на ковалентната врска. Ваквата врска е овозможена поради малата маса на протонот, и поради непостоењето на други (внатрешни) електрони во електронската обвивка, освен единствениот.



Сл. 8. Водородна врска помеѓу страничните гранки на спиралите од ДНК (зелени испрекинати цртки).

Кратко резиме

- | | |
|--------------------|-------------------------|
| - јонска врска | - Ван дер Валсова врска |
| - ковалентна врска | - електричен дипол |
| - шуплина | - момент на диполот |
| - метална врска | - водородна врска |
| - излезна работа | - енергија на врската |

Прашања, задачи и активности

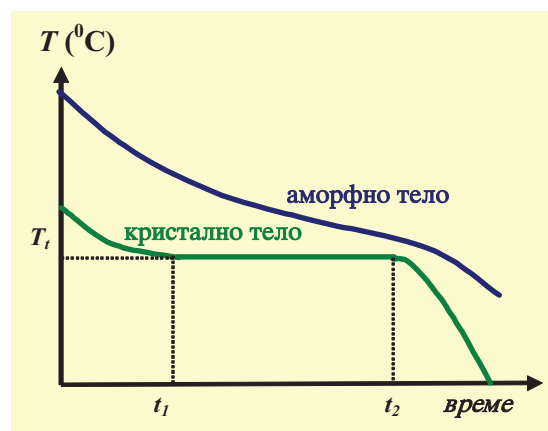
1. Кои сили се причина за која и да било од молекуларните врски?
2. Дали еден јонски молекул може да се смета за дипол.
3. Колкав е диполниот момент P_e на диполот што го прават два полнежа со големина $Q = 0,51 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, ако се тие на меѓусебно растојание $r = 0,96 \cdot 10^{-10} \text{ m}$?
(Одговор : $P_e = 0,48 \cdot 10^{-29} \text{ Cm}$)

21.3. КРИСТАЛНИ И АМОРФНИ МАТЕРИЈАЛИ

Кога на некоја супстанција што се наоѓа во течна состојба и се снижува температурата, таа ќе помине во цврста состојба. При ладењето доаѓа до формирање на кристални цврсти тела или аморфни тела кои, според поновите научни сознанија, повеќе не се сметаат за цврсти, туку за преладени течности.

Имено, при рамномерно ладење, кај некои материјали температурата на течноста рамномерно паѓа до некоја вредност (точката на топење $-T_i$), кога се појавуваат мали кристали и започнува втврдувањето. Тогаш температурата престанува да паѓа, иако ладењето и понатаму продолжува (сл. 1). Задршката на температурата на точката на топење (втврдување) останува во временскиот период помеѓу t_1 и t_2 , сè додека целата течност не се претвори во цврста агрегатна состојба. Вака се однесуваат **кристалите**.

Кај некои други материјали, при втврдувањето се забележува континуирано паѓање на температурата (без застој) а едновремено стврдување на течноста. Тоа се **аморфните материјали**.



Сл. 1. Стврдување кај кристални и аморфни супстанции.

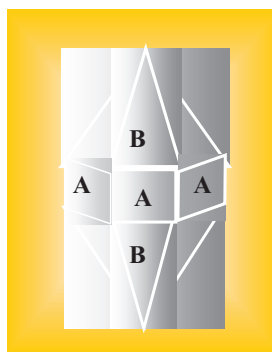
Кристалните тела може да бидат монокристали или поликристали.

Ако се обезбедат поволни услови при самото стврдување, тогаш може да се добие **монокристал**.



Сл. 2. Еднакви кристали од ист материјал.

Монокристалот има правилна форма, ограничен е со рамни и мазни страни со рамни гранични рабови. Монокристалите од иста супстанција имаат сличен геометриски облик, кој е типичен за таа супстанција, па тоа помага за препознавање на супстанцијата (сл. 2). Во дадени услови може една страна од кристалот несразмерно побрзо да расте отколу преостанатите. Важно својство кај монокристалите е тоа што аглите помеѓу соседните рамнини се запазуваат. Така аглите помеѓу соседите А и А, В и В, и А и В се секогаш исти (сл. 3).



Сл. 3. Меѓусебните агли меѓу соседните рамнини кај сите монокристали од иста супстанција се еднакви.

Врз основа на надворешната форма на монокристалот не може сосем сигурно да се каже за која супстанција се работи со помош на мерење на аглите помеѓу соседните страни. На пример, монокристалот од готварската сол (NaCl) најчесто има форма на коцка, но се јавува и во форма на правоаголни паралелопипеди. Кај монокристалот од оваа

21. Физика на материјалите

супстанција аглие помеѓу кои било две соседни страни е прав (90°). Досега кажаното се однесува само на природни необработени монокристали. Со разни постапки на обработка, на кристалот може да му се даде која било форма.



Сл. 4. Монокристал од силициум (лево) и од него пресечен монокристален диск (десно) што служи како основа за правење на интегрирани кола (чипови). Од овој диск ќе се фабрикуваат 20-25 чипови.

Постапката за производство на интегрирани кола (чипови), инаку започнува со правење на монокристал од силициум којшто, потоа, со сечење се доведува во форма на кружни плочки (сл. 4). На нив се нанесуваат другите полупроводни слоеви.

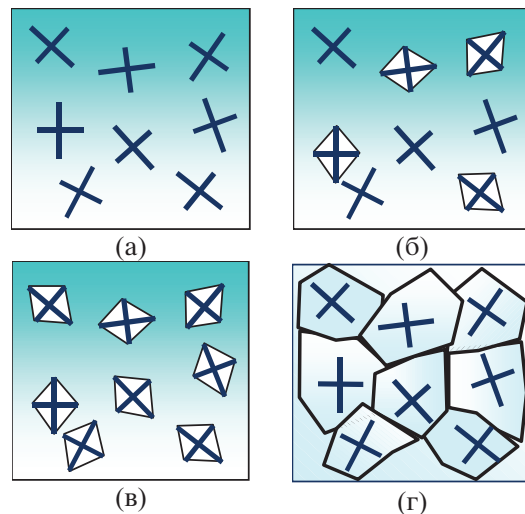
Важна одлика на монокристалите е тоа што следниве физички својства се менуваат во зависност од правецот во кристалот:

- коефициент на топлинско ширење,
- диелектрична пермеабилност,
- топлинска спроводливост,
- тврдост,
- специфичен електричен отпор,
- индекс на прекршување и др.

Тоа значи дека овие физички величини покажуваат различна големина во различни правци. Нееднаквоста на физичките карактеристики во различните правци се нарекува **анизотропија**.

Поликристалите настануваат кога преминот од течна во цврста состојба се случува со појава на таканаречени центри на кристализација во течноста (означени со

крсчиња на сликата 5(a)). Од нив по некое време се формираат мали одвоени кристалчиња со правилна форма, а истовремено се формираат и нови центри (сл. 5б). Во текот на растењето тие добиваат толкави димензии што почнуваат да се допираат едни со други, со што е посметан нивниот правилен раст, па почнуваат меѓусебно да сраснуваат. На крајот од стврднувањето се добива поликристал кој се состои од многу мали, меѓусебно споени, кристалчиња со неправилна форма (сл. 5г). Кристалчињата се нарекуваат кристални зрнца. Инаку, поликристалични се мразот, металите и легурите, полупроводниците и др.



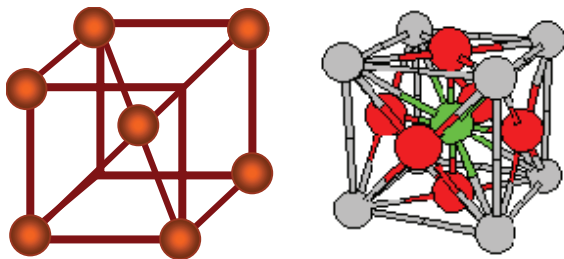
Сл. 5. Фази во формирање на поликристал (замрзнување на вода) од центри на кондензација (а) до поликристал (б).

Иако се составени од голем број монокристални зрнца, секое засебно покажува анизотропија, **поликристалите се изотропни** (својствата им се исти во сите правци низ волуменот). За разлика од нив, монокристалите се анизотропни. Бидејќи бројот на овие зрнца е огромен, а тие се распоредени и ориентирани хаотично, тогаш физичките величини во секој правец имаат еднаква вредност, па поликристалите, иако составени од монокристали, се изотропни.

Аморфните тела се, исто така, изотропни, иако од слични причини.

Кристална решетка (ред на далечен поредок)

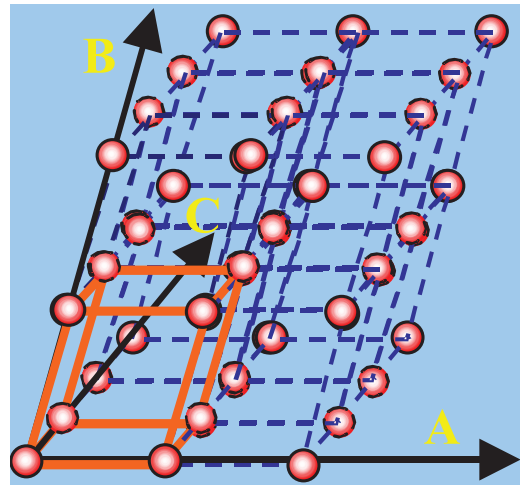
Забележано било дека кога ќе се скрши монокристал настанатите делчиња, иако имаат различна големина, имаат сличен правилен облик. Тоа ги навело научниците на мислата дека монокристалот е составен од множество од правилно распределени кристални клетки. Врз основа на научните истражувања со сигурност се говори за тоа дека кристалите се изградени од јони, атоми или молекули кои се правилно распределени во просторот и заземаат непроменливи меѓусебни положби, нижејќи се во сите три просторни правци. Севкупноста од тие положби се нарекува **кристална решетка**. Местата каде што се сместени атомите (јоните) на кристалот се нарекуваат **јазли на кристалната решетка**. Основниот градбен елемент на кристалната структура што го пополнува просторот на кристалот е **елементарната кристална клетка** која може да се транслира во сите три просторни правци. На сликата 6 се дадени елементарните клетки од специфични видови кубни решетки.



Сл. 6. Елементарна клетка од специфични видови кубни решетки.

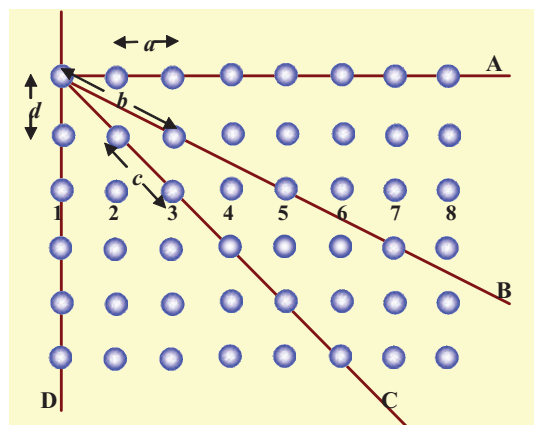
Со сложување на елементарните клетки во сите три просторни правци се добива целата кристална решетка (сл. 7). Главната особина на таквата структура е просторната периодичност кои ја чинат **подреденоста на далечина** на кристалот.

По должината на кој И да било правец што е повлечен низ центарот на една честица се сместени центрите на други честици на еднакви растојанија. За разните правци А, В, С,



Сл. 7. Со translација на елементарната клетка во три просторни правци се добива монокристалот.

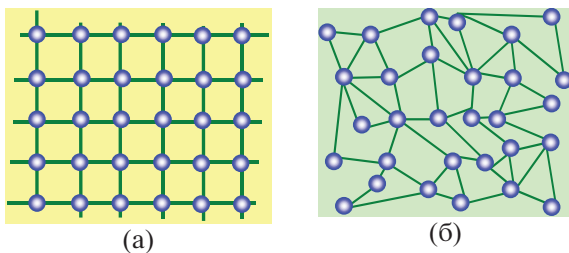
Д овие растојанија се различни: a , b , c , d . Доколку е позната положбата на една честица (на пример честицата 1 од рамнинскиот пресек на кристалот, сл. 8), растојанието до 5-тата, 10-тата или стотата честица во некој правец од кристалот е целосно определена со растојанието до соседната (на пример честицата бр. 2). Така на пример растојанието од 1 до честицата 3 во правецот А изнесува $3a$. А растојанието до 999-тата честица во истиот правец би изнесувала $999a$.



Сл. 8. Еднакви меѓучестицни растојанија по должината на сите правци (А, В, С и D).

Сега може да се каже која е суштинската одлика на сите кристали (моно и поли). Тоа секако не може да биде анизотропијата и правилната геометриска форма, зашто ова е одлика само на монокристалите. Карактеристиката според која кристалите се разликуваат од аморфните цврсти тела се состои во тоа што нивните честици (јони, атоми, молекули) се правилно и периодично распределени во просторот, па постои тродимензионална подреденост во нивната структура (сл. 9). Кога просторната подреденост го зафаќа целото тело, тогаш се работи за монокристали. Подреденоста кај монокристалот сосема ја објаснува неговата анизотропија. Така, на пример, различната цврстина во различни правци е последица на тоа што во даден правец на еднакви растојанија се распоредени еднаков број честици, различен од бројот во некој друг правец. Монокристалот е најцврст во правецот со најголема густина.

Познато е дека при одредени услови на ладење при стврднувањето може да се добие и цврста фаза без никаква просторна подреденост (сл. 9б), т.е. аморфен материјал.



Сл. 9. Подреденост на атомите (јоните) во едно (а) кристално и (б) аморфно тело.

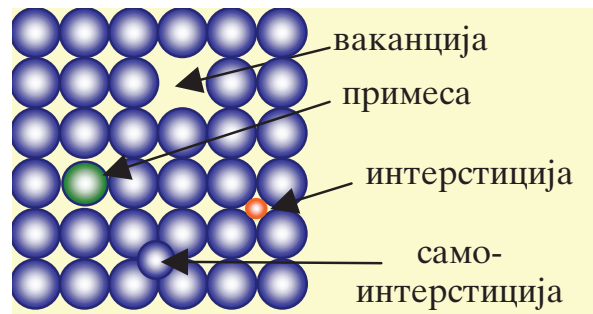
Во поново време аморфните материјали повеќе не се класифицираат како цврсто тело, туку како **преладена течност**. Сметајќи ги аморфните материјали за течности со многу голем коефициент на вискозност, кај нив можат да се објаснат многу физички својства.

Дефекти во кристалната решетка

Сосем правилен распоред на градителите на кристалот постои во поголеми или помали области. Но во монокристалот како целина

постојат отстапувања од идеалната периодична структура кои се нарекуваат **дефекти на кристалната решетка**.

Постојат неколку типа дефекти (сл. 10) што можат да се класифицираат како точкести и линиски дефекти, кои значително можат да влијаат врз физичките особини на кристалот.

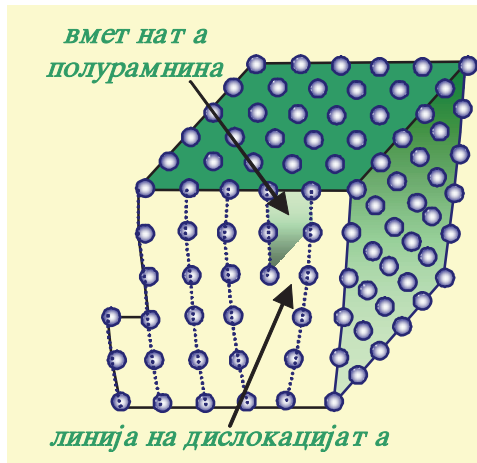


Сл. 10. Неколку вида точкести дефекти во кристалната решетка.

Точкестите дефекти претставуваат локални нарушувања во правилноста на распределбата на атомите (јоните или молекулите) во кристалната решетка. Еден вид точкест дефект се **ваканциите** (сл. 10)-места во јазлите на решетката каде недостигаат атоми (јони или молекули). Меѓујазолните или таканаречените **интерстицијални** честици се точкести дефекти што ги прават дополнителните (вишокот) честици кои се сместени помеѓу јазлите на честиците. Интерстицијалите можат да бидат од истиот вид атоми како оние од кои е изградена решетката (**самоинтерстицијали**) или од друг вид атоми (**интерстицијали**). Третиот вид дефекти се **примесите**, т.е. честиците што замениле една честица од матичните атоми во решетката и се вградиле во неа на тоа место.

Точкестите дефекти играат огромна улога во промената на оптичките и електричните својства на материјалот бидејќи секој од нив може да се однесува како вишок или недостиг на електрон или како стапица за шуплина или електрон.

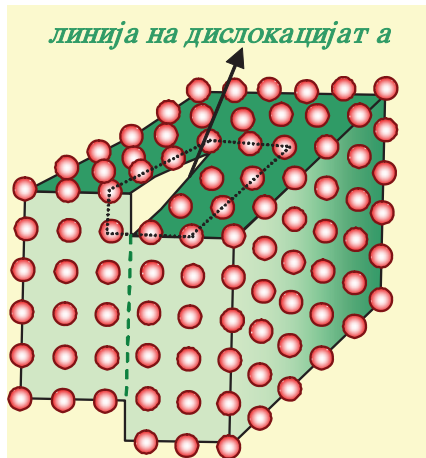
Линиските дефекти, за разлика од точкестите, не се локализирани на едно место, туку се простираат по должината на некоја



Сл. 11. Линиска рабна дислокација

непрекината линија и се нарекуваат **дислокации**. Дислокациите можат да бидат **рабни** или **завојни**.

На сликата 11 е даден приказ на **рабна дислокација**. Како што може да се види, идеалната структура е нарушена поради постоењето на вметнатата полурамнина помеѓу две рамнини. Кај овој вид дислокација деформацијата на структурата е најголема во близината на почетокот на полурамнината, па затоа рабната дислокација се смета дека е, всушност, линија по должината на таа полурамнина.



Сл. 12. Линиска: завојна дислокација.

Завојната дислокација (сл. 12) во простор дава форма која би настанала со засекување на некој правоаголник, а потоа

притискање на двете спротивни страни на засекот во спротивни насоки, паралелно со таа линија. Линијата долж која настанува деформацијата на решетката се вика **завојна дислокација**.

Објаснете ги следниве поими:

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| - монокристал | - точкести дефекти |
| - поликристал | - примеси |
| - кристална решетка | - интерстиција |
| - јазли на решетката | - вакансии |
| - аморфни тела | - завојна дислокација |
| - елементарна клетка | - рабна дислокација |

Прашања, задачи и активности

1. Во една тегла направете концентриран раствор од топла вода и обична готварска сол. По должината на оската на теглата, во растворот потопете едно вертикално поставено конче (проврете го низ капакот за да се држи). Оставете го така неколку дена и набљудувајте како на крајот се зафаќаат и секојдневно растат кристалчиња.

2. Ако сакате да се уверите во анизотропијата на некој монокристал што го имате (на пример, кварцно стакленце) направете го следниов експеримент: премачкајте ја едната од рамнините на кристалот со восок од стопена свеќа. Кога ќе се олади, забодете во средината една долга игла. Другиот крај од иглата загревајте го (на пример со леткум). Ќе забележите дека топењето започнува околу иглата и се шири во форма на елипса. Тоа значи дека топлинската спроводливост на монокристалот не е еднаква во сите правци.



crystalos (грч.)=лед, ледообразен
amorfos (грч.)=безобличен

Отворете го сајтот:

<http://www.uta.edu/optics/sudduth/crystals/>

Разгледајте некоку модели на неколку карактеристични кристални решетки од некои познати материјали.

21. 4. ТЕЧНИ КРИСТАЛИ

Течните кристали се присутни во нашето секојдневие, почнувајќи од дисплеите на рачните часовници, калкулаторите, компјутерите, камерите, па се до мониторите со огромни димензии, командните табли кај навигациските системи, и многу други уреди.



Течните кристали се среќаваат и во биолошкиот свет. Ги има, на пример, во холестеринот и неговите естри во живиот организам, во мускулните влакна и друго. Многу се значајни испитувањата на течните кристали во биологијата и медицината поради нивната улога што ја имаат при размената на материјата во живите организми.

Во современата наука интензивно се работи на синтетизирање нови видови течни кристали, а особено нивно комбинирање во течнокристални смеси (кои може да содржат и по дваесет различни компоненти), со цел да се добијат што по погодни карактеристики за нивна примена во технологијата.

Со оглед на нивната поголема практична примена во поново време се интензивираат и истражувањата на нивните физички својства, се дизајнираат нови комбинации од полимерни супстанции. Течните кристали досега се незаменливи во дисплеј-технологијата.

Поделба на течните кристали

Во природата постојат органски материи кои не преминуваат на класичен начин од цврста во течна состојба, туку минуваат низ повеќе фази на премин. Во овие фази тие имаат механички и електромагнетни својства кои се негде помеѓу цврстата кристална и течната состојба. Поради тоа, овие материјали се наречени течни кристали, а тие фази технички се нарекуваат **мезофази**.

Течните кристали, обично, се ароматични органски супстанции со молекули и групи кои имаат издолжена, прачкеста или цилиндрична форма и се однесуваат како диполи.

Течите кристали кои се состојат од чисти органски молекули кај кои фазниот премин од цврста во течна состојба настанува со промена на температурата, се наречени **термотропни течни кристали**.

Постојат и некои видови молекули со прачкеста структура, кои се наоѓаат во некој раствор, кои не пројавуваат температурна зависност. Кај нив фазниот премин настанува со промена на концентрацијата. Овие, пак, молекули спаѓаат во групата **лиотропни течни кристали**.

Кај термотропните течни кристали преминот од цврста во течна кристална состојба настанува при точно определена температура на топење, што е нивна важна карактеристика. Исто така, особено е значајна и температурата на премин од течно-кристална во течна (изотропна) состојба или таканаречената „температура на осветлување“.

Постоењето на различните меѓусостојби (мезофази) довело до класификација на течните кристали во две основни групи:

- нематски,
- смектички.

21. Физика на материјалите

Исто така постојат и

- холестерични течни кристали, кои се класифицираат како специјален вид нематски кристали.

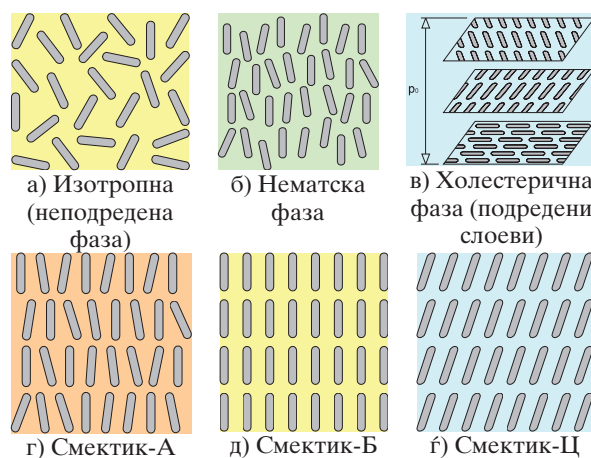
Главно, нематските течни кристали и нивните смеси се употребуваат за технологијата на дисплеите.

Смектичките течни кристали немаат позначајна комерцијална улога поради тоа што нивните молекули во електрично поле не се ориентираат униформно.

Нематските и смектички течни кристали, понатаму се делат на подгрупи.

Смектичките се јавуваат во подгрупи, и тоа: смектик-А, смектик-Б, смектик-Ц (фероелектричен смектик) и други.

На сл. 1. е даден едноставен шематски приказ на подреденоста на молекулите во различни типови течни кристали.



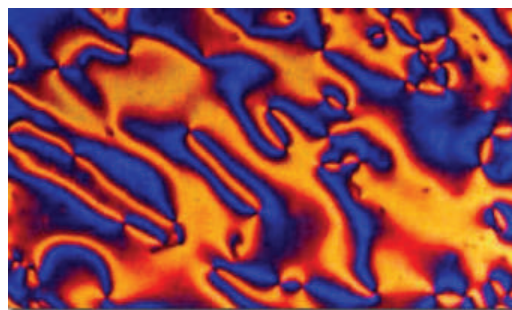
Сл. 1. Подреденост на молекулите во различни типови течни кристали.

Кај нематските течни кристали може да се набљудуваат области на подреденост на молекулите во даден правец, но не постои подреденост во однос на тежиштата (сл. 1б). Поради ваквата подреденост на молекулите, нематските течни кристали покажуваат анизотропија (просторна нееднаквост) во механичките, електричните, магнетните и оптичките својства. Токму тоа својство е искористено за нивната примена, особено во техниката на дисплеите.

Општо земено, кај течните кристали се јавуваат ефекти карактеристични за тврдо тело (како анизотропијата), но и ефекти карактеристични за течности кои се добри електрични изолатори. Но, тие поседуваат и некои специфични својства кои не можат да се набљудуваат ниту кај цврстите тела ниту кај течните супстанции.

Течните кристали не ја апсорбираат светлината од видливиот дел на спектарот, но поголем дел од примерокот изгледа млечно бел. Тоа се јавува заради светлинско расејување на границите на малите „микрорегиони“, т.е. области со многу добра подреденост на молекулите, додека подреденоста од една до друга област се разликува.

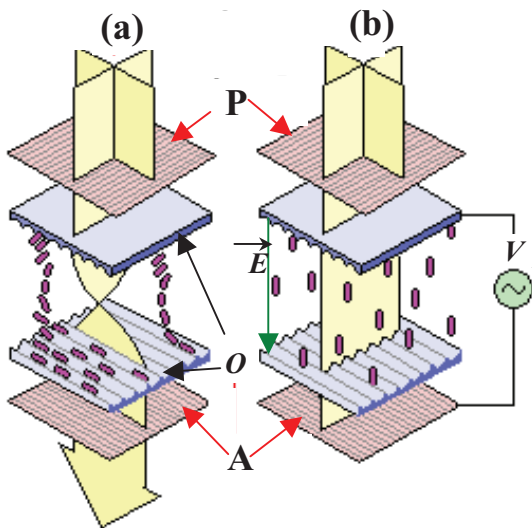
За да се набљудуваат одредени мезофази кај течните кристали, се употребува поларизационен микроскоп. Притоа, може да се види дека постои подреденост на молекулите во даден правец, во одредени региони. Тие ориентации на молекулите по региони се наречени текстури.



Сл. 2. Текстура на течниот кристал набљудуван под поларизационен микроскоп.

Како се подредуваат молекулите на течните кристали

Прва значајна примена на течните кристали била ТН (Twisted Nematic) ќелијата, чија што работа се заснова на ТВИСТ (twist) ефектот кај нематски течни кристали.



Сл. 2. Испитување на твист-ефектот кај нематски течен кристал (НТК): а) ТН-ќелија во отсуство на електрично поле. Р и А се вкрстени, а светлината поминува низ ќелијата (ВКЛУЧЕНО); б) ТН-ќелија под напон. Р и А се вкрстени и светлината не поминува низ ќелијата (ИСКЛУЧЕНО).

Твист-нематската (ТН) ќелија се состои од две просирни електроди (многу тенок спроводник нанесен на стакло), премачкани со тенок слој од супстанцијата полиамид. Овој слој служи за направи почетно подредување и ориентација на молекулите паралелно со електродите. Правецот на почетната ориентација е определен со правецот на полирање на ориентирачкиот слој. Така правците на полирање се нормални еден на друг, па поради тоа и молекулите се завртуваат за 90° во просторот помеѓу електродите.

Од горната и од долната страна на ќелијата се поставени поларизатор Р (оптички уред што ја пропушта само светлината по долживата на неговата поларизациона оска)) и анализатор - А (исто таков оптички уред што го прави истото како и Р) и тоа во правецот на почетната ориентација на секоја од електродите. Во просторот помеѓу електродите е сместен нематскиот течен кристал.

Кога се вкрстени поларизаторот (Р) и анализаторот (А) (сл. 2а), кои се, инаку, паралелни на правецот на полирање на електродите (О), тогаш течниот кристал во ТН

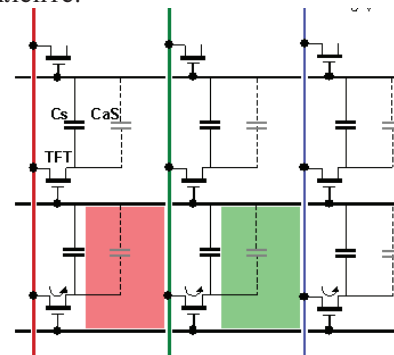
ќелијата ја врти поларизираната светлина што минува низ неа, па наместо темно поле (ИСКЛУЧЕНО), набљудувачот низ ќелијата, сепак, ќе набљудува светлина (ВКЛУЧЕНО).

Со донесувањето на напон V помеѓу електродите (сл. 2б), молекулите ќе се стремат да се ориентираат по должината на силовите линии на електричното поле. На тој начин ваквата ориентација на молекулите на течниот кристал ѝ овозможува на поларизираната упадна светлина да помине низ течниот кристал непроменета, па така светлината низ вкрстениот анализатор нема да помине (ИСКЛУЧЕНО).

Мала промена во аголот на молекулите низ ќелијата, т.е. мала варијација во приложениот напон создава огромна промена во трансмисијата, и може да даде цела палета нијанси од сосем темно до сосем светло.

Течните кристали во технологијата на LCD-TFT дисплеите

Екраните со течни кристали сега веќе се реалност. Електрооптичките дисплеј системи користат различен состав на течнокристални смеси, а се разликуваат и според начинот на адресирање (упатување на наредбата за вклучено или исклучено) на одделните пиксели од дисплеите.



Сл. 2. Пиксели кај TFT-LCD. Секое пикселче содржи по еден тенкофилмов транзистор (TFT) и LCD-ќелија.

Еден монохроматски LCD дисплеј се состои од матрица од вакви ќелии (пиксели) кои се напојуваат посебно за да ѝ се овозможи управување со трансмисијата на секоја од нив.

21. Физика на материјалите

Така, сликата кај овие дисплеи се формира од разните нијанси што ги произведуваат ќелиите.

Кај современите дисплеи се применува активно матрично адресирање кое се врши со помош на прекинувачи од TFT (тенкослојни транзистори). Така секоја течност-кристална ќелија си има свој транзистор, што дозволува до неа да стигне напонот или да се прекине напонот. TFT-LCD се користат за ТВ апликации, но наедно се и поскапи од катодните цевки (обичните монитори), но цената од година во година се приближува до онаа на комерцијалните катодни цевки. Максималната можна големина и цената се единствени фактори кои ја ограничуваат нивната примена.

Современите испитувања на течнокристалните смеси и нивните електрооптички карактеристики овозможува примена на течни кристали со негативна диелектрична анизотропија за правење на дисплеи во кои се применува ДАП ефектот, кој претставува двојно прекршување на светлината што може да се контролира со електрично поле. Со примена на оваа технологија се добиени колор дисплеи со време на одзив помало од 100 ms .

Течните кристали станаа неразделен дел од нашиот секојдневен живот, тие го освоија светот на електрониката и развија цела една индустрија за нивно производство и практична примена. Тоа се материјали на денешнината и на иднината.

LCD (Liquid Crustal Display) (анг.) = течнокристален екран

Малку историја

Течните кристали биле откриени во 1888 год. од австрискиот ботаничар Фридрих Рајницер кој го испитувал холестеролот. Тој, притоа увидел дека холестеролот се втечува на температура од 145°C , но не станува чиста течност, туку има млечен облик. Дури на температура од 179°C , течноста станувала проѕирна и бистра. Во 1904 година започнало синтетизирањето на течни кристали за научни истражувања, но дури на крајот од шеесеттите години Џејмс Фергасон открил дека холестеричните течнокристални супстанции се идеално погодни за употреба како температурни индикатори. Во тоа време бил конструиран и првиот алфанумерички дисплеј со течни кристали, но се уште без комерцијална примена. Дури во почетокот на седумдесеттите години од XX век станало јасно дека најголемата примена на течните кристали е во технологијата на дисплеите, откако претходно биле синтетизирани течни кристали што постојат во течнокристална состојба и на собна температура.

Кратко резиме

- | | |
|-----------------------|----------------|
| - течнокристална фаза | - нематски |
| - мезофази | - смектички |
| - термотропни | - холестерични |
| - лиотропни | - твист ефект |
| | - LCD |
| | - TFT-LCD |

21. 5. МЕТАЛНИ СТРУКТУРИ



Во текот на историјата металите одиграле и ќе играат главна улога во општествениот развој, преку развојот на техниката и индустријата. За да се употребуваат металите на најдобар можен начин, потребно е да се запознае нивната микроструктура, физичките и хемиските својства.

Науката што се занимава со проучување на методите кои се користат за добивање метали кои се употребуваат во науката и техниката, како и проучувањето на нивните својства што се во зависност од начинот на добивањето, се нарекува **металургија**.

Основни својства на металите

Под метали се подразбира група супстанции (хемиски елементи) кои можат да се опишат со следниве својства:

- на обична температура се цврсти (освен живата);
- ја запазуваат својата форма. Поголемиот број метали покажуваат и извесна пластичност и цврстина што е од големо техничко значење,
- хемиски се доста активни, лесно оддаваат електрони и прават хемиски соединенијач
- непросирни се и со голем сјај;
- поседуваат голема електрична спроводливост;
- електричната спроводливост им опаѓа со порастот на температурата;
- покажуваат добра топлоспроводливост.

За секој метал е важно да се познава неговата **точка на топење**. Точката на топење е температура при која металот се топи при

нормален атмосферски притисок. Се определува со мерење на промената на температурата на металот при неговото постојано загревање. Притоа, штом првото кристалче од металот ќе се претвори во течност, тогаш температурата на металот нема да расте (ќе остане константна)- сè додека и последното кристалче не помине во течна фаза, исто како што се однесуваат сите кристални супстанции (поглавје 3.3). Во следнава табела се дадени точките на топење на некои метали.

Метал	$T_f (^{\circ}\text{C})$
Sn	232
Au	1063
Cu	1083
Fe	1539

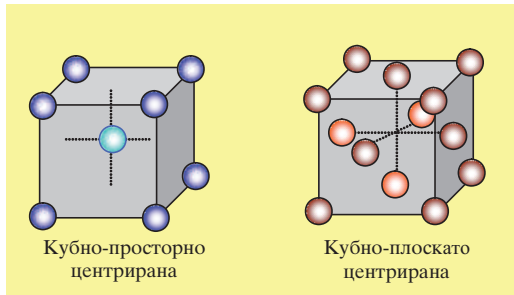
За времето на температурниот застој (платото), температурата на металот не може да порасне бидејќи сета доведена топлина се троши за раскинување на врските со другите кристалчиња. Оваа енергија се карактеризира со **специфична топлина на топење**. Тоа е енергија потребна да се даде на единица маса на даден метал на температурата на топење за таа сосема да се стопи.

Точката на топење е еднаква со точката на стврднување.

Металот поседува добри механички особини (можност за валање, ковање и извлекување во жица) во зависност од меѓуатомските врски. При пластична деформација на металот доаѓа до нарушување на кристалната решетка, па металот станува потврд и покрт. Затоа металите треба да се обработуваат на повисока температура за да си ја задржат својата првобитна структура.

Кристалната решетка е различна кај разните метали, но се разликуваат три главни типа решетки: кубна, тетрагонална и хексагонална. Ако во елементарната клетка е сместен по еден атом во секој агол од коцката тогаш решетката е кубна. Ако кон ова се додаде и по еден атом и на средината на секоја страна на коцката, тогаш решетката е кубно-плоскато центрирана. Доколку, пак, покрај атомите во аглиите има и еден атом во центарот на коцката, тогаш решетката се нарекува

кубна-просторно центрирана (сл. 1).



Сл.1. Кубична решетка

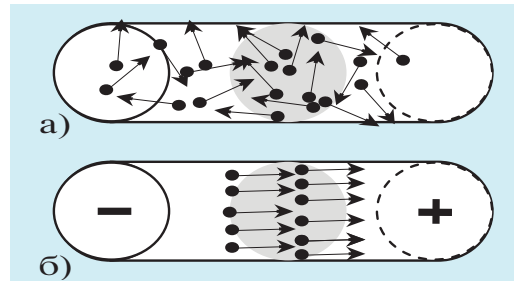
Модел на “електронски гас”

Некои од својствата на металите се поврзуваат со постоењето на слободни електрони во кристалот. Кога се во цврста состојба, металите имаат кристална структура, т.е. нивните атоми се распоредени во просторно геометријска мрежа - **кристална решетка**. Секој метал има своја карактеристична кристална структура. Инаку, силите што ги држат атомите на металот во кристалот се должат на металната врска од парот спроводни електрони што се формира помеѓу секои два соседни атома и кој е еднакво привлечен од секој од јоните кои се наоѓаат во јазлите на кристалната решетка. На тој начин валентните (периферни) електрони не се строго врзани за одредени атоми, туку се “колективизирани” – заеднички за сите позитивни јони на металниот спроводник. Тие слободно се движат по сиот волумен на спроводникот и рамномерно се распоредуваат во меѓупросторот помеѓу јазлите на решетката. **Концентрацијата на слободните електрони** зависи од валентноста на металот. Колку е поголема валентноста, поголема е и концентрацијата на слободните електрони. Така, на секој едновалентен атом одговара по еден слободен електрон, на двовалентен по два и т. н. Концентрацијата на слободните електрони во металите е од ред на големина 10^{28} слободни електрони на еден кубен метар. Се покажува дека концентрацијата на слободните електрони не се менува кога металот ќе се најде во електрично поле. Исто така, концентрацијата на слободните електрони практично не зависи

од температурата на металот.

Како се објаснуваат основните својства на металот?

Слободните електрони формираат таканаречен **електронски гас**. Инаку, овие електрони не припаѓаат повеќе ниту на еден од атомите, туку еднакво на целата кристална решетка. Кога во металот не постои електрично поле, слободните електрони се движат хаотично, при што тие трпат судири со јоните на кристалната решетка и меѓу себе. Поради тие судири големината на брзината и нејзиниот правец и насока на секој одделен електрон постојано се менува (сл.2а). Се покажува дека средната брзина на ова ненасочено, хаотично, топлинско движење на слободните електрони при собни температури, е од редот на големина на 10^5 m/s што е околу 1000 пати поголема брзина од средната брзина на молекулите на гасот при тие температури.



Сл. 2. Хаотично и насочено движење на електроните во металот.

Треба да се подвлече дека ова ненасочено движење на слободните електрони (сл. 2а) не претставува електрична струја. Тоа постои и кога металот е надвор од електричното поле

Ако металот се доведе во електрично поле (сл.2б) електроните во него ќе почнат насочено да се движат. Тие добиваат додатна брзина која е насочена спротивно од насоката на електричното поле. Треба да се истакне дека брзината на ова насочено движење на електроните, дури и при многу јаки струи, е многу мала, ред на големина од неколку милиметри во секунда. Меѓутоа, поради многу големата концентрација на електроните, иако се тие брзини мали, се добиваат многу јаки струи. Малите вредности на насоченото движење на слободните електрони во металот не треба да се мешаат со брзината на течењето

21. Физика на материјалите

на струјата. Насоченото движење на слободните електрони, на кое и да било место во металниот спроводник, започнува во оној миг кога на тоа место ќе се воспостави електричното поле. А брзината на воспоставување на електричното поле е еднаква на брзината на простирањето на светлината во вакуум $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Тоа значи дека и електричната струја во металот се воспоставува со таква брзина.

Електроспроводливоста се намалува со зголемување на температураата. Поради поголема средна брзина на атомите (топлинско движење) доаѓа до почесто судрување меѓу електроните и јоните на кристалната решетка. Поради тоа, пак, дел од енергијата на насоченото движење на електроните се претвора во внатрешна енергија на металот. Отпорот на металот се зголемува, а неговата температура се покачува. Температурната зависност на отпорот (R) кај металите е дадена со релацијата:

$$R = R_0 (1 + \alpha t), \text{ каде што}$$

R_0 е отпорот на металот на 0°C , t е температурата на металот, а α е константа за секој метал, која се нарекува термички коефициент на отпорот и која ја покажува релативната промена на отпорот на металот при промена на неговата температура за еден степен.

Инаку, со класичниот модел на “електронски гас”, можат да се објаснат Омовиот закон, Џул-Ленцовиот закон, како и низа други појави својствени на металите. Такви се појавите на термоелектронската емисија, појавите на контактен потенцијал меѓу два различни метала и низа други.

Недостатоци на моделот на “електронски гас”

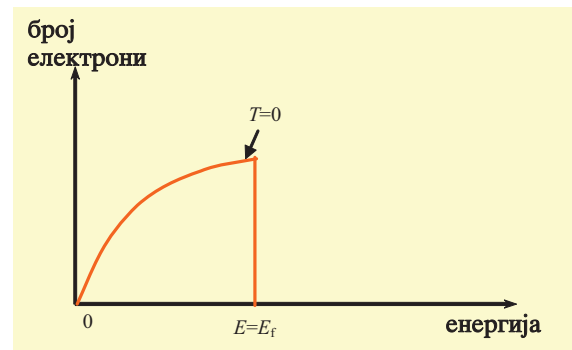
Теоријата која базира на моделот на “електронски гас” има многу недостатоци. На пример, оваа теорија не може квантитативно да ја објасни зависноста на спроводливоста на металите од температурата.

Несложувањето на класичната теорија на металите и експериментот посебно доаѓа до

израз при ниски температури. Сепак, денес сите недостатоци на класичната теорија се надминати со **квантната теорија на металите**.

И уште еден недостаток на класичната теорија: ако носители на струјата во металите се слободните електрони, кои, според класичната теорија создаваат “електронски гас”, тогаш средната енергија на електронот (честица со 3 степени на слобода) би била $E_{sp} = 3/2 kT$. Овде k е Болцманова константа. Но, кај металите експериментите покажале дека ваква зависност од температурата не постои. Така, средната енергија на електроните, дури и на температура од 0 K, не е еднаква на нула.

Постои крива што ни ја дава распределбата на електроните по енергии, и таа се нарекува крива на распределба според Ферми-Дираковата статистика за слободните електрони во металите.



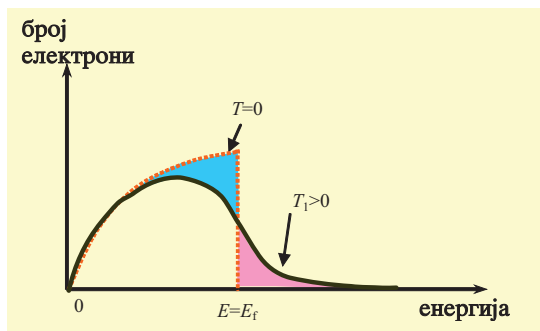
Сл. 3а. Зависност на бројот на електроните од енергијата кај метал на апсолутна нула.

На сликата 3а е дадено како фактички изгледа распределбата на електроните по енергии кога металот е на температура апсолутна нула ($T=0$ K). Во тој граничен случај постои една остра граница за максималната енергија што можат да ја поседуваат електроните во еден метал на температура од апсолутна нула. Така, Ферми-Дираковата статистика кажува дека највисоката енергија што можат електроните да ја имаат во ваква состојба на замрзнатост на материјата ($T=0$ K) е еднаква на точно определен износ карактеристичен за секој метал, еднаков на **Ферми-енергијата** (E_F) од сликата 3а.

Да се запрашаме сега како слободните

21. Физика на материјалите

електрони во едно парче метал, што се заграло на некоја температура $T_1 > 0$, ќе си ја распределуваат меѓу себе вкупната енергија што е донесена однадвор. Одговор ќе ни даде обликот на кривата што соодветствува на некоја температурата T_1 поголема од нула (сликата 3б). Од кривата може да се види дека голем број електрони имаат средно-големи енергии, дека сосем мал број електрони поседуваат големи енергии.



Сл. 3б. Зависност на бројот на електроните од енергијата кај метал над апсолутната нула.

И уште нешто многу интересно: од сликата 3б се гледа дека сиромашните електрони со енергија нема да добијат речиси ништо, па нововедената енергија ќе си ја поделат меѓу себе побогатите електрони (оние со енергии во близината на E_f). Ова би значело дека “богатите” електрони ќе станат само уште побогати, па ќе се преселат во делот од графикот со уште повисоки енергии (розово поле). Бидејќи вкупниот број на електроните не се менува, тогаш плоштината што соодветствува на преселените електрони кон повисоки енергии треба да остане иста (синиот и розовиот дел се со иста плоштина).

И на крајот, ако се пресмета теориски средната енергија на електроните при апсолутна нула, според оваа теорија ќе се добие дека $E_{sp} = 3/5 E_f$, што е различно од нула.

Легирање

Додавањето на атоми од некој друг елемент (метал или неметал) во кристалната решетка на чистиот метал се нарекува легирање. Во

технолојата на легирање од големо значење е тоа што кристалната решетка на едниот метал може да ги вгради во себе атомите од другиот метал (види легирање кај дефектите на кристалната решетка во поглавјето 21. 3). Покрај тоа, постојат и кристали од метали кои можат во себе да вградуваат и такви елементи како што е на пример, водородот, јаглеродот и азотот во форма на интерстицијални дефекти (поглавје 23. 3). Инаку, во основата на производството на челикот стои вградување на јаглеродни атоми во железото.

Легурата месинг се состои од бакар и цинк. Инаку, нашла многу широка примена во индустријата. Речиси да не постои метален производ направен од хемиски чист метал, туку најголемиот број метални производи се составени од два, три или повеќе елементи.

Синтерувани материјали

Постои група материјали што се добиваат од метали или легури во прав. Постапката поради тоа се нарекува прашочна металургија. Правот или хомогенизираната смеса од металниот прав потоа се пресува со помош на хидраулична или механичка преса во брикети, кои потоа се загреваат на висока температура во електрични печки. Загревањето најчесто се изведува во атмосфера на некој гас којшто на високите температури не реагира со металите. Може да се користи на пример водород за да се спречи оксидација при загревањето. При синтерувањето доаѓа до силно поврзување на зрната од правот по пат на дифузија. Притоа не доаѓа до стопување бидејќи температурата на синтерување треба секогаш да биде под точката на топење на главната состојка од смесата.

Кај синтерувани материјали постојат далеку повеќе можности за комбинирање на металите и соединенијата отколку при мешањето при топење.

Кратко резиме

- точка на топење
- модел на “електронски гас”
- концентрација на слободни електрони
- Ферми-Диракова статистика
- легури
- синтерувани метални материјали

21. 6. ПОЛИМЕРИ



Производи кои се составени, целосно или делумно од полимерни материјали се составен дел на човековото секојдневие, кое со право се нарекува време на пластиката. Пластиката, гумата, некои бои, се полимерни супстанции. Иако науката за полимерите е релативно млада, сепак откритјата и иновациите бргу влегуваат во масовна примена и во секојдневието.

Хипотезата за постоењето на циновски молекули (макромолекули) ја дал германскиот научник Херман Стродингер (Hermann Straudinger, 1881-1965) само пред околу шест децении, за што добил и Нобелова награда во 1953 година.

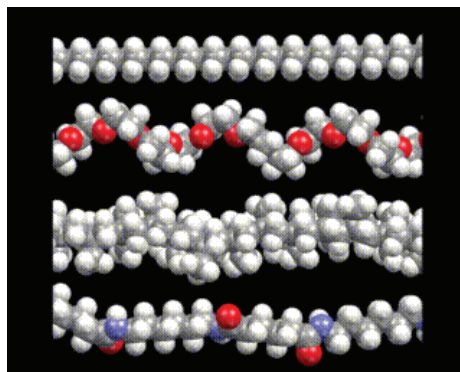
Денес веќе се знае дека повеќето хемиски супстанции преку хемиски реакции, под погодни услови, можат да се полимеризираат и да се добијат макромолекули (полимери).

Полимерите претставуваат долги синџири од цврсто врзани јаглеродни молекули (обично над 1000) со ковалентна врска. Одделните синџири меѓу себе се држат со помош на послаби физички врски, што овозможува полимерите лесно да се фабрикуваат.

Полимерите постојат само во цврста и течна, но не и во гасовита состојба. Поголемиот број од нив се органски супстанции, иако се познати и многу неоргански полимери.

Најпознатите полимерни материјали се синтетичките индустриски производи, како

што се: полиетиленот, полипропиленот, поливинилхлоридот (PVC), најлоните (алифатични полиамиди), полиуретаните. Постојат и природни полимери како што се: целулозата и полисахаридите, некои белковини (полипептиди), полинуклеотидите (РНК и ДНК), природната гума, памукот и др.



Многу технолошки, енергетски и други проблеми нема да може да бидат решени без создавање нови материјали, меѓу кои и полимерните.

Пластиката околу нас

Современото производство на полимерни материјали денес влегува во една сосема нова етапа на развој која се карактеризира со пораст на производството и потрошувачката и која бара повисоко ниво на знаење. Само во САД годишното производство на гума и пластични маси ја надминува бројката од 10 милијарди килограми. Дека навистина длабоко сме навлегле во времето на пластиката, укажува фактот дека во периодот од 1950 до 1980 година годишното производство на гума и пластика во светот пораснало за 8,9 пати, а на метали само за 3,2 пати.

Во науката постојано расте интересот за сложени, комбинирани материјали. Типични претставници на таквите материјали се повеќеслојните материјали кои вклучуваат органски полимери, метали и керамики. Овде спаѓаат армираните пластики, синтетичките пени и материјали, потоа биокompatибилните полимери од кои се прават вештачките коски, крвните садови и срцевите залистоци и др.

Исто така, полимерите станаа перспективни материјали во електрониката и информатиката во производството на отпорници за интегралните микроелектронски шеми, полеви транзистори (FET), минијатурни сензори, фотодиоди и др.

Меѓу полимерите кои се составен дел на горенаведените материјали спаѓаат :

- спроводливиите,
- пиезоелектричните
- пироелектричните полимери и други.

Посебна класа полимери се

- биополимерите.

Пиезоелектрични и пироелектрични полимери

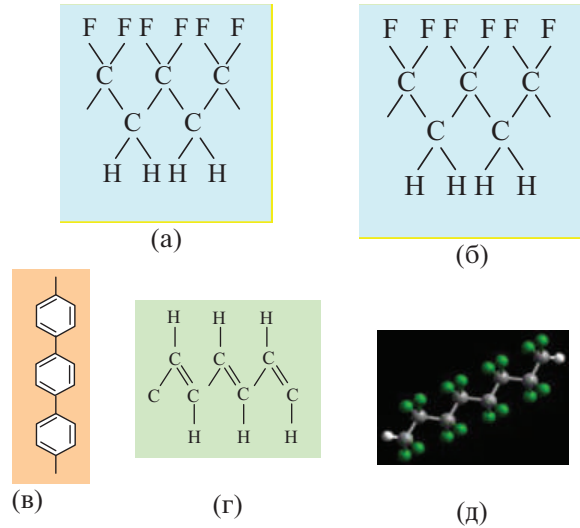
Познати се некои кристали, како што се, на пример, кварцот, сегнетовата сол (BaTiO_2) и др. кои во електрично поле си ги менуваат димензиите (се издолжуваат во еден, а скратуваат во друг правец). Ефектот се нарекува пиезоелектричен (види поглавје 1.9). Кај истиве материјали постои и обратниот ефект, под притисок во нив се јавува електрично поле.

Слично како кај пиезоелектричниот ефект, постои и ефект при кој доаѓа до електризирање на површината на кристалот ако се промени неговата температура, Оваа појава се нарекува **пироелектричен ефект**. Во редот на најдобрите пиезоелектрици и пироелектрици спаѓаат и некои полимери чиј претставник со најизразени својства е поливинилендифлуоридот (PVDF), даден на сликата 1а.

Ако PVDF филмот се загрева од 100 до 150°C и потоа се лади во силно електрично поле со вредност од 1000 kV/cm (како електроди можат да послужат метални слоеви од алуминиум, злато, жива и никел-хром, нанесени од двете страни на полимерниот филм), се добива полимерен пиезо и пироелектрик, стабилен повеќе години на собна температура.

Иако нивниот пиезоелектричен ефект е десетина пати помал од оној кај најдобрите неоргански материјали, а пироелектричниот двапати, сепак PVDF има големи предности. Тој може да има произволна форма (вклучувајќи и тенки филмови со голема површина),

дебелината може да се менува од 2 mm до само 5 μm , полесен е, стабилен е и во електрични полиња над 1000 kV/cm, има подобри механички својства. И, што е најбитно многу е поевтин.



Сл. 1. Типични полимери со пиезоелектрични и пироелектрични или спроводни својства: а) PVDF; б) полисулфурнитрит; в) PPP; г) полиацетилен, (д) модел на еден полимер.

PVDF се користи како составен дел на слушалките и звучниците (под дејство на електрични импулси се менува радиусот на нивната конвексна мембрана и се генерираат сферни звучни бранови), кај апаратите за мерење притисок, микрофоните. Неговите пироелектрични својства имаат примена кај топлотните сензори, со чија помош се детектира присуство на луѓе (инфрацрвени детектори - night vision) и др.

Спроводливи полимери

Се започнало со научната работа на В. А. Литл, објавена во 1964 година, во која тој предвидува високотемпературна суперспроводливост кај линеарните органски вериги. Интересот на истражувачите просто експлодираше за овој тип полимери и во наредните години беа синтетизирани и целосно испитани десетина. Првиот суперспроводник

21. Физика на материјалите

меѓу овие материјали е откриен дури во 1977 година: полисулфурнитрит (сл. 1б), кој на собна температура е метал со просечна електрична спроводливост, а на температура под 0,3 К станува суперспроводник.

Слична драстична промена на спроводливоста покажал и полиацетиленот..

Меѓутоа, времето на спроводливите полимери тукушто доаѓа.

Интересни се полимерите што можат да се допингуваат при што се добива промена на некое физичко својство. Така со помош на допингување може да варираат електричните својства во определени размери. Спроводливоста на полипарафениленот (PPP), слика 1в, по допингувањето со AsF_5 се менува за 18 редови на големина ($\times 10^{18}$). Крајната цел во истражувањата е да се добие полимер со голема спроводливост, но истовремено и хемиски стабилен, со добри механички својства, лесно обработлив и, се разбира, да биде евтин.

Комерцијалното значење кое можат да го имаат овие т.н. „пластичните метали“ е големо.

Современата наука за полимерите следи неколку правци во истражувањата од овој тип:

- добивање допингувани полимери,
- добивање полимери кај кои може да се менуваат еластичните својства: од пластично до еластично, во зависност од практичните потреби;
- да се развијат теориски модели за опишување на овие полимерни материјали.

Примената на спроводливите полимери во секојдневниот живот од ден на ден постојано расте. Со електрохемиското **p** и **n** допингување на полиацетиленските филмови се овозможи производство на батерии со пластични електроди кои можат повеќекратно да се полнат. Малата густина ($0,4 \text{ g/cm}^3$) и големата површина на филмовите (неколку илјада пати зголемен број носители на електричеството), ги прави пластичните батерии многу посилни и полесни од конвенционалните.

Комерцијалното производство на овие батерии почна во Јапонија и веќе се зборува за нивна примена, како извори на енергија кај

лесните моторни возила. Веќе се појавија и патенти базирани на спроводливи полимери кои се користат за производство на лакови кои заштитуваат од статички електрицитет, сончеви ќелии, електронски компоненти (**n-p** диоди и фотодиоди), елементи кои сметаат на работата на радарите. Исто така започна и производство на сензори и прекинувачи кои реагираат на присуство на вода, воздух, одредени гасови, на промена на електричното поле, како и на нелинеарни елементи во електронските кола врз основа на полимерни супстанции.

Во последната деценија од XX век пронаоѓачите, конструкторите и стратезите на индустриското производство со голем успех работат на добивање материјали со голема спроводливост, еластичност и пластичност за да можат да се развлекуваат во тенки филмови кои ќе бидат водоотпорни, неоксидирачки и, се разбира, произведени од евтина суровина, со мала потрошувачка на енергија и кои нема да ја загадуваат животната околина.

Свој придонес во истражувањата на спроводливите полимерни материјали во овој момент дава и Лабораторијата за електрооптика на дисперзни системи при Институтот за физика на Природно-математичкиот факултет во Скопје. Имено, последната година се вршат испитувања на еден од најатрактивните спроводливи полимери, полипарафениленот на молекуларно ниво. Главна цел на овие испитувања ќе биде добивањето на негови тенки слоеви (филмови) кои имаат голема спроводливост.

Голема надеж на научниците е дека сега кога влегуваме во новиот милениум можат да се дадат безброј одговори и да се решат проблемите за производство на овие материјали без кои човечкиот живот не може да се замисли.

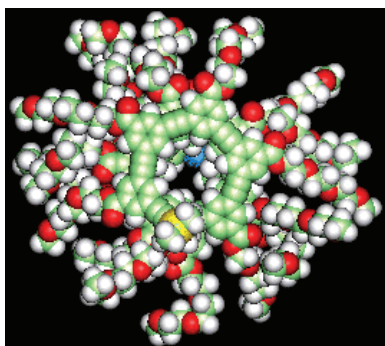
Биополимери

Биополимерите се полимери што се добиени од живиот свет или, пак, лабораториски синтетизирани полимери кои можат да вршат функции на поддржување на животот во живите организми.

21. Физика на материјалите

Каде се применуваат биополимерите?

- Биополимерите, благодарение на некои нивни сензорни својства нашле примена во медицината и фармацевцијата како материјали, носители на лекаства, со цел да се постигне продолжено дејство на лекот (забавена и рамномерна ресорпција).
- Биополимерите се користат за правење на биолошки мембрани и вештачки органи (залистоци за срце, крвни садови, стентови, вештачки коски, вештачка кожа и др).



- Биополимерите во иднина треба да добијат широка еколошка поддршка бидејќи тие треба да ги заменат досегашните пластични материјали за амбалажа, заради нетоксичната и брзата деградација во природата.

И гумата е полимер



Гумата е специфичен тип полимер, и претставува еден од материјалите со

супериорни еластични особини. Широката примена што ја има соодветствува токму на тоа физичко својство. Гумата е единствена и незаменлива во автомобилската индустрија, и друго.

Гумата е претставник на групата материјали со меморија на формата. Кога ќе и се даде некаков геометриски облик, и кога ќе се подлегне на разни облици на деформирање, како што се: притискање, истегнување, торзија, сукција и сл, таа повторно се враќа во првобитната состојба.

Другото суштествено својство, поради кое таа нашла широка примена е непропустливоста на водата, па таа се јавува како одличен хидроизолатор.

Постојат гуми од билкино потекло кои се добиваат од слузта што ја излучуваат некои специфични билки, природно или кога се оштетени. Екстрактите се растворливи во вода и даваат колоидна течност во која набубруваат. Хемиски гледано, гумите претставуваат соединенија слични на јаглекхидратите. Најпознати природни гуми се арапската гума и црешовата гума и др.

Најпопуларна и најмасовно користена за комерцијални цели е гумата што се добива со вулканизација на латексот од каучукот со некои додатоци. Со примената на ладна вулканизација, без додатоци, се добиваат тенки гумени предмети што не пропуштаат вода, како што се гумените ракавици. Заостанатите гумени предмети се изработуваат од каучук со разни додатоци, како што е сулфурот. Во зависност од количеството на сулфурот, се добива гума со различна еластичност (тврда или мека гума).

Меката гума се одликува со еластичност, непропустливост, електроизолациона способност и други погодни својства. Од неа се изработуваат внатрешните и надворешните автомобилски гуми, гумените обувки, ракавиците, спортските обувки и друго.

Тврдата гума (ебонит) е тврда рожеста материја која е хемиски многу стабилна и лесно се обработува, а се употребува за изработка на електротехнички материјали, садови за оловните акумулатори, чешли и др.

21. Физика на материјалите

Се користи и за обложување на хемиска апаратура заради заштита од корозија.

Постои и сунгереста гума која се користи за некои производи со сунгереста структура, како што се: сунгери за миене, за звучна изолација, амортизери на удари и сунгери во фискултурните сали и играчки за деца. Сунгерестата гума, инаку, се добива откако во смесата за производство на гума се додаде некоја материја што ослободува гас.

Гумата за цвакање е еластичен нетоксичен материјал која се приготвува од каучукот богат со смоли, или од обичен каучук на кој му се додаваат смоли со помош на гмечење со етерични масла и други супстанции.

Инаку чистата гума кога ќе се олади станува кршлива. Ваквата промена се случува поради формирањето на дополнителни врски помеѓу јаглеродните синџири што ја прават гумата да добие кристална структура. Така, на пример, една гумена ракавица потопена во течен азот (77 K), станува цврста и кршлива. Гумите што се употребуваат на ниски температури (во северните предели) многу побргу стареат и се трошат.

Вулканизација на гумата

Вулканизација претставува специфичен третман кој подобрува одредени својства на гумата, како што е еластичноста, отпорноста кон хемикалии, и ги ублажува промените на својствата при големи температурни промени. При процесот на вулканизација доаѓа до воспоставување на дополнителни хемиски врски помеѓу полимерните синџири од молекулите на гумата. Вулканизацијата на гумата се изведува со загревање во присуство на сулфур. Постои и ладна вулканизација при која гумата се третира во бања што содржи пареи со соединенија на сулфур. Речиси за секоја намена гумата се вулканизира, освен онаа за гумениот цемент, за лепливите ленти и некои други намени. Инаку, меките гуми содржат околу 5% сулфур а тврдата гума се вулканизира со 30% до 50% сулфур. Процесот на вулканизација се состои од внесување на сулфурот во гумената маса. На смесата и се додава и супстанцијата анилин кој го забрзува

процесот на вулканизацијата. Потоа смесата се става во калапи и се загрева. Така, финалниот продукт не е веќе леплив, како што е суровата гума, не се стврднува (кристализира) на ладно и не омекнува на топло, поеластична е и е поотпорна на органски хемикалии (бензин, нафта и др.), не апсорбира вода и е одличен термички и топлински изолатор.



Објаснете ги следниве поими:

- полимери
- пиезоелектрични полимери
- пироелектрични полимери
- биополимери
- гума
- стареење (кристализација) на гумата
- вулканизација на гумата

Прашања, задачи и активности

1. Со оглед на сè поголемата употреба на пластичната амбалажа во нашите реки, на нашите улици, паркови, одморалишта и игралишта секојдневно се среќаваме со таков отпад. Имајќи предвид дека полимерните супстанции трајно ја загадуваат нашата животна околина, организирајте акција на собирање на пластичен отпад.
2. Како ќе си го објасните фактот дека гумите и на неупотребуван автомобил по повеќе години не е препорачливо да се користат.

Несреќата на Спејс Шатлот Челинџер се случила како последица на едно гумено прстенче за дихтунг што станало круто и пукнало во ладната ноќ пред лансирањето. Како последица, низ пукнатината протекло водородното ракетно гориво, истекло и се samozапалило.

21. 7. СТАКЛО И КЕРАМИКА

Стакло



Од стакло се направени прозорите, шишињата, чашите, автомобилските стакла и многу други продукти.

Стаклото е најтипичниот претставник на аморфните материјали, кои во поново време се дефинирани како преладени течности со екстремно висок вискозитет. Стаклото се добива од стопена маса од неорганска природа, која при ладење на собна температура станува тврда, крга и не кристализира. Преминувањето од течна во цврста состојба се одвива континуирано, а не како кај металите на точно определена карактеристична точка на топење и дефинирана топлина на кристализација).

Исто како и преостанатите аморфни материјали, стаклото се одликува со многу низок степен на подреденост и заемна положба помеѓу атомите. Стаклото е изградено од неправилна тродимензионална мрежа од кислородни атоми кои меѓусебно се поврзани со јони.

Кај обичното силикатно стакло, најважен елемент е силициумот во градбата на мрежата. Другите јони во стаклото, како, на пример, калциумот (Ca), магнезиумот (Mg), натриумот (Na) и калиумот (K), се сместуваат во јазлите на мрежата што се состои од соединенија на силициумот (SiO_2). Имајќи го предвид ваквиот состав, едно цело стакло или стаклено парче може да се третира како еден голем молекул. На овој начин се објаснуваат својствата на голема цврстина на стаклото. Доколку на едно слабо место на стаклена површина се направи пукнатинка, тогаш таа набргу ќе се прошири по должината на целиот материјал. Ова

ширење не може да се сопре на внатрешната граница помеѓу зрцата, како кај кристалните супстанции (металите). Кршењето на стаклата е последица на силата на истегнување, бидејќи цврстината при притисок е 10 пати поголема отколку цврстината при истегнување.

Физичките својства кои го прават стаклото незаменлив материјал за намените кои ги спомнавме се:

- просирност. стаклото има голема пропустливост на видливата светлина (голем коефициент на трансмисија), па поради тоа се користи за изработка на прозорци и застаклување во станбените и деловните објекти, и како обвивка на електричните светилки;
- не ја пропушта водата; тоа е апсолутно најдобриот хидроизолатор, што додава уште еден квалитет во примената за прозорци;
- обичното силикатно прозорско стакло ја рефлектира инфрацрвената светлина, па застаклените простории го засилуваат ефектот на стаклената бавча. Се употребува за правење стаклени градени за одгледување раноградинарски култури;
- отпорно е на најголемиот број киселини и бази, се употребува како амбалажа и за чување на хемикалии и како заштита;
- не пропушта воздух; се користи за херметичко затворање и за вакумирани електрични уреди како што се електричните светилки, рендгенските цевки и друго.

Со промената на составот може да се добијат стакла со најразлична намена. Во следната табела се наведени неколку вида стакло и нивниот состав:



Огноотпорно (пирекс) стакло за лабораториски експерименти.

21. Физика на материјалите

Вид стакло	Примена	Состав	Суровини
обични стакла натриум- карбонатно стакло	Прозорци, амбалажа, домаќинство, електрични светилки.	натриумкарбонат, варовник и силикат	кварцен песок, варовник и калцифицирана сода
борсиликатно стакло.	огноотпорни садови за лабораторија и домаќинство (има голема отпорност на хемикалии, и температурни промени).		песок, боракс, борна киселина, фелдшпат и алуминиум хидрат
кварцно стакло	оптички инструменти и (има голем коефициент на трансмисија за УВ светлина)	99,5% SiO ₂	кварцен песок
кристално стакло	уметничко стакло или стакло за изработка на кристални чаши.	поташа, мениге и песок	калиум, варовник и силикат, олово
мурано стакло	украсно стакло со сина боја што се изработува во Венеција		само се додаваат оксиди на кобалт

Производство на стакло

Мешање на суровините. Процесот на топење се одвива континуирано или дисконтинуирано (кај производството на специјални и обоени, уметнички или оптички стакла. Стаклото се топи во садови од огноотпорна глина во пламена печка. Топењето се изведува на температура од 1400-1550 °C. Во последната фаза од топењето, масата се избиструва (се ослободува од воздушни меури) со додавање на некои хемикалии. При ладењето стаклената маса станува сè погуста и дава повеќе можности за производство и обработка: извлекување (прозорско стакло), дување (чаши и шишиња), валање и рачна обработка.

Боење на стакло

Со додавање на мало количество од некои супстанции кон стопената смеса, стаклото може да се обои:

Боја	Додаток
безбојно	чисти хемикалии
црвено	јаглен и натриумсулфат
зелено	железо
сино	балароксид или кобалт

Боење се прави заради специјални намени

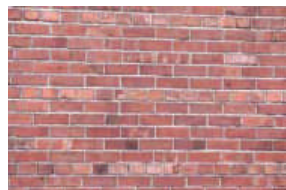
кај амбалажирањето на некои пијалоци, за производство на разни филтри за оптички инструменти или за уметнички намени, за изработка на витражи.

Стаклени влакна (стаклена волна). Се произведува така што од стопената маса се извлекуваат тенки млазови за да се оладат без претходно обликување. Од овие влакна се произведува стаклена волна којашто се користи како термоизолационен материјал во градежништвото.

Најстарите предмети од стакло биле најдени во Месопотамија (денешен Ирак) и Египет. Наодите кажуваат дека тогашните стакла имале глинено јадро. Се правеле на следниов начин: растопена стаклена маса се ставала врз смеса од глинен прав и стаклест песок. Откако стаклената маса ќе се оладела глиненото јадро се отстранувало. На ваков начин се произведувало сè до почетокот на нашата ера, кога во целото Римско Царство била усвоена новата техника на производство.

Керамика

Порцеланот и керамичките производи се добиваат со обично печење на обликувана маса што се состои од глина, каврц и и фелдшпат. Во некои случаи, кога се изработуваат градежни материјали како што се тули и



керамиди тогаш масата се состои само од глина. Чистата глина се нарекува каолин, и тој се пече според степенот на чистотата до бел производ. Овој се употребува за порцелан во домаќинствата и за санитарни уреди. Нечистите глини се користат за градежни материјали и обична керамика.

Примената на порцеланот во домаќинствата и техниката произлегува од неговите поволни физички својства:

- одличен електричен изолатор; поради ова негово својство тој е незаменлив електроизолационен материјал кај трафостаниците, далводите, електроцентралите, диспечерските центри и кај осигурувачките табли во станбените и деловните објекти;
- одличен топлински изолатор; поради ова негово својство, јадењето и пиењето остануваат подолго време топли отколку кога се во метални садови. Затоа садовите во домаќинството се повеќето изработени од порцелан;
- висока точка на топење; ова својство дава дополнителен квалитет во примената како електроизолатор. Во случај на потекување на силна струја, доаѓа до загревање но не и стопување на овој материјал ;
- не е запалив; уште еден квалитет во прилог на примената како незаменлив електричен изолатор;
- отпорен е на вода, киселини и бази; незаменлив материјал во производството на керамика за

купатила, кујни и лабораториска опрема.



Добивањето на порцелански производи започнува со пречистување на суровините, миене, боење и мешање, сè додека не се добие маса погодна за обликување.



Обликувањето може да биде рачно или машинско за производство на овални предмети. На овој начин се формираат чинии, филцани, саксии и електроизолатори. Пресување е постапка со која се формираат сидните и подните керамички плочки. Пригорвената маса се пресува помеѓу подвижен шаблон и цврста подлога. Инаку тулите и керамидите се произведуваат со пресување во форма на волуминозно парче. Скулптурите од глина се произведуваат со процедурата наречена **леене**. Глинена каша се налева во калапи од материја што може да ја собере водата (на пример, гипс). На тој начин течноста истекува а останува слој што се нафаќа на сидовите и кој може да се направи доволно дебел за да се отстрани калапот.

Сушење. Предметите се оставаат на спонтано (природно сушење).

Печење. За разни намени се применува различна температура на печење, што може да се види во табелата подолу.

Производ	Температура (°C)
глинени производи	700-1000
керамички предмети	1200-1250
електроизолациски материјал	1400

Глазирање

На некои од производите после првото печење им следува уште едно печење при кое им се наносува горен сјаен просирен или непросирен слој наречен глазура. Улогата на глазурата може да биде за порцеланскиот производ на не пропушта вода или едноставно естетска.

Најважните состојки од кои се прави глазурата се: песок, кварц, стакло, глина, фелдшпат, боракс и друго, кои се мешаат на различни начини во зависност од намената. Печењето за глазирање се изведува на температура од 700-900 °C.

Огноотпорни керамики

Една посебна група керамики производи се состои од одделни оксиди. Во оваа група спаѓаат материјалите што се отпорни на високи температури (огноотпорни материјали). Тоа се, на пример: алуминиумоксидот, ториумоксидот, магнезиумоксидот и берилиумоксидот. Последниов а и циркониумоксидот се употребуваат во нуклеарните реактори бидејќи

имаат висока точка на топење (2570 °C и повеќе).

Специјални керамики

Бариум, стронциум, бакар оксидот е керамики материјал со суперспроводливи својства.

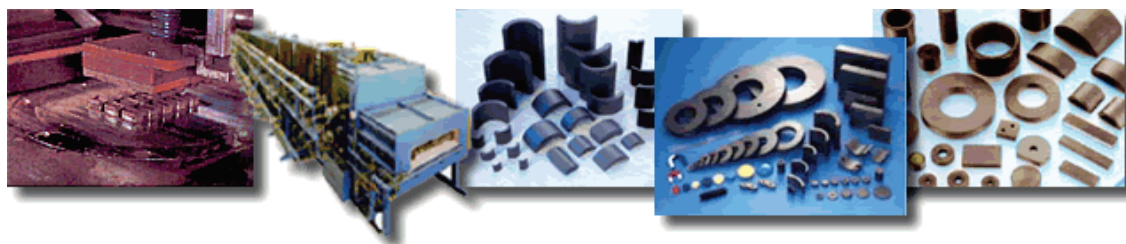
Керамички магнети

Бариумот или стронциум феритот можат да се употребат за изработка на керамики материјали со својства на перманентни магнети.

Фероелектрични керамики

Се изработуваат од BaTiO₃, материјал со многу висока диелектрична константа, фероелектричен материјал, сличен на феромагнетните. Се употребува во производството на микрофони, звучници и уреди за претворање на електрични во механички уреди (главата на ултразвучната сонда).

Постојат и керамики материјали со таква тврдост и еластични својства што се погодни за изработка на делови од мотори и механички уреди.



21. 8. ГРАДЕЖНИ МАТЕРИЈАЛИ



Камените сидини на Мачу Пичу (Перу)

Со векови се граделе живеалишта, разни објекти и споменици. И да не беше нивната трајност и отпорност на климатските услови, немаше да ја познаваме својата историја и обичаите. Со векови се стремело да се гради за многу генерации, на начини за да се победи забот на времето. Материјалите што се користат во градежништвото зависат како од природата на пределот, од нивната застапеност и од културолошкиот напредок. Доминантен градежен материјал во разните предели, по правило, е оној што лесно се наоѓа или произведува во непосредната околина. Така, она што бил каменот за египќаните, тоа е дрвото кај канаѓаните, снегот кај ескимите.

При изборот на градежните материјали треба секогаш да се запазуваат трите основни принципи:

- **безбедност;** материјалите треба да бидат безбедни по животот и здравјето на луѓето. Материјалите треба да се отпорни на атмосферски влијанија, отпорни на потреси - асейзмички, огноотпорни;
- **трајност;** материјалите треба да бидат трајни и временски да не се видоизменуваат и да не ги губат почетните својства поради кои биле применети;
- **енергетска ефикасност и еколошка исправност;** материјалите треба да помагаат при заштедата на топлинската и електричната енергија, да бидат еколошки исправни, да не содржат радиоактивни елементи.

Во денешното градежништво се користи цела палета од природни и вештачки материјали кои ги задоволуваат горенабројаните барања. Некои се добро познати и обработени во претходните поглавја.

Градежните материјали, според улогата што ја играат, можат да се поделат на две групи.

- Во **првата група** спаѓаат материјалите што се погодни за основна конструкција во градењето. Тука спаѓаат природниот и вештачкиот камен (бетон), материјалите кои се добиваат со технолошка обработка на природни минерали, конструкционите пластични маси, дрвото и др.

- Во **втората група** спаѓаат: градежни материјали од специјален вид кои се неопходни за заштита на градежните материјали од првата група од атмосферски влијанија, да им ја зголемат трајноста, материјали што помагаат заштеда на енергија, материјали за создавање удобност и за декорација. Тука спаѓаат материјалите за термоизолација, хидроизолација, акустична изолација, антикорозивните средства и декоративните бои, лакови и пластични материји.

Природните материјали се користат без значителна технолошка обработка. Од материјалите што се добиваат со одредена технологија се железото, кое се користи за арматура (зајакнување) на бетонот, керамиката (тули и ќерамиди), стаклото (прозорско застаклување и основен материјал што го бележи градежништвото на нашиов век е цементот.

Цементот е fino сомелено сврзно средство кое најмногу содржи калциум и алуминиум силикат. Цементот и водата даваат малтер кој по сушењето дава цементен камен. Кога на малтерот ќе му се додаде песок или чакал тогаш се добива бетон.

За добивање на цементот се користат fino сомелени варовник и глина. Мешањето се прави со сува или влажна постапка. Во одредени случаи може да се додаваат и други компоненти кои ќе го подобрат хемискиот состав и ќе дадат поповолни физичко-хемиски својства за примена во градежништвото.

**Физички својства на материјалите
важни за градежништвото**

Параметри на состојба

Густина на материјалот. Густината може да се определи од количникот на масата (m) и волуменот (V) на апсолутно тврдиот материјал, т.е

$$\rho = m/V.$$

Релативна густина. Релативната густина ја дава густината на материјалот во однос на густината на водата. Кај повеќето градежни материјали целиот волумен се состои од волуменот на цврстиот дел (V_c) и од волуменот на порите во него (V_p), т.е. $V = V_c + V_p$.

Средна густина. Средната густина е густината во вистинската состојба на материјалот (мерена заедно со порите) Така, на пример, **средната густина** на лесниот бетон е $500-1800 \text{ kg/m}^3$, а неговата вистинска **густина** изнесува 2600 kg/m^3 .

Структурни карактеристики

Порозност. Порозноста (P) е мерка за степенот на исполнетоста на волуменот на материјалот, а се пресметува од односот на волуменот на порите (V_p) и вкупниот волумен на материјалот (V), т.е.

$$P = V_p/V$$

Во долната табела се дадени неколку градежни материјали, нивните густини и порозноста.

материјал	густина (g/cm^3)	средна густина (g/cm^3)	порозност (%)
тежок бетон	2,6	2,4	10
гранит	2,7	2,67	1,4
стакло	2,65	2,65	0
плексиглас	2,0	2,0	0

Хидрофизички својства

Хигроскопичност се нарекува својството на материјалот да впира водена пара од влажниот воздух. Процесот се состои од апсорпција на водената пара на површинскиот молекуларен слој од материјалот и од капиларна кондензација.

Капиларно впивање настанува кога дел од конструкцијата е натопена во вода. Така, со капиларно впивање може да дојде до навлажнување и на повисоките делови од конструкцијата.

Апсорпција на влага. За определување на овој параметар кај бетоните се користи методот на потопување во вода на собна температура. Се пресметуваат апсорпцијата на вода по единица волумен (W_v), и по единица маса (W_m).

Пропустливост на вода е својство на материјалот да ја пропушта водата при потопување. Се дефинира коефициент на филтрација кој укажува на водопропустливоста на материјалот.

Деформации од влага. Некои материјали, како што се бетонот и дрвото, при промена на влажноста си ги менуваат димензиите и волуменот, т.е. набабруваат.

Отпорноста на мраз на еден материјал се мери преку промените што настануваат во материјалот при повеќе циклуси на замрзнување и стопување.

Термофизички својства

Топлоспроводливост се нарекува својството на материјалот да ја пренесе топлината од една површина до друга. Ова својство е многу важно при изборот на материјал за термоизолација или материјал за покрив.

Топлински капацитет е физичка величина што го изразува својството на материјалот да акумулира топлина при загревање и да ја ослободува при ладење. Се мери со топлината што е потребна за загревање на 1 kg од даден материјал за 1°C . Од табелата подолу може да се види дека најголем топллински капацитет има водата.

Материјал	Топлински капацитет (kJ/kg K)
вода	4,19
дрво	2,39-2,72
бетон	0,75 - 0,92

21. Физика на материјалите



Највисоката зграда во Дубаи изградена во 2009та година. Во градежниот цемент има додадено гума и адитиви за да му дадат еластичност. Пресметките покажале дека само таков материјал ќе може да го издржи напрегањето при дување на силните пустински ветрови.

Огностабилност е својството на материјалот да не се видоизменува и да не се деформира под дејство на високи температури (од 1580°C и повеќе)

Огноотпорност е својство на материјалот за некое извесно време да се спротивставува на дејството на огнот во случај на пожар.

Термички коефициент на линеарна деформација (α) е мерка за релативното издолжување на материјалот при загревање за 1°C . Неговата вредност за неколку материјали е даден во табелата.

Материјал	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
бетон	$10 \cdot 10^{-6}$
гранит	$8-10 \cdot 10^{-6}$
дрво	$10-20 \cdot 10^{-6}$

Механички својства

Градежните материјали се изложени не само на внатрешните сили (од статиката на

градбата), туку и на надворешни сили: ветрови, силни дождови, тектонски поместувања, земјотреси и др. Поради тоа треба материјалите да поседуваат соодветни маханички својства што ќе им овозможат да се спротистават на внатрешните и надворешните сили и ќе обезбедат стабилна и безбедна градба.

Еластичност е својството на цврстото тело да се врати во старата форма по престанување на дејството на надворешната сила. Поради погодната еластичност железото се користи во градежништвото во конструкциите подложени на големи надворешни напрегања. Инаку тоа се користи и како арматура што ги подобрува еластичните својства на бетоните.

Пластичност се нарекува својството на телото да си ја измени формата при дејството на сила и да си ја запази истата по престанувањето на нејзиното дејство. Трајната промена се нарекува остаточна или пластична деформација.



Мостовите се градат од челик поради неговите еластични својства

Кртост на тврдото тело се нарекува неговата способност да се скрши без притоа да се здобие со пластични деформации.

Напрегање е мерка за внатрешните сили што се јавуваат во деформираното тело под дејство на надворешни сили. Јунгов модул на еластичност E ги поврзува релативната еластична деформација (ϵ) и соодветното напрегање (σ), т.е.

21. Физика на материјалите

$$\varepsilon = \sigma / E$$

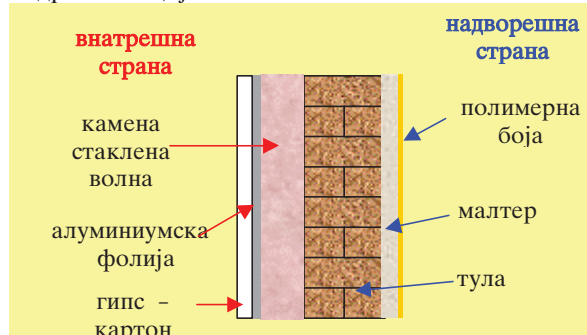
Еластичните својства на материјалите се менуваат во зависност од температурата поради тоа што Јунговиот модул на еластичност покажува температурна зависност.

Тврдост е својството на материјалот да се спротивставува на разрушувањето (деструкцијата) под дејство на внатрешните сили. Тврдоста зависи како од формата на телото така и од правецот на дејството на надворешната сила. Тврдоста на материјалите се предмет на опсежни истражувања кај градежните материјали.

Енергетски ефикасно градење

За заштедата на енергијата е потребно да се гради во согласност со физичките закони, и да се искористат материјалите со најпогодните својства за таа намена. Еве еден пример на градење на ѕид што максимално ја зачувува топлината во внатрешноста на градбата и ја намалува потрошувачката на електрична и топлинска енергија.

Од надворешната страна на ѕидот од тула нанесен е слој од малтер заради естетско израмнување и заради дополнителна цврстина и слој од полимер-боја која дава речиси 100 % хидроизолација.



Профил на еден ѕид што максимално штеди топлинска енергија.

Од внатрешната страна се става термоизолација (тоа е дебел слој од камена или стаклена волна со многу воздух; воздухот е добар термоизолатор). Потоа следува алуминиумска фолија која игра улога на рефлектор на инфрацрвените зраци и ги задржува да останат во внатрешноста на објектот. На крајот сле-

дува слој од производот наречен гипс-картон и кој ја дава финалната рамнина на ентериерот, кој потоа се бои во саканата боја.

Постојат и многу други технички решенија за заштеда на енергијата.

Многу векови во поголем дел од цивилизираниот свет основниот градежен материјал бил природниот камен. Записите кажуваат дека Кеопсовата пирамида била изградена 2500 години пред нашата ера. Таа се состои од 2,5 милиони кубни метри од делкани камени блокови, кршени и обработувани по каменоломите, како и големи количества гранит, кој со бродови бил пренесен преку реката Нил. Според историчарот Херодот, оваа пирамида ја граделе околу 100 000 луѓе, цели 20 години.



Египетски пирамиди се градби од камен со мистична намена, форма и размер.

Прашања и задачи

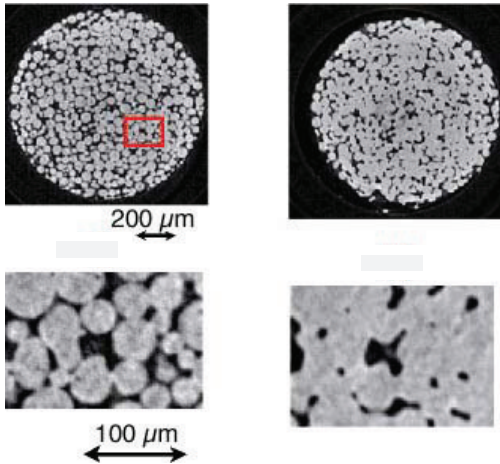
1. Погледнете ја сликата на топлинските загуби кај една куќа. Размислете кој дел од куќата треба да биде обложен со најдебел слој од термоизолација?



Топлинските загуби кај една куќа.

21. 9. СИНТЕРУВАНИ МАТЕРИЈАЛИ

Синтерувањето е постапка за правење на предмети од правови со нивно загревање на температура пониска од точката на топење, сè додека гранулите од прав меѓусебно се поврзат (залепат) едно со друго. На сликата 1 е прикажана суштината на синтерувањето. На сл.1а се прикажани гранулите (ситните честици) пред загревањето, а на сл. 1б се дадени меѓусебно поврзани по загревањето. Синтерувањето е најпознат начин за правење на керамички премети, и нагло голема примена и во прашкастата металургија. Инаку, зборот "sinter" значи пепел а потекнува од германски дијалект.



Сл. 1а. Синтерување на материјал: пред загревање.

Сл. 1б. Синтерување на материјал: по загревање.

Првото синтерување на науката и е познато од 1906-та година, кога бил пријавен и првиот патент од Блоксам, кој извршил синтерување на правови со помош на загревање со **права струја во вакуум**. Првата намена на синтеруваниот материјал бил за индустријата за светилки, поточно за правење на филаменти (жаречки влакна) за светилките. Овој патент дал упати за компактирање на правови од вофрам и молебден. Употребата на правата струја овозможила формирање на помалку површински оксиди, а со тоа и зголемување на емисивноста на материјалот на филаментите (поефикасни светилки).

Во следната деценија од 20-тиот век бил пријавен патент кој во синтерувањето на правовите од материјалите, покрај правата струја применил и **притисок**. Во оваа процедура, почетната смеса од правови бор-јаглен или силициум-јаглен, биле сместени во изолаторска цевка. Потоа цевката била притисната од две страни со рамни метални шипки кои служеле како електроди за да се пушти правата струја што загрева за да се постигне температура од околу 2000 °C.

Во 1932 било патентирано синтерување со помош на лачно празнење, со помош на полн кондензатор. Тога, правата струја била заманета со наизменична или пулсирачка струја. Подоцна следувале стотици па илјадници патенти од областа на синтерувањето, а се добивале материјали со многу интересни својства и намени и со контролирана порозност.

Синтерување на керамики

Синтерувањето е многу илјадници години познат процес за правењето на глинени садови и керамички предмети во сите култури и цивилизации.



Сл.2. Синтерувана керамика од III-тиот век од нашата ера.

Некои сировини за керамика имаат послаб афинитет за впивање вода и помала пластичност отколку глината, па затоа е потребно додавање на адитиви, пред постапката синтерување.



Сл. 3. Порозни керамички цевки - синтерувани.

Општо земено, процедурата на синтерување керамики може да се смета дека ги содржи следниве фази:

21. Физика на материјали

- мешање со вода врзивниот материјал, дефлокулантот, керамичкиот прав во каша или тесто;
- сушење на тестото со воздух што струи;
- ставање на смесата во калап;
- загревање на пониска температура за да изгори врзивниот материјал и
- загревање на повисока температура за да дојде до синтерување (залепување) на честичите од правот.

Синтерување на метали



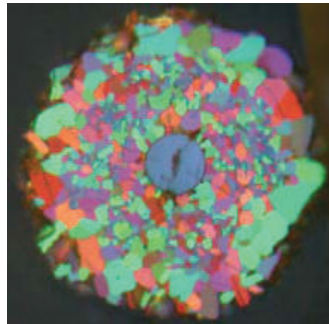
Сл. 4. Магнети од AlNiCo (алуминиум- никел - кобалт) добиени со синтерување.

Повеќето метали (скоро сите) можат да се синтеруваат. Ова се однесува посебно на чистите метали, кои ако се загреваат во вакуум нема да оксидираат, па синетруваниот материјал ќе биде, повторно, чист метал. На сликата 4 е прикажана палета производи од синетрувани магнетни материјали за добивање посилни перманентни магнети.

Ако е потребно синтерувањето да се врши под атмосферски притисок, тогаш е потребно да се користи инертен гас (нпр. аргон). Синтерување со последователна обработка може да помогне да се подобрат некои од особините, како, на пример, густината може да се зголемува ако материјалот се набива или пресува (вала) низ преса. Исто така, со последователно загревање може да се варираат некои физички својства. Така, Јунговиот модул на еластичност на синтеруваниот материјал не зависи од времето на термичката обработка, но многу зависи од густината на материјалот која се зголемува со набивањето (применетиот притисок врз материјалот).

Синтерување на суперспроводници

Најголем број суперспроводни материјало се прават со помош на синтерување. Правови од разни елементи се мешаат во точно определен состав, се синтеруваат во печка во инертна атмосфера и потоа се делува со притисок.



Сл. 5. Пресек на синтеруван суперспроводник од магнезиум-бој-јаглерод.

Синтерување на пластични материјали

Некои пластичните материјали можат да се формираат со помош на синтерување со цел да се добие сакана порозност. Синтерувани пластики се користат за правење на делови за филтрирање и контрола на флуиди и протоци на гасови.

Синтеруваниот полиетилен со ултра висока молекуларна маса се употребува за правење на скии и сноубордови. Порозноста може да се контролира при синтерувањето. Порозноста кај скиите е потребна за да се обезбеди трајност во нанесениот восок при подмачкувањето за да се обезбеди помало триење, а со тоа и поголема брзина на лизгање.



Сл. 2. Синтерувана пластика е нанесена на лизгавата површина од сноубордот.

Пластката е порозна па има впиено поголеми количества од воокот за подмачкување.

21.10. НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИЈАЛИ

Нанотехнологијата, популарно наречена нанотек е наука за контролирање на својствата на материјалите на атомско или молекуларно ниво. Општо земено, нанотехнологијата се занимава со структури со димензии помали од 100 nm (10^{-9} m) во во барем една од трите просторни димензии.

Нанотехнологијата се занимава со дизајнирање и констриција на материјали или уреди со споменатите димензии.

Нанотехнологијата навлегла во повеќе области, почнувајќи од физиката на електронските уреди, се до комплетно нови области, ако што се самоасемблирачките молекули. Истражувањата се насочени кон дизајнирање на нови и нови материјали со нано-димензии и кон создавање на материја со контролиран состав на атомско ниво.

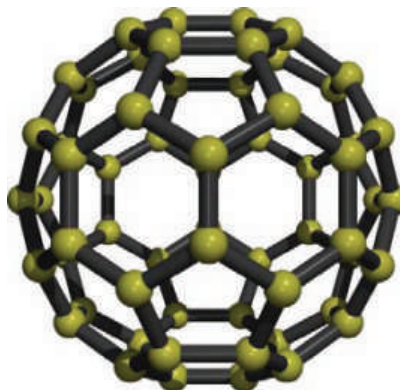
Истражувањата во областите на нанотехнологиите овозможуваат креирање на нови материјали и уреди со многу различни примени во медицината, електрониката, фармакологијата, енергетиката и други области и подрачја.

Од едната страна се можните примени и нивното влијание врз технолошкиот напредок, но од друга страна стојат можните токсични својства и влијанието на наноматеријалите врз животната средина, за кои многу се дебатира во научната јавност.

Фулерени

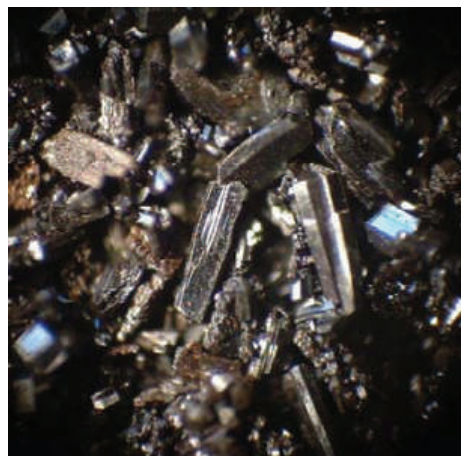
Фулерените претставуваат една алотропска модификација на јаглеродот. Фулерените претставуваат еден вид графитни листови од еден слој јаглеросни атоми кои се замотани

во топче или во цевче. Фулеренот C-60 е првиот и едновременно и наједноставниот претставник на фулерените. Се состои од точно 60 јаглеродни атоми кои формираат топка како на сликата 1.



Сл. 1. Фулерен C-60.

Најмалиот фулерен топка се состои од 20 јаглеродни атоми. Фулерените не постојат во природата, туку се добиваат низ сложени технолошки процеси. На сликата 2 е прикажан кристален фулерен C-60, по неговото добивање.



Сл. 2. Кристален филерен C-60.

Карбон (јаглеродни) наноцевки

Од најголема технолошка важност се наноцевките направени од јаглерод или од силициум, како поради нивната исклучителна цврстина така и поради нивните интересни електрични својства. Јаглеродните наноцевки се алотропска модификација на јаглеродот со цилиндрична форма. Односот долина спрема дијаметар може да достигне и вредност од редот на 132 милиони : 1, што е значително повеќе отколку кај кој и да било друг материјал. Дијаметрите на наноцевките можат да бидат и до 50 илјадите дел влакно од коса.

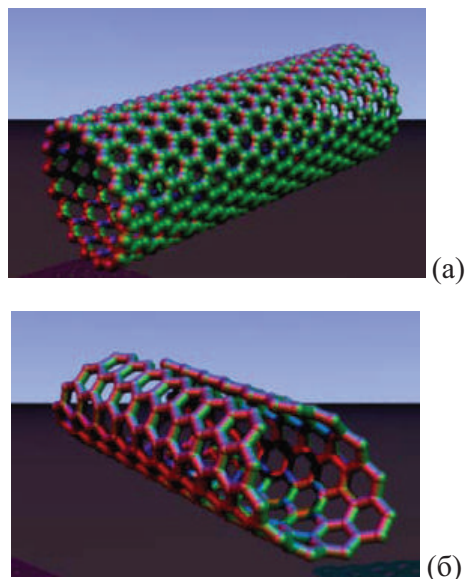
Во изминатата деценија, фулерените беа интензивно изучувано подрачје, и интересот за нив најверојатно нема да стивне ниту во идната деценија. Во 2003-та година било откриено дека можат да се користат како носачи на антибиотици за некои резистентни бактерии. Исто така било пронејдено дека можат да делуваат како лек против некои видови на канцер, како, на пример, меланомата. Исто така било откриено дека фулерените можат да се искористат и како антимиробни агенти кои се активираат под дејство на одредена светлина.

Најинтересни за физиката се нивните својства на висока топлоспроводност и електрична спроводливост (суперспроводност).

Добивање на фулерените

За да се создадат филерени е потребно да се пушти многу јака струја помеѓу 2 блиски графитни електроди во инертна атмосфера (на пример, во атмосфера на аргон -Ar). Лачното празнење помеѓу електродите од графит доведува до создавање на плазма од јаглерод која при ладењето создава црни остатоци од кои можат да се изолираат фулерените.

Нивната употреба засега се ограничува поради потенцијалната токсичност, и поради проментата на поведението под дејство на разни хемиски третмани.



Сл. 3. Карбон-наноцевки. За својствата важен е аголот на усуквање на формирање на цилиндарот. (а) агол 0° (б) агол на усуквање различен од нула.

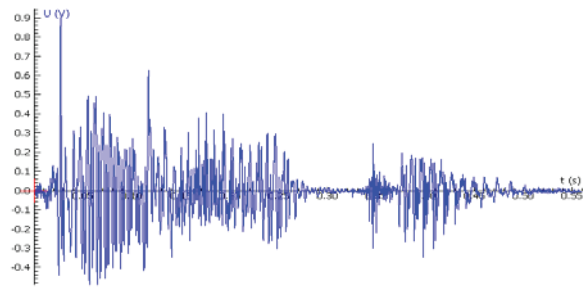
22.1. АНАЛОГНО-ДИГИТАЛНА КОНВЕРЗИЈА

Во секојдневието често се сретнуваме со сигнали, сигнали кои доаѓаат од радио и телевизиски станици, сигнали од инструменти и сензори кои мерат најразлични физички величини, сигнали кои стигнуваат од вселенскиот бескрај. Сите тие сигнали се аналогни. Под **аналогно** се подразбира секоја промена која се менува континуирано. Во литературата може да се најдат најразлични дефиниции за тоа што е аналогно, но најдобро може да се сфати преку пример.

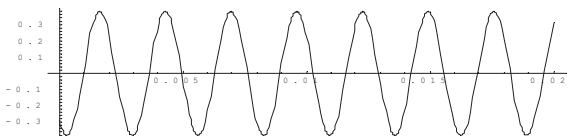
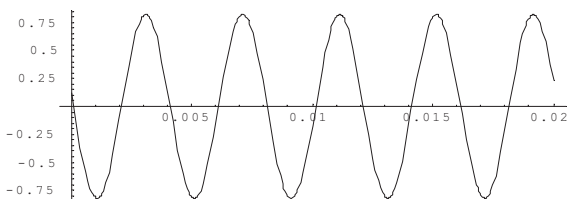
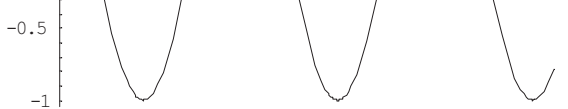
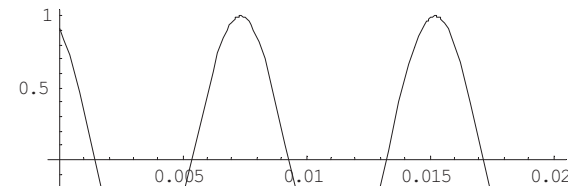
Првиот уред за снимање на сигнали, односно звук, наречен фонограф, го конструирал Томас Едисон (Thomas Edison) 1877 година. Тој на една инка ставил игла, иглата била во контакт со фолија, која била нанесена на еден цилиндар што ротирал. Кога некој зборувал во инката, звучните бранови предизвикувале осцилирање на инката, а таа, пак, на иглата. Иглата ја гребела фолијата и на тој начин звукот бил снимен. Значи, гребнатинката се менувала континуирано, како што се менувал и звукот. Тоа е првата аналогна снимка на некој сигнал. Десет години подоцна Емил Берлинер (Emil Berliner) го подобрил овој уред и така го конструирал грамофонот и грамофонските плочи, кои денеска ги користат и DJ-ите. Снимката на аудио и видеолентите е, исто така, аналогна, само со таа разлика што кај нив "гребнатинката" не е механичка, туку е електромагнетна.

На сл. 1.а е прикажан график на континуиран сигнал снимен при изговорање на зборот "ФИЗИКА". На вертикалната оска е нанесена промената на напонот индуциран во микрофонот, а на хоризонталната оска времето. Секој ваков континуиран сложен (анхармониски) сигнал е збир од повеќе синусоидални (хармониски) сигнали. Тоа значи, ако се соберат сигналите прикажани на сл. 1.б ќе се добие сигналот од сл. 1а.

При снимањето на сигнали или звук, постојат две основни цели. Првата е да се направи таква снимка која при репродукцијата ќе даде верна слика на оригиналниот сигнал.



а)



б)

Сл. 1.

Кратенката Hi-Fi со која често се сретнуваме доаѓа токму од англискиот термин High Fidelity, што значи "висока верност". Втората цел е снимениот сигнал да даде верна репродукција на оригиналниот звук, секогаш кога ќе се пушти, односно репродуцира снимката, независно од тоа колку пати таа била пуштана.

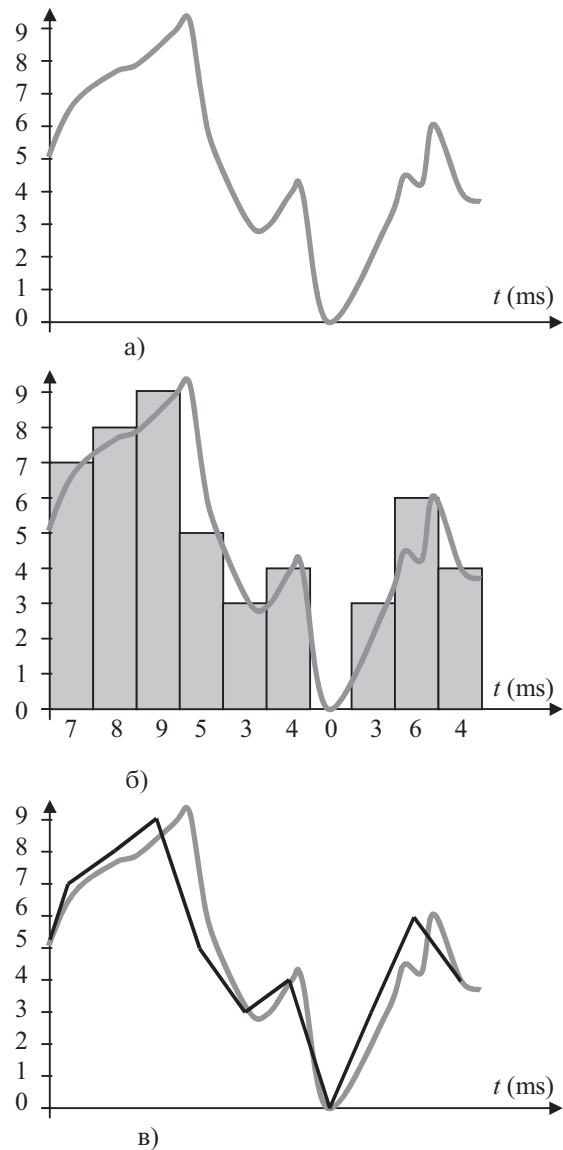
За да се постигнат овие цели, аналогниот сигнал се преведува во низа од броеви. Така сега наместо да се снимат аналогниот сигнал, се снима низата од броеви. Репродукцијата на сигналот, односно звукот, ќе биде иста, сè додека тие броеви не се уништат.

Како се врши конверзијата од аналоген во дигитален сигнал?

Да претпоставиме дека имаме еден аналоген сигнал претставен на сл. 2а. Една црточка на временската (хоризонталната) оска претставува една 1 ms. Кога се конвертира овој сигнал во дигитален, потребно е да се контролираат две величини: **бројот на семплови во секунда** (sampling rate) и **бројот на нивоа на квантирање** (sampling precision). Во нашиот случај нека имаме 1000 семплови во секунда (по еден во 1 ms) и нека имаме 10 нивоа на квантирање, од 0 до 9. На сл. 2б е прикажано како изгледа аналогниот сигнал од 2а после дигиталната обработка. На вертикалната оска се нанесени нивоата на квантирање од 0 до 9. Сивите правоаголници ги претставуваат семпловите, по еден секоја милисекунда. Во дното на сликата, под секој семпл се наоѓа број којшто го определува нивото на квантирање. Овие броеви се дигитална репрезентација на оригиналниот аналоген сигнал. При репродукција на дигиталната снимка, потребно е да се изврши конверзија на дигиталната снимка во аналогна. Притоа на излезот се добива сигнал прикажан на сл. 2в со тенка црна линија.

Се гледа дека овој сигнал не е баш верен на оригиналот (сл. 2а). Ова отстапување помеѓу двата сигнали се вика **грешка на семплување**. Таа грешка може да се намали со зголемување на бројот на семплови во секунда и бројот на нивоа на квантирање. На сл. 3 е даден пример како би изгледал аналогниот сигнал од сл. 2 кога би се обработил со двојно поголем број на нивоа на квантирање, дваесет и двојно повеќе семплови во единица време, 2000 семпла во секунда (сл. 3а). Се гледа дека во овој случај семпловите, односно сигналот при репродукција поверно го следи оригиналниот сигнал. Тоа е уште поизразено кај случајот на семплување со четириесет нивоа на квантирање и 4000 семпла во секунда (сл. 3б).

Денеска на секој чекор се сретнуваме со уреди кои вршат конверзија од аналогни во



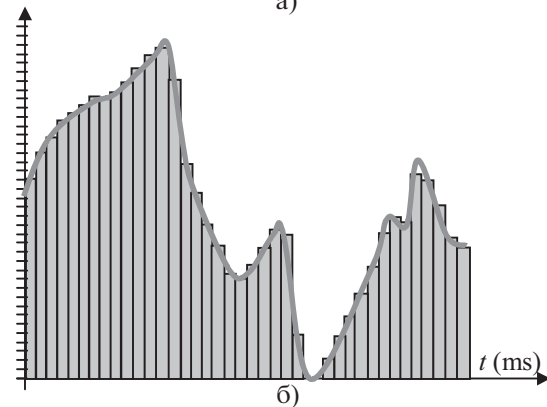
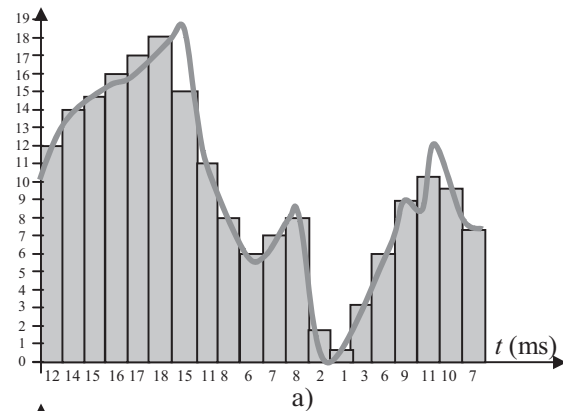
Сл. 2.

дигитални сигнали (AD конвертори). На пример, тоа се сите интерфејси кои се користат во компјутеризираниите лаборатории, фабрики и работилници. Инструментите кои/главно, даваат аналогни сигнали на излезот, се приклучуваат на интерфејс, кој има задача сигналот да го дигитализира и да го испрати на компјутерот. За жал, оперативните системи како што се Windows 95/98 и Windows NT4.0 имаат една негативна карактеристика. Постои

нешто што се вика real time мерење. Тоа е мерење кое овозможува да се набљудуваат резултатите во текот на самото мерење. Значи, секоја вредност што ќе се измери веднаш се прикажува на график или во табела. Windows 95/98 и Windows NT4.0 и практично сите оперативни системи со коишто сте се сретнале во својата пракса се системи кои може да работат повеќе операции едновремено (multitasking). Секоја од овие операции, па и мерењето, може да биде накратко прекината од останатите и дел од мерените вредности да се изгубат. Ова е посебно проблем кога станува збор за мерења што се вршат со голема фреквенција. За да се реши овој проблем се додава посебен автономен процесор во интерфејсот, кој го контролира мерењето и ги чува податоците од мерењето во посебна локална меморија. Тоа се таканаречени **вгнездени системи** (embedded systems). Подоцна, кога системот е слободен и не може да биде прекинат од некоја друга операција, податоците се испраќаат на компјутерот. Еден таков систем е и интерфејсот CoachLab2, кој може да се најде во кабинетите по физика во средните училишта.

Уредите кои ја вршат обратната функција, конвертираат дигитални сигнали во аналогни, се викаат DA конвертори и се, исто така, дел од нашето секојдневие. Секој плеер кој треба да прочита некој диск, независно од форматот во кој податоците се снимени на тој диск (CD, DVD, DivX, MP3), дигиталната информација мора прво да ја преведе во аналогна, а потоа да ја испрати на некој уред кој ќе ја претвори таа информација во звук, слика или движење.

Конечно, многу често се случува ваквите уреди да ги вршат и двете конверзии. Тоа се ADA конвертори. Таков еден конвертор е, на пример, модемот, кој се употребува со компјутерот за да се сурфа на Интернет. Дигиталната информација од компјутерот, тој ја претвора во аналогна и ја испраќа во телефонската мрежа. И обратно, аналогната информација што пристигнува од мрежата, тој ја претвора во дигитална и ја испраќа на компјутерот, за да можеме ние да ја видиме, слушнеме или меморираме на некој од медиумите.



Сл. 3.

Прашања и задачи

1. Како изгледа аналоген сигнал?
2. Која е целта на дигитализирањето на сигналите?
3. Од што зависи квалитетот на дигитализацијата? Кои се двете величини кои го определуваат тоа?
4. Што е грешка на семпливање?
5. Кои AD и DA конвертори ги знаете?
6. Што е вгнезден систем и зошто е воведен?

22.2. КОМУНИКАЦИОНИ СИСТЕМИ

Малку историја

Од своето прво појавување на лицето на Земјата луѓето се обидуваа да комуницираат. Во почетокот тоа била многу едноставна комуникација преку звука којшто човекот ги испуштал, односно разговор и се одвивала помеѓу двајца или повеќе поединци кои биле блиску еден до друг. Подоцна, за да можат да остават порака, луѓето почнале да ги употребуваат цртежите. Како се развивала цивилизацијата, така се зголемуваа потребите на човекот, меѓу другото, и за комуникација. Човекот се обидувал да комуницира на далечина, испраќајќи сигнали од чад, звучни сигнали со помош на барабани и писма со помош на коњи и гулаби. Оставањето пораки и тоа не кратки, уште повеќе добило на интензитет во 1450 година со појавата на техниката за печатење воведена од Гутенберг. Работите почнуваат од корен да се менуваат во средината на деветнаесеттиот век. Во 1844 година Семјуел Морз (Samuel Morse) ја испратил првата телеграфска порака. Комуникациите добиле нов квалитет кога во 1876 година Александар Греам Бел (Alexander Graham Bell) го конструирал првиот телефон. Малку се знае дека во исто време, независно од Бел, и Илајша Греј (Elisha Gray) конструирал телефон, меѓутоа правната битка во докажување на авторските права, сепак, ја добил Александар Бел. Овој начин на комуницирање е "жичен". Џејмс Клерк Максвел (James Clerk Maxwell) во 1860 година го предвиде постоењето на електромагнетните бранови, а во 1886 година Хајнрих Херц (Heinrich Hertz) покажа дека постои начин тие да се пренесуваат без помош на жици. Тоа била добра основа која можела да се искористи за конструирање на нешто ново што се вика радио. Во многу книги може да се најде податок дека радиото прв го конструирал Гуљелмо Маркони (Guglielmo Marconi) во 1899 година. Но, всушност, Никола Тесла е тој којшто прв конструирал радио. Својот патент, брод контролиран со

радио бранови, тој го прикажал на изложба во 1898 година и истата година го заштитил. Недоразбирањето во врска со тоа дали Маркони или Тесла е првиот конструктор на радиото е решено 1943 година, кога е признаен патентот на Тесла. Првата интерконтинентална радио-порака била испратена 1902 година. Тоа е моментот кога започнува глобализацијата на комуникациите. Во почетокот на дваесеттиот век голема група научници и конструктори работеле на конструирањето на телевизијата, за веќе во 1930 година ВВС (Би-Би-Си) да почне да емитува редовна програма.

Глобализацијата доби на интензитет и квалитет со првиот телекомуникационен сателит INTELSAT 1 во 1965 година. Веќе 1969 година, со помош на ИНТЕЛСАТ 3, е комплетиран првиот глобален сателитски комуникационен систем.

Во 1969 година за прв пат се појавува Internet, но под името ARPANET. Во 1978 година компјутерите од неколку универзитети во САД и Европа за прв пат се поврзуваат на Интернет со помош на INTELSAT.

Во исто време се развива и телефонијата. Во средината на дваесеттиот век се прават првите напори за воведување на мобилните телефони, за конечно во 1979 година да почне да работи првиот комерцијален систем за мобилна телефонија.

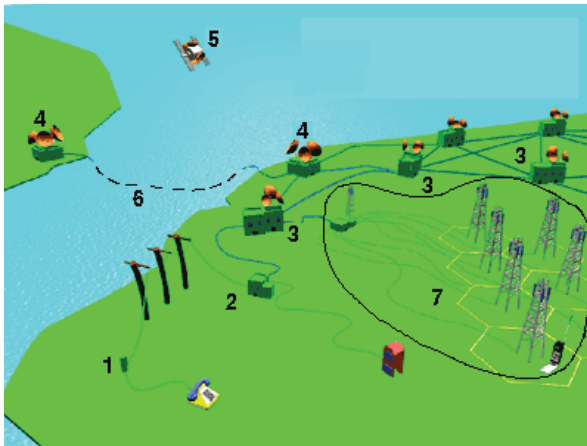
Тука некаде застанува историјата на телекомуникациите. Барем сега засега. Се разбира, нивниот развиток не застанува. Но, ова што беше досега кажано се корените на денешната современа комуникација. Сите овие технологии, обидувајќи се да се надополнат една со друга, дадоа нови приоди и нов квалитет во комуникацијата. Она што е заедничко за сите е дека тие се дел од една глобална комуникациона мрежа. Како изгледа тоа?

Телефонска мрежа

Комуникационата мрежа е составена од помали подмрежи, а тие од уште помали. Историски, телефоните се оние што се појавија први, па да тргнеме да ја расплеткуваме мрежата

22. Физика на комуникациите

од нив. Сите телефони во вашето соседство се поврзани на телефонската кутија, која се наоѓа на блиската бандера. Оттаму сигналот оди до локалната централа, а оттаму до главната централа (сл. 4). Оттука, преку оптички кабли сигналот се води до друга главна централа или до централата за меѓународни разговори, во зависност од тоа каде сакате да разговарате. Од централата за меѓународни врски, преку сателитската антена или оптичкиот кабел под океанот, сигналот се испраќа до сателитот којшто се наоѓа во геостационарна орбита околу Земјата и тоа над нашата држава. Оттаму сигналот го оди обратниот пат. Преку меѓународната, главната и локалната централа, доаѓа до телефонската кутија и конечно до телефонот.

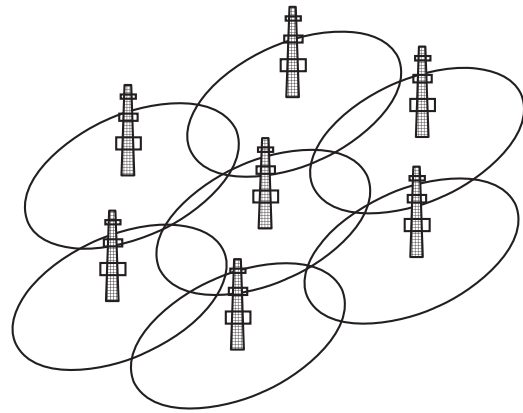


Сл. 4. Телефонска мрежа:

- 1: телефонска кутија; 2: локална централа;
- 3: главни центри; 4: централа за меѓународни разговори; 5: комуникационен сателит;
- 6: оптички кабел; 7: систем за мобилна телефонија.

Но, човекот сака да се движи и да комуницира. Затоа измислил подвижен, мобилен телефон. Во средината на дваесеттиот век постоеле подвижни радиотелефони кои имале многу моќни предаватели, за да може сигналот да стигне до телефонската централа. Тоа било

непрактично, па затоа во седумдесеттите години се развива нов систем со ќелии. Овој систем претпоставува поставување многу примопредаватели чии полиња на дејство се допираат (сл. 5). Тоа се таканаречени **базни станици**. Така, сега телефонот во секој момент е во близина на некоја базна станица и не мора да има многу моќен предавател. Кога телефонот ќе излезе од полето на едната базна станица, тој веднаш преоѓа во полето на друга, па така врската не се прекинува. Овие локални полиња личат на клетки, па затоа во некои земји оваа телефонија се вика целуларна или клеточна.



Сл. 5. Ќелиите од мобилната телефонија со базните станици

Во светот постојат неколку системи на мобилна телефонија:

- FDMA (Frequency Divison Multiple Access), каде што секој од телефоните работи на различна фреквенција во фреквентно подрачје од 800 MHz. Овој систем е погоден за пренос на аналогни сигнали;

- TDMA (Time Divison Multiple Access) е систем којшто овозможува сигналот да се дигитализира и компресира; тоа од своја страна овозможува многу пократко време за пренос на сигналите; тоа го прави овој систем три пати

22. Физика на комуникациите

побрз од FDMA; тој може да работи во фреквентно подрачје од 800 MHz и 1900 MHz;

- CDMA (Code Divison Multiple Access) системот му доделува на секој повик соодветен код и фреквенција;

- GSM (Global System for Mobile Communications) во основа е ист со TDMA системот; разликата е во тоа што кај GSM постои дополнително кодирање на сигналот за поголема безбедност. Овој систем е најраширен во светот, во Европа, Азија и Австралија оперира во фреквентните подрачја од 900 MHz и 1800 MHz, а во САД од 1900 MHz.

Телевизиска мрежа

Во исто време, на сличен начин и телевизијата ги користи сателитите. Сигналот од телевизиското студио со помош на оптички кабел се носи до сателитската антена која го испраќа сигналот до сателитот и понатаму сигналот може да се испраќа до која било точка на планетата. Ако станува збор за локална телевизија и нема потреба од сателитски пренос, сигналот повторно со оптички кабел се носи до локалниот предавател. Ако треба тој сигнал да се пренесе подалеку, тој се насочува со антена слична на сателитската кон други центри, таканаречени репетитори, кои го примаат тој сигнал, го засилуваат и го реемитуваат понатаму.

Кога зборуваме за сателитите, во последно време има една новина, а тоа е што до пред некоја година сателитите емитувале аналоген сигнал во фреквентното подрачје од 3,4 GHz до 7 GHz, а сега дигиталниот сигнал го емитуваат во фреквентното подрачје, од 12 GHz до 14 GHz. Ова не треба да се помеша со фреквенцијата на која емитуваат телевизиските станици. Тие емитуваат во три фреквентни подрачја, и тоа:

- 54 MHz до 88 MHz, што одговара на каналите од 2 до 6;

- 174 MHz до 216 MHz, што одговара на

каналите од 7 до 13;

- 470 MHz до 890 MHz или UHF подрачје, што одговара на каналите од 14 до 83.

Денеска телевизиските станици емитуваат, главно, во UHF подрачјето.

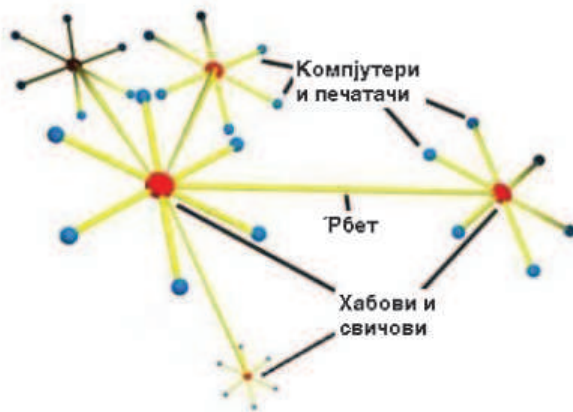
Да расчистиме уште една работа. Тоа што сателитите емитуваат дигитален сигнал, не значи дека тоа е дигитална телевизија. Едноставно аналогниот сигнал пред да се испрати на сателитот се дигитализира. Така тој се реемитува од сателитот и стигнува на другиот крај од Земјата, каде што се претвора повторно во аналоген сигнал и таков се испраќа до телевизиските приемници.

Интернет

Последниве години сè повеќе и сè побргу најголем извор на информации и најинтензивно место за комуникација станува Интернетот. Затоа малку повеќе ќе се задржиме кај него.

Секој компјутер којшто е поврзан на Интернет е дел од некоја мрежа, па дури и оние што ги имате во своите домови. Се разбира, тие не се дел од мрежата нон-стоп, туку тоа стануваат во моментот кога ќе се најавите на својот Ај-Ес-Пи (од англиската кратенка ISP, Internet Service Provider). Од дома тоа го правите со помош на модем. На училиште, на универзитет или во некоја компанија, компјутерот може да биде дел од етернет (Ethernet) мрежата, која може да биде локална (LAN, Local Area Network) или поширока (WAN, Wide Area Network). За да се поврзат компјутерите во локалната мрежа може да се користи уред наречен хаб (hub). Но, колку повеќе компјутери се врзуваат во оваа локална мрежа, толку се намалува проодноста на мрежата. Затоа во последно време за поголеми мрежи наместо хабови се користат свичови (од англиски switch, што значи прекинувач или преклопник). Разликата помеѓу хабовите и свичовите е иста како и помеѓу сообраќајните раскрсници регулирани со семафори и големите клучки. Кај првите, на дел од учесниците во сообраќајот

светлото на семафорот им е зелено и тие возат, доека на другите светлото на семафорот им е црвено и тие чекаат. Кај клучките сите учесници во сообраќајот може да возат со полна брзина без да си пречат едни на други. Во една компанија може да има повеќе локални мрежи во кои може да има комбинирано и хабови и свичови.



Сл. 6.

Поврзувањето на компјутерите може да се изведе на неколку различни начини. Најчест којшто денеска е во употреба е таканаречениот стар-бас (star-bus) начин (сл. 6). Тоа значи дека една група од компјутери е поврзана во вид на ѕвезда преку хаб или свич. На тој начин е формирана една подмрежа. Повеќе такви подмрежи се поврзуваат заедно на дополнителна машина, таканаречена **'рбет'**. Вака поврзани компјутерите го формираат стар-басот. Тие може да комуницираат помеѓу себе, но сè уште не може да отидат на Интернет. За таа цел сите овие локални мрежи треба да бидат поврзани на компјутер, таканаречен **рутер** (router). Рутерите овозможуваат влез во Интернет и врска помеѓу поединечните големи мрежи. Тие го сочинуваат 'рбетот на Интернет.

Секоја машина којашто е поврзана во мрежа, независно дали станува збор за компјутер или мрежен печатач, има своја адреса

наречена Ај-Пи адреса (IP address, од англиски Internet Protocol Address). Протокол е претходно дефиниран начин на комуникација којшто некој сака да го користи на Интернет. На пример, IP адресата на компјутерот на којшто е пишуван овој текст е 194.149.146.180. Овие четири броја, одделени со точка помеѓу, се наречени **октети**. Секој од тие броеви може да има вредност помеѓу 0 и 255, значи вкупно $2^8=256$ различни вредности. Ако се комбинираат сите четири октети, можни се $(2^8)^4=2^{32}=4\,294\,967\,296$ различни вредности.

Можеби не е тешко да се запомнат ваквите адреси ако ги нема многу, како што било во почетокот на постоењето на Интернет. Но, луѓето обично сакаат да пишуваат зборови кои ќе им бидат поразбирливи и ќе им кажуваат нешто. Затоа во 1983 година луѓето од Универзитетот во Висконсин измислија Ди-Ен-Ес систем и сервер (DNS, од англискиот Domain Name System/Server). Овој сервер ги преведува IP адресите во зборови кои се погодни за помнење и обратно, од зборови во IP адреси. Така, наместо да помните бројки, адресите можете да ги помните по некоја логика, па да одите на компјутер чија адреса е:

<http://www.pmf.ukim.edu.mk/>

а тоа значи дека ќе одите на компјутерот кој што се наоѓа на pmf (Природно-математички факултет) којшто е дел од ukim (Универзитет "Св. Кирил и Методиј") и спаѓа во edu (едукативниот систем) на mk (Македонија). Едноставно и ќе може да ја видите веб-страницата на тој факултет.

На почетокот од адресата напишавме http, со што го одбравме протоколот којшто ќе го користиме. Протоколот **http** доаѓа од англискиот збор **hypertext transfer protocol**, што значи протокол за пренос на хипертекст. Друг можен протокол е **ftp**, што значи **file transfer protocol**, што значи дека тоа е протокол кој овозможува да се пренесуваат фајлови.

Мобилната телефонија и Интернетот во последно време се здружени, така што сега е на располагање мобилен безжичен Интернет,

познат под името ВАП (WAP, Wireless Application Protocol). WAP е дизајниран да работи на кој било безжичен сервис, користејќи стандарди како:

- SMS (Short Message Service);
- CSD (High Speed Circuit-Switched Data);
- GPRS (General Packet Radio Service);
- USSD (Unstructured Supplementary Services Data).

Тоа е во кратки црти за користење Интернет можности преку телефон. Но постои и другата можност, користење телефон преку Интернет, таканаречена IP телефонија. Кога користите телефон класично, тогаш линијата помеѓу двата телефона е отворена цело време се додека не се спуштат слушалките. Значи дека линијата е цело време зафатена со тој еден повик. Кај IP телефонијата, компјутерот ја дели информацијата што треба да ја пренесе на мали делови, наречени пакети. Тој ја испраќа информацијата дел по дел. Во времето помеѓу две испраќања на две пакетчиња истата линија може да ја користат и други корисници. Се разбира, тие времиња помеѓу две испраќања се многу мали и не пречат во разговорот.

Прашања и задачи

1. Што се базни станици?
2. Кои системи на мобилна телефонија постојат и во што се разликуваат?
3. Кои се фреквентните подрачја во кои емитураат телевизиските станици?
4. Како се викаат уредите кои овозможуваат компјутерите да се поврзат во мрежа?
5. Кој е најчестиот начин на поврзување на компјутерите во мрежа?
6. Што е рутер и која е неговата улога?
7. Што е IP адреса и од што е составена?
8. Што се http и ftp?

!!! ЗА ОНИЕ ШТО САКААТ ДА НАУЧАТ ПОВЕЌЕ !!!

Безжичната комуникација станува се поактуелна во секојдневието. Претходно разгледавме еден сегмент, мобилните телефони. Но, кога зборуваме за комуникација помеѓу било какви електронски уреди, тогаш постојат различни можности за различни нивоа на комуникација:

- Bluetooth (Блутут) за PAN (Personal Area Network)
- WiFi за LAN (Local Area Network) и
- WiMAX за MAN (Metropolitan Area Network)

Заедничко за сите три варијанти е што користат радио бранови за комуникација.

Блутут конекцијата работи на мали растојанија, најмногу до десетина метри во фреквентно подрачје од 2,402 GHz до 2,480 GHz. За да не дојде до мешање со други уреди, блутут уредите емитураат сигнал со моќ од 1mW, што е многу мала моќ, споредено на пример со мобилните телефони, чија моќ е 3 W. Блутут уредите емитураат сигнал непрекинато. Кога два вакви уреди ќе дојдат во близина, тие се препознаваат и ако не е потребна посебна авторизација (лозинка или слично), тие автоматски си разменуваат информации. Блутут може да поврзе истовремено до осум различни уреди. За да не дојде до мешање во комуникацијата помеѓу различни уреди, блутут уредите користат техника наречена spread-spectrum frequency hopping. Буквално преведно ова значи, скокање на фреквенцијата со развлечен спектар. Штом еднаш двата уреди ќе се препознаат, тие одбираат по случаен избор 79 различни фреквенции во блутут фреквентното подрачје. Во текот на комуникацијата синхронизирано ја менуваат фреквенцијата помеѓу овие 79 можности (скокаат од една на друга) и тоа го прават 1600 пати во една секунда. Ако во близината на овие два уреди дојде трет, со него се повторува процедурата за препознавање и избор на други случајни 79 фреквенции. Така, речиси не постои веројатност две различни комуникации во ист момент да се

22. Физика на комуникациите

најдат на иста фреквенција.

WiFi конекцијата служи за комуникација на поголеми растојанија, вообичаено околу триесетина метри (со моќни уреди и до 100 m). Постарите WiFi уреди работат на фреквенција од 2,4 GHz, а поновите на 5 GHz. Во зависност од генерацијата на уредот, брзината на пренос на информации може да биде од 11 до 54 мегабити во секунда. Бидејќи станува збор за комуникација преку радио бранови кои може да ги прими секој приемник кој работи на таа фреквенција, многу е важна безбедноста на ова врста комуникација. Два постари безбедносни системи се: WEP (Wired Equivalency Privacy) и WPA (WiFi Protected Access). Најновиот систем за заштита се вика MAC (Media Access Control), кој ја користи MAC адресата, која е карактеристична за секој компјутер и зависи од неговиот хардвер.

WiMAX конекцијата ги обединува безжичноста на WiFi и брзината на широкопојасната врска, која ја имаме кај конекцијата преку жица. За разлика од WiFi, WiMAX оперира на растојанија до 50 km. Брзината е до 70 мегабити во секунда, што е помала од широкопојасната врска. Работи во две фреквентни подрачја: до 2 до 11 GHz и од 10 до 66 GHz.

Секој од наведените начини на безжично поврзување има свои предности и свои недостатоци. Што ќе се користи во даден момент зависи од потребите, но зависи и од можностите и односот помеѓу цената и она што се добива.

Прашања и задачи

1. Кои се фреквентните подрачја што ги користат ове начини на безжична комуникација? Зошто се користат токму тие, а не оние кои се за обична радио-комуникација?
2. Зошто WiMAX оперира на толку високи фреквенции? Помош: што се менува кај електромагнетниот бран, со зголемување на фреквенцијата?

Спореди ги трите врсти безжична комуникација и откри ги предностите и недостатоците.

22.3. КОМПАКТ ДИСК - ПЛЕЕР

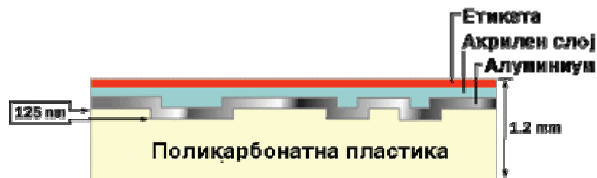
Компакт диск

Компакт дисковите (Це-ДЕ, CD) и дигиталните видеодискови (Ди Ви-Ди, DVD) се насекаде околу нас. Независно дали се користат за музика, видео, податоци или софтвер, тие станаа стандарден медиум за дистрибуирање и пренос на големи количества податоци и информации.

Во претходната лекција се запознавме со семплирање. Колкаво количество информации може да соберат CD-ата. Тие работат со 44100 семпла во секунда за секој канал. Ако тоа се помножи со бројот на канали, два, и со бројот на бајти потребни за секој семпл, два, тогаш за 74 минути музика потребни се 783 216 000 бајта, или:

$$(44100 \text{ семпла/канал} \cdot \text{секунда}) \cdot 2 \text{ канала} \cdot (2 \text{ бајта/семпл}) \cdot 74 \text{ минути} \cdot (60 \text{ секунди/минута}) = 783\,216\,000 \text{ бајта}$$

CD -то е цврсто парче од поликарбонатна пластика во вид на кружна плоча со дебелина од околу 1,2 mm и радиус 12 cm. Во текот на изработката во пластиката се втиснуваат мали испакнатини кои се наредени во вид на долга спирална лента. После тоа се нанесува тенок алуминиумски слој кој ја прекрива спиралната лента. Со спреирање врз алуминиумот се нанесува тенок акрилен слој за да го заштити алуминумот. Конечно, одозгора се отпечатува етикетата. Пресек на изгледот на CD е даден на сл. 7.

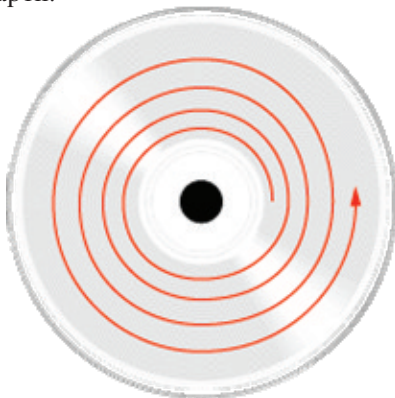


Сл. 7.

Спиралната лента на дискот почнува од внатрешноста и се шири кон периферијата (сл.8).

22.. Физика на комуникациите

Ваквата конструкција дозволува дискот да има помал радиус од 12 cm. Така, денеска се прават и помали дискови, па дури и дискови во вид на визит карти.



Сл. 8.

Ширината на лентата е $0,5 \mu\text{m}$, а растојанието помеѓу две соседни линии во лентата е $1,6 \mu\text{m}$. Должината на испакнатните кои ја сочинуваат оваа спирална лента е најмалку $0,83 \mu\text{m}$, а нивната височина или дебелина е 125 nm (сл. 9). Вкупната должина на спиралната лента е околу 5 km.



Сл. 9.

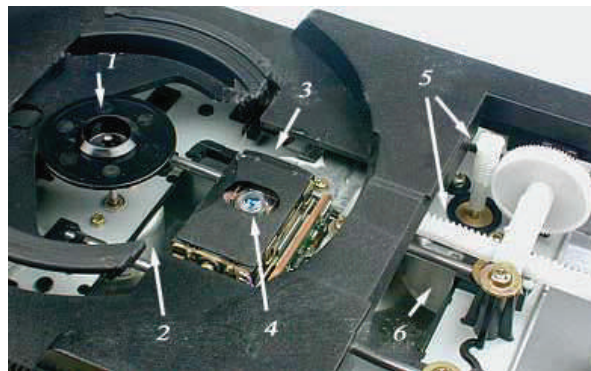
Често за овие мали испакнатини можете да слушнете дека се вдлабнатини. Погледнати од страна на алуминиумската фолија, тие се вдлабнатини, но од страната од која ласерот ги чита тие се испакнатини. На местата на кои нема испакнатини, светлината се рефлектира и уредот за читање овој сигнал го регистрира како 1. На местата каде што има испакнатина, светлината не се рефлектира и уредот го регистрира ова како 0. Така информацијата е преведена во бина-

рен код, на којшто комуницираат компјутерите.

CD плеер

CD плеерот има задача да ги најде податоците на дискот и да ги прочита. Со оглед на широчината на спиралната лента и големината на испакнатините, механичкиот уред кој се наоѓа во CD плеерот мора да биде крајно прецизен и фин. Овој ред се состои од три основни елементи (сл.10):

- мотор на носачот на дискот;
- глава за читање со ласер и леќи;
- механизам за следење на спиралната лента (tracking system).



Сл. 10. 1: носач на дискот, 2: мотор на носачот на дискот, 3: глава за читање со ласер, 4: леќи на ласерот за фокусирање, 5: механизам за следење на спиралната лента, 6: мотор на механизмот за следење на спиралната лента

Како се читаат податоците од дискот?

Моторот на носачот може да го врти дискот со брзина од 200 до 500 завртувања во секунда. Оваа брзина многу прецизно се контролира, затоа што од неа зависи точноста на читање на податоците. Кога ласерот се наоѓа поблиску до центарот на дискот, тој ротира со поголема брзина. Како се движи кон периферијата, така брзината на ротацијата се намалува. Радиусот на кривината на спиралната лента поблиску до центарот е помал од оној на периферијата на дискот. Тоа значи дека еден

22. Физика на комуникациите

круг од лентата поблиску до центарот ќе има помалку податоци од оној поблиску до периферијата на дискот. Затоа, ако не се намали брзината на ротација на дискот, тогаш брзината со која ќе доаѓаат податоците ќе се зголемува и уредот нема да може да ги прочита.

Втор битен момент во читањето на дискот е светлината од ласерот да се фокусира на лентата со испакнатини. Ласерскиот сноп поминува низ поликарбонатниот слој, се рефлектира од алуминиумската фолија и паѓа на оптоелектронскиот уред. Интензитетот на светлината се менува во зависност од испакнатините на кои снопот наидува. Опто-електронскиот уред ги детектира овие промени и понатаму ги преведува на јазик кој е разбирлив за дадениот уред.

Третиот момент во читањето на дискот е најтешката работа што треба овој уред да ја направи, а тоа е ласерскиот сноп да се држи во центарот на спиралната лента. За тоа е задолжен механизмот за следење на лентата.

Така, додека ја слушате музиката од дискот, моторот на носачот го врти дискот, читачот од главата ја регистрира рефлектираната светлина од ласерот, моторот за следење го повлекува читачот кон периферијата на дискот "мачејќи се" да ја следи лентата. За цело време читачот му испраќа информација на моторот на носачот за брзината со која му стигнуваат податоците. Штом "почувствува" дека таа брзина се зголемува му дава сигнал на моторот на носачот и тој ја намалува брзината. Едноставно, нели?

Конструкторите на овој уред се потрудиле да го направат така да не биде толку едноставно, а тоа значи да биде и посигурно читањето на податоците. Кои се можните проблеми?

1. На лентата не смее да има продолжени празнини без испакнатини. За да се реши овој проблем податоците се кодирани со помош на И-Еф-Ем (EFM, од англискиот Eight-Fourteen Modulation), односно 8-битните бајти се конвертираат во 14-битни.
2. За да се овозможи лесно поместување од песна на песна и читање на податоците за секоја песна поединечно, се користи така-

наречено субкодирање на податоците, коешто ги кодира релативната и апсолутната позиција на ласерскиот читач.

3. Бидејќи постои можност ласерот да не прочита некоја испакнатина од дискот, воведен е уред за корегирање на грешките (error correcting codes).
4. Можно е цел пакет од информации да не биде воопшто прочитан, затоа што површината на дискот е оштетена. За да се избегне ова, читачот ги чита податоците од едно завртување на дискот, ги меморира и потоа ги чита податоците од следното завртување, па ги спојува.

Постојат повеќе формати во кои може да се запише податокот на компакт дисковите. Некои од нив се во широка употреба, а некои се веќе одамна заборавени. Два формати со кои најчесто се сретнуваме се Це-Де-Де-А (CD-DA, Compact Disc-Digital Audio) за запишување звучни информации и Це-Де-РОМ (CD-ROM, Compact Disc-Read Only Memory) за запишување компјутерски податоци.

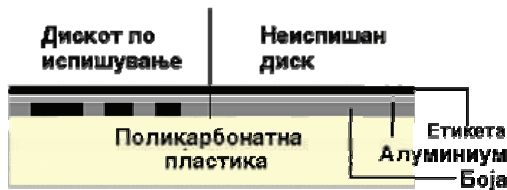
CD пишувачи

CD пишувачите не се разликуваат многу од CD читачите. Се разбира CD пишувачот не мора да има уред за читање на информациите од дискот. Но, денеска секој современ пишувач е снабден и со читач. Друга разлика е што ласерот којшто треба да ја испише информацијата е помокен од оној којшто е вграден во CD читачот.

За да може да испишете, односно снимите податоци на еден компакт диск, потребен ви е диск којшто малку се разликува од оној со којшто се запознавме претходно. Тоа е CD-R (Compact Disc-Recordable). Неговиот пресек е даден на сл. 11. На десната половина, на која е претставен изгледот на неиспишан диск, може да се забележи дека нема акрилен слој, а под алуминиумскиот слој има слој од фотоосетлива боја. Уште поважно нема испакнатини. Фотоосетливата боја е потполно транспарентна за светлината. Светлината поминува низ неа и се

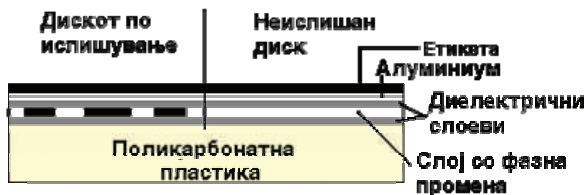
22.. Физика на комуникациите

рефлектира од алуминиумскиот слој. Но кога со помош на ласерска светлина ќе се изгори дел од бојата, таа станува нетранспарентна. Од тоа место не се рефлектира светлина и се однесува како испакнатина (десната страна на сл. 11).



Сл. 11.

Вториот вид компакт диск на којшто може да се запишуваат податоци е CD-RW (Compact Disc-ReWritable), односно компакт диск на којшто податоците може да се пишуваат, бришат и повторно пишуваат. Неговата конструкција е различна од онаа на претходните два типа компакт дискови (сл. 12)



Сл. 12.

Под етикетата и алуминиумскиот слој, коишто се стандардни за сите дискови, нанесен е сендвич од два диелектрични слоја и еден слој од материјал чија фаза може да се менува. Овој материјал е соединение направено од сребро, антимон, телур и индиум. Кога тој е во кристална фаза, светлината може да поминува низ него и да се рефлектира од алуминиумскиот слој. При пишување на податоците, ласерот за пишување го загрева потребното место до температура од околу 600°C, при што го топи материјалот и тој станува аморфен. На тие места материјалот веќе не е транспарентен и се

однесува како испакнатина.

За да се избрише информацијата од компакт дискот, уредот е опремен со дополнителен ласер, чија моќност не е толку голема како на оној за пишување, но е поголема од оној за читање. Така, во процесот на бришење на податоците тој успева да го загрее материјалот до околу 200°C, на која материјалот повторно кристализира.

CD-RW дисковите рефлектираат помалку светлина од обичните компакт дискови. Затоа постарите CD читачи не можат да ги читаат овие дискови. Некои од новите CD читачи и плеери, вклучувајќи ги и сите CD-RW пишувачи можат да ја прилагодуваат моќноста на ласерите за работа со различни типови на компакт дискови.

DVD

Кога зборуваме за компакт дисковите, не можеме да ги заборавиме и DVD -ата (Digital Video Disc). Станува збор за дискови кои се малку поинаку изградени од компакт дисковите. Како и кај претходните и кај DVD носачот е направен од поликарбонатна пластика, на која се нанесени испакнатини наредени во вид на долга спирална лента. Над нив доаѓа слој од алуминиум. Некој ќе се запраша, па каква е разликата помеѓу CD и DVD?

Ширината на лентата кај DVD е 0,32 μm , растојанието помеѓу две соседни линии во лентата е само 0,74 μm , должината на една испакнатина е само 0,4 μm , а нејзината височина е само 0,12 μm . Споредбата на овие димензии помеѓу CD и DVD е дадена во табела 1.

Табела 1.

	CD (μm)	DVD (μm)
Широчина на лента	0,50	0,32
Растојание помеѓу две линии	1,6	0,74
Должина на испакнатина	>0,83	>0,4
Височина на испакнатината	0,125	0,12

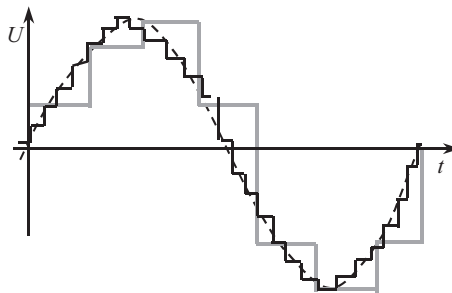
Ако ги споредиме со оние кај компакт дискот ќе забележиме дека овде големините се

22. Физика на комуникациите

многу помали. Тоа значи дека густината на податоци овде е многу поголема, што значи дека на DVD може многу повеќе податоци да се сместат. Така на DVD може да се сместат 4,8 GB податоци, што е за околу шест и пол пати повеќе од она кај компакт дискот. Волкав мемориски капацитет дозволува на дискот да се снимат филм во траење од два часа. Втора голема предноста на DVD во однос на CD е што може да се нанесат два слоја со податоци. Во тој случај, помеѓу двата слоја се нанесува полупропусен слој од злато, којшто може да служи за рефлектирање, но низ него може и да поминува светлина, во зависност од тоа од кој слој треба ласерот да чита податоци. На тој начин капацитетот на дискот се зголемува на 7,95 GB. Во тој случај на дискот може да се смести видео снимка со времетраење од четири часа. Капацитетот на дискот не се дуплира со додавање на вториот слој, затоа што должината на испакнатините во тој случај е поголема ($> 0,44 \mu\text{m}$). Ова овозможува да се избегне можноста од мешање на податоците од двата слоја.

Трета предност е што на DVD дисковите може да се нанесуваат слоеви од двете страни на дискот. Во тој случај капацитетот на дискот е 8,75 GB. Кај овој диск видеоснимката трае до четири и пол часа. Ако на двете страни од дискот се нанесат по два слоја капацитетот на дискот е 15,9 GB. На овој диск може да снимите филм со времетраење од над осум часа. Овие времетраења важат ако снимката е во MPEG-2 формат.

Кога зборуваме за DVD видео дискови навикнати сме, главно, да зборуваме за видео снимки. Но, не е далеку моментот кога наше секојдневие ќе станат и DVD аудиодискови. Повеќето DVD плеери имаат 96 kHz/24 битни дигитално-аналогни конвертори. Тоа е доволно за видеоснимки. Но, за аудиодискови е потребен 192 kHz/24 битен дигитално-аналоген конвертор. Тоа значи дека аудиодисковите се читаат со поголема брзина. Како изгледа тоа и како влијае тоа на квалитетот на сигналот?



Сл. 13. Оригинален аудио сигнал (испрекинатата линија), дигитализиран аудио сигнал за компакт диск (сива) и дигитализиран аудио сигнал за DVD (полна црна линија).

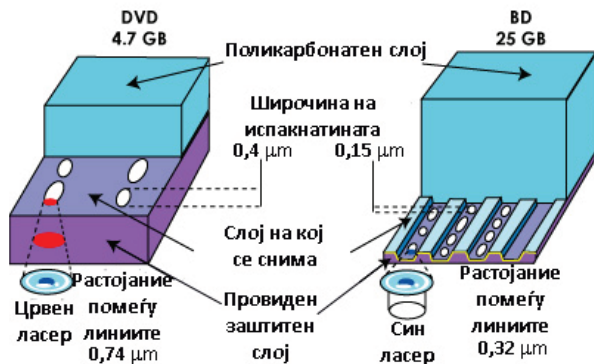
Оригиналниот сигнал на сл. 13 е претставен со испрекинатата линија. Кога тој сигнал е обработен, односно дигитализиран за CD (како што беше објаснето во Аналогно-дигитална конверзија), тогаш излезниот сигнал изгледа отприлика како сивата крива на сл. 13. Претходно видовме дека дигитализацијата за CD се врши со брзина од 44100 семпла во секунда, односно 44,1 kHz. Се гледа дека тие две криви се разликуваат, што значи дека дел од информациите се изгубени. Кога истиот тој сигнал е дигитализиран за DVD, тогаш тој се дигитализира со брзина од 192 000 семпла во секунда, односно со 192 kHz. Сигналот во тој случај изгледа како црната крива на сл. 13. Се гледа дека овој сигнал е многу поблизок до оригиналниот и верноста при репродукцијата е поголема.

Прашања и задачи

1. Како е изграден компакт дискот?
2. Кои се главните делови на CD плеерот и како ги чита податоците од компакт дискот?
4. Во што се разликуваат CD пишувачите од CD плеерите и како работат?
5. Која е разликата помеѓу CD-R и CD-RW? Како се изградени овие компакт дискови?
6. Зошто DVD собира повеќе податоци од CD?
7. Зошто не се дуплира капацитетот на DVD со додавање на втор слој?

!!! ЗА ОНИЕ ШТО САКААТ ДА НАУЧАТ ПОВЕЌЕ !!!

Кога во 1997 година се појави DVD, тоа беше вистинска револуција, која во домовите ги донесе дигиталниот звук и слика, а со тоа направи големи промени и во филмската индустрија. За релативно кратко време се случи нова револуција. Во 2006 година се појавија блуреј дисковите (Blue-ray Discs, BD). За разлика од DVD, кај кое растојанието помеѓу двете ленти е $0,74 \mu\text{m}$, кај BD растојанието е $0,32 \mu\text{m}$. Така сега и широчината на лентата е преполовена, па изнесува $0,15 \mu\text{m}$, колку што изнесува и големината на должината на испакнатината (кај DVD таа беше $0,4 \mu\text{m}$). Со овие промени, капацитетот на BD е пет пати поголем од оној на DVD, односно 25 GB.

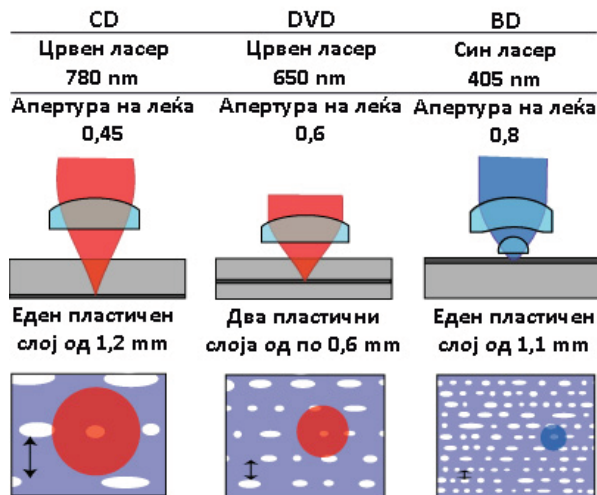


Сл. 14 DVD во однос на BD

Но, разликата не е само во големината на лентите и растојанијата.

Еден од проблемите кој се појавува при читање на CD или DVD е непрецизноста на светлинскиот сноп. Поради релативно големата дебелина на провидниот заштитен слој, доаѓаат до израз ефектите на прекршувањето на светлината. Дополнително, се настанува двојно прекршување на светлината, со што се шири светлинскиот сноп, што прави дополнителни

проблеми и при читање и при запишување на податоците на дискот. Овие ефекти особено се изразени ако ласерскиот сноп не паѓа нормално на површината. Затоа, кај BD тој слој е со многу помала дебелина, па овие ефекти се далеку намалени.



Сл. 15 Како чита ласерот кај CD, DVD и BD

И тоа не е единствената предност на BD. Со оглед на неговата конструкција и трошоците за изработка се намалени.

Меморискиот капацитет на BD овозможува на него да се запишат 13 филмови во стандарден формат или пак еден филм во HD формат.

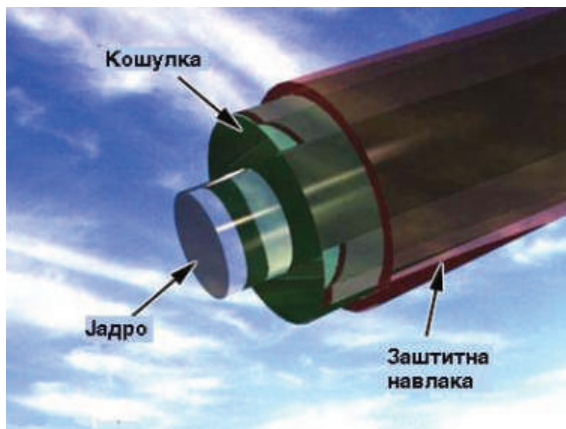
Прашања и задачи

1. Споредете ги CD, DVD и BD и откријте ги нивните разлики?
2. Како е можно со двојно намалување на димензиите на лентите и испакнатините, меморискиот капацитет на дискот да се зголеми пет пати? Помош: кога ќе се променат димензиите на еден правоаголник два пати, колку се променува неговата плоштина? Кога ќе се промени радиусот на круг два пати, колку се менува неговата плоштина?

22. 4. ФИБЕР ОПТИЧКИ КОМУНИКАЦИИ

Секогаш кога се зборува за пренос на информации се споменува терминот оптички кабли. Оптичките кабли во себе не содржат метални жици, како што обично сме навикнати да гледаме во стандардните кабли. На нивно место, во оптичките кабли има стаклени влакна. Постојат повеќе причини за замена на металните кабли со оптички. Првата причина е што тие можат да пренесат повеќе информации од металните. Втората причина е што овие кабли се многу помалку подложни на надворешни влијанија од други електромагнетни полиња.

Структурата на стаклените влакна е дадена на сл. 14. Во оската на влакното е **јдрото** направено од стакло. Околу јадрото е **кошулка** која е, исто така, од стакло, но направена на посебен начин. Конечно, сето тоа е ставено во пластична заштитна навлака. Во оптичките кабли има стотици и илјадници вакви влакна.



Сл. 14. Структура на оптичко влакно

Постојат два типа на влакна:

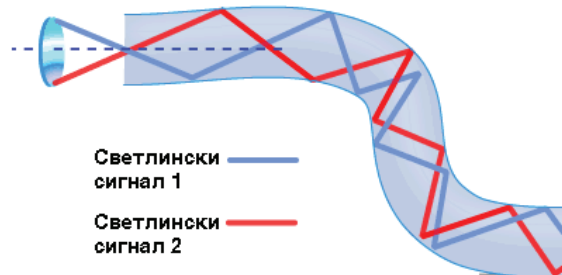
- влакна што работат во еден мод (*single-mode*);
- влакна што работат во повеќе модови (*multi-mode*).

Првите имаат јадро со мал дијаметар од околу 9 μm . Тие пренесуваат информации со помош на инфрацрвена светлина со бранови должини помеѓу 1300 и 1550 nm. Вторите имаат поголеми јадра, со дијаметар од околу 62,5 μm . Тие пренесуваат информации со помош на инфрацрвена светлина со бранови должини помеѓу 850 и 1300 nm. Некои влакна се прават и од специјални пластични материјали. Нивното јадро е многу големо, со дијаметар од околу 1 mm. Низ нив се простира видлива црвена светлина со бранова должина од 650 nm.

Значи, за да имаме пренос на информација на овој начин, потребен е *извор на сигналите, оптичко влакно, оптички регенератор и оптички приемник.*

Како работат оптичките влакна?

Оптичките влакна ја користат појавата на тотална рефлексija. Светлината се простира праволиниски. Лесно е да се осветли едно место, ако нема препрека помеѓу изворот на светлината и тоа место. Но, ако постои препрека, тогаш светлината не може да ја заобиколи препреката. Оптичките влакна можат да \square помогнат на светлината да го направи тоа. Патувајќи низ јадрото на влакното, светлинскиот зрак доаѓа до кошулката, тотално се рефлектира од неа и повторно се враќа во јадрото (сл. 15).

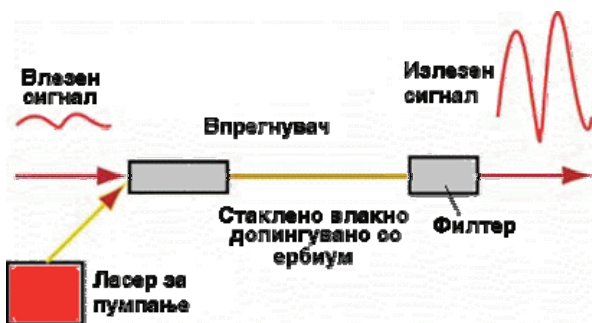


Сл. 15. Простирање на светлина низ оптичко влакно со помош на тотална рефлексija

Така, светлинскиот зрак не може да излезе од влакното. Ништо не е идеално, па ни ова. Простирајќи се низ влакното, интензитетот на

22. Физика на комуникации

светлинскиот зрак опаѓа. Причина за тоа се, главно, нечистотиите во стаклото. За различни бранови должини ослабувањето е различно, но се движи околу 50% на секој километар. Кај некои специјални влакна опаѓањето на интензитетот на светлинскиот зрак со бранова должина од 1550 nm е помало од 10% на километар. Поради ова, по должината на оптичкиот кабел на повеќе места се поставуваат **оптички регенератори** (сл. 16).

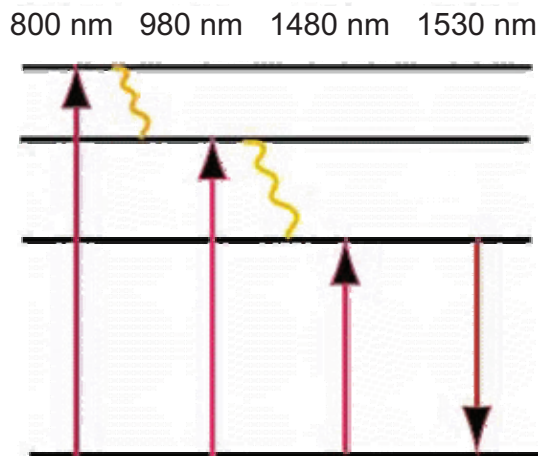


Сл. 16. Оптички регенератор

Оптички регенератор

Регенераторот има задача да го засилува ослабениот сигнал. Во почетокот, регенераторите го претворале светлинскиот сигнал во електричен, го чистеле од шума, го засилувале и повторно во вид на светлина го испраќале понатаму. Но, ваквите регенератори воведувале изобличувања во сигналот и трошеле многу електрична енергија. Во 1987 година за прв пат е конструиран таканаречен фиберов засилувач. Типичниот фиберов засилувач работи на подрачјето од 1550 nm и се состои од оптички влакна направени од стакло кое е допингувано со ербиум и лазер за "пумпање", којшто емитува светлина со бранова должина од 980 nm. Ослабениот сигнал влегува во впрегнувачот, каде што се комбинира со сигналот од лазерот за пумпање. Тој го побудува допингуваното стакло да емитува. Таа стимулирана емисија дополнително стимулира нова емисија, па така бројот на

емитирани фотони расте многу бргу по експоненцијален закон. На тој начин сигналот може да се засили и до 10 000 пати и на излез да се добие моќност и до 100 mW.



Сл. 17.

Зошто стаклото се допингува токму со ербиум? Ербиумот може да се побуди со светлина со бранови должини од 800 nm и 980 nm (сл.17). Ова е важно затоа што стаклените влакна може да пренесуваат светлина со овие бранови должини без големи губитоци. Уште еден битен момент е што овие бранови должини многу се разликуваат од брановата должина на сигналот (1550 nm) што го олеснува раздвојувањето на носечкиот сигнал и сигналот за пумпање. Кога ербиумот ќе се побуди со светлина со бранови должини од 800 nm или 980 nm, електроните преоѓаат во повисоко енергетско ниво. Оттаму, тие преоѓаат во пониско енергетско ниво без да емитираат светлина. Електроните остануваат во тоа ниво релативно долго време, ред големина 10 ms. Ова е многу важно, затоа што квантната ефикасност на уредот зависи од тоа колку долго може атомите да останат возбудени, односно колку долго електроните може да останат во повисоко енергетско ниво.

9.4. Фибер оптички комуникации

Ако остануваат пократко, тогаш е потребна дополнителна енергија која ќе ги држи во тоа ниво. Ербиумот може да се побуди и со светлина со бранова должина од 1480 nm, но тоа не е погодно, затоа што таа бранова должина не се разликува многу од брановата должина на светлината која го носи сигналот. Тоа од своја страна може да ја намали ефикасноста на уредот и да го зголеми шумот во сигналот.

Втора добра карактеристика на ербиумот е што може лесно да се раствори во стаклото. Со додавање на ко-допанти, како што се Al_2O_3 , $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ или P_2O_5 , растворливоста на ербиумот може да се зголеми и да се подобрат некои карактеристики на засилувачот. На пример, ако се додаде $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ може да се зголеми двојно времето на останување во возбудена состојба, што двојно ја зголемува и квантната ефикасност на засилувачот.

Се разбира, ништо не е идеално, па ни овие засилувачи. Брановата должина на излезниот сигнал доста варира, па затоа се потребни дополнителни пасивни филтри. На крајот, вака засилениот сигнал го прима оптичкиот приемник, кој може да биде фотоќелија или фотодиода. Овие засилувачи се користат во кабловската телевизија и телефонијата.

Кои се предностите на фибер оптичката комуникација?

- Цената на оптичкиот кабел може да биде пониска од онаа на бакарната жица.

- Оптичките влакна може да бидат потенки од жицата.

- Тоа што се потенки овозможува повеќе влакна да се стават во еден кабел. Од своја страна, ова овозможува повеќе информации, односно телефонски линии и радио и телевизиски канали да поминуваат низ еден кабел.

- Ослабувањето на сигналот е помало кај оптичките кабли од оној кај бакарните жици, што од своја страна ги намалува трошоците за засилување на сигналот.

- Светлинските сигнали, за разлика од електричните, не можат да си влијаат едни на други.

- Оптичките влакна се идеални за пренос на дигитални сигнали.

- Бидејќи низ влакната не тече електрична струја, нема опасност од загревање и запалување.

- Оптичкото влакно е полесно од бакарната жица.

- Флексибилноста на оптичките влакна овозможува нивна употреба и во други области, како што е медицината (во бронхоскопија, ендоскопија, лапароскопија . . .)

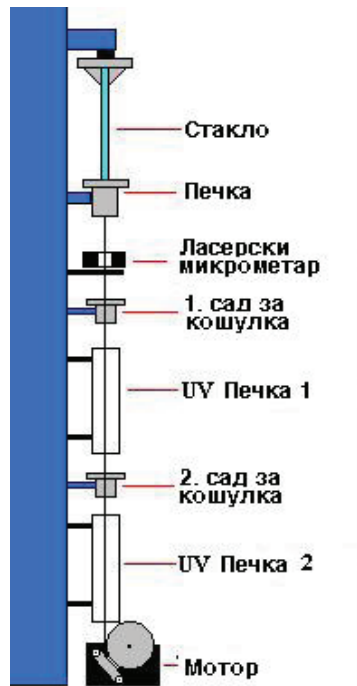
Посебно ќе ја разгледаме предноста во квалитетот на сигналот. Зошто квалитетот на сигналот е многу поголем од кој било друг начин на пренос на информации. Светлинскиот бран во овој случај е носечки бран на кој е втиснат сигналот што треба да се пренесе или, со други зборови, светлинскиот сигнал е модулиран. Кога зборуваме за модулирање на електромагнетни бранови (радио и телевизија) видовме дека е потребен бран со поголема фреквенција за да се пренесат повеќе податоци. Така, за да се пренесе звук со добар квалитет фреквенцијата на електромагнетните бранови треба да биде околу 100 MHz (FM браново подрачје). Но, за да се пренесе квалитетна слика, електромагнетните бранови може да имаат фреквенција и до 890 MHz (телевизија). Ако се потсетиме дека фреквенцијата на брановата должина има ред големина од 100 THz (терагерци), што е за милион пати поголема од фреквенцијата на радио и телевизиските бранови, тогаш е јасно зошто сигналот пренесен со светлина е многу поквалитетен од сите останати.

Како се прават оптичките влакна

Најпрво се подготвува материјалот од којшто ќе се влечат влакната. Тој материјал се добива од мешавина на SiCl_4 , GeCl_4 , POCl_3 и VBr_3 . Концентрацијата на секој од овие супстанции точно се контролира, затоа што од тоа зависи индексот на прекршување, коефициентот на ширење, точката на топење и другите важни карактеристики на материјалот. Оваа смеса се носи во една кварцна цевка во која се впумпува кислород и се загрева на висока температура.

22. Физика на комуникации

Притоа се формираат двете главни соединенија, SiO_2 и GeO_2 . Откако ќе се добие масивното парче стаклен материјал од кој ќе се прават оптичките влакна, прво се тестираат физичките карактеристики, ако задоволуваат се оди на влечење на влакната.



Сл. 18. Направа за влечење оптички валкна

Парчето стакло се закачува на еден држач да виси, а долниот дел се загрева во графитна печка на температура помеѓу 1900°C и 2000°C . Стопениот дел од стаклото под дејство на гравитацијата почнува да се цеди надолу и се формира влакно. Најдолу на уредот за влечење се наоѓа мотор кој го влече ова влакно. Брзината со која тоа тој го прави е контролирана од ласерскиот микрометар. Ако дебелината на влакното е поголема од онаа која што треба да биде, микрометарот го регистрира тоа и му дава наредба на моторот да влече посилно. На

својот пат влакното поминува низ садовите во кои се нанесува кошулката и низ две ултравиолетови печки кои вршат корекција на влакната. На крајот, на калемот од моторот може да има над 2 km оптичко долго влакно.

Така изработеното оптичко влакно повторно се тестира, и тоа: неговата еластичност, индексот на прекршување на светлината, геометријата на влакното, коефициентот на апсорпција и негова зависност од температурата, колку информации може да пренесува, хроматската дисперзија, температурното подрачје во кое може да работи, способноста да работи под вода, што е многу важно за каблите кои ќе се спуштат под океаните и морињата.

Прашања и задачи

1. Каква е структурата на оптичкото влакно?
2. Кое браново подрачје од светлината го користат оптичките влакна?
3. Која физичка појава ја користат оптичките влакна за да може светлината да се простира "криволиниски"?
4. Што е оптички регенератор и зошто служи?
5. На кој принцип работи оптичкиот регенератор?
6. Зошто е погоден ербиумот за допингување на стакло за оптички регенератори?
7. Дали е погодна светлина со бранова должина од 1480 nm за пумпање на ласерот? Зошто?
8. Зошто употребата на оптичките влакна има предност над бакарните жици?
9. Кои се двете битни соединенија кои се употребуваат при изработка на оптичките влакна?

22.5. ЗАСИЛУВАЧИ

Кога ќе се спомне засилувач, најчесто се мисли на делот кој се наоѓа кај хај-фај уредите и кој е задолжен за најголемата галама. Но, забораваме дека засилувачи имаат и радијата, телевизорите, репетиторите и др. Исто така, обично под засилувач мислиме на нешто што засилува звук, односно сигнал со ниска фреквенција. Па така, според фреквенцијата, засилувачите може да ги делиме на:

- нискофреквентни;
- високофреквентни;
- засилувачи на постојан напон.

Според тоа што засилуваат, тие може да се поделат на засилувачи на:

- струја;
- напон;
- моќност.

Секој засилувач, во принцип, може да се изведе со: електронски ламби, транзистори, диоди и друг каков било активен елемент.

Постојат повеќе величини што го опишуваат засилувачот, но во моментот ќе се запознаеме со три од нив. Тоа се **влезна импеданција**, **излезна импеданција** и **коэффициент на засилување**. Степенот на засилување се пресметува како однос од излезната и влезната величина што се засилува. Значи, ако станува збор за напонски засилувач, коэффициентот на засилување, A , ќе биде однос од излезниот и влезниот напон:

$$A = \frac{V_{iz}}{V_{vl}} \quad (1)$$

Често засилувањето што го дава само еден елемент е недоволно, па затоа се употребуваат повеќе елементи споени во каскада. Секој од елементите претставува засебен засилувач и во случајот се вика засилувачки степен. При спојување на степените во каскада, излезот од првиот степен е споен на влезот од вториот, излезот од вториот со влезот од третиот итн. Во случај кога степените се напонски засилувачи, тогаш целата каскада ќе биде напонски засилувач. Ако во засилувачот имаме N степени, коэффициентот

на засилување кај ваков засилувач ќе биде однос од излезниот напон на N -тиот степен и влезниот напон на првиот степен:

$$A = \frac{V_{iz}^N}{V_{vl}^I} \quad (2)$$

Коефициентот на засилување на кој било степен во каскадата може да се пресмета според равенката (1). Ако се земе предвид дека излезниот напон на k -тиот степен е влезен за $k+1$ и ако се земе предвид равенката (2), тогаш се добива дека коефициентот на засилување на каскадата е производ од поединечните коефициенти на засилување:

$$A = A_1 \cdot A_2 \cdots A_k \cdots A_N = \prod_{k=1}^N A_k \quad (3)$$

Оваа анализа важи ако засилувачот е направен од електронски ламби. Ако тој е направен од транзистори, анализата е прилично комплицирана, затоа што при поврзување во каскада отпорите се менуваат во голема мерка. Како втора причина се јавува големото повратно дејство на колекторската врз базната струја. Поради тоа, секоја промена во колекторското коло предизвикува промена на влезниот отпор. Затоа во овој случај нема смисла да се зборува за засилување на одделен степен. Ситуацијата се олеснува ако транзисторскиот засилувач се сфати како струен засилувач. При тоа, излезната струја од првиот степен е влезна струја на вториот степен, излезната од вториот како влезна за третиот и тн. Коефициентот на струјното засилување на k -тиот степен ќе биде:

$$A_{i,k} = \frac{I_{iz,k}}{I_{vl,k}} \quad (4)$$

Слично како и кај првата анализа и во овој случај за коефициентот на струјното засилување на целата каскада се добива:

$$A_i = A_{i,1} \cdot A_{i,2} \cdots A_{i,k} \cdots A_{i,N} = \prod_{k=1}^N A_{i,k} \quad (5)$$

Коефициентот на напонско засилување ќе се добие од изразот:

22. Физика на комуникации

$$A_V = \frac{A_i R_L}{R_{vl}} \quad (6)$$

каде што A_i е коефициент на струјно засилување, R_L е отпор на потрошувачот споен на излезот од засилувачот, а R_{vl} е влезната импеданција на првиот степен, мерена кога тој е споен во каскадата.

Коефициентот на засилување на моќноста е однос од излезната и влезната моќност:

$$A_P = \frac{P_{iz}}{P_{vl}} = \frac{A_i^2 R_L}{R_{vl}} \quad (7)$$

Во праксата често се користи логаритамска скала за засилувањето што го дава еден систем. Во неа засилувањето се изразува во децибели (dB), дефинирано со:

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log \frac{P_{iz}}{P_{vl}} \quad (8)$$

Во овој случај, засилувањето што го дава една каскада ќе биде сума од засилувањата на поединечните степени:

$$G(\text{dB}) = G_1(\text{dB}) + G_2(\text{dB}) + \dots + G_k(\text{dB}) + \dots + G_N(\text{dB})$$

$$G(\text{dB}) = \sum_{k=1}^N G_k(\text{dB}) \quad (9)$$

Засилувач со повратна врска

Во случај кога излезниот напон на засилувачот влијае на влезниот, велиме дека постои повратна врска. Наједноставен начин за реализирање на повратната врска е дел од излезниот напон да се врати на влезот. Блок шема на засилувач со повратна врска е даден на сл. 19.

Влезниот и излезниот напон се сумираат, давајќи нов влезен напон, кој понатаму се засилува. Ова може да се изведе со помош на потенциометар, отпори, кондензатори, трансформатор или каков било друг пасивен елемент. Делот од излезниот напон што се враќа на влезот се вика **степен на повратна врска** (β). Во најопшт случај, тој може да биде

комплексен број и да зависи од фреквенцијата. Кога тој е негативен реален број, вратениот напон ќе биде во спротивна фаза во однос на влезниот. Новиот влезен напон ќе биде разлика од влезниот (V_{vl}) и вратениот (βV_{iz}):

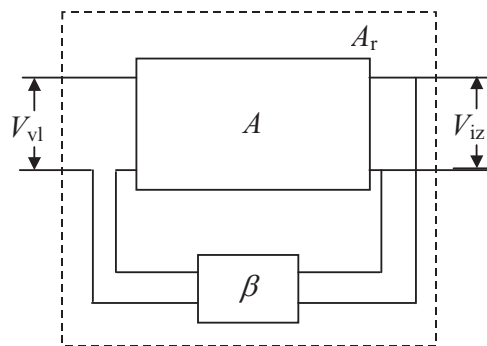
$$V_{vl}' = V_{vl} - \beta \cdot V_{iz} \quad (10)$$

Коефициентот на засилување A_r ќе биде однос од излезниот напон и новиот влезен напон:

$$A_r = \frac{V_{iz}}{V_{vl}'} \quad (11)$$

Ова се вика негативна повратна врска. Во овој случај коефициентот на засилување ќе биде помал од случајот кога немаме повратна врска.

Но, кога β е позитивен број, тогаш влезниот и вратениот напон се во фаза и тие се сумираат. Притоа новиот излезен сигнал ќе биде поголем и коефициентот на засилување ќе биде поголем. Ова се вика позитивна повратна врска.



Сл. 19.

Да го пресметаме коефициентот на засилување кај засилувач со повратна врска. Од равенката (11) за излезниот напон добиваме:

$$V_{iz} = A \cdot V_{vl}' \quad (12)$$

Вратениот напон ќе биде:

$$V_{vr} = A \cdot V_{iz} \quad (13)$$

Овој напон ќе се сумира со влезниот, давајќи го новиот влезен напон:

$$V_{vl}' = V_{vl} + \beta \cdot V_{iz} \quad (14)$$

Ако ја замениме равенката (14) во (12) за излезниот напон ќе добиеме:

$$V_{iz} = A(V_{vl} + \beta \cdot V_{iz}) \quad (15)$$

Од равенката (15) за излезниот напон при повратна врска добиваме:

$$V_{iz} = \frac{A}{1 - \beta \cdot A} V_{vl} \quad (16)$$

Ако оваа равенка ја споредиме со (11) за коефициентот на засилување со повратна врска добиваме:

$$A_r = \frac{A}{1 - \beta \cdot A} \quad (17)$$

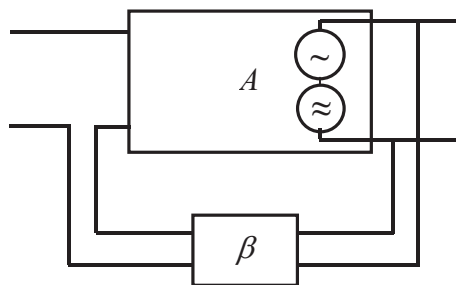
Од овде гледаме дека кога постои позитивна повратна врска (β е позитивно), коефициентот се наголемува и обратно, кога постои негативна повратна врска (β е негативно), тој се намалува. Именителот од равенката (17) може да биде комплексен број и да зависи од фреквенцијата:

$$F(\omega) = (1 - \beta \cdot A) \quad (18)$$

Тој се вика **функција на повратната врска**. Производот βA се вика кружно засилување на системот и претставува коефициент на засилување на засилувачот споен во каскада со елемент со повратна врска.

Некој ќе се запраша: па кога коефициентот на засилување е помал кај негативна повратна врска, тогаш зошто се применува? Тоа си има други позитивни карактеристики. За сметка на засилувањето се добива на намалување на хармониското изобличување, се зголемува стабилноста на засилувачот, се намалува брмчењето поради слабото филтрирање на напојувачкиот напон, се намалува излезната и се зголемува влезната импеданција.

Еквивалентната шема на еден реален засилувач може да се претстави со еден идеален засилувач (којшто не го изобличува излезниот сигнал), што е споен во серија со генератор на хармоници (сигнали кои ќе претставуваат изобличувања во крајниот засилен сигнал) (сл. 20).



Сл. 20.

За поедноставување ќе земеме дека генераторот го дава само вториот хармоник ($V_{2\omega}$). Со негативната повратна врска дел од излезниот сигнал се враќа на влезот во спротивна фаза. Реалниот засилувач како излезен напон ќе дава засилен влезен и на него додаден вториот хармоник, односно:

$$V_{iz} = A \cdot V_{vl} + V_{2\omega} \quad (19)$$

Дел од излезниот напон се враќа на влезот и се сумира со влезниот, при што се добива нов влезен напон:

$$V_{vl}' = V_{vl} - A \cdot \beta \cdot V_{vl} - \beta \cdot V_{2\omega} \quad (20)$$

Оттука се добива вистинскиот влезен напон:

$$V_{vl}' = \frac{V_{vl}}{1 + A \cdot \beta} - \frac{\beta \cdot V_{2\omega}}{1 + A \cdot \beta} \quad (21)$$

Од равенките (19) и (21) се добива излезниот напон при негативна повратна врска:

$$V_{iz} = \frac{A}{1 + A \cdot \beta} V_{vl} + \frac{V_{2\omega}}{1 + A \cdot \beta} \quad (22)$$

Од равенката (22) се гледа дека излезниот напон ќе го содржи влезниот напон засилен за коефициент A_r , но покрај него го има и вториот хармоник, чија амплитуда е намалена за фактор $\frac{1}{1 + A \cdot \beta}$. Ова покажува дека за сметка на слабото засилување на главниот сигнал, се добива драстично намалување на хармониското изобличување. Ова што важи за вториот хармоник, важи и за третиот, четвртиот и за повисоките хармоници.

22. Физика на комуникации

Претходно спомнавме дека засилувачот со негативна повратна врска е постабилен. Нестабилноста на еден засилувач се јавува поради промена на коефициентот на засилување, предизвикан поради некоја промена на некој од параметрите на засилувачките елементи. За да докажеме дека промената на коефициентот на засилување е најмала кај засилувачите со негативна повратна спрега, да ја диференцираме равенката (17):

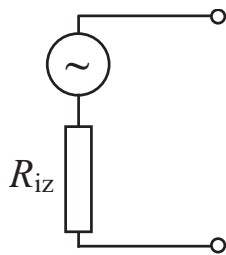
$$\begin{aligned} dA_r &= \frac{dA(1 + \beta \cdot A) - \beta \cdot A \cdot dA}{(1 + \beta \cdot A)^2} = \\ &= \frac{dA}{(1 + \beta \cdot A)^2} \end{aligned}$$

Ако добиениот израз се помножи и подели со A , ќе се добие:

$$\begin{aligned} dA_r &= \frac{A}{1 + \beta \cdot A} \cdot \frac{1}{1 + \beta \cdot A} \cdot \frac{dA}{A} \\ \frac{dA_r}{A_r} &= \frac{1}{1 + \beta \cdot A} \cdot \frac{dA}{A} \end{aligned} \quad (23)$$

Равенката (23) покажува дека релативната промена на коефициентот на засилување кај засилувачи со негативна повратна врска е намалена за фактор $\frac{1}{F(\omega)}$.

Покрај овие квалитети, негативната повратна врска придонесува за намалување на излезниот отпор, односно импеданцијата на засилувачот. Секој засилувач може да се претстави со еквивалентна шема во која се врзани еден генератор на електромоторна сила, сврзан во серија со отпорник со вредност еднаква на излезниот отпор на засилувачот (сл. 21).



Сл. 21

Со воспоставување на повратна врска, генераторот ќе даде напон еднаков на $(A \cdot V_{vl} - A \cdot \beta \cdot V_{iz})$. Кога се мери излезниот отпор, на влезот на засилувачот не се носи сигнал ($V_{vl} = 0$), но затоа на излезот се носи сигнал (V_{iz}). Равенката на електричното коло на таа слика е:

$$V_{iz} + A \cdot \beta \cdot V_{iz} = R_{iz} \cdot I_{iz} \quad (24)$$

Новата вредност на излезниот отпор дефинирана со изразот:

$$R_{iz}' = \frac{V_{iz}}{I_{iz}}$$

ќе биде дадена со:

$$R_{iz}' = \frac{R_{iz}}{1 + A \cdot \beta} \quad (25)$$

Равенката (25) покажува дека излезниот отпор кај засилувачи со повратна спрега се намалува за фактор $\frac{1}{F(\omega)}$.

Но, затоа на излезот се носи сигнал.

Прашања и задачи

1. Според фреквенцијата на сигналот што го засилуваат какви засилувачи постојат?
2. Какви засилувачи постојат од гледна точка на тоа што засилуваат?
3. Кои се основните карактеристики што опишуваат еден засилувач?
4. Како се дефинира коефициентот на засилување?
5. Каква е врска помеѓу коефициентот на засилување на напонот и струјата на каскадата и поединечните степени?
6. Каква е врска помеѓу коефициентот на засилување на моќноста на каскадата и поединечните степени?
7. Како изгледа засилувач со повратна врска?
8. Што е степен на повратна врска?
9. Какви повратни врски постојат?
10. Што е функција на повратна врска?
11. Кои се предностите на засилувачите со негативна повратна врска?

23. 1. ХИЕРАРХИСКА ОРГАНИЗАЦИЈА НА ВСЕЛЕНАТА: ОД ЕЛЕМЕНТАРНИ ЧЕСТИЦИ ДО ГИГАНТСКИ ГАЛАКСИИ

Вселената е сè што постои, што било кога постоело и што секогаш ќе постои, нешто бесконечно, голема тајна сè уште несфатлива за човечкиот ум. Дури и обична помисла за Вселената кај нас предизвикува неспокојство, чудно чувство што тешко се објаснува. Свесни сме дека тоа е тајна поголема од сите тајни, тоа е надвор од обичното човечко поимање, пошироко од сè она што астрономијата досега го спознала. Старите Грци го употребувале терминот *космос* (што значи "ред") за оној дел од Вселената што се владее како совршен, хармонично построен систем кој се потчинува на универзални физички закони.

1. Свезди. Галаксии

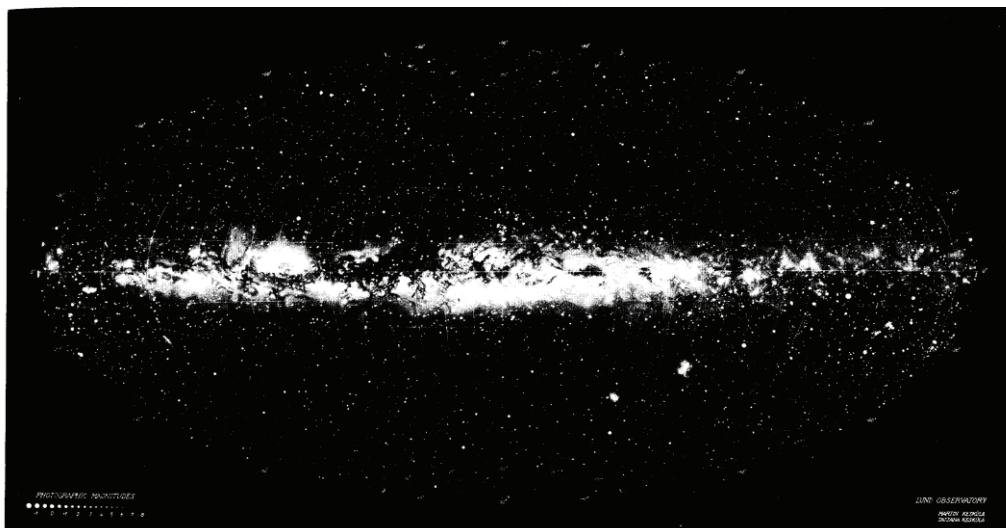
Ако ноќе го подигнеме погледот кон небото, ќе забележиме огромен број светли небески тела. Во најголем број тоа се ѕвезди (сл. 1). Секоја ѕвезда припаѓа на некој систем, сличен состав на ѕвезди кои се групирани. Таквите системи се викаат **галаксии**.



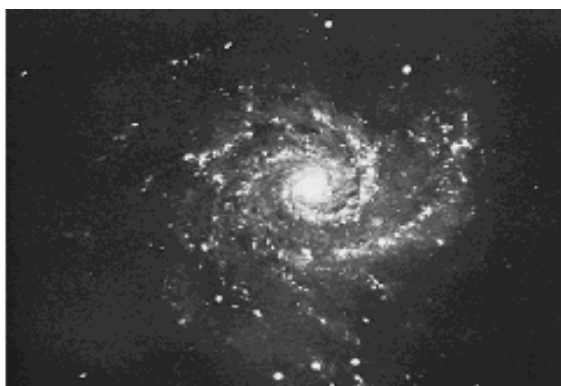
Сл. 1.

На сл. 2 е прикажана карта на целото небо со видливите ѕвезди. Светлиот појас ја претставува Галаксијата во која припаѓа нашиот Сончев систем. Таа се вика **Млечен Пат** и има скоро милијарда ѕвезди

Уште *Галилеј* во 1610 год. со телескоп забележал дека Млечниот Пат е составен од ѕвезди, а подоцна, *В. Хершел* со подобар телескоп ја утврдил нивната застапеност и групирање. Од нив само малку се гледаат со голо око. Галаксијата Млечен Пат има облик на спирала (сл. 3).

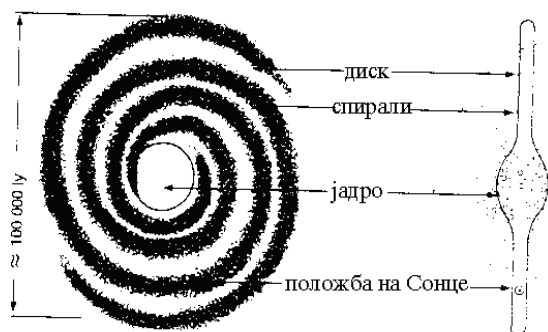


Сл. 2.



Сл. 3.

Ако нашата галаксија би се гледала од страна, таа би имала изглед на двојно испакнат диск со дијаметар околу 30.000 ps (парсеци) и централно проширување околу 4.000 парсеци. Дијаметарот на јадрото е околу 1.300 парсеци. Со помош на радиоастрономски методи, Ј. Орт (1900-1992) недвосмислено ја потврди спиралната структура на галаксијата (сл. 3а).



Сл. 3 а.

Во галаксијата можат да се забележат области со зголемен број ѕвезди; овие области се шират од јадрото кон периферијата. Тие се *спиралните ракави* на галаксијата каде што се групирани ѕвездите гиганти, со висока површинска температура, водородни облаци и прашина (ѕвездена популација од I тип). Во просторот меѓу спиралните ракави има не само ѕвезди гиганти, туку и *ѕвезди-цуциња* со

пониска површинска температура. Во далечните предели на галаксијата е втората група ѕвезди (*ѕвездена популација од II тип*) кои се разликуваат од првите не само по положбата, туку и по хемискиот состав. Тоа значи дека тие се создале во различни услови и се на различна "возраст".

Зошто било важно да се знае формата на галактиката? Тоа укажува на ротационо движење на целиот систем и со пресметки се добива дека Сонцето обиколува околу галактичкиот центар за 250 милиони години (сметајќи средна брзина од 220km/s). Според III Кеплеров закон се добива дека масата на нашата галактика е околу 10^{11} сончеви маси! Фантастично, зар не? Но некои галаксии имаат многу, многу поголеми маси.

Така, ниту живееме на Земја што е центар на светот, ниту Сонцето е центар на светот, ниту нашата галаксија е нешто посебно во однос на другите галаксии!

Сончевиот систем (а со тоа и Земјата) се наоѓа во внатрешноста на галаксијата, па затоа на ноќното небо ние ја гледаме нашата галаксија во облик на бел магличест појас чии краеве се оддалечени стотина светлосни години. Х. Шепли докажал дека Сончевиот систем се наоѓа на оддалеченост од 10.000 светлосни години од центарот на нашата галаксија, значи, Сонцето не е центар на ѕвездениот систем.

Сонцето како ѕвезда што е од животна важност за нас, не е некаква посебна ѕвезда. Како него има милијарда-милијарди ѕвезди. Меѓу нив има такви кои имаат илјадници пати посилен сјај од сончевиот, но се наоѓаат на многу големи растојанија. Густината на материјата во центарот на Сонцето достигнува 150000 kg/m^3 , а притисокот од ред на 10^{16} N/m^2 со што е овозможено да се одвиваат термонуклеарни реакции при што секоја секунда 600 милиони тони од неговата маса се претвора во 596 милиони тони хелиум. Разликата на овие маси според Ајнштајновата равенка

$$E = mc^2$$

како енергија што се зрачи во просторот.

2. Класификација на галаксиите

Долго време се сметаше дека нашата галаксија е единствен познат свезден систем. Но, во 1924 год. Е. Хабл докажа дека многу од дотогаш набљудуваните небески маглини всушност се далечни галаксии. Денес се цени дека во Вселената има барем сто милијарди галаксии и секоја од нив содржи просечно по сто милијарди свезди.

Најблиски галаксии до нашата се Магелановите облаци кои можат да се видат од јужната хемисфера како нејасни облаци покриени со вел што го создаваат свездите од нашата галаксија. Од северната хемисфера одвај видлива со голо око во ведрите есенски ноќи, е маглината Андромеда (сл. 4). Оддалечена е скоро два милиони светлосни години. Се смета дека таа има двапати повеќе свезди отколку нашата галаксија.



Сл. 4.

Нашата галаксија своето постоење го започнала како огромен облак од водород и хелиум кој најверојатно имал дијаметар околу 300.000 светлосни години. Таа била само една од многуте гасни маглини кои заради гравитацијата го смалувале постоејано својот волумен и станувале сè погусте делејќи се на помали делови кои ги изградиле првите свезди составени само од водород и хелиум. Подоцна

создадените свезди, на пр. Сонцето, во својот состав покрај водород и хелиум имаат и потешки елементи, јаглерод, силициум, железо, кои настанале при експлозиите на Суперновите со што се расеале во Вселената. Бидејќи Галаксиите имаат различни форми и размери, Е. Хабл ги класификувал во три основни групи:

- елиптични
- спирални и
- неправилни.

Елиптичните галаксии (Е) најчесто имаат силно издолжена елиптична форма, но можат да бидат скоро сферни (сл. 5).



Сл. 5.

Спиралните галаксии се поделени на

- нормални спирални галаксии како галаксијата Млечен Пат и
- неправилни спирални галаксии кои што не личат на некоја определена геометриска форма. Тие содржат “млади” свезди, гасови и прашина. На сл. 6 е покажана една спирална галаксија.

Нашата галаксија припаѓа на една група од 30-тина галаксии кои што се на растојание помало од 1 мега парсек. Тоа е *Месното галактичко јато* што во каталогот на **Месие** се



Сл. 6.

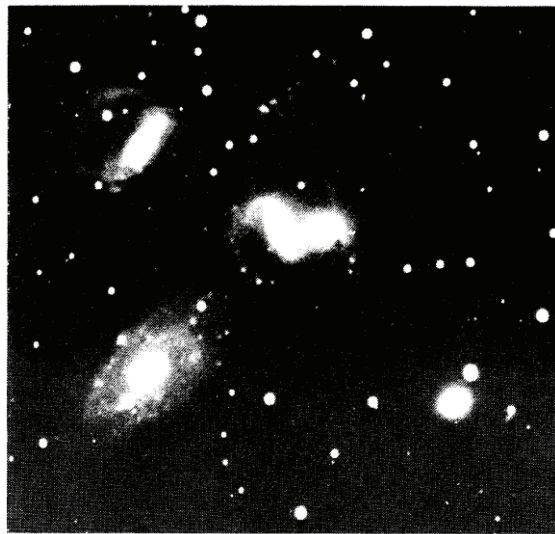
обележува со M31 (таму спаѓаат сосвездието Андромеда, Големиот и Малиот Магеланов облак и други). Нашето Месно галактичко суперјато има маса околу 10^{15} сончеви маси. Најголем број галаксии припаѓаат кон вакви галактички јата; бројот на галаксиите во нив може да биде и до неколку илјади.

Во астрономијата се познати и *галактички суперјата*, повеќе јата што просторно припаѓаат во еден таков систем. Галактичките суперјата се најголемите структури во Вселената што сè уште се гравитационо поврзани, а нивните размери се околу 100 Mps.

На сл.7 прикажано е галактичко јато т.н. "**Стефанов квинтет**", група од пет привидно поврзани галаксии за кои се смета дека се оддалечени приближно 250 милиони светлосни години. Од нашата галаксија се оддалечуваат со брзина од 6.000 km/s.

3. Тајната на Големиот Атрактор

Се покажало дека Месното суперјато заедно со уште неколку соседни галактички суперјата трпи гравитационо привлекување од

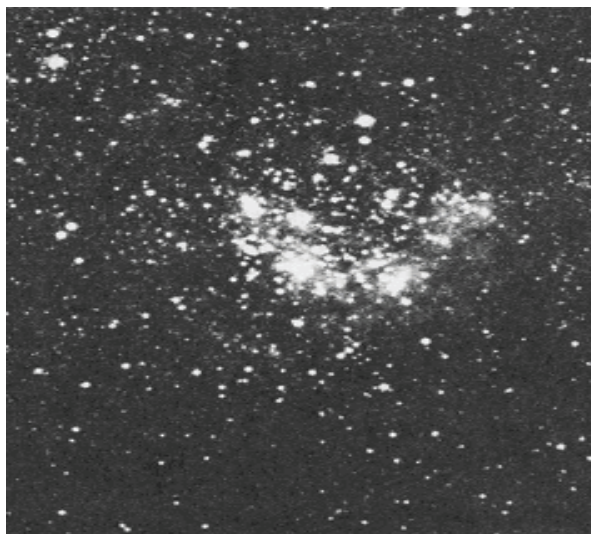


Сл. 7.

непознато потекло чиј извор астерономите го нарекле *Големиот Атрактор*. Брзината со која се оддалечуваат од нас сите галаксии во околните суперјата е од ред на 600 km/s и е насочена кон сосвездието Центаур каде што се "крие" Големиот Атрактор.

Се проценува дека масата што го предизвикува ова групно движење е приближно еквивалентна на $5 \cdot 10^{16}$ сончеви маси. На тоа место се наоѓа богато галактичко јато со назив Абел 3627, но неговата маса е мала за да се објасни гравитационата сила на Големиот атрактор. Но "тој" е сигурно таму, иако неговата "скриена маса" (dark matter) не е достапна за директно набљудување со инструментите што ги поседуваме.

Со најмодерните телескопи констатирано е постоењето на десетина милијарди галаксии групирани во галактички јата (сл. 8) и суперјата. "Погледот" на овие телескопи допира до оддалеченост од десет милијарди светлосни години од нашата галаксија. Тоа е набљудуваниот дел на Вселената (сфера со радиус приближно 10^{25} м). Во секоја галаксија се содржат просечно 10^{11} ѕвезди (сто милијарди ѕвезди).



Сл. 8.

Прашања и задачи

1. Каква е разликата меѓу поимите Вселена и Космос?
2. Колкави се димензиите на нашата галаксија? Како би изгледала ако би можела да се види од некоја друга галаксија?
3. Луѓето биле разочарани кога Коперник покажа дека Земјата не е центар на светот, кога Х. Шепли покажа дека Сонцето не е во центарот на галаксијата, кога стана јасно дека нашата алаксија не е ни единствена, ни најголема, ни најбројна со ѕвезди! Што мислите, зошто?
4. Кои се основните групи галаксии според Е. Хабл?
5. Каде припаѓа (во која група) нашата галаксија?
6. До каде допира "погледот" на најмоќните телескопи (во светлосни години)?
7. Колку галаксии се проценува дека постојат? Колку ѕвезди има во секоја галаксија?

23. 2. ЗРАЧЕЊЕ ВО ВСЕЛЕНАТА

Низ земјината атмосфера поминува поголем дел од видливото подрачје од електромагнетскиот дел на спектарот што се емитира од небеските објекти и тоа е предмет на истражување на *оптичката астрономија*. Но, атмосферата пропушта голем дел од инфрацрвеното подрачје како и подрачјето на радиобрановите кои исто така можат да бидат емитирани од небески објекти. Нивното проучување доведе до развој на *радиоастрономијата*.

Радиоастрономијата како метода за испитување на небеските објекти својот почеток го имаше во триесетите години на 20 век кога К. Јански направи голема антена за "прислушување" на радиобрановите што доаѓаа од Вселената. Во неа се изучуваат космичките објекти преку следење на нивното електромагнетско зрачење во радиобрановото подрачје. Регистрација на тоа зрачење се врши со радиотелескопи (сл. 1).



Сл. 1.

За разлика од оптичките телескопи кои бараат поволни атмосферски услови за набљудување, радиотелескопите го немаат тоа ограничување. Предност е и можноста да се

23. Астрофизика

градат големи радио антени или комплекси антени за покривање на одредени подрачја од спектарот на радиобрановите.

Лоцирани се повеќе извори на микробраново зрачење што беше поттик да се направат радиотелескопи со големи димензии, многу поголеми од оптичките. Така, еден од најголемите радиотелескопи во Аресибо (Порто Рико), има антена со дијаметар од 300 m, сместена во кратер на изгаснат вулкан. И покрај фактот што со радиоастрономијата се откриени радиоизвори на многу поголеми растојанија од оптичките извори, сепак оваа метода има недостаток заради малата разделна моќ што оневозможува точно лоцирање на космичките радиоизвори.

Некои небески тела емитираат *рендгенско и γ -зрачење*, но земјината атмосфера го апсорбира, како и голем дел од ултравиолетовото зрачење. Сепак, со развојот на космичките летови овозможено е да се проучува и тој дел од зрачењето, па во последно време се развија и методите на рендгенската и γ -астрономијата.

За истражувања на ѕвездените објекти изградени се големи астрономски опсерватории каде што се монтираат телескопи, спектрографи и други уреди комплетирани со прибори за визуелна, фотографска и фотоелектрична регистрација.

Електромагнетското зрачење што носи информации за сите објекти во Вселената настанува во процеси што се одвиваат на атомско ниво. Од таму, за разбирање на Вселената, потребно е проучување не само на појавите во макросветот, туку и на појавите и законитостите во микросветот, кои се неразделно поврзани.

Користењето на физичките методи во проучување на небеските објекти овозможи да се развие нова област на астрономијата, тоа е **астрофизиката**. Таа ја проучува состојбата на материјата и нејзините структури во космички размери, како и физичките процеси што се одвиваат во небеските тела. Почетокот на оваа дисциплина датира од средината на XIX век кога за прв пат се искористени методите на оптичката спектроскопија во астрономски

испитувања. Особен подем на астрофизиката и дадоа модерните физички дисциплини: физика на плазмата, физика на елементарните честичи, квантната физика, теоријата на релативноста.

Астрофизиката го откри составот и структурата на небеските објекти. Така, постоењето на хелиумот првин беше откриено на Сонцето, па дури потоа се откри дека го има и во земјината атмосфера. Одредени се брзините на небеските тела со помош на Доплеровиот ефект, кои поинаку би било многу тешко да се одредат.

Од космички аспект, нашата земја е само невидлива точка во бескрајната Вселена што има сличен состав како и другите небески тела. Таа нема некое посебно место. Ако не беше среќната околност што Сонцето е толку блиску да и дава енергија, Земјата би била едно мртво парче вселенска материја со температура блиску до апсолутната нула.

Небеските објекти емитираат зрачење според законите за емисија и апсорпција на црно тело што беа утврдени кон крајот на 19 и почетокот на 20 век. Тоа се:

1. Законот на Стефан -Болцман кој што вели дека енергијата што ја емитира апсолутно црно тело со површина S во единица време е пропорционална на четвртиот степен од неговата апсолутна температура:

$$E = S \sigma T^4 \quad (1)$$

каде што $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ е наречена Стефан-Болцманова константа.

2. *Виновиот закон за зрачење:*

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b \quad (2)$$

каде што λ_{max} е бранова должина на која ѕвездата емитира максимум зрачење при температура T . Бидејќи константата b е позната, со инструмент само треба да се одреди λ_{max} и може да се пресмета површинската температура T на ѕвездата која за различни ѕвезди се менува од неколку илјади, до неколку десетици илјади степени.

СПЕКТРАЛНА КЛАСИФИКАЦИЈА НА СВЕЗДИТЕ

При набљудување на "ноќното" небо, паѓа в очи дека небеските објекти имаат различен сјај. Бројот на сјајните ѕвезди е помал во однос на оние со среден или слаб сјај. Се смета дека на небескиот свод со голо око (од северната и јужната хемисфера) можат да се забележат до 6000 ѕвезди. Свездите со послаб сјај се детектираат со инструменти.

Покрај разликите во сјајот, небеските објекти имаат и различна боја. Некои се црвени (Бетелгез во созвездието Орион, Антарес во созвездието Скорпион), други се жолти (Сонце, ѕвездата Капела), бели (Вега во созвездието Лира), сино-бели (Ригел во Орион). Бојата на ѕвездата носи информација за температурата на нејзината површина.

Од снимените спектри на некој вселенски објект можат да се добијат податоци за хемискиот состав, движењето, густината итн. Добиените спектри се континуирани и врз нив се суперпонираат апсорпциони линии што зависи од слоевите над ѕвездата низ кои поминува зрачењето. Било утврдено дека ѕвездите и другите небески тела се состојат од истите елементи кои се присутни и на Земјата што кажува дека целата Вселена е изградена на ист начин. Повеќето ѕвезди имаат сличен состав како Сонцето; скоро 70% од составот е водород, 28% е хелиум, а 1- 2% се присутни сите други елементи.

За класификација на спектрите на ѕвездите во астрофизиката се користи т.н. **МК-систем** според научниците Морган и Киан што ја вовеле. Во овој систем ѕвездата се класификува спроед две карактеристики: *спектрална класа* и *класа на сјајот (луминозитет)*.

Постојат седум основни *спектрални класи ѕвезди (О, В, А, F, G, K, M)* и четири специјални. Секоја класа е поделена на десет поткласи (означени со бројките 0-9). Со соодветни ознаки по оваа класификација, секоја ѕвезда си има свое "име и презиме". Поаѓајќи од класата О кон М, карактеристичната температура на ѕвездите опаѓа а со тоа и бојата се менува. Свездите од класата О се сино бели, имаат големи маси, висок сјај во УВ-подрачјето поради високата површинска тем-

пература (25-35.000 К). Најинтензивните линии се од јонизираните атоми на He, H, C, O, N и др. Типични ѕвезди од оваа класа се λ -Орион, λ -Цефеј.

Свездите од класата М се црвени ѕвезди во чии спектри најмногу има апсорпциони линии на јоните од метали. Нивната површинска температура е 2.500 - 3.500 К. Такви се веќе споменатите Бетелгез, Антарес, Мира Цети како и други ѕвезди.

Класи на сјај (луминозитет). На една иста температура (иста спектрална класа) некои ѕвезди ќе зрачат повеќе енергија, што зависи од нивната големина (радиус). Така, дефинирани се и седум *класи на ѕвездите по сјај* кои се обележуваат според римските цифри: I класа се *супергиганти*, а во VII се *белите џуџиња*. Фактички, оваа класификација на ѕвездите е според нивниот радиус и густината на нивната атмосфера.

Да споменеме дека некои од овие класи имаат и подкласи (a, ab, b). Сонцето спаѓа во класата G каде ѕвездите имаат жолта боја, површинска температура приближно 6000 К, а нивните спектри имаат многубројни апсорпциони линии од јонизирани метали и други елементи. Така, нашето Сонце во МК-системот се бележи G2 V (Сонцето е жолто џуџе), а Бетелгез, α ѕвезда од Орион е M2 Iab (црвен супергигант).

Во познатиот Хенри-Дрејперов каталог има податоци за положбата, привидната големина, спектралните својства и др. за 500.000 ѕвезди. Тоа е *прочуената харвардска спектрална класификација* која се смета за најкомплетна. Освен неа, има и други класификации.

Прашања и задачи

1. Која е разликата меѓу оптичката астрономија и радиоастрономијата?
2. Какво зрачење можат да емитираат небеските објекти? Во која област?
3. Што е предмет на изучување на астрофизиката?

4. Кои се физичките закони што важат за зрачењето на небеските објекти?

5. Каков е типичниот состав на ѕвездите, кои елементи ги содржат?

6. Колку ѕвезди на небескиот свод може да изброите со голо око?

7. Која е најпознатата класификација на ѕвездите? Според кои карактеристики се прави? Кои се основните спектрални ѕвездени класи?

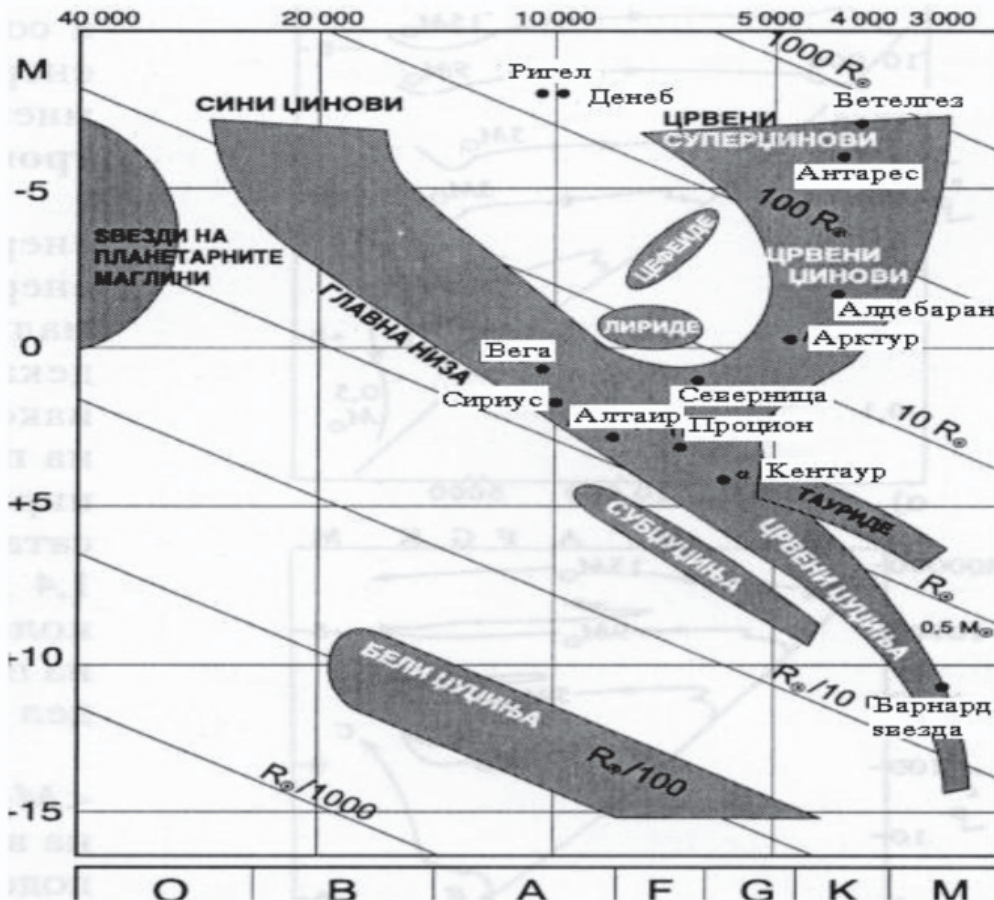
9. Во која класа спаѓа нашето Сонце? Кои се карактеристиките?

10. Да се определи температурата на површината на Сонцето и неговиот луминозитет L . Дадени се: $R=7 \cdot 10^8 \text{ m}$, $\lambda_{\text{max}}=500 \text{ nm}$, растојанието Земја-Сонце= 1 AU ($1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$). Соларната константа е 1370 W/m^2 . ($T=5800 \text{ K}$, $L=3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$)

23.3. СТЕЛАРНА ЕВОЛУЦИЈА

Во Вселената сè е во непрекинато движење, сè се менува. И ѕвездите имаат свој "живот", се создаваат, постојат, а потоа ги снемат, се раѓаат нови ѕвезди. Нивниот "живот" трае десетици милијарди години, а тоа во прв ред зависи од нивната маса; *ИЗНОСОТ на масата на ѕвездата е главен фактор на ѕвездената еволуција.*

Протосвезда. Меѓуѕвездената материја, гас и друго, е составена од честици со големина $60\text{-}80 \mu\text{m}$ чија концентрација е многу мала (меѓуѕвездениот простор е подобар вакуум од оние постигнати во лабораториски услови). Ако нивната концентрацијата достигне $10^5\text{-}10^6$ честички во 1 cm^3 , поради гравитацијата, почнува да се формира облак (сл.12a) чии честици



се привлекуваат кон центарот (условно кажано) на облакот. Така настанува *протосвезда* чија температура во почетокот е блиска на температурата на меѓузвездениот гас (-170°C).

Со тек на времето, движејќи се кон центарот, честичите си ја зголемуваат брзината, а со тоа и енергијата. Оваа фаза на контракција долго трае, но сепак на одреден стадиум од развојот, температурата толку пораснала што сите атоми се јонизирани, постојат електрони и водородни јадра (протони). Дијаметарот на овој систем кој има јадро и обвивка достигнува 100-тина милиони километри, внатрешната температура до $\approx 150.000^{\circ}\text{C}$, а надворешната 3000°C .

1. Херцшпрунг-Раселов дијаграм

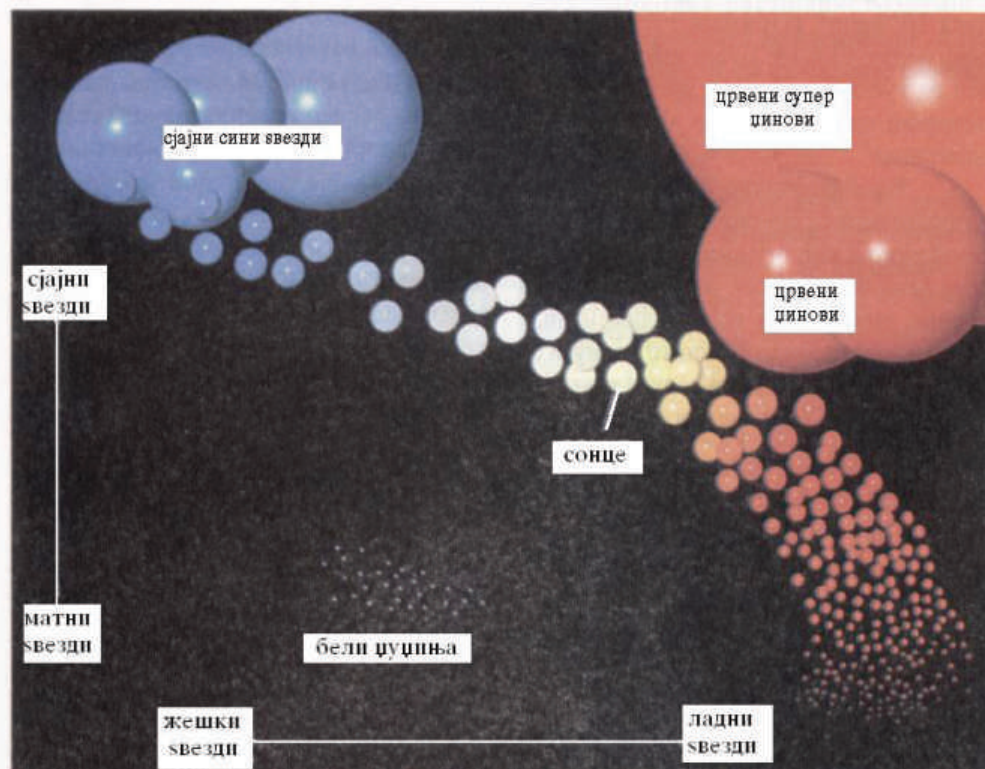
Од тој степен на развојот натаму, современите теории доста добро ја опишуваат "историјата" на ѕвездата. Имено, *Е. Херцшпрунг* и *Х. Расел*, независно еден од друг, нашле врска меѓу апсолутната магнитуда (сјај) на ѕвездите и нивната површинска тем-

пература. Ако таа зависност се прикаже графички (сл. 1), се добива Херцшпрунг - Раселов (H-R) дијаграм.

На дијаграмот, најголем број ѕвезди се наоѓаат приближно на една линија што се вика *главна низа*. Првиот тоа го направил за ѕвездите од ѕвездените јата Плејади (Квачка) и Хијади, а вториот за ѕвездите од околината на Сонцето. Тоа се ѕвезди чии радиуси се од $0,5 - 7 R_{\odot}$ (сончеви радиуси).

На апсцисата е температурата (од 40.000 до 2.500 K), а на ординатата е магнитудата (сјајот). H-R дијаграмот опфаќа ѕвезди чии апсолутни магнитуди варираат од -6^{m} до $+15^{\text{m}}$. Од него може да се определи оддалеченоста на ѕвездата. Првин се снима спектарот на ѕвездата и од таму се одредува нејзината површинска температура. Потоа од дијаграмот се одредува нејзината апсолутна магнитуда, и на крај се пресметува оддалеченоста според формулата.

Ѕвездите што се наоѓаат над главната низа се *црвени џинови* и *суперџинови*, а ѕвездите под неа се наречени *бели џуџиња*. Најголемиот број ѕвезди (Белатрикс, Спика,



Сл. 2.

23. Астрофизика

Регул, Алгол, Кастор, Мизар, Сириус- α , УВ Кит, Вега, Алтаир, Проксион, Кентаур) се наоѓаат на главната низа каде што се наоѓа и Сонцето. Свездите суперџинови се мошне поретки од црвените џинови.

Откриен е мал број бели џуџиња што е нормално да се очекува затоа што можат да се откријат само најблиските до нас.

Да проследиме како од нормална звезда од главната низа се добиваат другите типови ѕвезди. Создадената протосвезда мошне брзо се вклопува на главната низа (според сјајот и температурата). Терминот "брзо" се однесува на процеси во Вселената и означува неколку стотини милиони години. Нејзиниот вистински живот се одвива токму тогаш кога температурата во центарот достигне 10-ина милиони степени. Тогаш започнуваат да се одвиваат термонуклеарните реакции што веќе ги опишавме.

На почетокот површинската температура изнесува $\sim 4000 - 5000^{\circ}\text{C}$, и ѕвездата има голем сјај. За неколку десетици милиони години процесите се стабилизираат, температурата на површината достигнува $\sim 6000^{\circ}\text{C}$, а во внатрешноста околу 15 милиони степени. Такво е нашето Сонце. Од неговото формирање до денес поминале $\sim 4,5$ милијарди години.

Дека навистина ѕвездите, со тоа и нашето Сонце се раѓаат од големите комплекси на маглини потврдува состојбата со ѕвездите во маглината Орион (сл. 3). Таа е најпознат комплекс на гас и прашина.



Сл. 3.

Однадвор маглината е темна, но внатре

има нови, "млади" ѕвезди. Веројатно во нашата Галаксија се наоѓаат ѕвезди што настанале од истиот комплекс како и Сонцето кои се на "негова возраст".

2. Еволуција и крај на ѕвездите

Ф. Хојл предвидел детално сценарио за текот на ѕвездената еволуција. Во фазата на развој во која сега е Сонцето, ѕвездата не ги менува битно своите димензии и температура. Тоа траело се додека добар дел од водородот што ѕвездата го имала во внатрешноста се претвори во хелиум. Тогаш ѕвездата влегува во фаза на старост, има 10-15 милијарди години и настануваат драматични промени; ѕвездата нагло се проширува, температурата се смалува, сјајот се менува. Таа веќе не може да се вклопи во ѕвездите од главната низа на $H - R$ дијаграмот, туку претставува *црвен џин*.

Иако температурата е смалена, заради поголемата површина, ѕвездата зрачи поголемо количество енергија.

Кога ќе престане фузијата на водородните јадра во центарот на ѕвездата, зоната на реакции се пренесува кон надворешните слоеви сè до тогаш додека температурата падне под 10 милиони степени. Тогаш реакциите престануваат. Рамнотежата се нарушува, па заради гравитационото дејство, јадрото на ѕвездата богато со хелиум, се собира. Ова резултира со повторно зголемување на внатрешната температура (до неколку стотини милиони степени) и огромен притисок.

На овој степен од еволуцијата почнува нова фаза на фузиони реакции, хелиумот гори и од него се добива јаглерод, потоа кислород итн. сè до железо. Свездата како феникс се кренала од пепелта за да гори уште извесно време. Тоа се вика *хелиумов блесок* на ѕвездата кој може да трае до 50 милини години и го најавува нејзиниот крај. Потоа температурата пак паѓа, ѕвездата се зголемува стотина пати и таа е *црвен џин* или *суперџин*. Кога Сонцето ќе постане црвен џин, ќе ги "проголта" Меркур и Венера, а можеби и Земјата.

Каков крај ќе доживее ѕвездата и колку ќе трае нејзиниот живот зависи од тоа колкава

23. Астрофизика

била нејзината маса (хелиумски блесок не може да настане кај сите ѕвезди).

Животот на големите ѕвезди е покус заради тоа што имаат повисока внатрешна температура и со тоа нуклеарните реакции во внатрешноста се одвиваат побрзо. На пример, два пати повисока температура ги забрзува реакциите неколку десетини илјади пати. И покрај гравитацијата, огромниот поток енергија што се ослободува во средиштето на ѕвездата однесува и дел од нејзините периферни слоеви. Најмасивните познати ѕвезди се шеесетина пати поголеми од Сонцето и се чини дека тоа е горна граница; ако ѕвездата биде уште помасивна, таа веќе нема да биде стабилна.

И обратно, ако ѕвездата има маса десетина пати помала од масата на Сонцето M_0 нејзиниот живот ќе биде многу подолг. Така, малата Барнардова ѕвезда веројатно ќе има долг живот до стотина милијарди години. Но, постои гранична вредност на масата на ѕвездата под која гравитацијата не може да достигне таква вредност за во внатрешноста да се создадат услови за започнување на термонуклеарните реакции. Ако масата на системот е помала од $1/20$ од Сончевата маса (педесет Јупитерови маси) нема да започнат фузиони реакции па таквиот систем ќе заврши како планета слична на Јупитер!

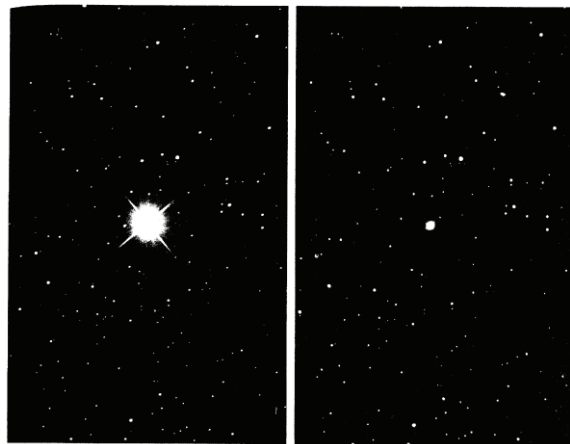
3. Ѕвезди Нови и Супернови

Кај ѕвездите што имаат неколку пати поголема маса од Сонцето ($3-4 M_0$) во нивното средиште се создаваат услови за одвивање и на фузиони реакции на потешки јадра од јаглеродните. Таквите ѕвезди за неколку милијарди години (*времето зависи од износот на нивната маса*) веќе создале јадро што во најголем дел е составено од железо, потоа слоеви од силициум, јаглерод, хелиум и на крај обвивка од водород. Во слоевите се одвиваат соодветни фузиони реакции што ја даваат вкупната енергија што ја зрачи ѕвездата.

Но, таквиот систем е нестабилен и на повидок е крајот на ѕвездата. Гравитационите сили не се доволни да го држат системот јадро - обвивка па доаѓа до експлозивно одделување на обвивката и деловите од неа се шират на

огромен простор во Вселената. Заради експлозијата, може да се случи таквата ѕвезда што дотогаш била невидлива од Земјата, да стане видлива.

Т. Брахе забележал ваква појава во 1572 год. во соѕвездието *Касиопеја*. Таа за неколку дена станала посјајна од Венера. Бидејќи му изгледало како да се раѓа нова ѕвезда, тој ја нарекол *Нова* (*Stela nova* -од латинскиот јазик). До денес се познати околу 360 *Нови*, повеќето се забележани во нашата галаксија, помалку во Андромеда и другите галаксии. На сл. 4 е прикажана истата ѕвезда; пред експлозијата (десно) и по експлозијата како Нова (сјајната ѕвезда лево).



Сл. 4.

Понекогаш, блесокот на таквата експлозија може да биде посилен од сјајот на целата Галаксија на која припаѓа. Така во 1885 год. во маглината Андромеда регистрирана била експлозија на ѕвезда што била 100.000 пати посилна од Нова. Тоа е тн ѕвезда *Супернова* (SN).

Битен услов за експлозија на *Супернова* е ѕвездата да има јадро составено од елементи потешки од силициумот. Во тој колосален *блесок на Супернова* се создаваат елементи потешки од железото, експлозијата ги расејува во Космосот. Потоа тие можат да бидат зафатени од системи во создавање и така да бидат присутни во нивниот состав (на пример, тешките елементи на Земјата).

23. Астрофизика

Експлозијата на Супернова во 1054 год. во маглината Краб била забележана од повеќе народи (за жал Европејците тоа не го сториле па нема записи). Од Земјата можела да се набљудува полни три месеци. Била видлива дури и дење, веројатно ноќе би можело да се чита при нејзината светлост. На сл. 5 е прикажано она што останало (денес) по таа експлозија.



Сл. 5.

Ако случајно експлодира Супернова на растојание од 32,6 светлосни години од нас (10 парсеци), сјајот би бил 1500 пати поголем од сјајот на полната Месечина. Како тоа би се одразило на животот на Земјата може само да се претпоставува.

Во 1987 год. се случи експлозија на Супернова во Големиот Магеланов облак. Тоа беше добра прилика да се извршат најразлични испитувања и мерења со што се здобија драгоцен податоци не само за самата звезда, туку за процесите при такви експлозии, зрачењата, неутринскиот флукс и многу други појави. Големите светски опсерватории подолго време ги вршеа тие испитувања.

Бели џуџиња. Крајот на звездата зависи од нејзината маса. Ако звездата е помала од $1,4M_0$ (Сончеви маси), величина што се вика

Чандрасекаров лимит, кога таа го потроши поголемиот дел од нуклеарното гориво, започнува да се лади, заради *гравитационата контракција* се собира, се збива на мал волумен и густината може да достигне до 100 тони во 1cm^3 . Во почетокот таквиот систем ќе има бела боја, потоа ладејќи се, ќе добие црвена и на крај нема да се гледа. Астрономите им дале име *бело џуџе*.

Типичните бели џуџиња имаат $2/3$ од сончевата маса стисната во волумен колку земјиниот. Се разбира, белите џуџиња нема веднаш да престанат да зрачат, туку процесот на "гаснење" трае неколку милијарди години сè додека температурата падне на просечната температура на Вселената.

Она што ќе остане од Сонцето и звездите слични на него ќе биде бело џуџе кое со ладење ќе стане *црно џуџе*. Покрај Сириус (најсјајната звезда на небото со привидна големина $-1,4^m$, оддалечена од нас 9 светлосни години) има мала звезда, Сириус В, која е првото *регистрирано бело џуџе*. Се смета дека скоро 10% од сите ѕвезди во нашата галаксија се бели џуџиња.

Неутронски ѕвезди и пулсари. Ако масата на ѕвездата е $1,5-3M_0$ (истото важи и за јадрото што останало по експлозијата на Супернова), гравитационата контракција е толку голема што добар дел од електроните и протоните се принудени да се спојат и да образуваат неутрони. Тоа е *неутронска ѕвезда* чија густина има фантастичен износ, скоро 10^{15} пати поголема од густината на обичната материја. Тоа е најгустото пакување на материјата ако воопшто и натаму може да се зборува за материја каква што ја знаеме.

Дијаметарот на *неутронските ѕвезди* не надминува 10-30 km (може да биде и помал од 1 km). Тие имаат силно магнетско поле кое има особена улога. При *ротацијата* се исфрлаат електрони кои што се движат по силовите линии на неверојатно силно магнетско поле. Неутронските ѕвезди зрачат импулси во микробрановото подрачје и можат да се откријат според тоа зрачење. Можно е зрачење и во видливата област и при секоја ротација би се видел блесок. Ѕвездите што имаат вакви особини се викаат *пулсари*. Нивниот период на

23. Астрофизика

ротација е толку точен, поточен од обичните часовници.

Во маглината Рак е откриен пулсар (неутронска ѕвезда) чиј дијаметар е ~ 25 km, и ротира триесет пати во секунда! Неговата маса е ред на големина како масата на Сонцето!

Првиот пулсирачки радиоизвор (пулсар) е откриен во 1967 година. Кусите, строго периодични импулси што тој ги емитува личеле на сигнали од Морзеовата азбука па откритието веднаш било ставено како строга тајна затоа што се претпоставило дека тоа се сигнали од вонземска цивилизација. Непознатито извор бил наречен LGM (Little green man-мали зелени човечиња). Ете од каде доаѓа називот за вонземјаните! Но, кога беа откриени и други такви извори (до денес околу 500), отпадна хипотезата за умните вонземјани што ни испраќаат сигнали за своето присуство.

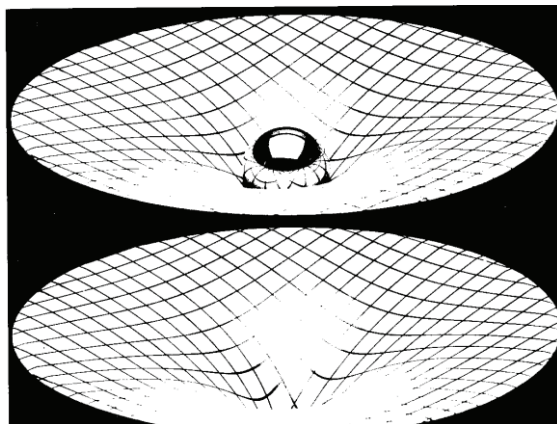
За откривање на пулсарите Е. Хјуиш доби Нобелова награда во 1974 год, а во 1993 год. исто така е доделена Нобелова награда за физика, на Р. Халс и Џ. Тејлор за откритие на двоен пулсар PSR 1913+16.

Црни јами. Најдраматичен крај имаат ѕвездите чија маса е поголема од три сончеви маси ($3M_{\odot}$). Тогаш *гравитациониот колапс* е толку силен што не е стабилен ни стадиумот на неутронски ѕвезди, туку контракцијата продолжува и натаму сè до збивање во многу мал волумен ("*скоро еднаков на нула*"). Гравитацијата на овој систем е толку голема што ни тело, ни светлина не може да го напушти, "просторот се затворил во себе". Тоа се *црни јами* кои што општата теорија на релативност на Ајнштајн ги предвидува. Според теоријата, определени се критичните размери кога од небескиот објект може да настане црна јама (Шварцшилдов радиус). Сферната површина со овој радиус се вика *хоризонт на настани*, а над него се наоѓа т.н. *ергосфера* каде просторот и времето се силно деформирани и се привлекуваат со ротацијата на црната јама.

Црна јама скоро е невозможно да се регистрира, туку може да се набљудува просторот околу неа каде што блиските објекти се забрзуваат до толкав степен што се емитуваат кванти со високи енергии. Има индикации за нивно постоење во системите на двојни ѕвезди (во сосвездието Лебед од каде е детектирано силно

зрачење во *рендгенската област*). Од нив не потекнува никаква информација, никаков знак, сè што е во близина едноставно јамата го "голта".

Современите теории предвидуваат дека материјата во *црните јами* може да биде збиена во една точка со бесконечно голема густина и бесконечна гравитација. Оваа состојба се означува како *просторно временски сингуларитет*. Според С. Хокинг, водечки физичар во оваа област, во таков случај престануваат да важат физичките закони онакви какви што ги знаеме.



Сл. 6.

Со црните јами се поврзани многу сложени феномени кои засега се во доменот на теоријата (а некои во фантазијата). Заради огромната гравитација, според теоријата на релативноста, околу црните јами просторот треба да биде закривен (сл. 6). Влегувањето во таков систем би значело влегување во некој друг дел на *просторно временскиот континуум*. Кажано поинаку, црна јама што ротира би ги одвела во некоја друга Вселена сите објекти што ќе влезат во неа. Меѓу сите такви Вселени, црните јами би биле единствената врска.

Ваквите заклучоци не се само плод на научната фантастика туку на сериозни научни теории. Размислувањата одат до таму да се изнајде начин како да се искористи големата енергија од ротацијата на овие објекти. Кога би можела да се створи вештачка малечка црна јама (да се "стисне" материјата како што е тоа во црните јами), би биле решени сите

23. Астрофизика

потреби за енергија на човештвото.

Овде треба да истакнеме дека проблемите кои што се разгледани погоре во врска со еволуцијата на ѕвездите како и другите од пошироката област се прикажани во општи црти. Тие сè уште не се доволно проучени и уточнети, за многу прашања не постојат задоволителни одговори, но тие се бараат од науката.



Ентони Хјуиш (1924–) англиски радио-астроном. Завршил физика во Кембриџ и таму бил професор. Нобелова награда добил во 1974 год. заедно со сер Мартин Рајл.

Прашања и задачи

1. Каков е составот на меѓуѕвездената материја и гас?
2. Кои величини ги поврзува Херцшпрунг-Раселовиот дијаграм? Наброј некои ѕвезди се наоѓаат на главната низа на дијаграмот.
3. Која е најпозната маглина чие набљудување дало сознанија за еволуцијата на ѕвездите?
4. Што е хелиумов блесок на ѕвездата и што претскажува тој?
5. Зошто Барнардовата ѕвезда (и ѕвезди слични на неа) ќе има многу долг живот, над стотина милијарди години?
6. Кои ѕвезди се Нови, а кои Супернови?
7. Поетски настроените научници знаат да речат дека ние сме деца на ѕвездите! Размислете дали има вистина во тоа?
8. Што е тоа Чандрасекаров лимит?
9. Температурата на една од најсјајните ѕвезди на небото Капела (од сосвездието Колар) е 5.200 К. Сјајот што го дава на земјаната површина е $1.2 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$. Растојанието до неа е $4,3 \cdot 10^{17} \text{ m}$. Колкав е радиусот на ѕвездата? Што може да се каже за местото на Капела на

Херцшпрунг - Раселовиот дијаграм?

$$R = \sqrt{L / 4\pi\sigma T^4} = 2 \cdot 10^9 \text{ m}$$

10. Споменатиот пулсар во маглината Рак има период $T=0,033\text{s}$, да се оцени колкава е густината на материјата во него?

Одговор: Нека аголната брзина на пулсарот е $\omega = \frac{2\pi}{T}$, а централното забрзување во екваторијалната област ќе биде $\omega^2 R$ каде што R е радиусот на пулсарот. Ако масата на пулсарот е M , гравитационото забрзување во таа област ќе биде: $\gamma \frac{M}{R^2}$. За да не се разлета материјата на пулсарот во околниот простор, треба да биде исполнето: $\gamma \frac{M}{R^2} > \omega^2 R$. Ако се има предвид дека густината на таква структура во принцип е: $\rho = \frac{M}{R^3}$, се добива дека $\rho > 610^{14} \text{ kg/m}^3$.

Оваа густина е скоро милион пати поголема од онаа на белите џуџиња а е од ред на густината на атомските јадра. Ваква густина можат да имаат само неутронските ѕвезди.

11. Дали сте се запрашале зошто ноќе небото е темно? Ова прашање не е така глупаво како што може да се помисли! Ако Вселената е бескрајна и ѕвездите се рамномерно распоредени, не би требало небото да е темно, туку напротив, од било која насока би доаѓала светлост од милијарди ѕвезди, небото би требало да биде рамномерно осветлено како и дење.

Овој проблем е основа на тнр. *Олберсов парадокс*, според името на германскиот лекар и астроном кој прв го поставил ова прашање. Размислете малку повеќе имајќи предвид дека Вселената не постоела вечно, не е бескрајна и според Хабл, се шири!!

За оние кои сакаат да се запознаат со најновите достигнувања во областа на астрономијата и астрофизиката, ги препорачуваме овие сајтови:

<http://www.astronomynow.com>

<http://www.physlink.com>

<http://science.nasa.gov/news>

<http://antwrp.gsfc.gov/apod/astropix.html>

<http://www.xs4all.nl/~carlkop/astroeng.html>

23.4. ОДРЕДУВАЊЕ НА КАРАКТЕРИСТИЧНИТЕ ВЕЛИЧИНИ НА НЕБЕСКИТЕ ОБЈЕКТИ

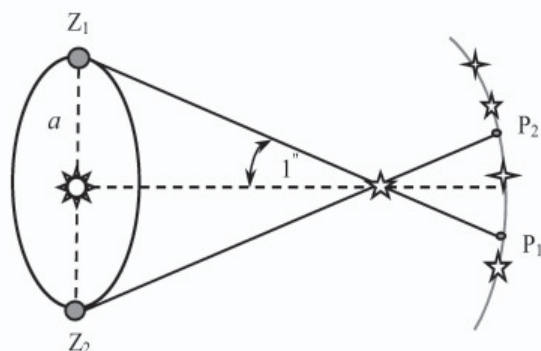
Растојанијата меѓу небеските објекти се толку големи што не е zgodно да се прикажуваат на вообичаен начин како растојанијата на Земјата. Се користат овие единици:

- астрономска единица 1 AU - таа е еднаква на средното растојание од Земјата до Сонцето, 150 милиони километри ($1,5 \cdot 10^{11}$ m) Обично се користи за прикажување на растојанијата меѓу објектите во Сончевиот систем

- светлосна година (ly) тоа е растојание што светлината би го поминала за една година простирајќи се со брзина 300.000 km/s. Треба да се обрне внимание на фактот што овде терминот "година" се употребува за мерење на растојание. Поради огромните растојанија меѓу небеските објекти за кои информација носи светлината, ние, гледајќи во даден објект, всушност го гледаме него во минато време (а не како изгледа сега), толку колку требало на светлината да го премине тоа растојание. Така, нашите набљудувања на оддалечените галаксии се однесуваат на тоа како тие изгледале пред стотици милиони, понекогаш и милијарди години (зависи на која оддалеченост се од нас).

- парсек (паралакс секунда, се бележи ps). Оваа единица се дефинира со појавата на ѕвездена паралакса. Тоа е појава на привидна промена на положбата на набљудуваната ѕвезда на небото заради земјиното кружење околу Сонцето. Нека една ѕвезда S што се наоѓа на растојание r се набљудува од Земјата Z (сл. 1) и тоа кога Земјата е на спротивните точки од својата револуција околу Сонцето (пр. во јули Z_1 и декември Z_2). Положбата на ѕвездата на небото е изменета (P_1 и P_2), а тоа се гледа во однос на многу далечни ѕвезди кои практично имаат занемарливо мала паралакса па може да се сметаат како "неподвижни". Еден парсек е растојание од кое радиусот на земјината орбита околу Сонцето би се гледал

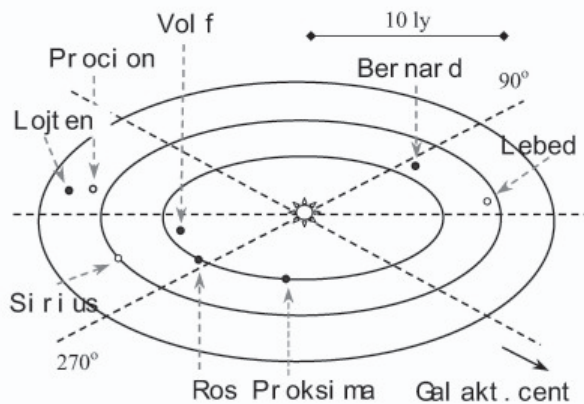
под агол од $1''$ (лачна секунда).



Сл. 1.

Многу оддалечените небески објекти ќе имаат мала паралакса па може да се користи и килопарсек (kps) и мегапарсек (Mps). Најголема паралакса (најмало растојание) има ѕвездата Проксима - Центаур (проксима - блиска) во износ од $0,76''$ растојанието од Земјата е 1,3 ps.

$$1 \text{ ps} = 3 \cdot 10^{13} \text{ km} = 3,26 \text{ светлосни години}$$



Сл. 2.

На сл. 2 прикажана е оддалеченоста на најблиските ѕвезди од Сонцето. Имено, на растојание од 4 парсеци (околу 13 светлосни години) се наоѓаат околу 25 ѕвезди но само неколку од нив се гледаат со голо око (Сириус, Проксима, Лебед 61), а другите се гледаат само со телескопи: Ѕвездата на Лојтен, Рос, Волф, ϵ -Еридан, Бернард, Сруве 2398, Лакајл итн.

Привидна и апсолутна големина на ѕвездите

Со голо око тешко може да се одреди која ѕвезда зрачи поголем светлосен флукс (има поголем сјај) затоа што ѕвездите се наоѓаат на многу различни оддалечености од нас. Затоа наместо флуксот, се одредува *привидната големина* (**магнитуда** m) на ѕвездата. Оваа величина нема врска со димензиите на ѕвездата туку се однесува на нејзиниот сјај онака како што се гледа или регистрира од Земјата. Се разбира, привидната големина зависи од растојанието на кое се наоѓа ѕвездата. Така може да се случи некоја мала и поладна ѕвезда што е доста блиску до нас да има знатно поголема привидна големина (привиден сјај) во однос на некои гигантски усвитени ѕвезди што се наоѓаат на огромни растојанија.

Најголемиот старогрчки астроном Хипарх (2 век п.н.е) според привидниот сјај ги поделил ѕвездите на шест класи; најсјајните се во I класа, а во VI класа се ѕвездите кои одвај се гледаат со голо око. Се означуваат со $1^m, 2^m, 3^m, 4^m \dots$ итн. што значи ѕвезди од прва, втора, трет, четврта класа (**магнитуда**). Но, на небескиот свод има објекти со поголем сјај од ѕвездите од прва магнитуда, па е дефиниран сјај на ѕвезда од нулта (0^m) магнитуда. Таа на границата на Земјината атмосфера би дала осветленост $E=2,78 \cdot 10^{-8} \text{ lx}$ (лукси). Оние објекти кои имаат поголем сјај, имаат магнитуда со знак минус, на пример: Сириус има привидна големина $-1,4^m$, Јупитер -3^m , Венера $-4,4^m$, Месечината $-12,7^m$, Сонцето $-26,8^m$. Од блиските ѕвезди со слаб сјај да ја спомнеме Волф-359 со привидна големина $+13,5^m$, потоа Северница $+2^m$ Алдебаран $+1,1$, Антарес $+1,2^m$, Капела $+0,2^m$.

На предлог на Ј. Баер (1603 год) во астрономијата е договорено најсјајната ѕвезда од некое сосвездие да се бележи со грчката буква α , втората ѕвезда по сјајност со β итн. (во интерес на вистината има исклучоци од овој договор). На пример, во зимските месеци најлесно се препознава сосвездието Орион кое се наоѓа високо на јужниот дел од небото. Во неправилна четиристрана фигура, покрај другите, се наоѓаат три сјајни ѕвезди. Најсјајната ѕвезда во Орион се бележи со α -Орион

(ѕвездата Бетелгез), втората е β -Орион (Ригел), итн. Привидната големина на ѕвездата m е сврзана со осветленоста E што таа ја дава на површина што стои нормално на насоката на гледање:

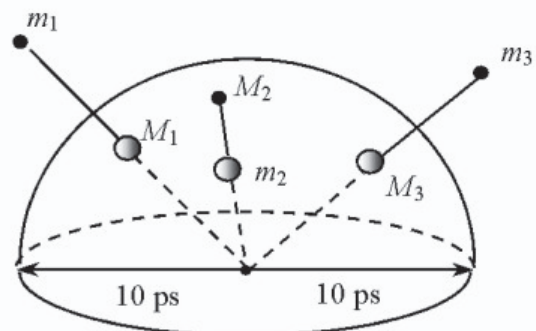
$$m = -2,5 \log E + const \quad (1)$$

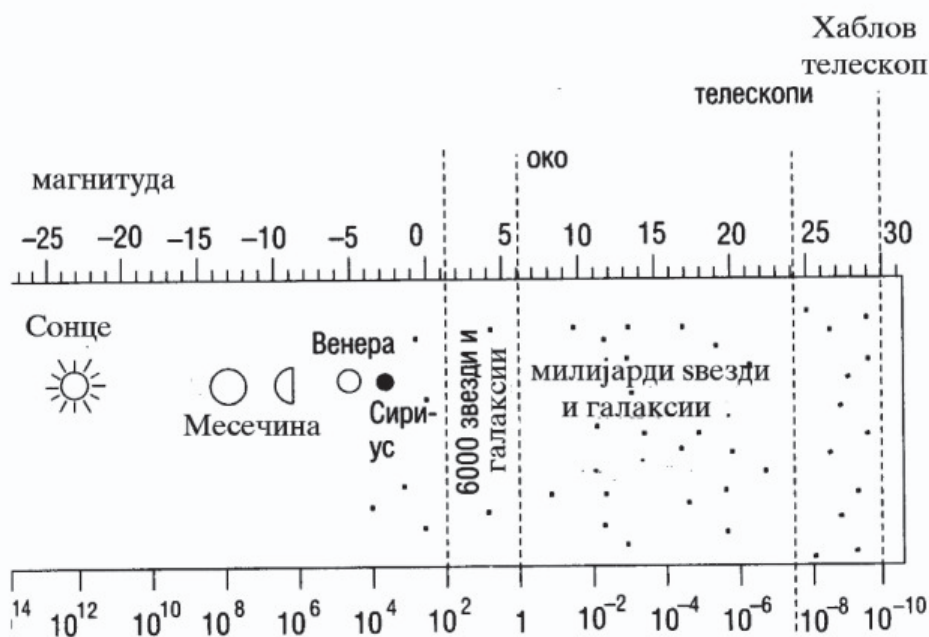
Знакот минус на десната страна покажува дека ѕвезда што има поголем сјај и дава поголема осветленост врз површината на детекторот (око, фотоплата или фотоелектричен детектор), има помала привидна големина.

Ако две ѕвезди со привидни големини m_1 и m_2 даваат осветленост E_1 и E_2 , тогаш врската е дадена со формулата што ја утврди англискиот астроном *Н. Погсон* (1856):

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{E_1}{E_2} \quad (2)$$

Привиднатата големина m на ѕвездите што се регистрира со било кој детектор не е добар "стандард" што би дал веродостојни податоци за оддалеченоста на ѕвездите. За да може да се спореди сјајот на ѕвезди кои се наоѓаат на различни растојанија, се дефинира **апсолутна големина** (**магнитуда**) на ѕвездите M . Тоа е оној сјај што ѕвездата би го дала ако се најде на оддалеченост од 10 ps (парсека) или 32,6 светлосни години. Во тој случај ситуацијата битно се менува (сл.3). Многу ѕвезди кои одвај се забележувале заради огромната оддалеченост (m_1, m_3) кога би се нашле на само 10 ps, по апсолутна големина кк се најдат пред Сонцето (m_2) кое на таа иста оддалеченост од десет парсека би било ѕвезда која одвај се гледа.





Сл. 4.

Сл. 3.

Врската меѓу апсолутната M и привидната големина m е:

$$M = m + 5 - 5 \log r \quad (3)$$

каде што r треба да биде во парсеци. За таа цел со астрономските набљудувања се одредува паралаксата на ѕвездата со што се знае растојанието изразено во парсеци.

Привидната големина се одредува со доволна точност од астрономските мерења. Од горната релација се пресметува апсолутната големина M на ѕвездата. Се разбира, за многу оддалечените ѕвезди не е едноставно да се извршат точни мерења и апсолутната големина да се одреди со доволна точност.

Определувањето на пречникот на ѕвездите може да се направи на различни начини. На пример, за Сонцето, најблиската ѕвезда, тоа се прави со мерење на аголниот радиус и растојанието-паралакса. За релативно блиски ѕвезди се користи стеларен интерферометар. Оваа метода, применета на 30-тина најблиски ѕвезди дава добри вредности (аголен пречник од $0'',047-0'',0007$). За сите ѕвезди е применлив методот што се заснова на мерење на оддалеченоста и сјајот (осветленоста) како што е

прикажано со формулата на Погсон.

На сл. 4 е прикажана скала со видните ѕвездени величини. На најдоланата апсцисна оска е прикажан интензитетот на небески објекти спореден со границата на осетливост на голо око.

Бидејќи луминозноста L на некоја ѕвезда е определена од енергијата што се зрачи од нејзината површина:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (4)$$

$$E = \frac{L}{4\pi R^2} = 10^{-0,4m-5,67} \quad (5)$$

тогаш може да се пресмета ѕвездениот радиус R ако е определена температурата на фотосферата T . Имајќи ја предвид дефиницијата за апсолутна ѕвездена големина M , радиусот може да се определи со формулата:

$$\log R = -0,2M - 2 \log T + 8,46 \quad (6)$$

Како илустрација, пречникот на сјајната ѕвезда Бетелгез (ѕвездице Орион) е околу 850 пати поголем од пречникот на Сонцето.

Со методот на годишна паралакса, во

најдобар случај, можат да се одредат оддалечености на ѕвездите не поголеми од 1.000 ps што претставува само 1/30 од дијаметарот на нашата галаксија. Определувањето на поголеми растојанија се врши по индиректни методи. Еден од нив е методот на *зависност период-сјај* (PL-зависност). Таа појава е поврзана со посебна класа на ѕвезди коио периодично го менуваат сјајот и затоа се викаат *променливи ѕвезди*. Најпознати се т.н. *цефеиди* што го носат името според ѕвездата δ -Цефеј. Промената на нивниот сјај се должи на промени во нивната внатрешна структура, што има за последица периодични пулсации на фотосферата. Бидејќи цефеидите се ѕвезди-гиганти со голем сјај што се гледа далеку, со нивна помош се определуваат растојанија на небески објекти не само во нашата, туку и во другите галаксии.

Прашања и задачи

1. Како се дефинирани единиците за одредување на растојанието меѓу небеските објекти: астрономска единица, светлосна година, парсек?

2. Кои се најблиските ѕвезди до Сонцето (на растојание до 13 светлосни години)?

3. Каква е првата класификација на ѕвездите што ја направил Хипарх?

4. Со Погсоновата формула може да се пресмета големината на една ѕвезда. Објасни како се прави тоа?

5. Како се дефинира апсолутната магнитуда на една ѕвезда?

6. Пречникот на сјајната ѕвезда Бетелгез е 850 пати поголем од пречникот на Сонцето. Како е тоа одредено?

7. Што се подразбира под поимот луминозитет на ѕвездите?

8. Колкав е односот на осветленоста врз земјината површина што ја даваат Сонцето и полната Месечина?

Дадени се: привидната големина на Сонцето $m_1 = -26^m,8$ и на Месечината $m_2 = -12^m,7$

(Одговор: $E_1/E_2 = 440.000$. Толку пати Сонцето "посилно" ја осветлува Земјата).

9. Колкав е сјајот на најблиската ѕвезда Сириус?

Дадено е: неговата привидна магнитуда $m = -1^m,6$, а растојанието до Сонцето е $d = 2,64 \text{ ps}$. (Одговор: Првин најди ја $M = +1^m,4$ а потоа сјајот (луминозитетот) $L = 10^{1,36} L_s = 23 L_s$ (23 пати поголем од сончевиот).

10. Годишната паралакса на ѕвездата Вега (од соѕвездието Лира) изнесува $0,133''$. Определи го растојанието до неа?



ПРОШИРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈАТА ВО СВЕЗДИТЕ

Огромната енергија што ја зрачат ѕвездите (како нашето Сонце) претставувала загатка долго време. Порано се претпоставувало дека тоа е *гравитациона енергија* што се ослободува при постепената контракција на ѕвездената материја. Х. Хелмхолц во 1861 год. ја проучил оваа хипотеза и констатирал дека при постојано губење енергија на таков начин, нашето Сонце би траело само 10 милиони години. Од други податоци со сигурност е утврдена возраста на Сонцето, околу 4,5 милијарди години. Значи, хипотезата за гравитациона енергија не била реална.

А. Едингтон во 1920 год. прв ја искажал претпоставката дека енергијата во ѕвездите се создава преку **термонуклеарни реакции** во нивната внатрешност при кои настанува синтеза на водородот во хелиум. По скоро две децении, Х.Бете и К.Вајцекер, независно еден од друг, ги разработиле поединостите на овие реакции, начинот и условите при кои се одвиваат. Ѕвездата е динамички систем што се состои од огромен број честици: електрони, јони, протони, јадра, атоми, но и сите видови зрачења итн. Средната температура на ѕвездата зависи од нејзината големина и состав. Распределбата на температурата на ѕвездата зависи од механизмот на пренос на енергијата од внатрешноста каде температурата е неколку милиони степени, до површината каде температурата е неколку илјади (до неколку десетини илјади) степени.

На различни етапи од еволутивниот развој на ѕвездите можни се различни циклуси

на термонуклеарни реакции. На денешниот степен на развој на Сонцето и ѕвездите слични на него, главни циклуси се:

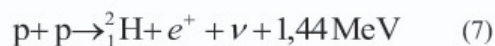
-протон протонскиот ($p-p$) и
-јаглерод-азот-кислород циклус.

Овие циклуси имаат свои варијанти во зависност од условите што владеат во внатрешноста на ѕвездата (притисок, температура, процентен состав итн.) но ние ќе опишеме најкарактеристичен модел.

Протон - протонски циклус

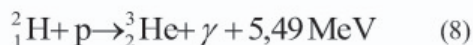
Реакциите од овој циклус се карактеристични за температури во внатрешноста на ѕвездите од околу 15 милиони степени и густина на водородот $\rho \approx 100 \text{ g/cm}^3$. Главните реакции се одвиваат многу бавно. Така, за да согори 1g водород и да се претвори во хелиум, потребни се неколку милиони години. Но, масата на ѕвездите е огромна, а со тоа и количеството водород што стои на располагање за реакциите.

Циклусот започнува со реакцијата на две водородни јадра (два протони) која иако со мала веројатност, сепак се случува. При тоа се добива деутерон, позитрон e^+ и неутрино ν , се ослободува и енергија:



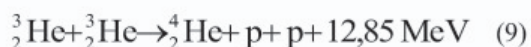
Добиените позитрони веднаш се анигилираат при средба со електрони, а неутринскиот флуks во износ $\sim 10^9$ неутрина во секунда на 1 cm^2 однесува дел од енергијата на реакцијата.

Добиениот деутерон од горната реакција веднаш се врзува со нов протон при што се добива јадро на ${}^3\text{He}$ и γ -квант со голема енергија:



Реакцијата се одвива само за неколку секунди.

Натаму циклусот се одвива на овој начин (најверојатен):



при што се добива јадро на хелиум-4 и два протони. Реакцијата дава големо количество на енергија. Времето на одвивање на ваквите реакции е доста долго. Вкупната енергија што се добива од овие процеси зависи од динамиката на нивното одвивање, таа пак во прв ред е зависна од температурата. Со опаѓање на температурата (ако реакциите се одвиваат подалеку од јадрото на ѕвездата) продуктивноста на протон-протонскиот циклус опаѓа. Обратно, со пораст на температурата, продуктивноста расте, првин брзо, потоа многу полака.

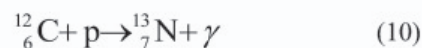
Протон протонскиот циклус е доминантен во внатрешноста на Сонцето. За сето време досега се смета дека само 12% од водородот се претворил во хелиум.

Горе опишаниот тек е најверојатен, иако циклусот може да се одвива и поинаку преку формирање на берилиум и литиум. Конечно пак се добиваат хелиумови јадра.

Јаглеродно - азотен циклус

Овој циклус се одвива во масивни ѕвезди, поголеми од Сонцето (на пример Сириус кој има маса скоро два пати поголема од сончевата) на температури над 12 милиони степени и неговото учество е значително како што расте температурата. Процесот на формирање хелиум овде оди посредно. Во него учествуваат и јадра на јаглерод, азот и кислород, затоа се вика CNO или Бетеов циклус.

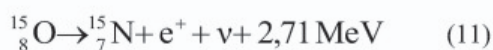
Најпрвин, јадрото на јаглерод-12 зафаќа протон и при тоа се добива нестабилно јадро на азот-13 и γ -квант:



Ваквите реакции имаат мала веројатност, но сепак се одвиваат.

Добиениот азот-13 брзо се распаѓа и се добива изотоп јаглерод-13 кој зафаќа протон и се добива јадро на азот-14 (се разбира и гама зрачење). Ова јадро од своја страна зафаќа протон и се добива кислород-15 кој е нестабилен и за само неколку десетини секунди се распаѓа:

23. Астрофизика



Добиениот азот-15 го зафака четвртиот протон:



Се добива јаглерод -12 со кого започна циклусот и хелиумово јадро од четирите протони. Јадрата на јаглеродот, азотот и кислородот како да беа само "домаќини", а јаглеродот-12 игра улога на "катализатор" на реакцијата при која се ослободуваат 25,03 MeV енергија.

Трансформација на хелиумот во ѕвездите

Постојат ѕвезди во чие средиште владеат многу повисоки температури (до 100 милиони степени) од оние кои досега ги спомнавме. При такви температури ефективни стануваат и други термојадрени реакции, но тие заради скромниот енергетски придонес не претставуваат значителен извор на ѕвездената енергија.

Така на пример, можно е за сосема кратко време да се создаде нестабилно јадро на берилиум-8 од две хелиумови јадра:



при што е најверојатно дека јадрото берилиум-8 ќе се распадне пак на две хелиумови јадра. Но постои одредена веројатност тоа јадро да зафати уште едно хелиумово јадро и да формира јадро на јаглерод -12 во возбудена состојба:



кое што преминува во основна состојба со емисија на интензивно γ -зрачење.

Ако на било каков начин во ѕвездите се создаде јаглерод, од него понатаму се добиваат потешките, посложените атоми на кислород, неон итн. Така се создаваат слоеви во ѕвездата. Од неонот може да се добие магнезиум и сè така до фаза кога се создаваат атоми на железо.

Неутрината што настануваат во реакциите кои се одвиваат во внатрешноста на ѕвездата без пречки проаѓаат и брзо стигнуваат до површината на ѕвездата за тоа што тие не

дејствуваат заемно со материјата на ѕвездата. Очигледно, единствено тие носат "информации" за процесите во внатрешноста.

Согледувајќи го тоа, физичарите пред дваесетина години се зафатија со проблемот на детекција на сончевите неутрина за да може да се добијат информации за состојбата на материјата и процесите во внатрешноста на Сонцето. Но, детектираниот флуks на Сончеви неутрина е помал од оној што го предвидува теоријата со реакциите што ги проучивме. Дали тоа значи дека теоријата за нуклеосинтеза во внатрешноста на Сонцето не е точна? Можеби тоа не е во прашање, но сепак овој проблем мора да има особено значење па затоа е еден од најактуелните во современата физика.

Прашања и задачи

1. На каков начин се добива енергијата во ѕвездите?

2. Кои се најпознати циклуси на реакции во ѕвездите?

3. Со нуклеосинтезата се создаваат потешките елементи во внатрешноста на ѕвездите, но не сите. Каде завршува тој процес?

4. Кои честици, создадени во внатрешноста на ѕвездите можат да ја напуштат ѕвездата и да стигнат до огромни далечини без да бидат зафатени? Какви информации можат да донесат?

5. Да се пресмета колку време може да свети нашето Сонце за сметка на термојадрените реакции што се одвиваат во неговата внатрешност?

Дадено е: луминозитет $L=3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$, средна густина $\rho=1400 \text{ Kg/m}^3$, маса $M=2 \cdot 10^{30} \text{ Kg}$. При синтеза на едно јадро ${}^4\text{He}$ се добива $B=27 \text{ MeV}=4,33 \cdot 10^{-12} \text{ J}$. Да се смета дека во циклусот само 10% од водородот се претвара во ${}^4\text{He}$. Масата на протонот е $m_p=1,67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$.

(Одговор: Сметаме дека Сонцето се состои само од водород, па се наоѓа вкупниот број на протони $N_p=0,1 M/m_p = 1,2 \cdot 10^{56}$. Вкупната енергија што би се добила е $\Delta E=B N_p/4 = 1,3 \cdot 10^{44} \text{ J}$. Времето на живот е $t= \Delta E/L=3,25 \cdot 10^{17} \text{ s}$ (10^{10} год).

23. 5. ИНТЕРСТЕЛАЕН ПРОСТОР. МЕЃУСВЕЗДЕНА МАТЕРИЈА

Што има во огромниот меѓусвезден простор, дали тој е празен? Во него делуваат *гравитационото и магнетското поле*, но дали тоа е сè? Не баш; во него има меѓусвезден а материја составена од:

-*гасно-честични облаци* што покрај водород содржат прашина и прости молекули (вклучувајќи и органски).

-*меѓусвездена прашина*, и

-*гас* што се состои од неутрален и/или јонизиран водород чија густина е неверојатно мала, просечно $\approx 10^{-24} \text{kg/m}^3$, скоро вакуум кој не може да се достигне во земјини услови. Присуството на *неутралните атоми на водородот* во интерстеларниот простор е откриено дури во 1951 год. според негово карактеристично зрачење со бранова должина од 21,1cm (*песна на водородот*) што беше можно да се регистрира со развојот на радиоастрономијата.

Поради огромните димензии на просторот во кој е сместена оваа меѓусвездена материја, се мисли дека таа чини блиску 5-10% од вкупната маса во галаксиите.

Меѓусвездениот гас и прашина се најгусто околу екваторијалната рамнина на нашата галактика и во областите што се наречени **маглини**. Овие маглини можат да бидат **дифузни и планетарни**.

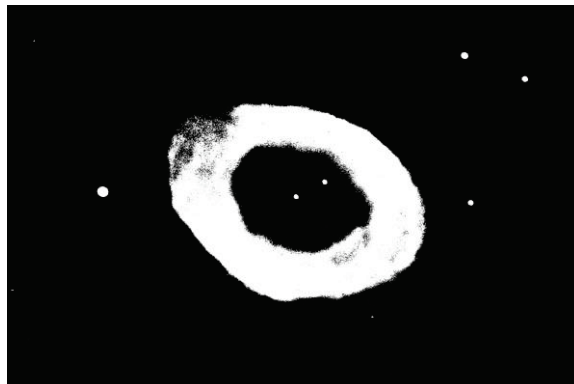


Сл. 1.

Ако дифузната маглина е во близина на некоја топла звезда, таа е *светла*, а нејзините составни честички претежно се јонизирани. Таков пример е Големата Орионова маглина (сл. 1) која што обвиткува голема група ѕвезди.

Маглините што се состојат само од прашина се *темни*. Нивното присуство се докажува според апсорпциони спектри и се чини како таа област да нема ѕвезди.

Планетарните маглини се во елиптична или сплескана форма. Тие личат на планети, затоа го добиле и името. Но, температурата на гасот во нив е така голема што може да достигне до 10.000 К. Подрачјето што го зафаќа јонизируваниот гас е дефинирано (до 10 ps). Една од планетарните маглини прикажана е на сл. 2.



Сл. 2.

Присуството на меѓусвездениот гас и прашина треба да се има предвид при набљудување на одредени ѕвезди, затоа што со тоа се поместува спектарот на спектралните линии кон црвено и ја намалува сјајноста на ѕвездата. Затоа, се внесува корекција при добивањето на температурата на ѕвездата според Виновиот закон.

Космичко зрачење

Од космичкото пространство во Земјината атмосфера стигнува флукс честичи со огромна енергија кои предизвикуваат

бројни нуклеарни реакции и претворби. Тоа се примарни космички зраци што имаат многу голема продорност па можат да поминат низ слој вода до 1.000 m. Се смета дека нивната енергија е до 10^{10} eV, а некои честици од флуксот имаат и многу поголема енергија.

Констатирано е дека составот на примарниот космички флукс е: протони 77,5%, хелиумови јадра 20%, јадра на литиум, берилиум, бор и други 1%, јадра на јаглерод, азот, кислород 1%, траги на останати јадра со атомски број $9 < Z < 28$.

Поради огромната енергија што ја имаат честиците од снопот, а особено протоните, јадрата со кои се судираат се разбиваат на поголем број честици што исто така имаат голема енергија. Тие ги претставуваат *секундарните космички зраци* што најчесто се позитрони, μ -мезони, π -мезони, K-мезони, хиперони и тн. Впрочем, позитроните, мионите и пионите најпрвин се регистрирани во космичките зраци.

Проблемите сврзани со космичкото зрачење се сложени. Каде постанува и од каде доаѓа? Се смета дека примарниот космички флукс е последица на нуклеарни процеси во нашата галаксија. Во големите ѕвездени маси, во плазмата, се создаваат турбуленции што како последица имаат појава на огромни магнетски полиња кои ги забрзуваат честиците и тие се разлетуваат во космичкото пространство. Особена активност покажуваат ѕвездите *Супернови* при нивните гигантски експлозии.

Аристарх (3 век п.н.е), александарски астроном, бил првиот кој со набљудувања на небеските појави и пресметки дошол до сознание дека Сонцето е барем 312 пати поголемо од Земјата и е оддалечено околу 770 земјини пречници. Затоа, тој го поставил Сонцето во средината на Вселената, а Земјата и сите други планети обиколуваат околу него. Но, неговото учење не било прифатено, особено од Црквата во чие учење долго време се задржал ставот дека Земјата е центар на Вселената.

23.6. ВО СВЕТОТ НА ГАЛАКСИИТЕ

Дали Вселената, со сите галаксии и небески тела во нив е ваква отсекогаш? Дали таа на некој начин се менува, има своја еволуција? Дали постојат и други населени светови? Ваквите прашања имаат своја смисла затоа што човекот отсекогаш сакал да ги одгатне тајните на светот што го опкружува. Структурата на Вселената и нејзината еволуција се предмет на посебна научна дисциплина, *космологија*.

Јасно е дека сложеноста на Вселената не може да се сфати и објасни комплетно, туку само преку некои проучени појави можат (колку-толку) да се разберат нејзината структура и постоење. Обичните претстави од секојдневниот живот не можат да послужат за тоа, туку успех имаат математички теории кои на прв поглед се необични, но добро се согласуваат со експерименталните набљудувања. Космолозите најмногу се користат со *Ајнштајновата општа теорија на релативноста* која се занимава со гравитацијата, просторот и времето.

Постојат две карактеристични теории за Вселената:

- *стаационарна и*
- *еволуциона Вселена.*

Теоријата за стаационарна Вселена вели дека Вселената е апсолутно иста во сите правци и сите точки, во сите моменти од времето. галаксиите не се оддалечуваат, туку исчезнуваат, други се појавуваат, како материјата бавно да се раѓа во меѓугалактичкиот простор (за да се надокнади материјата која се претвора во енергија). Тоа се тешко сфатливи поставки и прашање е колку се веродостојни, иако од филозофски аспект оваа теорија е доста привлечна (теорија за вечна Вселена).

Еволуционата теорија кажува дека Вселената се менува, има свој развој, еволуција во просторот и времето. Значи, има свој почеток и од тогаш таа се шири. Но, дали ќе се

шири вечно?

Хаблов закон. Космологија

Галаксиите се оддалечуваат една од друга. Тоа е појава што астрономот Е. Хабл ја откри во 1929 год. Тој утврди дека сите галаксии се оддалечуваат од нас. Тоа е непобитно утврдено според поместувањето на спектралните линии во спектрите на оддалечените галаксии (црвено поместување на спектралните линии заради Доплеровиот ефект).

(Доплеровиот ефект е појава кога настанува промена на брановата должина (фреквенцијата) на зрачењето заради релативно движење на изворот во однос на набљудувачот (приемникот). Кога изворот се оддалечува брановата должина на регистрираното зрачење се зголемува (и обратно) промената на брановата должина е $\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{v}{c}$ каде што v е брзина со која се движи изворот, c брзина на светлината, λ_0 е бранова должина на зрачењето кога изворот мирува).



Едвин Хабл (1889 - 1953), американски астрофизичар.

Е. Хабл утврди дека брзината со која галаксиите се оддалечуваат е пропорционална на нивната оддалеченост d :

$$v = Hd \quad (1)$$

што го претставува *Хабловиот закон*, еден од најважните закони за Вселената. Во горниот израз H е Хаблова константа која ја карактеризира брзината на ширење на Вселената. Според поновите мерења, оваа константа има вредност

$$H = (72 \pm 8) \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc}) \quad (2)$$

(километри во секунда по мегапарсек).

Експерименталното одредување на Хабловата константа е доста неизвесно и врзано со неизбежна грешка.

Бидејќи нашата галаксија нема некое посебно место во Вселената, не е нејзин центар, јасно е дека одреденото оддалечување важи за сите галаксии. Сите тие се оддалечуваат една од друга. Сликвито тоа се прикажува како точките на балон кој се шири; сите точки ќе се оддалечуваат како што се надувава балонот.

Последиците од ширењето на Вселената се значајни;

-максималното растојание до каде може

да се "набљудува" Вселената е $d_{\text{max}} = \frac{c}{H}$

значи $\sim 2 \cdot 10^{10}$ светлосни години односно $6 \cdot 10^9$ ps каде што зедовме дека максималната брзина со која се оддалечуваат најдалечните галаксии може да биде еднаква на брзината на светлината. Јасно, се што е подалеку од d_{max} не може да се регистрира. Тоа се вика *граница на набљудување* или *хоризонт на Вселената*. Делот од Вселената кој може да се набљудува се вика *Метагалаксија*.

Ако се замени за брзината $v=d/t$ во Хабловиот закон се добива:

$$\frac{d}{t} = Hd \quad \text{односно} \quad t = \frac{1}{H} \quad (3)$$

Земајќи ја вредноста на Хабловата константа, се добива $t=18 \cdot 10^9$ години, (осумнаесет милијарди години), и толкава би била староста на Вселената, те. времето кога започнало нејзиното ширење. Споредено со други теории ова време добро се вклопува во границите

23. Астрофизика

меѓу десет и дваесет милијарди години за старост на Вселената.

Значи, пред 15 - 20 милијарди години сета материја и енергија биле собрани во извонредно мал простор, првобитно "космичко јајце". Но не само материјата, туку и целиот простор бил збиен, компримиран. Со циновска експлозија (*Big Bang*) Вселената го започнала своето ширење кое трае и денес. Раната Вселена била само зрачење и врели гасови, потоа се формираат гасни облаци, (кога температурата паднала на 2000 К се формирале атомите на водород и хелиум), протогалаксии, галаксии што започнале засебна историја, па се формирале ѕвездите и другите космички објекти.

Но, дали има некаков доказ, некој остаток од *Големата експлозија*? Во 1964 год. А. Пензиас и Р. Вилсон открија зрачење, шум, што секогаш е присутен во Космосот, што не потекнува од небеските објекти туку како небото во целина да зрачи, слично на зрачење на црно тело при многу ниска температура од ~3К. Ова заднинско, *реликтно зрачење* се смета дека е остаток од Големата експлозија, како досега Вселената во целост да се изладила на таа температура.

А сега неизбежното прашање: Дали Вселената вечно ќе се шири?

Физичарите сметаат дека тој процес зависи од просечната густина на материјата во Вселената. Просечната густина не може да се утврди со голема точност затоа што постои материја во Вселената која не може да се регистрира, не се гледа (во црните јами, во невидливите гасови меѓу галаксиите, во неутрината ако нивната маса само малку се разликува од нулта вредност итн.).

Ако густината на материјата надмине некоја критична вредност ($\rho > 10^{-29} \text{ g/cm}^3$), тогаш процесот на ширење на Вселената може да се замени со збивање заради гравитацијата која ќе достигне некоја определена вредност. Вселената би се компримирала до размери на првобитното "космичко јајце", би настанала нова голема експлозија итн. Тоа би бил модел на Вселена која осцилира, која има циклуси. Тогаш Вселената не би имала ни почеток ни

крај, а ние живееме во еден миг на таков циклус.

Пред да завршиме, треба да истакнеме дека човекот со својот интелект како највисок степен на организација и творба на таа иста вселенска материја, во тек на илјадалетија ги напрегнува своите духовни сили да ги разоткрие тајните и законитостите на Вселената за да го одреди своето место и улога во неа.



Арно Пензиас (1933—). Американски физичар кој долго време работел во Бел-лабораториите во одделот за радиофизички иследувања. Добитник е на Нобелова награда за физика во 1978 год. заедно со Р. Вилсон.

Прашања и задачи

1. Каков е составот на интерстеларниот гас?
2. Какви маглини се откриени?
3. Од што се состои примарното космичко зрачење?
4. Кои се најпознати теории за Вселената?
5. Дали Вселената има почеток и крај?
6. Каква законитост откри Е. Хабл во 1929 год.?
7. Што е Доплеров ефект?
8. Какви се последиците од ширењето на вселената?
9. Кој е доказот за Големата експлозија или тоа е само теорија?
10. Која густина на материјата во вселената се смета за критична?