

Lambe Barandovski • Marija Velevska

LİSE İKİNCİ SINIFLAR (II) İÇİN

FİZİK

DERS KİTABI



Lambe Barandovski
Marija Velevska

LİSE İKİNCİ SINIFLAR (II) İÇİN

FİZİK

DERS KİTABI



Üsküp, 2026

Yazarlar:

Prof. Dr. Lambe Barandovski – Fizik Enstitüsü, Fen Fakültesi – Üsküp "Aziz Kiril ve Metodiy" Üniversitesi – Üsküp
Marija Velevska – "Orce Nikolov" Lisesi – Üsküp

Değerlendirenler:

Prof. Dr. Atanas Tanuşevski – UKİM – Fizik Enstitüsü – Üsküp
Prof. Dr. Katerina Drogreška – UKİM – Sismoloji Gözlemevi – Fen Fakültesi – Üsküp
Elizabeta Popovska – "Nikola Karev" Lisesi – Üsküp

Kuzey Makedonya Cumhuriyeti Ders Kitapları Ulusal Komisyonu'nun 27.04.2026 tarihinde aldığı onayla ve Kuzey Makedonya Cumhuriyeti Eğitim ve Bilim Bakanlığı Pedagoji Hizmetleri tarafından 04.05.2026 tarihinde 26-559/1 sayı ile kayda geçirilen kararıyla, lise 2. sınıflarda okutulmak üzere Lise İkinci Sınıflar için Fizik Ders Kitabı'nın kullanımına onay verilmiştir.

Sevgili öğrenciler,

Lise ikinci sınıf fizik dersinde, doğadaki olaylar ve bu olayları açıklayan yasalar hakkındaki bilgilerinizi derinleştirecek, aynı zamanda modern fiziğin temel kavramlarıyla tanışacaksınız. Bu ders kitabında, özellikle atom ve nükleer fizik alanında klasik fizik açıklamalarını tamamlayan yeni kavram ve modeller ele alınacaktır. Ayrıca bu bilgilerin bilim, teknoloji, tıp ve çevrenin korunması gibi bir çok alandaki uygulamalarını da öğreneceksiniz.

Bu ders kitabı, her konunun bir önceki konunun devamı olacak şekilde mantıksal bir düzen içinde hazırlanmıştır. Kavramlar; fiziksel büyüklüklerin ve yasaların anlamını ortaya koyan tanımlar, açıklamalar ve örneklerle aşamalı olarak sunulmaktadır. Çözümlü örnekler, hesaplama ve analizde izlenen temel yaklaşımı göstermenin yanı sıra günlük yaşamda karşılaşılan problemlerin çözümünde eleştirel düşünme ve hayal gücünü geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bölüm sonlarında yer alan sorular ve alıştırmalar, bağımsız çalışma yapmanıza ve öğrendiğiniz bilgileri değerlendirmenize yardımcı olacaktır. Ayrıca bazı bölümlerde, öğretim programının ötesinde bilgi edinmek isteyen öğrenciler için ek içeriklere de yer verilmiştir.

Bu ders kitabında teori ile uygulamanın ilişkilendirilmesine özel önem verilmiştir. Metinde, incelenen olayları doğrulamak veya açıklamak amacıyla yapılabilecek deney ve etkinlik önerilerinin yanı sıra fiziğin teknoloji, tıp, enerji ve günlük yaşamdaki uygulamalarına ilişkin örnekler de bulunmaktadır. Bunun yanında, bazı bilim insanlarının kısa yaşam öykülerine yer verilerek bilimsel düşüncenin tarihsel gelişimi ve bilimsel keşiflerin deney ve gözlemlerle nasıl doğrulandığı açıklanmaktadır.

Lise ikinci sınıf fizik dersinin amacı yalnızca formülleri öğrenmek değildir. Aynı zamanda mantıksal akıl yürütme becerinizi geliştirmek, fiziksel olayları bilimsel modeller çerçevesinde değerlendirebilmenizi sağlamak ve elde ettiğiniz sonuçları eleştirel bir bakış açısıyla analiz edebilmenize katkıda bulunmaktır.

Fizik dünyasında başarılı ve ilham verici bir yolculuk geçirmenizi dileriz.

Yazarlar

AÇIKLAMA



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK



ETKİNLİKLER



SORULAR VE ÖDEVLER



DAHA FAZLA ÖĞREN



GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA



ÜNLÜ BİLİM İNSANI

İÇİNDEKİLER

KONU 1. ELEKTROMANYETİZMA.....7

1.1. Cisimlerin elektriklenmesi.....	8
1.2. Coulomb(Kulon) yasası.....	13
1.3. Elektrik alanı	18
1.4. Elektrik potansiyeli ve gerilim.....	25
1.5. Elektrik kapasitansı. Kondansatörler.....	31
1.6. Elektrik akımı	37
1.7. Elektrik direnci. Dirençler	42
1.8. Bir Devre Elemanı ve Tam Bir Devre İçin Ohm Yasası	48
1.9. Kirchhoff yasaları	53
1.10. Dirençlerin bağlanması.....	58
1.11. Kondansatörlerin Bağlanması.....	62
1.12. Elektrik akımının iş, enerji ve gücü. Joule–Lenz yasası	66
1.13. Sıvılar ve gazlardan geçen elektrik akımı.....	70
1.14. Manyetik alan	75
1.15. Manyetik kuvvetler.....	81
1.16. Malzemelerin manyetik özellikleri	89

KONU 2. MEKANİK SALINIMLAR VE DALGALAR97

2.1. Mekanik salınımlar ve harmonik salınımcı.....	98
2.2. Harmonik salınım örnekleri: elastik salınım ve matematiksel sarkaç	104
2.3. Salınım hareketinin enerjisi.....	109
2.4. Mekanik dalgalar	114
2.5. Dalgaların yansıması ve kırılması.....	122
2.6. Ses ve sesin özellikleri	129
2.7. Dalgaların girişim. Duran dalgalar.....	137
2.8. Doppler etkisi	143

KONU 3. GEOMETRİK OPTİK.....	153
3.1. Işığın doğasına ilişkin teoriler. Işığın hızı	154
3.2. Işığın yansıması. Düz ayna.....	158
3.3. Küresel aynalar	162
3.4. Işığın kırılması.....	170
3.5. Optik mercekler.....	176
3.6. Işığın saçılması olayı	185
KONU 4. ATOM VE NÜKLEER FİZİK	191
4.1. Mutlak siyah cismin ışıınımı	192
4.2. Fotoelektrik etki.....	204
4.3. Atom modelleri	214
4.4. Atomların emisyon ve absorpsiyon spektrumları	224
4.5. Röntgen ışınları ve uygulamaları	231
4.6. Atom Çekirdeği ve Nükleer Kuvvetler.....	239
4.7. Doğal radyoaktivite	244
4.8. Radyoaktif bozunma yasası.....	255
4.9. Radyoaktif bozunma zincirleri	263
4.10. Nükleer bağ enerjisi.....	266
4.11. Nükleer reaksiyonlar.....	271
4.12. Filyon, füzyon ve nükleer reaktörler	277
4.13. Dozimetri ve dozimetrik büyüklükler.....	284

KONU 1:

Elektromanyetizma

Elektrik ve manyetik olaylar, çoğu zaman doğrudan fark etmesek de, günlük yaşamımızın ayrılmaz bir parçasıdır. Aydınlatma sistemlerinden ev aletlerine, bilgisayarlardan telekomünikasyon araçlarına ve tıbbi cihazlara kadar pek çok modern teknolojik ürünün çalışması elektrik ve manyetik olaylara dayanır. Bu nedenle, bu olayların anlaşılması modern dünyayı kavramak açısından büyük önem taşır.

Elektrik ve manyetik olayları, ayrıca bu olaylar arasındaki ilişkiyi inceleyen fizik dalına elektromanyetizma denir. Bu bölümde elektrik yükü, elektrik ve manyetik alanlar, elektrik akımı ve bunların temel özellikleri ile bu kavramlar arasındaki etkileşimleri açıklayan temel fizik yasalarını öğreneceksiniz.

Bunun yanı sıra, elektrik akımı ile onun oluşturduğu etkiler ve elektriksel olaylarla manyetik olaylar arasındaki ilişki üzerinde özellikle durulacaktır. Elektromanyetizmanın incelenmesi, hem çevremizde gerçekleşen doğal olayları hem de teknolojik sistemlerin çalışma prensiplerini daha iyi anlamamızı sağlar. Ayrıca bu konu, fiziğin daha ileri düzey konularının öğrenilmesi için sağlam bir temel oluşturur.

Öğrenme Çıktıları

Bu bölümün sonunda öğrenci:

1. elektrikleşme olayını ve yüklü cisimlerin elektrik alan aracılığıyla birbirleriyle etkileşimini açıklayabilir.
2. karmaşık elektrik devrelerinde devre elemanlarını uygun şekilde bağlayabilir, bu devrelerde elektrik akımına ilişkin büyüklükleri belirleyebilir ve bu büyüklüklerin nasıl değiştirilebileceğini açıklayabilir.
3. metallerde, sıvılarda ve gazlarda elektrik akımının oluşumunu ve elektrik akımının neden olduğu etkileri açıklayabilir.
4. elektriksel ve manyetik olaylar arasındaki ilişkiyi ve bu olayların günlük yaşamdaki uygulamalarını açıklayabilir.
5. elektrik akımında iş ve güç kavramlarını ayırt edebilir ve bir evin elektrik enerjisi tüketimini hesaplayabilir.
6. elektrik ve manyetizma ile ilgili problemlerin çözümünde temel yasa ve bağıntıları uygulayabilir.

1.1. Cisimlerin elektriklenmesi

Plastik bir tarakla saçınızı taradığınızda, tarak saç tellerini çekmeye başlar. Benzer şekilde, şişirilmiş bir balon saça sürtüldüğünde saç tellerini kendine çeker (Şekil 1). Newton'un Üçüncü Yasası'na göre, balon saçı çektiği gibi saç da balonu aynı büyüklükte, ancak zıt yönde bir kuvvetle çeker. Bu olay, cisimlerin elektriklenmesi sonucunda meydana gelir.



Şekil 1. Balon ile saç arasındaki etkileşim.

Atomun yapısı

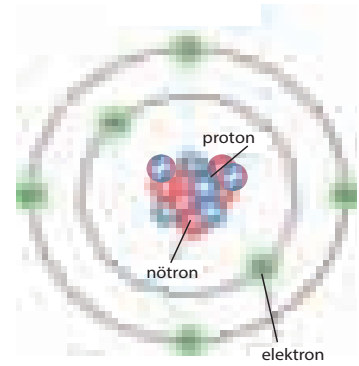
Elektriklenme olgusunun açıklanması, atomun yapısının anlaşılması-na dayanır. Her atom, bir çekirdek ve çekirdeğin etrafındaki elektronlardan oluşur (Şekil 2). Atom çekirdeği, protonlar ve nötronlardan oluşur. Protonlar pozitif yüklü, nötronlar ise yüksüz parçacıklardır.

Elektronlar, çekirdeğin çevresinde bulunan elektron bulutunda hareket eder. Elektronlar negatif elektrik yüküne sahiptir ve bir elektronun yükünün büyüklüğü, bir protonun yükünün büyüklüğüne eşittir; ancak işareti tersidir. Bir atomda proton sayısı elektron sayısına eşit olduğundan atom elektriksel olarak nötrdür. Elektriksel olarak nötr atomlardan oluşan cisimler de toplamda elektriksel olarak nötrdür.

Elektronun ve protonun yükü, doğadaki mümkün olan en küçük elektrik yüküdür ve buna elementer (temel) elektrik yükü denir. Bunun büyüklüğü $e = 1,602 \cdot 10^{-19}C$ 'dir. Herhangi bir elektrikle yüklenmiş cismin yükü, elementer elektrik yükünün tam sayı katı olarak elde edilir. Yani:

$$q = Ne.$$

Elektrik yükünün SI birimi **(Kulon) Coulomb'dur** ve **C** simgesiyle gösterilir. Anlaşmaya göre, negatif elektrik yükleri eksi işaretli sayılarla (örneğin, $q_1 = -2C$), pozitif elektrik yükleri ise artı işaretli sayılarla (örneğin, $q_2 = 3C$) gösterilir.



Şekil 2. Karbon atomu ($^{12}_6C$) çekirdeğinde altı proton ve altı nötron bulunur, ve elektron kabuğunda da altı elektron bulunur

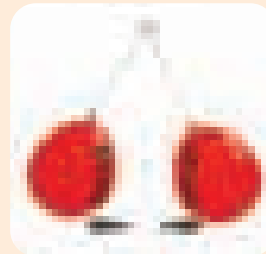
Yükler arasındaki etkileşim

Balon saça sürtüldüğünde, saçtan balona elektronlar aktarılır. Böylece balon fazla elektron kazanarak negatif yüklü hâle gelirken, saç elektron kaybederek pozitif yüklü hâle gelir. Elektriksel olarak nötr bir cismin yüklü hâle gelmesi olayına **elektriklenme** denir.



ETKİNLİK 1.

İki küçük balonu iplere bağlayın. Balonları birbirine sürterek elektrikleştirin ve birbirine yakın olacak şekilde asın. Balonlar birbirini çekiyor mu, yoksa itiyor mu? Şekil 3'ü inceleyin ve bu gözlemden bir sonuç çıkarın.



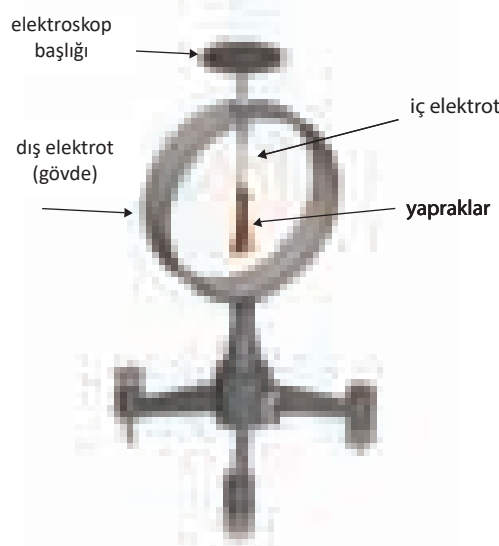
Şekil 3. Saça sürtülen iki balon birbirini iter.

Etkinlik 1'deki iki balon, saça sürtüldüğünde elektron kazanan aynı malzemeden yapılmıştır. Bu nedenle elektriklendiklerinde her iki balon da fazla elektrona sahip olur ve negatif yüklü hâle gelir. Aynı durum saç telleri için de geçerlidir; ancak saç telleri negatif değil, pozitif yüklü olur. Bunun nedeni, saçtaki elektronların bir kısmının balona geçmesi ve saçta elektron eksikliği oluşmasıdır. Şekil 1'de, Şekil 3'teki balonlarda olduğu gibi saç tellerinin birbirlerini ittiği görülmektedir. Ayrıca, Şekil 1'de saç ile balonun birbirini çektiği de gözlemlenmektedir. Bu örneklerden, aynı cins elektrik yüküne sahip cisimlerin birbirlerini ittiği, zıt cins elektrik yüküne sahip cisimlerin ise birbirlerini çektiği sonucuna varılır.

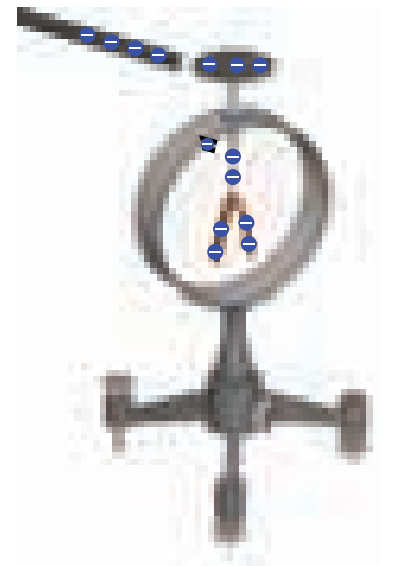
Sürtünmeyle elektriklenme

İki cisim birbirine sürtüldüğünde, elektronların bir kısmı bir cisimden diğerine geçer. Elektron veren cisim pozitif, elektron alan cisim ise negatif yüklü hâle gelir. Balonun yapıldığı kauçuk elektronlarını kolay kolay vermez. Buna karşılık, saçın temel yapısını oluşturan keratindeki elektronlar atomlara daha zayıf bağlandığından, sürtünme sırasında kolayca balona geçebilir. Yünlü bir bezle ovulan cam çubuk pozitif yüklü hâle gelirken, yünlü bir bezle ovulan plastik çubuk negatif yüklü hâle gelir. Cisimlerin bu şekilde yüklenmesine **sürtünmeyle elektriklenme** denir.

Bir cismin elektrik yüklü olup olmadığı, elektroskop adı verilen bir araçla belirlenebilir (Şekil 4). Elektroskop iki elektrottan oluşur. Bunlardan biri, cam pencerelerle çevrili dış metal kutu, diğeri ise alt ucunda iki ince metal yaprak bulunan iç elektrottur. Dış metal kutu yalıtılmış bir ayak üzerine monte edilmiştir. İç elektrot, dış metal kutudan yalıtılmıştır ve üst ucunda elektroskopun başlığını oluşturan metal bir plaka veya metal bir küre bulunur.



Şekil 4. Elektroskop



Şekil 5. Dokunma ile Elektriklenen Elektroskop

Dokunma ile elektriklenme



ETKİNLİK 2.

Negatif yüklü bir çubuğu (yünlü bir bezle ovulmuş plastik bir çubuk) yüksüz bir elektroskopun başlığına dokundurun. Elektroskopun yapraklarında nasıl bir değişiklik gözlemlenir?

Elektroskopun yapraklarının birbirinden uzaklaştığını gözlemleyebilirsiniz (Şekil 5). Temas sırasında çubuktaki elektronlar elektroskopun başlığına geçer. İç elektrot ve yapraklar iletken malzemeden yapıldığı için elektronlar iç elektrotta ve yapraklara yayılır. Yapraklar aynı cins elektrik yüküyle yüklendiğinden birbirlerini iter ve birbirinden uzaklaşır. Böylece, negatif yüklü bir çubuk elektroskoba dokundurulduğunda, elektroskop da negatif yükü yüklenir.

Temasla elektriklenme, nötr bir cismin elektrik yüklü başka bir cisimle doğrudan temas etmesi sonucunda elektrik yükü kazanması olayıdır.

Pozitif yüklü bir çubuğun (yünlü bir bezle ovulmuş cam çubuk) yüksüz bir elektroskobu temas yoluyla nasıl yüklediğini açıklayın. Bu işlem sonucunda elektroskop hangi cins elektrik yüküyle yüklenir?

Etki ile (indüksiyonla) elektriklenme

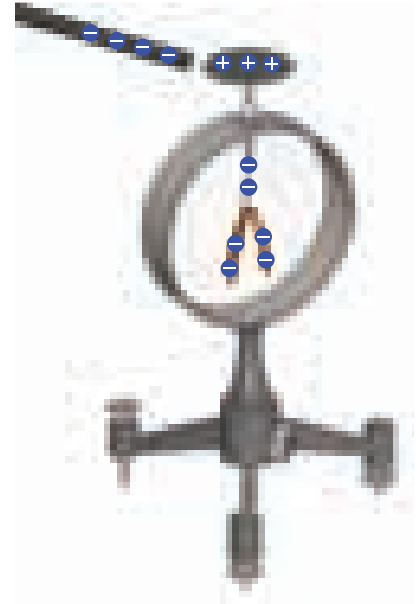


ETKİNLİK 3.

Negatif yüklü bir çubuğu (yünlü bir bezle ovulmuş plastik bir çubuk) yüksüz bir elektroskobun başlığına dokundurmadan yaklaştırın. Ne gözlemliyorsunuz?

Gözlemlenen bu olay, yüklü çubuğun etkisiyle elektroskop içindeki elektrik yüklerinin yeniden dağılımı ile açıklanabilir. Elektroskopun başlığı iletken bir malzemeden yapıldığı için elektronlar serbestçe hareket edebilir. Negatif yüklü çubuktaki elektronların oluşturduğu itme kuvveti nedeniyle elektroskoptaki serbest elektronlar, çubuktan olabildiğince uzağa, yani yapraklara doğru hareket eder. Böylece yapraklarda elektron fazlalığı oluşur ve yapraklar negatif yüklenir. Buna karşılık, çubuğa daha yakın olan elektroskopun başlığında elektron eksikliği meydana gelir ve başlık pozitif yüklü hâle gelir (Şekil 6). Bu olayda cisimler arasında fiziksel temas olmamasına rağmen, elektroskop içindeki **elektrik yükleri yeniden dağılıma uğrar**.

Çubuğu uzaklaştırdığımızda, elektroskopun yapraklarının başlangıç konumuna geri döndüğü görülür. Bu durum, söz konusu elektriklenmenin kalıcı olmadığını gösterir. Çubuk elektroskopun başlığına yakinken başlığa parmağımızla dokunursak, serbest elektronlar parmağımız üzerinden toprağa geçer. Böylece elektronlar, negatif yüklü çubuktan olabildiğince uzaklaşmış olur. Önce parmağımızı çekip ardından çubuğu uzaklaştırırsak, elektroskop pozitif yüklü kalır. Bu yüklenme yöntemine etki ile elektriklenme (indüksiyonla elektriklenme) denir.



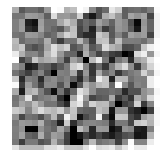
Şekil 6. Etki ile elektriklenme (indüksiyonla elektriklenme)



ETKİNLİK 4.

Aşağıdaki bağlantıdan "Elektroskop - JavaLab" simülasyonunu açın: https://javalab.org/en/electroscope_en/

Yüklü çubuğu elektroskopun başlığına dokundurmadan yaklaştırın. Çubuk elektroskopun yakınındayken elinizle elektroskoba dokununuz. Ne gözlemliyorsunuz? Aynı işlemi pozitif yüklü bir çubukla da tekrarlayın.



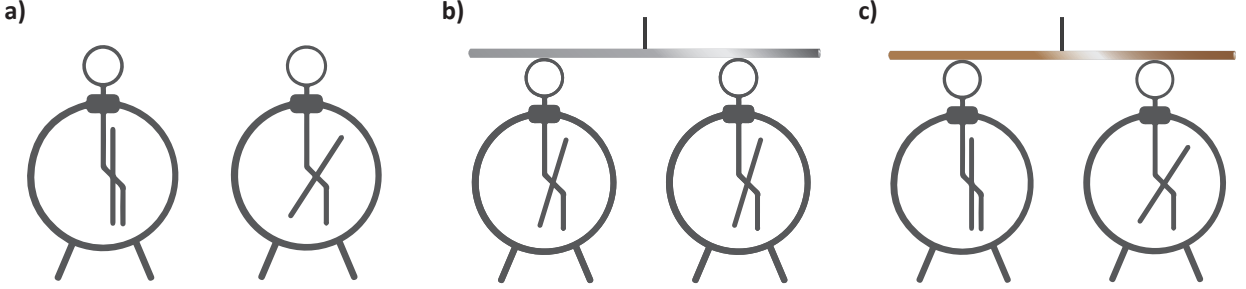
İletkenler ve Yalıtkanlar



ETKİNLİK 5.

İki elektroskopa da aynı metal küreler takılmıştır. Elektroskoplardan biri, önceden yünlü bir bezle ovulmuş cam çubukla dokundurulmuş elektriklendirilirken, diğeri elektriksel olarak nötr kalır (Şekil 7a).

Daha sonra iki elektroskop, yalıtkan saplı bir metal çubukla birbirine bağlanır. Bağlantı kurulduktan sonra, başlangıçta nötr olan elektroskopun da yüklendiği gözlemlenir (Şekil 7b). Aynı deney metal çubuk yerine tahta bir çubuk kullanılarak tekrarlandığında ise başlangıçta nötr olan elektroskopun yapraklarının açılmadığı görülür (Şekil 7c)..



Şekil 7. a) Metal çubukla bağlanmadan önce yüksüz ve yüklü elektroskop
b) Elektroskoplar bir iletkenle birbirine bağlanmıştır. c) Elektroskoplar bir yalıtkanla birbirine bağlanmıştır.

Metal çubuk, elektronların bir cisimden diğerine geçmesine izin verdiği için iletken olarak adlandırılır. İletkenler, elektrik yüklerinin serbestçe hareket edebildiği maddelerdir. Bu gruba, yük taşıyıcıları serbest elektronlar olan metaller ile yük taşıyıcıları pozitif ve negatif iyonlar olan tuz, asit ve baz çözeltileri, yani elektrolitler dahildir. Gazlar da belirli koşullar altında iletken olabilir. Bu durum, gazın iyonlaşması sonucunda serbest elektronlar ve pozitif iyonların oluşmasıyla gerçekleşir.

Metal çubuğun aksine, tahta çubuk elektronların bir elektroskoptan diğerine geçmesine izin vermez. Elektrik yüklerinin serbest hareketinin mümkün olmadığı veya çok sınırlı olduğu maddelere yalıtkan ya da dielektrik denir. Ahşap, plastik, cam, hava ve saf su yalıtkan maddelere örnek olarak verilebilir.

Ancak bu ayrım kesin değildir. Belirli koşullar altında yalıtkanlar da iletken hâle gelebilir. Örneğin, bir cam çubuk çok yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında elektrik iletkenliği gösterebilir.

Metallerde yük dağılımı

Metalik bir iletkende yük nasıl dağılır?



ETKİNLİK 6.

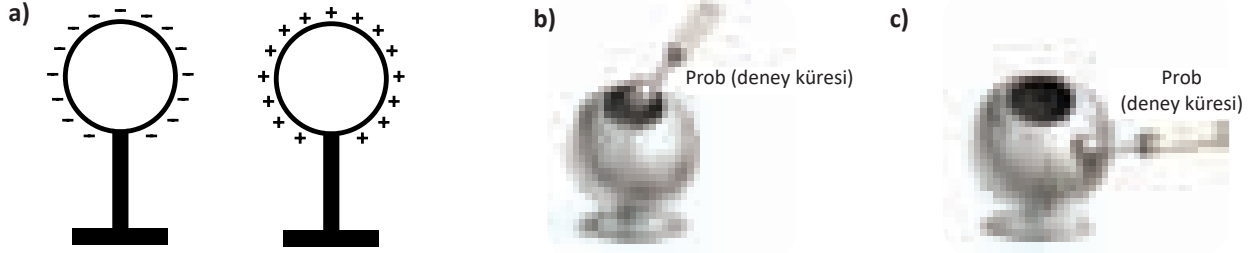
Yalıtkan bir ayak üzerine monte edilmiş, içine probun sokulabileceği büyüklükte bir açıklığa sahip metal bir küreyi elektrikleştirin. **Prob**, yalıtkan bir çubuğa tutturulmuş küçük bir metal küreden oluşur. Önce probu, içi boş metal kürenin iç yüzeyine dokundurun, ardından probu elektroskopun başlığına dokundurun. Daha sonra aynı işlemi, probu metal kürenin dış yüzeyine dokundurarak tekrarlayın ve yeniden elektroskopun başlığına dokundurun.

Prob önce içi boş metal iletkenin iç yüzeyine, ardından elektroskopun başlığına dokundurulduğunda elektroskopun yaprakları açılmaz. Bu durum, iletkenin iç yüzeyinde elektrik yükü bulunmadığını gösterir.

2 İyonlar, elektron kaybederek veya kazanarak elektrik yükü taşıyıcısı haline gelmiş atomlar veya moleküllerdir.

3 Nötr atomlardan veya moleküllerden elektronların koparak ayrılması olayına iyonlaşma denir.

Ancak prob metal kürenin dış yüzeyine dokundurulup daha sonra elektroskobun başlığına dokundurulduğunda yapraklar açılır. Bu gözlem, iletken bir cismin elektrik yükünün yalnızca dış yüzeyinde dağıldığını gösterir.



Şekil 8. a) Elektrik yüklü metal küre. Metal bir iletken olduğundan, elektrik yükü yalnızca dış yüzeyinde dağılmıştır. b) Kürenin iç yüzeyi prob ile inceleniyor ve c) Kürenin dış yüzeyi prob ile inceleniyor.



ETKİNLİK 7.

Şimdi elektrik yükünün metal bir iletken üzerinde nasıl dağıldığını inceleyelim. Bir ucu sivri olan metal bir cismi elektrikleştirin. Probu önce cismin düz veya daha az sivri olan kısmına, ardından elektroskobun başlığına dokundurun. Daha sonra elektroskopyu ve probu yüksüz hâle getirin. Deneyi aynı cismi yeniden elektrikleştirerek tekrarlayın. Bu kez probu iletkenin sivri ucuna, ardından elektroskobun başlığına dokundurun. Ne gözlemliyorsunuz?

Bu etkinliğin sonuçları, elektrik yükünün metal iletkenin yüzeyi üzerindeki dağılımıyla açıklanabilir. Prob cismin düz veya daha az sivri kısmına dokundurulduğunda elektroskobun yaprakları az açılır. Aynı prob iletkenin sivri ucuna dokundurulduğunda ise yaprakların daha fazla açıldığı görülür. Bu gözlem, elektrik yükünün iletkenlerin sivri uçlarında daha yoğun bir şekilde toplandığını gösterir (Şekil 9).

Elektrik Yükünün Korunumu Yasası

Bir balon saça sürtüldüğünde, saçtaki elektronlar balona geçer. Bu süreçte balon negatif, saç ise pozitif yüklü hâle gelir. Ancak balon-saç sisteminin toplam elektrik yükü değişmez. Elektrik yükleri bir cisimden diğerine aktarıldığında veya bir cisim içinde yeniden dağıldığında, sistemin toplam elektrik yükü korunur; yani sabit kalır. Bu ilke, doğanın temel yasalarından biri olan Elektrik Yükünün Korunumu Yasası olarak adlandırılır.

Bu yasaya göre, yalıtılmış bir sistemde toplam elektrik yükü sabit kalır. Başka bir deyişle, elektrik yükü yoktan var edilemez ve var olan yük yok edilemez; yalnızca bir cisimden diğerine aktarılabilir. Bu nedenle, sistemdeki elektrik yüklerinin cebirsel toplamı her zaman sabit kalır. Bu yasa matematiksel olarak aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{sabit.}$$

Burada q , sistemin toplam elektrik yükünü; $q_1, q_2, \dots, q_n$ ise yalıtılmış sistemdeki cisimlerin elektrik yüklerini gösterir.

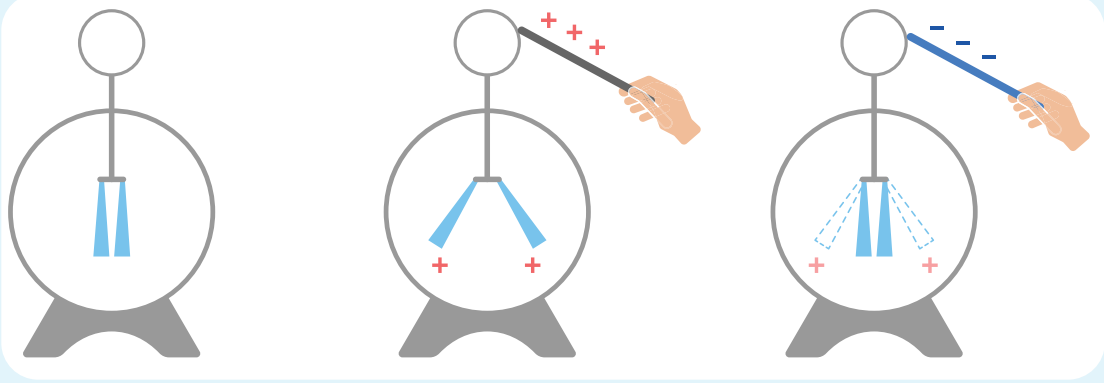


Şekil 9. Sivri uçlu bir iletkendeki yük dağılımı

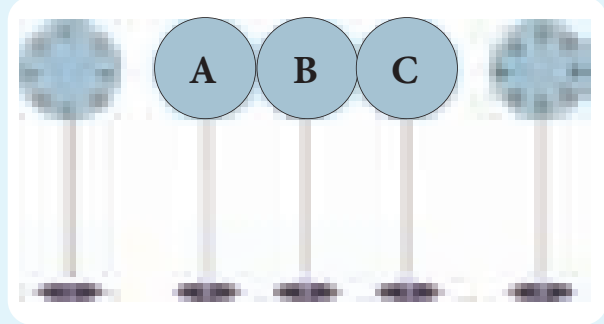


SORULAR VE ÖDEVLER

1. Yerçekimi kuvveti ile elektrostatik kuvvet arasındaki farkları açıklayınız. Yerçekimi kuvveti ile elektrostatik kuvvet aynı anda aynı cisim üzerinde etkili olabilir mi?
2. Cisimlerin elektriklenme yöntemlerini açıklayınız.
3. Elektroskopun çalışma prensibi hangi özelliğe dayanır?
4. Elinizde tuttuğunuz metal bir küreyi sürtünerek elektriklendirebilir misiniz? Cevabınızı açıklayınız.
5. Bulutların nasıl elektriklendiğini açıklayınız.
6. Aşağıdaki şekilde gösterilen işlemi açıklayınız. Sağdaki şekilde, yalıtkan ayaklar üzerine yerleştiril-



miş özdeş metal küreler gösterilmektedir. **A**, **B** ve **C** küreleri yüksüzdür ve birbirleriyle temas hâlinindedir. Bu kürelere, her iki taraftan simetrik olarak aynı büyüklükte ancak zıt işaretli elektrik yüküne sahip iki yüklü metal küre yaklaştırılmaktadır. **A**, **B** ve **C** küreleri elektriklenir mi, yoksa elektriksel olarak nötr mü kalır? Elektrikleneceklerini düşünüyorsanız, her bir kürenin hangi cins elektrik yüküyle yükleneceğini açıklayınız.



1.2. Coulomb(Kulon) Yasası

Yerçekimi kuvveti bizi Dünya'ya bağlar. Peki, atomda elektronları çekirdeğin etrafında tutan kuvvet nedir? Bu, elektrik yükleri arasındaki elektrostatik kuvvettir. Elektrostatik kuvvet, protonlar ile elektronlar arasındaki kütle çekim kuvvetinden çok daha büyüktür ve atomların kararlı yapısını sağlar.

Elektrik yüklü cisimler arasındaki etkileşimin büyüklüğü uzun yıllar yalnızca nitel olarak açıklanabilmiştir. Bu konuda ilk sistematik ve deneysel çalışmaları Fransız fizikçi Charles Coulomb gerçekleştirmiştir. Coulomb, noktasal elektrik yükleri arasındaki etkileşimi açıklayan elektrostatikğin temel yasasını ortaya koymuştur. Günümüzde bu yasa Coulomb(Kulon) Yasası olarak bilinmektedir. Coulomb, iki küçük iletken küre arasındaki elektrostatik kuvveti ölçmek için Şekil 1'de gösterilen burulma terazisini kullanmıştır. Kürelerden ikisi, ince, esnek ve burulabilen bir tele bağlı hafif bir yatay çubuğun uçlarına yerleştirilmiştir. Üçüncü bir yüklü küre ise bu kürelerden birine yaklaştırılmış veya uzaklaştırılmıştır. Aynı cins elektrik yüküne sahip küreler birbirini iterken, zıt cins elektrik yüküne sahip küreler birbirini çeker. Bu etkileşim sonucunda

yatay çubuk dönmüş, Coulomb da dönme açısını ölçerek elektrostatik kuvvetin büyüklüğünü hesaplamıştır. Yaptığı deneyler sonucunda elektrostatik kuvvetin büyüklüğünün, cisimlerin elektrik yüklerine ve aralarındaki uzaklığa bağlı olduğunu belirlemiştir.

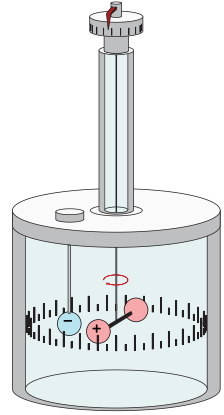
Sonuçlar, elektrostatik kuvvetin büyüklüğünün yüklerin çarpımıyla doğru, $(F \sim q_1 \cdot q_2)$ aralarındaki uzaklığın karesiyle ise ters orantılı olduğunu göstermektedir $\left(F \sim \frac{1}{r^2}\right)$. Bu orantı, günümüzde **Coulomb(Kulon) Yasası** olarak bilinen matematiksel ifadeyle gösterilmektedir. Bu kuvvet; yüklerin büyüklükleriyle doğru, aralarındaki uzaklığın karesiyle ise ters orantılıdır. Matematiksel olarak aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}.$$

Orantı sabiti k , vakumda (yaklaşık olarak havada) aralarında 1 m uzaklık bulunan ve her biri 1 C elektrik yüküne sahip iki noktasal yük arasındaki elektrostatik kuvvetin büyüklüğüne sayısal olarak eşittir. Değeri $k = 9 \cdot 10^9 \text{ (N} \cdot \text{m}^2) / \text{C}^2$. Coulomb Yasası genellikle şu şekilde yazılır:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2},$$

burada ϵ_0 vakum (havasız) ortamda dielektrik sabiti olarak adlandırılan değerdir. Değeri ise $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ dir. Yukarıda verilen bağıntılara göre **Coulomb Yasası** şu şekilde ifade edilir: İki noktasal elektrik yükü arasındaki elektrostatik kuvvetin büyüklüğü, yüklerin büyüklüklerinin çarpımıyla doğru, aralarındaki uzaklığın karesiyle ise ters orantılıdır.



Şekil 1. Coulomb'un elektrostatik kuvvetleri incelemek için kullandığı burulma terazisi. Noktasal Elektrik Yükleri Arasındaki Etkileşim



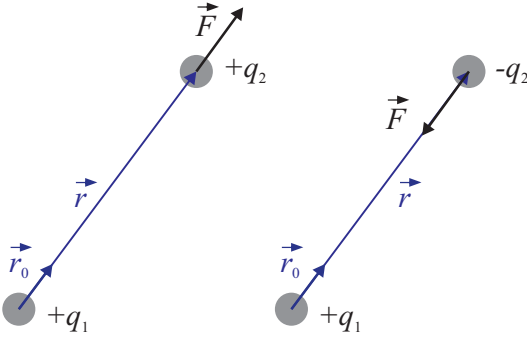
ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Helyum çekirdeği (α parçacığı) $+2e$ yüküne sahiptir. Burada $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. İki α parçacığı vakumda birbirinden $2,0 \cdot 10^{-14}$ uzaklıkta bulunmaktadır. Bu ikie α parçacığının birbirine uyguladığı Coulomb kuvvetinin büyüklüğünü hesaplayınız.

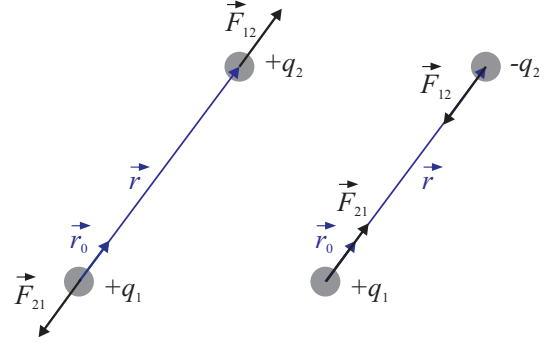
Verilenler: $q_1 = q_2 = q$ $q = +2e = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ $r = 2,0 \cdot 10^{-14} \text{ m}$ $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$	Çözüm: İki helyum çekirdeği arasında etki eden Coulomb kuvveti şüformül kullanılarak hesaplanabilir: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ Her iki çekirdeğin yükü aynı olduğundan, formül şu şekilde yazılabilir: $F = k \frac{q^2}{r^2}$ Coulomb kuvveti bağıntısında verilen sayısal değerler yerine yazıldığında, kuvvetin büyüklüğü aşağıdaki gibi bulunur: $F = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \frac{(3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(2,0 \cdot 10^{-14} \text{ m})^2} = 2,3 \text{ N}.$
İstenen: $F - ?$	

Coulomb kuvveti vektörel bir büyüklüktür; yani büyüklüğü, doğrultusu ve yönü vardır. q_2 yüküne etki eden Coulomb kuvvetinin doğrultusu, q_1 ve q_2 yüklerini birleştiren doğru üzerindedir. Kuvvetin yönü ise yüklerin işaretine bağlıdır. Yükler aynı işaretli ise birbirlerini iter, zıt işaretli ise birbirlerini çeker (Şekil 2).

Newton'un Üçüncü Yasası'na göre, q_2 yüküne de büyüklüğü eşit, yönü zıt bir Coulomb kuvveti etki eder.



Şekil 2. q_2 yüküne etki eden Coulomb kuvvetinin yönü, yüklerin işaretine bağlıdır.



Şekil 3. Aynı yükler birbirlerini iterken, zıt yükler birbirlerini çeker.

Bu nedenle, iki yükün birbirine uyguladığı kuvvetler aynı doğrultuda, zıt yönde ve eşit büyüklüktedir (Şekil 3).

Vektörel biçimde Coulomb Yasası şu şekilde yazılır:

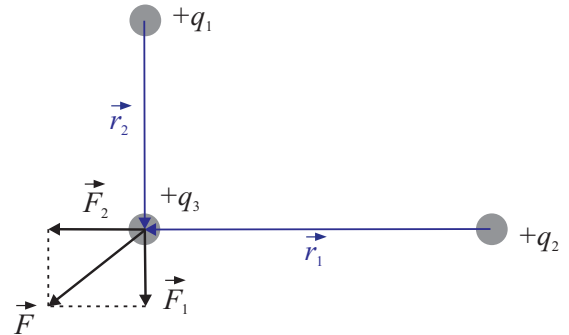
$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \vec{r}_0$$

Burada r_0 , r yarıçap vektörü ile aynı doğrultu ve yönde olan birim vektördür.

İki veyâ daha fazla elektrik yükünün başka bir yüke etki ettiği durumlarda, kuvvetlerin süperpozisyon ilkesi uygulanır. Bu ilkeye göre, bir yüke etki eden toplam Coulomb kuvveti, diğer yüklerin her birinin o yüke uyguladığı Coulomb kuvvetlerinin **vektörel toplamına** eşittir; yani:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

Şekil 4'te q_1 ve q_2 yüklerinin q_3 yükü üzerindeki etkisi gösterilmektedir. q_3 yüküne etki eden bileşke kuvvet, bu iki Coulomb kuvvetinin vektörel toplamına eşittir.



Şekil 4. q_1 ve q_2 yükleri, q_3 yüküne etki etmektedir. q_3 yüküne etki eden bileşke kuvvet, $\vec{F}_1$ ve $\vec{F}_2$ kuvvetlerinin vektörel toplamıdır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Elektrik yükleri sırasıyla $6 \mu\text{C}$ ve $24 \mu\text{C}$ olan iki noktasal yük, birbirinden 10 cm uzaklıkta sabitlenmiştir. Üzerine etki eden bileşke kuvvetin sıfır olması için, üçüncü yük q_3 bu iki yük arasındaki hangi noktaya yerleştirilmelidir? q_3 yükünün yerleştirileceği nokta, q_3 yükünün büyüklüğüne ve işaretine bağlı mıdır?

Verilenler:

$$q_1 = 6 \mu\text{C} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ C}, \quad q_2 = 24 \mu\text{C} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ C}, \quad r = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}, \quad F_R = 0$$

İstenen:

$x - ?$

Çözüm:

q_1 ve q_2 yüklerinin q_3 yüküne uyguladığı kuvvetlerin yönlerini belirlemek için önce q_3 yükünün pozitif olduğunu varsayalım. Bu durumda q_1 ile q_3 arasındaki ve q_2 ile q_3 arasındaki Coulomb kuvvetleri itici olacağından, bu kuvvetlerin yönleri birbirine zıt olacaktır. Problemin çözümünde şekilden yararlanacağız.

Soruda verilen koşula göre, üçüncü yük üzerine etki eden bileşke kuvvet sıfır olmalıdır. Bu durumda,

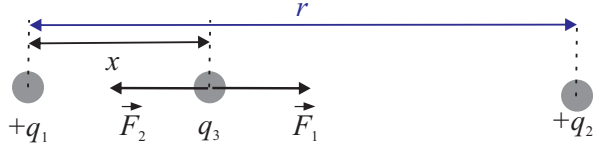
$$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2|$$

$$k \frac{q_1 q_3}{x^2} = k \frac{q_2 q_3}{(r-x)^2} \Rightarrow \frac{q_1}{x^2} = \frac{q_2}{(r-x)^2}$$

Son bağıntı bilinmeyen uzaklık için çözüldüğünde aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$\frac{(r-x)^2}{x^2} = \frac{q_2}{q_1} \Rightarrow \frac{r-x}{x} = \sqrt{\frac{q_2}{q_1}} \Rightarrow \frac{r-x}{x} = \sqrt{\frac{q_2}{q_1}} \Rightarrow x = r \cdot \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}} = 3,3 \text{ cm}$$

Bu sonuçtan, q_3 yükünün yerleştirileceği noktanın q_3 yükünün büyüklüğüne ve işaretine bağlı olmadığı görülmektedir. q_3 yükü negatif kabul edilerek çözüm yapıldığında da aynı sonuç elde edilir.

**ETKİNLİK 1.**

Coulomb kuvvetinin yüklerin büyüklüğüne ve aralarındaki mesafeye bağlılığı

Bölüm I. Coulomb kuvvetinin yükler arasındaki mesafeye bağlılığı

Adımlar:

1. "[Coulomb Yasası - Elektrostatik | Elektrik Kuvvetleri | Kuvvet Çiftleri](https://phet.colorado.edu/mk/simulations/coulombs-law)"

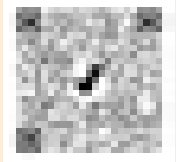
simülasyonunu başlatın - [PhET Etkileşimli Simülasyonlar \(https://phet.colorado.edu/mk/simulations/coulombs-law\)](https://phet.colorado.edu/mk/simulations/coulombs-law)

Not: Cetvel uzunluğunun santimetre cinsinden ifade edildiği (Macro Scale) seçeneğini seçin. Cetveli kullanarak şunları yapacaksınız 1 ve 2 numaralı yüklerin merkezleri arasındaki uzaklığı ölçünüz. Ölçtüğünüz değerleri SI birim sistemine dönüştürünüz (uzaklığı metre, elektrik yükünü ise coulomb cinsinden ifade ediniz).

2. İki cismin elektrik yükleri için istediğiniz değerleri belirleyiniz. Bu değerler belirlendikten sonra, sonraki ölçümler boyunca cisimlerin elektrik yüklerini değiştirmeyiniz.

3. Yükleri birbirinden sekiz farklı uzaklığa yerleştiriniz ve aşağıdaki tabloyu doldurunuz.

4. Coulomb kuvvetinin yükler arasındaki mesafeye nasıl bağlı olduğunu gösteren bir grafik çizin.



N	r (cm)	r (m)	F (N)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

II Bölüm. Coulomb kuvvetinin birinci cismin yüküne bağlılığı

1. İkinci cismin elektrik yükü ile iki cisim arasındaki uzaklığı istediğiniz gibi belirleyiniz. Bu değerler belirlendikten sonra, sonraki beş ölçüm boyunca değiştirmeyiniz.

2. Birinci cismin elektrik yükünü beş farklı değer için değiştiriniz ve aşağıdaki tabloyu doldurunuz.

3. Coulomb kuvvetinin büyüklüğünün birinci yükün elektrik yüküne bağlılığını gösteren bir grafik çizin.

N	q_1 (C)	F (N)
1		
2		
3		
4		
5		

III Bölüm. Coulomb kuvvetinin ikinci cismin yüküne bağlılığı

4. Birinci cismin elektrik yükü için istediğiniz bir değeri belirleyiniz. İki cisim arasındaki uzaklığı ise Bölüm II'deki değerle aynı tutunuz. Bu değerler belirlendikten sonra, sonraki ölçümler boyunca değiştirmeyiniz.

5. İkinci cismin elektrik yükünü beş farklı değer için değiştiriniz ve aşağıdaki tabloyu doldurunuz.

6. Coulomb kuvvetinin büyüklüğünün ikinci cismin elektrik yüküne bağlılığını gösteren bir grafik çizin.

Son olarak, Coulomb kuvvetinin iki yükün büyüklüklerine ve aralarındaki uzaklığa nasıl bağlı olduğunu yazınız.

N	q_2 (C)	F (N)
1		
2		
3		
4		
5		



DAHA FAZLA ÖĞREN

İki elektrik yükü vakumda bulunduğunda, aralarındaki Coulomb kuvveti yukarıda verilen bağıntıyla hesaplanır. Ancak yükler hava, yağ, su veya plastik gibi bir maddesel ortamda bulunuyorsa, aralarındaki Coulomb kuvvetinin büyüklüğü azalır. Bu azalma, ortamın **bağıl dielektrik sabiti (bağıl geçirgenliği)** ϵ_r ile ifade edilir. ϵ_r , ortamın iki noktasal yük arasındaki Coulomb kuvvetini, vakumdaki değerine göre kaç kat azalttığını gösterir. Buna göre, homojen ve izotrop bir ortam için **Coulomb Yasası** aşağıdaki şekilde yazılır:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

burada $F_{\text{середина}} = \frac{F_{\text{вакуум}}}{\epsilon_r}$. Vakum için bağıl dielektrik sabiti 1'dir.

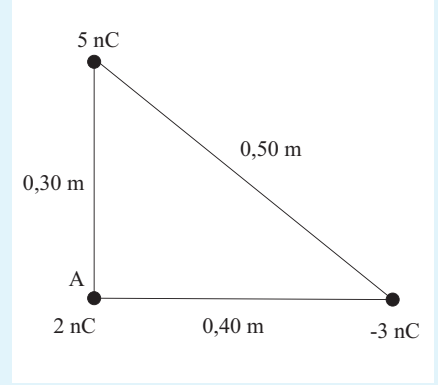
Bağıl dielektrik sabiti (bağıl geçirgenlik) ϵ_r , maddesel ortamlar için 1'den büyüktür. Örneğin, havanın bağıl dielektrik sabiti 1,0006, alkolünki yaklaşık 25, suyunki ise 80'dir. Havanın bağıl dielektrik sabiti vakumunkine çok yakın olduğundan, çoğu durumda havadaki Coulomb kuvvetinin büyüklüğü vakumdakiyle aynı kabul edilir.



SORULAR VE ÖDEVLER

- İki pozitif noktasal elektrik yükü, birbirini 0,8 N büyüklüğünde bir kuvvetle itmektedir. Her iki yükün büyüklüğü iki katına çıkarılırsa, aralarındaki Coulomb kuvveti kaç newton olur? (Çözüm: 3,2 N)
- Vakumda birbirinden 48 cm uzaklıkta bulunan, büyüklükleri eşit ve işaretleri zıt iki noktasal elektrik yükü, 10^{-3} N büyüklüğünde bir Coulomb kuvvetiyle birbirini çekmektedir. Her bir yük kaç temel elektrik yükü içerir? (Çözüm: $1 \cdot 10^{12}$)

3. Büyüklükleri 10^{-6} C ve $-2 \cdot 10^{-6}$ C olan iki noktasal elektrik yükü, vakumda birbirinden 0,20 m uzaklıkta bulunmaktadır. Bu iki yükün arasına $5 \cdot 10^{-8}$ C. üyüklüğünde üçüncü bir noktasal yük yerleştirilmiştir. Bu yüke etki eden bileşke Coulomb kuvvetini bulunuz. (Çözüm: $F = 0,135$ N)
4. 10 nC ve -4 nC yüklerine sahip iki özdeş küre birbirine değdirdikten sonra, küreler tekrar başlangıçtaki uzaklıklarına yerleştiriliyor. Küreler arasındaki Coulomb kuvvetinin büyüklüğü, değiştirilmeden önceki duruma göre kaç kat değişir? (Çözüm: $\frac{F_2}{F_1} = 0,225$)
5. Bir dik üçgenin köşelerine üç farklı noktasal elektrik yükü yerleştirilmiştir. A köşesindeki yüke etki eden Coulomb kuvvetini hesaplayınız. (Çözüm: $1,06 \cdot 10^{-6}$ N)



1.3. Elektrik alanı

Uzaydaki belirli bir noktada bulunan bir elektrik yüküne etki eden kuvvetin çekici mi yoksa itici mi olacağını nasıl belirleyebiliriz? Başka bir deyişle, belirli bir uzaklıkta bulunan elektrik yükleri arasındaki etkileşim nasıl gerçekleşir? Bu soruları yanıtlamak için Dünya'nın yerçekimi alanını örnek olarak ele alabiliriz. Yerçekimi alanının varlığına ilişkin dolaylı kanıtlardan biri, cisimlerin serbest düşmesidir. Dünya'nın yerçekimi alanı içinde bulunan her cisim, yerçekimi kuvvetinin etkisiyle Dünya'ya doğru hareket eder. Benzer şekilde, her elektrik yükünün de çevresinde bir elektrik alanı oluşturduğu ve bu alan aracılığıyla diğer elektrik yüklerini çektiği veya ittiği sonucuna varabiliriz.

Elektrik alanını duyumamızla doğrudan algılayamayız¹. Ancak, bu alanın başka bir elektrik yükü üzerindeki etkisini gözlemleyerek varlığını dolaylı olarak belirleyebiliriz. Tıpkı kütlenin yerçekimi alanını oluşturmaması gibi, elektrik yükü de elektrik alanını oluşturur. Bu nedenle, her yüklü cismin çevresinde, diğer elektrik yükleriyle etkileşimin gerçekleştiği bir elektrik alanı bulunduğunu söyleriz.

Yüklü bir cismin çevresindeki uzayda, diğer yüklü cisimlere elektrik kuvveti uygulayan bir elektrik alanı vardır. Elektrik alanı sayesinde yüklü cisimler birbirleriyle doğrudan temas etmeden etkileşebilir. Başka bir deyişle, elektriksel etkileşim temassız bir etkileşimdir.

Elektrik Alanının Şiddeti

Uzaydaki belirli bir noktadaki elektrik alanını incelemek için **test yükü** (q_p), kavramı tanımlanır. Test yükü, **geleneksel olarak pozitif işaretli** ve elektrik yükü çok küçük olan bir yüküdür. Yükünün çok küçük seçilmesinin nedeni, oluşturduğu elektrik alanının incelenen elektrik alanını ihmal edilebilecek kadar az etkilemesidir. Test yüküne bir elektrik kuvveti etki ediyorsa, bulunduğu noktada bir elektrik alanı vardır. Test yüküne hiçbir kuvvet etki etmiyorsa, o noktadaki elektrik alanı sıfırdır. Test yüküne etki eden elektrik kuvvetinin büyüklüğü arttıkça, elektrik alanının şiddeti de artar.

Elektrik alan şiddeti, uzaydaki bir noktaya yerleştirilen birim pozitif test yüküne etki eden elektrik kuvvetine eşit olan fiziksel büyüklüktür. Bu tanıma göre, elektrik alan şiddeti aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$E = \frac{F}{q_p}$$

¹ Bazı hayvanlar elektrik alanını algılayabilir. Bunlara köpekbaklıkları, vatozlar, elektrikli yılan balıkları ve yunuslar örnek olarak verilebilir.

Yukarıda verilen bağıntıdan, elektrik alan şiddetinin SI biriminin **newton/coulomb (N/C)** olduğu görülmektedir.

Kuvvet vektörel bir büyüklük olduğundan, elektrik alan şiddeti de vektörel bir büyüklüktür. Bu nedenle, elektrik alan şiddeti vektörel biçimde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_p}$$

Denklemden, belirli bir noktadaki elektrik alanının **doğrultu ve yönünün**, o noktaya yerleştirilen **pozitif test yüküne** etki eden kuvvetin doğrultu ve yönüyle aynı olduğu görülür. Elektrik alanı, test yükü üzerine uyguladığı kuvvet aracılığıyla tanımlandığından, elektrik alan şiddeti alanın **kuvvet etkisini** gösteren bir büyüklüktür.

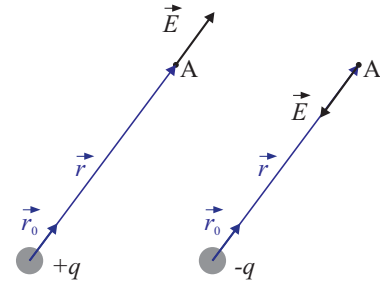
Önceki bölümde, noktasal elektrik yükleri arasındaki etkileşimi **Coulomb kuvveti** ile açıklamıştık. Alanı oluşturan q yükü ile elektrik alanını incelemek için kullanılan q_p test yükü arasındaki etkileşim için **Coulomb Yasası** şu şekilde yazılır:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_p}{r^2} \vec{r}_0$$

Burada r , yükler arasındaki uzaklıktır. Coulomb kuvveti bağıntısı, elektrik alan şiddeti için verilen önceki bağıntıda yerine yazıldığında aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{r}_0$$

Son bağıntıdan, belirli bir noktada pozitif bir yükün, elektrik alanını $\vec{r}_0$ birim vektörü yönünde oluşturduğu; negatif bir yükün ise elektrik alanını $\vec{r}_0$ birim vektörüne zıt yönde oluşturduğu görülmektedir. Şekil 1'de, A noktasında bulunan q yükünün pozitif ve negatif olması durumlarında oluşturduğu elektrik alanının yönü gösterilmektedir.



Şekil 1. Pozitif ve negatif yüklerin A noktasında oluşturduğu elektrik alan



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

8 nC elektrik yüküne sahip bir noktasal yükün oluşturduğu elektrik alanında, alan şiddetinin 12 N/C olduğu noktanın yüke olan uzaklığını bulunuz.

Verilen:

$$q = 8 \text{ nC} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

$$E = 12 \text{ N/C}$$

İstenen:

$$r - ?$$

Çözüm:

Noktasal bir yükün oluşturduğu elektrik alan şiddeti formülünden, $E = k \frac{q}{r^2}$,

Elektrik yükünden bu noktaya olan uzaklık için aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$r = \sqrt{k \frac{q}{E}} = 2,4 \text{ m.}$$

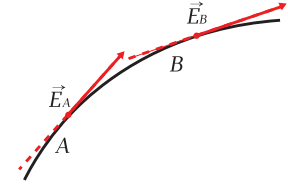
Elektrik Alan Çizgileri

Elektrik alanı, **elektrik alan çizgileri** ile gösterilebilir. Elektrik alan çizgileri, alan içerisine yerleştirilen **pozitif test yüküne** etki eden kuvvetin yönünü gösterir. Alan çizgilerinin yoğunluğu, elektrik alan şiddetinin bir göstergesidir. Belirli bir yüzeyden geçen elektrik alan çizgilerinin sayısı arttıkça, o bölgedeki elektrik alanı da güçlenir. Noktasal bir elektrik yükü, **radyal bir elektrik alanı** oluşturur. Bu alanda, yüke eşit uzaklıktaki tüm noktalarda elektrik alan şiddeti aynı büyüklüktedir ve alanın yönü yarıçap doğrultusundadır. Radyal elektrik alanı homojen değildir. Yükten uzaklaştıkça elektrik alan şiddeti azalır. Elektrik alan çizgisi üzerindeki her noktada, genel olarak eğri de olabilir. Nitekim, birden fazla yükün oluşturduğu elektrik alanlarında bunu

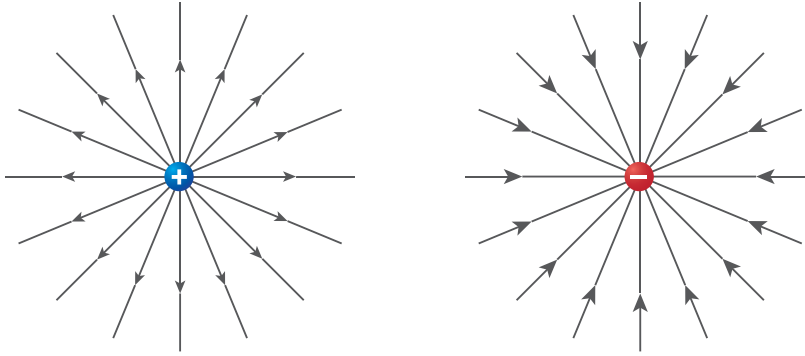
göreceğiz. Elektrik alanındaki herhangi bir noktada, elektrik alan şiddeti vektörünün yönü, o noktadan geçen elektrik alan çizgisine teğettir (Şekil 2).

Elektrik alan çizgileri kavramı, **Michael Faraday** tarafından ortaya atılmıştır. Faraday, yükler arasındaki etkileşimin bir elektrik alanı aracılığıyla gerçekleştiğini sezgisel olarak öne sürmüştür. Ancak, elektrik alan çizgilerinin gerçekte var olan fiziksel yapılar olmadığı unutulmamalıdır. Bunlar, elektrik alanını görselleştirmek ve tanımlamak için kullanılan kuramsal bir modeldir.

Yukarıdaki vektörel bağıntıdan, uzaydaki herhangi bir noktada elektrik alanının yönünün elektrik alan çizgisine teğet olduğu anlaşılır. Buna göre, elektrik alan çizgileri pozitif yükten çıkar ve negatif yüke girer (Şekil 3).

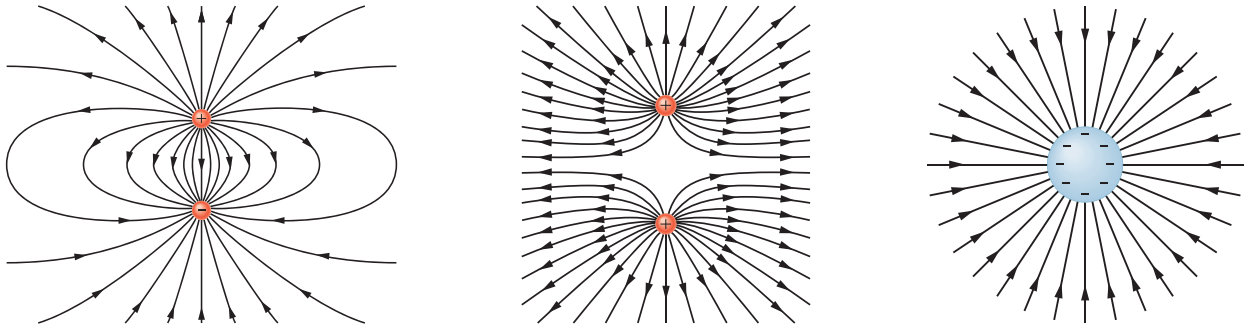


Şekil 2. Elektrik alan çizgileri ve elektrik alan şiddeti vektörü



Şekil 3. İzole pozitif ve negatif yüklerin elektrik alan çizgileri

Elektrik alan çizgileri hiçbir zaman kesişmez. Çünkü uzaydaki herhangi bir noktada elektrik alanının yönü yalnızca bir tane olabilir.



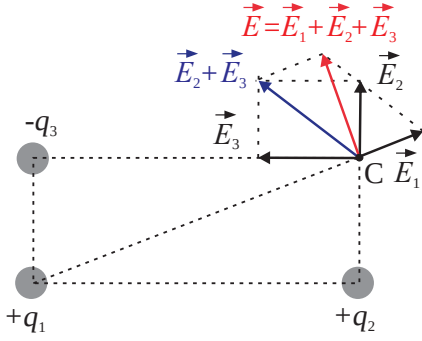
Şekil 4. İki noktasal yük ile yüklü bir kürenin oluşturduğu elektrik alan çizgileri. Elektrik alan çizgileri uzayda hiçbir noktada kesişmez.

Birden Fazla Yük Tarafından Oluşturulan Elektrik Alanı

Uzaydaki bir noktadaki elektrik alanı iki veya daha fazla yük tarafından oluşturuluyorsa, o noktadaki elektrik alan şiddeti vektörü, her bir yükün o noktada oluşturduğu elektrik alan şiddeti vektörlerinin vektörel toplamına eşittir:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

$\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ ve $\vec{E}_n$, her bir yükün oluşturduğu elektrik alan şiddetleridir. **Şekil 5'te**, bir dikdörtgenin köşelerine yerleştirilmiş üç yükün oluşturduğu elektrik alanın, elektrik alan şiddeti vektörlerinin vektörel toplamı ile elde edildiği gösterilmektedir.



Şekil 5. Üç yükün oluşturduğu elektriksel alanların vektörel toplamı



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Şekil 5'te gösterilen dikdörtgenin kenar uzunlukları $a = 10\text{cm}$, ve $b = 5\text{cm}$, yüklerin büyüklükleri ise $q_1 = 5\text{ pC}$, $q_2 = 5\text{ pC}$ ve $q_3 = 10\text{ pC}$ olduğuna göre, C noktasındaki elektrik alan şiddetini hesaplayınız.

Verilen:

$$q_1 = 5\text{ pC} = 5 \cdot 10^{-12}\text{ C}, \quad q_2 = 5\text{ pC} = 5 \cdot 10^{-12}\text{ C},$$

$$q_3 = 10\text{ pC} = 10 \cdot 10^{-12}\text{ C}, \quad a = 10\text{ cm} = 0,1\text{ m},$$

$$b = 5\text{ cm} = 0,05\text{ m}$$

İstenen:

$$E - ?$$

Çözüm:

Elektrik alan şiddeti vektörleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

C noktasındaki elektrik alan şiddetini hesaplamak için, Şekil 3'te gösterildiği gibi bir koordinat sistemi kuruyoruz. Bu durumda, vektörel bağıntıdan

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3,$$

Elektrik alan şiddeti vektörlerini koordinat eksenlerine izdüşürdüğümüzde, aşağıdaki iki skaler denklem elde edilir:

$$E_x = E_3 - E_{1x} \quad \text{ve} \quad E_y = E_2 + E_{1y}$$

burada $E_{1x} = E_1 \cos \alpha$ ve $E_{1y} = E_1 \sin \alpha$

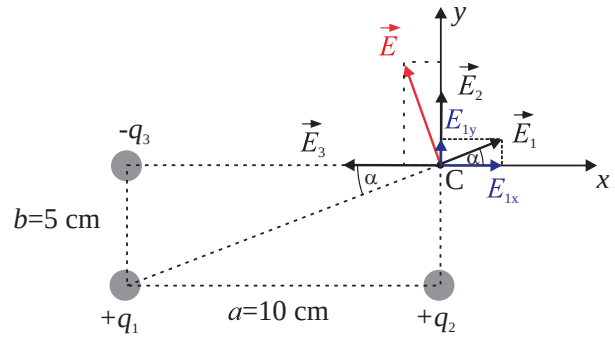
E_1 alanının x ve y eksenlerindeki değerleridir.

α açısını belirlemek için üçgenin kenarları kullanılı

$$\tan \alpha = \frac{b}{a} \Rightarrow \alpha = 26,6^\circ,$$

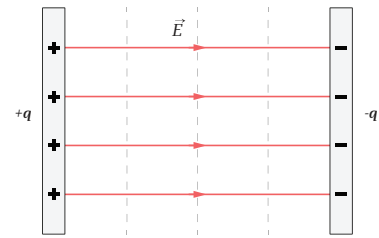
dikdörtgenin köşegeni ise, Pisagor Teoremini kullanılarak hesaplanır $d = \sqrt{a^2 + b^2} = 0,11\text{m}$. Her bir eksen doğrultusundaki elektrik alan bileşenleri belirlendiğine göre, bileşke elektrik alanın büyüklüğü

Pisagor Teoremi kullanılarak şu şekilde elde edilir: $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = 20,4\text{ N/C}$.



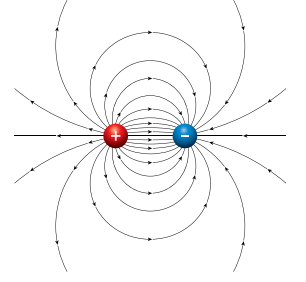
Homojen Elektrik Alanı

Elektrik alan şiddeti vektörünün uzayın her noktasında aynı doğrultuya, aynı yöne ve aynı büyüklüğe sahip olduğu elektrik alanlara **homojen elektrik alan** denir. Homojen bir elektrik alanın herhangi bir noktasına yerleştirilen test yüküne, her yerde aynı büyüklükte ve aynı yönde bir elektrik kuvveti etki eder. Homojen elektrik alan, en basit şekilde biri pozitif, diğeri negatif yüklü iki paralel metal levha arasında oluşturulur. Homojen elektrik alanın alan çizgileri birbirine paraleldir ve aralarındaki uzaklık her noktada aynıdır (Şekil 6)..



Şekil 6. İki yüklü metal levha arasındaki bölgede oluşan homojen elektrik alan.

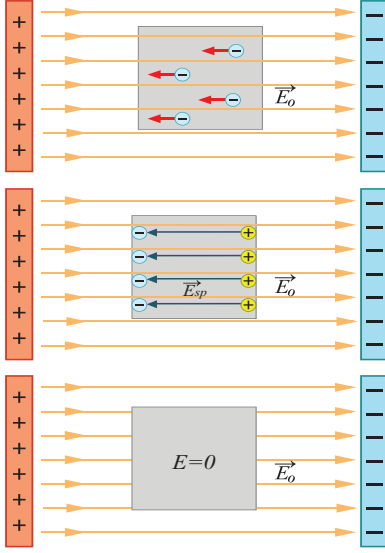
Şekil 7, bir elektrik dipolünün elektrik alan çizgilerini göstermektedir. Elektrik dipolü, eşit büyüklükte ancak zıt işaretli iki elektrik yükünün belirli bir uzaklıkta bulunmasıyla oluşan sistemdir. Yükler arasındaki bölgenin bir kısmında elektrik alan yaklaşık olarak homojendir.



Şekil 7. Bir elektrik dipolünün elektrik alanı.

Elektrik alanındaki iletkenler

İletkenlerde, iletken içinde serbestçe hareket edebilen elektronlar bulunur. Bir iletken elektrik alanına yerleştirildiğinde, bu serbest elektronlar yeniden dağılım gösterir. Elektronlar, elektrostatik denge sağlanıncaya kadar elektrik alanın yönüne zıt yönde hareket eder.



Bu durumda iletkenin içindeki elektrik alan şiddeti sıfırdır ($E = 0$). Başka bir deyişle, dış elektrik alan ile iletken içinde oluşan elektrik alanın vektörel toplamı sıfıra eşittir:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{sp} = 0 \Rightarrow |\vec{E}_0| = |\vec{E}_{sp}|$$

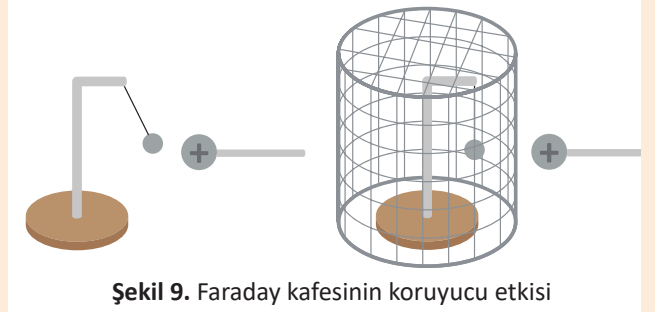
Bu özellik, **elektrostatik ekranlamanın** temelini oluşturur. Elektrostatik ekranlama, **Faraday kafesi** adı verilen, metal levha veya metal ağdan yapılmış kapalı ya da kısmen kapalı bir yapı ile sağlanır. Faraday kafesi, iç kısmı dış elektrik alanlarının etkisinden korur. Otomobillerin metal gövdesi de bir Faraday kafesi gibi davranır. Bu nedenle, araca yıldırım düşmesi durumunda elektrik akımı aracın dış yüzeyinden geçer ve içindeki yolcular korunmuş olur.

Şekil 8. Homojen bir elektrik alanında bulunan iletken



ETKİNLİK 1.

Yalıtkan bir ip ile asılmış küçük bir metal kürenin yanına pozitif yüklü bir cisim yaklaştırsın. Kürenin denge konumundan sapıp saptadığını gözlemleyin. Daha sonra metal küreyi bir metal ağına (Faraday kafesi) içine yerleştirin ve yine pozitif yüklü bir cismi kafese yaklaştırsın. Küre bu kez denge konumundan sapıyor mu? Gözlemlerinizi grubunuzla tartışarak bir sonuca varınız.



Şekil 9. Faraday kafesinin koruyucu etkisi

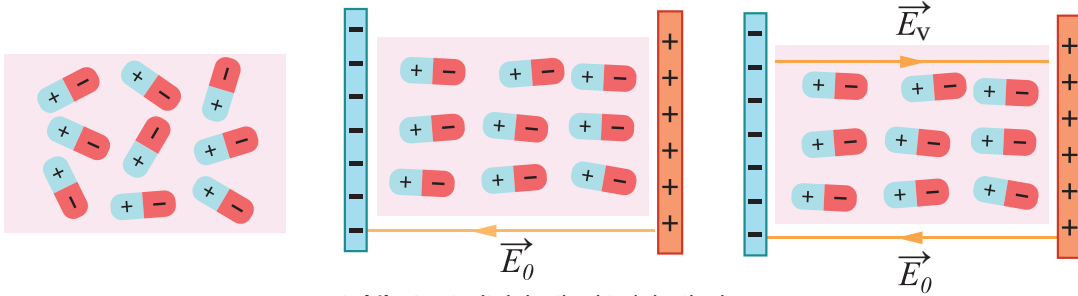
Yalıtkanlardaki Elektrik Alanı

Yalıtkanlar (dielektrikler), E_0 , şiddetindeki bir elektrik alanına yerleştirildiğinde molekülleri kutuplanır (polarize olur). Bu durumda moleküllerin pozitif ve negatif yük merkezleri çok az yer değiştirir ve bunun sonucunda, dış elektrik alanına zıt yönde (E_v) şiddetinde bir elektrik alanı oluşur. Şekil 10'da gösterildiği gibi bu alan, yalıtkan içindeki net elektrik alan şiddetini vakumdaki değerine göre azaltır. Bir dielektrikteki elektrik alan şiddeti için aşağıdaki bağıntı geçerlidir:

$$E = E_0 - E_v$$

Bu azalma, bağıl dielektrik sabiti ϵ_r , ile ifade edilir. Bağıl dielektrik sabiti, vakumdaki elektrik alan şiddetinin (E_0) yalıtkan içindeki elektrik alan şiddetine (E) oranı olarak tanımlanır.

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E}$$



Şekil 10. Bir dielektrikteki elektrik alanı

Dielektrik içinde elektrik alan şiddeti azaldığından $\epsilon_r > 1$ 'dir. Bir malzemenin bağli dielektrik sabiti ne kadar büyükse, içindeki elektrik alan şiddeti vakumdaki değerine göre o kadar fazla azalır. Buna göre, dielektrik bir ortamda bulunan noktasal bir yükün oluşturduğu elektrik alan şiddeti için aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q}{r^2} \vec{r}_0.$$

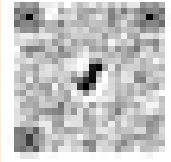


ETKİNLİK 1.

Aşağıdaki bağlantıdaki PhET simülasyonu "Charges and Fields - Electric Field | Electrostatics" te elektrik alanını ve alan çizgilerini inceleyebilirsiniz:

https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_all.html

Homojen bir elektrik alanı oluşturmaya çalışın.



Doğada Elektriklenme

Bulut ile yer arasında meydana gelen elektrik boşalmasına **yıldırım** denir. Yıldırımdan korunmak için **paratoner** kullanılır. Paratoner, ucu sivri bir metal çubuktur ve binaların en yüksek noktasına yerleştirilerek iletken bir kablo aracılığıyla toprağa bağlanır. Böylece yıldırım akımı güvenli bir şekilde toprağa iletilir.

Bulutlar, içerdikleri su damlacıkları, buz kristalleri ve dolu tanelerinin hava akımlarıyla sürekli hareket edip birbirleriyle çarpışması sonucu elektriklenir. Bu çarpışmalar sırasında elektrik yükleri yer değiştirir. Sonuçta bulutun alt kısmı genellikle negatif, üst kısmı ise pozitif yüklü hâle gelir. Yüklü bulutlar, **elektrostatik etki (indüksiyon)** yoluyla yeryüzünü ve ağaçlar, kuleler ile paratonerler gibi yüksek cisimleri elektrikleştirir. Yükler, sivri uçlarda daha yoğun birikir.

Bulutun alt kısmındaki negatif yükler, elektrostatik etki sonucu yeryüzündeki elektronları daha derin katmanlara iter. Böylece bulutun altındaki yeryüzü pozitif yüklerle yüklenmiş gibi davranır. Bulut ile yer arasındaki elektrik alan yeterince büyüdüğünde hava iyonlaşır ve elektrik yüklerinin hareket edebileceği iletken bir kanal oluşur. Bu kanal boyunca gerçekleşen ani elektrik boşalması **yıldırım** olarak adlandırılır. Yıldırım sırasında çevresindeki hava çok yüksek sıcaklıklara kadar ısınır ve hızla genleşir. Bu ani genleşme sonucunda oluşan ses **gök gürültüsü** olarak duyulur.



DAHA FAZLA ÖĞREN

İletkenden yapılmış yüklü bir küre ile dielektrikten yapılmış yüklü bir kürenin elektrik alanı.

Yarıçapı R olan iletken bir kürede, elektrostatik dengede elektrik yükü q yalnızca kürenin dış yüzeyine dağılır. Bu nedenle kürenin içinde elektrik alan şiddeti sıfırdır ($E = 0$). Kürenin dışındaki, merkezden r

zaklıktaki bir noktadaki elektrik alan şiddeti ise aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad \text{za } r \geq R,$$

Bu alan, kürenin merkezinde bulunan aynı büyüklükteki noktasal bir elektrik yükünün oluşturduğu alanla aynıdır. Elektrik alan çizgileri, kürenin yüzeyine her noktada diktir.

Yüklü bir dielektrik (yalıtkan) kürede elektrik yükü serbestçe hareket edemez; bu nedenle yük yalnızca yüzeyde değil, kürenin hacmi boyunca da dağılabilir. Toplam q yükü kürenin hacmine düzgün (homojen) olarak dağılmışsa, kürenin içindeki ($r < R$ için) elektrik alan şiddeti aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qr}{R^3},$$

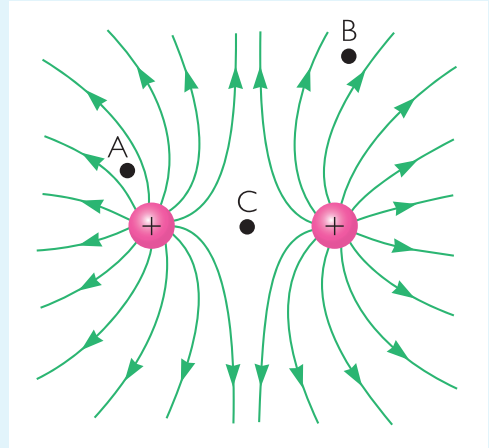
burada elektrik alan şiddeti, r ile doğrusal olarak artar. Kürenin dışındaki ($r \geq R$ için) elektrik alan şiddeti ise, aynı yüke sahip iletken bir kürenin oluşturduğu elektrik alan şiddetiyle aynıdır; yani:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}.$$



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Elektrik alan şiddetinin, elektrik alanın bir kuvvet özelliği olduğunu neden söylüyoruz?
2. Hangi durumda bir elektrik alanının homojen olduğunu söyleyebiliriz?
3. Şekildeki üç noktadan hangisinde elektrik alan şiddeti en büyük olacaktır? Cevabınızı gerekçelendirin.
4. 3 nC ve 5 nC büyüklüğündeki iki noktasal elektrik yükü, birbirinden 14 cm uzaklıkta bulunmaktadır. Yüklerin tam ortasındaki noktadaki elektrik alan şiddetini hesaplayınız. Ayrıca, birinci yükten hangi uzaklıkta elektrik alan şiddeti sıfır olur?
(Çözüm: 3,7 kN/C; 8,1 cm)
5. $q = 10^{-10}$ C ve $d = 20$ cm olduğunda, sağdaki şekilde gösterilen P noktasındaki elektrik alan şiddetini ve elektrik potansiyelini hesaplayınız. Yükleri noktasal elektrik yükleri olarak kabul ediniz. Ayrıca, şekilde verilen üç noktadan hangisinde elektrik alan şiddetinin en büyük olduğunu belirleyiniz ve cevabınızı gerekçelendiriniz. (Çözüm: 303 N/C; 42,8 V)
6. Yatay konumda yerleştirilmiş iki metal levha arasında, şiddeti $2 \cdot 10^3$ N/C olan homojen bir elektrik alan oluşturulmuştur (üst levha pozitif yüklüdür). Alanın bir noktasında, kütlesi 0,2 g, olan ve $-5 \mu\text{C}$ noktasal yük taşıyan bir kürecik bulunmaktadır. Kürecik serbest bırakıldığında hangi yönde ve ne büyüklükte bir ivmeyle hareket eder? Küreciğin başlangıç hızı sıfırdır. Levhalar arasındaki ortam vakum ortamıdır? (Çözüm: 50 m/s²)



1.4. Elektrik Potansiyeli ve Gerilim

Elektrik potansiyel enerjisi

Elektrik alanı, yerçekimi alanına birçok bakımdan benzer. Her ikisi de korunumlu kuvvet alanlarıdır ve cisimler üzerinde temassız kuvvet uygular. Yerçekimi alanı kütle tarafından, elektrik alanı ise elektrik yükü tarafından oluşturulur. Bir cisim yerçekimi alanında hareket ettiğinde, örneğin belirli bir yükseklikten düştüğünde, toplam mekanik enerjisi korunur. Bu sırada potansiyel enerjisi azalırken kinetik enerjisi artar. Cismi yerçekimi kuvvetine karşı yukarı kaldırmak için ise dışarıdan iş yapılması gerekir; böylece cismin potansiyel enerjisi artar.

Benzer şekilde, elektrik alanındaki yüklü bir cisim de potansiyel enerjisinin azaldığı yönde hareket eder. Bu hareket sırasında elektrik potansiyel enerjisi azalırken kinetik enerjisi artar. Başka bir deyişle, yük, elektrik potansiyel enerjisinin büyük olduğu bir noktadan daha küçük olduğu bir noktaya doğru hareket etme eğilimindedir.

Pozitif yüklü bir cismin oluşturduğu elektrik alanında bulunan pozitif bir test yükünü düşünelim. Test yükünü elektrik alanın yönüne ters yönde, yani alanın kaynağına doğru yaklaştırmak için dışarıdan iş yapmak gerekir. Bu durumda test yükünün elektrik potansiyel enerjisi artar. Test yükü serbest bırakıldığında ise elektrik alanın yönünde hareket ederek hızlanır; kinetik enerjisi artarken elektrik potansiyel enerjisi azalır.

Elektrik alanı negatif yüklü bir cisim tarafından oluşturulmuşsa, pozitif test yükü elektrik alanın etkisiyle negatif yüke doğru hızlanır ve elektrik potansiyel enerjisi azalır. Test yükünü negatif yükten uzaklaştırmak için ise dışarıdan iş yapılması gerekir; bu durumda elektrik potansiyel enerjisi artar.

Elektrik potansiyel enerjisi, iki elektrik yükü arasındaki etkileşimden kaynaklanır. Bu nedenle, elektrik alanındaki her yüklü cismin belirli bir elektrik potansiyel enerjisi (E_p) vardır.

Elektrik Alanında İş

Noktasal q yükünden r_1 uzaklığında bir q_p test yükünü ele alalım (Şekil 1). Elektrik kuvvetinin etkisiyle q_p yükü, q yükünden r_2 uzaklıktaki bir noktaya hareket etmektedir. Bu yer değiştirme sırasında, test yükünün elektriksel potansiyel enerjisi değişir.



Şekil 1. Pozitif yüklü q yükünün oluşturduğu elektrik alanındaki q_p test.

Elektrik kuvvetinin yaptığı iş, test yükünün elektrik potansiyel enerjisindeki değişimin negatifine eşittir; yani:

$$A = -\Delta E_p = E_{p1} - E_{p2} \quad .$$

Noktasal bir yükün oluşturduğu elektrik alanında elektrik kuvveti sabit olmadığından, yapılan işi hesaplamak için ortalama elektrik kuvveti $\bar{F}$ kullanılır. Buna göre yapılan iş aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$A = \bar{F}(r_2 - r_1) \quad .$$

Dolayısıyla, şu sonuç çıkar:

$$E_{p1} - E_{p2} = \bar{F}(r_2 - r_1) .$$

Başlangıç konumundaki kuvvet $F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_p}{r_1^2}$, son konumdaki elektrik kuvveti ise,

$$F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_p}{r_2^2} .$$

Ortalama elektrik kuvveti $\bar{F}$, başlangıç ve son konumlardaki elektrik kuvvetlerinin geometrik ortalamasına eşittir. Bunun nedeni, elektrik kuvvetinin uzaklıkla doğrusal değil, uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak değişmesidir:

$$\bar{F} = \sqrt{F_1 F_2} .$$

Değiştirilerek elde edilen sonuç:

$$\bar{F} = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_p}{r_1^2} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_p}{r_2^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_p}{r_1 r_2} .$$

Bu ifade, potansiyel enerjisindeki değişimi veren bağıntıda yerine yazıldığında aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$E_{p1} - E_{p2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_p}{r_1 r_2} (r_2 - r_1) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{qq_p}{r_1} - \frac{qq_p}{r_2} \right) .$$

Denklemin sağ tarafındaki terimler, q_p test yükünün başlangıç ve son konumlardaki elektrik potansiyel enerjilerini ifade eder. Buna göre, q noktasal yükünden r uzaklıkta bulunan q_p test yükünün elektrik potansiyel enerjisi aşağıdaki bağıntıyla verilir:

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_p}{r} ,$$

burada q ve q_p etkileşim halindeki yükler, r ise aralarındaki mesafedir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

3,0 μC büyüklüğündeki bir elektrik yükü, $4,0 \cdot 10^4 \text{ V/m}$ şiddetindeki homojen bir elektrik alanına yerleştirilmiştir. Elektrik alan yatay doğrultudadır ve yük, A noktasından B noktasına, elektrik alanın yönünde hareket etmektedir. A ve B noktaları arasındaki uzaklık 0,25 m'dir.

a) Elektrik alanın, yük A noktasından B noktasına hareket ederken yaptığı işi hesaplayınız.

b) Yükün elektrik potansiyel enerjisindeki değişimi bulunuz.

Verilenler:

$$E = 4,0 \cdot 10^4 \text{ V/m} , \\ q = 3,0 \mu\text{C} = 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ C} , \\ d = 0,25 \text{ m}$$

İstenen:

$$A - ? , \Delta E_p - ?$$

Çözüm:

a) Homojen bir elektrik alanında yapılan iş, $A = qEd$ bağıntısıyla hesaplanır. Verilen değerler bağıntıda yerine yazıldığında $A = 3 \cdot 10^{-2} \text{ J}$ elde edilir. Yük, elektrik alanın yönünde hareket ettiğinden elektrik kuvvetinin yaptığı iş pozitifdir.

b) Elektrik kuvvetinin yaptığı iş ile elektrik potansiyel enerjisindeki değişim arasındaki ilişki $A = -\Delta E_p$ bağıntısıyla ifade edilir. Buna göre, yükün elektrik potansiyel enerjisindeki değişim $\Delta E_p = -3 \cdot 10^{-2} \text{ J}$ olur. Elektrik kuvveti yük üzerinde pozitif iş yaptığından, yükün elektrik potansiyel enerjisi azalır.

Elektrik Potansiyeli

Test yükünün elektrik potansiyel enerjisi, elektrik alanın farklı noktalarında farklı değerler alır. Aynı şekilde, elektrik alanın aynı noktasına yerleştirilen farklı büyüklükteki yüklerin elektrik potansiyel enerjileri de farklıdır. Şekil 1'deki 1 numaralı noktaya, q_p büyüklüğündeki test yükü yerine $2q_p$ büyüklüğünde bir test yükü yerleştirildiğini düşünelim. Elektrik potansiyel enerjisi bağıntısına göre, bu yükün elektrik potansiyel enerjisi $2E_p$ olur. Benzer şekilde, $3q_p$ büyüklüğündeki bir test yükünün elektrik potansiyel enerjisi $3E_p$ olur. Test yükünün elektrik potansiyel enerjisinin yük büyüklüğüne oranı alındığında aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\frac{E_p}{q_p} = \frac{2E_p}{2q_p} = \frac{3E_p}{3q_p} = \text{sabit}$$

Bu oran, belirli bir noktadaki elektrik alan için sabittir ve test yükünün büyüklüğüne bağlı değildir. Bu büyüklüğe, elektrik potansiyeli denir ve φ (fi) ile gösterilir. Elektrik potansiyeli, belirli bir noktadaki elektrik alanının etkisini, o noktaya yerleştirilen yükten bağımsız olarak ifade eden bir büyüklüktür. Başka bir deyişle, elektrik potansiyeli birim yük başına düşen elektrik potansiyel enerjisidir. Sayısal olarak, o noktaya yerleştirilen birim pozitif yükün sahip olduğu elektrik potansiyel enerjisine eşittir. Bu büyüklük aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$\varphi = \frac{E_p}{q_p},$$

burada:

- φ elektrik potansiyelidir (volt, V cinsinden ölçülür),
- E_p elektrik potansiyel enerjisidir (joule, J cinsinden),
- q , elektrik yüküdür (coulomb cinsinden, C).

Noktasal bir elektrik yükünün oluşturduğu elektrik alanın potansiyeli aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\varphi = k \frac{q}{r}.$$

Elektrik potansiyel enerjisinin büyüklüğü, elektrik alanına yerleştirilen yükün büyüklüğüne bağlıdır. Buna karşılık, elektrik potansiyeli yalnızca elektrik alanındaki konuma bağlıdır. Bu nedenle, elektrik potansiyeli yüklü parçacığın değil, **elektrik alanının bir özelliğidir**.

SI birim sisteminde elektrik potansiyelinin birimi **volt (V)**'tur. Elektrik potansiyeli bağıntısından aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$1\text{V} = \frac{1\text{J}}{1\text{C}}.$$

Elektrik potansiyeli skaler bir büyüklüktür. Sayısal değeri, elektrik alanını oluşturan yükün işaretine ve seçilen referans potansiyel düzeyine bağlı olarak pozitif veya negatif olabilir. Elektrostatikte, elektrik alanını oluşturan yükden sonsuz uzaklıktaki bir noktanın elektrik potansiyelinin sıfır olduğu kabul edilir. Buna bağlı olarak, bu noktadaki elektrik potansiyel enerjisi de sıfırdır.

Belirli bir noktadaki elektrik potansiyeli, birden fazla yükün oluşturduğu potansiyellerin toplamından oluşabilir. Her bir yükün o noktadaki potansiyele katkısı ayrı ayrı hesaplanır ve toplam elektrik potansiyeli, bu potansiyellerin **cebirsel toplamına** eşittir:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n.$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Bir düzlemde $+6 \text{ pC}$ ve -3 pC değerlerinde iki noktasal yük bulunmaktadır. P noktası, birinci yükten 30 cm , ikinci yükten ise 20 cm uzaklıktadır. P noktasındaki toplam elektrik potansiyelini hesaplayınız.

Verilenler:

$$q_1 = 6 \text{ pC} = 6 \cdot 10^{-12} \text{ C}, q_2 = -3 \text{ pC} = -3 \cdot 10^{-12} \text{ C}, r_1 = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}, r_2 = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

İstenen:

$$\varphi - ?$$

Çözüm:

$$\varphi_1 = k \frac{q_1}{r_1}, \varphi_2 = k \frac{q_2}{r_2}, \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 0,18 \text{ V} + (-0,135) \text{ V} = 0,045 \text{ V}.$$

Elektrik Potansiyeli

Daha önce, bir test yükü elektrik alanında hareket ettiğinde elektrik kuvvetinin yaptığı işin, elektrik potansiyel enerjisindeki değişimin negatifine eşit olduğunu belirtmiştik. Buna göre aşağıdaki bağıntı geçerlidir:

$$A = E_{p1} - E_{p2}.$$

Aynı sonuç, noktasal bir yükün oluşturduğu elektrik potansiyeli bağıntısından da elde edilebilir. Buna göre şöyle yazılır:

$$A = q_p (\varphi_1 - \varphi_2).$$

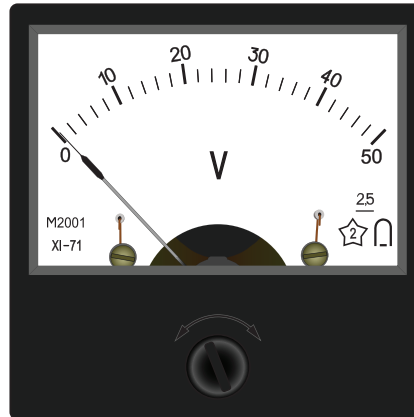
$\varphi_1 - \varphi_2$ ifadesi, elektrik alanındaki 1 ve 2 noktaları arasındaki potansiyel farkını gösterir. Bu büyüklüğe elektrik potansiyel farkı ya da gerilim denir ve U ile gösterilir: $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Potansiyel farkının SI birim sistemindeki birimi, potansiyelde olduğu gibi **volt (V)**'tur. Yukarıdaki bağıntıdan, potansiyel farkı elektrik kuvvetinin yaptığı iş cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$U = \frac{A}{q_p}.$$

Alan içindeki iki nokta arasındaki gerilim (potansiyel farkı), birim pozitif test yükünü bu iki nokta arasında hareket ettirirken elektrik kuvvetinin yaptığı işe eşittir.

Gerilim (potansiyel farkı), voltmetre adı verilen bir ölçü aleti ile ölçülür. Şekil 2'de bir analog voltmetre ile, gerilim dâhil birçok elektriksel büyüklüğü ölçebilen bir dijital multimetre gösterilmektedir.

a)



b)



Şekil 2. a) Analog voltmetre
b) Dijital multimetre

$A = qU$ bağıntısından, elektrik alanın yaptığı işin, iki nokta arasındaki gerilime ve taşınan elektrik yükünün büyüklüğüne bağlı olduğu görülür. Taşınan yükün bir **temel elektrik yükü**, yani bir **elektron** olduğu durumda, elektronun belirli bir potansiyel farkına sahip iki nokta arasında hareket ederken kazandığı veya kaybettiği enerji, **elektronvolt (eV)** adı verilen özel bir enerji birimiyle ifade edilir.

Bir elektronvolt (eV), bir temel elektrik yükünün bir temel elektrik yükünün ($e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) 1 V potansiyel farkına sahip iki nokta arasında hareket ederken elektrik alanın yaptığı işe eşit olan enerji birimidir. Başka bir deyişle:

$$A = eU = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$$

Elektronvolt (**eV**), Uluslararası Birim Sistemi'nde (SI) yer almayan bir enerji birimidir. Ancak çok küçük enerji değerlerinin ifade edilmesinde oldukça kullanışlıdır. Bu nedenle, özellikle atom ve nükleer fizik alanlarında enerji değerlerini ifade etmek için yaygın olarak kullanılır.

Eş Potansiyel Yüzeyler

Uzayın farklı noktalarında elektrik potansiyeli farklı değerler alabilir. Ancak, uzayda elektrik potansiyelinin her noktada aynı olduğu yüzeyler de vardır. Bu yüzeylere **eş potansiyel yüzeyler** denir. Eş potansiyel yüzey, elektrik potansiyelinin aynı değere sahip olduğu noktaların oluşturduğu yüzeydir.

Bir test yükü eş potansiyel bir yüzey boyunca hareket ettiğinde, elektrik potansiyeli değişmediği için elektrik potansiyel enerjisi de değişmez ($\Delta E_p = 0$). Bu nedenle, eş potansiyel yüzey boyunca hareket sırasında elektrik alan herhangi bir iş yapmaz. $A = q(\varphi_1 - \varphi_1) = 0$. Bu, eş potansiyel yüzeylerin en önemli özelliklerinden biridir.

Eş potansiyel yüzeyler, elektrik alan çizgilerine her zaman diktir. Bunun nedeni, elektrik alan çizgilerinin elektrik alanın yüklü bir parçacık üzerinde iş yapabildiği yönü göstermesidir. Eş potansiyel bir yüzey boyunca hareket edildiğinde elektrik potansiyeli değişmediğinden, elektrik alan iş yapmaz. Bu nedenle, eş potansiyel yüzey boyunca hareket yönü elektrik alan çizgilerine diktir. Metal bir iletkenin yüzeyi de bir **eş potansiyel yüzey** olduğundan, elektrik alan çizgileri iletken yüzeyine her noktada dik olarak çıkar veya yüzeye dik olarak girer.

Homojen bir elektrik alanında eş potansiyel yüzeyler, elektrik alan çizgilerine dik doğrultuda **uzanan paralel düzlemlerdir**. **Noktasal bir elektrik yükünün** oluşturduğu elektrik alanında ise eş potansiyel yüzeyler, yükün merkez olduğu eş merkezli küresel **yüzeylerdir**. (Şekil 3).



Şekil 3. Kesikli çizgilerle gösterilen eş potansiyel yüzeyler:
a) Homojen elektrik alanı b) Noktasal yük tarafından oluşturulan alan
c) Elektrik Dipolünün Oluşturduğu Elektrik Alanı



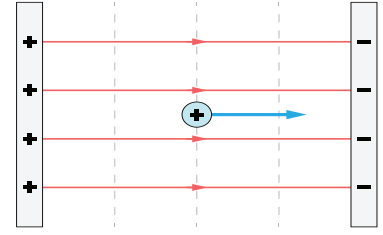
ETKİNLİK 1.

Metal iletkenlerin yüzeyi bir **eş potansiyel yüzeydir**. Bu durum, bir **elektrometre** kullanılarak deneysel olarak gösterilebilir. Elektrometrenin bir ucu hareketli bir proba, diğer ucu ise toprağa bağlanır. Yalıtkan bir destek üzerine yerleştirilen metal iletken elektrikle yüklenir. Daha sonra prob, metal iletkenin yüzeyindeki farklı noktalara dokundurulur. Prob, yüzeyin hangi noktasına değdirilirse değdirilsin elektrometrenin aynı sapmayı gösterdiği gözlenir. Bu, iletken yüzeyinin her noktasında elektrik potansiyelinin aynı olduğunu kanıtlar. Dolayısıyla, metal iletkenin yüzeyi bir **eş potansiyel yüzeydir**. Bu özellik, elektrostatik dengede bulunan, yani üzerinden elektrik akımı geçmeyen metal iletkenler için geçerlidir.

Şekil 4, iki yüklü iletken plaka arasında oluşan homojen elektrik alanı göstermektedir. Kesikli çizgiler, eş potansiyel yüzeyleri temsil etmektedir. Bu yüzeyler, elektrik alan çizgilerine dik doğrultuda uzanan paralel düzlemlerdir. Plakalar arasındaki her noktada elektrik alan şiddetinin büyüklüğü aynıdır ve aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$E = \frac{U}{d},$$

Burada U , plakalar arasındaki gerilim; d ise plakalar arasındaki uzaklıktır. Bu bağıntıdan, elektrik alan şiddetinin volt/metre (V/m) birimiyle de ifade edilebildiği görülmektedir.



Şekil 4. İki paralel iletken levha arasında oluşan homojen elektrik alan ve bu alandaki eş potansiyel yüzeyler



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Şekil 4'te gösterildiği gibi, homojen bir elektrik alanında iki yüklü plaka arasındaki uzaklık 5 cm, plakalar arasındaki gerilim ise 150 V'tur.

a) Plakalar arasındaki elektrik alan şiddetini hesaplayınız.

b) $2 \mu\text{C}$ büyüklüğündeki bir elektrik yükünü pozitif plakadan negatif plakaya taşıırken elektrik alanın yaptığı işi hesaplayınız?

Verilenler: $d = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$, $U = 150 \text{ V}$, $q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$	Homojen bir elektrik alan için $E = \frac{U}{d}$ bağıntısı geçerlidir. Sayısal değerler yerine yazıldığında, elektrik alanın şiddeti $E = 3000 \text{ V/m}$ olarak bulunur. Elektrik alanın yaptığı iş ise $A = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = q \cdot U$ bağıntısıyla hesaplanır. Sayısal değerler yerine konulduğunda, yapılan iş $A = 3 \cdot 10^{-4} \text{ J}$ olarak elde edilir.
İstenen: $E = ?$, $A = ?$	
Çözüm:	



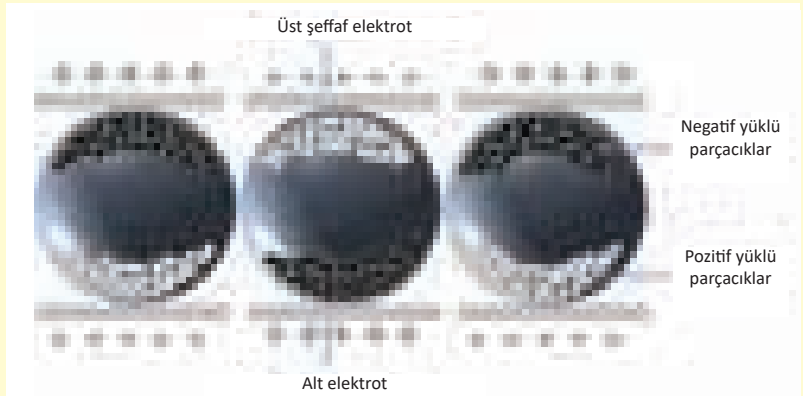
GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

Kindle gibi elektronik kitap okuyucular, kâğıt görünümünü taklit eden e-mürekkep (e-ink) teknolojisini kullanır. Bu teknoloji, elektrik potansiyeli farkı sayesinde çalışır. Ekran yüzeyi, şeffaf bir sıvıyla doldurulmuş milyonlarca mikrokapsülün oluşur. Bu sıvının içinde pozitif yüklü beyaz parçacıklar ile negatif yüklü siyah parçacıklar bulunur.

Uygulanan elektrik potansiyeli farkı, parçacıkları yüklerine göre hareket ettiren bir elektrik alan oluşturur. Pozitif yüklü beyaz parçacıklar negatif elektrotta, negatif yüklü siyah parçacıklar ise pozitif elektrotta doğru hareket eder.

Böylece beyaz parçacıklar mikrokapsülün üst kısmında toplandığında piksel beyaz, siyah parçacıklar üst kısımda toplandığında ise piksel siyah görünür. Her mikrokapsülün altındaki elektrot dizisi kontrol edilerek ekranda metin ve görüntüler oluşturulur. Parçacıkların farklı oranlarda yer değiştirmesi ise çeşitli gri tonlarının elde edilmesini sağlar.

E-mürekkep teknolojisinin en önemli avantajlarından biri, görüntüyü korumak için sürekli enerji gerektirmemesidir. Parçacıklar istenen konuma yerleştikten sonra bu ko-



numlarını korumak için enerji harcanmaz. Pil yalnızca sayfa değiştirildiğinde, yani ekrandaki parçacıkların yeniden düzenlenmesi gerektiğinde enerji sağlar. Bu durum, sayfa çevrilirken ekranın kısa süreliğine "yanıp sönmesinin" nedenidir. Cihaz, önce parçacıkları nötr başlangıç durumuna döndürerek önceki görüntünün izlerini siler, ardından yeni görüntüyü oluşturacak şekilde parçacıkları yeniden düzenler.

E-mürekkep ekranlar ışık yaymaz; bunun yerine kâğıt gibi ortamdan gelen ışığı yansıtır. Bu nedenle, parlak güneş ışığında bile kolaylıkla okunabilir ve uzun süreli kullanımda göz yorgunluğunu azaltır. Elektrostatik kuvvetlerden yararlanan bu teknoloji, elektrik potansiyelinin günlük yaşamda kullanılan önemli uygulamalarından biridir.



DAHA FAZLA ÖĞREN

Yarıçapı R olan ve q yüküyle yüklenmiş metal bir kürenin, küre dışındaki herhangi bir noktada oluşturduğu elektrik potansiyeli aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad \text{3a } r \geq R.$$

Bu, kürenin dışındaki elektrik potansiyelinin, kürenin merkezinde bulunan aynı büyüklükteki noktasal bir elektrik yükünün oluşturacağı elektrik potansiyeline eşit olduğu anlamına gelir. Küre yüzeyindeki elektrik potansiyeli ise aşağıdaki bağıntıyla verilir:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R},$$

Buna karşılık, kürenin içindeki her noktada elektrik potansiyeli aynıdır; yani:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R} \quad \text{3a } r \leq R.$$



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Elektrik potansiyel enerjisi nedir? Bu enerjinin oluşmasının nedeni nedir?
2. Elektrik potansiyeli nasıl tanımlanır? Neden elektrik alanının bir özelliği olarak kabul edilir?
3. Elektrik potansiyel farkı (gerilim) nedir? Elektrik alanındaki iki noktanın potansiyelleriyle nasıl ilişkilidir?
4. İki proton içeren bir helyum çekirdeğinden 2 nm uzaklıktaki elektrik potansiyelini hesaplayınız. Bu uzaklıkta bulunan bir elektronun elektrik potansiyel enerjisi nedir? (Çözüm: 1,44 V; $-2,3 \cdot 10^{-19}$ J)?
5. Her biri 2 nC yüke sahip dört özdeş pozitif noktasal elektrik yükü, vakumda kenar uzunluğu 0,15 m olan bir karenin köşelerine yerleştirilmiştir. Karenin merkezindeki elektrik potansiyelini hesaplayınız. (Çözüm: 679 V)
6. Vakumda, birbirinden 50 cm uzaklıkta bulunan 6 nC ve -12 nC büyüklüğünde iki sabit noktasal elektrik yükü vardır. Elektrik alan şiddetinin sıfır olduğu noktadaki elektrik potansiyelini hesaplayınız. (Çözüm: $x = 1,21$ m; -18,5 V).

1.5. Elektriksel Sığa (Kapasite) ve Kondansatörler

Bir balon saçınıza sürtüldüğünde elektrikle yüklenir ve küçük kâğıt parçalarını çekebilir. Bu durum, cisimlerin elektriklenebildiğini ve elektrik yükü taşıyan cisimlerin elektriksel enerjiye sahip olduğunu gösteren basit bir örnektir. Elektrik yükü, metal bir iletkenle de aktarılabilir. Örneğin, bir elektroskopun metal başlığı elektrikle yüklenebilir. Topraklanmış bir elektrometre ile yapılan ölçümlerde, elektrometrenin başlığına q kadar yük verildiğinde potansiyelin φ , yük $2q$ olduğunda potansiyelin 2φ olduğu gözlenir. Benzer şekilde, yük miktarı arttıkça elektrometrenin potansiyeli de aynı oranda artar. Buna göre, bir iletkenle verilen elektrik yükü ile iletkenin kazandığı elektrik potansiyeli arasındaki oran sabit bir büyüklüktür. Bu büyüklüğe elektriksel sığa (kapasite) denir.

$$\frac{q}{\varphi} = \frac{2q}{2\varphi} = \frac{3q}{3\varphi} = \text{sabit.}$$

Belirli bir iletkendeki elektrik yükü miktarının potansiyeline oranı elektriksel kapasitans(sığa) olarak adlandırılır. Elektriksel kapasitans C ile gösterilir, yani:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Topraklanmış bir elektrometre ile iletken ile Toprak arasındaki potansiyel farkı ölçülür. Toprağın elektrik potansiyeli sıfır ($\varphi_{\text{Toprak}} = 0$), kabul edildiğinden, elektriksel sığa (kapasite) aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$C = \frac{q}{\varphi - \varphi_z}, \text{ yani } C = \frac{q}{U}.$$

Son formüle göre, belirli bir iletkenin kapasitansı, voltajının 1 V olması için iletken yüklenmesi gereken yüke sayısal olarak eşittir. Elektrik kapasitansının ifade edildiği birim farad (F) 'dir.

kapasitans **1 farad (1F)** ise:

$$1 \frac{C}{V} = 1F,$$

Elektriksel sığanın SI birim sistemi olan **farad (F)**, büyük İngiliz bilim insanı **Michael Faraday**'ın onuruna bu adı almıştır. Bir iletkenin elektriksel sığasını incelemenin en basit yolu, iletkenin yapılmış yüklü bir kürenin elektriksel sığasını incelemektir. Yarıçapı R olan ve q yükü taşıyan iletken bir kürenin yüzeyindeki elektrik potansiyeli aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R}.$$

Elektriksel sığa bağıntısı kullanıldığında, iletken kürenin elektriksel sığası için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$C = \frac{q}{\varphi} = 4\pi\epsilon_0 R$$

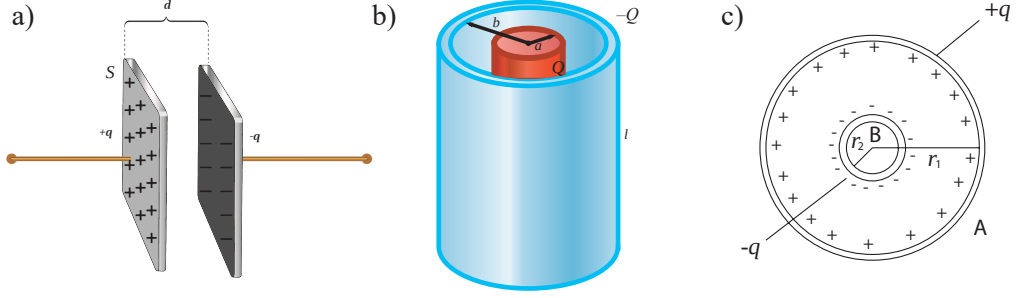
Son bağıntıdan, elektriksel sığanın iletkenin yapıldığı malzemeye değil, yalnızca kürenin yarıçapına bağlı olduğu görülür. Yarıçapı 1 m olan iletken bir kürenin elektriksel sığası yaklaşık $1,1 \cdot 10^{-10}$ F'tır. Bu sonuç, yalıtılmış iletkenlerin yalnızca sınırlı miktarda elektrik yükü depolayabildiğini gösterir. Çünkü iletken yük artırıldıkça elektrik potansiyeli hızla yükselir ve belirli bir değerden sonra yükler, çevredeki havanın iyonlaşması veya kıvılcım atlaması sonucu iletkeni ayrılır.

Teknolojik uygulamalarda ise, küçük hacimde büyük miktarda elektrik yükü depolayabilen düzeneklere ihtiyaç duyulur. Deneyler, tek bir iletken yerine, aralarında bir **yalıtkan (dielektrik)** bulunan iki iletkenin oluşan bir sistemin daha fazla elektrik yükü ve dolayısıyla daha fazla enerji depolayabildiğini göstermektedir. Elektriksel sığa bağıntısına göre, belirli bir gerilim altında ne kadar fazla elektrik yükü depolanabiliyorsa, sistemin elektriksel sığası da o kadar büyüktür.

Birbirine yakın yerleştirilmiş ve aralarında bir **dielektrik** bulunan iki iletkenin oluşan devre elemanına **kondansatör** denir. Kondansatör, yalıtılmış tek bir iletkeni göre daha fazla elektrik yükü depolayabilir. Bunun nedeni, iletkenlerin zıt işaretli yüklerle yüklenmesi ve aralarındaki elektrostatik çekimin daha fazla yükün depolanmasına olanak sağlamasıdır. İki iletken arasındaki dielektrik ise yüklerin iletkenler arasında doğrudan geçişini engelleyerek kondansatörün boşalmasını önler. Kondansatörlerde iletkenler, oluşturdukları elektrik alan büyük ölçüde kondansatörün iç bölgesinde kalacak şekilde tasarlanır ve yerleştirilir. Elektrik alan homojen veya homojen olmayan yapıda olabilir; ancak kondansatörlerin çalışma prensibi aynıdır. İletkenlerin şekline ve yerleşimine göre başlıca kondansatör türleri şunlardır:

- Aralarında bir dielektrik bulunan iki paralel iletken levhadan oluşan **paralel levha kondansatörü** (Şekil 1a),
- aralarına bir dielektrik yerleştirilmiş iki eş eksenli silindirik iletkenin oluşan **silindirik kondansatör** (şekil 1b),

Şekil 1.
İletkenlerin geometrik yapılarına göre kondansatör türleri:
a) Paralel levha b) Silindirik c) Küresel



- iki eşmerkezli iletken küreden oluşan ve aralarında bir dielektrik bulunan **küresel kondansatör** (şekil 1c).

İletkenler arasındaki dielektrik; vakum, hava, seramik, ince metal oksit tabakası, plastik film, mika ve benzeri yalıtkan malzemelerden oluşabilir. Kullanılan dielektrik malzemeye göre kondansatörler; hava kondansatörleri, seramik kondansatörler, elektrolitik kondansatörler, film (plastik) kondansatörler, mika kondansatörler ve çok katmanlı (lamine) kondansatörler gibi türlere ayrılır (Şekil 2).

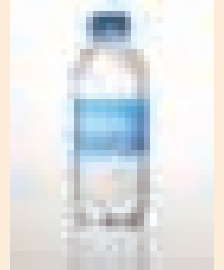
Şekil 2. Bir elektronik cihaza monte edilmiş çeşitli kondansatörler (mavi renkli devre elemanları)



ETKİNLİK 1.

Bir kondansatörün **elektriksel sığası** nelere bağlıdır? Bu soruyu açıklamak için, bir su şişesinin hacmi ile benzetme yapılabilir (**Şekil 3**). Bir su şişesinin kapasitesi, içine alabileceği en fazla su hacmidir. Bu hacim, şişenin içinde o anda ne kadar su bulunduğuna bağlı değildir. Kapasite; şişenin şekline, boyutlarına ve geometrisine bağlıdır, ancak hangi malzemeden yapıldığına bağlı değildir. Örneğin, 1 L hacmindeki cam ve plastik iki şişe aynı kapasiteye sahiptir.

Benzer şekilde, bir kondansatörün **elektriksel sığası**, iletken levhaların geometrisine ve birbirlerine göre konumlarına bağlıdır; ancak levhaların yapıldığı iletken malzemeye bağlı değildir.



Şekil 3. Belirli bir kapasiteye (hacme) sahip su şişesi

Yalıtılmış bir iletkende biriken elektrik yükü arttıkça, iletkenin elektrik potansiyeli de artar. Benzer şekilde, bir kondansatörde iletken levhalar üzerindeki elektrik yükü arttıkça, levhalar arasındaki **gerilim** de artar. Şimdi, bir kondansatörün levhaları arasındaki gerilimin, levhalarda depolanan elektrik yükü ve kondansatörün **elektriksel sığası** ile nasıl ilişkili olduğunu inceleyelim.



ETKİNLİK 2.

Topraklanmış bir **elektrometrenin** bir ucunu, paralel levha kondansatörünün levhalarından birine bağlayınız; diğer levhayı ise toprağa bağlayınız (**Şekil 4**). Elektrometreye bağlı levhayı, bir **etki makinesi** veya **triboelektrik jeneratör** kullanarak elektrikle yükleyiniz. Kondansatörün topraklanmış levhasında, elektrostatik indüksiyon sonucu aynı büyüklükte fakat zıt işaretli bir yük oluşacaktır. Böylece levhalar arasında homojen bir elektrik alan meydana gelir.

Levhalar üzerindeki belirli bir elektrik yükü için elektrometrenin gösterdiği potansiyel değerini okuyunuz. Levha üzerindeki elektrik yükü arttıkça, elektrometreye bağlı levhanın potansiyelinin de arttığını gözlemleyiniz. Buna bağlı olarak, kondansatör levhaları arasındaki gerilim de artar.

Şekil 4. Topraklanmış bir elektrometreye bağlanmış paralel levhali kondansatör.



Deneyssel ölçümler, belirli bir kondansatör için elektrik miktarının plakalar arasındaki gerilime oranının sabit bir değer olduğunu göstermektedir. Bu orana **kondansatörün elektrik kapasitesi** diyoruz ve şu formülü kullanarak hesaplıyoruz:

$$C = \frac{q}{U}.$$

Burada q , kondansatörün her bir levhasındaki elektrik yükünü; U ise levhalar arasındaki gerilimi ifade eder. Bu bağıntı, elektriksel sığa ile yük ve gerilim arasındaki ilişkiyi gösterir. Ancak **elektriksel sığa**, yük ve gerilime bağlı değişken bir büyüklük değildir. Bir kondansatörün elektriksel sığası; levhalar üzerindeki yük miktarına veya levhalar arasındaki gerilime değil, levhaların geometrik özelliklerine ve aralarındaki dielektrik malzemenin cinsine bağlıdır.

Bir kondansatörün levhaları arasındaki gerilim **1 V** iken levhalardan birinde **1 C** yük bulunuyorsa, kondansatörün elektriksel sığası **1 farad (F)** olur. Farad oldukça büyük bir elektriksel sığa birimi olduğundan, uygulamada daha çok **mikrofarad (μF)**, **nanofarad (nF)** ve **pikofarad (pF)** birimleri kullanılır.

Paralel levha kondansatörün, aralarında elektrik alan bulunan iki yüklü iletken levhadan oluştuğunu gördük. Levhalar sırasıyla $+q$ ve $-q$ yükleriyle yüklenmiştir. Levhalar arasındaki elektrik alan homojendir ve elektrik alan şiddeti aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 S},$$

Burada q , kondansatör levhalarından birindeki elektrik yükünü; S ise her bir levhanın yüzey alanını ifade eder. Bu bağıntı, levhalar arasındaki ortamın **vakum** olduğu durumda geçerlidir.

Not: Levhalardan biri $=q$, diğeri $-q$ yüküne sahip olmasına rağmen, elektrik alan şiddeti hesaplanırken yalnızca levhalardan birindeki yükün büyüklüğü (q) dikkate alınır. Genel olarak, bir kondansatörün q yüküyle yüklü olduğu ifade edildiğinde, levhalardan yalnızca birindeki yükün büyüklüğü kastedilir.

Elektrik alan şiddeti, levhalar arasındaki gerilim cinsinden ifade edildiğinde, **paralel levha kondansatörün elektriksel sığası** için aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d}.$$

Paralel levha kondansatörün elektriksel sığası, levhaların yüzey alanına (S), levhalar arasındaki uzaklığa (d) ve levhalar arasındaki ortamın özelliklerine bağlıdır.

Coulomb Yasası incelenirken tanımlanan ϵ_0 sabiti, **boşluğun elektriksel geçirgenliği** olarak adlandırılır ve değeri $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ şeklindedir. Belirli bir kondansatör geometrisi için bu sabit, kondansatörün elektriksel sığasını belirleyen temel büyüklüklerden biridir. ϵ_0 değerinin oldukça küçük olması (10^{-12} mertebesinde), levhalar arasındaki ortam vakum olduğunda kondansatörün elektriksel sığasının da küçük olmasına neden olur. Levhaların boyutları değiştirilmeden elektriksel sığayı artırmak için levhalar arasına bir **dielektrik** yerleştirilir. Dielektrik, levhalar arasındaki elektrik alan şiddetini azaltır. Böylece, levhalardaki elektrik yükü aynı kalmasına rağmen kondansatörün **elektriksel sığası artar**. Dielektriğin elektriksel özelliklerini belirleyen büyüklük **bağıl dielektrik sabiti** (ϵ_r)'dir. Levhaları arasında bağıl dielektrik sabiti ϵ_r olan bir dielektrik bulunan paralel levha kondansatörün elektriksel sığası aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$E = \frac{qU}{2},$$

Tüm dielektrik malzemeler için $\epsilon_r > 1$ olduğundan, bir kondansatörün levhaları arasına dielektrik bir madde yerleştirildiğinde elektriksel sığası artar.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Paralel levha kondansatörün levhalarının yüzey alanı 30 cm^2 , levhalar arasındaki uzaklık ise 2 mm 'dir. Kondansatör bir gerilim kaynağına bağlanarak yüklenmektedir. Daha sonra, levhaların birbirine bakan etkin alanı 25 cm^2 'ye düşürülmektedir. Buna göre, levhaların örtüşen alanının azalması sonucunda kondansatör levhalarında depolanan elektrik yükü kaç kat değişir? Değişimin nedenini açıklayınız.

Verilenler:

$$S_1 = 30 \text{ cm}^2,$$

$$S_2 = 25 \text{ cm}^2,$$

$$U_1 = U_2 = U,$$

İstenen:

$$\frac{q_2}{q_1} - ?$$

Çözüm:

Farklı levha alanlarına sahip paralel levhalı bir kondansatörün kapasitansı aşağıdaki bağıntılarla ifade edilir:

$$C_1 = \epsilon_0 \frac{S_1}{d} \text{ ve } C_2 = \epsilon_0 \frac{S_2}{d}.$$

Kondansatör bir gerilim kaynağına bağlandığında yüklenir; başka bir deyişle, levhalarında elektrik yükü birikir. Yük miktarı aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$q_1 = C_1 U = \epsilon_0 \frac{S_1}{d} U \text{ ve } q_2 = C_2 U = \epsilon_0 \frac{S_2}{d} U.$$

Gerilim sabit kaldığından, levha alanı değişmeden önceki ve sonraki elektrik yükü miktarlarının oranı

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\epsilon_0 \frac{S_2}{d} U}{\epsilon_0 \frac{S_1}{d} U} = \frac{S_2}{S_1} = 0,83 \text{ şeklinde elde edilir.}$$

Kondansatör levhalarının alanı azaltıldığında, levhalarda depolanan elektrik yükü miktarı da aynı oranda azalır. Çünkü gerilim sabit tutulduğunda, yük miktarı levha alanı ile doğru orantılıdır.

Kondansatörler, levhaları arasında oluşturdıkları elektrik alan sayesinde elektrik enerjisi depolar ve gerektiğinde bu enerjiyi devreye geri verebilir. Kimyasal enerji depolayan galvanik hücrelerden (pillerden) farklı olarak, kondansatörler elektrik enerjisi depolar. Depolanan bu enerji, gerektiğinde başka enerji türlerine dönüştürülebilir. Kondansatörde depolanan elektrik enerjisi, kondansatörü yüklemek için yapılan işe eşittir ve aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$E = \frac{qU}{2},$$

Burada q , kondansatörde depolanan elektrik yükünü; U ise levhalar arasındaki gerilimi ifade eder.

Kondansatörler, elektrik devrelerinde elektrik yükünü ve elektrik enerjisini depolayan temel devre elemanlarıdır. Bunun yanı sıra; gerilim dalgalanmalarını filtrelemek ve düzgülendirmek, doğru akım devrelerinde doğru akımı engelleyip alternatif akımı geçirmek (kuplaj uygulamaları), zaman gecikmesi oluşturmak, frekans seçimi yapmak ve rezonans devreleri oluşturmak gibi birçok amaçla kullanılır. Bu özellikleri sayesinde kondansatörler; cep telefonları, fotoğraf makinelerinin flaş devreleri, defibrilatörler ve daha birçok elektronik ve elektrikli cihazın vazgeçilmez devre elemanlarıdır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Paralel levha kondansatörün levhalarının yüzey alanı 60 cm^2 , levhalar arasındaki uzaklık ise 3 mm 'dir. Kondansatör **200 V doğru gerilim (DC)** kaynağına bağlanmış ve tamamen yüklenmiştir.

Daha sonra, gerilim kaynağı devreden çıkarıldıktan sonra levhalar arasındaki uzaklık 6 mm'ye çıkarılıyor. Buna göre, levhalar arasındaki uzaklık değiştirilmeden önce ve değiştirildikten sonra kondansatörde depolanan elektrik enerjisini hesaplayınız.

Verilenler:

$$S = 60 \text{ cm}^2 = 60 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$l_1 = 3 \text{ mm} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$l_2 = 6 \text{ mm} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$q_1 = q_2 = q$$

İstenen:

$$E_1 - ?, E_2 - ?$$

Çözüm:

$$C_1 = \epsilon_0 \frac{S}{d_1} = 1,77 \cdot 10^{-11} \text{ F}, q_1 = C_1 U = 3,54 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

Paralel levhalı kondansatörün enerjisi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilir:

$$E_1 = \frac{q_1 U}{2} = \frac{C_1 U^2}{2} = 0,354 \mu\text{J}.$$

Kondansatör levhaları arasındaki uzaklık değiştirildiğinde, kondansatörün kapasitansı da değişir:

$$C_2 = \epsilon_0 \frac{S}{d_2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F}.$$

Levhalar gerilim kaynağından ayrılmış olduğundan, levhalardaki yük miktarı değişmez; yani $q_1 = q_2$. Bu durumda, levhalar birbirinden uzaklaştırıldıktan sonraki kondansatör enerjisi aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$E_2 = \frac{q_2 U_2}{2} = \frac{q_1^2}{2C_2} = 0,708 \mu\text{J}$$

Buradan, levhalar arasındaki uzaklık değiştirildiğinde kondansatör enerjilerinin oranı

$$\frac{E_2}{E_1} = 2 \text{ olarak elde edilir.}$$

Sonuç olarak, levhalar arasındaki uzaklık 3 mm'den 6 mm'ye çıkarıldığında (iki katına çıkarıldığında), yük miktarı sabit kalmak koşuluyla kondansatörün enerjisi de iki katına çıkar. Bu sırada levhaları birbirinden ayırmak için dış bir kuvvet iş yapar ve yapılan bu iş, elektrik alanında ek enerji olarak depolanır.

**GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA**

Defibrilatör, kalbin normal ritmini yeniden sağlamak amacıyla kullanılan tıbbi bir cihazdır. Bu cihazın temel bileşenlerinden biri kondansatördür. Defibrilatörün içinde, yüksek gerilime kadar yüklenebilen, büyük elektriksel sığaya sahip bir kondansatör bulunur. Bu kondansatör, elektrik yükünü ve elektrik enerjisini depolar

$$E = \frac{C \cdot U^2}{2}.$$

Cihaz etkinleştirildiğinde, kondansatörde depolanan enerji hastanın göğsüne yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla çok kısa bir süre içinde boşaltılır ve kalp kasından kontrollü bir elektrik akımı geçirilir.

Bu kısa süreli ve yüksek enerjili elektrik darbesi, kalpteki düzensiz elektriksel etkinliği sonlandırarak kalbin normal elektriksel iletim sisteminin yeniden çalışmasına olanak sağlar. Böylece sinoatriyal (SA) düğüm, kalbin doğal uyarı merkezi olarak yeniden kontrolü ele alır ve normal sinüs ritmi yeniden sağlanabilir. Defibrilatörde kullanılan kondansatörün elektriksel sığası ve uygulanan gerilim, hastaya güvenli ve etkili bir defibrilasyon uygulanmasını sağlayacak enerji düzeyini oluşturacak şekilde dikkatle seçilir.



Şekil 5. Defibrilatör



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Aynı miktarda elektrik yüküne sahip farklı iletkenler neden farklı elektrik potansiyellerine sahip olabilir? Bu durum elektriksel sığa ile nasıl ilişkilidir? Bir iletkenin elektriksel sığasını belirleyen etkenler nelerdir?
2. Bir paralel levha kondansatörü, bir gerilim kaynağına bağlanarak levhaları sırasıyla $+q$ ve $-q$ yükleriyle yükleniyor. Kondansatör yüklendikten sonra gerilim kaynağı devreden çıkarılıyor. Daha sonra levhalar arasındaki uzaklık artırılıyor. Buna göre kondansatörün elektriksel sığası, levhalar üzerindeki elektrik yükü ve levhalar arasındaki gerilim nasıl değişir?
3. Yüksüz bir iletken, $2,4 \cdot 10^{-5}$ C, elektrik yükü ile yüklendiğinde elektrik potansiyeli 30 V olmaktadır. İletkenin elektriksel sığasını hesaplayınız. (Çözüm: $8 \cdot 10^{-7}$ F)
4. Bir paralel levha kondansatöründe, levhalar arasındaki elektrik alan şiddeti 1,5 MV/m'dir. Levhalar arasındaki uzaklık 2 mm olduğuna göre, kondansatörün levhaları arasındaki gerilim kaç voltur? (Çözüm: 3 kV)
5. Bir paralel levha kondansatörünün levhalarının yüzey alanı 40 cm^2 , levhalar arasındaki uzaklık 4 mm'dir. Kondansatör 120 V'luk sabit bir gerilim kaynağına bağlanmıştır. Levhalar arasındaki uzaklık 1 mm artırılırsa, levhalar üzerinde depolanan elektrik yükü kaç kat değişir? (Çözüm: $\frac{q_2}{q_1} = 0,8$)
6. Bir paralel levha kondansatörünün levhalarının yüzey alanı 200 cm^2 , levhalar arasındaki uzaklık 4 mm'dir. Başlangıçta levhalar arasında hava bulunmaktadır. Daha sonra araya bağlı dielektrik sabiti 4 olan plastik bir levha yerleştiriliyor. a) Levhalar arasında hava varken kondansatörün elektriksel sığasını hesaplayınız. b) Dielektrik yerleştirildikten sonraki elektriksel sığayı hesaplayınız. c) Dielektrik yerleştirildiğinde kondansatörün elektriksel sığası kaç kat artar? (Çözüm: 4,425 $\cdot 10^{-11}$ F, $1,77 \cdot 10^{-10}$ F, dört kat)
7. 2200 pF elektriksel sığaya sahip bir kondansatör, 220 V'luk bir gerilim kaynağına bağlanmıştır. Kondansatörde depolanan elektrik enerjisini hesaplayınız. (Çözüm: $1,016 \cdot 10^{-4}$ J)

1.6. Elektrik akımı

Statik elektrik ve cisimlerin elektriklenmesi ile ilgili olaylar eski çağlardan beri bilinmesine rağmen, elektrik ancak elektrik yükünün hareketi denetlenebildiğinde modern teknolojinin temelini oluşturmuştur. Bu nedenle, her sanayi devriminden önce önemli bilimsel keşiflerin ve teknolojik yeniliklerin gerçekleştiği söylenebilir. Her sanayi devrimi; üretim yöntemlerinde, teknolojide, ekonomik ilişkilerde ve toplumsal yaşamda köklü değişimlere yol açmıştır.

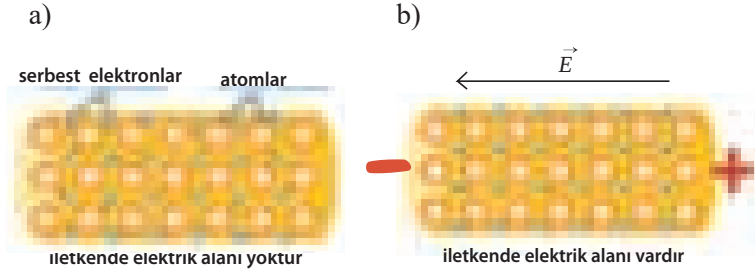
Mekanik ve termodinamik alanındaki bilimsel gelişmeler, buhar makinesinin geliştirilmesini sağlayarak **Birinci Sanayi Devrimi**'nin başlamasına öncülük etmiştir. Daha sonra elektrik ve manyetizma alanındaki bilimsel ilerlemeler, **İkinci Sanayi Devrimi**'nin temelini oluşturmuştur. Bu dönemin en önemli özelliği, elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve yaygın biçimde kullanılmaya başlanmasıdır.

Günümüzde elektrik, hem günlük yaşamın hem de canlıların temel bir parçasıdır. Elektrik yalnızca teknolojik cihazlarda değil, canlı organizmalarda da önemli bir rol oynar. İnsan vücudunda sinir uyarıları, hücre zarları boyunca iyonların hareketi sonucu oluşan elektriksel sinyallerle iletilir. Elektrik akımının etkileri ilk kez **Luigi Galvani** tarafından gözlenmiştir. Galvani, iki farklı metalin (örneğin bakır ve çinko) temas ettirilmesiyle kurbağa bacaklarının kasıldığını fark etmiş, ancak bu olayın nedenini açıklayamamıştır. Daha sonra **Alessandro Volta**, bu kasılmanın iki farklı metal arasındaki **potansiyel farkı** nedeniyle oluşan elektrik akımından kaynaklandığını göstermiştir. Volta, aralarına bir elektrolit yerleştirilen iki farklı metalin bir elektrik akımı kaynağı oluşturduğunu keşfetmiştir. Bu buluş, tarihteki ilk pil olan Volta pilinin geliştirilmesini sağlamış ve ilk yapay elektrik akımı kaynağının ortaya çıkmasına öncülük etmiştir. Luigi Galvani'nin anısına,

kimyasal tepkimeler sonucunda elektrik enerjisi üreten akım kaynaklarına galvanik hücre adı verilmiştir. Galvanik hücrelerin geliştirilmesiyle birlikte fizik ve teknolojiye yeni bir dönem başlamış, çünkü ilk kez sürekli, denetlenebilir ve kullanılabilir bir elektrik akımı elde etmek mümkün olmuştur.

Metallerde atomlar, düzenli bir kristal örgü yapısı oluşturacak şekilde dizilmiştir. En dış elektron katmanındaki elektronların bir kısmı atomdan kolayca ayrılabilir. Atomdan ayrılan bu elektronlar metal içerisinde serbestçe hareket edebilir ve serbest elektronlar olarak adlandırılır.

İletken üzerinde bir elektrik alanı bulunmadığında, serbest elektronlar rastgele (düzensiz) hareket eder (Şekil 1a). Bu elektronların hareket hızları oldukça büyüktür ve yaklaşık 10^5 m/s mertebesinde. Ancak elektronlar her yöne eşit olasılıkla hareket ettiklerinden, belirli bir doğrultuda net bir hareket oluşmaz. Bu nedenle serbest elektronların ortalama sürüklenme hızı sıfırdır ve iletken elektrik akımı geçmez.



Şekil 1. a) Metal içindeki serbest elektronların rastgele termal hareketi. b) Metal içindeki serbest elektronların yönlü hareketi

Metal bir iletken, bir elektrik akımı kaynağına (galvanik hücre, pil veya akümülatör) bağlandığında, iletkenin içinde bir elektrik alanı oluşur. Bu elektrik alanı, serbest elektronlara elektrik kuvveti uygular ve elektronların elektrik alanın yönüne zıt yönde yönlü hareket etmelerine neden olur (Şekil 1b). Metallerde serbest elektronların bu sürüklenme hızı, oldukça küçüktür ve yaklaşık 0,1 mm/s ile 1 mm/s arasında değişir. **Serbest elektronların iletken içerisindeki bu yönlü hareketi elektrik akımını oluşturur. Katı iletkenlerde (metallerde) elektrik yükü taşıyıcıları serbest elektronlardır.** Buna karşılık, elektrolitlerde ve iyonlaşmış gazlarda elektrik yükü hem iyonlar hem de elektronlar tarafından taşınır.

Elektrik Akım Şiddeti

Diğer fiziksel büyüklüklerde olduğu gibi, **elektrik akımı** da nicel olarak tanımlanabilen ve ölçülebilen bir büyüklüktür. Bu amaçla **elektrik akımı şiddeti** (kısaca **akım şiddeti**) tanımlanmıştır. Aynı zaman aralığında bir iletkenin kesitinden geçen elektrik yükü miktarı ne kadar büyükse, akım şiddeti de o kadar büyük olur. Buna göre, **elektrik akımı şiddeti**, bir iletkenin herhangi bir kesitinden **birim zamanda geçen elektrik yükü miktarı** olarak tanımlanır. Bu tanım matematiksel olarak aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$I = \frac{q}{t},$$

Burada I elektrik akımı şiddetini; q , iletkenin kesitinden geçen elektrik yükünü; t ise yükün bu kesitten geçmesi için geçen zamanı ifade eder. Burada I , **elektrik akımı şiddetini**; q , iletkenin kesitinden geçen **elektrik yükünü**; t ise bu yükün kesitten geçmesi için geçen **zamanı** ifade eder. Elektrik akımı şiddetinin SI birim sistemindeki birimi **amper (A)**'dir ve yedi temel SI biriminden biridir. **2019 yılında** SI birim sisteminin yeniden tanımlanmasıyla birlikte amper, **elementer yük (e)** ve **saniye (s)** temel alınarak tanımlanmıştır. Akım şiddeti bağıntısından, $1 \text{ A} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}}$ olduğu görülür. Buna göre **1 amper**, bir iletkenin herhangi bir kesitinden **1 saniyede 1 coulomb** elektrik yükünün geçtiği sabit elektrik akımıdır. Başka bir ifadeyle, **1 A**'lık akım, saniyede yaklaşık $6,2415 \cdot 10^{18}$ elementer yükün (elektron yükü büyüklüğünün) iletken kesitinden geçmesine karşılık gelir. Elektrik akımı şiddeti **ampermetre** adı verilen ölçü aleti ile ölçülür.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Basit bir elektrik devresindeki lambadan 2,5 A şiddetinde sabit bir elektrik akımı geçmektedir. 15 dakika boyunca lambadan geçen toplam elektrik yükünü hesaplayınız. Daha sonra devredeki lamba başka bir lamba ile değiştirilmiş ve yeni lambadan geçen akım şiddeti 1 A olmuştur. İlk durumda geçen toplam elektrik yükünün aynısının yeni lambadan geçmesi için gereken süreyi hesaplayınız.

Verilenler:

$I = 2,5 \text{ A}$,
 $t = 15 \text{ min} = 900$
 saniye,
 $I_1 = 1 \text{ A}$

İstenen:

$q - ?$
 $t_1 - ?$

Çözüm:

Akım şiddeti, iletkenen geçen elektrik yükü miktarı ile aşağıdaki bağıntı kullanılarak ifade edilir:

$$I = \frac{q}{t}$$

Bu bağıntıdan, birinci ampulden geçen elektrik yükü miktarı

$$q = I \cdot t = 2250 \text{ C} .$$

olarak bulunur. Ampul değiştirildiğinde akım şiddeti de değişecektir. İletkenen aynı miktarda elektrik yükünün geçebilmesi için gerekli süre

$$t_1 = \frac{q}{I_1} = 2250 \text{ s} = 37,5 \text{ olur.}$$



ETKİNLİK 1.

Aşağıdaki düşünce deneyini tartışınız. Aynı şiddette elektrik akımı, kesit alanları farklı olan iki metal iletkenen geçmektedir. İletkenlerden birinin kesit alanı küçük, diğerinin ise büyüktür. Elektrik akımının her iki iletken üzerindeki etkileri aynı olur mu? Gerekçenizi açıklayınız. Elektrik akımı şiddetini tanımlayan bağıntıda iletkenin geometrik özellikleri yer almakta mıdır? Konutlardaki elektrik tesisatında, priz devrelerinde genellikle **2,5 mm²** kesit alanına sahip iletkenler kullanılırken; elektrikli fırın, ocak ve elektrikli su ısıtıcısı gibi yüksek güçlü cihazların besleme hatlarında neden **4 mm²** kesit alanına sahip iletkenler tercih edilir? Açıklayınız.

Akım yoğunluğu, jile gösterilen ve bir iletkenin **birim kesit alanından geçen elektrik akımı şiddetini** ifade eden fiziksel bir büyüklüktür. Akım yoğunluğu aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

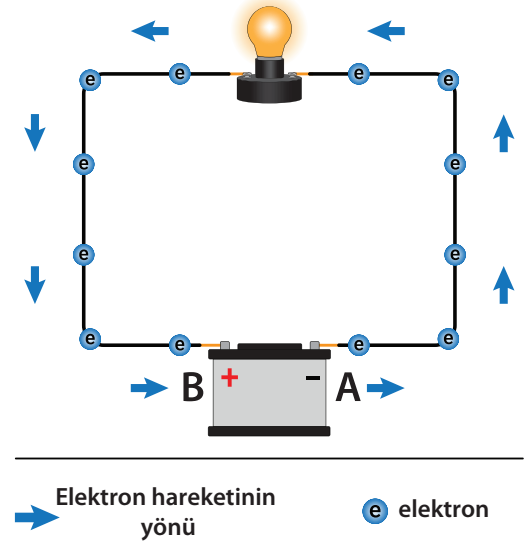
$$j = \frac{I}{S} .$$

Elektrik akımı yoğunluğunun birimi $1 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ (amper/metrekare)'dir. Bu fiziksel büyüklük; fizik, elektronik ve enerji teknolojileri alanlarında özel bir öneme sahiptir. Akım yoğunluğunun yüksek olması, iletkenlerin, elektrik tesisatlarının ve elektrikli cihazların aşırı ısınmasına ve zarar görmesine yol açabilir.

Elektrik Akımı Kaynakları ve Elektromotor Kuvvet (EMK)

Bir iletkenen elektrik akımının geçebilmesi için iletkenin uçları arasında bir potansiyel farkı (gerilim) bulunmalıdır. İletkenin uçları farklı potansiyellere getirildiğinde, serbest elektronlar düşük potansiyelden yüksek potansiyele doğru hareket etmeye başlar. Ancak bu hareket kısa süre devam eder. Çünkü elektronların yeniden dağılması sonucunda potansiyel farkı giderek azalır ve bir süre sonra sıfır olur. Böylece elektrik akımı da kesilir. Elektrik akımının sürekli akabilmesi için iletkenin uçları arasındaki potansiyel **farkının sürekli korunması** gerekir. Uçları arasında sürekli bir potansiyel farkı oluşturan ve bunu koruyan düzeneklere **elektrik akımı kaynağı** denir. Elektrik akımı kaynağı, devrede hareket eden yük taşıyıcılarının devre elemanlarına aktardığı enerjiyi sürekli olarak yeniler. Başka bir ifadeyle, kaynak kendi içinde farklı enerji türlerini elektrik enerjisine dönüştürerek yük taşıyıcılarına enerji kazandırır ve böylece devrede elektrik akımının sürekli akmasını sağlar.

En yaygın elektrik akımı kaynakları; galvanik hücre, pil, akümülatör, elektrik jeneratörü ve güneş pili (fotovoltaik hücre). Galvanik hücrelerde, pillerde ve akümülatörlerde elektrotlar arasındaki potansiyel farkı, kaynak içinde gerçekleşen kimyasal tepkimeler sonucunda oluşur. Elektrik jeneratörlerinde ise iletkenin manyetik alan içinde hareket ettirilmesiyle elektromanyetik indüksiyon sonucu potansiyel farkı oluşturulur. Buna göre, galvanik hücrelerde, pillerde ve akümülatörlerde kimyasal enerji elektrik enerjisine, elektrik jeneratörlerinde ise mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Güneş pilleri (fotovoltaik hücreler) ise ışık enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Şekil 2, bir elektrik akımı kaynağı, bir alıcı (yük) ve bağlantı iletkenlerinden oluşan kapalı bir elektrik devresini göstermektedir. Devrede A noktası daha düşük, B noktası ise daha yüksek elektrik potansiyeline sahiptir. İletken içerisindeki elektrik alanın etkisiyle serbest elektronlar A noktasından B noktasına doğru hareket eder.



Şekil 2. Basit bir devrenin şeması

Her elektrik akımı kaynağının en önemli karakteristik büyüklüklerinden biri, elektromotor kuvvet (EMK) olup e ile gösterilir. Buradaki "kuvvet" sözcüğü yanıltıcı olabilir; çünkü elektromotor kuvvet, mekanik anlamda bir kuvvet değildir.

Elektromotor kuvvet (EMK), bir akım kaynağının birim pozitif yükü (1 C) kaynak içinde negatif kutbundan pozitif kutbuna taşımak için yaptığı işe eşit olan fiziksel büyüklüktür.

$$\varepsilon = \frac{A}{q}$$

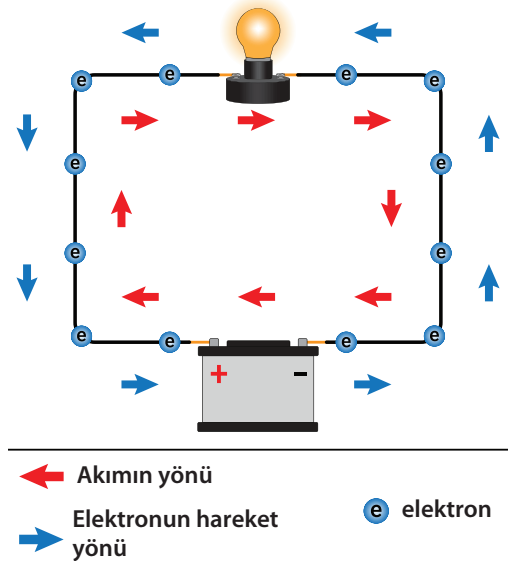
Elektromotor kuvvetin (EMK) birimi, gerilim birimi ile aynıdır ve volt (V) ile ifade edilir. Elektromotor kuvvet, devre açıkken, yani akım kaynağından elektrik akımı geçmezken, kaynağın uçları arasında ölçülen en büyük gerilim değeridir. Devre kapatılıp elektrik akımı akmaya başladığında ise akım kaynağının sağladığı enerji yalnızca devrenin dış elemanlarına değil, kaynağın iç direncinde de harcanır. Bu nedenle, akım geçerken kaynağın uçları arasındaki gerilim, elektromotor kuvvet değerinden daha küçük olabilir.

Elektrik Akımının Yönü

Bilim insanları, elektron keşfedilmeden yaklaşık bir yüzyıl önce elektrik akımını incelemeye ve kullanmaya başlamışlardır. O dönemde, elektrolitlerde elektrik akımının pozitif ve negatif iyonlar tarafından taşındığı biliniyordu. Ancak metallerde elektrik akımını taşıyan parçacıkların ne olduğu henüz bilinmiyordu.

Bu nedenle bilim insanları, elektrik akımının yönünü ortak bir kabulle tanımlamışlardır. Buna göre, elektrik akımının yönü, devrenin dış kısmında akım kaynağının pozitif kutbundan negatif kutbuna doğru kabul edilir. Bu yön, geleneksel akım yönü olarak adlandırılır.

Daha sonra metallerde elektrik yükünü taşıyan parçacıkların negatif yüklü elektronlar olduğu keşfedilmiştir. Elektronlar, devrenin dış kısmında akım kaynağının negatif kutbundan pozitif kutbuna doğru hareket eder. Dolayısıyla, elektronların hareket yönü, geleneksel olarak ka-

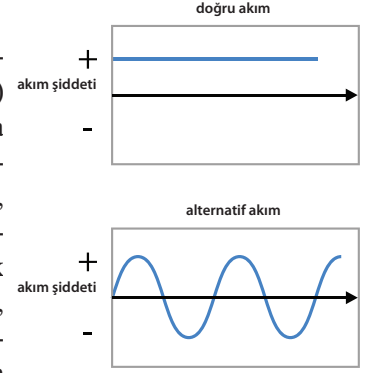


Şekil 3. Akımın yönü ve serbest elektronların yönü

bul edilen elektrik akımı yönünün tersidir. Elektronların gerçek hareket yönü, geleneksel olarak tanımlanan elektrik akımı yönünün tersidir. Ancak tarihsel nedenlerle, başlangıçta kabul edilen bu yön günümüzde de kullanılmaya devam etmektedir. Bu yön, geleneksel akım yönü veya teknik akım yönü olarak adlandırılır (Şekil 3). Bu kitapta elektrik akımı ile ilgili tüm açıklama, problem ve uygulamalarda teknik akım yönü (pozitif kutuptan negatif kutba doğru) esas alınacaktır.

Doğru Akım ve Alternatif Akım

Elektrik akımı, zamanla şiddetini, yönünü veya her ikisini birden değiştirebilir. Bu nedenle elektrik akımı doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) olmak üzere ikiye ayrılır. Doğru akım (DC, Direct Current), yönü zamanla değişmeyen elektrik akımıdır. Akım şiddeti de sabit ise sabit doğru akım olarak adlandırılır (Şekil 4a). Doğru akım kaynaklarına galvanik hücreler, piller, akümülatörler ve güneş pilleri (fotovoltaik paneller) örnek verilebilir. Alternatif akım (AC, Alternating Current) ise yönü ve şiddeti zamanla periyodik olarak değişen elektrik akımıdır. Akım, zamanın bir bölümünde bir yönde, diğer bölümünde ise ters yönde akar. Günlük yaşamda evlerimizde kullandığımız elektrik enerjisi alternatif akımdır ve elektrik şebekesi tarafından sağlanır (Şekil 4b). Doğru akım uluslararası gösterimde DC (Direct Current), alternatif akım ise AC (Alternating Current) kısaltmalarıyla ifade edilir.



Şekil 4. a) Doğru akım, b) Alternatif akım.



ETKİNLİK 2.

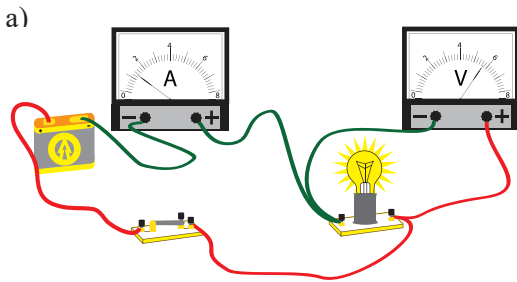
Basit elektrik devresi

Aşağıdaki devre elemanlarını kullanarak basit bir elektrik devresi kurunuz: bir gerilim kaynağı (1,5 V veya 9 V pil), bir anahtar, bir alıcı (yük) ve bağlantı iletkenleri (Şekil 5a). Alıcı olarak farklı ampuller, küçük bir elektrik motoru, fan veya benzeri elektrikli elemanlar kullanılabilir. Ayrıca bir ampermetre ve bir voltmetre de kullanınız.

Ampermetre, akım şiddetini ölçeceği devre elemanına seri bağlanır. Voltmetre ise gerilimini ölçeceği devre elemanına paralel bağlanır ve uçları arasındaki gerilimi ölçer.

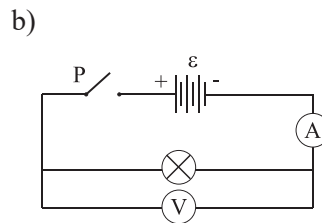
Öncelikle, devre açıkken voltmetre ile gerilim kaynağının elektromotor kuvvetini (EMK) ölçünüz. Daha sonra devreyi kapatarak alıcının uçları arasındaki gerilimi ölçünüz ve elde ettiğiniz değeri kaynağın EMK'si ile karşılaştırınız. Ölçülen değerler aynı mıdır? Farklı ise bunun nedenlerini tartışınız.

Ardından, bir multimetreyi ampermetre olarak kullanarak devreden geçen elektrik akımı şiddetini ölçünüz. Aynı ölçümü devrenin farklı noktalarında (örneğin anahtarın önünde ve arkasında) tekrarlayınız. Ölçülen akım şiddeti değerleri aynı mıdır, yoksa farklı mıdır? Sonuçlarınızı yorumlayınız.



Şekil 5. a) Bir pil, bir lamba, bir anahtar, bir ampermetre ve bir voltmetreden oluşan basit bir devre, b) devre şeması

Gerçek elektrik devreleri, basitleştirilmiş bir şema veya devre şeması ile gösterilebilir. Bunu yaparken, elemanları temsil etmek için semboller kullanınız.



Şemalar, Şekil 5b'de gösterildiği gibi bileşenlerin devrede nasıl bağlandığını açıkça gösterir. Elektrik şemalarında, devredeki bileşenleri temsil etmek için Şekil 6'da gösterilen sembollerini kullanınız.



DAHA FAZLA ÖĞREN



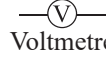
Anahtar

Galvanik
Hücre

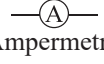
Batarya



Ampul



Voltmetre



Ampermetre

Şekil 6. Devre elemanlarının sembolleri

Elektrik akımı şiddeti, bir iletkeninden geçen elektrik akımının büyüklüğünü ifade eden temel bir fiziksel büyüklüktür. Akım yoğunluğu ise, iletkenin birim kesit alanından geçen akım miktarını gösterir ve iletkenlerin ısınması, elektriksel güvenlik ve elektrikli cihazların çalışması açısından büyük önem taşır. Akım yoğunluğunun gereğinden büyük olması, iletkenlerde aşırı ısınmaya, yalıtımın zarar görmesine ve elektrik devrelerinde arızalara neden olabilir. Buna karşılık, uygun akım yoğunluğunun seçilmesi elektrik sistemlerinin güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasını sağlar. Elektrik akımı şiddeti ve akım yoğunluğu, makroskobik düzeyde

tanımlanan ve ölçülebilen fiziksel büyüklüklerdir. Akım yoğunluğu, doğrudan ölçülmesi kolay olmayan mikroskobik büyüklüklerle ilişkilidir. Bu ilişki aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$\vec{j} = ne\vec{v},$$

Burada n , serbest yük taşıyıcılarının sayı yoğunluğunu (birim hacimdeki yük taşıyıcı sayısını) ifade eder ve $n = \frac{N}{V}$ bağıntısıyla tanımlanır. SI birim sistemindeki birimi m^{-3} 'tür v ise serbest yük taşıyıcılarının ortalama sürüklenme hızını ifade eder.

Bu bağıntı, metallerin neden iyi birer elektrik iletkeni olduğunu açıklar. Metallerde serbest elektronların ortalama sürüklenme hızı oldukça küçük olmasına rağmen, serbest elektronların sayı yoğunluğu çok büyüktür. Bu nedenle metaller elektrik akımını etkin bir şekilde iletebilir.

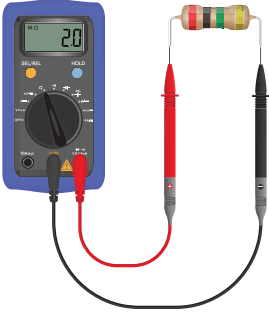


SORULAR VE ÖDEVLER

1. Serbest elektronların rastgele (kaotik) hareketi neden elektrik akımı oluşturmaz?
2. Bir iletkeninden elektrik akımının geçebilmesi için hangi koşulların sağlanması gerekir?
3. Elektrik alanı ile elektrik akımı arasındaki ilişkiyi açıklayınız.
4. Bir elektrikli ısıtıcıdan 8 dakika boyunca 2,5 A şiddetinde sabit elektrik akımı geçmektedir.
 - a) Isıtıcıdan geçen toplam elektrik yükünü hesaplayınız. (Çözüm: 1200 C)
 - b) Isıtıcıdan geçen toplam elektron sayısını hesaplayınız. (Elektronun yükü $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C) (Çözüm: $7,5 \cdot 10^{21}$ elektron)
6. Bir lambadan 3 dakika boyunca 0,8 A şiddetinde sabit elektrik akımı geçmektedir. Daha sonra anahtar ayarlanarak lambanın parlaklığı artırılıyor ve lambadan 30 saniye boyunca 1,5 A şiddetinde akım geçiyor. Buna göre lambadan geçen toplam elektrik yükünü hesaplayınız. (Çözüm: 189 C)

1.5. Elektriksel Sığa (Kapasite) ve Kondansatörler

Elektrik akımı, serbest yük taşıyıcılarının bir iletken içerisindeki yönlü hareketidir. Ancak bu hareket tamamen engelsiz gerçekleşmez. Mikroskobik düzeyde, metal iletkenlerde serbest elektronlar hareket ederken sürekli olarak kristal örgüdeki atomlar ve iyonlarla etkileşime girer. Ayrıca kristal örgü kusurları ve safsızlık atomlarıyla da karşılaşılır. Bu olay, klasik anlamda bir çarpışmadan çok, serbest elektronların kristal örgüdeki iyonlar ve bağlı elektronlarla etkileşmesi şeklinde gerçekleşir. Bu etkileşim sırasında serbest elektronlar kinetik enerjilerinin bir bölümünü kristal örgüye aktarır. Aktarılan enerji, iletkenin **iç enerjisini** artırır ve bunun sonucunda iletken **ısınır**. Bir malzemenin, serbest yük taşıyıcılarının yönlü hareketine karşı

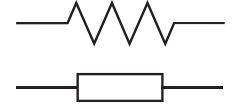


gösterdiği bu zorluğa **elektrik direnci** denir. Elektrik direnci *R* ile gösterilir. Elektrik direncinin SI birim sistemindeki birimi ohm (Ω)'dur. Bu birim, elektrik akımı ile gerilim arasındaki ilişkiyi ortaya koyan Alman fizikçi Georg Simon Ohm'un anısına adlandırılmıştır. Uygulamada kiloohm ($k\Omega$) ve megaohm ($M\Omega$) gibi daha büyük birimler de yaygın olarak kullanılır. Elektrik direnci, ohmmetre adı verilen ölçü aleti ile ölçülür (Şekil 1).

Şekil 1. Ohmmetre ile elektrik direncinin ölçülmesi

Dirençler

Bazı malzemelerin serbest elektronların hareketine karşı gösterdiği direnç özelliğinden yararlanılarak direnç (rezistör) adı verilen devre elemanları üretilir. Direnç, elektrik devrelerinde elektrik akımının şiddetini sınırlandırmak ve kontrol etmek amacıyla kullanılan temel devre elemanlarından biridir. Devreye uygun değerde bir direnç bağlanarak akım şiddeti azaltılabilir. Böylece devredeki diğer elemanlar aşırı akımdan, aşırı ısınmadan ve olası hasarlardan korunur. Ayrıca dirençler, elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştürme özelliklerinden dolayı elektrikli ısıtıcılar, ütüler, saç kurutma makineleri, elektrikli sobalar ve benzeri birçok ısıtma cihazının temel bileşenleri arasında yer alır. Elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüştürüldüğü elektrikli ısıtıcılar, su ısıtıcıları (kazanlar), elektrikli sobalar ve benzeri cihazlarda, ısı üretmek amacıyla kullanılan özel direnç elemanları bulunur. Bu tür dirençlere ısıtıcı direnç veya ısıtıcı eleman denir. Günümüzde, elektrik akımını düzenleyen veya sınırlayan direnç elemanları bulunmayan elektronik ya da elektrikli cihaz neredeyse yoktur. Şekil 2'de, elektrik devre şemalarında dirençleri göstermek için kullanılan standart devre sembolleri verilmiştir.



Şekil 2. Direnç sembolleri

Direnç Türleri



ETKİNLİK 1.

Ohmmetre ile direnç ölçümü (doğrudan yöntem)

CDirenç ölçme özelliğine sahip bir dijital multimetre veya analog bir ohmmetre kullanarak çeşitli dirençlerin ve elektrikli alıcıların dirençlerini ölçünüz. Direnci doğrudan ölçebilmek için, ölçülecek direnç veya potansiyometre devreden çıkarılmalı ve bağlantı uçları açıkta bırakılmalıdır. Ölçüme başlamadan önce, ölçü aletinin direnç ölçme kademesini, ölçülmesi beklenen direnç değerinden daha yüksek bir değere ayarlayınız. Daha sonra ölçü aletinin iki probunu direnç veya potansiyometrenin bağlantı uçlarına dokundurarak direnç değerini okuyunuz. Şekil 1'de gösterildiği gibi, farklı değerlerde birkaç sabit direncin, farklı güçlerde birkaç ampulün, bir parça direnç telinin ve uzun bir iletken telin elektrik dirençlerini ölçünüz. Ölçüm sonuçlarını karşılaştırarak dirençlerin hangi etkenlere bağlı olduğunu tartışınız.

Dirençler, direnç değerlerinin değiştirilebilmesine göre sabit dirençler ve değişken dirençler olmak üzere iki gruba ayrılır. Sabit dirençlerde direnç değeri üretim sırasında belirlenir ve sonradan değiştirilemez. Elektrik ve elektronik devrelerde en yaygın kullanılan direnç türüdür. Sabit dirençlerin üzerinde direnç değerini gösteren renk kodları veya sayısal işaretler bulunur ve farklı malzemelerden çeşitli yapılarla üretilirler. Değişken dirençler ise devredeki direnç değerinin istenildiği gibi ayarlanmasına olanak sağlar. Böylece devredeki akım şiddeti veya belirli bir devre bölümündeki gerilim kontrol edilebilir. En yaygın değişken direnç türü, üzerinde hareketli bir sürgü bulunan sargılı telden oluşan sürgülü dirençtir (Şekil 3a). Bu dirençler üç bağlantı ucuna sahiptir. Değişken direnç, devreye bağlanma şekline göre iki farklı amaçla kullanılabilir: Potansiyometre: Direncin iki ucu ile hareketli sürgüsü devreye bağlanır. Bu bağlantı şekli, devrenin belirli bir bölümündeki gerilimi ayarlamak için kullanılır (Şekil 3b). Reosta: Direncin bir ucu ile hareketli sürgüsü devreye bağlanır.

Bu bağlantı şekli, devreden geçen akım şiddetini ayarlamak veya sınırlandırmak için kullanılır (Şekil 3c).

Doğrusal bir iletkenin elektrik direnci

Diğer boyutlarına göre uzunluğu çok daha fazla olan iletkenler, elektrik mühendisliğinde büyük önem taşır. Tüm uzunluğu boyunca kesit alanı sabit olan bu tür homojen metal iletkenlere doğrusal iletken denir. İletkenin uzunluğu (l), elektrik direncini önemli ölçüde etkiler. İletken uzadıkça, serbest elektronların kat etmesi gereken yol uzar ve kristal örgü ile etkileşme olasılığı artar. Bu nedenle, iletkenin uzunluğu arttıkça elektrik direnci de artar. İletkenin kesit alanı (S) da elektrik direncini etkileyen önemli bir etkidir. Kesit alanı büyüdükçe, serbest elektronların hareket edebileceği alan artar. Bu nedenle, kesit alanı arttıkça elektrik direnci azalır. Uzunluğu l , kesit alanı S olan, sıcaklığı sabit tutulan homojen bir iletkenin elektrik direnci aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

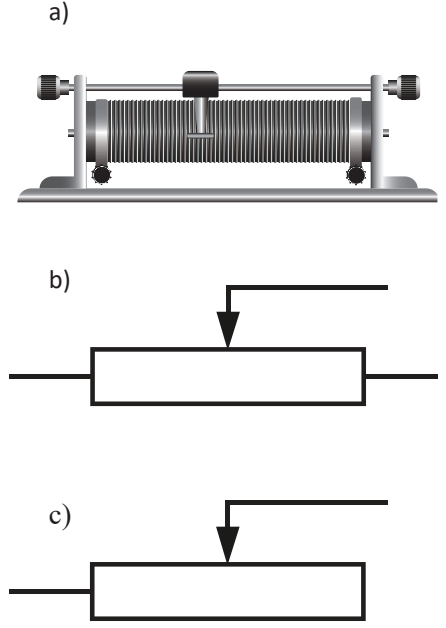
Burada ρ , malzemenin öz direncini (özgül elektrik direncini) ifade eder. Öz direnç, bir malzemenin elektrik akımına karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür.

Gümüş ve bakır gibi metaller, öz dirençleri düşük olduğu için elektrik tesisatlarında iletken olarak kullanılır. Buna karşılık, kauçuk, plastik ve porselen gibi yalıtkan malzemelerin öz dirençleri çok yüksektir. Bu nedenle bu malzemeler elektrik akımını çok zor iletir ve elektrik yalıtımında kullanılır. Öz direnç bağıntısından, büyüklüklerin SI birim sistemindeki birimleri yerine yazıldığında, öz direncin biriminin ohm metre ($\Omega \cdot m$) olduğu görülür. Tablo 1'de çeşitli malzemelerin öz direnç değerleri verilmiştir.

Malzeme (iletken)	Öz direnç ($\Omega \cdot m$)	Malzeme (yarı iletken)	Öz direnç ($\Omega \cdot m$)	Malzeme (yalıtkan)	Öz direnç ($\Omega \cdot m$)
gümüş	$1,6 \cdot 10^{-8}$	karbon	$3,5 \cdot 10^{-5}$	kuru odun (kayın, meşe)	$10^9 - 10^{12}$
bakır	$1,7 \cdot 10^{-8}$	germanyum	0,5	kalay	$10^{11} - 10^{15}$
demir	$9,7 \cdot 10^{-8}$	silikon	20-2300	sert kauçuk	$10^{13} - 10^{16}$

Tablo 1. Bazı malzemelerin öz direnci: 20°C sıcaklıkta iletkenler, yarı iletkenler ve yalıtkanlar.

Yarı iletkenlerin öz direnci, saflık derecesine ve içerdiği katkı (safsızlık) atomlarının miktarına bağlı olarak değişir. Yalıtkan malzemelerde ise öz direnç, nem miktarından önemli ölçüde etkilenir. Örneğin, tabloda verilen kayın ve meşe odununa ait öz direnç değerleri yaklaşık %10 nem içeriğine karşılık gelmektedir. Mika ve kauçuk gibi yalıtkanlarda ise öz direnç; nemin yanı sıra malzemedeki safsızlıklara, yaşlanmaya ve diğer çevresel etkenlere bağlı olarak değişebilir.



Şekil 3.

- a) Sürgülü(kayar) direnç,
b) Potansiyometre,
c) Reosta



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Bir elektrik tesisatında kullanılmak üzere, öz direnci $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, çapı 1,5 mm ve uzunluğu 120 m olan bir bakır iletken seçilmiştir. Projede, iletkenin elektrik direncinin $1,1 \Omega$ 'u geçmemesi gerektiği belirtilmiştir. Verilen özelliklere sahip bakır iletkenin elektrik direncini hesaplayınız. Hesaplanan direnç izin verilen değeri aşıyorsa, aynı malzemeden ve aynı uzunlukta kullanılacak iletkenin direncinin $1,1 \Omega$ 'u aşmaması için çapı en az kaç milimetre olmalıdır?

Verilenler:

$$\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m,$$

$$d = 1,5 \text{ mm} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

$$l = 120 \text{ m}, R_{\max} = 1,1 \Omega$$

İstenen:

$$R - ?, d_1 - ?$$

Çözüm:

İletkenin enine kesit alanı, çapı dolan bir dairenin alanına eşittir.

Bu nedenle: $S = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4}$. u ifade elektrik direnci bağıntısında yerine yazıldığında, telin direnci için: $R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{4l}{\pi d^2} = 1,15 \Omega$ sonucu elde edilir.

Hesaplanan değerden, telin direncinin izin verilen en büyük direnç değerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu nedenle, direnci $1,1 \Omega$. olacak başka bir telin çapını hesaplamamız gerekir.

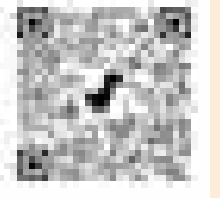
Bu telin çapı için aşağıdaki ifade elde edilir: $d_1 = 2 \sqrt{\frac{\rho \cdot l}{\pi R_{\max}}}$
Sayısal değerler yerine yazıldığında telin çapı: $d_1 = 1,54 \text{ mm}$.



ETKİNLİK 2.

Doğrusal Bir İletkenin Direncini Etkileyen Etkenler

Phet simülasyonu "Bir Teldeki Direnç", (<https://phet.colorado.edu/mk/simulations/resistance-in-a-wire>) kullanarak, telin malzemesi, uzunluğu ve kesit alanındaki değişikliklerin telin elektrik direncini nasıl etkilediğini belirleyin. Simülasyonda gösterilen görselleştirme ve değerlerden yararlanarak, bu parametreler değiştirildiğinde iletkenin elektrik direncinin nasıl değiştiğini gözlemleyiniz. Ardından, elektrik direncinin iletkenin fiziksel özelliklerine ve geometrik özelliklerine nasıl bağlı olduğunu açıklayınız.



Dirençin Sıcaklığa Bağlılığı

Özdirenç, bir malzemenin karakteristik bir özelliğidir ve belirli bir sıcaklıkta belirli bir değere sahiptir. Ancak sıcaklık değiştiğinde, malzemenin öz direnci de değişir.

Doğrusal bir iletkenin direnç bağıntısına göre, elektrik direnci; iletkenin uzunluğuna, kesit alanına ve öz direncine bağlıdır. Sıcaklık değiştiğinde iletkenin uzunluğu ve kesit alanındaki değişim genellikle çok küçük olduğundan ihmal edilir. Bu nedenle, dirençte meydana gelen değişim esas olarak öz dirençteki değişimden kaynaklanır.

Metallerde, sıcaklık arttıkça kristal örgüdeki atomların titreşim genliği artar. Bunun sonucunda serbest elektronların atomlarla etkileşimi artar ve elektronların hareketi zorlaşır. Bu nedenle, metallerin elektrik direnci sıcaklık arttıkça artar.

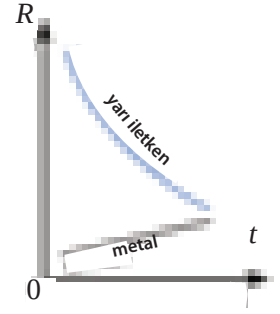
Geniş bir sıcaklık aralığında, metallerin elektrik direncinin sıcaklığa bağlılığı yaklaşık olarak doğrusaldır ve aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$R = R_0 (1 + \alpha t),$$

Burada R , t sıcaklığındaki iletkenin direncini; R_0 ise 0°C 'deki direncini ifade eder. α , malzemenin direncin sıcaklık katsayısı olup birimi $^\circ\text{C}^{-1}$ 'dir.

Metallerde α değeri pozitif olduğundan sıcaklık arttıkça elektrik direnci artar. Yarı iletkenlerde ise α değeri negatiftir. Bu nedenle sıcaklık arttıkça yarı iletkenlerin elektrik direnci azalır. Bir metal ve bir yarı iletken için elektrik direncinin sıcaklığa bağlılığı Şekil 4'te gösterilmiştir.

Elektrik direncinin sıcaklığa bağlılığı, teknoloji ve günlük yaşamda birçok uygulama alanına sahiptir. Bu özellik, sıcaklıktaki değişimin direnci değiştirmesi ilkesine dayanan direnç termometrelerinde sıcaklık ölçümünde kullanılır. Termostatlar ve otomatik sıcaklık kontrol sistemleri de aynı ilkeye göre çalışır. Ayrıca, elektrikli cihazların ve iletkenlerin sıcaklığı, direnç değişimi ölçülerek dolaylı olarak izlenebilir. Bu sayede cihazların güvenli çalışması sağlanır ve aşırı ısınmaya karşı korunmaları mümkün olur.



Şekil 4. Metal ve Yarı iletkenlerde Elektrik Direncinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Süperiletkenlik

Sıcaklık belirli bir kritik sıcaklığın (T_k) altına düştüğünde, bazı malzemelerin öz direnci ve dolayısıyla elektrik direnci sıfıra iner. Bu tür malzemelere süperiletken, bu olaya ise süperiletkenlik denir. Çoğu malzeme süperiletkenlik, mutlak sıfıra yakın, yani yalnızca birkaç kelvin üzerindeki sıcaklıklarda ortaya çıkar. Süperiletken malzemeler, elektrik akımının enerji kaybı olmadan iletilmesini sağlar. Bu nedenle süperiletkenlik, sıradan iletkenlerden farklı bir elektriksel davranış olup maddenin özel bir fiziksel durumunu temsil eder. Keşfedilen ilk süperiletkenler cıva ve kurşun gibi metallerdir. Bu metaller ancak mutlak sıfıra çok yakın sıcaklıklarda süperiletken hâle gelir. Daha sonra, yaklaşık $(90-135)$ K sıcaklık aralığında süperiletkenlik gösteren bazı seramik malzemeler de keşfedilmiştir. Bu malzemeler yüksek sıcaklık süperiletkenleri olarak adlandırılır. Süperiletkenler günümüzde birçok ileri teknoloji uygulamasında kullanılmaktadır. Elektrik dirençlerinin sıfır olması sayesinde çok güçlü ve kararlı manyetik alanlar oluşturabilirler. Bu nedenle manyetik rezonans (MR) cihazlarında, manyetik kaldırma (maglev) trenlerinde, parçacık hızlandırıcılarında, kuantum bilgisayarlarında ve diğer birçok ileri teknoloji uygulamasında kullanılmaktadırlar.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

25°C sıcaklıkta elektrik direnci $0,85\ \Omega$ olan bir gümüş tel, çalışma sırasında 125°C sıcaklığa ulaşan bir cihazda kullanılmaktadır. Gümüşün direncin sıcaklık katsayısı $0,0038\ ^\circ\text{C}^{-1}$ 'dir. a) Telin 125°C 'deki elektrik direncini hesaplayınız. b) Telin elektrik direncinin $2,1\ \Omega$ olabilmesi için sıcaklığının kaç $^\circ\text{C}$ olması gerektiğini hesaplayınız.

Verilenler:

$$R_1 = 0,85\ \Omega, \quad t_1 = 25^\circ\text{C}, \quad t_2 = 125^\circ\text{C}, \\ \alpha = 0,0038\ ^\circ\text{C}^{-1}, \quad R_3 = 2,1\ \Omega$$

İstenen:

$$\text{a) } R_2 = ?, \quad \text{b) } t_1 = ?.$$

Çözüm:

a) Telin direncinin sıcaklığa bağlı olarak değişimini gösteren formüle göre, iki farklı sıcaklıktaki telin direncini şu şekilde yazabiliriz: $R_1 = R_0 (1 + \alpha t_1)$, $R_2 = R_0 (1 + \alpha t_2)$. Telin

0°C 'deki direncini ilk denklemden bulup ikinci denklemin yerine koyarsak, şu sonuçları elde ederiz:

$$R_2 = \frac{R_1}{(1 + \alpha t_1)} (1 + \alpha t_2) = 1,17\ \Omega.$$

b) Telin direncinin $R_3 = 2,1 \, \Omega$ olacağı sıcaklığı bulmak için şunu yazarız denklem $R_3 = R_0(1 + \alpha t_3)$, bunlardan sıcaklık için şu sonucu elde: $t_3 = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_3}{R_0} - 1 \right)$. Telin direncini a) durumundaki gibi 0°C olarak ayarlayıp bunu son denklemin yerine koyarsak, şu sonucu elde ederiz:

$$t_3 = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_3}{R_1} (1 + \alpha t_1) - 1 \right) = 412 \, ^\circ\text{C}.$$

DAHA FAZLA ÖĞREN



Özdirencin tersine eşit olan fiziksel büyüklüğe öziletkenlik denir.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

Öziletkenlik, σ (sigma) ile gösterilir ve SI birim sistemindeki birimi siemens/metre (S/m)'dir. Bu birim, $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ile eşdeğerdir. Öziletkenlik, bir malzemenin elektrik akımını iletme yeteneğini gösteren karakteristik bir özelliktir. σ değerinin büyük olması, malzemenin iyi bir elektrik iletkeni olduğunu gösterir. Öziletkenlik, aşağıdaki bağıntıda orantı katsayısı olarak yer alır:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$$

Bu bağıntıya göre, akım yoğunluğu, iletkendeki elektrik alan şiddeti ile doğru orantılıdır.

Bu ifade, malzemenin mikroskobik özelliklerinin (öziletkenlik) makroskobik bir büyüklük olan akım yoğunluğunu belirlediğini gösterir. Dolayısıyla elektrik akımı, tek başına ortaya çıkan bir olgu değildir. Elektrik akımı, malzeme içindeki yük taşıyıcılarının elektrik alanın etkisiyle yönlü hareket etmelerinin sonucudur. Kapalı bir elektrik devresi kurulduğunda, elektrik alan devre boyunca çok kısa sürede oluştuğu için elektrik akımının etkileri hemen gözlenir. Örneğin, bir anahtar kapatıldığında lambanın hemen yanması bunun bir sonucudur.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Elektrik akımı kablolardan geçtiğinde kablolar neden ısınır?
2. Bir saç kurutma makinesi, elektrik devresine bağlandığında havayı nasıl hızlı bir şekilde ısıtır?
3. $3,5 \, \Omega$ dirençli bir direnç yapmak için, kesit alanı $0,8 \, \text{mm}^2$ olan bir bakır tel gereklidir. Bakırın özdirenci $1,7 \cdot 10^{-8} \, \Omega \cdot \text{m}$ ise, ne kadar uzunlukta tel gereklidir? (Çözüm: $l = 165 \, \text{m}$)
4. Kesit alanı $4 \, \text{mm}^2$ olan iletken bir bakır tel, iletken bir alüminyum tel ile değiştirilecek, ancak iletkenin toplam direnci aynı kalmalıdır. Bakırın özdirenci $1,7 \cdot 10^{-8} \, \Omega \cdot \text{m}$ ve alüminyumun özdirenci $2,8 \cdot 10^{-8} \, \Omega \cdot \text{m}$ ise, alüminyum telin kesit alanı neye eşit olmalıdır? (Çözüm: $S = 6,6 \, \text{mm}^2$)
5. İki iletken farklı malzemelerden yapılmıştır. İlk malzemenin direnci, ikinci malzemenin direncinin iki katıdır. Kesit alanı ikincisinin kesit alanından üç kat daha büyüktür. İkinci iletkenin uzunluğu $5 \, \text{m}$ ise, elektrik dirençlerinin eşit olması için birinci iletkenin uzunluğunun ne kadar olması gerektiğini belirleyiniz (Çözüm: $l_1 = 7,5 \, \text{m}$)

6. Bir elektrik ampulünün tungsten telinin elektrik direnci, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta $18,0\text{ }\Omega$ 'dur. Tungstenin direncin sıcaklık katsayısı $0,0045\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ olduğuna göre, telin elektrik direnci $96,0\text{ }\Omega$ olduğunda sıcaklığı kaç $^{\circ}\text{C}$ olur? (Çözüm: $t = 1263\text{ }^{\circ}\text{C}$)

1.8. Devrenin Bir Bölümü ve Tamamı İçin Ohm Yasası

XIX yüzyılın ilk yarısında Alman fizikçi Georg Simon Ohm, yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda günümüzde Ohm yasaları olarak bilinen yasaları ortaya koymuştur. Birinci Ohm Yasası, bir elektrik devresinin bir bölümü için geçerlidir ve bir devre elemanının uçları arasındaki gerilim, üzerinden geçen akım şiddeti ve direnci arasındaki ilişkiyi açıklar. İkinci Ohm Yasası ise tam bir elektrik devresi için geçerlidir. Bu yasa, devrede bulunan pasif elemanların yanı sıra elektromotor kuvvet (EMK) kaynağını da kapsar. EMK kaynağı; galvanik hücre, pil, akümülatör, jeneratör, güneş pili veya başka bir elektrik enerjisi kaynağı olabilir. Elektrik devresindeki pasif elemanlar, elektrik enerjisini ısı, ışık ve mekanik enerji gibi diğer enerji türlerine dönüştürür. Aktif elemanlar ise kimyasal, mekanik veya ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek devreye enerji sağlar. Georg Simon Ohm'un elektrik alanına yaptığı katkılardan dolayı, SI birim sisteminde elektrik direncinin birimi onun anısına ohm (Ω) olarak adlandırılmıştır.



ETKİNLİK 1.

Gerilim ve akım şiddeti arasındaki ilişkiyi araştırma.

Bir güç kaynağı, bir anahtar, bir direnç, bir ampermetre ve bir voltmetreden oluşan basit bir devre kurun. Şekil 1'de gösterildiği gibi, ampermetreyi dirençle seri, voltmetreyi ise dirençle paralel bağlayın. Voltmetre tarafından gösterilen direnç üzerindeki belirli bir gerilim için, ampermetre tarafından gösterilen dirençten geçen akımı okuyun. Verileri Tablo 1'e girin.

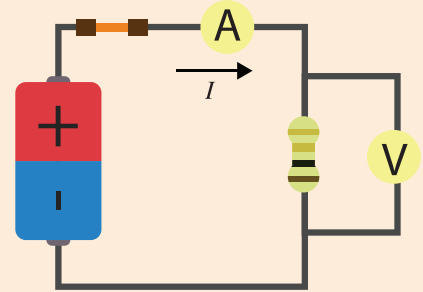
Kaynağın elektromotor kuvvetini birkaç kez değiştirin,

Galvanik hücreleri seri bağlayarak veya bir potansiyometre kullanarak elektromotor kuvveti değiştiriniz. Elektromotor kuvvetinin her bir değeri için voltmetre ve ampermetre okumalarını kaydediniz ve elde ettiğiniz değerleri tabloya yazınız. Daha sonra, direnç uçları arasındaki gerilimin akım şiddetine oranını hesaplayınız. Elde ettiğiniz sonuçları bir grafik üzerinde gösteriniz. Yatay eksene gerilimi (U), düşey eksene ise akım şiddetini (I) yerleştiriniz. Böylece $I = f(U)$ bağıntısını gösteren grafiği elde ediniz.

Direnç uçlarındaki gerilim değiştirildiğinde, akım şiddetinin nasıl değiştiğini inceleyiniz. Elde edilen grafiğin **doğru** mu yoksa **eğri** mi olduğunu belirleyiniz.

Grafikten, ΔU ile ΔI arasındaki ilişkiyi belirleyin $\frac{\Delta U}{\Delta I}$.

Ardından, Bir multimetre kullanarak, dirençten akım geçmediğinde direncin elektrik direncini ölçün ve bunu tablonun son sütunundaki sonuçların ortalama değeriyle karşılaştırın.



Şekil 1.

Akım ve gerilim arasındaki ilişkiyi incelemek için kurulan elektrik devresi.

N	$U(\text{V})$	$I(\text{A})$	$\frac{U}{I} \left(\frac{\text{V}}{\text{A}} \right)$
1.			
2.			
3.			

Tablo 1. Ölçüm sonuçları

Elektrik devresinin bir bölümü için Ohm

Ohm, yaptığı deneyler sonucunda, bir elektrik devresinin bir bölümü (iletken, direnç veya herhangi bir alıcı) için, üzerinden geçen elektrik akımı şiddetinin, uçları arasındaki gerilim ile doğru orantılı olduğu sonucuna varmıştır. Buna göre:

$$I \sim U.$$

Bu ifade, direnç üzerindeki gerilim arttıkça devrenin o kısmından geçen akımın da arttığını gösterir. Orantı sabiti, kullanılan birim sistemine bağlıdır. SI birim sisteminde bu sabit, devrenin ilgili bölümünün elektrik direncinin tersine eşittir. Buna göre, bir elektrik devresinin bir bölümü için Ohm Yasası aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$I = \frac{U}{R},$$

Sözlü olarak ifade edilirse: Bir elektrik devresinin bir bölümünden geçen elektrik akımı şiddeti, o bölümün uçları arasındaki gerilim ile doğru, elektrik direnci ile ters orantılıdır. Bu yasadan, elektrik direncinin SI birim sistemindeki birimi olan ohm (Ω) tanımlanabilir. Başka bir ifadeyle, Ohm Yasası'na göre, uçları arasına 1 V gerilim uygulandığında üzerinden 1 A akım geçen bir iletkenin veya devre elemanının direnci 1 Ω 'dur.

$$R = \frac{U}{I} \text{ ve dolayısıyla } 1 \Omega = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} \text{ değerindedir.}$$

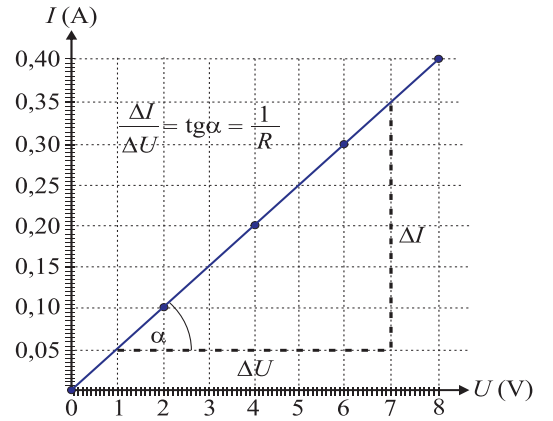
Bir iletkenin uçları arasındaki gerilim 1 volt olduğunda ve üzerinden 1 amper şiddetinde elektrik akımı geçtiğinde, o iletkenin elektrik direnci 1 ohm (Ω) olarak tanımlanır.

Etkinlik 1'de elde ettiğiniz ölçüm sonuçlarından çizdiğiniz grafik, Şekil 2'deki gibi doğrusal olmalıdır. Grafikteki doğru geriye doğru uzatıldığında, koordinat sisteminin başlangıç noktasından (orijinden) geçer.

Doğrunun eğim katsayısı $\frac{\Delta I}{\Delta U}$ direncin ters değerine eşittir; yani:

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{1}{R}.$$

Burada ΔI akımdaki ΔU değişimi, gerilimdeki değişimi, Rise direnci ifade eder. Buna göre, akım-gerilim ($I-U$) grafiğinin eğimi arttıkça direnç azalır. Bir devre elemanının (direnç, alıcı vb.) $I = f(U)$ grafiğine volt-amper karakteristiği denir. Ohm Yasası'na uyan (ohmik) devre elemanlarında bu karakteristik doğrusal olup bir doğru şeklindedir. Buna karşılık, diyot, neon lamba ve akkor flamanlı lamba gibi bazı devre elemanlarının volt-amper karakteristiği doğrusal değildir. Bu durum, bu elemanların dirençlerinin uçları arasındaki gerilime bağlı olarak değiştiğini gösterir. Bir devrenin herhangi bir bölümünden geçen akımın değiştirilmesinin yollarından biri, o bölümün uçları arasındaki gerilimi değiştirmektir. Ancak, evlerde kullanılan elektrik tesisatında olduğu gibi bazı devrelerde gerilim sabittir. Bu durumda, Ohm Yasası'na göre, akım şiddeti ancak direncin değiştirilmesiyle değiştirilebilir. Direnç; farklı bir malzeme kullanılarak, iletkenin uzunluğu veya kesit alanı değiştirilerek artırılabilir ya da azaltılabilir.

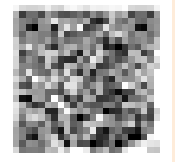


Şekil 2. $I = I(U)$ bağıntısı grafiği



ETKİNLİK 2.

Bir elektrik devresinin bir bölümü için Ohm Yasası'nı görsel olarak gösteren bir yöntem <https://phet.colorado.edu/mk/simulations/ohms-law> web sitesindeki "Ohm Yasası" adlı etkileşimli simülasyonda sunulmaktadır. Belirli bir iletken üzerinden geçen akım şiddetinin nasıl değiştirilebileceğini araştırın. Simülasyonda, önce dirençteki sabit elektrik direnci değerinde voltaj düşüşünü değiştirin ve içinden geçen akım şiddetinin



nasıl değiştiğini gözlemleyin. Ardından, direnç uçları arasında sabit bir gerilim varken, direncin değerini değiştirin ve akım şiddetindeki değişiklikleri tekrar kaydedin.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

55 Ω dirençli bir alıcı, 24 V gerilimli bir kaynağa bağlanmıştır.

- Alıcıdan geçen elektrik akımının şiddetini hesaplayınız.
- Direnç değerinin sabit kaldığını kabul ederek, alıcıdan 1 A akım geçmesi için uçları arasında uygulanması gereken gerilimi hesaplayınız.

Verilenler:

$$R = 55 \Omega, U = 24 \text{ V}, I_1 = 1 \text{ A}$$

İstenen:

- $I - ?$, b) $U_1 - ?$

Çözüm:

a) Devrenin bir bölümü için Ohm kanununa göre, $I = \frac{U}{R}$
Tüketiciden geçen akım şiddeti şu şekilde bulunur $I = 0,44 \text{ A}$.

b) Ayrıca, Ohm yasasından $U_1 = I \cdot R = 55 \text{ V}$ olduğu sonucu çıkar.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Grafikte verilen iki alıcının volt-ampere karakteristiklerinden yararlanarak her birinin elektrik direncini hesaplayınız.

Verilen:

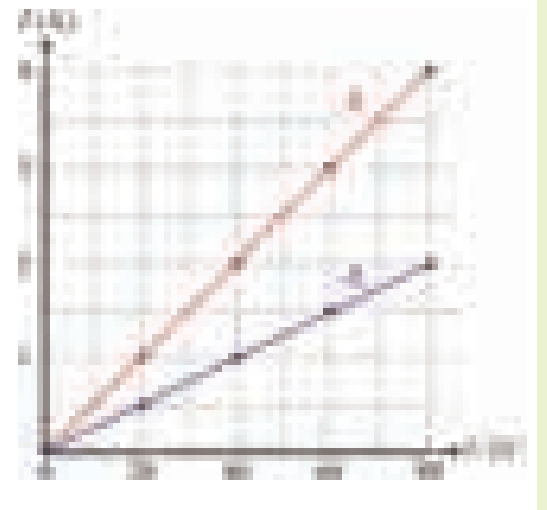
İki Alıcının $I = I(U)$ Volt-Ampere Karakteristikleri

İstenen: $R_1 - ?$ ve $R_2 - ?$

Çözüm:

Doğrunun eğim katsayısının $\frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{1}{R}$ olduğunu bildiğimizden, grafikten $\frac{\Delta U}{\Delta I} = R$ değerini hesaplayabiliriz. İlk alıcı (kırmızı renkli grafik) için grafikten $\frac{\Delta U}{\Delta I}$ oranı hesaplandığında, $R_1 = 20 \Omega$ değeri elde edilir.

Aynı şekilde, ikinci alıcı için de $R_2 = 40 \Omega$ bulunur.



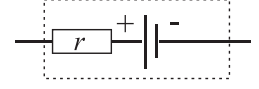
Devrenin tamamı için Ohm yasası

Kapalı bir elektrik devresinde akan akım, akım kaynağından da geçer. Akım kaynağı, uçları arasındaki potansiyel farkını (EMK) koruyarak devreye enerji sağlayan aktif bir devre elemanıdır. Kaynağın türüne bağlı olarak, elektriksel olmayan iç kuvvetler yükleri bir kutuptan diğerine taşır. Kaynak içinde de yükler bir iletken ortamdan geçtiği için bu hareket dirençsiz değildir. Bu nedenle, devrenin dış kısmındaki dirence ek olarak, akım kaynağının da iç direnci vardır. Kaynağın iç direnci r ile gösterilir. Pil, akümülatör, jeneratör ve güneş pili gibi akım kaynaklarının iç direnci bulunur. Devre şemalarında iç direnç, kaynağın yanında

gösterilen küçük bir direnç sembolü ile ifade edilir ve kaynağın bir parçası olarak kabul edilir (Şekil 3).

Ohm yasasının matematiksel ifadesini veren formül şöyledir:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$



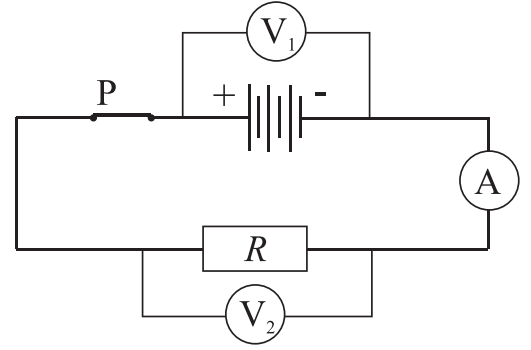
Şekil 3.
Kaynağın iç direnci.

Burada I devreden geçen akım şiddetini, ε kaynağın elektromotor kuvvetini (EMK), R devrenin dış kısmındaki direnci, r ise kaynağın iç direncini ifade eder. Buna göre, tam bir elektrik devresinden geçen akım şiddeti, kaynağın EMK'si ile doğru, devrenin toplam direnci (dış direnç ile iç direncin toplamı) ile ters orantılıdır. Başka bir ifadeyle, akım şiddeti hem kaynağın iç direncine hem de devrenin dış kısmındaki devre elemanlarının direncine bağlıdır.

Kaynağın EMK'sini değiştirmeden de devreden geçen akım şiddeti, devrenin dış kısmındaki direnç (R) değiştirilerek değiştirilebilir. Ayrıca, kaynağın iç direnci (r) de akım şiddetini etkiler. Dış direncin artması akım şiddetini azaltır. Benzer şekilde, kaynağın iç direncinin artması da akım şiddetinin azalmasına neden olur. Özellikle, pil ve akümülatörlerin iç direnci, kullanım süresi ve deşarj miktarı arttıkça genellikle artar. Bu nedenle zamanla aynı yükte daha düşük akım sağlayabilirler.

Gerilim ve Gerilim Düşümü

Devreden akım geçtiğinde, akım kaynağında elektriksel olmayan enerji elektrik enerjisine dönüşür. Bu enerji, yükleri kaynağın bir kutbundan diğer kutbuna taşır. Devre açıkken, kaynağın uçları arasındaki potansiyel farka elektromotor kuvvet (EMK) veya kaynak gerilimi denir. Akım, devredeki bir alıcıdan geçtiğinde elektrik enerjisinin bir bölümü başka enerji türlerine dönüşür. Bu nedenle alıcının uçları arasında bir gerilim düşümü oluşur. Bir alıcının gerilimi denildiğinde, alıcının uçları arasındaki gerilim düşümü (potansiyel farkı) kastedilir. Akım kaynağının iç direnci nedeniyle, kaynak içinde de bir gerilim düşümü meydana gelir. Şekil 4'te, kaynağın EMK'sini ve direnç üzerindeki gerilim düşümünü ölçmek için voltmetrenin bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 4. Potansiyel farkın ölçülmesi

Tam bir elektrik devresi için Ohm Yasası'na göre, devrenin dış direnci $R = 0$ olduğunda, yani kısa devre olduğunda, devreden geçen akım en büyük değerine ulaşır. Bu durumda kısa devre akımı, aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r}.$$

Bu durumda akım yalnızca kaynağın iç direnci üzerinden geçtiğinden, kısa devre akımı en büyük değerine ulaşır. Akım kaynağı devreye bağlı değilken veya devredeki anahtar açıkken (açık devre), kaynağın uçları arasındaki gerilim kaynağın elektromotor kuvvetine (EMK) eşittir. Başka bir ifadeyle:

$$U_{\varepsilon} = \varepsilon.$$

Kaynaktan bir akım geçtiğinde, iç direnç r nedeniyle tüketicinin kullanabileceği gerilim azalır; bu durumda aşağıdaki ilişki geçerlidir:

$$U = \varepsilon - Ir.$$

Pil gibi kimyasal akım kaynaklarında, kullanım süresi arttıkça kimyasal maddelerin tükenmesi, elektrolit derişiminin değişmesi ve elektrot yüzeylerinde yalıtkan tabakaların oluşması gibi nedenlerle EMK azalabilir ve kaynağın iç direnci artar. Bunun sonucunda, alıcı üzerindeki gerilim düşümü azalır ve elektrikli cihazlar istenilen performansta çalışmayabilir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

EMK'si 12 V ve iç direnci $1,0 \, \Omega$ olan bir akım kaynağı, $9,0 \, \Omega$ dirençli bir alıcıya bağlanmıştır.

Aşağıdakileri hesaplayınız:

- Devreden geçen akım şiddetini.
- Devrenin dış kısmındaki (alıcı üzerindeki) gerilim düşümünü.
- Kaynağın iç direnci üzerindeki gerilim düşümünü.

Verilenler:

$$\varepsilon = 12 \, \text{V}, \, r = 1,0 \, \Omega, \, R = 9,0 \, \Omega$$

İstenen:

- $I - ?$, b) $U_n - ?$, c) $U_\varepsilon - ?$

Çözüm:

a) Tam devre için Ohm yasasına göre akım şiddeti $I = 1,2 \, \text{A}$ 'dır.

b) $U_n = I \cdot R$ ifadesinden $U_n = 10,8 \, \text{V}$ elde edilir.

c) $U_\varepsilon = I \cdot r$ ifadesinden, $U_\varepsilon = 1,2 \, \text{V}$ elde edilir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 4.

EMK'si 4,5 V ve iç direnci $0,25 \, \Omega$ olan bir akım kaynağı kısa devre edilmektedir. Kısa devre anında devreden geçen akım şiddetini hesaplayınız.

Verilenler:

$$\varepsilon = 4,5 \, \text{V}, \, r = 0,25 \, \Omega$$

İstenen:

$$I_{\text{ks}} - ?$$

Çözüm:

Ohm yasasının tam devre için verdiği formüle göre $R = 0 \, \Omega$ iken akım şiddeti $I_{\text{ks}} = \frac{\varepsilon}{r}$, olur; buradan yapılan hesaplamalar $I_{\text{ks}} = 18 \, \text{A}$ sonucunu verir.



GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

Dirençli dokunmatik ekran, basınca ve ekran içindeki elektrik akımındaki değişime göre çalışan basit ve kullanışlı bir teknolojidir. Bu ekran, yüzeyleri şeffaf dirençli bir malzemeye kaplanmış, birbirine çok yakın konumda bulunan ancak mikroskobik boşluklarla ayrılmış iki ince ve esnek katmandan oluşur. Normal koşullarda bu katmanlar birbirine temas etmez. Kullanıcı parmağıyla veya bir dokunmatik kalem (stylus) ile ekrana bastığında, üst katman esneyerek alt katmana temas eder. Temas gerçekleştiğinde, dirençli katman boyunca akan elektrik akımı ve gerilim dağılımı temas noktasında değişir. Bu sistemde Ohm Yasasından yararlanılır. Denetleyici devre, dirençli katmandaki gerilim ve akım değerlerini ölçerek dokunulan noktayı belirler. Ekranın her noktası farklı bir elektrik direncine karşılık geldiğinden, gerilim ve akımdaki değişimler kullanılarak temas noktasının x ve y koordinatları hesaplanır. Bu çalışma ilkesi sayesinde dirençli dokunmatik ekranlar; parmak, dokunmatik kalem ve hatta eldiven ile kullanılabilir. Bu nedenle endüstriyel kontrol panelleri, ATM'ler ve navigasyon sistemleri gibi farklı çalışma koşullarına sahip cihazlarda yaygın olarak tercih edilir. Bu konuyla ilgili eğitim videosu aşağıdaki bağlantıdan izlenebilir.



<https://www.bing.com/videos/riverview/relatedvideo?q=how+touch+screen+technology+works+in+physics+explanation&mid=3E44E17E9FEBAC467A543E44E17E9FEBAC467A54&FORM=VIRE>



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Kısa devre sırasında devredeki akım çok yüksek bir değere ulaşır. Devrenin dış kısmındaki direnç sıfır, kısa devre sırasında maksimum akımı hesaplayabileceğimiz formülü yazınız.
2. Kaynağın iç direnci arttığında, tüketici üzerinden akan akım nasıl değişir?
3. Bir elektrikli ısıtıcı 125 V'luk bir gerilime bağlanmıştır ve içinden 4 A'lık bir akım geçmektedir. Direncin sabit kaldığını varsayarak, gerilim 150 V'a yükseltildiğinde ısıtıcının direncini hesaplayın ve akımı belirleyin. (Çözüm: $R = 31,3 \Omega$, $I = 4,8 \text{ A}$)
4. Kesit alanı 1 mm^2 , uzunluğu 15 m olan bir bakır telden 6 A akım geçmektedir. Bakırın öz direnci $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$ olduğuna göre; a) Telin uçları arasındaki gerilimi hesaplayınız. b) Aynı telden 10 A akım geçmesi için uygulanması gereken gerilimi hesaplayınız. (Çözüm: $U = 1,53 \text{ V}$, $U_1 = 2,55 \text{ V}$)
5. EMK'si 9 V ve iç direnci $0,8 \Omega$ olan bir pil bir alıcıya bağlanmıştır. Devreden 1,5 A akım geçtiğine göre; a) Alıcının direncini hesaplayınız. b) Alıcı üzerindeki gerilim düşümünü hesaplayınız. (Çözüm: $R = 5,2 \Omega$, $U = 7,8 \text{ V}$)
6. EMK'si 7,2 V ve iç direnci $0,6 \Omega$ olan bir pil, $3,4 \Omega$ dirençli bir alıcıya bağlanmıştır. a) Devreden geçen akım şiddetini hesaplayınız. b) Alıcının uçları arasındaki gerilimi hesaplayınız. (Çözüm: $I = 1,8 \text{ A}$, $U = 6,12 \text{ V}$)
7. EMK'si 7,2 V ve iç direnci $0,6 \Omega$ olan bir pil, $3,4 \Omega$ dirençli bir alıcıya bağlanmıştır. a) Devreden geçen akım şiddetini hesaplayınız. b) Alıcının uçları arasındaki gerilimi hesaplayınız. (Çözüm: $I = 1 \text{ A}$, $R = 3 \Omega$)

1.9. Kirchhoff'un Birinci Yasası

Basit elektrik devreleri; elektromotor kuvveti (EMK), dirençler üzerindeki gerilim düşümü ve devreden geçen akım şiddeti arasındaki ilişkiyi açıklamak ve anlamak için yeterlidir. Ancak günlük yaşamda ve teknolojiye daha çok karmaşık elektrik devreleri kullanılır. Bu devrelerin karmaşıklığı; güvenilir elektrik tesisatlarının kurulması, yüksek güvenlik sağlanması ve devreye yeni alıcıların kolayca eklenebilmesi gibi gereksinimlerden kaynaklanır.

Karmaşık devrelerin analizi ve tasarımında, Ohm Yasası tek başına yeterli değildir. Bu nedenle, elektrik devrelerinin analizinde en temel araçlardan biri olan Kirchhoff Yasaları kullanılır. Kirchhoff Yasaları, enerjinin korunumu ve elektrik yükünün korunumu ilkelerine dayanır. Bu yasalar; fizik, elektrik-elektronik mühendisliği, enerji sistemleri, otomasyon, robotik ve haberleşme alanlarında yaygın olarak uygulanmaktadır. Kirchhoff Yasaları, 1845 yılında Alman fizikçi Gustav Robert Kirchhoff tarafından ortaya konulmuştur. Kirchhoff, birbirini tamamlayan iki temel yasa geliştirmiştir. Kirchhoff Yasalarını incelemeye başlamadan önce, iletken tellerin ideal olduğu, yani dirençlerinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu kabul edilir. Ayrıca, aksi belirtilmedikçe akım kaynağının ideal olduğu ve iç direncinin sıfır olduğu varsayılır. Şekil 1'de basit bir elektrik devresi gösterilmiştir. Bu devre incelenirken kullanılan temel kavramlardan biri düğüm noktasıdır.

- **Düğüm** (düğüm noktası): En az üç iletkenin birleştiği noktadır. Düğümdeki tüm noktaların elektrik potansiyeli aynıdır.

Şekil 1'de A ve B olmak üzere iki düğüm noktası bulunmaktadır. $AR_2\epsilon_2B$, AR_3B ve $B\epsilon_1R_1A$

- **Dal (brans)**: Devrede iki düğüm noktası arasındakı bölüm ya da akımın bir düğümden diğerine izlediği yoldur. Bir düğüm noktasında en az üç dal birleşir. Şekil 1'de üç dal bulunmaktadır:

• **Kapalı çevrim (kontur):** Elektrik devresinde başlangıç noktasına tekrar dönülen kapalı bir yoldur. Her yeni kapalı çevrim, daha önce tanımlanan kapalı çevrimlerde bulunmayan en az bir dal içermelidir. Şekil 1'deki akım devresinde iki bağımsız kapalı kontur vardır: $AR_2\epsilon_2BR_3A$ ve $AR_3\epsilon_1R_1A$. Belirli bir devredeki bağımsız kapalı döngülerin sayısı (K), dalların sayısı (G) eksi düğümlerin sayısı (J) artı 1'dir, veya: $K = G - J + 1$.

Kirchhoff'un Birinci Yasası

Bu kural, elektrik yükünün korunumu ilkesinin doğrudan bir sonucudur. Bir düğüm noktasında elektrik yükü ne oluşabilir ne de yok olabilir. Bu nedenle, bir düğüm noktasına birim zamanda giren toplam yük, o düğüm noktasından birim zamanda çıkan toplam yüke eşit olmalıdır. Bu ilke, Kirchhoff'un Akımlar Yasası olarak da bilinir. Buna göre, bir düğüm noktasına giren ve çıkan akımların cebirsel toplamı sifıra eşittir:

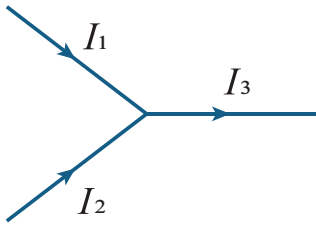
$$\sum_{i=1}^n I_i = 0,$$

Burada I_i düğüm noktasına giren veya düğüm noktasından çıkan akımlardan her birinin şiddetini ifade eder. $\blacksquare$ ise düğüm noktasına giren ve çıkan toplam akım sayısını gösterir. Buna göre, düğüm noktasına giren akımlar pozitif (+), düğüm noktasından çıkan akımlar ise negatif (-) işaretli kabul edilir. Kirchhoff'un Birinci Yasası şu şekilde de ifade edilebilir: **Bir düğüm noktasına giren akımların toplamı, düğüm noktasından çıkan akımların toplamına eşittir:**

$$\sum I_{\text{çıkan}} = \sum I_{\text{giren}}$$

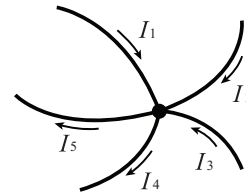
Bir elektrik devresi analiz edilirken, her düğüm noktası için Kirchhoff'un Birinci Yasası'na göre ayrı bir denklem yazılır. Örneğin, bir düğüm noktasına iki akım giriyor ve bir akım çıkıyorsa (Şekil 2a), $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ veya eşdeğer olarak $I_1 + I_2 = I_3$. Şekil 2b'de ise, bir düğüm noktasına üç akım girdiği ve iki akımın çıktığı bir örnek gösterilmektedir.

Kirchhoff'un ikinci yasası



Şekil 2.

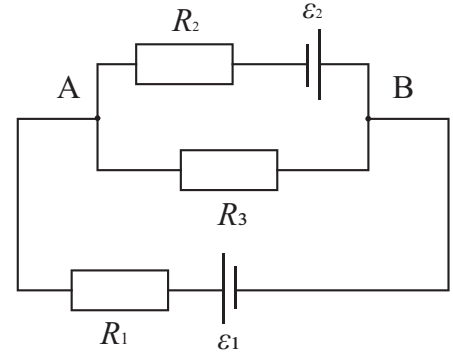
- a) İki akımın girdiği ve bir akımın çıktığı bir düğüm noktası.
b) Üç akımın girdiği ve iki akımın çıktığı bir düğüm noktası.



$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$$

Bir elektrik devresi analiz edilirken, her düğüm noktası için Kirchhoff'un Birinci Yasası'na göre ayrı bir denklem yazılır. Örneğin, bir düğüm noktasına iki akım giriyor ve bir akım çıkıyorsa (Şekil 2a), $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ veya eşdeğer olarak $I_1 + I_2 = I_3$ yazılır. Şekil 2b'de ise, bir düğüm noktasına üç akımın girdiği ve iki akımın çıktığı bir örnek gösterilmektedir.

$$\sum_i \mathcal{E}_i = \sum_i I_i R_i.$$



Şekil 1.
Karmaşık bir devre.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

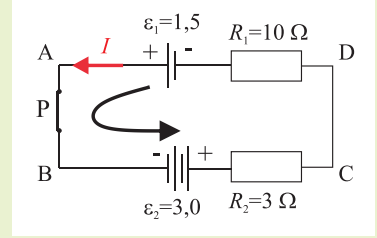
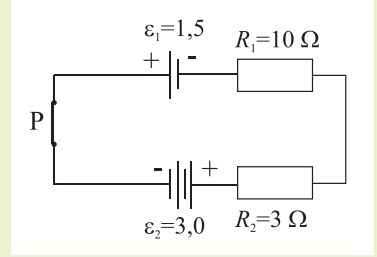
Şekilde gösterilen devreden geçen akım şiddetini hesaplayınız.

Çözüm: Devrede akımın kollara ayrıldığı bir nokta, yani düğüm noktası yoktur. Devreyi dolaşma yönü olarak saat yönünün tersine olan ABCDA yönü seçilir. Akım yönü, devrenin dolaşılma yönü ile aynı yönde kabul edilir. Buna göre, verilen çevrim için Kirchhoff'un İkinci Yasası aşağıdaki gibi yazılır:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = IR_1 + IR_2,$$

buradan akım şiddetini aşağıdaki gibi yazarız:

$$I = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{R_1 + R_2} = 0,35 \text{ A}.$$



Denklemin her iki tarafındaki cebirsel toplamda yer alan terimler pozitif veya negatif işaretli olabilir. Bir elektrik devresinin analizinde tutarlılığı sağlamak ve belirsizlikleri önlemek amacıyla, Kirchhoff'un İkinci Yasasının uygulanmasında aşağıdaki kurallar kullanılır:

- Elektrik devresi şemasında bilinen ve bilinmeyen tüm büyüklükler gösterilir.
- Devrenin her bir kolundan geçen akım için, akımın yönü rastgele seçilir ve şema üzerinde gösterilir.
- 3Her bağımsız kapalı çevrim için, saat yönünde veya saat yönünün tersinde olmak üzere bir dolaşım yönü seçilir.
- Belirli bir çevrim için Kirchhoff'un İkinci Yasası yazılırken, çevrim boyunca ilerlerken önce üreticinin negatif, ardından pozitif kutbuyla karşılaşırsa elektromotor kuvvet (EMK) pozitif işaretli alınır. Önce pozitif, ardından negatif kutbuyla karşılaşırsa EMK negatif işaretli alınır.
- Bir devre elemanı üzerindeki gerilim düşümü yazılırken, çevrim boyunca seçilen dolaşım yönü ile elemandan geçen akımın yönü aynı ise gerilim düşümü pozitif işaretli alınır. Bu iki yön zıt ise gerilim düşümü negatif işaretli alınır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Şekilde verilen elektrik devresi için Kirchhoff'un Birinci ve İkinci Yasalarının matematiksel ifadelerini yazınız.

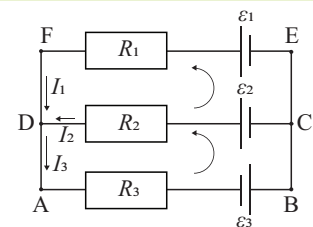
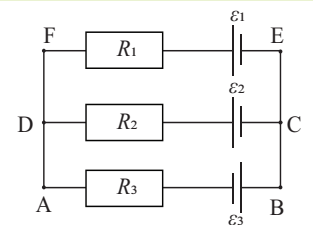
Çözüm: Öncelikle, her kapalı çevrim için rastgele bir dolaşım yönü seçilir. Bu örnekte, her iki çevrim için de dolaşım yönü saat yönünün tersine seçilmiştir. Daha sonra, devrenin her bir kolundan geçen akımlar için rastgele bir akım yönü belirlenir.

D noktasındaki düğüm için Kirchhoff'un Birinci Yasası aşağıdaki gibi yazılır: $I_1 + I_2 = I_3$.

Her bir döngü için İkinci Kirchhoff yasası şöyledir:

DCEFD konturu için $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$ ve:

$\varepsilon_3 + \varepsilon_2 = I_3 R_3 + I_2 R_2$ ABCDA konturu için geçerlidir.



Kirchhoff yasaları, birden fazla kaynak ve birden fazla yük içeren karmaşık elektrik devrelerinin analiz edilmesini sağlar. Her iki yasanın birlikte uygulanmasıyla, devreyi tanımlayan doğrusal cebirsel denklemlerden oluşan bir denklem sistemi elde edilir. Bu sistemin çözülebilmesi için, bilinmeyen büyüklük sayısı kadar bağımsız denklem bulunmalıdır. Denklem sisteminin çözümü sonucunda, kolları geçen akımlar, kaynakların iç direnci ve elektromotor kuvveti (EMK) gibi bilinmeyen büyüklüklerin değerleri elde edilir.

Belirli bir akım için denklem sisteminin çözümü negatif bir değer verirse, bu durum gerçek devrede akımın yönünün başlangıçta seçilen yönün tersi olduğunu gösterir. Bir elektromotor kuvveti (EMK) için negatif bir değer elde edilmesi ise, gerçek devrede kaynağın kutuplarının ters bağlandığını veya kaynağın enerji sağlayan bir eleman olarak değil, enerji tüketen bir eleman olarak çalıştığını gösterir. Buna örnek olarak bir pilin veya akünün şarj edilmesi verilebilir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

$\varepsilon_1 = 12 \text{ V}$, $\varepsilon_2 = 6 \text{ V}$, $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 4 \Omega$ ve $R_3 = 2 \Omega$ olduğuna göre, Şekil 1'deki devrenin her bir kolundan geçen akımı hesaplayınız. ε_1 ile gösterilen gerilim kaynağının iç direnci r olduğuna göre, Kirchhoff'un İkinci Yasasının matematiksel ifadesini yazınız.

Çözüm: Şekil 3a'da devre elemanlarının sembolleri ile birlikte, devrenin üç kolu için seçilen akım yönleri gösterilmiştir. A düğümü için Kirchhoff'un Birinci Yasası aşağıdaki gibi yazılır:

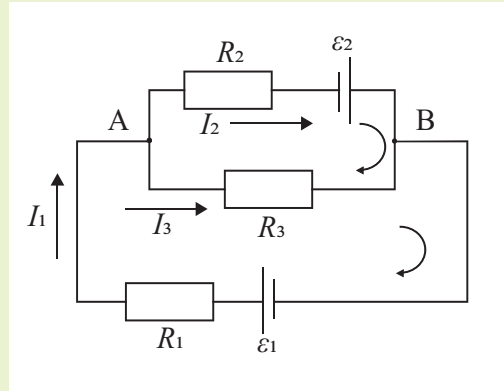
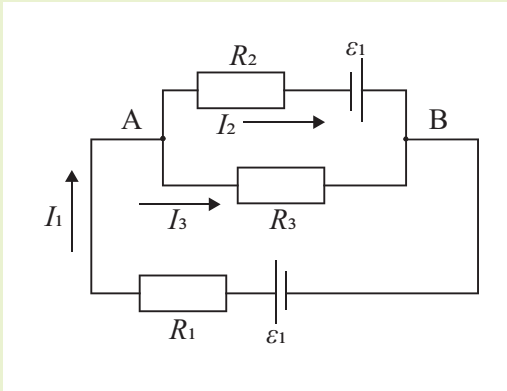
$$I_1 = I_2 + I_3, \quad (1)$$

Şekil 3b'de, çevrimlerin dolaşım yönü rastgele seçilmiştir.

$AR_2\varepsilon_2BR_3A$ ve $AR_3B\varepsilon_1R_1A$ çevrimleri için ikinci Kirchhoff yasası aşağıdaki gibi yazılır:

$$\varepsilon_2 = -I_3R_3 + I_2R_2, \quad (2)$$

$$\varepsilon_1 = I_1R_1 + I_3R_3. \quad (3)$$



Şekil 3 a) Akım yönleri rastgele seçilmiş akım devresi
b) Çevrimlerin dolaşım yönü rastgele seçilmiş akım devresi

(1), (2) ve (3) numaralı denklemler, üç bilinmeyenli bir denklem sistemini oluşturur. Bu denklem sistemi çözüldüğünde, devrenin her bir kolundan geçen akımlar sırasıyla $I_1 = 1,24 \text{ A}$, $I_2 = 1,41 \text{ A}$, $I_3 = -0,18 \text{ A}$ olarak bulunur. I_3 akımının negatif değer alması, akımın gerçek yönünün başlangıçta seçilen yönün tersi olduğunu gösterir.

ε_1 gerilim kaynağının iç direnci r ise, (3) numaralı denklem aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\varepsilon_1 = I_1R_1 + I_3R_3 + I_1r.$$

Gerilim kaynağının iç direnci dikkate alındığında, Kirchhoff'un İkinci Yasası yazılırken gerilim kaynağının iç direnci de dikkate alınmalıdır. Bu gerilim düşümü genel olarak $I \cdot r$ ile ifade edilir. Burada I , gerilim kaynağından geçen akımdır.



ÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

Kirchhoff yasaları evlerde kullanılan elektrik tesisatlarının ve elektrikli cihazların tasarımında ve analizinde önemli bir yere sahiptir. Kullanıcılar genellikle yalnızca prizleri, anahtarları ve elektrikli cihazları görür. Ancak bu sistemlerin güvenli ve düzgün çalışabilmesi için Ohm Yasası ve Kirchhoff yasalarından yararlanılır. Elektrik tesisatlarının tasarımı, malzeme seçimi, güvenlik hesaplamaları, testleri ve bakımı bu yasalara göre yapılır. Bu kurallara uyulmaması; elektriksel aşırı yüklenme, aşırı ısınma, enerji kayıpları, elektrik kesintileri ve yangın gibi istenmeyen durumlara yol açabilir.

Kirchhoff yasaları, temel fizik ile elektrik mühendisliği arasında önemli bir bağ kurar. Bu yasalar; elektrik devrelerinin analizi, güç sistemlerinin tasarımı ve devrelerdeki akım ile gerilimlerin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılır. Ayrıca korunum yasalarının gerçek sistemlerde nasıl uygulandığını göstermesi bakımından da önemlidir.

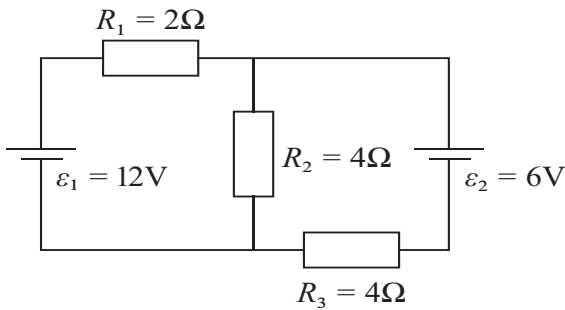
Kirchhoff yasaları çok geniş bir kullanım alanına sahip olmakla birlikte her durumda geçerli değildir. Bu yasalar, akım ve gerilimin zamana göre yavaş değiştiği devreler için geçerlidir. Yüksek frekanslı akımların bulunduğu devrelerde veya devrede zamanla değişen manyetik alanların etkili olduğu durumlarda Kirchhoff yasaları tek başına yeterli olmaz. Bu tür devrelerin analizinde daha gelişmiş yöntemler ve ek hesaplamalar kullanılır.



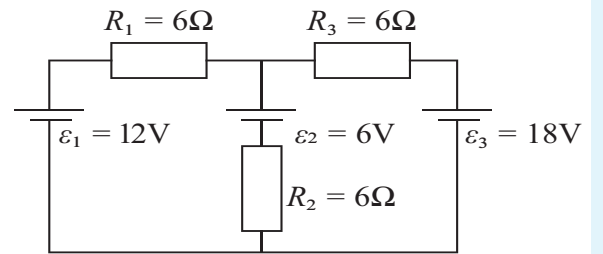
SORULAR VE ÖDEVLER

1. Basit elektrik devreleri ile karmaşık elektrik devreleri arasındaki fark nedir?
2. Karmaşık bir elektrik devresinin temel elemanları nelerdir? Bu devrelerin analizinde hangi kavramlar kullanılır?
3. Kirchhoff yasaları hangi temel fizik yasalarına dayanır?
4. Kirchhoff'un Birinci ve İkinci Yasalarının matematiksel ifadelerini yazınız ve bu yasaları açıklayınız.
5. Şekilde verilen devrenin üç kolundan geçen akımları hesaplayınız.

a)



b)



(Çözüm: a) 2,25 A; 1,875 A; 0,375 A; b) 0 A; 1 A; 1 A)

1.10. Dirençlerin Bağlanması

Birden fazla direnç içeren elektrik devrelerinin analizinde akım, gerilim ve direnç değerleri; Ohm Yasası ve Kirchhoff yasaları kullanılarak belirlenir. Karmaşık bir elektrik devresi, devredeki dirençlerin yerine aynı etkiyi gösteren tek bir direnç yerleştirilerek basitleştirilebilir. Bu dirence eşdeğer direnç denir. **Eşdeğer direnç**, iki veya daha fazla direncin yerine kullanılabilen ve devre üzerinde aynı etkiyi oluşturan dirençtir. Aynı gerilim kaynağına bağlandığında, eşdeğer direnç içeren basitleştirilmiş devreden geçen akım, karmaşık devreden geçen akımla aynı olur.

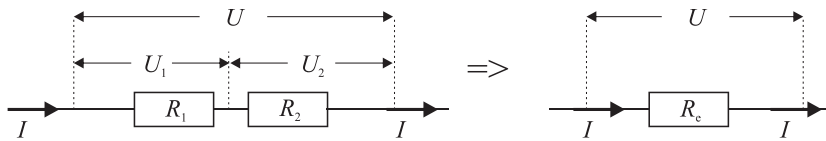
Elektrik tesisatlarında, elektronik devrelerde ve elektrikli cihazlarda kullanılan devreler; **seri ve paralel bağlı devre elemanlarının bir araya gelmesiyle oluşur**. Dirençlerin seri ve paralel bağlanma özelliklerini bilmek, devrede akımın, gerilimin ve enerjinin nasıl dağıldığını anlamayı sağlar. Bu nedenle, dirençlerin iki temel bağlanma şekli olan **seri ve paralel bağlantılar incelenecektir**. Dirençlerin bağlanma şekli, üzerlerinden geçen akımı ve uçları arasındaki gerilimi belirler. Dirençler için elde edilen sonuçlar, diğer devre elemanları için de aynı şekilde geçerlidir.

Dirençlerin seri bağlantısı

Dirençlerin seri bağlanması, dirençlerin uç uca bağlanması anlamına gelir. Seri bağlı bir devrede akım kolları ayrılmaz ve tüm dirençlerden aynı şiddette akım geçer. Örneğin, Şekil 1'de gösterilen seri bağlı iki direnç için aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$I_1 = I_2 = I$$

Bu sonuç, Yük Korunumu Yasası'nın bir sonucudur. Bu yasaya göre, devrenin herhangi bir noktasında elektrik yükü birikemez veya yok olamaz. Bu nedenle, bir zaman biriminde bir dirence giren yük miktarı, aynı zaman biriminde o dirençten çıkan yük miktarına eşittir.



Şekil 1. Seri bağlı dirençler, eşdeğer direnç değerine sahip tek bir dirençle temsil edilir.

Kirchhoff'un İkinci Yasasına göre, seri bağlı dirençlerin uçları arasındaki gerilimlerin toplamı (U_1 ve U_2 , Şekil 1), bu direnç grubunun uçları arasındaki toplam gerilime (U) eşittir:

$$U = U_1 + U_2.$$

Devrenin bu bölümüne Ohm Yasası uygulanırsa, her bir direnç üzerindeki gerilim ile eşdeğer direnç üzerindeki gerilim ($U_i = IR_i$) bağıntısından yararlanılarak aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$IR_e = IR_1 + IR_2,$$

Buradan, denklemin her iki tarafı devreden geçen akıma bölündüğünde aşağıdaki ifade elde edilir:

$$R_e = R_1 + R_2$$

Bu bağıntı, seri bağlı dirençlerin eşdeğer direncini hesaplamak için kullanılır. Genel olarak aşağıdaki şekilde yazılır:

$$R_e = \sum_{i=1}^n R_i$$

Bu sonuç, seri bağlı dirençlerin eşdeğer direncinin, dirençlerin tek tek değerlerinin toplamına eşit olduğunu gösterir. Bu nedenle, seri bağlı dirençlerin eşdeğer direnci her zaman devredeki en büyük direnç değerinden daha büyüktür.

Ohm'un Birinci Yasasına göre ($U_i = IR_i$), direnci daha büyük olan direnç üzerinde oluşan gerilim de daha büyüktür. Seri bağlı bir devreye yeni bir direnç eklendiğinde eşdeğer direnç artar. Buna bağlı olarak devreden geçen akım azalır:

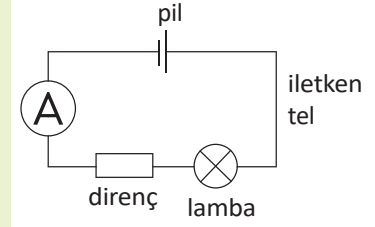
$$I = \frac{U}{R_e}$$

Örneğin, iki ampul seri bağlandığında eşdeğer direnç arttığı için devreden geçen akım azalır. Bu nedenle ampuller, tek bir ampulün bağlı olduğu duruma göre daha sönük yanar. Dirençlerin veya diğer devre elemanlarının seri bağlı olduğu bir devrede, devrenin herhangi bir noktasında bağlantı kesilirse akımın geçtiği yol kesileceğinden tüm devreden akım geçmez.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Devre şemasında, 10Ω direnç ile direnci bilinmeyen bir ampul seri bağlıdır. Ampermetre $0,4 \text{ A}$ akım göstermektedir. Gerilim kaynağının gerilimi 12 V olduğuna göre ampulün direncini hesaplayınız. Kaynağın iç direnci, ampulün direncinin sıcaklıkla değişimi ve ampermetrenin iç direnci ihmal edilmektedir.

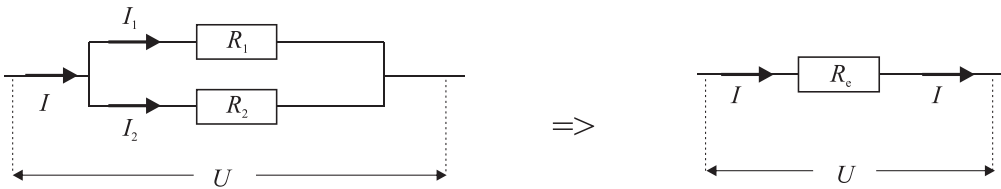


Verilenler: $R_1 = 10 \Omega$, $I = 0,4 \text{ A}$, $U = 12 \text{ V}$	Çözüm: Soruda verilen bilgiler ve dirençlerin seri bağlı olması dikkate alındığında, devrenin eşdeğer direnci $R_e = R_1 + R_2$ şeklinde yazılır. Kaynak üzerindeki gerilim $U = I \cdot R_e$, veya $U = I \cdot (R_1 + R_2)$ şeklindedir; bu, bir bilinmeyenli bir denklemdir. Lambanın bilinmeyen direnci için $R_2 = \frac{U}{I} - R_1$ sonucunu elde ederiz Bilinen değerleri yerine koyarak lambanın direnci lambanın diri, $R_2 = 20 \Omega$ sonucunu elde ederiz.
İstenen: $R_2 - ?$	

Dirençlerin paralel bağlantısı

Paralel bağlantıda, tüm dirençler devrenin aynı iki noktası (düğüm) arasına bağlanır. Bu nedenle, her bir direncin uçları arasındaki gerilim kaynak gerilimine eşittir. Başka bir deyişle, tüm paralel kollardaki gerilim aynıdır:

$$U_1 = U_2 = U$$



Şekil 2. Paralel bağlı dirençler, eşdeğer direnç değerine sahip tek bir dirençle temsil edilir.

Devrede paralel bağlantı varsa akım kollara ayrılır (Şekil 2). Devrenin her bir kolundan geçen akım, o kolun direncine bağlıdır. Bu durumda Kirchhoff'un Birinci Yasası uygulanır.

Kirchhoff'un Birinci Yasası: Devrede paralel bağlantı varsa, Şekil 2'de gösterildiği gibi akım kollara ayrılır. Devrenin her bir kolundan geçen akım için Kirchhoff'un Birinci Yasası geçerlidir.

$$I = I_1 + I_2 .$$

Bir elektrik devresinin bir bölümü için Ohm yasasına göre $I_i = \frac{U}{R_i}$, buna göre, direnci daha küçük olan koldan daha büyük akım geçer. Bu ifade akım bağıntısında yerine yazıldığında aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$\frac{U}{R_e} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} .$$

Bu ifadenin her iki tarafını gerilimle bölersek, şunu elde ederiz:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} .$$

Bu bağıntı, paralel bağlı dirençlerin eşdeğer direnci ile her bir direncin değeri arasındaki ilişkiyi gösterir. Genel olarak, paralel bağlı dirençler için aşağıdaki ifade yazılır:

$$\frac{1}{R_e} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} ,$$

Buna göre, paralel bağlı dirençlerin eşdeğer direncinin tersi, dirençlerin terslerinin toplamına eşittir. Paralel bağlı iki direnç için eşdeğer direnç aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} .$$

Dirençler paralel bağlandığında, eşdeğer direnç her zaman paralel bağlı dirençler arasındaki en küçük dirençten daha küçüktür. Devreye yeni bir paralel kol eklendiğinde eşdeğer direnç azalır. Buna bağlı olarak, devrenin dallanmamış kısmından geçen akım artar.

İki ampulün paralel bağlandığı bir devrede, her bir ampulün uçları arasındaki gerilim aynıdır. Devre kollara ayrıldığı için ampullerden biri çalışmaz hâle gelse diğer ampul çalışmaya devam eder. Bu nedenle evlerde kullanılan elektrikli cihazlar paralel bağlanır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Şekil 2'de verilen devrede, devrenin dallanmamış kısmından geçen akım 12 A'dır. Birinci kola 3 Ω, ikinci kola ise 9 Ω direnç bağlanmıştır. Buna göre a) Devrenin eşdeğer direncini,

b) Gerilim kaynağının gerilimini,

c) Her bir dirençten geçen akımı hesaplayınız

Verilenler:

$$I = 12 \text{ A} ,$$

$$R_1 = 3 \Omega ,$$

$$R_2 = 9 \Omega$$

İstenen:

$$R_e - ? , U - ? ,$$

$$I_1 - ? , I_2 - ?$$

Çözüm:

a) Paralel bağlı iki direnç için eşdeğer direnç: $R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ Direnç değerleri yerine konulduğunda: $R_e = 2,25 \Omega$ olarak bulunur.

b) Devrenin dallanmamış kısmındaki akım şiddeti biliniyorsa, kaynak gerilimi: $U = I \cdot R_e$ bağıntısıyla hesaplanır. Sayısal değerler yerine konulduğunda: $U = 27 \text{ V}$ elde edilir.

c) Her bir koldaki akım şiddeti, Ohm Kanunu kullanılarak hesaplanır: $I_i = \frac{U}{R_i}$. Değerler yerine konulduğunda: $I_1 = 9 \text{ A}$ ve $I_2 = 3 \text{ A}$.

Akım devresine ampermetre bağlama

Ampermetre, bir elektrik devresinde veya devrenin bir kolundan geçen akımı ölçen ölçü aletidir. Akımın doğru ölçülebilmesi için ampermetre, ölçülecek koldan geçen akımın tamamı üzerinden geçecek şekilde devreye bağlanmalıdır.

Ampermetre her zaman devreye seri bağlanır. Böylece ilgili koldan geçen akımın tamamı ampermetreden de geçer.

Ampermetre, iç direnci çok küçük olacak şekilde üretilir. Bunun nedeni, ölçüm sırasında devredeki akımı değiştirmemesidir. Ampermetrenin iç direnci büyük olsaydı, devreye ek bir direnç gibi davranarak devreden geçen akımı değiştirirdi.

Akım devresine voltmetre bağlama

Voltmetre, bir elektrik devresindeki iki nokta arasındaki potansiyel farkını (gerilimi) ölçen ölçü aletidir. Bir direncin, bir devre elemanının veya bir gerilim kaynağının uçları arasındaki gerilimi ölçmek için voltmetre, bu iki nokta arasına bağlanır. **Bu nedenle voltmetre, gerilimi ölçülecek devre elemanına her zaman paralel bağlanır.** Voltmetrenin iç direnci çok büyüktür. **Ohm Yasası'na** göre, bu nedenle voltmetreden geçen akım çok küçüktür ve genellikle ihmal edilir.



ETKİNLİK 1.

"Sanal Devrede Bileşenleri Bağlama" adlı etkileşimli simülasyonu kullanarak („Circuit Construction Kit: DC - Virtual Lab“) [https:// phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab](https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab) dirençlerin ve tüketicilerin (ampullerin) seri ve paralel bağlanmasını inceleyiniz. Devreye bir ampermetre ve bir voltmetre bağlayınız. Ohm Yasası'nı kullanarak bir direncin veya tüketicinin direncini hesaplayınız. Daha sonra aynı işlemi seri bağlı iki direnç veya tüketici ile paralel bağlı iki direnç veya tüketici için tekrarlayınız. İsterseniz hem seri hem de paralel bağlantıların bulunduğu birleşik bir devreyi de inceleyebilirsiniz.



GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

Elektrikli saç kurutma makinesinde, yüksek özgül dirence sahip metal telden yapılmış bir ısıtıcı ve fanı döndüren bir elektrik motoru bulunur. Saç kurutma makinesinin farklı çalışma modlarını sağlamak için ısıtıcı telin seri ve paralel bağlantılarından yararlanır. Birinci çalışma modunda akım, ısıtıcı telin daha uzun bir bölümünden geçtiği için devrenin toplam direnci daha büyüktür. Bu nedenle devreden geçen akım azalır ve ısıtıcı daha az ısı üretir. İkinci çalışma modunda ise ısıtıcı telin bir bölümü paralel bir kolla devre dışı bırakılır. Böylece devrenin toplam direnci azalır, devreden geçen akım artar ve ısıtıcı daha fazla ısı üretir.



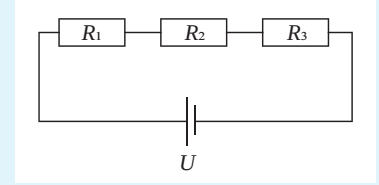
SORULAR VE ÖDEVLER

1. Dirençler veya yükler paralel bağlandığında, tüm kollarındaki gerilimin neden aynı olduğunu açıklayınız.
2. Paralel bağlı iki direncin eşdeğer direnci aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

Paralel bağlı bir devrede $R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ bağıntısını kullanarak eşdeğer direncin hesaplanmasını sağlayan formülü yazınız.

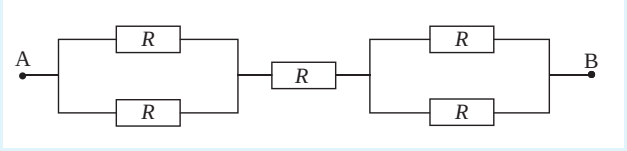
Dirençler sırasıyla R_1 , R_2 ve R_3 şu şekilde verilmiştir.

3. Dirençler paralel bağlandığında akım kollar arasında nasıl dağılır?
4. Paralel bağlı bir devrede dirençlerden birinin değerinin değiştirilmesi, kaynaktan çekilen toplam akımı nasıl etkiler? Açıklayınız.
5. Devre şemasında dirençlerin değerleri $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 4 \Omega$ ve $R_3 = 6 \Omega$ 'dir. Kaynağın uçları arasındaki gerilim $U = 18 \text{ V}$ 'tur ve kaynağın iç direnci ihmal edilebilir derecede küçüktür. Aşağıdakileri hesaplayınız:

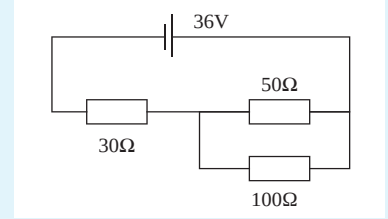


- a) Devrenin eşdeğer direnci,
 - b) Devreden geçen akımı, Her bir direnç üzerindeki gerilimi hesaplayınız.
- (Çözüm: $R_e = 12 \Omega$, $I = 1,5 \text{ A}$, $U_1 = 3 \text{ V}$, $U_2 = 6 \text{ V}$, $U_3 = 9 \text{ V}$)

6. Tüm dirençlerin değeri $R = 23 \Omega$ olduğuna göre, A ve B noktaları arasındaki seri bağlı dirençlerin eşdeğer direnci nedir? (Cevap: 46Ω)



7. Üç direnç, şekilde gösterildiği gibi bir elektrik devresine bağlanmıştır. Her bir dirençten geçen akımı ve her bir direnç üzerindeki gerilimi hesaplayınız. Kaynağın iç direncini ihmal ediniz.
- (Çözüm: $I_1 = 0,57 \text{ A}$, $I_2 = 0,38 \text{ A}$, $I_3 = 0,19 \text{ A}$, $U_1 = 17 \text{ V}$, $U_2 = U_3 = 19 \text{ V}$)



1.11. Kondansatörlerin bağlanması

1.5. derste kondansatörleri ve yük depolama özelliklerini incelemiştik. Kondansatör plakalarının zıt işaretli yüklerle yüklendiğini ve plakalar arasında bir elektrik alanı oluştuğunu öğrenmiştik. Ayrıca kondansatörün yükü, plakaları arasındaki gerilim ve kapasitansı arasındaki ilişkiyi de ele almıştık.

Bir kondansatör doğru akım (DC) kaynağına bağlandığında, devreden yalnızca çok kısa bir süre akım geçer. Bu süreçte elektronlar yalnızca kaynak ve iletkenler boyunca hareket eder; kondansatörün içinden geçmez. Çünkü kondansatör plakaları arasında, elektrik akımının geçmesini engelleyen bir yalıtkan (dielektrik) madde bulunur. Gerilim kaynağının negatif kutbuna bağlı plaka elektron olarak negatif yüklenir. Aynı anda, gerilim kaynağının pozitif kutbuna bağlı plakadaki elektronlar kaynağın pozitif kutbuna doğru hareket eder. Elektron kaybeden bu plaka ise pozitif yüklenir. Böylece plakalar arasında bir elektrik alanı oluşur. Kondansatörün şarj olması, plakaları arasındaki gerilim gerilim kaynağının gerilimine eşit oluncaya kadar devam eder. Bu andan sonra devreden akım geçmez ve kondansatör tam şarj olmuş olur. Doğru akım kaynağına bağlı bir kondansatörün bulunduğu devrede akım yalnızca kondansatör şarj olurken geçer. Bu sırada enerji, plakalar arasında oluşan elektrik alanında depolanır. Daha sonra bu enerji dış devreye aktarılabilir. Bu olaya kondansatöründeşarj olması denir. Örneğin fotoğraf makinelerinin flaş devrelerinde bulunan kondansatör, enerjiyi bir süre boyunca depolar ve çok kısa bir sürede boşalarak pilin tek başına sağlayamayacağı kadar büyük bir enerji çıkışı oluşturur. Böylece kısa süreli ve güçlü bir ışık flaşı elde edilir.

Bir devrede birden fazla kondansatör birlikte kullanılabilir. **Birbirine bağlı kondansatörlerden oluşan bu yapıya kondansatör grubu denir.** Kondansatör grubunda gerilim, yük ve depolanan enerji miktarının

dağılımı, kondansatörlerin bağlanma şekline bağlıdır. Bir kondansatör grubunun yerine aynı etkiyi gösteren tek bir kondansatörün kapasitansına **eşdeğer kapasitans** denir. Dirençlerde olduğu gibi kondansatörler de **seri ve paralel bağlanabilir**. Bir devrede hem seri hem de paralel bağlı kondansatörlerin birlikte bulunmasına ise kombine bağlantı denir.

Kondansatörlerin seri bağlantısı

Kondansatörlerin seri bağlantısında (Şekil 1), kondansatörler uç uca bağlanır. Bu bağlantıda yalnızca en dıştaki iki plaka gerilim kaynağına bağlanır. İç plakalar ise birbirine iletken bir tel ile bağlanır ve etki (indüksiyon) ile elektriklenir. Yüklerin yeniden dağılımı sonucunda her bir iç plakada eşit büyüklükte yük oluşur. Ancak komşu iki plakanın yük işaretleri birbirinin tersidir.



Şekil 1. Seri bağlı kondansatörler, eşdeğer kapasitansı C_e olan tek bir kondansatörle temsil edilir.

Sonuç olarak, seri bağlı her kondansatör, kapasitansından bağımsız olarak aynı miktarda yük (q) ile yüklenir. Kapasitansları sırasıyla C_1 ve C_2 olan seri bağlı iki kondansatör için aşağıdaki bağıntı yazılır:

$$q_1 = q_2 = q.$$

Kaynağın toplam gerilimi kondansatörler arasında şu şekilde dağıtılır:

$$U = U_1 + U_2.$$

Kondansatörün gerilimini yük miktarı (Q) ile ilişkilendiren bağıntı kullanılırsa, gerilim bağıntısı aşağıdaki şekilde yazılır:

$U = \frac{q}{C}$, gerilim dağılımına ilişkin önceki formül yardımı ile elde edilen yeni formül aşağıdaki gibi olur:

$$\frac{q}{C_e} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}.$$

Bu ifadenin her iki tarafını da q ile bölersek, şu sonucu elde ederiz

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Seri bağlanmış n kondansatörün eşdeğer kapasitansı için denklem şöyledir:

$$\frac{1}{C_e} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

Denklemden görüldüğü gibi, seri bağlı kondansatörlerin eşdeğer kapasitansı her zaman devredeki en küçük kondansatörün kapasitansından daha küçüktür. Bu nedenle, tek bir kondansatörle elde edilemeyecek kadar küçük bir kapasitans gerektiğinde kondansatörler seri bağlanır. Her biri C kapasitansına sahip n tane

kondansatör seri bağlanırsa aşağıdaki bağıntı elde edilir: $C_e = \frac{C}{n}$.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

İki kondansatör seri bağlanarak 150 V gerilime bağlanmıştır. Birinci kondansatörün kapasitansı 6 μF , üzerinde depolanan yük ise 720 μC 'dir. Buna göre ikinci kondansatörün kapasitansını hesaplayınız.

Verilenler:

$$U = 150 \text{ V}, C_1 = 6 \mu\text{F},$$

$$q_1 = 720 \mu\text{C}$$

İstenen:

$$C_2 = ?$$

Çözüm:

Kondansatörler seri bağlı olduğundan, her iki kondansatörde depolanan yük aynıdır:

$$q_1 = q_2 = q.$$

$$\text{Birinci kondansatörün gerilimi: } U_1 = \frac{q}{C_1} = 120 \text{ V}.$$

$$\text{İkinci kondansatörün gerilimi: } U_2 = U - U_1 = 150 \text{ V} - 120 \text{ V} = 30 \text{ V}.$$

$$\text{İkinci kondansatörün kapasitansı: } C_2 = \frac{q}{U_2} = \frac{720 \mu\text{C}}{30 \text{ V}} = 24 \mu\text{F}.$$

Kondansatörlerin paralel bağlantısı

Kondansatörlerin paralel bağlantısında (Şekil 2), tüm kondansatörlerin bir uçları gerilim kaynağının bir kutbuna, diğer uçları ise diğer kutbuna bağlanır. Bu nedenle her bir kondansatörün uçları arasındaki gerilim aynıdır ve gerilim kaynağının gerilimine eşittir. Yani:

$$U_1 = U_2 = U.$$

Kondansatörler paralel bağlandığında, toplam yük kondansatörlerin kapasitelerine göre dağılır. Kapasitansı büyük olan kondansatör daha fazla, kapasitansı küçük olan kondansatör ise daha az yük depolar. Yük Korunumu Yasası'na göre aşağıdaki bağıntı yazılır:

$$q = q_1 + q_2.$$

$q = C \cdot U$ formülünü kullanırsak, şu denklemi elde ederiz:

$$C_e U = C_1 U + C_2 U.$$

Bu denklemin her iki tarafını gerilime bölersek, şunu elde ederiz:

$$C_e = C_1 + C_2.$$

Genel olarak, seri bağlanmış iki veya daha fazla kondansatör için şu ifade geçerlidir:

$$C_e = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Paralel bağlı kondansatörlerin eşdeğer kapasitansı, kondansatörlerin kapasitanslarının toplamına eşittir. Bu nedenle, tek bir kondansatörün sağlayabileceğinden daha büyük bir kapasitans gerektiğinde kondansatörler paralel bağlanır. Her biri (C) kapasitansına sahip n tane paralel bağlı kondansatör için eşdeğer kapasitans $C_e = nC$ bağıntısıyla hesaplanır.



Şekil 2. Paralel bağlanmış kondansatörler, eşdeğer kapasitansa sahip tek bir kondansatörle temsil edilir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Havadaki kapasitansı $4 \mu\text{F}$ olan bir paralel levhalı kondansatör, levhaları arasındaki bölgenin dörtte biri su içinde, geri kalanı havada kalacak şekilde dikey olarak suya daldırılıyor. Suyun bağıl dielektrik katsayısı 81 olduğuna göre, kondansatörün yeni kapasitansını hesaplayınız.

Verilenler:	Çözüm:
$C = 4 \mu\text{F}$	Kondansatörün bir kısmı havada, bir kısmı ise suda bulunduğu için, bu iki bölüm paralel bağlı kondansatörler gibi davranır. Havadaki bölüm (yüzey alanının $\frac{3}{4}$ 'ü):
$S_{\text{hava}} = \frac{3}{4}S$	$C_{\text{hava}} = \frac{3}{4} \cdot 4 \mu\text{F} = 3 \mu\text{F}$
$S_{\text{su}} = \frac{1}{4}S$	Sudaki bölüm (yüzey alanının $\frac{1}{4}$ 'ü) $C_{\text{su}} = \epsilon_r \cdot \frac{1}{4} \cdot 4 \mu\text{F} = 81 \cdot 1 \mu\text{F} = 81 \mu\text{F}$
$\epsilon_r = 81$	Toplam (eşdeğer) kapasite: $C_e = C_{\text{hava}} + C_{\text{su}} \quad C_e = 3 \mu\text{F} + 81 \mu\text{F} = 84 \mu\text{F}$
İstenen:	$C_e = 84 \mu\text{F}$
$C_{\text{ek}} - ?$	

Elektrikli Cihazlarda Kondansatörlerin Rolü ve Uygulamaları

Deneyimler, bazı durumlarda birkaç küçük kondansatörden oluşan bir kondansatör grubunun, onun yerine kullanılabilecek tek bir büyük kondansatöre göre avantajlı olduğunu göstermiştir. Küçük kondansatörlerin üretimi daha kolaydır, birleştirilmeleri daha esnektir ve bir tanesi arızalanırsa, bu mutlaka kondansatör grubunun çalışmayı durduracağı anlamına gelmez. Kondansatör bankaları enerjiyi hızlı bir şekilde depolayabildikleri ve serbest bırakabildikleri için, defibrilatörler ve lazerler gibi darbeli güç kaynağı gerektiren cihazlarda kullanılırlar. Ayrıca, harmonik filtreleme, elektrikli ve elektronik sistemlerde gürültü azaltma, gerilim düzeltme ve stabilizasyonu ile elektrik motorları, transformatörler vb. cihazlarda reaktif güç kompanzasyonu gibi başka uygulamalar da bulunmaktadır.



GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

Elektrikli araçlarda, rejeneratif frenleme adı verilen bir sistem kullanılır. Bu sistemde frenleme sırasında elektrik motoru jeneratör gibi çalışır ve aracın kinetik enerjisinin bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürür. Ancak bu enerji çok kısa sürede üretildiği için batarya, elektrokimyasal yapısı nedeniyle bu enerjiyi aynı hızda depolayamaz. Bu nedenle elektrikli araçlarda bataryaya ek olarak süperkapasitörler de kullanılır. Süperkapasitörler çok kısa sürede şarj olup boşalabilir.

Bir süperkapasitör yaklaşık $2,7 \text{ V}$ gerilime dayanabilir. Elektrikli araçların batarya sistemleri ise 300 V , 400 V veya 800 V gibi çok daha yüksek gerilimlerle çalışır. Bu nedenle istenen gerilim değerine ulaşmak için çok sayıda süperkapasitör seri bağlanır. Daha fazla enerji depolayabilmek ve daha büyük akım sağlayabilmek için ise bu seri bağlı gruplar paralel bağlanır.

Bu sayede süperkapasitörler, frenleme sırasında oluşan elektrik enerjisini çok kısa sürede depolar ve araç yeniden hızlanırken bu enerjiyi elektrik motoruna geri verir. Böylece aracın enerji verimliliği artar ve bataryanın yükü ile yıpranması azalır.



SORULAR VE ÖDEVLER

- Kondansatörler seri bağlandığında eşdeğer kapasitansın neden tek bir kondansatörün kapasitansından daha küçük olduğunu açıklayınız.
- Kondansatörler paralel bağlandığında eşdeğer kapasitansın neden tek bir kondansatörün kapasitansından

dan daha büyük olduğunu açıklayınız.

3. Aşağıdaki durumlarda kondansatörlerin hangi bağlantı şeklinin tercih edildiğini açıklayınız.

- Kondansatörlerin seri bağlantısı?
- Kondansatörlerin paralel bağlantısı?

Her durum için birer örnek veriniz.

4. İki kondansatörden oluşan bir kondansatör grubunun eşdeğer kapasitans bağlantısını aşağıdaki durumlar için yazınız.

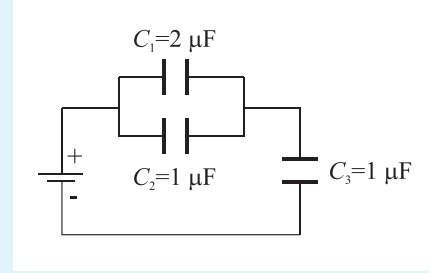
- a) Kondansatörler seri bağlı ise
- b) Kondansatörler paralel bağlı ise.

5. Şekilde bir kondansatör bataryası gösterilmektedir:

a) Kondansatör grubunun eşdeğer kapasitansını hesaplayınız.

(Çözüm: $C_e = 0,75 \mu F$)

b) Kaynak gerilimi 6 V ise, kondansatör grubundaki toplam yükü belirleyin. (Çözüm: $q = 4,5 \mu C$)



6. Kapasitansları sırasıyla $3 \mu F$ ve $6 \mu F$ olan iki kondansatör, sırasıyla 90 V ve 45 V gerilim kaynaklarına bağlanarak şarj ediliyor. Kondansatörler gerilim kaynaklarından ayrıldıktan sonra paralel bağlanıyor. Buna göre, oluşan kondansatör grubunun gerilimini hesaplayınız. (Çözüm: $U = 60 V$)

7. Kapasitansı $10 \mu F$ olan bir kondansatör, 200 V gerilim kaynağına bağlanmıştır. Kondansatörde depolanan enerjiyi hesaplayınız. Daha sonra bu kondansatör, aynı kapasitansa sahip ve aynı gerilime kadar şarj edilmiş başka bir kondansatörle paralel bağlanıyor. Buna göre, kondansatör grubunda depolanan toplam enerjiyi hesaplayınız. (Çözüm: $E_1 = 0,2 J$, $E_2 = 0,4 J$)

1.12. Elektrik Akımının Yaptığı İş, Enerji ve Gücü.

Joule–Lenz Yasası

Elektrik akımının işi ve enerjisi

Akım kaynağının iletkenin uçları arasında oluşturduğu potansiyel farkı nedeniyle, iletkendeki serbest elektronlar belirli bir yönde hareket eder ve iletkendeki elektrik akımı geçer. Bu potansiyel farkı etkisiyle elektronlar, elektrik potansiyel enerjisinin yüksek olduğu bölgeden düşük olduğu bölgeye doğru hareket ederken kinetik enerjileri artar. Hızlanan elektronlar, hareketleri sırasında iletkeni oluşturan taneciklerle çarpışır ve kinetik enerjilerinin bir kısmını iletkene aktarır. Böylece iletkenin iç enerjisi artar. Sonuç olarak, elektronların yönlü hareketi sayesinde elektrik enerjisi devre boyunca iletilmiş olur.

Elektronlar bu enerjiyi yalnızca iletkene değil, devredeki alıcılara da aktarır. Bu sırada elektrik enerjisi; ısı, ışık, mekanik ve kimyasal enerji gibi farklı enerji türlerine dönüşür. Örneğin elektrikli ısıtıcılarda elektrik enerjisi büyük ölçüde ısı enerjisine, lambalarda ışık ve ısı enerjisine, elektrik motorlarında ise büyük ölçüde mekanik enerjiye dönüşür. Bu nedenle elektrik devreleri, enerjinin bir türden başka bir türe dönüştürüldüğü sistemler olarak değerlendirilebilir.

Bir elektrik akımının, U potansiyel farkının etkisiyle q yükünü kaynağın bir ucundan diğer ucuna taşımak için yaptığı iş şuna eşittir:

$$A = qU .$$

Bir iletkenin belirli bir kesitinden geçen yükün, devrede akan akım şiddetinden hesaplanabileceği göz önüne alındığında:

$$q = I \cdot t ,$$

elektrik akımı tarafından yapılan iş için şu sonucu elde ederiz:

$$A = U \cdot I \cdot t .$$

Formüle göre, elektrik akımının yaptığı iş; iletkenin uçları arasındaki gerilime, iletken üzerinden geçen akıma ve akımın devreden geçiş süresine bağlıdır. İşin SI birim sistemindeki birimi joule (J)'dür. Bu bağıntıdan, $1 \text{ J} = 1 \text{ V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}$ olduğu görülür.

Metalik iletkenlerin dirençleri çok küçük olduğundan, elektrik enerjisinin yalnızca çok küçük bir kısmı iletkenlerde harcanır. Bu nedenle elektrik enerjisinin büyük bölümü elektrikli alıcılara ulaşır ve burada yararlı enerjiye dönüştürülür. Böylece gerilim kaynağı, iletkenler ve alıcılar birlikte elektrik enerjisinin iletildiği ve farklı enerji türlerine dönüştürüldüğü bir sistem oluşturur.

Elektrik akımının gücü

Bir elektrik akımının gücü (P), elektrik akımının birim zamanda yaptığı işi ifade eder. Başka bir deyişle, birim zamanda alıcıya aktarılan veya alıcı tarafından tüketilen elektrik enerjisi miktarıdır:

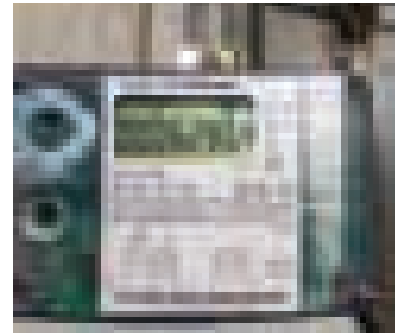
$$P = \frac{A}{t} = U \cdot I .$$

Güç, elektrik akımının birim zamanda yaptığı işi ifade eder. Başka bir deyişle, elektrik enerjisinin birim zamanda ısı, ışık, mekanik enerji gibi diğer enerji türlerine dönüşme hızıdır. Gücün SI birim sistemindeki birimi watt (W)'tır. Bir elektrikli alıcının uçları arasındaki gerilim 1 V ve alıcıdan geçen akım 1 A ise, alıcının gücü 1 W'tır. Buna göre, $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot \text{A}$ olur.

Günlük yaşamda genellikle "elektrik akımının yaptığı iş" yerine "tüketilen elektrik enerjisi" ifadesi kullanılır. Bir elektrikli alıcının başka bir enerji türüne dönüştürdüğü elektrik enerjisi, elektrik akımının yaptığı işe eşittir.

Enerjinin SI birim sistemindeki birimi joule (J) olmasına rağmen, günlük yaşamda ve elektrik enerjisi tüketiminin hesaplanmasında daha çok kilovat-saat (kWh) birimi kullanılır. Bu iki birim arasındaki ilişki $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$ şeklindedir. Bir kilovat-saat, gücü 1 kW olan bir elektrikli alıcının 1 saat boyunca çalışması sırasında tükettiği elektrik enerjisini ifade eder. Elektrik sayaçlarında okunan tüketim değeri ve elektrik faturalarındaki tüketim miktarı kilovat-saat (kWh) cinsinden gösterilir.

Örneğin, bir ailenin bir ayda yaklaşık 300 kWh elektrik enerjisi tüketmesi, yaklaşık $1,08 \cdot 10^9 \text{ J}$ ($1\,080\,000\,000 \text{ J}$) enerji tükettiği anlamına gelir.



Şekil 1. Elektrik sayacı.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Bir elektrikli ısıtıcının uçlarına 220 V gerilim uygulandığında, gücü 2000 W'tır.

- Isıtıcıdan geçen elektrik akımı hesaplayınız?
- Isıtıcının direncini hesaplayınız?

Verilenler:

$$U = 220 \text{ V} , P = 2000 \text{ W} .$$

İstenen:

- $I - ?$, b) $R - ?$

Çözüm:

a) Dirençten geçen akımı bulmak için elektrik gücü formülünü kullanırız:

$$P = U \cdot I \text{ olduğundan, } I = \frac{P}{U} = \frac{2000 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 9,1 \text{ A}.$$

b) Isıtıcının direnci, bir elektrik devresinin bir bölümü için Ohm kanunu kullanılarak bulunabilir:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220 \text{ V}}{9,1 \text{ A}} = 24,2 \Omega.$$

Verim Katsayısı

Her elektrikli alıcıda elektrik enerjisi; ışık, ısı, mekanik enerji, ses gibi farklı enerji türlerine dönüştürülür. Ancak hiçbir elektrikli alıcı, aldığı elektrik enerjisinin tamamını yararlı enerjiye dönüştüremez. Elektrik enerjisinin bir bölümü, çoğunlukla ısı enerjisi olarak çevreye aktarılır. Bu nedenle, alınan toplam enerjinin ne kadarının yararlı enerjiye dönüştürüldüğünü gösteren verime ihtiyaç duyulur.

Verim katsayısı η (eta olarak okunur) ile gösterilir ve şu oranla tanımlanır:

$$\eta = \frac{E_k}{E_{vk}}.$$

Burada E_k , yararlı işe veya istenen başka bir enerji türüne dönüşen enerjiyi; E_{vk} ise sisteme verilen toplam enerjiyi gösterir. Bir cihazın veya makinenin verimi (η) her zaman 1'den küçüktür. Verim yüzde (%) cinsinden ifade edilmek istendiğinde, η değeri 100 ile çarpılır:

$$\eta = \frac{E_k}{E_{vk}} \cdot 100 \%.$$

Bir elektrikli cihazın verimliliği %80 ise, bu, giren elektrik enerjisinin %80'inin yararlı işe dönüştürüldüğü ve kalan %20'sinin, çoğunlukla ısı şeklinde kaybedildiği anlamına gelir.

Joule–Lenz yasası

Serbest elektronlar, direnci büyük olan bir iletkenin üzerinden geçerken kristal örgüyü oluşturan iyonlarla daha sık çarpışır. Bu çarpışmalar sırasında elektronların enerjisinin bir bölümü iletkenin iç enerjisi artar. Bunun sonucunda iletken ısınır. Elektrikli ısıtıcılar, akkor ampuller, saç düzleştiriciler ve elektrikli su ısıtıcıları gibi birçok cihazın çalışma prensibi bu olaya dayanır. Bu cihazlarda elektrik enerjisi ısı ve ışık enerjisine dönüştürülür.

Bununla birlikte, aynı olay elektrik kablolarının aşırı ısınmasına, elektrik motorlarında verim kayıplarına ve transformatörler ile diğer elektrikli cihazlarda enerji kayıplarına da neden olur. Elektrik akımının bu etkisine **termik etki** denir. Elektrik akımının termik etkisi sonucu açığa çıkan ısı miktarı **Joule–Lenz Yasası** ile ifade edilir:

$$Q = I^2 R t,$$

Buna göre, iletkenin veya elektrikli alıcının üzerinden açığa çıkan ısı miktarı (Q); iletkenin direncine, iletkenin direncine ve akımın devreden geçiş süresine bağlıdır. Bu bağıntı, elektrik akımının yaptığı işin tamamının ısı enerjisine dönüştüğü kabul edilerek ve **Ohm Yasası** dikkate alınarak elde edilebilir:

$$Q = U \cdot I \cdot t = \frac{U^2}{R} t = I^2 R t.$$

Bu bağıntılar uygulamada büyük önem taşır. Aynı akım geçtiğinde ince iletkenlerin kalın iletkenlere göre neden daha fazla ısındığını, enerji iletim hatlarında neden öz direnci küçük malzemelerin kullanıldığını ve sigortaların neden aşırı akım durumunda ısınarak devreyi kesecek şekilde tasarlandığını açıklar.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Direnci 4Ω olan bir iletken 30 s boyunca 2 A akım geçmektedir. Buna göre iletkenin açığa çıkan ısı miktarını hesaplayınız.

Verilenler:

$$R = 4\Omega, I = 2A, t = 30s$$

İstenen:

$$Q - ?$$

Çözüm:

$$\text{Joule–Lenz yasasını kullanırız: } Q = I^2 R t = 480J.$$



GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

Günlük yaşamda buzdolabı, çamaşır makinesi, klima, elektrikli su ısıtıcısı, elektrikli ocak ve aydınlatma gibi birçok elektrikli cihaz kullanılır. Bu cihazların her biri belirli bir güçte çalışır. Güç, bir cihazın elektrik enerjisini ne kadar hızlı tükettiğini gösterir.

Bir cihazın gücü arttıkça, belirli bir sürede tükettiği elektrik enerjisi de artar. Bu nedenle elektrikli su ısıtıcıları, elektrikli ocaklar ve klimalar gibi yüksek güçlü cihazlar; LED lambalar veya cep telefonu şarj cihazları gibi düşük güçlü cihazlara göre aynı çalışma süresinde daha fazla elektrik enerjisi tüketir.

Bir cihazın tükettiği elektrik enerjisi yalnızca gücüne değil, çalışma süresine de bağlıdır. Bir elektrikli cihazın tükettiği elektrik enerjisi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$E = P \cdot t,$$

Bu bağıntıya göre, gücü daha büyük olan bir cihaz aynı sürede daha fazla elektrik enerjisi tüketir. Aynı miktarda elektrik enerjisini ise daha kısa sürede harcar.

Tüketicilerin daha bilinçli seçim yapabilmesi için birçok elektrikli cihazda enerji etiketi bulunur. Bu etiket, cihazın enerji verimliliğini gösterir. Enerji verimliliği, cihazın tükettiği elektrik enerjisinin ne kadarını yararlı enerjiye dönüştürdüğünü ifade eder. Enerji sınıfı daha yüksek olan cihazlar (örneğin A veya A+), aynı işi yaparken enerji sınıfı daha düşük olan cihazlara göre daha az elektrik enerjisi tüketir.

Enerji verimliliği yüksek cihazların tercih edilmesi, elektrik enerjisi tüketimini ve elektrik faturalarını azaltırken enerji kayıplarının da azalmasını sağlar. Bu nedenle elektrik gücü, iş ve enerji kavramları günlük yaşamda önemli bir yere sahiptir ve elektrik enerjisinin verimli kullanılmasına katkı sağlar.



Şekil 2.

Elektrikli cihazlardaki enerji etiketleri.
Cihazın gücü ve çalışma süresi, tüketilen elektrik enerjisini belirler.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Bir iletken den elektrik akımı geçtiğinde neden ısı oluşur?
2. Elektrikli ısıtıcılar (örneğin ütü, ekmek kızartma makinesi ve elektrikli ısıtıcı) neden aynı devrede bulunan sıradan iletkenlere göre daha fazla ısınır? Açıklayınız.
3. Yüksek akımların geçtiği elektrik devrelerinde neden ince iletkenler yerine kalın iletkenler kullanılır? Açıklayınız.
4. Aynı gerilimle çalışan telefon şarj cihazlarının iletken telleri, hızlı şarj sırasında neden daha fazla ısınır? Açıklayınız.
5. Dirençleri $20\ \Omega$ ve $30\ \Omega$ olan iki direnç seri bağlanarak $120\ \text{V}$ gerilim kaynağına bağlanmıştır. Buna göre aşağıdakileri hesaplayınız:
 - a) Her dirençte harcanan gücü hesaplayınız.
 - b) Devrenin toplam gücünü hesaplayınız. (Çözüm: a) $115,2\ \text{W}$, $172,8\ \text{W}$, b) $288\ \text{W}$)
1. $R_1 = 10\ \Omega$ ve $R_2 = 40\ \Omega$ olan iki direnç paralel bağlanarak iç direnci ihmal edilen $120\ \text{V}$ gerilim kaynağına bağlanmıştır. Buna göre aşağıdakileri hesaplayınız: a) Her dirençten geçen akımı hesaplayınız. b) Her dirençte harcanan gücü hesaplayınız. (Çözüm: a) $12\ \text{A}$, $3\ \text{A}$ b) $1440\ \text{W}$, $360\ \text{W}$)

1.13. Sıvılar ve gazlardan geçen elektrik akımı

Yıldırım, havada meydana gelen bir elektrik boşalmasıdır. Ancak normal koşullarda gazlar yalıtkan olduğundan elektrik akımını iletmez. Peki, bu durumda yıldırım nasıl oluşur? Ayrıca, elektrik akımı bazı durumlarda sıvılardan nasıl geçebilir?

Elektrik akımı farklı ortamlarda iletilebilir. Metallerde elektrik akımını serbest elektronlar taşıırken, sıvılarda ve gazlarda akımın iletimi farklı mekanizmalarla ve yalnızca belirli koşullar altında gerçekleşir.

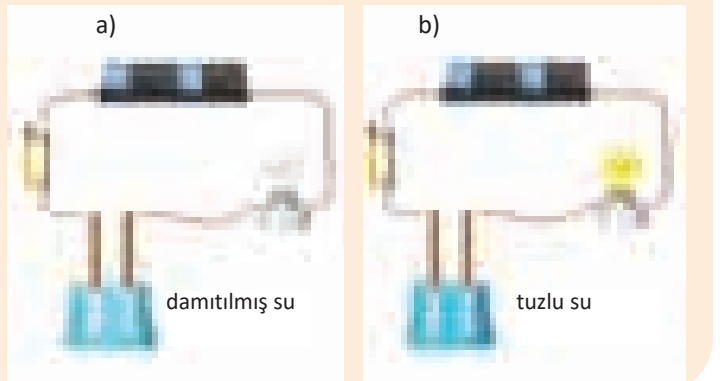
Sıvılardan geçen elektrik akımı



ETKİNLİK 1.

Bir gerilim kaynağına ve bir ampule bağlı iki elektrodu saf su bulunan bir kaba daldırınız. Devredeki anahtarı kapatınız. Ampul yanıyor mu? İsterseniz ampul yerine devreye bir ampermetre bağlayabilirsiniz. Daha sonra kaba bir miktar sofr tuzu ekleyiniz. Anahtarı yeniden kapattığınızda ampul yanıyor mu?

Şekil 1. a) Damıtılmış (distile) su elektrik akımını iletmez
b) Tuzlu su elektrik akımını iletir



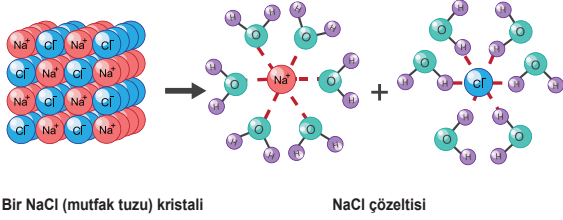
Bu etkinlikte, saf (distile) suyun elektrik akımını iletmediği, buna karşılık tuzlu suyun elektrik akımını iletmediği görülür (Şekil 1). Suyu tuz yerine bir asit veya baz eklendiğinde de ampul yanar ya da ampermetre akım geçtiğini gösterir. Buna göre, tuz, asit ve baz çözeltileri elektrik akımını iletir.

Buna karşılık, yağ tuz eklendiğinde karışım elektrik akımını iletmez. Bu durum, bir sıvının elektrik iletkenliğinin yalnızca içinde çözülmüş madde bulunmasına değil, sıvıda hareket edebilen elektrik yükü taşıyıcılarının bulunmasına da bağlı olduğunu gösterir.

Elektrolitik ayrışma

Tuz su içinde çözündüğünde, elektriği ileten yük taşıyıcıları oluşur. Bunun nedeni, suyun etkisiyle tuzun iyonlarına ayrılmasıdır. Bir maddenin suda çözünerek iyonlarına ayrılması olayına elektrolitik ayrışma denir. Bu olay sonucunda çözeltide pozitif yüklü iyonlar (katyonlar) ve negatif yüklü iyonlar (anyonlar) oluşur. Sıvılarda elektrik akımını bu iyonlar taşır.

Su, polar yapıli moleküllerden oluştuğu için iyi bir çözücüdür. Su molekülünde elektrik yükü eşit dağılmamıştır. Molekülün bir ucu kısmen pozitif, diğeri ucu ise kısmen negatif yüklüdür.



Şekil 2.

Sodyum klorürün elektrolitik ayrışması.

Tuz suya eklendiğinde, su molekülleri iyonların çevresini sarar. Su moleküllerinin kısmen negatif yüklü ucu Na^+ iyonlarına, kısmen pozitif yüklü ucu ise Cl^- iyonlarına yönelir. Böylece su molekülleri, iyonları kristal yapı içinde bir arada tutan çekim kuvvetini zayıflatır. Sonuç olarak, su molekülleri tarafından çevrelenmiş serbest Na^+ ve Cl^- iyonları oluşur (Şekil 2).

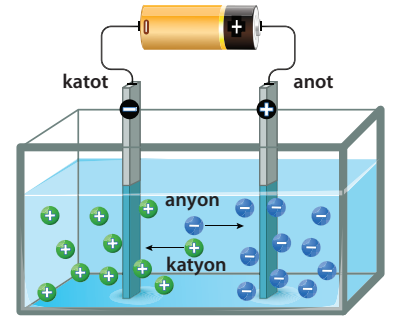
Bu serbest iyonlar çözelti içinde hareket edebilir. Elektrotlar bir gerilim kaynağına bağlandığında, iyonların yönlü hareketi sayesinde çözeltiden elektrik akımı geçer. Bu sırada pozitif yüklü iyonlar (katyonlar) negatif elektrota (katot), negatif yüklü iyonlar (anyonlar) ise pozitif elektrota (anot) doğru hareket eder.

Elektrotlar bir gerilim kaynağına bağlandığında, pozitif yüklü iyonlar (katyonlar) negatif elektrota (katot), negatif yüklü iyonlar (anyonlar) ise pozitif elektrota (anot) doğru hareket eder. İyonların bu yönlü hareketi, çözeltiden elektrik akımının geçmesini sağlar. Yağda ise durum farklıdır. Yağ molekülleri polar olmadığından, sodyum klorürün iyonlarına ayrılmasını sağlayamaz. Bu nedenle tuz çözünse bile iyonlarına ayrılmaz, çözeltide hareket edebilen yük taşıyıcıları oluşmaz ve yağ elektrik akımını iletmez. Elektrik akımını iyonlar aracılığıyla ileten sıvılara **elektrolit** denir. Elektrolitlerde elektrik akımı, pozitif ve negatif iyonların yönlü hareketi sayesinde iletilir.

Elektroliz

Elektrolitte elektrik alanı yokken iyonlar rastgele hareket eder. Ancak iki elektrot arasına doğru akım gerilimi uygulandığında oluşan elektrik alanının etkisiyle iyonlar belirli bir yönde hareket etmeye başlar. Negatif yüklü iyonlar (anyonlar) pozitif elektrota (anot), pozitif yüklü iyonlar (katyonlar) ise negatif elektrota (katot) doğru hareket eder. İyonlar elektrotlara ulaştıklarında kimyasal tepkimelere katılır. Bu sırada anyonlar elektron vererek yükseltgenir, katyonlar ise elektron alarak indirgenir (Şekil 3).

Bir elektrolitten elektrik akımı geçirildiğinde, elektrotlar üzerinde maddelerin ayrışması veya birikmesi olayına **elektroliz** denir. Elektrotlarda oluşan maddeler, elektrolitin yapısından veya gerçekleşen kimyasal tepkimelerin ürünlerinden kaynaklanabilir.



Şekil 3. Elektrolit içindeki iyonların hareketi.

Faraday'ın elektroliz yasaları

Şekil 3'teki devrede, metal iletkenlerden, elektrolitten ve elektrotlardan aynı şiddette akım geçer. Elektroliz sırasında anotta verilen elektron sayısı, katotta alınan elektron sayısına eşittir. Ancak elektrolize katılan iyonların kütleleri farklı olabilir.

Michael Faraday, elektrotlarda biriken veya gaz hâlinde açığa çıkan maddenin kütlesinin hangi etkenlere bağlı olduğunu araştırmıştır.

Şiddeti I olan bir akım, bir elektrolitten t süreyle geçtiğinde, elektrolitten geçen toplam yük $q = I \cdot t$ olur.

Bu süre içinde elektrot üzerinde biriken iyon sayısı arttıkça, biriken maddenin kütlesi de artar. Biriken maddenin kütlesi, $m = m_0 \cdot N$ bağıntısıyla ifade edilir. Burada m_0 bir iyonun kütlesini, N ise elektrot üzerinde biriken iyon sayısını gösterir. Elektrolitten geçen toplam yük, iyonların taşıdığı yük cinsinden de ifade edilebilir. Yüğü (ze) olan N tane iyon için:

$q = N \cdot z \cdot e$ olur, burada z iyonun değerliğini, e ise temel elektrik yükünü gösterir. Bu bağıntılar birlikte kullanıldığında aşağıdaki sonuç elde edilir: $N = \frac{q}{ze}$.

Bu bağıntı, kütle bağıntısında yerine yazılır. Daha sonra denklemin sağ tarafındaki ifadenin payı ve paydası **Avogadro sayısı** (N_A) ile çarpılır:

$$m = m_0 \cdot \frac{q}{ze} \cdot \frac{N_A}{N_A}.$$

Eğer $m_0 \cdot N_A = M$, olduğu dikkate alınırsa ve iki sabitin çarpımının yine bir sabit verdiği, yani $e \cdot N_A = F$ olduğu göz önünde bulundurulursa, elektrot üzerinde biriken (veya çöken) maddenin kütlesi için aşağıdaki formül elde edilir:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{z} \cdot q,$$

Burada F , Faraday sabitini; M , maddenin mol kütlesini; z ise iyonun yük sayısını (değerliğini) gösterir. Son bağıntı, **Faraday Yasaları** olarak bilinen yasaların matematiksel ifadesidir. **Faraday'ın Birinci Yasası'na** göre, elektrot üzerinde biriken maddenin kütlesi, elektrolitten geçen elektrik yükü ile doğru orantılıdır. Yani:

$$m = k \cdot q,$$

burada k , elektrokimyasal eşdeğer olarak adlandırdığımız bir orantılılık sabitidir. SI birim sistemindeki birimi $\frac{\text{kg}}{\text{C}}$ 'dir. Elektrolitten geçen elektrik yükünü doğrudan ölçmek yerine, akım şiddeti (I) ve akımın geçiş süresi (t) daha kolay ölçülebildiğinden, Faraday'ın Birinci Yasası daha kullanışlı bir biçimde aşağıdaki gibi yazılır:

$$m = k \cdot I \cdot t.$$

Faraday'ın İkinci Yasası'na göre, elektrot üzerinde biriken veya açığa çıkan maddenin kütlesi, maddenin cinsine bağlıdır. Başka bir ifadeyle, bir maddenin elektrokimyasal eşdeğeri, kimyasal eşdeğeri ile doğru orantılıdır $\frac{M}{z}$. Matematiksel olarak bu, aşağıdaki formülle yazılabilir:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{z}.$$

Burada $\frac{M}{z}$ addenin kimyasal eşdeğeridir. Elektrokimyasal eşdeğer, maddenin kimyasal eşdeğeri ile doğru, Faraday sabiti (F) ile ters orantılıdır, yani faraday sabitinin değerini temsil eder. Faraday sabitinin değeri $F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ C/mol}$ dur ve bir mol tek değeri olan maddenin ($z = 1$) katotta birikmesi için elektrolitten geçmesi gereken elektrik miktarını temsil etmektedir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

15 A şiddetindeki bir akım, nikel tuzu çözeltisinden 1 saat boyunca geçiriliyor. Nikelin elektrokimyasal eşdeğeri $3,04 \cdot 10^{-7} \text{ kg/C}$ olduğuna göre, elektrot üzerinde biriken nikel kütlesini hesaplayınız.

Verilenler:

$I = 15 \text{ A}$, $t = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$,
 $k = 3,04 \cdot 10^{-7} \text{ kg/C}$

Bulunması gereken:

$m = ?$

Çözüm:

Faraday'ın Birinci Yasası'na göre $m = k \cdot q$ Elektrik yükü $q = I \cdot t$ olduğundan, $m = k \cdot I \cdot t$ bağıntısı elde edilir. Bilinen değerler yerine yazıldığında,

$$m = 16,4 \text{ g}$$

bulunur.

**ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.**

Erimiş alüminyum oksit (Al_2O_3) elektrolizi sırasında, katotta 0,7 kg saf alüminyum elde etmek için 50 kWh elektrik enerjisi tüketilir.

a) Alüminyumun elektrokimyasal eşdeğerini hesaplayınız. Alüminyumun mol kütlesi ve değerlik derecesi değerlerini Periyodik Tablo'dan alınız.

b) Elektrolit içindeki elektrotlar arasındaki gerilimi hesaplayınız.

Verilen:

$E = 50 \text{ kWh} = 50 \cdot 1000 \cdot 3600 \text{ Ws} = 1,8 \cdot 10^8 \text{ J}$,
 $m = 0,7 \text{ kg}$

Aranan:

a) $k = ?$

b) $U = ?$

Çözüm:

a) Faraday'ın İkinci Yasasına göre $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{z}$ Periyodik cetveldен alınan $M = 26,98 \text{ g/mol}$ ve $z = 3$ değerleri yerine konulduğunda, $k = 9,32 \cdot 10^{-8} \text{ kg/C}$ elde edilir.

b) Faraday'ın Birinci Yasasına göre $m = kIt$ Elektrik enerjisi bağıntısından $E = Ult$ olduğuna göre, It çarpımı bu ifadedен alınabilir. Bu yerine koyma yapıldığında elektrotlar arasındaki gerilim için $U = k \frac{E}{m}$, bağıntısı elde edilir. Sayısal değerler yerine konulduğunda: $U = 24 \text{ V}$ bulunur.

**GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA**

Elektrolizin bilim ve teknoloji de birçok uygulama alanı vardır. Elektrokimya, elektrik akımı ile ilişkili kimyasal olayları inceleyen kimya dalıdır. Metalurjide elektroliz, safsızlıklardan arındırılmış saf metal elde etmek amacıyla metallerin rafine edilmesinde (saflaştırılmasında) kullanılır. Bakırın elektrolitik rafinasyonunda katot saf bakır levhadan, anot ise ham bakırdan oluşur. Elektrolit olarak bakır sülfatın sulu çözeltisi kullanılır. Bu işlem sonucunda %99'un üzerinde saflığa sahip bakır elde edilir ve değerli metaller de geri kazanılabilir.

Elektroliz, endüstride birçok metalin üretiminde de kullanılır. Cevherleri (çoğunlukla metal oksitleri veya tuzları) çok kararlı olan ya da yüksek erime noktasına sahip bazı metaller yalnızca elektroliz yöntemiyle elde edilebilir. Bu metaller arasında alüminyum, lityum, sodyum, potasyum ve magnezyum bulunur. Alüminyum oksit (Al_2O_3), önce erime noktasını düşüren ve elektrik iletkenliğini artıran bir elektrolit içinde çözündürülür. Elektrot olarak grafit çubuklar kullanılır. Bu yöntemle saf ve korozyona dayanıklı alüminyum elde edilir.

Endüstride birçok metal parça; dayanıklılığını artırmak, korozyona karşı korumak, görünümünü iyileştirmek veya parlaklık kazandırmak amacıyla başka bir metal ile kaplanır. Bu işlemde en yaygın olarak bakır, çinko, nikel ve krom kaplamalar kullanılır. Elektroliz yöntemiyle bir metal yüzeyin başka bir metalin ince bir tabakasıyla kaplanmasına **galvanizleme** denir. Kullanılan kaplama metaline bağlı olarak altın kaplama, gümüş kaplama, nikel kaplama, krom kaplama ve çinko kaplama gibi işlemler yapılabilir. Bu

işlemede kaplanacak cisim katot, kaplama metali ise anot olarak kullanılır. Elektrolit olarak, kaplama metalinin tuzunun sulu çözeltisi kullanılır.

Galvanizleme, endüstride yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Metal yüzeyleri korozyona karşı korumak, dayanıklılığını artırmak veya görünümünü iyileştirmek amacıyla uygulanır.

Elektrolizden yararlanılan bir diğer yöntem ise **elektroşekillendirme**dir. Bu yöntemde bir cismin metalden kopyası elde edilir. Önce balmumu, alçı veya plastikten bir kalıp hazırlanır. Kalıbın yüzeyi elektriği iletebilmesi için grafit tozu ile kaplanır. Daha sonra kalıp elektrolit içine yerleştirilir ve üzerine elektroliz yoluyla metal biriktirilir. Bu yöntem; kabartmaların, madalyaların, kalıpların ve çeşitli metal kopyaların üretiminde kullanılır.

Gazlardan geçen elektrik akımı

Gazlar, nötr atom ve moleküllerden oluştuğu için normal koşullarda elektrik akımını iletmez. Ancak belirli koşullar altında gazlar elektrik iletkeni hâline gelebilir. Gaz içinde serbest elektronlar ve iyonlar oluştuğunda, bu parçacıklar elektrik akımını taşır. Elektronların nötr atom veya moleküllerden ayrılması olayına iyonlaşma denir. İyonlaşma sonucunda gazda pozitif iyonlar ve serbest elektronlar oluşur. Serbest elektronların nötr atom veya moleküller tarafından yakalanmasıyla negatif iyonlar da oluşabilir.

Gazların iyonlaşmasına neden olan etkenlere iyonlaştırıcı etkenler denir. Yüksek sıcaklık, morötesi (ultraviyole) ışınlar, X ışınları, gama ışınları, güçlü elektrik alanı ve hızlı parçacıkların çarpışması bu etkenlere örnek olarak verilebilir. Gazın iyonlaşabilmesi için atom veya moleküllerine, iyonlaşma enerjisi olarak adlandırılan yeterli enerjinin aktarılması gerekir.

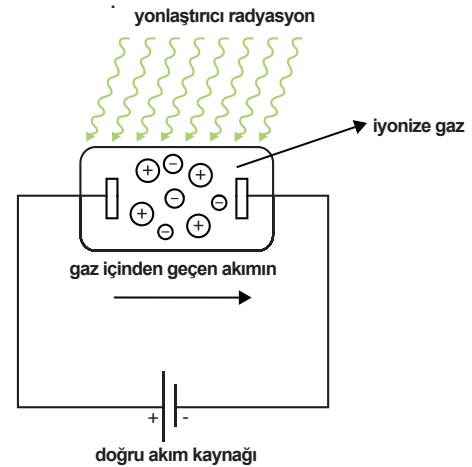
Bağımlı ve bağımsız deşarj

İki elektrot bir gerilim kaynağına bağlandığında, elektrotlar arasında bir elektrik alanı oluşur. Elektrotlar arasındaki gerilim düşük olduğunda elektrik alanı da zayıftır ve gazdan elektrik akımı geçmez. Ancak gaz içinde, kozmik ışınların etkisi veya moleküller arasındaki çarpışmalar sonucu oluşan az sayıda serbest elektron ve iyon her zaman bulunur. Elektrik alanı zayıf olduğunda bu yük taşıyıcıları ölçülebilecek bir elektrik akımı oluşturamaz.

Gaz, mum alevi veya radyoaktif bir kaynak gibi iyonlaştırıcı bir etkiyle iyonlaştırıldığında, gazdaki serbest elektron ve iyon sayısı artar. Bu durumda, zayıf bir elektrik alanında bile gazdan elektrik akımı geçebilir. Gazdan elektrik akımının geçmesine **elektrik boşalması (deşarj)** denir. Dışarıdan bir iyonlaştırıcı etkiyle başlatılan ve sürdürülen elektrik boşalmasına **sürekli gaz boşalması** denir (Şekil 4).

Elektrotlar arasındaki gerilim önemli ölçüde artırılırsa, elektrik alanı gazda bulunan serbest elektronları hızlandıracak kadar güçlü hale gelir. Hızlanan elektronlar daha fazla kinetik enerji kazanır ve nötr bir gaz molekülüyle çarpıştıklarında, bu molekülden bir elektron koparabilirler. Bu gerçekleştiğinde, gaz molekülü pozitif yüklü hale gelir. Yeni serbest elektron kinetik enerji kazanır ve gaz içinde hareket etmeye devam eder. Her yeni elektron, yolundaki nötr bir molekülle çarpışarak başka bir elektronu serbest bırakabilir; böylece Şekil 5'te gösterildiği gibi elektron ve pozitif iyonların sayısı kat kat artar.

Bu olaya **çarpışmalı iyonlaşma** denir. Bu tür iyonlaşmada, elektronlar güçlü elektrik alanının etkisiyle kazandıkları kinetik enerji sayesinde atom veya molekülleri iyonlaş-



Ş ekil 4.

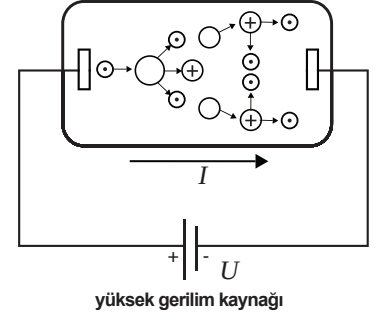
Kendiliğinden sürdürülemeyen gaz boşalması

tırır. Elektrotlar arasındaki gerilim yeterince büyük olduğunda çarpışmalı iyonlaşma kendi kendini sürdürebilir. Bu durumda dışarıdan bir iyonlaştırıcı etkiye gerek kalmadan iyonlaşma sürekli devam eder.

Bu durumda gaz, dışarıdan bir iyonlaştırıcı etkiye gerek kalmadan kendi kendine yeni iyonlar ve elektronlar üretmeye başlar. Böylece kendi **kendini sürdüren gaz boşalması** meydana gelir.

Bu boşalma, kıvılcım boşalması gibi kısa süreli veya ark boşalması gibi uzun süreli olabilir. Doğada yıldırım da aynı ilkeye dayanır. Yıldırım, bulut ile yer arasında veya iki bulut arasında meydana gelen bir elektrik boşalmasıdır. Bu olay sırasında oluşan çok güçlü elektrik alanı havayı iyonlaştırır ve içinden çok büyük bir elektrik akımının geçtiği iletken bir kanal oluşturur.

Pratik uygulamalarda, gazın kapalı bir kap içinde düşük basınç altında bulunduğu **kontrollü gaz boşalması** kullanılır. Basıncın düşürülmesi, gaz tanecikleri arasındaki ortalama serbest yolu artırır ve elektrik alanının etkisinin daha kolay kontrol edilmesini sağlar. Bu tür gaz boşalmaları; laboratuvar çalışmalarında, bilimsel araştırmalarda, gaz lazerlerinde, katot ışınlı tüplerde, neon lambalarında ve argon, kripton gibi soy gazlar içeren deşarj lambalarında kullanılır.



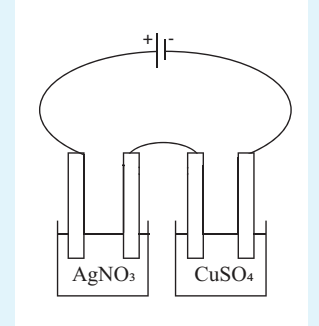
Şekil 5.

Kendi kendini sürdüren gaz deşarjı.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Elektrolitlerde elektrik akımını taşıyan parçacıklar hangileridir? Gazlarda elektrik akımını taşıyan parçacıklar hangileridir?
2. Katoda biriken metal kütlesinin, elektrolitten geçen akımın şiddetiyle neden doğru orantılı olduğunu açıklayın.
3. Galvanizleme(galvanizasyon) işlemini açıklayın.
4. Çarpışmalı iyonlaşma sürecinde elektrik alanının rolünü açıklayınız.
5. Gaz içinden geçen kendiliğinden devam etmeyen ve kendiliğinden devam eden deşarj arasındaki farkı açıklayın.
6. Bakır sülfat (CuSO_4) çözeltisinin elektrolizi sırasında elektrolitten 4 A şiddetinde akım geçmektedir. Akım 12 saat boyunca geçtiğine göre, katotta biriken bakırın kütlesini hesaplayınız. (Çözüm: 57 g)
7. Şekilde gösterildiği gibi, iki kapta bakır ve gümüş tuzlarının elektrolizi aynı anda gerçekleşmektedir. Biriken bakır kütlesi 100 g ise, biriken gümüşün kütlesi ne kadardır? Şekilde, hangi elektrotun bakır biriktireceğini ve hangisinin gümüş biriktireceğini işaretleyin. (Çözüm: $m_{\text{Ag}} = 399 \text{ g}$)



1.14. Manyetik alan

Manyetizma, doğal bir mineral olan **manyetit** küçük demir cisimleri çekebildiğinin eski uygarlıklar tarafından fark edilmesiyle bilinen bir fiziksel olaydır. Tarihsel kaynaklara göre **mıknatıs** ve **manyetizma** sözcükleri, bu mineralin bulunduğu Anadolu'daki eski **Magnesia** bölgesinin adından türemiştir. Demir gibi bazı maddeleri çekebilen malzemelere **manyetik malzemeler** denir. Bu malzemeler manyetik özellik gösterir, manyetik alanlarla etkileşir, mıknatıslanabilir ve mıknatıslar tarafından çekilir. Demir, nikel, kobalt, çelik ile AlNiCo ve NdFeB (neodimyum mıknatıslar) gibi bazı alaşımlar manyetik malzemelere örnekler. 17. yüzyılın başlarına kadar bazı minerallerin demir cisimleri çekme özelliği bilimsel olarak açıklanamamıştı. Bu durum, yalnızca bazı taşlara özgü ilginç bir özellik olarak kabul ediliyordu. İngiliz bilim insanı ve hekim **William Gilbert**, uzun yıllar süren araştırma ve deneylerinin ardından **De Magnete (Manyetizma Üzerine)** adlı eserini yayımladı.

Bu çalışmada, yaşadığı döneme göre oldukça ileri düzeyde bilimsel açıklamalar ortaya koydu. Gilbert'e göre Dünya, kendi manyetik kutuplarına sahip büyük bir mıknatıstır. Ayrıca pusulanın Kuzey Yıldızı'nı değil, Dünya'nın manyetik alanını gösterdiğini ortaya koyarak, Kuzey Kutbu'nda büyük bir manyetik ada bulunduğunu yönündeki dönemin yaygın inanışlarını çürütmüştür.

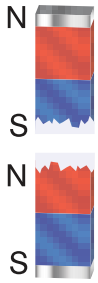
Mıknatıs ve Manyetik Kutuplar

Her mıknatısın iki kutbu vardır: kuzey ve güney. Bir mıknatıs kırıldığında veya ayrıldığında, iki kutuplu yeni mıknatıslar oluşur (Şekil 1). Birçok fizikçi, tek kutuplu bir mıknatıs (manyetik tek kutup) elde etmeye çalışmıştır, ancak tüm girişimler başarısızlıkla sonuçlanmıştır. İzole bir manyetik kutup hiç keşfedilmemiştir. Madde içindeki manyetizma, dipol (iki kutuplu) yapıların bir sonucu olarak malzemenin iç yapısından kaynaklandığından, tek kutuplu bir mıknatıs yoktur.

Doğal mıknatısların özelliklerinden yararlanılarak geliştirilen en önemli araçlardan biri pusuladır. Pusula, çalışma prensibi Dünya'nın manyetik alanına dayanan bir çubuk mıknatıstır. Ağırlık merkezi etrafında serbestçe dönebilen mıknatıslanmış bir iğneden oluşur. İğne; alüminyum, plastik veya cam gibi manyetik olmayan bir malzemeden yapılmış bir kutu içinde bulunur.

Geleneksel olarak, iğnenin Dünya'nın Coğrafi Kuzey Kutbu'nu gösteren ucu manyetik kuzey kutbu (N), Coğrafi Güney Kutbu'nu gösteren ucu ise manyetik güney kutbu (S) olarak adlandırılır.

Yön bulmak için pusula yatay bir konuma yerleştirilir ve iğnenin dengelenmesi beklenir. Dengeye ulaştığında iğnenin manyetik kuzey kutbu (N) kuzey yönünü gösterir (Şekil 2).



Şekil 1.
Her mıknatısın iki kutbu vardır

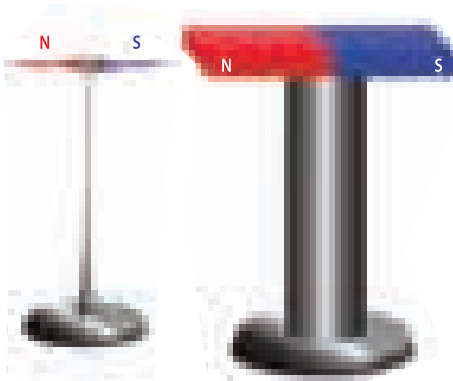


Şekil 2.
Pusula.

İki mıknatısın etkileşimi, manyetik bir iğne yardımıyla kolayca gösterilebilir. Ağırlık merkezi etrafında serbestçe dönebilen manyetik bir iğne, çubuk mıknatısın kuzey kutbuna yaklaştırıldığında, zıt kutupların birbirini çekmesi ve aynı kutupların birbirini itmesi nedeniyle belirli bir doğrultuda yönelir (Şekil 3a).

Aynı durum iki çubuk mıknatıs için de geçerlidir. Zıt kutuplar (N-S veya S-N) birbirini çekerken, aynı kutuplar (N-N veya S-S) birbirini iter (Şekil 3b).

a)



b)



Şekil 3. a) Pusula iğnesi ile çubuk mıknatıs arasındaki etkileşim.
b) İki çubuk mıknatıs arasındaki etkileşim.



ETKİNLİK 1.

Bir çubuk mıknatıs ve serbestçe dönebilen bir pusula iğnesi kullanınız. Mıknatısı manyetik olmayan bir yüzey üzerine yerleştiriniz. Şekil 3a'da gösterildiği gibi pusula iğnesini mıknatısın bir kutbuna yavaşça yaklaştırınız ve davranışını gözlemleyiniz. Daha sonra pusula iğnesini mıknatısın diğer kutbuna yaklaştırınız. Ne gözlemliyorsunuz? Hangi durumda çekme kuvveti, hangi durumda itme kuvveti oluşmaktadır? Defterinize bir şekil çizerek mıknatıs ile pusula iğnesi arasındaki etkileşmeyi ve etki eden kuvvetleri gösteriniz.

Not: Bu etkinlik için şu simülasyonu da kullanabilirsiniz:

Mıknatıs ve Pusula'yı (Magnet and Compass) da kullanabilirsiniz; bu simülasyona şu web sitesinden ulaşabilirsiniz:

<https://phet.colorado.edu/mk/simulations/magnet-and-compass>.



Manyetik Alan ve Manyetik Kuvvet Çizgileri

Her mıknatıs, çevresinde bir manyetik alan oluşturur. Elektrik yüklerinin çevresinde elektrik alanı bulunduğu gibi, mıknatısların çevresinde de manyetik alan bulunur. Manyetik alan, mıknatısların birbirleriyle ve elektrik akımı geçen iletkenlerle etkileşmesini sağlar.

Manyetik alanı göstermek için manyetik alan çizgileri kullanılır. Manyetik alan çizgileri, manyetik alanın özelliklerini göstermeye yarayan kuramsal çizgilerdir. Gerçekte var olan fiziksel çizgiler değildir; manyetik alanı daha kolay anlamak ve görselleştirmek amacıyla kullanılan bir modeldir.



ETKİNLİK 2.

Bir çubuk mıknatısı veya at nalı mıknatısını çalışma yüzeyine yerleştiriniz ve üzerine ince bir pleksiglas ya da plastik levha koyunuz. Levhanın üzerine ince demir tozu serpiniz. Levhaya parmağınızla hafifçe birkaç kez vurunuz. Demir tozlarının oluşturduğu deseni gözlemleyiniz (Şekil 4). Demir tozlarının dizilişini ve yoğunluğunu açıklayınız.

a)



b)



Şekil 4.
Demir tozu ile manyetik alan çizgilerinin gösterilmesi:
a) Çubuk mıknatıs.
b) At nalı mıknatıs.

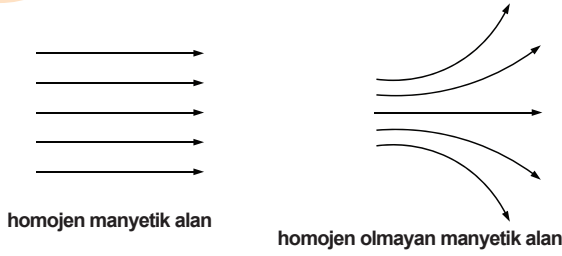
Belirli bir noktadaki manyetik alan çizgilerinin yönü, o noktaya yerleştirilen manyetik iğnenin kuzey kutbunun gösterdiği yöndür. Buna göre, mıknatısın dışında manyetik alan çizgileri manyetik kuzey kutbundan çıkar ve manyetik güney kutbuna girer (Şekil 5). Bu çizgiler birbirini kesmez ve mıknatısın çevresinde kapalı eğriler oluşturur. Manyetik alan çizgilerinin kapalı olması, tek başına bir manyetik kutbun bulunmadığını gösterir.

Birim alandan geçen manyetik alan çizgilerinin sayısı, **manyetik alanın şiddetinin** bir ölçüsüdür.

Şekil 5'te, manyetik alan çizgilerinin yoğunluğunun çubuk



Şekil 5. Çubuk mıknatısın manyetik alan çizgileri.



Şekil 6.

Homojen ve homojen olmayan manyetik alan.

mıknatısın kutupları yakınında en fazla olduğu görülebilir. Alan çizgileri paralel ve eşit aralıklıysa, alanın homojen olduğunu söyleriz; tersi durumda ise homojen olmayan bir manyetik alan söz konusudur (Şekil 6).

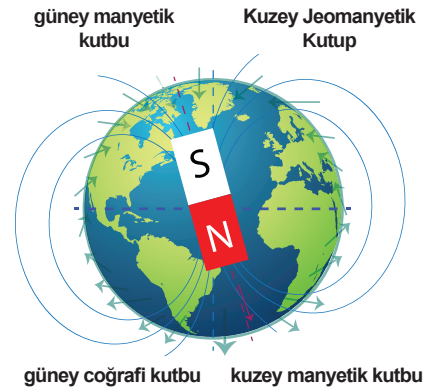
Manyetik alanın uzaydaki yönünü iki boyutlu olarak göstermek için bazı ortak semboller kullanılır. Manyetik alan çizgileri kâğıdın veya sayfa düzleminin içine doğru yönelmişse $\otimes$ sembolü, sayfa düzleminin dışarı doğru yönelmişse $\odot$ sembolü kullanılır.

Dünya'nın Manyetik Alanı

Pusula iğnesi, küçük bir çubuk mıknatıs gibi davranarak yaklaşık kuzey-güney doğrultusunda hizalanır. Bu durum, Dünya'nın büyük bir mıknatıs gibi davrandığını gösterir. Geleneksel olarak, pusula iğnesinin kuzeyi gösteren ucu **manyetik kuzey kutbu** olarak adlandırılır. Buna göre Dünya'nın **manyetik güney kutbu** coğrafi Kuzey Kutbu'nun, **manyetik kuzey kutbu** ise coğrafi Güney Kutbu'nun yakınında bulunur (Şekil 7).

Dünya'nın manyetik alanının kaynağı, Dünya'nın iç yapısında yer alır. Dünya'nın merkezinde katı hâlde bir iç çekirdek, bunun çevresinde ise sıvı hâlde bir dış çekirdek bulunur. Dış çekirdek, elektrik akımını ileten demir ve nikelten oluşur. Isı akımları ve Dünya'nın dönme hareketinin etkisiyle bu sıvı metalin hareketi, Dünya'nın manyetik alanını oluşturur.

Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönmesi, dış çekirdekteki iletken sıvının hareket etmesine neden olur. Bu hareket eden elektrik yükleri, kendi kendini sürdüren bir manyetik alan oluşturur. Dünya'nın manyetik alanının bu şekilde oluşmasına jeodinamo denir.



Şekil 7.

Dünya'nın manyetik alanı.

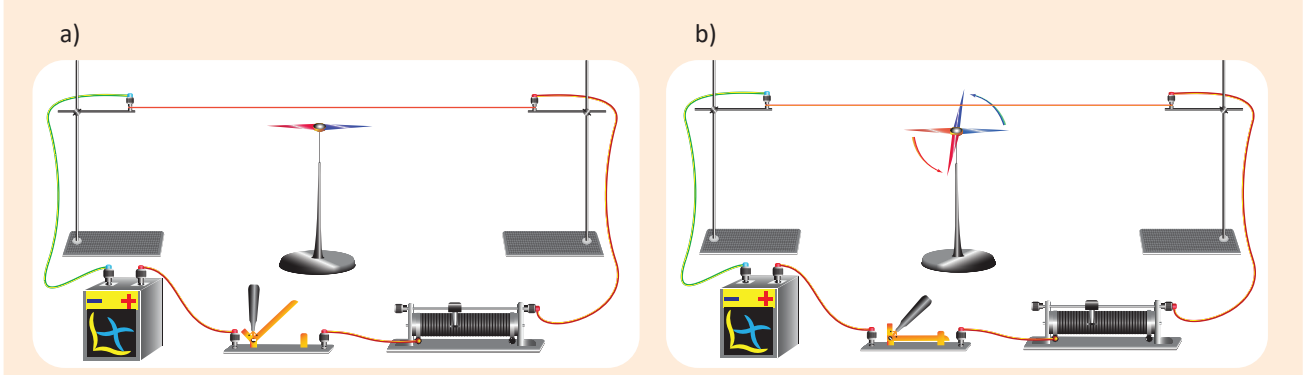
Elektrik Akımının Oluşturduğu Manyetik Alan

Dünya'nın manyetik alanının anlaşılması, Hans Christian Ersted'in tarihî keşfinin de anlaşılmasını sağlar. Ersted, 1820 yılında kuzey-güney doğrultusunda yerleştirilmiş ve üzerinden elektrik akımı geçen düz bir iletkenin yakınına konulan pusula iğnesinin saptığını gözlemledi (Şekil 8). Akımın oluşturduğu manyetik alan, iletkenin yakınındaki Dünya'nın manyetik alanını değiştirecek kadar güçlüydü. Bu gözlem, elektrik akımı geçen bir iletkenin çevresinde manyetik alan oluştuğunu gösteren ilk açık kanıt olmuş ve elektriksel olaylarla manyetik olaylar arasında doğrudan bir ilişki bulunduğunu ortaya koymuştur.



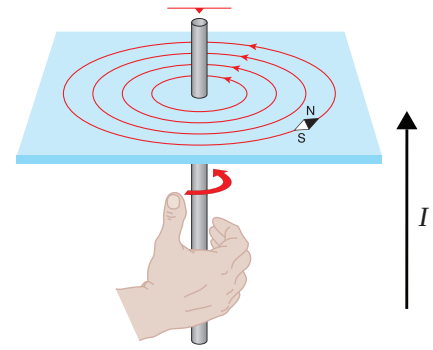
ETKİNLİK 3.

Genel olarak, manyetik alan hareket eden elektrik yükleri tarafından oluşturulur. Bu nedenle, üzerinden elektrik akımı geçen bir iletken de çevresinde bir manyetik alan oluşturur. Akım geçen bir iletkenin çevresinde manyetik alan oluştuğu, Ersted'in deneyine benzer basit bir düzenceyle gösterilebilir. Bir gerilim kaynağı, anahtar, reosta ve iletken tellerden oluşan bir devre kurulur. İletkenin bir bölümü kuzey-güney doğrultusunda düz olacak şekilde yerleştirilir ve altına bir pusula iğnesi konulur. İletkenden akım geçmediğinde pusula iğnesi, Dünya'nın manyetik alanının etkisiyle kuzey-güney doğrultusunda yönelir (Şekil 8a). Devre kapatılıp iletkenin akım geçirildiğinde ise pusula iğnesi başlangıç konumundan sapar (Şekil 8b).



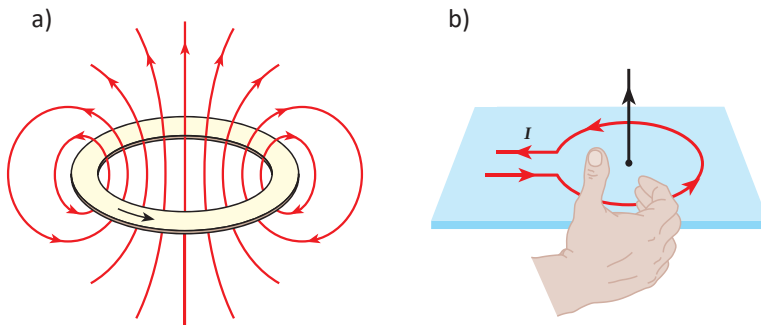
Şekil 8. Ersted'in Deneyi a) İletkenden akım geçmiyor. b) İletkenden akım geçiyor.

Manyetik iğne, üzerinden doğru akım geçen düz bir iletkenin yakınına yerleştirildiğinde, bulunduğu noktadaki manyetik alanın yönüne göre yönelir. Manyetik iğnenin farklı konumlardaki doğrultuları birleştirildiğinde, iletkenin etrafında eş merkezli daireler elde edilir (Şekil 9). Buna göre, düz bir iletkenin oluşturduğu manyetik alan çizgileri eş merkezli daireler şeklindedir. Düz bir iletkenin çevresindeki manyetik alanın yönü **sağ el kuralı** ile belirlenir. Sağ el ile iletken, başparmak akım yönünü gösterecek şekilde kavrandığında, diğer dört parmağın kıvrılma yönü manyetik alan çizgilerinin yönünü gösterir.



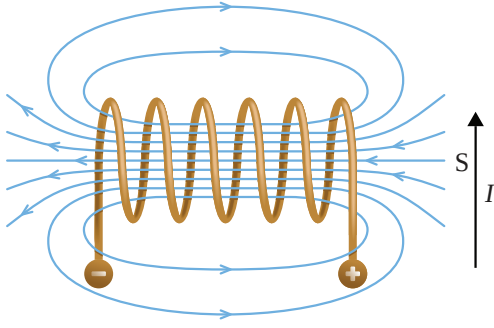
Şekil 9. İçinden elektrik akımı geçen düz bir iletkenin manyetik alanı bunun içinden akım geçer.

Şimdi, düz bir iletken yerine üzerinden akım geçen dairesel bir iletkeni ele alalım. Bu tür dairesel **akım halkasına** akım halkası denir. Manyetik alan çizgilerinin yoğunluğu, akım halkasının merkezinde en büyüktür. Bunun nedeni, iletkenin bütün bölümlerinin halkanın merkezinde aynı yönde manyetik alan oluşturmasıdır (Şekil 10). Bu durum basit bir deneyle gözlemlenebilir. Dairesel bir iletken, üzerine demir tozu serpilmiş bir kartonun içinden geçirildiğinde, demir tozları kendiliğinden düzenlenerek en yoğun biçimde halkanın merkezinde toplanır. Demir tozlarının yoğunluğu, manyetik alanın büyüklüğünü gösterir. Demir tozları ne kadar yoğunsa, manyetik alan da o kadar büyüktür. Akım halkasının manyetik alanının yönü de **sağ el kuralı** ile belirlenir. Sağ elin dört parmağı akımın yönünü gösterecek şekilde kıvrıldığında, başparmak akım halkasının **kuzey kutbunun** yönünü gösterir.

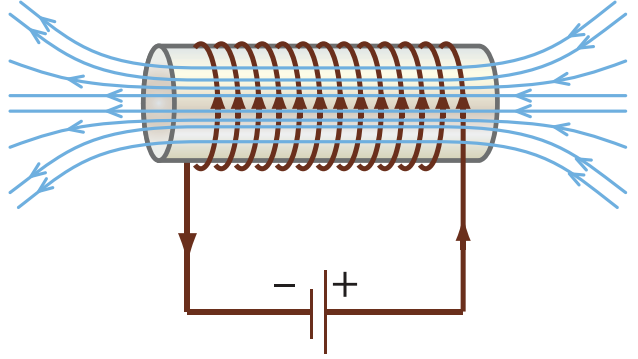


Şekil 10.
a) Akım halkasının manyetik alanı
b) Akım halkasının manyetik alanının yönü

Uzun bir iletken, silindirik biçiminde birbirine bitişik çok sayıda sarımdan oluşacak şekilde sarıldığında **bobin (solenoid)** elde edilir. Bobinin içinden geçen ve üzerine demir tozu serpilmiş bir karton kullanıldığında, demir tozlarının bobinin içinde birbirine paralel ve eşit aralıklarla dizildiği görülür. Bu durum, bobinin oluşturduğu manyetik alanın tek bir akım halkasının oluşturduğu manyetik alandan daha güçlü olduğunu gösterir. Ayrıca bobinin içinde manyetik alan **homojendir**; yani manyetik alanın yönü, doğrultusu ve büyüklüğü her noktada aynıdır (Şekil 11).



Şekil 11.
Solenoidin manyetik alanı



Şekil 12.
Elektromıknatis

Solenoid içindeki manyetik alanın yönü, çubuk mıknatısta olduğu gibi **sağ el kuralı** ile belirlenir. Sağ elin parmakları bobin sarımlarındaki akım yönünü gösterecek şekilde kıvrıldığında, başparmak solenoidin **kuzey manyetik kutbunu** gösterir. Üzerinden doğru akım geçen bir solenoid, çubuk mıknatıs gibi davranır. Solenoidin dışındaki manyetik alan çizgileri kuzey manyetik kutbundan güney manyetik kutbuna, solenoidin içindeki manyetik alan çizgileri ise güney manyetik kutbundan kuzey manyetik kutbuna yönelir.

Solenoidin içine demir bir çekirdek yerleştirildiğinde manyetik alanın şiddeti artar. Bu şekilde elde edilen mıknatısa **elektromıknatis** denir. Kalıcı mıknatıslardan farklı olarak elektromıknatisin manyetik alanı, akımın açılıp kapatılmasıyla ve akımın şiddeti ile yönü değiştirilerek kontrol edilebilir (Şekil 12).



GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

Kalıcı mıknatıslar günümüzde de birçok basit araç ve cihazda kullanılmaktadır. Ancak manyetizma alanındaki en önemli gelişmelerden biri, elektrik akımı geçen bir iletkenin de manyetik alan oluşturduğunun keşfedilmesi olmuştur. Bu keşif, **elektromıknatısların** geliştirilmesini sağlamıştır. Elektromıknatısların manyetik alanı gerektiğinde oluşturulabilir, ortadan kaldırılabilir veya şiddeti değiştirilebilir. Bu özellikleri sayesinde elektromıknatıslar modern teknolojiye geniş bir kullanım alanına sahiptir. Manyetik olayların ve manyetik alanların incelenmesi, yeni yapay manyetik malzemelerin geliştirilmesine de katkı sağlamıştır. Günümüzde yapay mıknatıslar; veri depolama ve bilgi işlem teknolojilerinde, elektrik ve elektronik sistemlerinde, enerji teknolojilerinde, ulaşım sistemlerinde, tıbbi görüntüleme ve tanı cihazlarında, kuantum teknolojilerinde ve yüksek hassasiyet, küçük boyut, kolay denetim ve yüksek enerji verimliliği gerektiren birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Pusula nedir?
2. Manyetik alan çizgilerinin ne olduğunu açıklayın.
3. Demir tozlarının, manyetik alan çizgilerini göstermede nasıl kullanıldığını açıklayınız.
4. Manyetik bir iğne nasıl davranır? Üzerinden akım geçen bir solenoid nasıl davranır? Açıklayınız.
5. Elektromıknatısların kalıcı mıknatıslara göre avantajlarını açıklayınız.
6. Aşağıdaki alanlardan birini seçiniz: yapay mıknatıslar, veri depolama ve bilgi işleme teknolojileri, tıbbi tanı, elektrik mühendisliği ve enerji, ulaşım sistemleri vb. Seçtiğiniz alanda mıknatısların ve manyetik alanın kullanım alanlarını araştırınız.

1.15. Manyetik kuvvetler

Her mıknatısın çevresinde bir **manyetik alan** bulunur. Ersted'in deneyi, üzerinden elektrik akımı geçen bir iletkenin çevresinde de manyetik alan oluştuğunu göstermiştir. İki mıknatısın birbirini çekmesi veya itmesi, çubuk mıknatısın yakınındaki manyetik iğnenin yön değiştirmesi ya da akım geçen bir iletkenin yakınındaki manyetik iğnenin sapması manyetik etkileşmeye örneklerdir. Bu etkileşmenin büyüklüğü manyetik kuvvet ile ifade edilir. Manyetik alanın etkisiyle cisimler arasında oluşan etkileşmeye manyetik etkileşim, bu etkileşmeye neden olan kuvvetlere ise manyetik kuvvetler denir. Manyetik kuvvetler, elektrik kuvvetleri gibi çekme veya itme yönünde olabilir.

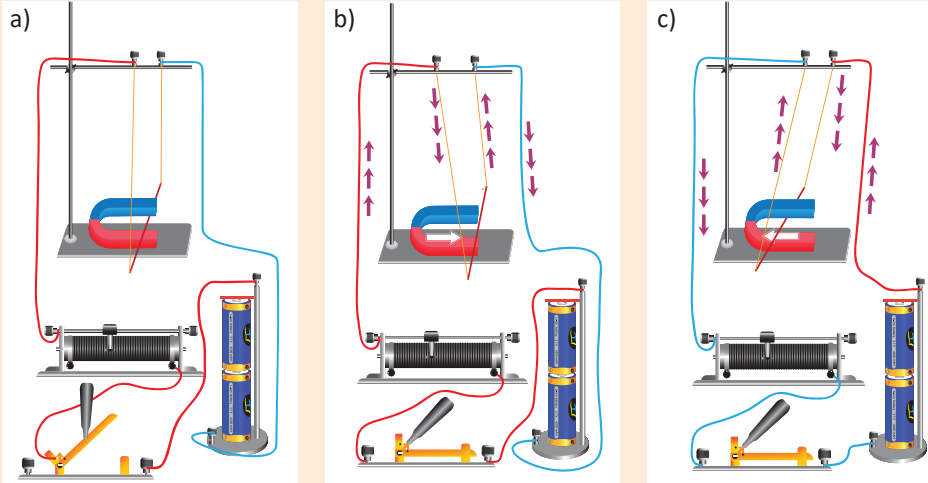
Amper kuvveti

Manyetik alan içine yerleştirilen, üzerinden elektrik akımı geçen bir iletken üzerine etki eden kuvvete Amper kuvveti denir. Amper kuvveti, manyetik alan ile iletkende hareket eden elektrik yüklerinin etkileşmesi sonucunda oluşur.



ETKİNLİK 1.

Bir elektrik devresine bağlı düz bir iletken, at nalı mıknatısın kutupları arasına, iletken manyetik alan çizgilerine dik olacak şekilde yerleştirilir. Etkinin daha kolay gözlenebilmesi için iletken, mıknatısın kutupları arasındaki boşlukta serbestçe hareket edebilecek şekilde asılır. İletkenden akım geçmediğinde iletken sabit kalır (Şekil 1a). İletkenden akım geçtiğinde ise iletken belirli bir yönde hareket eder. Akımın yönü ters çevrildiğinde, iletken bu kez ters yönde hareket eder.



Şekil 1.
Amper kuvveti:
a) iletkenden akım geçmiyor
b) iletken akım bir yönde geçiyor
c) iletkenden akım ters yönde geçiyor.

İletkenin hareket etmesi, üzerine bir kuvvet etki ettiğini gösterir. Yapılan deneyler, bu kuvvetin; iletken-den geçen akım şiddeti, manyetik alan içinde kalan iletkenin uzunluğu ve manyetik alanın bir özelliği olan manyetik **akı yoğunluğu (manyetik indüksiyon)** ile doğru orantılı olduğunu göstermiştir. Manyetik akı yoğunluğu **B** harfi ile gösterilir. Manyetik alanın iletkenle dik olduğu durumda, **Amper kuvvetinin** büyüklüğü aşağıdaki bağıntıyla verilir:

$$F_A = B \cdot I \cdot l ,$$

burada I , iletkendeki akım şiddetini, l ise manyetik alanın bulunduğu bölgede yer alan iletken parçasının uzunluğunu temsil eder.

B büyüklüğüne **manyetik akı yoğunluğu (manyetik indüksiyon)** denir. Manyetik akı yoğunluğu, manyetik alanın bir özelliğidir ve vektörel bir büyüklüktür. Bu nedenle büyüklüğü, doğrultusu ve yönü vardır.

Genel olarak, manyetik akı yoğunluğu (manyetik indüksiyon) vektörü, bulunduğu noktadaki manyetik alan çizgilerine teğettir ve yönü manyetik alan çizgilerinin yönü ile aynıdır. Manyetik akı yoğunluğunun büyüklüğü, manyetik alan çizgilerine dik yerleştirilen akım taşıyan bir iletken etki eden Amper kuvveti yardımıyla belirlenebilir. Bunun için Amper kuvveti bağıntısından yararlanılır:

$$B = \frac{F_A}{I \cdot l},$$

Buna göre, **manyetik akı yoğunluğunun** büyüklüğü; manyetik alan çizgilerine dik olarak yerleştirilen, uzunluğu **1 m** olan ve üzerinden **1 A** akım geçen bir iletken etki eden **Amper kuvvetinin** büyüklüğüne sayısal olarak eşittir. Manyetik akı yoğunluğunun SI birim sistemindeki birimi, **Nikola Tesla'nın** anısına **tesla (T)** olarak adlandırılır.

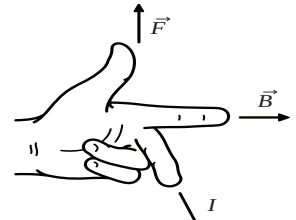
Yukarıdaki formülden, $1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$.

İletken, manyetik alan çizgilerine dik değil de onlarla α açısı yapacak şekilde yerleştirilmişse, manyetik alanın yalnızca iletken dik olan bileşeni kuvvet oluşturur. Bu bileşen, $B_{\perp} = B \cdot \sin \alpha$ şeklinde ifade edilir. Bu durumda **Amper kuvvetinin** büyüklüğü aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$F_A = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha,$$

Bu bağıntı, Amper kuvvetinin genel ifadesidir. İletken, manyetik alan çizgilerine dik yerleştirildiğinde ($\alpha = 90^\circ$), $\sin 90^\circ = 1$ olduğundan bağıntı, $F = B \cdot I \cdot l$ şeklini alır. İletken, manyetik alan çizgilerine paralel yerleştirildiğinde ($\alpha = 0^\circ$) ise $\sin 0^\circ = 0$ olduğundan iletken üzerine Amper kuvveti etki etmez.

Amper kuvveti, hem iletken hem de manyetik akı yoğunluğu vektörüne daima diktir. Amper kuvvetinin yönü, **Fleming'in sol el kuralı** ile belirlenir. Sol elin başparmağı, işaret parmağı ve orta parmağı birbirine dik olacak şekilde açıldığında; işaret parmağı manyetik akı yoğunluğunun (**B**) yönünü, orta parmak akımın (**I**) yönünü gösteriyorsa, başparmak **Amper kuvvetinin** (**F**) yönünü gösterir (Şekil 2).



Şekil 2.
Fleming kuralı
sol el kuralı



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Şekilde gösterildiği gibi, üzerinden 2,8 A akım geçen bir iletken, 0,5 T manyetik akı yoğunluğuna sahip bir manyetik alan içine kısmen yerleştirilmiştir. Manyetik alan içinde kalan iletken parçasının (A dan B ye) uzunluğu 12 cm'dir. İletken üzerine etki eden Amper kuvvetinin büyüklüğünü hesaplayınız. Fleming'in sol el kuralını kullanarak Amper kuvvetinin yönünü belirleyiniz.

Verilenler:

$I = 2,8 \text{ A}$, $B = 0,5 \text{ T}$,
 $l = 12 \text{ cm} = 0,12 \text{ m}$



İstenen:

$F = ?$ kuvvetin yönü ve işleme yönü

Çözüm:

CŞemaya göre, manyetik indüksiyon vektörü iletken dik olup, $\otimes$ sembolü B 'nin yönünün bizden sayfaya doğru olduğunu göstermektedir. Şemadan, iletkendeki akımın A'dan B'ye doğru aktığı da açıkça görülmektedir. Ampère yasasına göre, $F = B \cdot I \cdot l$ olduğundan, kuvvetin büyüklüğü $F = 0,17 \text{ N}$ olarak bulunur.

$\vec{F}$ kuvveti vektörünün hem $\vec{B}$ vektörüne hem de AB iletkenine dik olması gerektiğini biliyoruz. Fleming'in sol el kuralına göre, kuvvet levhanın düzleminde yukarı doğru etki edecektir.

Manyetik akı(flüks)

Uzaydaki her noktada, **manyetik akı yoğunluğu (B)** belirli bir büyüklüğe, doğrultuya ve yöne sahiptir. Ancak bazı durumlarda, uzayın belirli bir bölgesindeki manyetik akı yoğunluğundan çok, belirli bir yüzeyden geçen manyetik alanın toplamını bilmek daha önemlidir. Bu amaçla **manyetik akı** kavramı tanımlanmıştır. Şekil 3a'da gösterildiği gibi, bir yüzey manyetik akı yoğunluğu vektörüne dik konumda ise, bu yüzeyden geçen **manyetik akı** aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$\Phi = B \cdot S ,$$

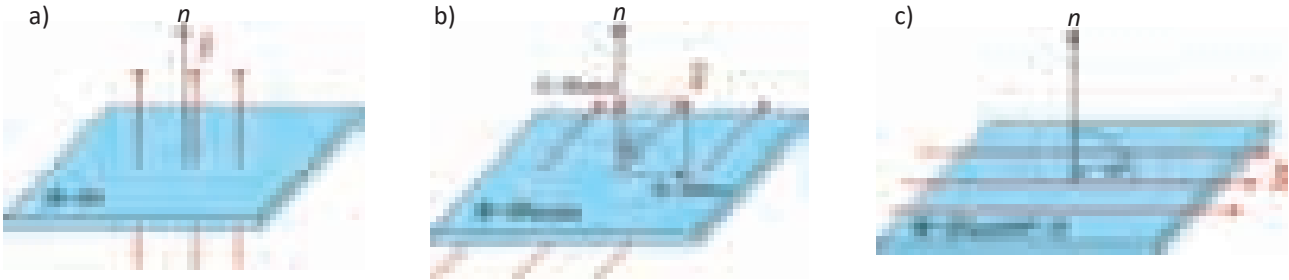
burada B manyetik indüksiyon, S ise söz konusu yüzeyin alanıdır (Şekil 3a). Genel durumda, **manyetik akı yoğunluğu** vektörü (**B**) ile yüzey normali (**n**) arasında α açısı bulunur. Bu durumda manyetik akı yoğunluğu iki bileşene ayrılabilir. Bunlardan biri, yüzeye dik (yüzey normaline paralel) olan **B_n** bileşeni, diğeri ise yüzeye paralel olan **B_p** bileşenidir (Şekil 3b). Bu bileşenlerin büyüklükleri aşağıdaki gibidir:

$$B_n = B \cdot \cos \alpha \text{ ve } B_p = B \cdot \sin \alpha \text{ dir.}$$

Manyetik akıya yalnızca yüzeye dik, yani yüzey normaline paralel olan **B_n** bileşeni katkı sağlar. Bu bileşen, **B_n = B · cos α** şeklinde ifade edilir. Buna göre, manyetik akı yoğunluğu vektörü ile yüzey normali arasında α açısı bulunduğunda, **manyetik akı** aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\Phi = B_n \cdot S = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Yüzey, manyetik akı yoğunluğu vektörüne paralel olduğunda, manyetik alan çizgileri yüzeyi kesmez. Bu nedenle manyetik akı sıfırdır ($\Phi = 0$) (Şekil 3c).



Şekil 3. Manyetik akı: a) $\alpha = 0^\circ$, b) $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, c) $\alpha = 90^\circ$.

Manyetik akının SI birim sistemindeki birimi weber (**Wb**)'dir. Manyetik akı bağıntısından, **1 Wb = 1 T · 1 m²** olduğu görülür. Manyetik akı yoğunluğu **1 T** olan bir manyetik alanda, manyetik alan çizgilerine dik olarak yerleştirilmiş **1 m²** büyüklüğündeki bir yüzeyden geçen manyetik akı **1 Wb**'dir.

İki paralel iletken arasındaki Amper kuvveti

Akım taşıyan düz bir iletkenin çevresindeki manyetik alan homojen değildir. İletkenden uzaklaştıkça **manyetik akı yoğunluğu** azalır. Sonsuz uzunluktaki düz bir iletkenden **r** uzaklıkta bulunan bir noktadaki manyetik akı yoğunluğunun büyüklüğü, iletkenden geçen **I** akımına bağlı olarak aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} ,$$

Burada μ_0 , **boşluğun manyetik geçirgenliği** (manyetik geçirgenlik sabiti) olarak adlandırılan orantı sabitidir. Değeri,

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}} ,$$

Akım geçen bir iletken çevresinde manyetik alan oluşturduğuna göre şu soru ortaya çıkar: Üzerlerinden akım geçen iki düz ve birbirine paralel iletken yan yana yerleştirildiğinde ne olur?

Mevcut bilgilere göre, aralarında bir etkileşim meydana gelecek ve Newton'un Üçüncü Yasası uyarınca her birine bir manyetik kuvvet etki edecektir.

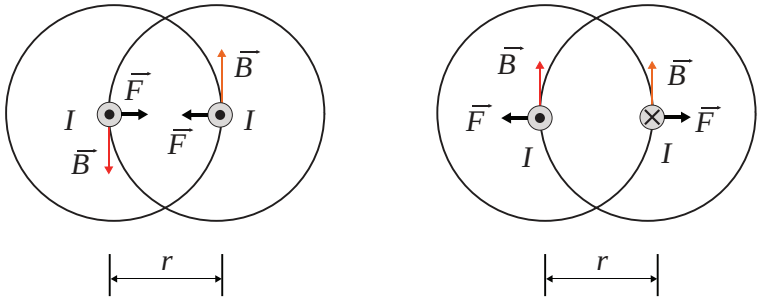
Birbirlerine r mesafesinde paralel yerleştirilmiş iki uzun, düz iletkeni ele alalım. Şekil 4'te bunlar levhanın düzlemine dik konumdadır. İki durumu ele alalım: akımların aynı yönde (sayfadan bize doğru) aktığı durum (Şekil 4a) ve akımların zıt yönlerde aktığı durum (Şekil 4b).

Her bir iletken, diğer iletkenin oluşturduğu manyetik alan içinde yer almaktadır. İlk iletkenin yakınındaki manyetik alan çizgileri eşmerkezli dairelerdir ve diğer iletkenle dik açıyla kesişir. Fleming'in sol el kuralını kullanarak, her iki durumda da her iki iletken üzerinde etkiyen Amper kuvvetinin yönünü belirleyebiliriz. Şekil 4'ü inceleyerek, akımın aynı yönde aktığı iki paralel iletkenin birbirini çektiği, akımın zıt yönlerde aktığı iki paralel iletkenin ise birbirini ittiği belirlenebilir.

Düz bir iletkenin **oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu** bağıntısı, **Amper kuvveti** bağıntısında yerine yazıldığında aşağıdaki ifade elde edilir.

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{r} l.$$

Bu, uzunlukları l olan ve sırasıyla I_1 ve I_2 şiddetindeki akımları taşıyan iki düz iletkenin, vakumda r mesafesi kadar birbirinden uzak yerleştirildiklerinde etkileşime girdikleri kuvveti gösteren formüldür.



ekil 4. İki paralel iletken: a) Akım aynı yönde akar
b) Akım zıt yönde akar

ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

İki uzun, paralel ve düz tel iletken, birbirinden 30 cm uzaklıkta yerleştirilmiştir.

Birinci iletkendен geçen akım, ikinci iletkendен geçen akımın üç katıdır. Birim uzunluk başına, iletkenler üzerinde $1,5 \cdot 10^{-7}$ N büyüklüğünde bir Amper kuvveti etki etmektedir.

İki iletken vakumda bulunuyorsa, bu iletkenlerden geçen akımların büyüklüklerini bulunuz.

Verilenler:

$$r = 30 \text{ cm} = 0,30 \text{ m},$$

$$\frac{F}{l} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ N/m},$$

$$I_1 = 3I_2$$

İstenen:

$$I_1 - ?, \quad I_2 - ?$$

Çözüm:

İki uzun paralel iletken için aşağıdaki bağıntı geçerlidir: $\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$
Buradan: $I_1 I_2 = \frac{2\pi r F}{\mu_0 l} = \frac{2\pi \cdot 0,30}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ N/m} = 0,225 \text{ A}^2$ olur.

Verilen bilgiye göre: $I_1 = 3I_2$ olduğundan, $I_1 I_2 = 3I_2^2 = 0,225$

$$I_2^2 = 0,075 \quad I_2 = 0,274 \text{ A bulunur.}$$

Böylece:

$$I_1 = 3I_2$$

$$I_1 = 3 \cdot 0,274$$

$$I_1 = 0,822 \text{ A elde edili.}$$

Lorentz kuvveti

Metalik bir iletkendeki elektrik akımı, iletken içinden geçen serbest elektronların yönlü hareketini temsil eder. Akım geçmeyen bir iletken manyetik alana yerleştirilirse, iletken üzerinde herhangi bir kuvvet etki

etmez. Amper kuvveti, iletken içinde çok sayıda serbest elektron bulunmasına rağmen yalnızca elektronlar belirli bir yönde hareket ettiğinde ortaya çıkar. Bu durum, Amper kuvvetinin iletkenin kendisinden değil, iletken içindeki elektrik yüklerinin yönlü hareketinden kaynaklandığını gösterir. Başka bir deyişle, hareket eden her elektrik yükü çevresinde bir manyetik alan oluşturur. Manyetik alan içinde hareket eden bir elektrik yüküne etki eden kuvvete **Lorentz kuvveti** denir.

Aslında Amper kuvveti, manyetik alanın iletken içindeki hareket eden her bir elektrik yüküne uyguladığı Lorentz kuvvetlerinin toplamıdır. Bu nedenle, manyetik alan içinde hareket eden bir elektrik yüküne etki eden kuvvete Lorentz kuvveti denir. Lorentz kuvvetinin (F_L) büyüklüğünü veren bağıntı, Amper kuvveti bağıntısından türetilir.

Amper kuvvetinin formülünde, $F_A = B \cdot I \cdot l$, akım şiddeti iletkendeki toplam serbest elektron sayısı N , cinsinden ifade edilir, yani:

$$I = \frac{Ne}{t}$$

v hızıyla ve t süresi boyunca hareket eden elektronlar, manyetik alan içinde bulunan iletkenin uzunluğuna eşit olan l mesafesini kat eder ve bu manyetik alan içinde bulunan iletkenin uzunluğuna eşittir.

Bu durumda, $t = \frac{l}{v}$ olur, dolayısıyla şu sonucu elde ederiz:

$$F_A = NevB.$$

Son formül, manyetik indüksiyon B olan bir alanda v hızında hareket eden e yüküne sahip tek bir elektronun, şu kuvvetin etkisine maruz kalacağını gösterir:

$$F_L = Bev.$$

Manyetik alanda hareket eden bir parçacığın yükü q ise ve manyetik indüksiyona dik v hızında hareket ediyorsa, bu parçacık üzerine Lorentz kuvveti etki eder:

$$F_L = qvB.$$

Genel durumda, hareket eden yüklü parçacığın hız vektörü ile manyetik akı yoğunluğu vektörü arasında α açısı varsa, Lorentz kuvvetinin büyüklüğü aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$F_L = qvB \cdot \sin \alpha.$$

Lorentz kuvvetinin yönü, **Fleming'in sol el kuralı** ile belirlenir. Sol elin üç parmağı birbirine dik açılarla dizilmiş ve işaret parmağı manyetik indüksiyonun yönünü gösteriyorsa, orta parmak Lorentz kuvvetinin yönünü gösterir.

Sol el kuralı. Sol elin üç parmağı birbirine dik açılarla tutulursa ve işaret parmağı manyetik indüksiyonun yönünü, orta parmak pozitif yüklü parçacığın hızının yönünü gösteriyorsa, başparmak Lorentz kuvvetinin yönünü gösterir. Negatif yüklü bir parçacık için de aynı kuralı kullanırız; ancak bu durumda kuvvetin yönü başparmağın yönünün tersi olur.

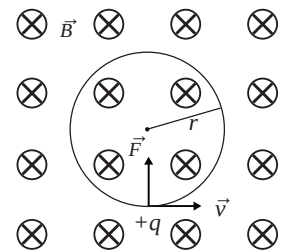
Lorentz kuvveti, hem hız vektörüne hem de manyetik akı yoğunluğu vektörüne daima diktir. Bu nedenle Lorentz kuvveti, yüklü parçacığın hızının büyüklüğünü değiştirmez; yalnızca hareket yönünü değiştirir. Sonuç olarak, manyetik alan içinde hareket eden yüklü parçacıkların yörüngesi eğrilir ve hız vektörü manyetik alana dik olduğunda parçacık dairesel bir yörünge izler.

Bu durumda parçacık merkezî ivme ile hareket eder ve bu ivmeyi sağlayan kuvvet Lorentz kuvvetidir. Bu nedenle aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$qvB = \frac{mv^2}{r}.$$

buradan, parçacığın hareket edeceği dairenin yarıçapı için bir ifade elde edilebilir:

$$r = \frac{mv}{qB}.$$



Şekil 5. Lorentz kuvveti

Doğrusal ve açısal hız arasındaki ilişkiyi kullanırsak, parçacığın dolanım periyodu için aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}.$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Bir döteryum iyonu, 600 V'luk bir voltajla hızlandırılır. İyonun kütlesi $3,34 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ 'dır. Döteryum iyonu daha sonra, manyetik indüksiyonu 0,40 T olan homojen manyetik alana, alan çizgilerine dik olarak girer. Deuteryumun manyetik alanda hareket ettiği dairenin yarıçapını bulunuz. Deuteryumun yükü şöyledir: $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Verilenler:

$$U = 600 \text{ V},$$

$$B = 0,40 \text{ T},$$

$$m = 3,34 \cdot 10^{-27} \text{ kg},$$

$$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

İstenen:

$$r - ?$$

Çözüm:

İyon bir voltaj tarafından hızlandırılır, dolayısıyla kinetik enerji kazanır

$$qU = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

Homojen bir manyetik alanda (normal yönde giren), daire şeklinde hareket eder $r = \frac{mv}{qB}$.

Buradan dairenin yarıçapı şu şekilde elde edilir:

$$r = \frac{m}{qB} \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}} = 1,25 \text{ cm}.$$

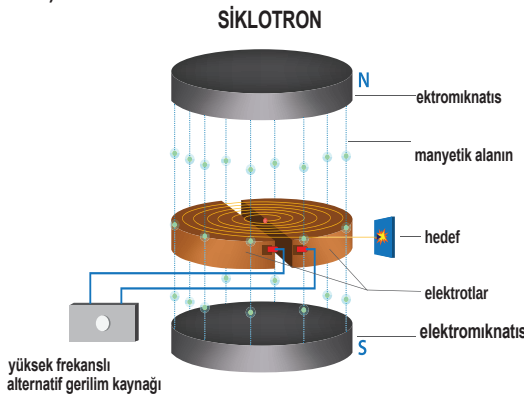
Manyetik Kuvvetlerin Uygulanması

Manyetik kuvvetlerin keşfedilmesi ve incelenmesi, bir zamanlar doğrudan gözlemlenemeyen bir olgu olan manyetik alanın çok sayıda pratik uygulamada kullanılmasını sağlamıştır. Günümüzde manyetik kuvvetler, birçok teknolojik cihazın çalışma temelini oluşturur. Bunlar arasında elektrik motorları, jeneratörler, katot ışın tüpleri ve osiloskoplar, parçacık hızlandırıcıları, kütle spektrometreleri, mikrofönler, hoparlörler, tıbbi görüntüleme ve tanı cihazları ile veri depolama ve okuma sistemleri yer almaktadır.

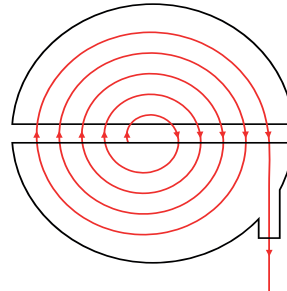
Parçacık hızlandırıcısı olarak siklotronun kullanımı

Siklotron, homojen bir manyetik alan ve değişken bir elektrik alanı kullanarak yüklü parçacıkları hızlandıran bir cihaz olan parçacık hızlandırıcı türüdür. Vakum içinde yerleştirilmiş ve yüksek frekanslı alternatif akım kaynağına bağlı iki adet içi boş, yarım daire şeklinde, yani D şeklindeki elektrottan oluşur.

a)



b)



Tüm sistem, güçlü bir elektromıknatısın oluşturduğu homojen bir manyetik alan içinde bulunur. Manyetik indüksiyonun yönü, elektrotların bulunduğu düzlemine diktir.

Elektromıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alanın rolü, yalnızca yüklü parçacıkların hızının yönünü değiştirmektir. Manyetik alan, parçacıkların hızının yönünü de-ğiş-

Şekil 6. a) Bir siklotronun şematik diyagramı. b) Bir siklotron içindeki yüklü bir parçacığın yörüngesi.

tirmez, onların dairesel bir yörüngede hareket etmelerini sağlar, bu da Lorentz kuvvetinin etkisi sonucunda oluşur. Parçacık, yalnızca yarım daire şeklindeki elektrotlar arasındaki boşlukta, yönü yüksek frekanslı bir alternatif akım kaynağı tarafından periyodik olarak değiştirilen bir elektrik alanının etkisi altında hızlanır. Elektrot boşluklarının içinde elektrik alanı bulunmadığından, parçacık her bir elektrotun içinden geçerken hızı sabit kalır. Alternatif gerilimin frekansı, parçacık elektrotlar arasındaki boşluğa her girdiğinde elektrik alanının yönünü değiştirecek şekildedir. Boşluktan her geçişinde parçacık ek kinetik enerji kazanır.

Hız arttıkça, parçacığın hareket ettiği dairenin yarıçapı da artar.

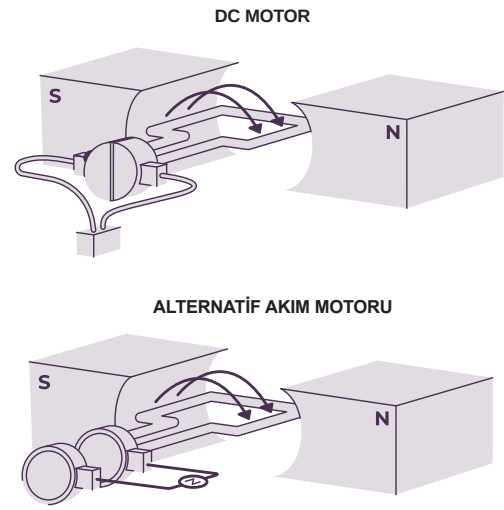
$$r = \frac{mv}{Bq}, \text{ formülüne göre, yörünge giderek genişler ve bir spiral oluşturur.}$$

Parçacık yeterli hıza, enerjiye ve yörünge yarıçapına ulaştığında, siklotronun dışarı çıkarılır.

Elektromotor

Evdeki tüm elektrikli aletler, elektrikli el aletleri, endüstriyel makineler, asansörler, pompalar, elektrikli ve hibrit araçlar, fanlar ve bilgisayar sabit diskleri bir elektrik motoru veya **elektromotor** tarafından çalıştırılır. Bu motorlarda elektrik enerjisi, faydalı mekanik işe dönüştürülür. Temel çalışma prensibi, akımın içinden geçtiği bir çerçeve veya bobin üzerinde manyetik kuvvetin etkisidir (Şekil 7). Motorun doğru akımla mı yoksa alternatif akımla mı çalıştığına bakılmaksızın, prensip her zaman aynıdır.

Her elektrik motoru, stator adı verilen sabit bir bölüm ile rotor adı verilen hareketli bir bölümden oluşur. Stator; sabit mıknatıslar, gövde ve fırçalardan oluşurken, rotor; bir bobin ve dönme hareketini ileten bir milden oluşur. Sabit mıknatıslar manyetik alan oluşturur. Bobinden geçen elektrik akımı, bobin üzerine Amper kuvveti uygular ve dönme momenti meydana getirir. Böylece bobin döner ve bu dönme hareketi motor mili aracılığıyla çalıştırılan



Şekil 7. Doğru akım ve alternatif akım elektrik motorlarının şematik gösterimi



DAHA FAZLA ÖĞREN

1. Çubuk mıknatıs ve solenoidin manyetik indüksiyonu

Bir iletken halka şeklinde bükülüp üzerinden elektrik akımı geçirildiğinde, halkanın etrafında simetrik bir manyetik alan oluşur. Bu tür dairesel akım halkasına akım halkası denir. Akım halkasının merkezinde, iletkenin bütün bölümlerinin oluşturduğu manyetik alanlar aynı yönde toplandığından manyetik akı yoğunluğu en büyük değerine ulaşır. Üzerinden I akımı geçen ve yarıçapı R olan bir akım halkasının merkezindeki manyetik akı yoğunluğu aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Dairesel bir iletken, silindir biçiminde birbirine bitişik çok sayıda sarım hâlinde sarıldığında solenoid (bobin) oluşur. Uzun bir solenoidin içinde manyetik alan yaklaşık olarak homojendir. Bu nedenle, solenoidin içindeki manyetik akı yoğunluğu her noktada aynı büyüklüğe, doğrultuya ve yöne sahiptir. İdeal, uzun

bir solenoidin içindeki manyetik akı yoğunluğu aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{l} I,$$

Burada N toplam sargı sayısı, l solenoidin uzunluğu ve n birim uzunluk başına düşen sargı sayısıdır. Solenoidin dışında manyetik indüksiyon çok küçüktür ve genellikle ihmal edilir. İçinden doğru akım geçen bir solenoid, etkileri bakımından bir çubuk mıknatıs çok benzer şekilde davranır.

2. İndüklenen elektromotor kuvveti

Manyetik akının değişmesi, kapalı bir iletken halkada indüklenmiş elektromotor kuvvetin (EMK) oluşmasına neden olur. Bu olay Michael Faraday tarafından keşfedilmiş olup elektromanyetik indüksiyon olarak adlandırılır. Manyetik akıdaki değişim; mıknatısın kapalı iletken halkaya göre hareket etmesi, iletken halkanın manyetik alan içinde hareket etmesi veya manyetik alanın şiddetinin değişmesi sonucu meydana gelebilir. Bunun sonucunda devrede indüklenmiş elektromotor kuvvet oluşur ve bu kuvvet aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta (BS \cos \alpha)}{\Delta t}.$$

İndüklenen elektromotor kuvvetinin büyüklüğü, manyetik akının değişim hızına bağlıdır. Manyetik akı ne kadar hızlı değişirse, indüklenen elektromotor kuvveti de o kadar büyük olur. İndüklenen akımın yönü, manyetik akıdaki değişime neden olan etkiye karşı koyacak yöndedir. Bu durum, Lenz yasası olarak bilinir. Örneğin, bir mıknatıs iletken halkaya yaklaştırıldığında, halkadan geçen manyetik akı artar. Halkada indüklenen akım, oluşturduğu manyetik alanla bu akı artışına karşı koyacak yönde oluşur.

İndüklenen elektromotor kuvveti; elektrik jeneratörlerinin, transformatörlerin ve birçok elektrikli cihazın çalışma prensibinin temelini oluşturur. Elektromanyetik indüksiyon sayesinde mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu nedenle elektromanyetik indüksiyon, modern teknoloji ve günlük yaşam için büyük önem taşır.



ÜNLÜ BİLİM İNSANI

Nikola Tesla (1856–1943), elektrik mühendisliği ve fizik tarihinin en önemli mucit ve bilim insanlarından biridir. O dönemde Avusturya İmparatorluğu sınırları içinde bulunan (günümüzde Hırvatistan'da yer alan) Smiljan'da Sırp bir ailenin çocuğu olarak dünyaya gelmiştir. Avrupa'da eğitim gördükten sonra Amerika Birleşik Devletleri'ne göç etmiştir. Küçük yaşlardan itibaren matematik, fizik ve mühendislik alanlarında olağanüstü bir yetenek göstermiş, karmaşık teknik sistemleri zihninde tasarlayabilme yeteneği sayesinde birçok buluşunu ayrıntılı çizimler yapmadan geliştirmiştir.

Tesla'nın en önemli katkısı, günümüzde elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımında kullanılan alternatif akım (AC) ve çok fazlı elektrik güç sistemlerinin geliştirilmesidir. Dönen manyetik alan ilkesini ortaya koymuş, endüksiyon motorunu geliştirmiş ve transformatörlerin, jeneratörlerin ile yüksek gerilim enerji iletim sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamıştır. Bu çalışmalar, elektrik enerjisinin uzun mesafelere verimli bir şekilde iletilmesini mümkün kılmış ve doğru akım sistemlerinin teknik sınırlamalarının aşılmasına yardımcı olmuştur.

Tesla, elektrik enerjisinin yanı sıra kablosuz iletişim, radyo teknolojisi, yüksek frekanslı akımlar ve elektromanyetik dalgalar üzerine de çalışmalar yapmıştır. Yaşamı boyunca çalışmaları her zaman hak ettiği değeri görmemiş, bazı fikirleri başka kişiler tarafından geliştirilmiş veya sahiplenilmiş ve zaman zaman maddi sıkıntılar yaşamıştır. Buna rağmen çalışmaları, modern bilim ve teknolojinin gelişimine büyük katkı



sağlamıştır. Günümüzde Nikola Tesla, fikirleri ve buluşlarıyla modern teknolojinin gelişimine yön veren önemli bir bilim insanı olarak kabul edilmektedir.



SORULAR VE ÖDEVLER

cihaza iletilir. Doğru akım (DC) motorlarında ayrıca, bobinden geçen akımın yönünü her yarım turda değiştiren komütatör bulunur.

1. Manyetik iğne veya demir tozu kullanılmadan manyetik alan deneysel olarak nasıl tespit edilebilir?
2. Manyetik alan çizgilerine paralel yerleştirilmiş düz bir iletken, içinden akım geçmesine rağmen neden yerinden kaymaz?
3. Aynı hızda aynı manyetik alana giren bir elektron ile bir protonun yörüngeleri ne açıdan farklılık gösterir?

4. Aralarındaki uzaklık 0,60 m olan iki uzun, düz ve paralel iletken, büyüklükleri 8 A olan ancak zıt yönlerde elektrik akımı geçmektedir. İki iletkenin tam ortasındaki noktada oluşan manyetik akı yoğunluğunu hesaplayınız.

(Çözüm: $1,07 \cdot 10^{-5}$ T)

5. Kütlesi 0,60 kg olan bir metal iletken, aralarında 25 cm mesafe bulunan yatay metal rayların üzerinde durmaktadır. Raylar, manyetik indüksiyonu 0,40 T olan dikey ve homojen bir manyetik alan içindedir. İletken ile raylar arasındaki sürtünme katsayısı 0,12 ise, iletkenin hareket etmeye başlaması için üzerinden geçirilmesi gereken akım şiddetini hesaplayınız?

(Çözüm: $7,10^5$ A)

6. Bir elektron, manyetik alan çizgilerine dik olarak homojen bir manyetik alana girer. Elektronun alana girerkenki hızı $2,0 \cdot 10^6$ m/s'dir. Alanın manyetik indüksiyonu $1,6 \cdot 10^{-3}$ T'dir. Aşağıdakileri belirleyin:

- a) Elektronun izlediği yolun şekli ve bu yolun yarıçapı; b) Elektronun manyetik alanda geçirdiği süre; c) Elektronun manyetik alandan geçerken hızı ve kinetik enerjisinin değişip değişmediğini. Cevabınızı gerekçelendirin.

Elektronun kütlesi $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg ve elektrik yükü $1,60 \cdot 10^{-19}$ C'dir.

(Çözüm: 7,1 mm; $2,23 \cdot 10^{-8}$ s)

1.16. Maddelerin manyetik özellikleri

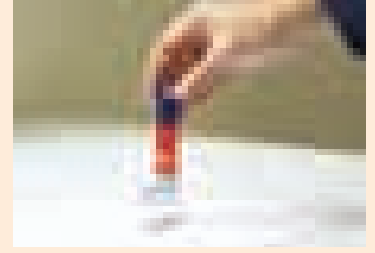
Her maddenin kendine özgü bir mikroyapısı vardır. Maddenin manyetik özellikleri; bileşimine ve mikroyapısına bağlı olduğu gibi sıcaklık, üretim yöntemi, mekanik gerilmeler, deformasyonlar ve daha önce manyetik alana maruz kalıp kalmaması gibi etkenlere de bağlıdır. Michael Faraday, yaklaşık iki yüz yıl önce tüm maddelerin manyetik özellik gösterdiğini ortaya koymuştur. Maddeler, bulundukları manyetik alanla etkileştiklerinde bu özelliklerini farklı biçimlerde ve farklı şiddetlerde gösterirler. Bir maddenin manyetik özellikleri, manyetik alan içinde veya bir mıknatısın yakınında nasıl davranacağını belirler. Buna göre maddeler, manyetik alana çekilebilir, itilebilir veya manyetik alandan çok az etkilenebilir. Bu özellikler; fizik, mühendislik ve günlük yaşam açısından büyük önem taşır.

Bir maddenin manyetik özellikleri, manyetik alanın madde içindeki davranışını ve maddenin manyetik alanı nasıl etkilediğini, yani alanı güçlendirip güçlendirmedeğini, zayıflatıp zayıflatmadığını veya önemli ölçüde değiştirip değiştirmediğini belirler. Bir madde manyetik alana yerleştirildiğinde manyetize olabilir. Manyetizasyon, maddenin manyetik alanın etkisiyle geçici veya kalıcı manyetik özellik kazanması olayıdır.



ETKİNLİK 1.

Bir düzine ataş alınız ve birbirlerini ne çektiklerini ne de ittiklerini gözlemleyiniz. Ataş yerine demir çiviler de kullanabilirsiniz. Bir çubuk mıknatıs, at nalı mıknatıs veya elektromıknatıs alınız. Mıknatısın bir kutbunu, ataşlara dokundurmadan yavaşça yaklaştırınız. Ne gözlemliyorsunuz? Etkileşim çekme yönünde mi, itme yönünde mi gerçekleşmektedir? Bu etkileşim temaslı mıdır, temassız mıdır? Daha sonra mıknatısın diğer kutbunu ataşlara (veya demir çivilere) yaklaştırarak deneyi tekrarlayınız. Bu durumda etkileşim çekme yönünde mi, itme yönünde mi gerçekleşmektedir?



Şekil 1. Nesneleri manyetize etme

Bir mıknatısın oluşturduğu manyetik alan, çevresindeki bazı maddeleri **manyetize edebilir**. Mıknatıs, manyetik bir maddeden yapılmış bir cisme (örneğin demir ataş veya çiviye) yaklaştırıldığında, bu cisim manyetize olur. Böylece cisim de geçici olarak bir mıknatıs gibi davranır. Mıknatısa yakın olan ucu, mıknatısın yaklaştırılan kutbuna zıt kutup özelliği kazanır ve bu nedenle mıknatıs ile cisim arasında **çekme kuvveti** oluşur. Mıknatısın hangi kutbu yaklaştırılırsa yaklaştırılsın, manyetize olan cisim ile mıknatıs arasındaki etkileşim **daima çekme yönündedir**.

Malzemelerin Manyetik Özelliklerinin Nedenleri

Manyetizma, makroskobik düzeyde etkileşimli bir kuvvet olarak gözlemlenen bir olgu olsa da, malzemelerin manyetik özelliklerinin nedenleri mikroskobik veya atomik düzeyde aranmalıdır. Manyetik özellikler, malzemelerin mikroskobik yapısından, daha kesin olarak atomlardaki elektronların davranışından ve atomlar arasındaki etkileşimden kaynaklanır. Bilim adamları, malzemelerin manyetik özelliklerinin nedenlerini araştırarak, bazı malzemelerin neden güçlü manyetik olduğunu, diğerlerinin manyetik alana zayıf tepki verdiğini ve yine diğerlerinin ise hiç belirgin manyetik etki göstermediğini açıklayabildiler.

Elektron keşfedilmeden ve atom modelleriyle ilgili fikirler ortaya atılmadan önce bile, Ampère mikroskobik düzeyde temel akımların, yani “moleküler akımların” var olduğu hipotezini ortaya atmıştı. Ona göre bunlar, bir demir levhadan geçen akıma benzer şekilde manyetik alan oluşturan kapalı akımlardır. Bu akımlara ilişkin hipotez, akımın geçtiği herhangi bir iletkenin çevresinde manyetik alan bulunması gerçeğiyle bağlantılıdır.

Modern bir bakış açısıyla, her atom bir çekirdekten ve onun etrafında hareket eden elektronlardan oluşur. Dairesel bir yörüngede hareket eden bir elektron, tıpkı kuzey ve güney olmak üzere iki kutbu olan herhangi bir mıknatıs gibi, manyetik bir dipol oluşturur. Dipol örneği olarak çubuk mıknatıs da verilebilir (içinden akım geçen daireysel bir iletken). Her dipol kendi manyetik alanını oluşturur. Dipolün özellikleri, vektörel bir büyüklük olan manyetik moment ile tanımlanır:

$$\vec{P} = I \cdot \vec{S},$$

akım şiddeti (I) ile döngünün alanı (S) çarpımıdır. Her atom, elektronların çekirdek etrafında hareket etmesi nedeniyle, yörünge manyetik moment olarak adlandırdığımız manyetik momente sahip küçük bir dipol oluşturur. Ayrıca, elektronun spin'i vardır; yani kütle ve elektrik yükü gibi, elektronun kendine özgü bir özelliğidir. Spin, parçacığın kendi eksenini etrafında dönmesi olarak düşünülebilir. Spin özelliği nedeniyle elektronun bir spin manyetik moment de vardır. Atomun bir bütün olarak manyetik moment, hem yörünge hem de spin manyetik momentlerinin katkısıyla oluşur. Atomun manyetik moment bir manyetik alan oluşturur ve bu nedenle atomun bir dipol mıknatıs (küçük bir mıknatıs) gibi davrandığını düşünebiliriz. Bu küçük mıknatısların birbirlerine göre yönelimleri ve dış manyetik alandaki hizalanmaları, malzemenin manyetik özelliklerini belirler.

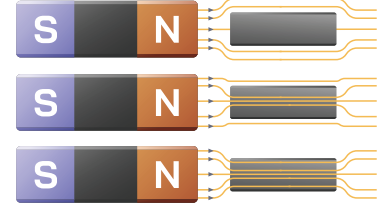
Göreceli manyetik geçirgenlik

Manyetik indüksiyon ve manyetik akının uzaydaki manyetik alanı tanımlayan büyüklükler olduğunu görmüştük. Manyetik alan vakumda oluştuğunda, vakumdaki bu alanın manyetik indüksiyonunu B_0 ile gösteririz. Aynı alan başka bir malzeme ortamında aynı şekilde oluşturulursa, malzeme içindeki manyetik indüksiyonun değeri vakumdakinden farklı olacaktır. Malzeme içindeki alanın manyetik indüksiyonunu B ile gösterelim. Malzeme ortamı uzaydaki alanı değiştirdiğinden, kendine özgü bir manyetik özelliğe sahiptir. Bu özelliği tanımlamak için, malzeme içindeki alanın manyetik indüksiyonunun, vakumdaki aynı alanın manyetik indüksiyonuna oranı olarak tanımlanan bir fiziksel büyüklük olan göreceli manyetik geçirgenlik μ_r kavramını kullanırız:

$$\mu_r = \frac{B}{B_0},$$

Formülden de anlaşıldığı üzere, bu boyutsuz bir niceliktir. Göreceli manyetik geçirgenlik, belirli bir malzemenin karakteristik özelliğidir ve o malzemedeki manyetik indüksiyonun, vakumdaki manyetik indüksiyona göre nasıl değiştiğini gösterir. μ_r değerine göre malzemeler, manyetik özelliklerine göre diamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik malzemeler olarak sınıflandırılır.

"Geçirgenlik" kelimesi, iletilebilirlik anlamına gelir ve manyetik özellikler bağlamında, bir malzemenin içinden manyetik alanı iletme yeteneğini ifade eder. Şekil 2'de gösterildiği gibi, alanı ne kadar çok iletirse, malzeme içindeki alanı o kadar çok güçlendirir. Dolayısıyla, ferromanyetiklerin manyetik alanı en iyi iletmediği ve bu da göreceli manyetik geçirgenlik açısından en yüksek değere sahip oldukları göreceli manyetik geçirgenlik açısından.

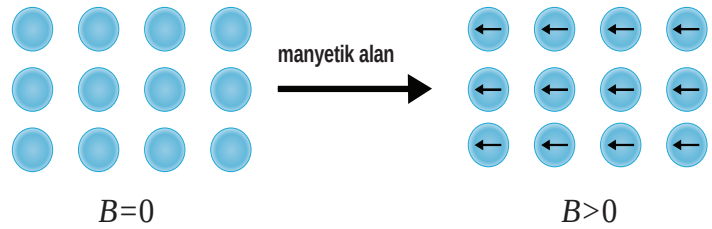


Şekil 2. Manyetik malzemelerin geçirgenliği

Diamanyetikler

Diamanyetiklerde, bağıl manyetik geçirgenlik birden biraz azdır ($\mu_r < 1$) ve bu maddeler manyetik alanı zayıflatır. Dış bir alan olmadığında, bu malzemelerdeki toplam manyetik moment sıfırdır; çünkü yö-rünge ve spin manyetik momentleri zıt yönlerde yönelmiştir. Bir diamanyetik malzeme bir manyetik alana yerleştirilirse, manyetik dipoller manyetik alanın yönünün tersi yönde hizalanır (Şekil 3). Bu tür manyetik özellikler gösteren malzemeler şunlardır: Su, gümüş, bakır, bizmut, kaya tuzu ve gazların büyük bir kısmı diamanyetik maddelere örnek olarak verilebilir. Bunlar dış manyetik alanı zayıflatır. Bu nedenle manyetik alanın daha zayıf olduğu bölgelere doğru itilirler (Şekil 2).

diamanyetik malzeme

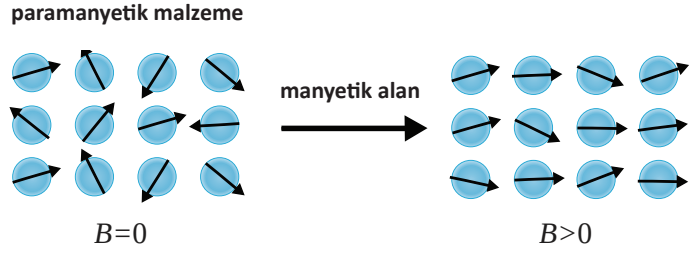


Şekil 3. Diamanyetik malzeme

Paramanyetikler

Paramanyetik maddelerin bağıl manyetik geçirgenliği birden büyüktür ($\mu_r > 1$). Bu maddelerde atomların sıfırdan farklı bir manyetik momentleri vardır. Dış manyetik alan olmadığında, atomların manyetik momentleri rastgele yönelmiştir. Bu nedenle, cismin toplam manyetik momentleri sıfırdır ve belirgin bir manyetik özellik göstermez. Paramanyetik bir madde dış manyetik alana yerleştirildiğinde, manyetik momentlerin bir kısmı alanın yönünde hizalanır (Şekil 4).

Bu kısmi hizalanma sonucunda malzeme içindeki manyetik akı yoğunluğu artar. Ancak bu etki zayıftır; çünkü manyetik momentlerin yalnızca bir bölümü dış manyetik alan doğrultusunda hizalanır. Dış manyetik alan ortadan kaldırıldığında ise paramanyetik maddeler hızla rastgele yönelime döner ve indüklenen manyetik özelliklerini kaybeder. Paramanyetik maddelere alüminyum, sodyum, potasyum, tungsten, platin ve oksijen örnek olarak verilebilir.



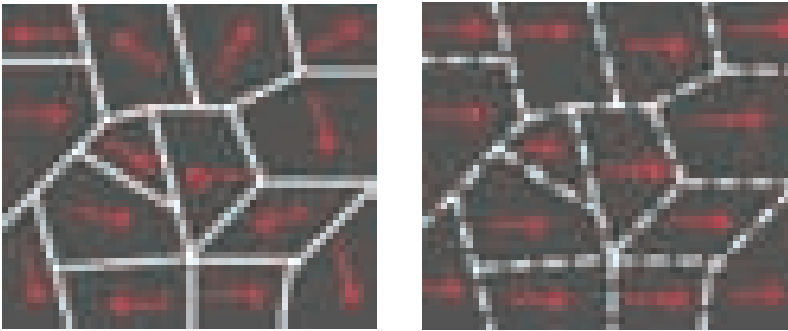
Şekil 4. Paramanyetik malzeme

Ferromanyetikler

Bu malzemeler çok güçlü manyetik özelliklere sahiptir; bu özellikler, atomun bir bütün olarak toplam momentinden çok, spin manyetik momentinden kaynaklanır. Bu malzemeler güçlü bir şekilde manyetize edilebilir. Ferromanyetiklerin göreceli manyetik geçirgenliği çok yüksektir. Bu değer

birden çok daha büyüktür ($\mu_r \gg 1$), birkaç on bin ile bir milyon arasında değişir; bu da dış manyetik alanı büyük ölçüde güçlendirdikleri anlamına gelir. Ferromanyetik özellikler demir, kobalt, nikel ve bunların alaşımları sergilemektedir.

Bu malzemelerde, komşu atomların manyetik momentleri arasında güçlü bir etkileşim vardır; bu nedenle, spinleri aynı yönde olan büyük atom grupları, manyetik alanlar olarak adlandırılan bölgeler oluşturur. Ferromanyetik malzeme dış manyetik alanda olmasa bile, bu alanların içinde kendiliğinden bir düzenlenme meydana gelir. Domen boyutu tipik olarak yaklaşık 10^{-3} mm ile 1 mm arasında değişebilir. Manyetize edilmemiş bir malzemede, Şekil 5a'da gösterildiği gibi domenler rastgele yönelmiştir. Bir ferromanyetik malzeme manyetik alana yerleştirildiğinde, her bir domen içindeki manyetik alanların yönelimi değişir ve dış alanın yönüne hizalanır (Şekil 5b). Bu hizalanma, dış manyetik alanın etkisini artırır. Bu davranış, örneğin manyetize edilmemiş demir gibi bazı malzemelerin, güçlü bir mıknatısın yakınına yerleştirildiklerinde veya bir kalıcı mıknatısla ovulduklarında manyetize olmalarını sağlar. Yavaş yavaş



Şekil 5. Bir ferromanyetik maddedeki manyetik alanlar
a) dış manyetik alan yokken, b) manyetik alan içindeyken.

Domenlerin kademeli olarak hizalanması, demirin geçici veya kalıcı olarak manyetize olmasına neden olur.

Diyamanyetik ve paramanyetik maddelerin aksine, yalnızca kristal yapıya sahip malzemeler ferromanyetik özelliklere sahip olabilir. Bir ferromanyetik malzeme eritilir veya buharlaştırılırsa, paramanyetik bir malzeme gibi davranır. Bu, manyetik özelliklerinin de kristal yapısı tarafından belirlendiğini gösterir.

Örneğin, bir ferromanyetik malzeme ısıtıldığında manyetik özelliklerini kaybedebilir ve paramanyetik bir malzeme haline gelebilir. Ferromanyetik bir malzemenin ferromanyetik özelliklerini yitirip paramanyetik bir malzemeye dönüştüğü sıcaklığa Curie noktası denir. Demir için bu sıcaklık 770°C iken, nikel için 360°C ile çok daha düşüktür. Bir ferromanyetik malzeme, manyetik özelliklerini Ayrıca, değişken bir manyetik alana maruz bırakıldığında ya da ani ve şiddetli mekanik gerilimlere maruz kaldığında da manyetik özelliklerini kaybedebilir. Örneğin, bir darbe aldığında alanlar hizasından çıkar, bu da düzenlerini bozar ve malzeme böylece manyetik özelliklerini yitirir.



GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

Malzemelerin manyetik özelliklerine ilişkin bilgiler, teorik öneminin yanı sıra, modern yaşamın vazgeçilmez bir parçası olan elektrik motorları, jeneratörler, bellek cihazları, sensörler ve tıbbi teşhis cihazları gibi sayısız teknolojik cihazın geliştirilmesine temel oluşturur.

Diyamanyetik malzemeler, manyetik parazitin önlenmesi gereken hassas aletlerin ve sensörlerin belirli parçalarının üretiminde kullanılır. Suyun ve organik dokuların diyamanyetik özellikleri, manyetik rezonans görüntüleme MR cihazlarının çalışma prensibi açısından da önemlidir. Örneğin, paramanyetik maddeler kontrast maddesi olarak kullanılır. Bazı sensörler, oksijeni tespit etmek için oksijenin paramanyetik bir madde olarak sahip olduğu özelliği kullanır.

Ferromanyetikler, kalıcı mıknatısların, elektrik motorlarının, jeneratörlerin ve transformatörlerin çekirdeklerinin yapımında kullanılır; ayrıca bilgi depolama cihazlarında, manyetik kilitlerde, hoparlörlerde, mikrofonde vb. de kullanılır. Manyetik özelliklerin anlaşılması, malzemelerin doğru seçilmesini ve teknoloji ile bilimde manyetik olayların en iyi şekilde kullanılmasını sağlar. Bunlardan bazıları kalıcı mıknatıs olarak kullanılırken, diğerleri manyetizasyonunun kolayca değiştirilebildiği yumuşak manyetik malzemeler olarak kullanılır.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Malzemelerin manyetik özellikleri neye bağlıdır?
2. Bağlı manyetik geçirgenlik nasıl tanımlanır?
3. Diyamanyetiklerin karakteristik özelliği nedir?
4. Paramanyetikler ile ferromanyetikler arasındaki benzerlikler ve farklılıklar nelerdir?
5. Curie sıcaklığı nedir?

Konu 1: SORULAR VE ÖDEVLER

1. Yüklü bir metal küre, aynı yarıçaplı nötr bir metal küre ile temas ettirilir ve ardından ikisi birbirinden ayrılır. Küreler temas halindeyken yük nasıl dağılır? Cevabınızı açıklayın. Bir kürenin yarıçapı diğerinin iki katı ise yük nasıl dağılır?
2. İki yük, belirli bir noktada elektrik alanının sıfır olacağı şekilde yerleştirilmiştir. Bu noktada elektrik potansiyeli de sıfır olmak zorunda mıdır? Açıklayınız.
3. Metal bir iletken içinden elektronların yönlü hareket hızının çok küçük olduğunu biliyorsak, anahtar açıldıktan hemen sonra lamba neden yanar?
4. Akım şiddetini ölçen bir ölçüm aletinin (ampermetre) neden çok küçük bir iç dirence sahip olması gerektiğini açıklayın. Ampermetre, bir elektrik devresindeki yüke nasıl bağlanmalıdır?
5. Bir devrede iki özdeş lamba paralel olarak bağlanmıştır. Lambalardan biri yanarsa, devredeki bu değişiklik diğer lambadan geçen akımı nasıl etkiler?
6. Aynı boyutlarda ve aynı malzemeden yapılmış iki direnç, bir elektrik devresinde seri olarak bağlanmıştır. Devredeki elektromotor kuvveti aniden artarsa, her bir dirençte açığa çıkan ısıya ne olur? Açıklayınız.
7. Bir direnç, sabit gerilimli bir devreye bağlanmıştır. İlk dirençle seri olarak aynı özelliklere sahip başka bir direnç eklenirse, aşağıdakiler nasıl değişecektir:
a) Devredeki akım? b) Devredeki toplam güç?
Her iki durumda da, iç direnci ihmal edilebilir düzeyde olan aynı elektromotor kuvveti kaynağı devreye bağlanmıştır. Hesaplama yapmadan cevabınızı niteliksel olarak açıklayın.
8. Elektrik akımı taşıyan düz bir iletken, manyetik akı çizgilerine dik olarak homojen bir manyetik alana yerleştirilir. İletken, manyetik akı çizgilerine paralel olarak yerleştirilirse, iletken üzerinde etkiyen Amper kuvveti ne olur?
9. Bir bakır yaydan elektrik akımı geçmektedir. Akım yaydan geçerken yay nasıl davranacaktır?
10. Bir elektron ve bir proton, homojen bir manyetik alanda aynı hızda hareket etmektedir; ancak dairesel yörüngelerinin yarıçapları farklıdır. Bu farkın neye bağlı olduğunu açıklayın. Hangi parçacığın yarıçapı daha büyük olan yörüngeye sahip olacaktır?
11. $+5 \text{ pC}$ ve $+2 \text{ pC}$ değerindeki iki nokta yük, vakumda birbirinden 30 cm uzaklıktadır. Yükler arasındaki, ilk yükten 10 cm uzaklıktaki bir noktadaki elektrik alanının şiddetini belirleyin. (Çözüm: $E = 4,1 \text{ N/C}$)
12. Uçuş sırasında, bir uçağın metal yüzeyi, hava ile sürtünme nedeniyle 200 kV 'luk bir elektrik potansiyeline ulaşabilir. Uçağın toplam kapasitansı 1 nF 'dir.
a) Uçakta ne kadar elektrik enerjisi depolanmıştır?
b) Bu durum, kabindeki yolcular için neden bir tehlike oluşturmaz? (Çözüm: $E = 20 \text{ J}$)
13. Bir kondansatör 200 V gerilime şarj edilir ve ardından kaynaktan ayrılır. Şimdi, kondansatörün plakaları arasına bağlı geçirgenliği 4 olan bir dielektrik yerleştirilirse:
a) Kondansatör üzerindeki gerilim nasıl değişecektir?
b) Plakalar arasındaki alan şiddeti nasıl değişecektir?
c) Kondansatörün enerjisi nasıl değişecektir? (Çözüm: a) $U_1 = U/4$, b) $E_1 = E/4$, c) $E_{c1} = E_c/4$)
14. Bir defibrilatör, 1800 V 'a şarj edilmiş $150 \text{ }\mu\text{F}$ 'lik bir kondansatör kullanır.
a) Depolanan enerjisi bulun.
b) Kondansatörün deşarj süresi 5 ms ise, defibrilatörün gücünü bulun.

c) Kapasitans sabit kalırken gerilim yarıya indirilirse depolanmış enerji nasıl değişir?

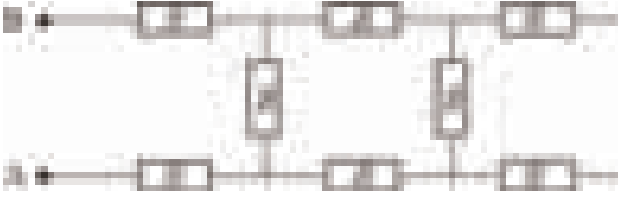
(Çözüm a) $E = 243 \text{ J}$, b) $P = 49 \text{ kW}$, c) $E_1 = E/4$)

15. Şekilde gösterilen devrenin üç dalından geçen akım şiddetini bulun:

(Çözüm: $0,91 \text{ A}$, $0,18 \text{ A}$, $0,73 \text{ A}$)

a) Tüm dirençlerin direnci R ise ve elektromotor kuvveti kaynağı A ve B noktaları arasına bağlanmışsa, seri bağlanmış dirençlerin eşdeğer direnci nedir?

(Çözüm: $R_e = \frac{30}{11} R$)



b) Şekilde gösterilen kondansatör grubunun eşdeğer kapasitansı, her bir kondansatörün kapasitansı C ise,

Kondansatörlerin toplam kapasitesi C' 'dir. (Çözüm: $C_e = \frac{4}{7} C$)

16. Şekilde gösterilen devredeki kondansatörün uçlarındaki gerilimi

bulunuz. Plakalarında ne kadar yük depolanacaktır?

(Çözüm: 3 V , $6 \mu\text{C}$)



17. 220 V 'luk bir kaynağa bağlı, güç değerleri sırasıyla 60 W ve 100 W olan iki ampul, devrede şu şekilde bağlanmıştır:

a) seri ve b) paralel olarak bağlanmıştır.

Her iki durumda da, hangi ampulün daha parlak olacağını belirleyin:

a) 60 W 'lık ampul,

b) 100 W gücündeki ampul.



18. İki uzun paralel iletken, dikey bir düzlemde birbirinden 6 cm uzaklıkta vakum içine yerleştirilmiştir. İlk iletken 10 A 'lık bir akım geçmektedir; ikinci iletkenin ise uzunluğunun her metresi başına kütlesi $0,04 \text{ kg}$ 'dır ve dikey düzlemde serbestçe hareket edebilir.

a) İkinci iletkenin birinci iletkenin üzerinde asılı kalması için akım hangi yönde akmalıdır? b) İkinci iletkenin geçen akımın büyüklüğü ne olmalıdır? (Çözüm b) $I_2 = 1,2 \cdot 104 \text{ A}$)

19. Yüklü bir parçacık, birbirine dik olan E elektrik alanı ve B manyetik alanının aynı anda mevcut olduğu bir bölgeye girer. Parçacık düz bir çizgi üzerinde hareket eder. Böyle bir sistem, bir filtre veya hız seçici görevi görür.

a) E , B ve parçacığın hızı arasındaki ilişkiyi ifade edin.

b) Bu bölgeye giren parçacığın hangi koşullar altında ve neden aynı yönde hareket etmeye devam edeceğini açıklayın.

c) Böyle bir hız seçicinin en az bir pratik uygulamasını belirtiniz. (Çözüm: a) $E = v B$)

KONU 2:

Mekanik salınımlar ve dalgalar

Doğada ve günlük yaşamda, sarkacın hareketi, bir telin titreşimi, sesin yayılması veya su yüzeyindeki dalgalanmalar gibi, zaman içinde tekrarlanan ya da uzayda yayılan olgularla sıklıkla karşılaşılır. İlk bakışta farklı görünseler de, bu olaylar ortak fiziksel özelliklere sahiptir ve aynı temel yasalarla açıklanır.

Periyodik mekanik hareketleri inceleyen fizik dalına salınımlar mekaniği denir ve bir ortamda salınımların yayılması dalgalar ile açıklanır. Bu konuda, mekanik salınımlar ve mekanik dalgalar, bunların temel özellikleri ve aralarındaki ilişki hakkında bilgi edineceksiniz.

Harmonik salınım, matematiksel sarkaç ve elastik salınım hareketlerinin yanı sıra periyot, frekans, genlik ve enerji kavramlarını inceleyeceksiniz. Ayrıca, mekanik dalgalar, bunların oluşumu ve yayılması ile yansıma, kırılma ve girişim olguları da ele alınacaktır.

Salınımlar ve dalgalar konusunda inceleyeceğiniz yasaların müzik ve akustiğinden ultrasona ve modern iletişim teknolojilerine kadar geniş bir uygulama alanı vardır. Kazanacağınız bilgiler, her gün gözlemlediğiniz birçok olguyu daha iyi anlamanızı sağlayacaktır.

Öğrenim çıktıları

Öğrenci aşağıdakileri yapabilecektir:

1. Doğada ve teknolojide karşılaşılan farklı mekanik salınım ve dalga türlerini örneklerle açıklar ve karşılaştırır.
2. Harmonik salınım, matematiksel sarkaç ve yay sarkacının özelliklerini analiz eder; periyot ve frekansı hesaplamak için gerekli bağıntıları uygular.
3. Salınım hareketlerindeki bağımlılıkları deneysel olarak belirler, sonuçları teorik tahminlerle karşılaştırır ve yorumlar.
4. Enerjinin korunumu ilkesini salınım ve dalga olaylarına uygular, bu süreçlerdeki enerji dönüşümlerini açıklar.
5. Mekanik dalga türlerini (boyuna, enine, düzlemsel ve küresel dalgalar) ayırt eder ve açıklar; problemlerin çözümünde dalga bağıntısını uygular.
6. Grafikler ve deneysel örneklerden yararlanarak dalgaların yansıma, kırılma ve girişim olaylarını analiz eder; farklı ortamlardaki yayılmaları hakkında çıkarımlarda bulunur.
7. Sesin oluşumunu ve yayılmasını açıklar; ses tonu, gürültü ve patırtıyı ayırt eder; gürültünün zararlı etkilerine karşı alınabilecek önlemleri açıklar.
8. İnfrases, ultrases ve yankının teknoloji, tıp ve günlük yaşamdaki kullanım alanlarını araştırır ve açıklar.
9. Doppler olayının astronomi ve tıp alanındaki uygulamalarını açıklar.

2.1. Mekanik salınımlar ve harmonik salınımcı

İlk yılda farklı hareket türlerini incelediniz. Bu hareketlerin bazılarında, hareket belirli zaman aralıklarıyla aynı yörünge üzerinde tekrar eder. Eşit zaman aralıklarında tekrarlanan bu tür hareketlere periyodik hareket denir.

Periyodik hareket farklı yörüngeler boyunca gerçekleşebilir. Bunun en yaygın örneklerinden biri dairesel yörüngede gerçekleşen harekettir. Örneğin, bir dönme dolabın kabini dairesel bir yörünge boyunca hareket eder ve belirli bir süre sonra başlangıç konumuna geri döner. Hareketin düzenli olarak tekrarlanması nedeniyle bu hareket periyodiktir. Benzer şekilde, bir saatin saniye ibresi de belirli bir zaman aralığından sonra başlangıç konumuna döndüğünden periyodik hareket yapar.

Periyodik hareketin kendini tekrar etmesi için geçen en kısa süreye periyot denir ve T ile gösterilir. Örneğin, saatin saniye ibresinin periyodu 60 saniyedir; çünkü saniye ibresi 60 saniye sonra başlangıç konumuna geri döner. Dönme dolabın periyodu ise dönme hızına bağlıdır. Dönme hızı arttıkça periyot azalır. Bunlar, dairesel yörüngede gerçekleşen periyodik hareketlere örnektir.



Şekil 1. Biri periyodik hareket gösteren, diğeri denge konumunda olan iki sarkaç.

Ancak, dairesel bir yörünge gerçekleşmeyen periyodik hareketler de vardır. Bu hareketlerde cisim daire çizmez, bunun yerine hareketi sırasında **denge konumu** olarak adlandırılan belirli bir konumdan geçer. Denge konumu, cisme etki eden sonuç kuvvetinin sıfıra eşit olduğu konumdur. Örneğin, bir park salıncakta denge konumu, Dünya yüzeyine göre en alçak konumdur, yani salıncak dururken bulunduğu konumdur (Şekil 1).

Mekanik salınım hareketi, bir cismin denge konumu etrafında ileri-geri yaptığı periyodik harekettir.

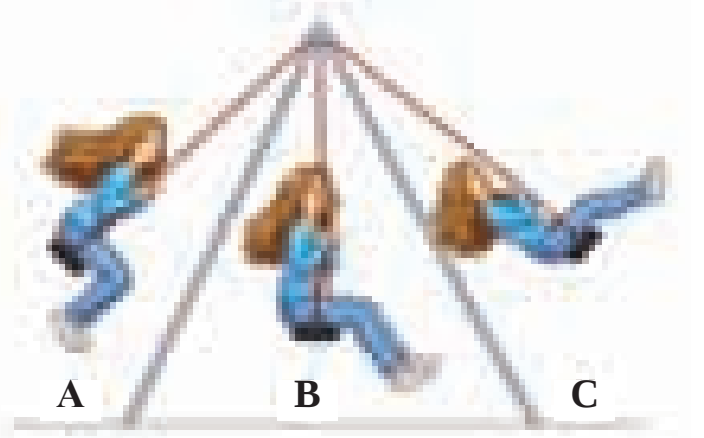
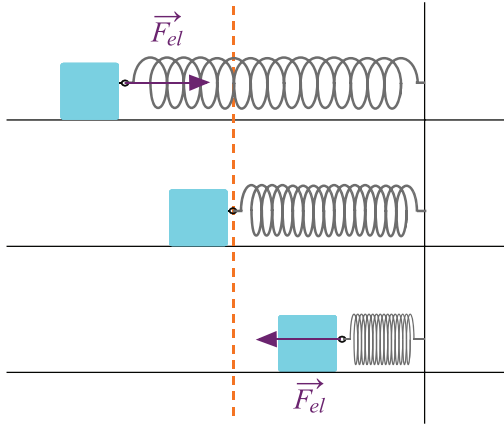
Bu konum, yönü her zaman denge konumuna doğru olan ve büyüklüğü cismin denge konumundan sapma derecesine bağlı olan bir **geri çekme kuvvetinin** etkisi altındadır. Bu tür bir hareketi gerçekleştiren cisme salınımcı denir. Sarkacın hareketi, gitar telinin hareketi veya bir yaydan sarkan bir ağırlığın hareketi salınım hareketine örnektir ve sarkaç, tel veya ağırlık salınımcıdır. **Tüm salınım hareketleri periyodik hareketlerdir, ancak her periyodik hareket salınım hareketi değildir.** Periyodik ancak salınımlı olmayan bir hareket örneği dairesel harekettir.

Her salınım hareketi, cismin anlık olarak durduğu ve ardından hareket yönünü tersine çevirdiği iki **uç konum** arasında gerçekleşir. Bir salınım, salınım hareketinin tamamlanmış bir döngüsüdür; bu döngüden sonra hareket aynı şekilde tekrarlanır. Sarkaç örneğinde, bir tam salınım, bir uç konumdan (Şekil 2'deki A noktası) denge konumuna (B noktası) geçip diğer uç konuma (C) ulaşmak ve tekrar ilk konuma (A) dönmektir.

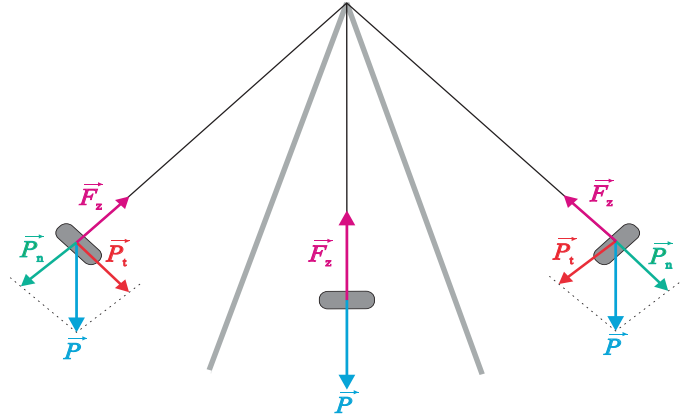
Salınım hareketinin gerçekleşmesi için iki koşulun sağlanması gerekir:

İlk koşul, cismin enerjiye sahip olmasıdır. Bir kuvvetin etkisiyle cisme iş yapıldığında, cisim enerji kazanır. Örneğin, bir sarkacı ittiğimizde sarkacın salınmaya başladığını görürüz. Benzer şekilde, sarkacı denge konumundan belirli bir yüksekliğe çekip bıraktığımızda da sarkacın salınmaya başladığını görürüz.

İkinci koşul, cisme sürekli olarak denge konumuna geri döndüren bir kuvvetin etki etmesidir. Bir yay üzerine asılı olan ve denge konumundan yer değiştiren bir cisim için bu, elastik bir yay kuvveti (şekil 3, sol). Sarkaç için ise bu kuvvet, denge konumuna doğru yönelen Dünya'nın yerçekimi kuvvetinin bileşenidir (şekil 3, sağ).



Şekil 2. Bir sarkacın salınım hareketindeki denge konumu (B) ve iki uç konumun (A ve C) şematik gösterimi

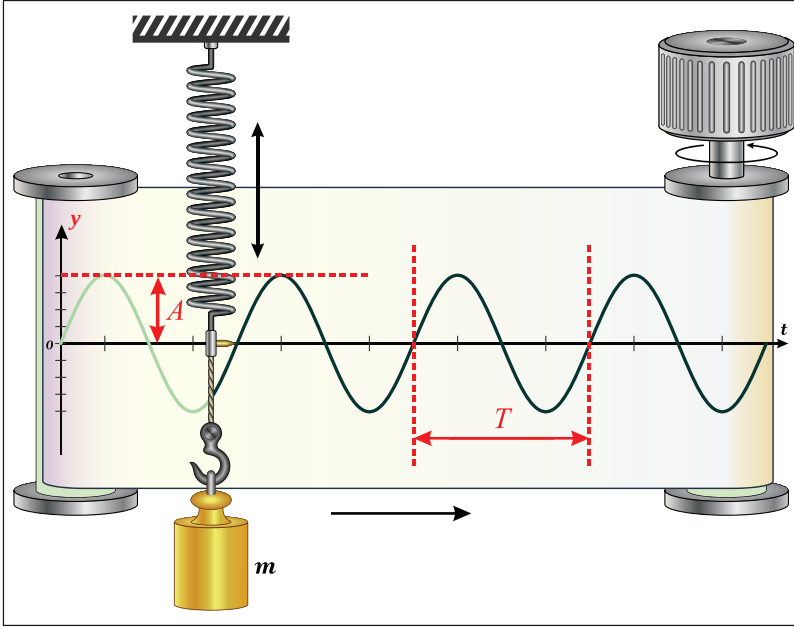


Şekil 3. Bir yaya bağlı cisimdeki (solda) ve bir sarkaçtaki (sağda) salınımlara neden olan kuvvetler. Yay durumunda, cisim ile destek arasında sürtünme yoktur

Bir süre sonra, yataklardaki sürtünme, hava direnci veya malzemenin iç sürtünmesi gibi sürtünme ve sönümleme kuvvetleri salınım yapan cisim üzerine etki ettiği için salınım durur. Bu kuvvetler salınım yapan cisim üzerinde negatif iş yaparlar ve mekanik enerjisinin sürekli azalmasına neden olurlar. Sonraki derslerde, basitlik amacıyla, tüm salınım hareketlerinde sürtünme ve hava direnci kuvvetlerinin ihmal edilebileceğini varsayacağız ve bunların etkisini daha sonra ele alacağız.

Bir yaya bağlı kütlesi m olan bir cisim düşünelim. Cisme bir kalem sabitlenmiştir ve arkasına sabit bir hızla yatay olarak hareket eden bir kağıt şeridi yerleştirilmiştir (şekil 4). Cisim dururken yay denge konumundadır. Bu durumda, kalem kağıt üzerinde düz bir çizgi bırakır, çünkü konumu zamanla değişmez.

Cisim denge konumundan kaydırılıp serbest bırakıldığında, denge konumu etrafında yukarı ve aşağı doğru salınmaya başlar. Aynı zamanda kağıt da yatay yönde hareket etmektedir. Kalem kağıt üzerinde bıraktığı iz, cismin denge konumundan zamanın bir fonksiyonu olarak kaymasını gösterir. Bu iz sayesinde, salınım hareketini tanımlayan birkaç önemli fiziksel büyüklük tanımlanabilir.



Şekil 4. Yaya asılı bir kütlenin titreşimlerinin (salınımlarının) grafiğinin çizilmesi

Bir cismin belirli bir anda denge konumundan sapmasına uzama denir. Cismin salınım yönüne bağlı olarak, **uzama** x ile (cisim yatay yönde salınıyorsa) veya y ile (cisim dikey yönde salınıyorsa) gösterilebilir. Cismin denge konumundan maksimum yer değiştirmesi (veya en büyük uzaması) genlik olarak adlandırılır. Genlik, A ile gösterilir. Periyot, cismin bir tam salınımı tamamlaması için geçen süredir. Örneğin, salınım yapan cismin bir tam salınımını 2 s sürüyorsa o zaman periyodu $T = 2$ s olur.

Frekans, bir saniyedeki salınım sayısıdır ve f ile gösterilir. Frekansın birimi **saniye üzeri eksi bir** (s^{-1}) veya hertz (Hz)'dir. Aşağıda-

ki eşitlik geçerlidir: $1s^{-1} = 1Hz$. Eğer osilatör 2 saniyede bir salınım yapıyorsa, frekansı: $f = 0,5s^{-1} = 0,5Hz$ olur. Osilatörün hareketindeki frekans ile periyot arasındaki ilişki aşağıdaki basit bağıntıyla verilir: $f = \frac{1}{T}$. Burada: f **frekans** (Hz) T : **periyot** (s) yani frekans, periyodun tersidir. Periyot arttıkça frekans azalır; periyot azaldıkça frekans artar.

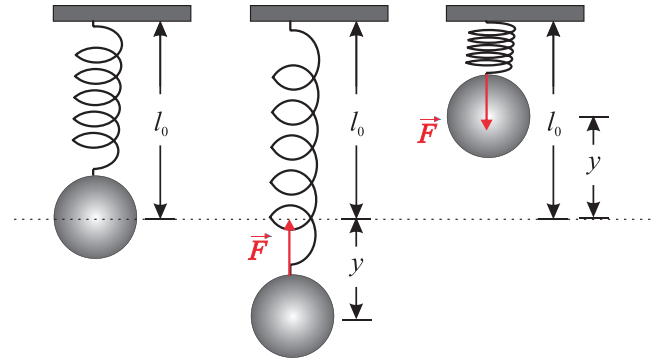
Harmonik Salınım Düzenegİ

Harmonik salınımcı, salınım hareketinin denge konumundan uzaklaşmaya orantılı ve her zaman denge konumuna doğru yönelen bir kuvvetin etkisiyle gerçekleştiği bir fiziksel sistemin salınımını tanımlayan bir modeldir. Bu modelde, salınım hareketinin incelenmesini basitleştirmek amacıyla cismin boyutları, ortamın direnci ve sürtünme gibi belirli fiziksel büyüklükler dikkate alınmaz. Şekil 5'te gösterildiği gibi, elastik bir yaya asılı bir cisim, harmonik salınımcının bir örneğidir. Denge konumunda, yayın uzunluğu l_0 'dır.

Yay gerilip cisim serbest bırakıldığında, cisim salınmaya başlar. Hooke yasasına göre, yayın uzunluğundaki değişime orantılı bir kuvvet her zaman cisim üzerinde etki eder. Yay üzerindeki cismin salınımlarına neden olan kuvvet şu şekilde yazılabilir:

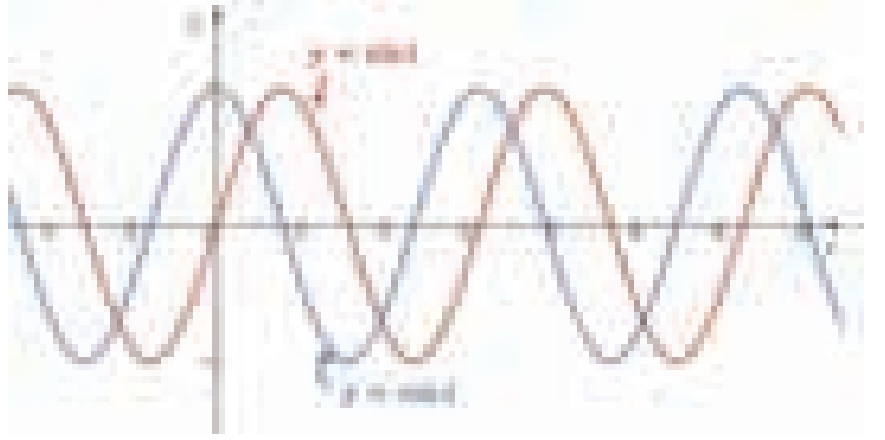
$$F = -ky,$$

burada y , cismin denge konumundan sapması, yani uzamadır ve k , yayın yay sabitidir. Denklemdaki eksi işareti, kuvvetin her zaman cismin sapmasının tersi yönde, yani her zaman denge konumuna doğru yöneldiğini gösterir.



Şekil 5. Bir yaydan sarkan ve harmonik salınım hareketi gösteren bir cisim

Böyle bir sistemin hareketine harmonik salınım denir. Harmonik salınımda, uzama zamanla periyodik bir şekilde değişir ve aynı şekilde zamanla olan bağıntısı sinüs veya kosinüs fonksiyonu şeklindedir (şekil 5).



Şekil 6. Sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının grafiği



ETKİNLİK 1.

Aşağıdaki bağlantıdan 'Desmos – Graphing Calculator' çevrimiçi grafik hesaplayıcısını açın: <https://www.desmos.com/calculator>

1. Aşağıdaki fonksiyonları aynı koordinat sisteminde çizin:

$$y = \sin t \text{ ve } y = \cos t.$$

Şekil 6'da gösterilen grafikleri elde edeceksiniz.

2. Yeni bir grafikte aşağıdaki fonksiyonu çizin:

$$y = A \cos t.$$

A katsayısı için 'kaydırıcı ekle' seçeneğini seçin. A değerini değiştirmenize olanak tanıyan bir kaydırıcı görünecektir. A değerini değiştirin ve grafikte ne olduğunu gözlemleyin. Özellikle aşağıdaki durumlara dikkat edin:

$$y = 2 \cos t \text{ ve } y = 0,5 \cos t.$$

- A değerini değiştirdiğinizde grafikte ne değişti?
 - Değişen fiziksel büyükeye ne ad verdik?
3. Aşağıdaki fonksiyonu grafiğe çizin:

$$y = A \cos(nt).$$

"Kaydırıcı ekle" seçeneğini kullanarak n katsayısını ekleyin ve $A = 1$. n değerini değiştirin, *değerini değiştirin* ve grafikte ne olduğunu gözlemleyin. Özellikle aşağıdaki durumlara dikkat edin:

$$y = \cos(2t)$$

$$y = \cos(0,5t).$$

- n değerini değiştirdikçe grafikte ne değişti?
- Aynı t aralığında salınım sayısı nasıl değişti?
- Değişen fiziksel büyükeye ne ad verilir?

4. Aşağıdaki fonksiyonu grafiğe çizin:

$$y = A \cos(nt + p).$$

'Kaydırıcı ekle(add slider)' seçeneğiyle p katsayısını ekleyin ve diğer katsayılar için değeri şu şekilde ayarlayın: değerler $A = 1$ ve $n = 1$ olsun. p değerini değiştirin ve grafikte ne olduğunu gözlemleyin.

- Grafik nasıl değişiyor?
 - Genlik ve salınım sayısı değişiyor mu?
5. Grafik hesap makinesini kullanarak aşağıdaki özelliklere sahip bir grafik çizin:
 - a) Fonksiyonun maksimum değeri 2 olsun,
 - b) Grafikteki iki bitişik maksimum değer arasındaki mesafenin iki katı $y = A \cos \pi t + p$
 - c) Başlangıç noktası orijinde olsun.

Fonksiyonun denklemini yazın ve ilgili grafiği çizin.

Not: Bu alıştırma grafik hesap makinesinde de yapılabilir, ancak katsayıların değerleri manuel olarak değiştirilmelidir.



Etkinlik 1’de çizdiğiniz fonksiyonların grafikleri sadece matematiksel eğriler değildir. Bunlar salınan bir cismin uzaması (yer değiştirmesi) belirlenirken elde edilen şekle sahiptir. Bu tür bir bağımlılık şekli, örneğin aşağıdaki salınımlarda elde edilir:

- Yaydan sarkan cisim
- Matematiksel sarkaç

Dolayısıyla, etkinlikte incelenen parametreler, harmonik salınım hareketini tanımlarken açık bir fiziksel anlam taşır. A katsayısı, fonksiyonun ulaştığı maksimum ve minimum değerleri belirler. Harmonik salınımcı durumunda, uzama dikey ekseninde gösterilirse, bu katsayı denge konumundan maksimum yer değiştirmeyi, yani **genliği** temsil eder.

n katsayısı, fonksiyonun tekrar ettiği aralığın uzunluğunu, yani grafikteki iki bitişik tam tekrar arasındaki mesafeyi etkiler. Fiziksel açıdan bu değişim, birim zamandaki salınım sayısı, yani salınım **frekansı** ile ilgilidir. Harmonik salınımın matematiksel tanımında, frekans yerine çoğunlukla **dairesel (açısal) frekans** kullanılır ve bu, ω (okunuşu 'omega') ile gösterilir. Frekans ile açısal frekans arasındaki ilişki ve periyot ile açısal frekans arasındaki ilişki aşağıdaki formüllerle verilir:

$$\omega = 2\pi f, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Açısal frekans, saniye başına radyan (rad/s) cinsinden ifade edilir.

Son parametre φ_0 ifadesinin başlangıç anındaki değerini belirler. Salınım hareketinde bu büyüklüğe başlangıç fazı denir. Başlangıç fazı, $t = 0$ anında salınım yapan cismin konumunu ve hareket yönünü belirler ve φ_0 (fi) ile gösterilir.

Sinüs veya kosinüs fonksiyonunun argümanı olan $(\omega t + \varphi_0)$ ifadesine salınım fazı denir. Salınım fazı, herhangi bir anda salınımcının konumunu belirler ve radyan cinsinden ifade edilir.

Buna göre **harmonik salınım hareketinin** denklemi:

$$y = A \cos(\omega t + \varphi_0),$$

şeklinde yazılır. Bu denklem, herhangi bir anda salınımcının denge konumundan uzamasını verir.

Aynı hareket sinüs fonksiyonu ile de ifade edilebilir. Bu durumda başlangıç fazı farklı bir değere sahip olur; ancak hareketin fiziksel anlamı değişmez. Örneğin, salınım hareketini tanımlayan denklem bu şekilde ifade edilirse, $y = A \sin(2t + \frac{\pi}{4})$ aynı denklem şu şekilde de yazılabilir:

$$y = A \cos(2t - \frac{\pi}{4}).$$

Harmonik salınım denklemi kullanılarak, ortaokul ikinci sınıfın kapsamını aşan matematiksel yöntemlerle hız ve ivme denklemleri türetilir. Bu nedenle, bunlar sadece hazır formda verilecektir.

Harmonik salınımda, cisim salınım boyunca aynı hızda hareket etmez. Cisim denge konumundayken en hızlı hareket eder ve genlik konumlarına ulaştığında anlık olarak durur ve hareket yönünü tersine çevirir. Harmonik salınım yapan cismin hızı, uzama gibi zamanla periyodik olarak değişir, ancak maksimum değerine aynı anlarda ulaşmaz. Denklem şeklinde bu şu şekilde yazılır:

$$v = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) = -v_{\max} \sin(\omega t + \varphi),$$

burada $v_{\max}$ salınım sırasında salınımcının alabileceği maksimum hız değerini belirler.

Cismin hızı genlik konumlarında sıfır olsa da, bu cismin o konumlarda ivmesi olmadığı anlamına gelmez. Aksine, cisim tam da bu konumlarda hareket yönünü değiştirir ve bu, ancak bir ivmesi olması durumunda mümkündür. Harmonik salınımda, ivme her zaman denge konumuna doğrudur ve büyüklüğü, salınan cismin denge konumundan ne kadar uzakta olduğuna bağlıdır. Uzatma ne kadar büyükse, ivme de o kadar büyük olur. Denge konumunda ivme sıfıra eşittir. Harmonik salınımdaki ivme denklemi şöyledir:

$$a = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) = -a_{\max} \cos(\omega t + \varphi)$$

burada $a_{\max}$ salınım sırasında salınımcının sahip olabileceği maksimum ivme değerini gösterir. Son denklem şu şekilde de yazılabilir:

$$a = -\omega^2 y,$$

Bu, ivmenin salınım yapan cismin uzamasına orantılı olduğunu, ancak her zaman ters yönde olduğunu kanıtlar.

Herhangi bir harmonik salınım hareketi için, yukarıdaki denklemde olduğu gibi salınan cismin ivmesi uzama cinsinden ifade edilebiliyorsa, uzama önündeki katsayı o salınım hareketinin açısal frekansının karesine eşittir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Bir harmonik salınımcı, 0,5 rad/s açısal frekansla salınmaktadır. Salınımın genliği 0,08 m'dir. Başlangıç anında cisim genlik konumundaysa, uzamanın zamana bağlılığını gösteren denklemi yazınız.

Çözüm:

Harmonik salınım denklemi şöyledir:

$$y = A \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Başlangıç anında $t = 0$ 'da cisim genlik konumunda olduğundan, o andaki uzaması $y(0) = A$ 'dır. Dolayısıyla, $y(0) = A$.

$$A = A \cos(\omega \cdot 0 + \varphi_0),$$

$$\cos \varphi_0 = 1 \text{ 'dir.}$$

Kosinüs fonksiyonu, 0 derecelik bir açı için 1 değerine sahiptir. Dolayısıyla, başlangıç fazı $\varphi_0 = 0$ 'dır. Verilen değerleri yerine koyarsak

$$A = 0,08 \text{ m, } \omega = 0,5 \text{ rad/s,}$$

şu denklem elde edilir:

$$y = 0,08 \text{ m} \cdot \cos\left(0,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot t\right).$$



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Periyodik hareketin üç örneğini ve salınım hareketinin üç örneğini veriniz. Salınım hareketi neden periyodiktir, ancak tüm periyodik hareketler salınım hareketi değildir?
2. Salınım hareketini hangi fiziksel büyüklükler karakterize eder?
3. Harmonik salınım nedir?
4. Bir yaya asılı bir cismin dikey salınım hareketi neden yatay salınım hareketiyle aynı denklemle tanımlanabilir?
5. Salınımcının denklemi şu ifadeyle verilir: $y = 0,04 \cos\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{\pi}{2}\right)$, burada genlik metre cinsinden, zaman ise saniye cinsindendir. Genlik, açısal frekans, periyodu ve başlangıç fazı belirleyin. (Çözüm: 0,04 m, $\frac{\pi}{4}$ rad/s, 8 s, $\frac{\pi}{2}$ rad)

6. Bir osilatörün denklemi aşağıdaki ifade ile verilmiştir:: $y = 0,02 \sin \frac{\pi}{4}(2t + 1)$, Burada genlik metre, zaman ise saniye cinsindendir. Genliği, açısal frekansı, periyodu ve başlangıç fazını belirleyiniz. (Çözüm:: 0,02 m, $\frac{\pi}{2}$ rad/s, 4 s, $\frac{\pi}{4}$ rad).
7. Harmonik salınım hareketinin genliği 24 cm ve periyodu 3 s'dir. Başlangıç anında uzama sıfırdır ve cisim +y yönünde hareket etmektedir. $T/8$ anındaki uzama, hız ve ivmeyi bulun. (Çözüm: 17 cm, 35,5 cm/s, -74,5 cm/s²)

2.2. Harmonik salınım örnekleri: elastik salınım ve matematiksel sarkaç

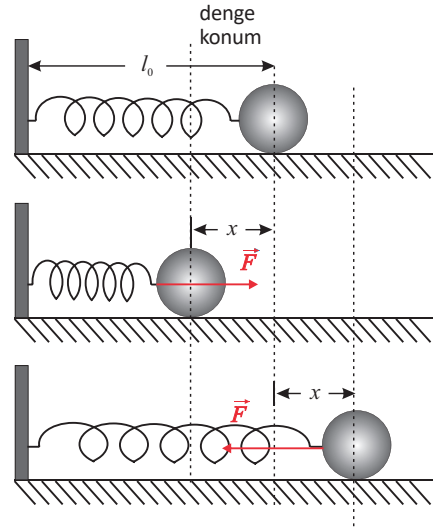
Elastik salınım

Kütlesi m olan ve yay sabiti k olan elastik bir yaya bağlı bir cisim, ideal olarak pürüzsüz bir yatay yüzeye yerleştirilsin (sürtünme kuvvetleri ihmal edilir). Cisim denge konumundan kaydırılıp serbest bırakıldığında, elastik kuvvetin etkisiyle cisim salınmaya başlar ve böylece basit **harmonik bir salınım** sistemi oluşturur.

Bu salınım cihazının salınım periyodu aşağıdaki formülle belirlenir::

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Formüle göre, elastik salınım cihazının salınım periyodu, cismin kütlesine ve yayın elastik özelliklerine bağlıdır. Salınım periyodu, salınım genliğine bağlı değildir. Elastik salınım cihazının salınımı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Elastik bir salınımcı. Cisme etki eden kuvvet her zaman uzamaya zıt yöndedir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Hooke Yasası ve Newton'un İkinci Yasasını uygulayarak, ideal bir yaya bağlı bir kütleden oluşan basit harmonik salınım cihazının salınım periyodunun ifadesini bulunuz.

Çözüm:

x 'i, edenge konumundan ölçülen uzama, yani cismin yer değiştirmesi olarak alalım. Hooke yasasına göre, yayın cisme uyguladığı elastik kuvvet $F = -kx$ şeklindedir. Bu kuvvet her zaman denge konumuna doğru yöneldiğinden, bir geri çekme kuvvetidir ve eksi işareti ile yazılır.

Salınım hareketi için Newton'un İkinci Yasası olan $F = ma$ 'yı uyguladığımızda, şu sonucu elde ederiz:

$$ma = -kx \Rightarrow a = -\frac{k}{m}x.$$

İvme, uzamayla orantılıdır ve ters yöndedir; bu da, uzamanın önündeki katsayının salınım hareketinin açısal frekansına eşit olduğu anlamına gelir (hatırlayın

önceki dersin son paragrafındaki açıklamaya göre). Genel denklem $a = -\omega^2 x$ 'e göre, elastik salınımcının açısal frekansı için şunu elde ederiz:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$



ETKİNLİK 1.

Etkinlik 1: Düşey doğrultuda salınan yay-kütle sisteminin salınım periyodu T 'nin hangi değişkenlere bağlı olduğunu araştırınız. Araştırmayı aşağıdaki üç ölçüm dizisi hâlinde gerçekleştiriniz:

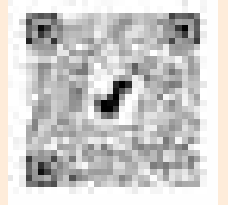
T 'nin kütle m 'ye bağlılığını (aynı yayı kullanarak),

T 'nin yay sabiti k 'ye bağlılığını (aynı kütleli kullanarak, farklı yaylarla),

Salınım periyodunun salınım genliğine bağlılığını.

Sonuçlarınızı tablo ve grafik hâlinde sununuz. Deneyin uygulama basamaklarını açıklayınız ve ölçüm hatasını tahmin ediniz. Not: Araştırma için, aşağıdaki web sitesinde bulunan PhET simülasyonu "Kütleler ve Yaylar" (Masses and Springs) da kullanılabilir:

<https://phet.colorado.edu/mk/simulations/masses-and-springs>



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Kütle oranı 4 : 1 olan farklı kütleli cisimlere iki özdeş yay bağlanmıştır.

Bu cisimlerin salınım periyotlarının oranı nedir?

Verilen: $\frac{m_1}{m_2} = \frac{4}{1}$

İstenen: $\frac{T_1}{T_2} = ?$

Çözüm: Bir yayla asılı bir cismin harmonik salınım periyodu şöyledir:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Yaylar eşit olduğundan, k değeri her iki yay için de aynıdır, bu nedenle şu şekilde yerine koyarız:

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} = \sqrt{\frac{4}{1}} = 2.$$

Matematiksel sarkaç

Biri diğerinden çok daha büyük kütleyle sahip iki cismi, eşit uzunluktaki iplerle aynı yükseklikten serbest bıraktığınızda hangisinin daha hızlı salınacağını düşünürsünüz? Bu sorunun cevabını verebilmek için fizikte matematiksel sarkaç adı verilen ideal bir model kullanılır. abit bir nokta etrafında salınım yapabilen her cisme sarkaç denir. Matematiksel sarkaç ise, boyutları ihmal edilebilen bir cismin uzamayan ve kütesiz kabul edilen bir ipe bağlanmasıyla oluşturulan ideal bir modeldir. İpin bir ucu sabit bir noktaya bağlanmıştır ve sarkaç düşey bir düzlemde salınım yapar.

Matematiksel sarkacın salınım hareketini açıklamak için, boyutları ihmal edilebilecek kütlesi m olan ve uzunluğu l olan uzayamayan bir ipe asılı bir sarkaç ele alacağız. Sarkaç denge konumundan küçük bir açı θ kadar kaydırılıp serbest bırakılırsa, denge konumu etrafında salınmaya başlar. Salınım, Dünya'nın yerçekiminin etkisi altında dikey bir düzlemde gerçekleşir.

Şekil 2'de gösterilen iki konumda sarkıca etki eden kuvvetleri ele alalım. İp denge konumundayken, sarkıca Dünya'nın yerçekimi kuvveti $\vec{P}$ ve gerilim kuvveti $\vec{F}_z$ (Şekil 2, sol). Bu konumda bileşke kuvvet sıfırdır. Bu nedenle matematiksel sarkaç dengede kalır. Sarkaç cismi denge konumundan uzaklaştırıldığında (Şekil 2, sağ), cisme yine aynı iki kuvvet etki eder; ancak bu kez kuvvetlerin bileşkesi sıfır değildir.

Cisim A konumundayken, ağırlık kuvveti iki bileşene ayrılabilir:

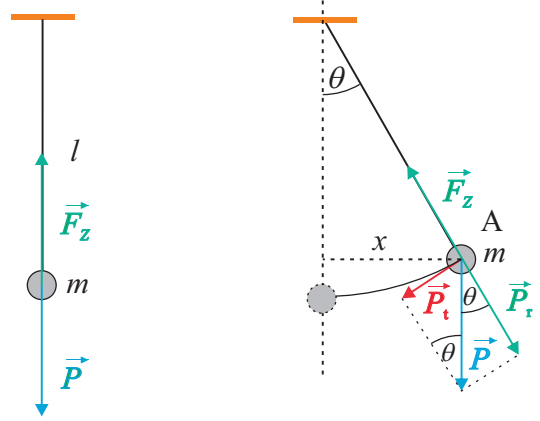
- İp doğrultusundaki radyal bileşen (P_r), ve
- İpe dik doğrultudaki teğetsel bileşen (P_t).

Cisim, Dünya'nın yerçekiminin teğetsel bileşeni tarafından denge konumuna doğru hızlandırılır. İpteki gerilim ve Dünya'nın yerçekiminin radyal bileşeni, hareket yönüne dik olup, hareketin yalnızca dairesel bir yörünge boyunca gerçekleşmesine neden olur.

Sarkaçla yapılan deneyler, periyot T 'nin cismin kütlesine değil, ipin uzunluğuna ve yerçekimi ivmesine bağlı olduğunu göstermektedir. Küçük salınım açıları için (yaklaşık 10° 'ye kadar) matematiksel sarkaç harmonik salınım yapar. Bu durumda salınım periyodu aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

Burada, l sarkacın uzunluğunu, g ise yerçekimi ivmesini gösterir. Bu sonuç, bölümün başında sorulan sorunun da cevabını verir. Farklı kütlelere sahip iki cisim, eşit uzunluktaki esnemeyen iplere asılıp denge konumundan aynı küçük açı kadar saptırılarak serbest bırakıldığında, her iki sarkaç da aynı periyotla salınır. Çünkü matematiksel sarkacın periyodu cismin kütlesine bağlı değildir.



Şekil 2. Bir ipe asılı sarkacın iki konumu



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Matematiksel sarkaç üzerine etki eden kuvvetleri inceleyerek, matematiksel sarkacın periyodunun neye bağlı olduğunu belirleyin.

Çözüm:

Şekil 2'ye (sağda) göre, sarkaç, Dünya'nın yerçekiminin teğetsel bileşeni nedeniyle denge konumuna doğru ivmelenir; bu bileşen şuna eşittir:

$P_t = mg \sin \theta$, burada $\sin \theta = \frac{x}{l}$ Dolayısıyla, her zaman denge konumuna doğru yönelen geri çekme kuvveti denklemi şu şekilde verilmiştir $P_t = -mg \frac{x}{l}$.

Newton'un İkinci Yasasına göre, $F = ma$, yani $ma = -mg \frac{x}{l}$.

O halde, cismin ivmesi şu şekilde verilir $a = -g \frac{x}{l}$.

Bu ifade, ivmenin uzamaya orantılı olduğunu gösterir; bu da harmonik salınım hareketinin karakteristik bir özelliğidir. Harmonik salınım hareketindeki ivme için genel formül $a = -\omega^2 x$ 'tir. Bu iki bağıntıyı karşılaştırarak şu sonuç elde ederiz:

$$\omega^2 = \frac{g}{l} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ olduğundan, matematiksel sarkacın salınım periyodu şu şekilde

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Bu sonuç, matematiksel sarkacın periyodunun yalnızca ipin uzunluğuna ve yerçekimi ivmesine bağlı olduğunu, sarkacın kütlesine bağlı olmadığını göstermektedir. Bu örnekte olduğu gibi küçük açılar söz konusu olduğunda, salınım periyodu salınım genliğine de bağlı değildir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 4.

2 m uzunluğundaki bir matematik sarkacı küçük açılarla salınmaktadır. Everest Dağı'nda yerçekimi ivmesi yaklaşık 9,76 m/s²'dir ve Güney Kutbu'nda ise 9,83 m/s²'dir. Everest'te yerleştirilen sarkacın periyodu, kutuplarda yerleştirilen sarkacın periyoduna göre yüzde kaç daha büyük (veya daha küçük)tür? Hava direncini ihmal edin.

Verilen: $g_E = 9,76 \text{ m/s}^2$, $g_P = 9,83 \text{ m/s}^2$

İstenen: $\Delta T\% - ?$

Çözüm:

Güney Kutbu ve Everest Dağı'nın periyodu $T = 2\pi$ olarak yazılır $T_P = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_P}}$ ve $T_E = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_E}}$.

Karşılaştırma yapmak için periyotların oranını

$$\frac{T_E}{T_P} = \sqrt{\frac{g_P}{g_E}} = \sqrt{\frac{9,83}{9,76}} \approx 1,0036 \Rightarrow \Delta T = 0,36\%.$$

Everest'te yerleştirilen sarkacın periyodu, Güney Kutbu'nda yerleştirilen sarkacın periyodundan %0,36 daha fazladır.

Matematiksel bir sarkacın periyodunu ve sarkacın uzunluğunu ölçerek, yerçekimi ivmesinin değeri deneysel olarak belirlenebilir.



ETKİNLİK 2.

Bilimsel yöntemi kullanarak, bulunduğunuz yerdeki Dünya'nın ivme değerini belirlemek için bir deney tasarlayın ve gerçekleştirin.

Adım 1: Gerekli malzemeleri kullanarak deneyi tasarlayın. Gerekli malzemeler: ip, küçük bir metal top (veya somun, pul), bir sehpa (üç ayaklı), bir mezura, bir kronometre (veya cep telefonu), bir hesap makinesi.

Adım 2: Bağımsız, bağımlı ve kontrol değişkenlerini belirleyin.

Adım 3: Bir hipotez oluşturun.

Adım 4: Deneyi gerçekleştirin. Bir tablo oluşturun ve sonuçları bu tabloya girin. Aşağıdaki hususlara dikkat edin:

Sarkaç küçük açılarla (10° 'den küçük) salınır,

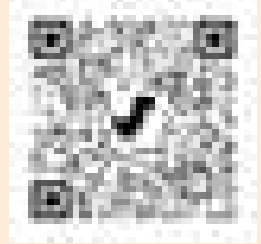
20 tam salınım için geçen süre ölçülür.,

Ölçüm, farklı sarkaç uzunlukları için birkaç kez tekrarlanır.

Neden birden fazla salınımın süresini ölçmek daha iyidir ve ölçüm neden birkaç kez tekrarlanmalıdır?

Adım 5: Salınım periyodunu belirleyin. T^2 'nin l 'ye göre nasıl değiştiğini gösteren bir grafik çizin. Grafikten doğrunun eğimini belirleyin ve g değerini hesaplayın. Hesaplanan değeri tablo değeriyle karşılaştırın ve hipotezin doğruluğunu kontrol edin.

Not: Bu araştırma için, aşağıdaki web sitesinde. PhET simülasyonu "Pendulum Lab" da kullanılabilir: <https://phet.colorado.edu/mk/simulations/pendulum-lab>



Hem matematiksel sarkaç hem de elastik salınımcı basit harmonik salınım hareketi yapsa da, salınım periyotları ve frekansları aynı formülle ifade edilmez. Bunun nedeni, bu iki sistemde geri çekme kuvvetinin doğasının farklı olmasıdır; dolayısıyla periyot, farklı fiziksel büyüklüklere bağlıdır.



GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

Matematiksel sarkacın prensibi, depremleri ve Dünya'nın iç yapısını inceleyen bilim dalı olan sismolojide önemli bir uygulamaya sahiptir. Temel sismometre modellerinde, deprem sırasında zemin (Dünya'nın yüzeyi) salınırken, kütleli bir cisim yaklaşık olarak yatay konumda kalmasını sağlayan bir mekanizmaya asılır. Atalet nedeniyle cisim, zeminin hareketini hemen takip etmez, geride kalır ve cisim ile Dünya arasındaki göreceli hareket kaydedilir.

Bu davranış, kütleli cismin yoğun bir kütle olarak kabul edilebildiği matematiksel sarkacın davranışına benzemektedir. Ortaya çıkan salınımlar, geri çekme kuvvetlerinin bir sonucudur ve matematiksel sarkacın salınımlarını yöneten fiziksel yasalarla aynı yasalar kullanılarak analiz edilebilir. Salınımların periyodu, genliği ve süresi ölçülerek, depremin büyüklüğü ve sismik dalgaların yayıldığı ortamın özellikleri hakkında bilgi elde edilir.

Ayrıca, matematiksel sarkaç, yerçekimi ivmesinin ölçülmesinde de tarihsel olarak önemli bir rol oynamıştır. Sarkacın periyodu g değerine bağlı olduğundan, uzunluğu kesin olarak bilinen bir sarkacın periyodunun ölçülmesi, Dünya'nın yerçekimi ivmesinin yerel değerinin belirlenmesini sağlar. Bu ölçümler, g değerinin Dünya'nın her yerinde aynı olmadığını göstermiştir; bu durum, Dünya'nın şekli ve düzensiz iç yapısı ile ilgilidir.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Aynı sarkaç, yerçekimi ivmesinin yaklaşık altı kat daha küçük olduğu Ay'a taşınırsa, matematiksel sarkacın periyodu nasıl değişir? Sarkaç sıfır yerçekimi ortamında bulunursa periyodu ne olur? (Çözüm: Dünya'daki periyodunun 2,45 katı).
2. Diğer tüm koşullar aynı kalırken, sarkacın asılı olduğu ipin uzunluğu orijinal uzunluğunun dörtte birine indirilirse, matematiksel sarkacın periyoduna ne olur?
3. Elastik bir salınımın periyodu, matematiksel sarkaçtan farklı olarak neden cismin kütlesine bağlıdır?

4. Daha yüksek yay sabiti olan bir yay kullanılırsa, basit harmonik salınımcının salınım periyodu nasıl değişir?
5. Matematiksel sarkacın salınım periyodu, Dünya yüzeyinden hangi yükseklikte iki katına çıkar? Dünya'nın yarıçapını 6400 km olarak alın. (Çözüm: 6400 km)
6. İki basit sarkaç, küçük açılarla salınmaktadır. İlk sarkaç dakikada 48 salınım yapar ve uzunluğu 0,8 m'dir. İkinci sarkacın dakikada 36 salınım yapabilmesi için, ikinci sarkacın uzunluğunun ilk sarkacınkinden ne kadar farklı olması gerekir? (Çözüm: 0,62 m)
7. Bir yay-kütle sistemi dakikada 60 salınımla salınmaktadır. Sistemin dakikada 40 salınımla salınması için cismin kütlesi nasıl ve ne kadar değiştirilmelidir? (Çözüm: $m_2 = 2,25m_1$)

2.3. Salınım Hareketinin Enerjisi

Salınım hareketi, potansiyel ve kinetik enerjideki sabit bir değişimle ilişkilidir; oysa sistemin toplam mekanik enerjisi sabit kalır. Salınımın başlaması için sistemin denge konumundan yer değiştirmesi, yani ona enerji verilmesi gerekir. Salınan cismi denge konumundan kaydırıp başlangıç (genlik) konumuna getirdiğimizde, sistem üzerinde iş yaparız. Bu iş sayesinde, sisteme mekanik enerji aktarırız; bu pozisyonda mekanik enerji potansiyel enerji şeklinde depolanır ve kinetik enerji sıfıra eşittir. Cismi denge konumundan genlik konumuna kaydırırken yapılan iş, sistemin potansiyel enerjisindeki artışa eşittir, yani şu ilişki geçerlidir:

$$A = \Delta E_p .$$

Birinci sınıfta incelediğiniz elastik harmonik salınımcı örneğinde, deforme olmuş bir yayın potansiyel enerjisi, denge konumundan sapmasına bağlıdır. Salınımcıyı denge konumundan A kadar kaydırırsak, o zaman genlik konumundaki potansiyel enerji şu şekilde ifade edilir:

$$E_{p,\max} = \frac{kA^2}{2} .$$

Bu enerji, elastik harmonik salınım sistemine aktarılan toplam mekanik enerjidir.

Cisim serbest bırakıldığında, geri çekme kuvvetinin etkisiyle denge konumuna doğru hareket etmeye başlar ve böylece salınım hareketi oluşur. Sisteme verilen enerji kaybolmaz, ancak salınım sırasında sürekli olarak potansiyel enerjiden kinetik enerjiye ve tekrar potansiyel enerjiye dönüşür. Denge konumuna yaklaştıkça cisim artan bir hızla hareket eder, bu nedenle kinetik enerjisi potansiyel enerjisi pahasına artar. Cisim denge konumundan geçtiğinde ve atalet etkisiyle bu konumdan uzaklaşmaya devam ettiğinde, hızı azalır ve kinetik enerjisi potansiyel enerjiye dönüşür.

Salınım hareketi sırasında herhangi bir anda, sistemin cismin hızına bağlı belirli bir kinetik enerji E_k , ve denge konumuna göre konumu, yani uzamanın büyüklüğü tarafından belirlenen potansiyel enerji E_p , vardır. Sistemin toplam mekanik enerjisi, bu iki enerjinin toplamına eşittir ve şu şekilde yazılır:

$$E = E_k + E_p .$$

Sürtünme kuvvetleri, hava direnci veya enerji kaybına neden olan diğer kuvvetler ihmal edilebilirse, Mekanik Enerjinin Korunumu Yasası geçerlidir; o zaman buna göre toplam enerji E, salınım boyunca sabit kalır. Kinetik ve potansiyel enerjiler zamanla değişse de, bunların toplamı sabit bir değere sahiptir.

Cisim denge konumundan geçtiğinde, potansiyel enerji en düşük seviyeye iner ve kinetik enerji en yüksek değerine ulaşır. Bu durumda cismin kinetik enerjisi şöyledir:

$$E_{k,\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

burada m cismin kütlesi, $v_{\max}$ ise sistemin denge konumundan geçtiği andaki hızdır.

Cisim denge konumundan uzaklaştıkça hızı azalır ve kinetik enerji potansiyel enerjiye dönüşür. Elastik salınım sisteminin potansiyel enerjisi, yayın elastik potansiyel enerjisine eşittir ve şu ifadeyle verilir:

$$E_p = \frac{kx^2}{2}$$

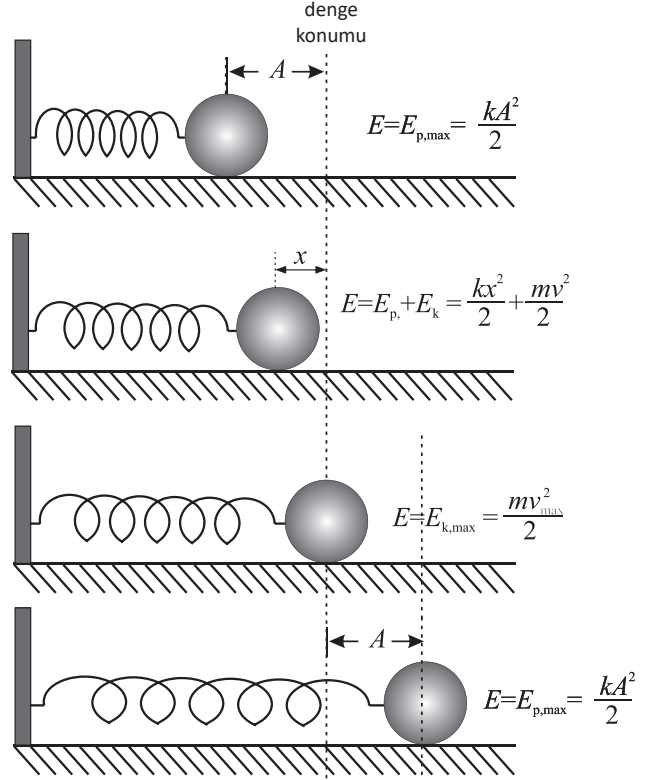
Burada, k yay sabitini, x ise uzamayı gösterir. Genlik konumunda uzama maksimum değerine ulaşır; yani $x = \pm A$ olur. Bu konumda cismin hızı sıfır olduğundan kinetik enerjisi de sıfırdır. Dolayısıyla sistemin tüm mekanik enerjisi potansiyel enerjiye dönüşür. Bu konumda potansiyel enerji maksimum değerine ulaşır:

$$E_{p,\max} = \frac{kA^2}{2}$$

Sistemin toplam enerjisi tüm konumlarda aynı olduğundan, salınım hareketinin toplam enerjisi maksimum potansiyel enerji cinsinden ifade edilebilir ve şu şekilde yazılabilir:

$$E = E_k + E_p = \frac{kA^2}{2}.$$

Bu ifade, sistemin toplam mekanik enerjisinin genliğin karesiyle orantılı olduğunu ve zamana bağlı olmadığını açıkça göstermektedir.



Şekil 1. Dört farklı konumdaki basit harmonik salınımcının enerjisi



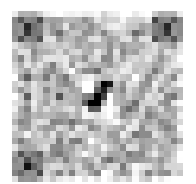
ETKİNLİK 2.

Harmonik salınımcının enerji korunumu

Etkileşimli bir bilgisayar simülasyonu kullanarak, harmonik salınımda kinetik ve potansiyel enerjinin nasıl değiştiğini inceleyin ve ideal durumda mekanik enerjinin korunumu yasasını doğrulayın.

Yöntem

1. PhET simülasyonu "Kütleler ve Yaylar"ı („Masses and Springs“) açın ve aşağıdaki web sitesinde "Energy" bölümünü seçin: https://phet.colorado.edu/sims/html/masses-and-springs/latest/masses-and-springs_all.html?utm_source=chatgpt.com
2. Salınımı şu şekilde ayarlayın:
 - Sürtünme yoktur (sönümleme = 0) (damping) = 0 olarak ayarlanmalıdır
 - Cisim, düşey konumda bulunan bir yaya asılı olsun.
3. Cismi denge konumundan aşağı doğru çekin ve genlik konumuna getirin.



4. Cismi serbest bırakın ve salınım hareketini gözlemleyin.
5. Gösterilen enerjileri takip edin:
 - Kinetik enerji E_k .
 - Potansiyel (elastik) enerji E_p .
 - Toplam mekanik enerji E .
6. Enerji değerlerini kaydedin:
 - Cisim denge konumundan geçtiğinde.
 - Cisim genlik konumundayken.
7. İşlemi daha büyük bir genlikle tekrarlayın ve her iki durumda toplam mekanik enerjiyi karşılaştırın.
8. "Daha sonra sönümlemeyi (damping $\neq 0$) etkinleştirin ve mekanik enerjinin zamanla nasıl değiştiğini gözlemleyin."

Değerlendirme soruları:

1. Kinetik enerji hangi konumda en yüksek seviyededir?
2. Potansiyel enerji hangi konumlarda en büyüktür?
3. Sürtünme olmadığında toplam mekanik enerji değişir mi? Açıklayın.
4. Genlik artışı toplam mekanik enerjiyi nasıl etkiler?
5. Sistemde sürtünme olduğunda mekanik enerjiye ne olur?
6. Salınım hareketinde sürtünme olduğunda mekanik enerjinin bir kısmı nereye "kaybolur"?



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Denge konumundan 2 cm uzaklıkta, harmonik salınımcının kinetik ve potansiyel enerjileri eşittir. Salınımcının genliğini bulunuz.

Çözüm: Harmonik salınımcı için toplam mekanik enerji:

$$E = \frac{1}{2}kA^2,$$

Denge konumundan y uzaklığındaki noktada potansiyel enerji: $E_p = \frac{1}{2}ky^2$ olur.

Buna göre kinetik enerji: $E_k = E - E_p = \frac{1}{2}k(A^2 - y^2)$ şeklindedir. Soruda verilen koşula göre

$E_k = E_p$ olduğundan, $\frac{1}{2}ky^2 = \frac{1}{2}k(A^2 - y^2)$ yazılabilir.

Her iki tarafı ortak çarpan olan $\frac{1}{2}k$ ile sadeleştirirsek: $y^2 = A^2 - y^2$ buradan: $A^2 = 2y^2$ ve dolayısıyla,

$A = \pm y\sqrt{2}$ elde edilir. $y = \pm 2$ cm için $A = 2\sqrt{2}$ cm $\approx 2,83$ cm bulunur.

Etkinlik 2'nin 5 ve 6 numaralı sorularının cevapları, sürtünme kuvvetleri veya ortam direnci olduğunda salınım sisteminin toplam mekanik enerjisinin artık sabit kalmadığını göstermektedir. Gerçek koşullarda, salınım sistemleri her zaman sürtünme ve ortam direnci gibi kuvvetlere maruz kalır. Bu kuvvetler nedeniyle, sistemin mekanik enerjisinin bir kısmı iç enerjiye (ısıya) dönüşür ve toplam mekanik enerji zamanla azalır.

Sonuç olarak, maksimum potansiyel enerji $\frac{kA^2}{2}$ cazar, buna bağlı olarak salınımın genliği de zamanla küçülür. Genliği zamanla azalan salınım hareketine sönümlü salınım denir. Sönümlü salınımda, denge konumunun aynı tarafındaki ardışık iki genliğin oranı sabittir ve aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$\frac{A_0}{A_1} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{A_2}{A_3} = \dots = \frac{A_{n-1}}{A_n} = \beta.$$

Bu bağıntıdan aşağıdaki sonuç kolayca elde edilir:

$$\frac{A_0}{A_n} = \beta^n,$$

yani

$$A_n = A_0 \beta^{-n}.$$

Burada $t = nT$ anında sistem n tam salınım yapmıştır $n = \frac{t}{T}$,

bu durumda n inci salınımda amplitüd(genlik) için geçerli formül şu şekilde olacaktır: $A_n = A_0 \beta^{-\frac{t}{T}}$.

β sabiti **sönümleme faktörü olarak** adlandırılır ve sürtünme kuvvetlerine bağlıdır. β değeri ne kadar büyükse, her salınımda genlik o kadar hızlı azalır.

Sönümlü salınım hareketinde, yeterince uzun bir süre geçtikten sonra salınımlar tamamen durur. Bu süreçte, enerji kayıpları ne kadar fazla olursa, yani sistem her salınımda çevreye ne kadar fazla enerji aktarırsa, salınımların genliği o kadar hızlı azalır. Ancak, böyle bir sisteme periyodik **bir dış kuvvet** etki ederse, sistemin kaybettiği enerjinin bir kısmı telafi edilir. Bu şekilde, salınımların tamamen sönümlemesi engellenir. Bu koşullar altında, sistemin hareketi yalnızca kendi özellikleri (salınımcının kütlesi, yay sabiti vb.) ile değil, aynı zamanda dış kuvvetin özellikleriyle de belirlenir. Sistem, bu kuvvetin etkisi altında salınmaya devam eder ve salınımlar, dış kuvvetin yaptığı iş yoluyla sağlanan sürekli enerji beslemesi sayesinde sürdürülür. Bu tür salınım hareketlerine **zorlanmış salınımlar** denir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Bir yaya bağlı bir top, sönümleyici bir ortamda salınır; bu nedenle genlik zamanla azalır. Başlangıç anında genlik 12 cm'dir. 5 tam salınımdan sonra genlik 7,5 cm'ye düşmüştür. Salınım periyodu 0,80 s'dir.

a) Sönümleme oranını bulunuz.

b) Genliğin kaç salınımdan sonra ve ne kadar sürede 3,0 cm'den az olacağını bulun.

Verilenler: $A_0 = 12 \text{ cm}$, $A_5 = 7,5 \text{ cm}$, $T = 0,80 \text{ s}$

İstenen: a) β - ? b) n - ? , t - ?

Çözüm:

a) $t = 5T$ zaman aralığında $n = 5$ salınım gerçekleşmiştir.

A_n n'inci salınımın genliği için denklem şöyledir: $A_n = A_0 \beta^{-n}$.

$n = 5$ için $A_5 = A_0 \beta^{-5}$. Dolayısıyla: $\beta^5 = \frac{A_0}{A_5} = 1,6 \Rightarrow \beta = \sqrt[5]{1,6} = 1,1$.

b) $A_n < 3,0$ cm koşulunun geçerli olduğu salınımların n sayısını arıyoruz.

$$\text{Şunu kullanıyoruz: } \ln A_n = \ln A_0 - n \ln \beta \Rightarrow n = \frac{1}{\ln \beta} \ln \frac{A_0}{A_n} = 14,5.$$

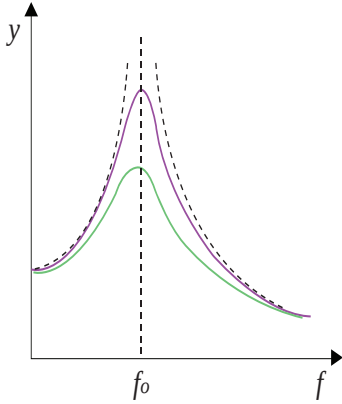
Salınım sayısı bir tam sayı olması gerektiğinden: $n = 15$ salınım. Bunun için gereken süre ise $t = nT = 15 \cdot 0,80 \text{ s} = 12 \text{ s}$.



DAHA FAZLA ÖĞREN

Esnek bir destek üzerine yan yana asılmış iki matematiksel sarkaç düşünelim. Sarkaçların uzunlukları değiştirilebilir. Sarkaçlardan biri denge konumundan saptırılıp serbest bırakıldığında salınmaya başlar. Kısa bir süre sonra, ortak destek üzerinden enerjisinin bir kısmını diğer sarkaca aktarır ve ikinci sarkaç da salınmaya başlar. Sarkaçlardan birinin uzunluğu değiştirilerek, iki sarkacın uzunlukları eşit olduğunda, yani doğal frekansları aynı olduğunda, ikinci sarkacın en büyük genlikle salındığı gözlemlenir.

Bu deney, salınım sistemleri arasındaki enerji aktarımının, doğal frekansları eşit olduğunda en verimli olduğunu gösterir. Bir salınım sisteminin, aynı frekansta salınan bir dış kaynaktan en fazla enerjiyi aldığı olaya rezonans denir. Enerjiyi aktaran sisteme tahrik edici salınım sistemi, enerjiyi alan sisteme ise rezonatör denir.



Bir salınım sistemine periyodik bir dış kuvvet etki ettiğinde, salınımın genliği bu kuvvetin frekansına bağlıdır. En büyük genlik, dış kuvvetin frekansı salınım sisteminin doğal frekansına eşit olduğunda elde edilir.

Bu frekansa rezonans frekansı denir. İdeal, sönümsüz koşullarda rezonans sırasında salınım genliği sınırsız olarak artabilir. Ancak gerçek sistemlerde her zaman sürtünme kuvvetleri ve ortam direnci bulunduğu için, mekanik enerjinin bir kısmı sürekli olarak kaybedilir. Bu nedenle rezonans sırasında ulaşılan maksimum genlik sonlu bir değere sahiptir.

Sönümleme artıkça rezonanstaki maksimum genlik azalır ve rezonans eğrisi genişler. Ayrıca rezonans frekansı, soldaki Şekil 'de gösterildiği gibi, sistemin doğal frekansına göre daha düşük değerlere kayar.

Rezonansın zararlı sonuçları da olabilir. Bir sisteme, doğal frekansına eşit veya çok yakın frekansta bir kuvvet etki ederse, salınım genliği zamanla artar. Bu artış yeterince büyük olursa, sistem hasar görebilir veya tamamen tahrip olabilir.

Buna örnek olarak ABD'deki Tacoma Köprüsü verilebilir. Orta şiddetteki bir rüzgârın etkisiyle köprüde rezonans salınımları oluşmuştur. Köprü'nün doğal frekansına yakın frekansta sürekli etki eden kuvvet nedeniyle salınım genliği hızla artmış ve bu durum kısa sürede köprü'nün çökmesine yol açmıştır.





SORULAR VE ÖDEVLER

1. Salınım cihazı denge konumundan bir başlangıç hızıyla harekete geçirildiğinde enerji dönüşümü nasıl olur?
2. Daha fazla sürtünmenin varlığı, salınımcının enerji kaybetme hızını nasıl etkiler?
3. Bir yaya bağlı cisim, periyodik bir dış kuvvetin etkisiyle zorlanmış salınımlar yapmaktadır. Zorlanmış salınımlarda, dış kuvvet sürekli iş yapmasına rağmen, salınım yapan cismin toplam mekanik enerjisinin zamanla neden artmadığını açıklayınız.
4. Kütlesi m olan bir cisim, genliği A olan harmonik salınımlar yapar. Cismin salınım genliği iki katına çıkarılırsa, sistemin toplam salınım enerjisine ne olur?
5. Bir harmonik salınımcı, 4 Hz frekansında salınmaktadır. Başlangıç anında cisim, genlik konumundadır. Ne kadar süre sonra salınımcının kinetik enerjisi, sistemin toplam mekanik enerjisinin üçte birine eşit olacaktır? (Çözüm: 0,024 s)
6. Sönümlü bir salınım cihazının genliği her salınımda %5,0 oranında azalır. Her salınımda salınım cihazının mekanik enerjisinin yüzde kaç kaybedilir? (Çözüm: %9,75)
7. Bir yaya bağlı bir cisim, ortamın direnci nedeniyle sönümlü salınımlar yapar. Başlangıç anında, salınım yapan cismin mekanik enerjisi 2 J'dir. Tam olarak 4 salınımdan sonra, salınım yapan cismin genliği başlangıç değerinin yarısına düşmüştür.
8. a) 4 salınımdan sonra salınım cihazının mekanik enerjisi ne kadardır?
9. b) Bu zaman aralığında başlangıç enerjisinin yüzde kaç başka bir enerji biçimine dönüşmüştür? (Çözüm: 0,5 J, %75)

2.4. Mekanik Dalgalar

Durgun suya bir çakıl taşı attığımızda, çarpma noktasından başlayarak su yüzeyinde dairesel dalgalar oluşur (Şekil 1). Bu dalgalar kaynaktan uzaklaşarak her yöne doğru yayılır. Su yüzeyinde bir yaprak veya başka bir hafif cisim varsa, bu cismin yalnızca yukarı ve aşağı hareket ettiği, ancak dalga ile birlikte yayılma yönünde ilerlemediği gözlemlenir. Dalga geçtikten sonra yaprak bulunduğu yerde kalır.

Bu örnekten, dalga hareketi sırasında madde- nin taşınmadığı, yalnızca bir salınımın veya uyarılmanın ortam boyunca yayıldığı sonucu çıkarılabilir.



Şekil 1. Su yüzeyindeki dalgalar

Bir dalganın nasıl oluştuğunu ve salınımın ortam boyunca nasıl yayıldığını daha iyi anlamak için, daha basit bir örnek ele alalım. Uzun bir ipin bir ucunu elinizle yukarı ve aşağı hareket ettirdiğinizi düşünün (Şekil 2). Bu durumda el, denge konumu etrafında salınan bir cisim, yani bir salınımcı görevi görür. El ile doğru- dan temas eden ip parçacıkları, ip molekülleri arasındaki elastik kuvvetlerin etkisiyle salınmaya başlar. Bu parçacıklar da aynı elastik kuvvetler aracılığıyla komşu parçacıkları salınmaya zorlar. Böylece salınım, ipin boyunca bir parçacıktan diğerine aktarılır.



Şekil 2. Dalganın oluşumu

Elastik bir ortamda salınım hareketinin yayılmasına mekanik dalga denir.

Mekanik dalgalarda, ortamın her bir parçacığı denge konumu etrafında salınır ve herhangi bir öteleme hareketi yapmadan enerjiyi komşu parçacıklara aktarır. Başka bir ifadeyle, mekanik dalga, birbirine bağlı salınımcılar aracılığıyla bir salınımın ortam boyunca iletilmesidir.

Ortamın salınımını başlatan cisim, bu örnekte el, dalga kaynağı olarak adlandırılır. Salınım ipin tamamı boyunca iletilir; ancak ip parçacıkları dalgayla birlikte ilerlemez, yalnızca denge konumları etrafında salınırlar. El, enerjisinin bir kısmını ilk parçacığa aktarır; bu parçacık da enerjiyi bir sonrakine aktarır ve bu süreç dalga boyunca devam eder.

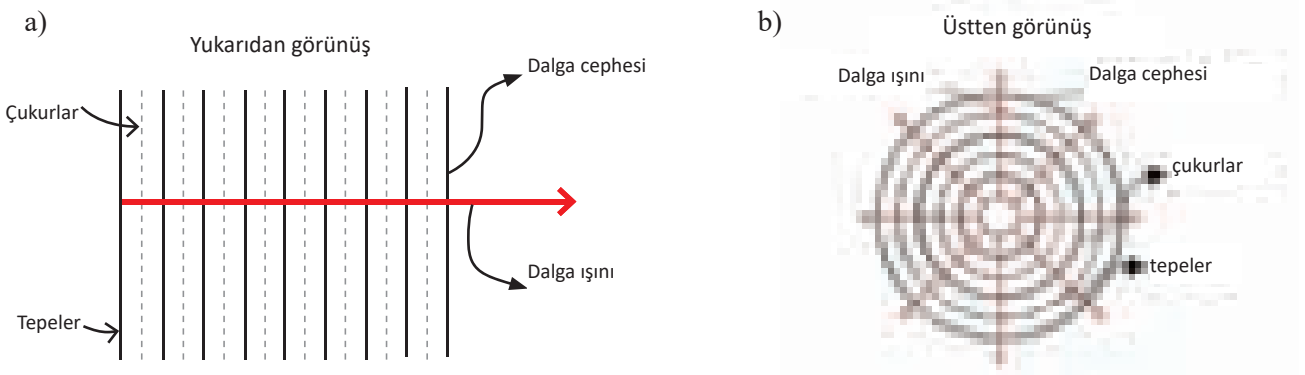
Buna göre, mekanik dalgaların yayılabilmesi için elastik bir ortamın bulunması gerekir. Vakumda salınım yaparak enerji aktarabilecek parçacıklar bulunmadığından, mekanik dalgalar vakumda yayılamaz.

Dalga hareketini daha ayrıntılı inceleyebilmek için, dalganın uzaydaki yayılımını tanımlayan bazı kavramların bilinmesi gerekir. Bunun için, durgun su yüzeyine düşen bir çakıl taşının oluşturduğu dalgaları yeniden ele alalım. Çakıl taşı su yüzeyine çarptığında, çarpma noktasında yerel bir uyarılma oluşur ve o noktadaki su parçacıkları salınmaya başlar. Dalganın herhangi bir anda ulaştığı noktaların oluşturduğu yüzeye dalga cephesi denir. Dalga cephesi, salınmaya başlamış olan ortam bölgesi ile henüz salınmaya başlamamış bölge arasındaki sınırı temsil eder. Zamanla dalga cephesi ortam boyunca ilerler.

Dalga cephesi, herhangi bir anda ortamda aynı fazda salınan, yani aynı uzamaya sahip olan ve aynı yönde hareket eden noktaların oluşturduğu yüzeydir. Başka bir ifadeyle, dalga cephesi, aynı fazda salınan noktaların geometrik yeridir. Bu nedenle, belirli bir dalga cephesindeki tüm parçacıklar aynı anda ya yukarı ya da aşağı yönde hareket eder. Dalga cephesi, dalga yüzeyinin özel bir durumudur.

Dalga cephesinin şekline göre mekanik dalgalar çeşitli türlere ayrılır. En yaygın dalga türleri şunlardır:

- düzlem dalga: Dalga cephesinin düzlem şeklinde olduğu dalgalardır (Şekil 3a). Bu tür dalgalar, örneğin su yüzeyine kısmen batırılmış doğrusal bir çubuğun salınımı ile elde edilir.



Şekil 3. Yukarıdan görünüşte dalga cephesi ve dalga ışını: a) Düzlem dalga b) Küresel dalga

• **Küresel dalga (Şekil 3b):** Dalga cephesi, merkezi kaynaқта bulunan küresel bir yüzeydir. Bu tür dalgalar, örneğin havadaki bir ses kaynağı gibi noktasal bir kaynağın salınımı sonucu oluşur.

Dalganın yayılma yönü, dalga ışını adı verilen hayali bir çizgi ile gösterilir. Dalga ışını, dalga cephesine dik olup enerjinin yayılma yönünü gösterir. Düzlem dalgalarda dalga ışınları birbirine paralel doğrular hâlinindedir. Küresel dalgalarda ise dalga ışınları kaynaktan radyal olarak yayılır

Enine ve boyuna dalgalar

Mekanik dalgalar, ortam parçacıklarının salınım yönüne göre ikiye ayrılır:

• **Enine dalgalar (Şekil 4a),** ortam taneciklerinin titreşim doğrultusunun dalganın yayılma doğrultusuna dik olduğu dalgalardır.

• **Boyuna dalgalar (Şekil 4b),** ortam taneciklerinin titreşim doğrultusunun dalganın yayılma doğrultusuna paralel olduğu dalgalardır.



Şekil 4. Uzun bir oyuncak yay (slinky) üzerindeki enine ve boyuna dalgalar

Enine dalgalar

Enine mekanik dalgalarda, **ortam tanecikleri dalganın yayılma doğrultusuna dik doğrultuda titreşir.** Bu titreşim sonucunda ortam, herhangi bir anda dalga biçimini alır ve bu biçim üzerinde **tepe ve çukur noktaları oluşur** (Şekil 5a).

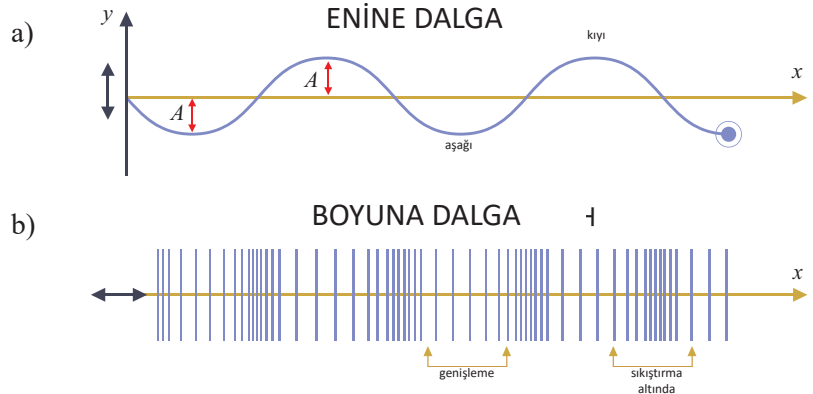
Tepe noktası, ortam taneciklerinin denge konumundan en büyük pozitif uzamaya ulaştığı; **çukur noktası** ise en büyük negatif uzamaya ulaştığı konumdur. Tepe ve çukur, taneciklerin dalga boyunca ilerlediğini değil, belirli bir andaki titreşim durumunu gösterir. Bu nedenle, tepe ve çukur kavramları tek bir taneciğe değil, dalganın belirli bir andaki şekline aittir.

Her ortam taneciği basit harmonik hareket yaptığından, titreşimi genlik ile tanımlanır. Enine dalgalarda **genlik**, taneciğin denge konumundan ulaştığı en büyük uzaklıktır. Başka bir ifadeyle genlik, denge konumu ile tepe ya da çukur noktası arasındaki uzaklıktır.

Dalga yayılırken ortam tanecikleri yalnızca denge konumları çevresinde titreşir; dalga ile birlikte ilerlemez. Dalga geçtikten sonra ortam eski hâline döner. Gerilmiş bir telde oluşan dalgalar, davul zarındaki titreşimler ve su yüzeyindeki dalgalar enine mekanik dalgalara örnek olarak verilebilir.

Boyuna dalgalar

Boyuna mekanik dalgalarda, ortam tanecikleri dalganın yayılma doğrultusunda titreşir. Bu titreşim sırasında ortamda taneciklerin birbirine yaklaştığı sıkışma (yoğunlaşma) bölgeleri ile birbirinden uzaklaştığı seyrekleşme (genleşme) bölgeleri oluşur (Şekil 5b). Boyuna dalgalarda ortamın şekli değişmez; yalnızca tanecik yoğunluğu periyodik olarak değişir.



Şekil 5. Enine ve boyuna dalgaların şematik gösterimi

Yoğunluktaki bu tür değişiklikler gazlarda, sıvılarda ve katılarda meydana gelebileceğinden, boyuna mekanik dalgalar tüm ortamlarda yayılabilir. Boyuna mekanik dalgaların en bilinen örneği sestir.

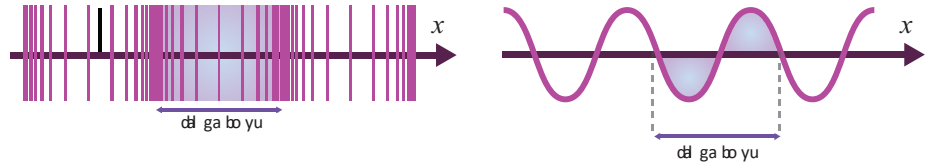
Dalga hareketinin temel büyüklükleri

Ortam tanecikleri farklı zamanlarda titreşmeye başlasa da, tümü dalga kaynağının titreşim frekansına eşit olan f frekansıyla titreşir. Frekans ile periyot T arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

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

Dalga hareketinin iletildiği tek tek parça cıkların salınımları arasındaki fark salınım fazındadır. Faz, herhangi bir anda parçacığın salınım döngüsünün hangi noktasında olduğunu gösterir, yani parçacığın konumunu ve hareket yönünü belirler. Faz, kaynaktan uzaklığa ve dalganın belirli bir parçacığa ulaşması için gereken süreye bağlıdır.

Dalga hareketini tanımlamak için kullanılan bir diğer önemli fiziksel büyüklük dalga boyu λ 'dir. Dalga boyu, aynı λ fazda titreşen birbirine en yakın iki tanecik arasındaki uzaklıktır (Şekil 6).



Şekil 6. Boyuna ve enine dalgalarda dalga boyu

Dalga hızı v salınımın ortam boyunca yayılma hızıdır ve ortam taneciklerinin titreşim hızından farklıdır. Dalga hızı, ortamın elastik özelliklerine ve dalganın türüne (enine veya boyuna) bağlıdır. Homojen bir ortamda dalga hızı sabittir. Homojen bir ortamda dalga hızı sabittir. Dalga, kaynağın bir titreşim periyodu T üresince bir dalga boyu λ kadar yol alır. Buna göre:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f.$$

Bir dalga bir ortamdan diğerine geçtiğinde, hızı ve dalga boyu değişir, Frekans ise kaynağın frekansı tarafından belirlendiği için aynı kalır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Frekansı 120 Hz ve genliği 4 mm olan bir dalga, bir ortamda yayılmaktadır. Bu dalganın dalga boyu 20 cm'dir. Dalganın hızını, bir parçacığın maksimum salınım hızıyla karşılaştırınız.

Verilenler:

$$f = 120 \text{ Hz}, A = 4 \text{ mm} = 0,004 \text{ m}, \lambda = 20 \text{ cm} = 0,20 \text{ m}$$

İstenen:

$$\frac{v}{v_{\max}} - ?$$

Çözüm: Dalganın hızı $v = \lambda f$ dir, yani $v = 0,20 \cdot 120 = 24 \text{ m/s}$ 'dir.

Harmonik salınımda, bir parçacığın maksimum salınım hızı $v_{\max} = \omega A$

burada $\omega = 2\pi f$ 'dir. Dolayısıyla. $\omega = 2\pi \cdot 120 = 240\pi$ ve $v_{\max} = 240\pi \cdot 0,004 = 0,96\pi \approx 3,02 \text{ m/s}$ 'dir.

$$\text{Dolayısıyla: } \frac{v}{v_{\max}} = \frac{24}{3,02} \approx 8.$$

Dalga denklemi

Dalga denklemi, dalganın yayıldığı ortamdaki her bir noktanın herhangi bir anda gösterdiği salınımı tanımlar. Esasen, bu denklem, ortamdaki her noktada farklı bir fazla tekrarlanan bir harmonik salınımcının denklemini temsil eder. Ortamdaki parçacıklar zamanla salınım gösterdiğinden, uzama *zaman t'ye* bağlı olmalıdır. Aynı zamanda, dalga uzayda yayılırken, parçacıkların salınımı dalga kaynağına olan uzaklıkları *x'e* de bağlıdır. Bu nedenle, dalga hareketindeki parçacıkların uzaması, konum ve zaman olmak üzere iki değişkenin bir fonksiyonudur.

Dalğanın *x* ekseninin pozitif yönünde yayıldığını varsayalım. O zaman, harmonik bir dalga için uzamanın bağımlılığı şu şekilde yazılabilir:

$$y = A \cos(\omega t - kx),$$

burada *y*, taneciğin uzamasını, *A* dalga genliğini, ω açısal frekansı ve *k* dalga sayısını gösterir; dalga sayısı,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

bağıntısıyla dalga boyu ile ilişkilidir. Dalga sayısı,

rad/m cinsinden ifade edilir. *kx* teriminin önündeki “-” işareti, dalğanın *x* ekseninin pozitif yönünde yayıldığını gösterir. Dalga ters yönde yayılırsa, denklem aşağıdaki şekilde yazılır:

$$y = A \cos(\omega t + kx).$$

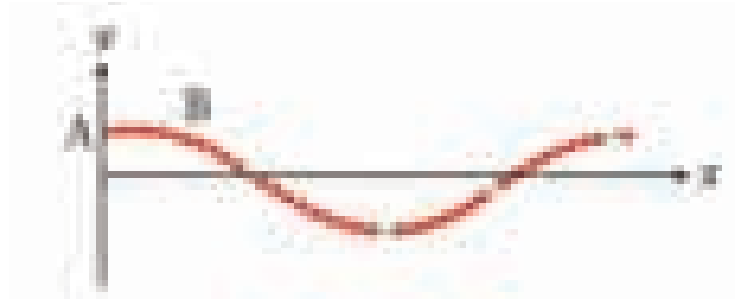
Bu denklem, uzamanın iki bağımsız değişkene bağlı olması nedeniyle iki boyutlu Kartezyen koordinat sisteminde tam olarak gösterilemez. Bu nedenle, dalga hareketini göstermenin en uygun yolu, her bir taneciğin zamanla nasıl titreştiğini izleyebileceğimiz bir animasyondur.

Grafiklerde ise en sık, dalğanın belirli bir andaki görünümünü gösterilir.

Şekil 5 ve 6'da gösterilen de tam olarak budur.

Kosinüs fonksiyonu, dalga hareketini tanımlamak için uygundur; çünkü ortam taneciklerinin harmonik titreşimi de bu tür bir fonksiyonla ifade edilir. Örneğin, *x* = 0 için dalga denklemi, basit harmonik hareket denkleğine indirgenir.

Denklemdaki *kx* terimi, dalğanın uzaydaki periyodikliğini ifade eder. Başka bir deyişle, ortam taneciklerinin titreşimleri her bir dalga boyunda aynı şekilde tekrar eder. Bu nedenle, dalga sayısı *k* ile dalga boyu λ arasında $k = 2\pi / \lambda$.



Şekil 7. Dalganın grafiksel gösterimi. Dikkat edilmelidir ki eksenler *y* ve *x* eksenleridir. Bu nedenle bu grafik, dalğanın belirli bir andaki anlık görüntüsünü (fotoğrafını) göstermektedir; yani *t* = 1 anındaki dalgayı temsil eder. Harmonik osilatörde ise grafikler *x-t* eksenlerinde çizilir ve cismin konumunun zamana göre değişimini ifade eder.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Harmonik salınım denkleminde yola çıkarak, ideal bir elastik ortamda *x* ekseninin pozitif yönünde yayılan düzlemsel harmonik dalğanın denklemini türetiniz.

Çözüm:

Dalga kaynağının (şekil 7, A noktası) salınımı, $y = A \cos(\omega t)$ denklemi ile tanımlanır; burada *A* genlik; ω ise salınımın açısal frekansıdır.

Dalga **sonlu bir hız** v ile yayıldığından, ortamdaki parçacıklar aynı anda salınmaya başlamaz. Kaynaktan x uzaklıkta bulunan bir parçacık (şekil 7, B noktası) hemen salınmaya başlamaz. Salınmaya, τ **zaman gecikmesiyle** başlar; bu **gecikme** süresi şuna eşittir

dalganın x mesafesini kat etmesi için gereken süreye eşittir: $\tau = \frac{x}{v}$. Dolayısıyla,

Kaynaktan x uzaklığı şu yasaya göre salınacaktır:

$$y = A \cos \omega(t - \tau) = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right).$$

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ ve $v = \frac{\lambda}{T}$, ilişkilerini kullanarak şunu elde ederiz:

$$\omega \frac{x}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} x.$$

Pozitif x yönünde yayılan düzlemsel bir harmonik dalga için $k = 2\pi / \lambda$ dalga sayısını kullanırsak, şu denklemi elde ederiz:

$$y = A \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \right) \Rightarrow y = A \cos(\omega t - kx).$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Bir dalga şu denklemle ifade edilir: $y = 0,5 \cos \pi(0,25t - x)$. Tüm büyüklükler temel birimlerle ifade edilmiştir. Dalganın genliğini, frekansını ve hızını bulun.

Çözüm:

Harmonik dalganın genel denklemi $y = A \cos(\omega t - kx)$

şöyledir: Verilen denklemle şöyledir: Verilen denklemle $y = 0,5 \cos(\pi \cdot 0,25t - \pi x)$, aradığımız değerleri elde ederiz:

- Genlik, kosinüsün önündeki katsayıdır: $A = 0,5$ m.

Argüman içindeki t zamanından önceki katsayı açısal frekanstır:

$$\omega = \pi \cdot 0,25 = 0,25\pi \text{ rad/s ve frekans şöyledir: } f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{0,25\pi}{2\pi} = 0,125 \text{ Hz.}$$

- x 'in önündeki katsayı dalga sabitidir: $k = \pi \text{ rad/m. } k = \pi \text{ rad/m.}$

- Dalga hızı şöyledir: $v = \frac{\omega}{k} = \frac{0,25\pi}{\pi} = 0,25 \text{ m/s.}$



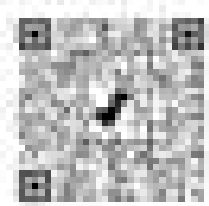
ETKİNLİK 1.

Enerjinin genlik ve frekansa bağlılığını inceleyin.

Yöntem

- Aşağıdaki web sitesinden PhET simülasyonu “Wave on a String”i açın: на следна-ва интернет-страница:

https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-on-a-string/latest/wave-on-a-string_all.html



2. Ayar:
 - Sönümlenme = Yok (Damping = None), böylece dalga enerjisinde kayıp olmaz
 - Son (End = No End) (yansıyan dalgaların oluşmasını önlemek için.)
 - Tel gerilmesini sabit olarak ayarlayın (Tension = Constant)
3. Dalga kaynağı olarak (Oscillate) seçeneğini seçin.
4. Başlangıç genliğini ve frekansı ayarlayın, ardından dalganın taşıdığı enerjiyi gözlemleyin.
5. Genliği değiştirmeden frekansı iki katına çıkarın.
6. Dalganın taşıdığı enerjinin bir periyot boyunca nasıl değiştiğini gözlemleyin.
7. Başlangıç frekansına geri dönün ve genliği yarıya indirin.
8. Aşağıdaki soruları yanıtlayın:
 - Frekans artırıldığında dalganın taşıdığı enerji nasıl değişir?
 - Genlik azaldığında dalganın taşıdığı enerji nasıl değişir?

Dalganın enerjisi ve şiddeti

Bir mekanik dalga, yayıldığı ortamda bir noktadan başka bir noktaya **mekanik enerji** taşır. Ortam tanecikleri dalgayla birlikte ilerlemez; yalnızca denge konumları etrafında titreşir. Enerji, bir tanecikten diğerine aktarılır.

Bir mekanik dalganın enerjisi, ortamın belirli bir bölümündeki taneciklerin **kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamına eşittir**:

$$E = E_k + E_p.$$

Daha önce öğrenildiği gibi, basit harmonik hareket yapan bir taneciğin toplam mekanik enerjisi sabittir ve genlik konumundaki potansiyel enerjiye eşittir. Mekanik dalgada ise tek bir tanecik değil, ortamdaki çok sayıda tanecik titreşim yapar. Bu taneciklerin tümü aynı açısal frekans ω ve aynı genlik A ile titreşir; ancak titreşim fazları farklıdır.

Yoğunluğu ρ olan ortamın küçük bir hacmi ele alındığında, bu hacimde çok sayıda titreşen tanecik bulunur. Her bir taneciğin enerjisi genliğin karesi (A^2) ve açısal frekansın karesi (ω^2) ile doğru orantılıdır. Bu nedenle dalganın taşıdığı toplam enerji de bu büyüklüklere bağlıdır. Ortamın söz konusu hacmindeki toplam enerji, tüm taneciklerin enerjilerinin toplamına eşittir ve harmonik mekanik dalga için aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$E = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \Delta V.$$

Bu bağıntı, dalganın taşıdığı enerjinin genliğe, ortamın özelliklerine ve dalganın frekansına bağlı olduğunu gösterir. **Mekanik dalganın taşıdığı enerji, genliğin karesi ile doğru orantılıdır.** Buna göre, dalganın genliği iki katına çıkarıldığında taşıdığı enerji dört katına çıkar.

Dalga şiddeti, dalganın yayılma doğrultusuna dik doğrultuda yerleştirilen **birim yüzeyden birim zamanda geçen enerji miktarıdır**. Dalga şiddeti aşağıdaki bağıntıyla tanımlanır:

$$I = \frac{E}{S \Delta t} = \frac{P}{S},$$

Burada P , dalga gücünü gösterir. Dalga şiddetinin SI birimi watt/metrekare (W/m^2)'dir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 4.

Bir dalga, homojen bir ortamda sabit bir hızla yayılır. Aşağıdaki durumlarda, bir periyot boyunca dalga tarafından taşınan enerjiye ne olur:

- a) Dalganın frekansı iki katına çıkar (genlik aynı kalır)?
 b) Dalganın genliğiyarıya indirilir (frekans aynı kalır)?

Çözüm:

Ortamın belirli bir bölümündeki mekanik dalganın enerjisi, genliğin karesi ve açısal frekansın karesiyle orantılıdır: $E \sim A^2 \omega^2$.

Bir periyot T süresince dalga, bir dalga boyu kadar ilerler; bu nedenle dalganın bu “parçasının” taşıdığı enerji her dik yüzeyden geçer. Dalganın hızı sabit olduğundan, bir periyotta taşınan enerjinin şu büyüklükle orantılı olduğu geçerlidir $E_T \sim A^2 \omega^2 T$

Ayrıca, $\omega = 2\pi f$ ve $T = \frac{1}{f}$ olduğundan, $E_T \sim A^2 f$ elde edilir.

a) Eğer $f' = 2f$, olur ve genlik aynı kalırsa, o zaman: $E_T' \sim A^2 2f = 2E_T$. Yani taşınan enerji iki katına çıkar.

b) Eğer $A' = \frac{A}{2}$, olur ve frekans aynı kalırsa, o zaman: $E_T' \sim (\frac{A}{2})^2 f = \frac{1}{4} E_T$ Yani taşınan enerji orijinal enerjinin dörtte birine düşer.



DAHA FAZLA ÖĞREN

Bir ip boyunca yayılan enine mekanik dalgayı ele alalım. Şekil 7'de, salınımın bir ip (veya başka bir elastik ortam) boyunca bir periyot T süresince (kaynağın bir tam salınım yaptığı zaman aralığında) nasıl iletildiği gösterilmektedir.

$t = 0$ anında ipin tüm tanecikleri denge konumundadır. Dalga kaynağını temsil eden ilk taneciğe yukarı yönde bir impuls uygulanır ve tanecik salınmaya başlar. Zamanla, ipteki elastik kuvvetlerin etkisiyle salınım bir tanecikten diğerine kademeli olarak aktarılır. Böylece her tanecik, kaynakla aynı şekilde ancak belirli bir zaman gecikmesiyle salınmaya başlar (Şekil 8).

$t = T$ süresi sonunda kaynak bir tam salınım yapmış olur ve salınım, ilk tanecikle aynı fazda salınan beşinci taneciğe ulaşır. Bu durum, dalga hareketinde salınımın ortam boyunca iletilmesini, taneciklerin ise yalnızca denge konumları etrafında salındığını gösterir.

Mekanik dalgalarda mekanik enerji, ortamın ΔV hacminde salınan tüm taneciklerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamına eşittir. Buna göre:

$$E = E_k + E_p$$

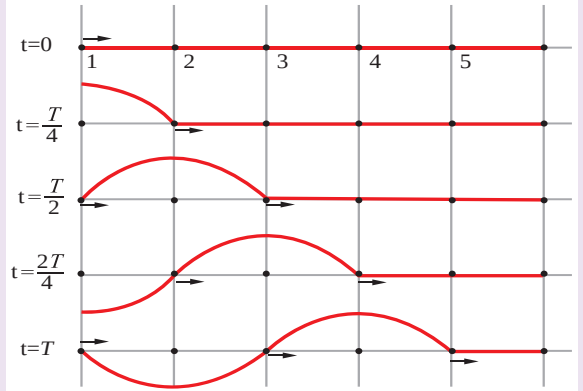
Kütlesi m_0 olan bir parçacığın mekanik enerjisi, harmonik salınımcının enerji denklemi ile veriliyorsa

$$E_1 = \frac{1}{2} m_0 \omega^2 A^2,$$

olduğunda ΔV hacmini kaplayan dalganın toplam mekanik enerjisi için şu sonucu elde ederiz:

$$E = NE_1 = N \frac{1}{2} m_0 \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2,$$

burada $m = Nm_0$ dir.



Şekil 8. Enine dalganın yayılması

$m = \rho \Delta V$ olduğundan, şu

$$E = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \Delta V.$$

sonucu elde ederiz:

Bir ortamdaki dalganın bir kısmının enerjisi, salınımın genliğinin karesiyle orantılıdır.



SORULAR VE ÖDEVLER

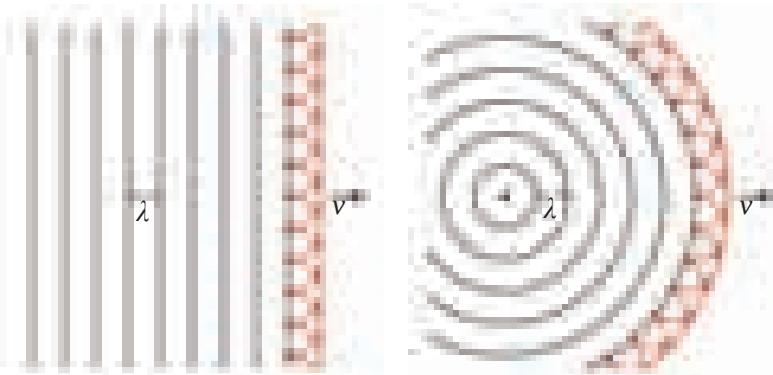
1. Enine dalgalar ile boyuna dalgalar arasındaki farkları belirtiniz.
2. Homojen bir ortamda yayılan bir dalganın hızı neye bağlıdır?
3. Genlik sabit kalırken kaynak frekansı arttığında, belirli bir ortamda yayılan bir dalganın şiddeti nasıl değişir?
4. Aynı anda aynı uzama y değerine sahip iki nokta, aynı fazda salınmak zorunda mıdır? Açıklayınız.
5. Dalga şu denklemle ifade edilir: $y = 0,05 \sin 2\pi(0,2t - 4x)$. Tüm büyüklükler temel birimlerle ifade edilmiştir. Dalganın genliğini, frekansını ve hızını belirleyin. (Çözüm: 0,05 m; 0,2 Hz; 0,05 m/s)
6. Farklı genlik ve frekanslara sahip iki enine dalga, aynı gerilmiş ip boyunca yayılır. Önce genliği 1 cm ve frekansı 12 Hz olan bir dalga ilerler, ardından genliği 2 cm ve frekansı 6 Hz olan bir dalga gelir. İki dalganın enerjilerinin oranını ve şiddetlerinin oranını bulun. (Çözüm: $E_1 / E_2 = 1, I_1 / I_2 = 1$)

2.5. Dalgaların Yansıması ve Kırılması

Huygens-Fresnel ilkesi

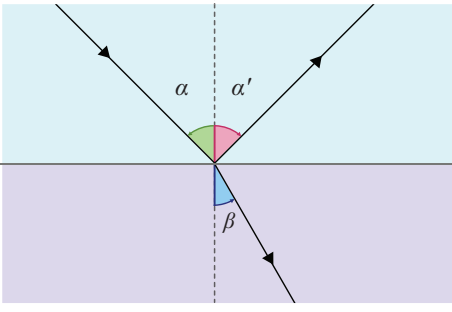
Bir dalganın oluşması ve yayılması için bir kaynak gerekir. Her dalganın bir dalga cephesi vardır. Dalga cephesi, salınmaya başlamış taneciklerle henüz salınmaya başlamamış tanecikleri ayıran yüzeydir. Dalga yayıldıkça dalga cephesi kaynaktan uzaklaşır ve ortamdaki giderek daha fazla tanecik titreşmeye başlar.

$t + \Delta t$ anındaki yeni dalga cephesi, t anındaki dalga cephesinin ilerlemesiyle oluşur ve aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:



Şekil 1. Düzlemsel (solda) ve küresel dalganın (sağda) oluşumu

1. Her dalga cephesi, üzerindeki her noktanın yeni bir dalga kaynağı gibi düşünülebileceği bir yüzeydir.
2. Dalga cephesi üzerindeki her nokta, **ikincil dalgalar** (küçük küresel dalgalar) oluşturan **ikincil bir kaynak gibi davranır**.
3. Belirli bir süre sonra, her ikincil kaynağın oluşturduğu **dalgaların kendi küçük dalga cepheleri oluşur**.
4. Yeni dalga cephesi, tüm ikincil dalga cephelerinin ortak zarfı olarak oluşur.



Şekil 2. Işınlarıyla gösterilen dalgaların yansıması ve kırılması

Ortam **izotropik** ise (tüm yönlerde aynı fiziksel özelliklere sahipse), dalga cephesi şeklini korur. Başka bir deyişle, düzlem dalga düzlem dalga, küresel dalga ise küresel dalga olarak yayılmaya devam eder (Şekil 1). Dalgaların yayılmasını açıklayan bu ilkeye Huygens–Fresnel ilkesi denir.

Bir dalga, farklı özelliklere sahip iki elastik ortamı ayıran sınıra ulaştığında, enerjisinin bir kısmı yansır, bir kısmı ise ikinci ortama geçerek kırılır. Bu nedenle dalganın yayılma doğrultusu değişir. Şekil 2'de gelen, yansıyan ve kırılan dalgaların ışınları gösterilmektedir. Şekildeki α , α' ve β açıları sırasıyla gelme açısı, yansıma açısı ve kırılma açısı olup sınır yüzeyine çizilen normale göre ölçülür.

Dalgaların yansıması

Yere dik olarak aşağı yönde bir lastik top atıldığında, top yüzeye çarptıktan sonra geldiği doğrultu boyunca geri döner. Top, yere normale göre belirli bir açıyla atıldığında ise yüzeye çarptıktan sonra yön değiştirerek sekmeye devam eder. Bu durumda topun yüzeye geliş açısı, sekme açısına eşittir. Dalgalar da benzer şekilde davranır. Düzlem bir dalga, iki ortam arasındaki sınıra ulaştığında yansır ve yansıyan dalga da düzlem dalga olarak yayılmaya devam eder. Dalgaların yansımasında, gelen dalga, normale çizilen doğru ve yansıyan dalga aynı düzlemde bulunur. Ayrıca yansıma açısı, gelme açısına eşittir. Buna göre:

$$\alpha = \alpha'$$



ETKİNLİK 1.

Su yüzeyinde dalgaların yansımasını inceleyin ve yansıma açısının geliş açısına eşit olduğunu belirleyin.

Gerekli malzemeler:

- Sığ su kabı
- Dalgaları oluşturmak için bir çıta veya cetvel
- Fayans, tahta çıta veya plastik bariyer

Yöntem

1. Sığ bir kaseyi suyla doldurun. Suyun derinliği 1 cm'den az olmalıdır.
2. Düz çıtayı veya cetveli suya daldırın ve cetveli düzgün bir şekilde salınmaya zorlayın. Bu, su içinde yayılan düzlemsel dalgalar oluşturacaktır.
3. Kabın içine, dalga yayılma yönüne göre 45° açıyla düz bir engel yerleştirin.
4. Dalgalar engelle karşılaştığında ne olduğunu gözlemleyin.
5. Fotoğraf veya video çekin ve geliş açısı ile yansıma açısını ölçün.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

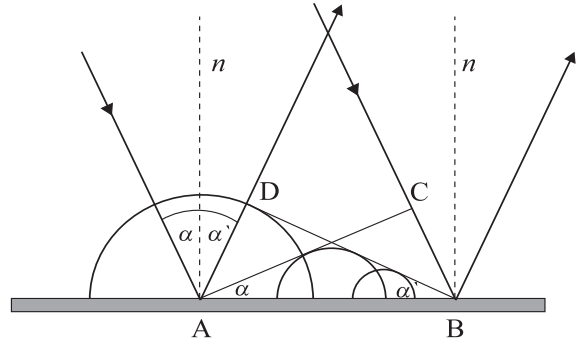
Huygens-Fresnel prensibini kullanarak dalgaların yansımasını açıklayın.

Çözüm: Şekil 3, dalga cephesi bir düz engele belirli bir açıyla çarpan bir düzlemsel dalgayı göstermektedir. Gelen dalganın dalga cephesi AC ile gösterilmiştir. Dalga cephesi engele belirli bir açıyla çarptığı için, dalga cephesinin farklı kısımları engele aynı anda ulaşmaz. A noktası engele ilk önce temas ederken, B noktası bir gecikmeyle temas eder.

Huygens-Fresnel ilkesine göre, engele temas eden dalga cephesinin her noktası ikincil bir dalganın kaynağı haline gelir. Dolayısıyla, dalga A noktasında engele temas ettiği anda, o noktadan itibaren ikincil bir dalga yayılmaya başlar. Dalga B noktasına ulaştığında, A noktasından gelen ikincil dalga çoktan yayılmış olur. Dalga cephesinin yeni konumu, ikincil dalgalara aynı anda dokunan çizgi olarak elde edilir. Bu çizgi, yansıyan DB dalgasının dalga cephesini temsil eder.

Şeklin geometrisinden, dalganın engele gelme açısının yansıma açısına eşit olduğu görülür. Başka bir ifadeyle, dalgaların yansımasında yansıma yasası geçerlidir:

$$\alpha = \alpha'.$$



Şekil 3. Huygens-Fresnel prensibi kullanılarak dalga yansıması olgusunun açıklanması

Farklı ortamlarda dalganın hızı

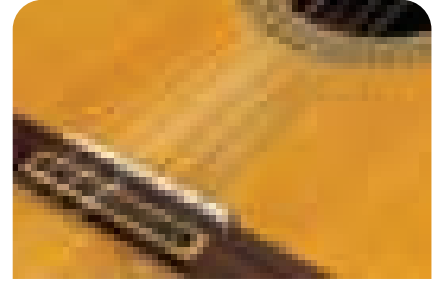
Gerilmiş bir tel boyunca dalganın yayılma hızı

Gitar telleri aynı uzunlukta olmalarına ve benzer şekilde titreştirilmelerine rağmen aynı sesi çıkarmazlar (Şekil 4). Bunun nedeni, tellerin fiziksel özelliklerinin farklı olmasıdır. Bazı teller daha ince, bazıları ise daha kalındır. Ayrıca tellerin gerilme kuvvetleri de farklı olabilir. Daha ince veya daha gergin bir telde dalga daha hızlı yayılır. Buna karşılık, daha kalın veya daha gevşek bir telde dalga daha yavaş yayılır. Bu nedenle, tellerin uzunlukları aynı olsa bile dalga hızı farklı olduğundan titreşim frekansları ve dolayısıyla çıkardıkları sesin perdesi de farklı olur.

Gergin bir tel veya ip üzerinden yayılan enine dalganın hızı şöyledir:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}},$$

Burada F , tel veya ipin gerilme kuvvetini; μ ise telin veya ipin doğrusal kütle yoğunluğunu gösterir. Doğrusal kütle yoğunluğu, telin veya ipin birim uzunluğunun kütlesidir ve $\mu = \frac{m}{l}$) bağıntısı ile ifade edilir.



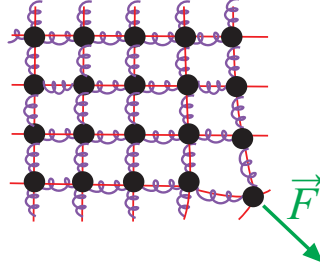
Şekil 4. Farklı kesit alanlarına ve gerilmelere sahip tellerde dalga yayılması: Aynı uyarma, farklı dalga hızı

Katı maddelerde boyuna dalgaların hızı

Katı maddeler, birbirine elastik bağlarla bağlı taneciklerden oluşmuş bir yapı olarak düşünülebilir. Bu elastik bağlar, küçük yaylar gibi davranır (Şekil 5). Bir tanecik denge konumundan uzaklaştırıldığında, komşu taneciklerle arasındaki elastik bağlar şekil değiştirir ve oluşan titreşim ortam boyunca yayılır. Dalganın yayılma hızı, ortamın elastik özelliklerine ve yoğunluğuna bağlıdır. Katı bir ortamdaki dalga hızı aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilir::

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

Burada E malzemenin elastik deformasyona karşı gösterdiği direnci ifade eden Young esneklik modülünü; ρ ise maddenin yoğunluğunu gösterir.



Şekil 5. Bir tanecik F kuvveti ile uyarıldığında, oluşan titreşim tanecikler arasındaki elastik kuvvetler sayesinde ortam boyunca yayılır.

Akışkanlar içindeki boyuna dalganın hızı

Sıvılarda, boyuna dalgalar ortamdaki parçacıkların periyodik sıkışması ve genişmesi şeklinde yayılır. Bir sıvıdaki boyuna dalgaların yayılma hızı v , aşağıdaki formülle ifade edilir: Bir akışkan içindeki boyuna dalgaların yayılma hızı v , aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}},$$

Burada B , akışkanın hacimsel elastiklik modülünü (hacim modülünü) gösterir ve akışkanın sıkışmaya karşı gösterdiği direnci ifade eder. ρ ise akışkanın yoğunluğudur.

Gazlarda boyuna dalganın hızı

Gazlarda tanecikler arasında kalıcı elastik bağlar bulunmamasına rağmen, boyuna dalgalar ortamda oluşan sıkışma ve seyrekleşme bölgeleri sayesinde yayılır. Gazlarda boyuna dalganın yayılma hızı, gazın basıncına (p) ve yoğunluğuna (ρ) bağlıdır. İdeal bir gazdaki boyuna dalganın hızı aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}},$$

Burada γ , adyabatik indis (Poisson sabiti) olup değeri gazın molekül yapısına bağlıdır. Tek atomlu gazlar için $\gamma = 1,67$, iki atomlu gazlar için $\gamma = 1,40$, üç atomlu ve çok atomlu gazlar için ise $\gamma \approx 1,33$ 'tür. İdeal gaz denklemi kullanılarak dalga hızı aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}},$$

Burada R , evrensel gaz sabitini; T , gazın mutlak sıcaklığını ve M , gazın mol kütlelerini gösterir. Evrensel gaz sabitinin değeri $R = 8,31 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ 'dir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

30 N'luk bir kuvvetle gerilmiş bir tel boyunca bir enine dalga yayılmaktadır. Telin bir metresinin kütlesi 5 g'dır. Aynı anda denge durumunda olan iki komşu parçacık arasındaki mesafe 0,5 m'dir. Dalganın hızını ve dalga boyunu belirtiniz.

Verilenler: $F = 30 \text{ N}$, $\mu = 5 \text{ g/m} = 0,005 \text{ kg/m}$, $d = 0,5 \text{ m}$

İstenen: v ?, λ ?

Çözüm:

Gerilmiş bir tel üzerindeki enine dalganın hızı şöyledir: $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = 77,46 \text{ m/s}$.

Sinüzoidal bir dalgada, parçacıklar $y = 0$, olduğunda denge konumundadır ve bu durum tel boyunca her $\lambda / 2$ mesafede gerçekleşir. Bu nedenle: $d = \frac{\lambda}{2}$. Buradan $\lambda = 2d = 2 \cdot 0,5 = 1,0 \text{ m}$ elde edilir.

Kısaca: Sinüs dalgasında ardışık iki denge noktası arasındaki uzaklık yarım dalga boyuna eşittir. Verilen $d = 0,5 \text{ m}$ olduğundan dalga boyu $\lambda = 1.0 \text{ m}$ olarak bulunur.

Dalga Kırılması

Bir araba asfalt yolda ilerlerken ön tekerleklerinden biri kumlu bir alana girdiğinde, o tekerlek daha düşük bir hızda hareket etmeye başlarken, diğeri asfalt üzerinde daha yüksek bir hızda hareket etmeye devam eder. İki tekerlek arasındaki hız farkı nedeniyle, araba hareket yönünü değiştirir ve hareketin daha yavaş olduğu tarafa doğru döner.

Dalgalar da benzer şekilde davranır. Bir dalga cephesi, iki ortam arasındaki arayüze bir açıyla çarptığında, dalga cephesi bu iki ortamda farklı hızlarda yayılır. Sonuç olarak, dalga cephesinin farklı kısımları farklı hızlarda hareket etmeye başlar. Sonuç olarak, dalga yayılma yönünü değiştirir. Bir dalganın bir ortamdan diğerine geçerken yayılma yönünü değiştirmesi olgusuna dalgaların kırılması denir (Şekil 2 bakınız).



ETKİNLİK 2.

Su yüzeyinde dalgaların kırılmasını araştırmak ve dalganın hızı ile dalga boyunun, derin sudan sığ suya geçişine bağlılığını belirlemek.

Gerekli malzemeler:

- Sığ su kabı
- Dalgaları uyarmak için bir çıta veya cetvel
- Alçak bir cam karo (kabın sığ bir bölümünü oluşturmak için)

Yöntem

1. Bir kabı suyla doldurun. Suyun yüzeyi sakın olmalıdır.
2. Küçük cam karoyu kabın bir kısmına yerleştirin, böylece o bölümde su daha sığ olurken diğer kısım daha derin kalır.
3. Suda salınan bir çubuk veya cetvel kullanarak düz dalgalar oluşturun. Dalgalar aynı frekansta uyarılmalıdır.
4. Dalgalar, suyun derin ve sığ kısımları arasındaki sınırla karşılaştığında ne olduğunu gözlemleyin.
5. Dalga yayılma yönündeki değişikliği not edin ve kabın derin ve sığ kısımlarındaki dalga boylarını karşılaştırın.

Aşağıdaki soruları yanıtlayın:

1. Dalgalar derin sudan sığ suya geçerken yayılma yönü ne olur?
2. Sığ suda dalganın dalga boyu, derin suya kıyasla nasıl değişir?
3. Dalganın frekansı dalga kaynağı tarafından belirleniyorsa ve aynı kalıyorsa, dalga boyu azalıyorsa, sığ sudaki dalganın hızı hakkında ne sonuç çıkarılabilir?

Gözlemler, bir dalganın derin sudan sığ suya geçerken yayılma doğrultusunun ve dalga boyunun değiştiğini göstermektedir. Dalganın frekansı, dalga kaynağı tarafından belirlendiği için bir ortamdan diğerine geçerken değişmez. Dalga hızı v , frekans f ve dalga boyu λ arasında $v = \lambda f$, bağıntısı geçerlidir. Buna göre, frekans sabit kaldığından dalga boyundaki değişim, dalga hızının da değiştiğini gösterir. Dalga ikinci ortama geçtiğinde, dalga cephesinin farklı noktaları bu ortama aynı anda ulaşmaz. Bu nedenle dalga cephesinin farklı kısımları farklı hızlarla yayılır. Hızların farklı olması, dalganın yayılma doğrultusunun değişmesine neden olur. Bu olaya dalgaların kırılması denir. Dalga kırılması için aşağıdaki kurallar geçerlidir:

- Gelen dalga, sınıra çizilen normal ve kırılan dalga aynı düzlemde bulunur.

Geliş açısının sinüsünün kırılma açısına oranı, iki ortam arasındaki barajdaki boşluğun oranına eşittir:

iki ortamdaki dalganın kırılma derecesi arasındaki orana eşittir

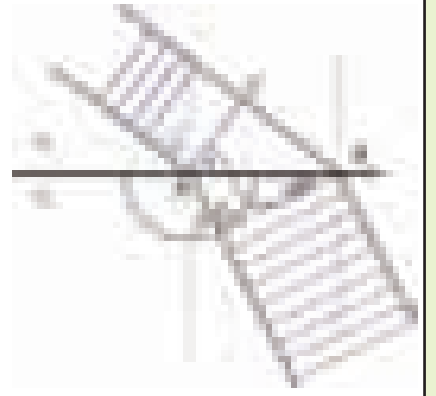
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}.$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Huygens–Fresnel ilkesinden yola çıkarak kırılma yasasını türetin.

Çözüm: Şekil 6'da, düzlem bir dalganın bir ortamdan başka bir ortama geçerken kırılması gösterilmektedir. Dalga, birinci ve ikinci ortamda sırasıyla v_1 ve v_2 hızlarıyla yayılır. Gelen dalganın dalga phesi, gelen ışına dik olan **AC** doğrusu ile gösterilmiştir. Dalga, sınır yüzeyine belirli bir açıyla ulaştığından, dalga cephesinin farklı noktaları sınıra aynı anda ulaşmaz. Dalga cephesinin **A** noktası sınıra ilk ulaşırken, aynı anda **C** noktası hâlâ birinci ortamda bulunur ve **B** noktasına doğru hareket eder. t süresi sonunda, **C** noktası birinci ortamda v_1 hızıyla **CB** kadar yol alırken, **A** noktası ikinci ortamda ikincil bir dalga kaynağı hâline gelir ve bu dalga v_2 hızıyla yayılarak **AD** kadar yol alır. İki ortamdaki dalga hızları farklı olduğundan genel olarak **CB** $\neq$ **AD** olur. Yeni dalga cephesi, ikincil dalga cephelerine teğet olan **BD** doğrusu ile gösterilir. **BD**, kırılan dalganın dalga cephesini temsil eder.



Şekil 6. Huygens–Fresnel ilkesine göre dalgaların kırılmasının açıklanması

Şeklin geometrisinden, ortak bir hipotenüs AB'ye sahip iki dik üçgen, ABC ve BAD, gözlemlenir. Bunlar için şu ilişki geçerlidir:

$$\sin \alpha = \frac{\overline{BC}}{\overline{AB}}, \quad \sin \beta = \frac{\overline{AD}}{\overline{AB}}.$$

$\overline{BC} = v_1 t$ ve $\overline{AD} = v_2 t$, olduğundan, bu iki ifadenin oranı alınır: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$, bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı, dalgaların kırılma yasasının matematiksel ifadesidir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 4.

Daha derin sulara su dalgasının dalga boyu 2,4 m ve hızı 1,2 m/s'dir. Dalga, hızın 0,75 m/s olduğu sığ sulara girer. Giriş açısı 30° 'dir.

a) Dalganın frekansını bulun. b) Sığ sudaki dalgaların dalga boyunu bulun. c) Kırılma açısını bulun.

Verilenler: $\lambda = 2,4 \text{ m}$, $v_1 = 1,2 \text{ m/s}$ (derin su), $v_2 = 0,75 \text{ m/s}$ (sığ su), $\alpha = 30^\circ$

İstenen: a) f - ? b) λ_2 - ? c) β - ?

Çözüm:

a) Dalganın frekansı $v = f \lambda \Rightarrow f = \frac{v_1}{\lambda_1} = 0,5 \text{ Hz}$.

b) Yansıma frekans değişmez, dolayısıyla sığ sudaki dalga boyu şöyledir:

$$\lambda_2 = \frac{v_2}{f} = 1,5 \text{ m}.$$

c) Dalga kırılması için aşağıdakiler geçerlidir:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \sin \beta = \sin \alpha \cdot \frac{v_2}{v_1} \Rightarrow \beta = \arcsin(0,3125) \approx 18,2^\circ.$$

Mutlak ve bağıl kırılma indisi

Dalga kırılması olgusu açısından, farklı ortamlardaki bir dalganın hızının karşılaştırılmasını sağlayan mutlak kırılma indisi ve göreceli kırılma indisi kavramlarını tanıtmak yararlıdır.

Bir ortamın **mutlak kırılma indisi**, referans ortamdaki dalga hızının, söz konusu ortamdaki dalga hızına oranı olarak tanımlanır. Su dalgaları veya ses dalgaları gibi mekanik dalgalar için referans ortam, genellikle dalganın en yüksek hızda yayıldığı ortamdır. Mutlak kırılma indisi aşağıdaki ifadeyle verilir:

$$n = \frac{v}{v_0},$$

Burada v_0 , e referans ortamdaki dalga hızını; v ise incelenen ortamdaki dalga hızını gösterir.

Mekanik dalgalarda uygulamada, iki farklı ortamdaki dalga yayılımını karşılaştırmak için daha çok bağıl kırılma indisi kullanılır. Ortam 2'nin, ortam 1'e göre bağıl kırılma indisi, bu ortamlardaki dalga hızlarının oranı olarak tanımlanır:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Bir dalga, yayılma hızının daha büyük olduğu bir ortamdan yayılma hızının daha küçük olduğu bir ortama ($v_2 < v_1$) geçtiğinde, bağıl kırılma indisi 1'den büyük olur ve dalga normale yaklaşacak şekilde kırılır. Buna karşılık, dalga yayılma hızının daha küçük olduğu bir ortamdan yayılma hızının daha büyük olduğu bir ortama geçtiğinde, normalden uzaklaşacak şekilde kırılır. Bağıl kırılma indisi kullanılarak dalgaların kırılma yasası aşağıdaki bağıntıyla da ifade edilebilir:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21},$$

Bu durum, dalgaların kırılmasının farklı ortamlardaki yayılma hızlarının farklı olmasının bir sonucu olduğunu açıkça göstermektedir.

DAHA FAZLA ÖĞREN



Tsunami dalgaları, çoğunlukla deniz tabanında meydana gelen depremler, volkanik patlamalar veya deniz altı heyelanları sonucunda büyük su kütlelerinin ani dikey yer değiştirmesiyle oluşan uzun dalga boylu su dalgalarıdır. Rüzgârın etkisiyle oluşan ve yalnızca suyun yüzey tabakasını etkileyen deniz dalgalarından farklı olarak, tsunami dalgaları deniz tabanından su yüzeyine kadar tüm su külesini etkiler.

Derin sularda tsunami dalgalarının dalga boyu çok büyük, genliği ise oldukça küçüktür. Bu nedenle açık denizde genellikle fark edilmezler. Tsunami dalgalarının yayılma hızı su derinliğine bağlıdır ve derin sularda saatte yüzlerce kilometreye ulaşabilir. Dalga boylarının çok uzun olması nedeniyle, yayılırken çok az enerji kaybeder ve okyanuslar boyunca çok uzak mesafelere ulaşabilirler.

Kıyıya yaklaşır sığ sulara ulaştığında, tsunami dalgasının hızı önemli ölçüde azalır. Dalganın frekansı kaynak tarafından belirlendiği için bir ortamdan diğerine geçerken değişmez. Bu nedenle hızın azalması, dalga boyunun da azalmasına neden olur. Aynı zamanda, dalganın taşıdığı toplam enerji yaklaşık olarak

korunduğundan, enerji daha dar bir bölgede yoğunlaşır ve bunun sonucunda dalga genliği hızla artar (Şekil 7).

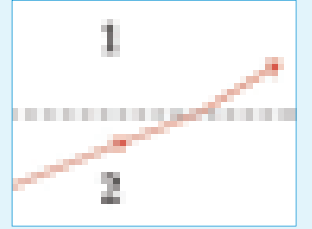
Bu nedenle tsunami dalgaları, kıyı bölgeleri için en yıkıcı doğal olaylardan biridir. Buna karşılık, derin sularda genliklerinin küçük olması nedeniyle çoğu zaman fark edilmezler.

Şekil 7. Tsunami dalgalarının dalga boyu ve genliğindeki değişim



SORULAR VE ÖDEVLER

1. İkinci ortamdaki dalganın yayılma hızı, birinci ortamdaki yayılma hızıyla aynı olsaydı dalganın yayılma yönü nasıl değişirdi? Bu durumda kırılma olayı gerçekleşir miydi?
2. Dalga bir ortamdan diğerine geçerken dalga boyu ve hızı değişirken frekansı neden değişmez?
3. Mekanik dalgaların yayılma hızı hangi faktörlere bağlıdır? Açıklayınız.
4. Sağdaki resim bir dalganın hareketini göstermektedir. Dalga hangi ortamda daha yüksek bir hızda ilerler? Açıklayınız.
5. 400 m uzunluğundaki bir çelik çubuğun bir ucuna çekiç darbesi ile bir ses dalgası oluşturulur. Çeliğin Young modülü $2,0 \cdot 10^{11}$ Pa ve yoğunluğu 7800 kg/m^3 'tür. Havadaki ses hızı 340 m/s 'dir. Çelik çubuk içindeki ses hızını bulun. Ses, hangi ortama daha hızlı ulaşır ve bu ne kadar sürede gerçekleşir? (Çözüm: çelik; $1,1 \text{ s}$)
6. Dalga boyu 85 cm olan bir ses dalgası havada ilerlerken deniz suyuna girer: a) Suyun içindeki ses dalgasının dalga boyunu bulun. b) Dalga, su yüzeyine 3° 'lik bir açıyla çarparsa, kırılma açısı ne kadardır? Ses hızlarını şu şekilde alın: havada: 340 m/s , suda: 1480 m/s . (Çözüm: $3,7 \text{ m}$; $13,2^\circ$)



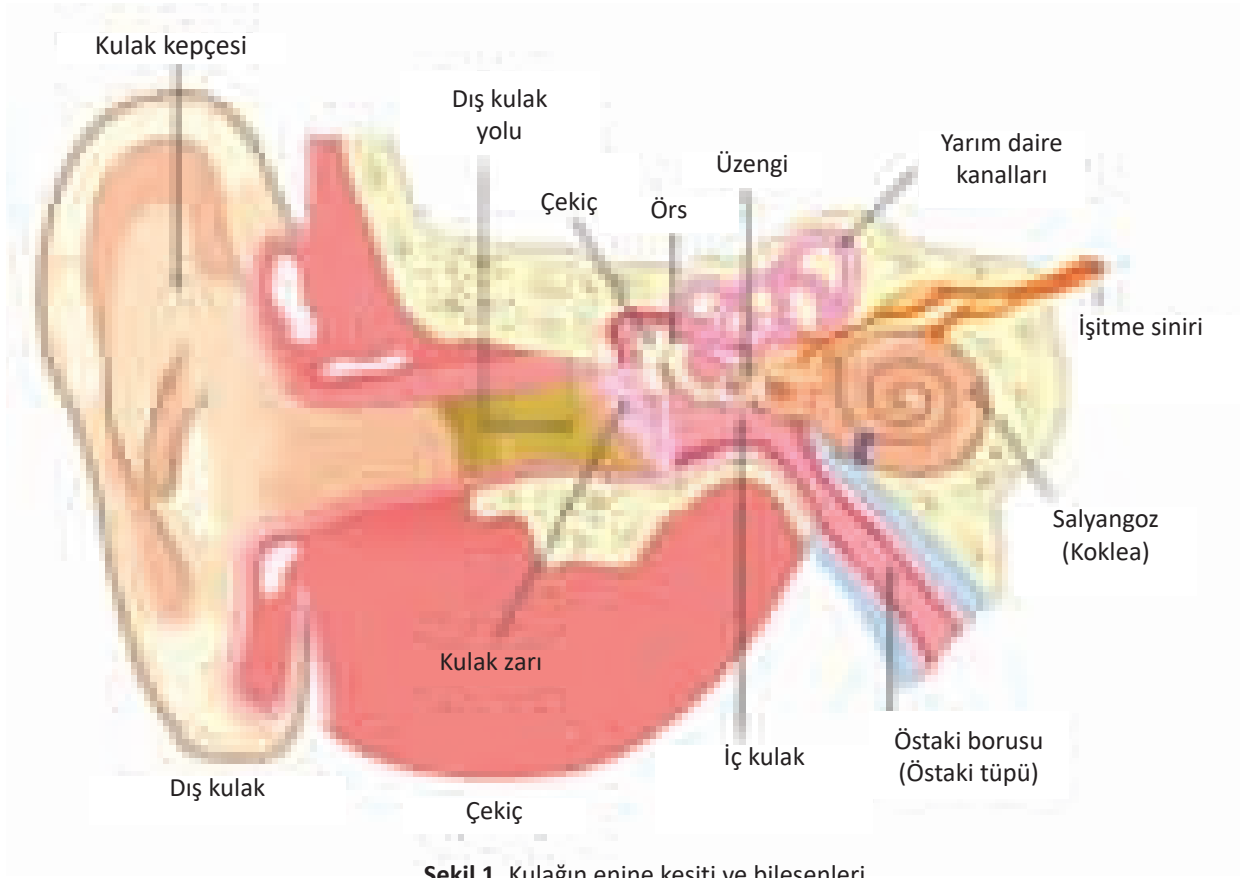
2.6. Ses ve sesin özellikleri

Günlük yaşamda sürekli olarak farklı seslere maruz kalırız. Arkadaşlarla yapılan sohbetler, dinlenen müzik, trafik gürültüsü ve ani yüksek sesli patlamalar buna örnek olarak verilebilir. İnsan sesi, ses tellerinin titreşmesi sonucu oluşur ve birkaç on hertz ile birkaç bin hertz arasındaki frekanslarda üretilebilir. Hoparlörler ise diyaframlarının titreşmesiyle çevresindeki hava taneciklerini titreştirerek ses oluşturur. Trafik gürültüsü, araçların çeşitli parçalarının titreşimlerinden kaynaklanır ve birçok farklı frekansı içerir.

Her ses, ses kaynağı olarak adlandırılan bir cismin titreşimleri sonucu oluşur. Kaynağın titreşimleri, içinde bulunduğu elastik ortamdaki taneciklere aktarılır ve mekanik dalga hâlinde yayılır. Bir mekanik dalganın insan kulağı tarafından ses olarak algılanabilmesi için frekansının 20 Hz ile 20 kHz arasında olması gerekir. 20 Hz 'in altındaki frekanslara infrases, 20 kHz 'in üzerindeki frekanslara ise ultrases denir. Bu frekans aralıklarındaki sesler insan kulağı tarafından işitilemez.

Ses, maddi bir ortamda (gaz, sıvı veya katı) yayılan ve insan kulağı tarafından algılanabilen boyuna bir mekanik dalgadır. Ses, mekanik bir dalga olduğu için vakumda yayılmaz. Ses dalgası yayılırken, ortamdaki parçacıklar denge konumları etrafında salınır ve böylece enerji aktarır; ancak dalga tarafından herhangi bir madde taşınmaz.

Nasıl duyarız?



Şekil 1. Kulağın enine kesiti ve bileşenleri

Şekil 1'de kulağın bir kesiti gösterilmiştir.

Bir ses kaynağı ses ürettiğinde, oluşan ses dalgaları ortamda yayılır. Ses dalgaları, ortamdaki taneciklerin ardışık sıkışma ve seyrekleşmeleri şeklinde ilerler. Dalgalar önce dış kulağa ulaşır. Dış kulağın görevi ses dalgalarını toplamak ve kulak kanalına yönlendirmektir. Ses dalgaları daha sonra kulak zarına ulaşır ve kulak zarı ses dalgasının frekansı ile titreşmeye başlar. Kulak zarının titreşimleri, orta kulakta bulunan **çekiç, örs ve üzengi** kemikleri aracılığıyla iletilir. Bu kemikler kaldıraç gibi çalışarak titreşimleri güçlendirir ve iç kulağa iletir.

Güçlendirilmiş titreşimler, iç kulakta bulunan ve sıvıyla dolu salyangoz (koklea) içine ulaşır. Koklea içinde, girişinde yaklaşık 0,04 mm'den ucunda yaklaşık 0,5 mm'ye kadar değişen uzunluklarda çok sayıda elastik lif içeren baziller membran bulunur. Farklı uzunlukları ve sertlikleri nedeniyle her bir kılıcın kendine özgü bir rezonans frekansı vardır. Bir ses dalgası kokleadaki sıvıyı salınmaya zorladığında, yalnızca doğal frekansı sesin frekansı ile eşleşen kılıklar titreşime geçer. Bu şekilde, baziller membran boyunca farklı yerlerde farklı frekanslar algılanır.

İşitme sinirinin uçları bu liflerin her birine temas eder. Saç hücreleri titreştiğinde sinir uçlarını uyarır ve elektriksel uyarılar oluşur. Bu uyarılar işitme siniri yoluyla serebral korteksteki işitme merkezine iletilir; burada işlenir ve ses algısı oluşur.

Tonlar

Sesler, saf ton veya karmaşık ton olabilir. Saf ton, akort çatalı gibi harmonik titreşim yapan bir kaynak tarafından üretilen sestir. Saf tonların temel özelliği, yalnızca tek bir frekansa sahip olmalarıdır.

Saf bir ses, sinüs (veya kosinüs) fonksiyonu ile ifade edilir:

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

Şekil 3a'da saf bir tona ait dalga grafiği gösterilmektedir. Müzik aletlerinin ürettiği sesler ise **karmaşık tondur**. Karmaşık ton, farklı frekanslara sahip birden fazla saf tonun üst üste binmesiyle oluşur. Başka bir ifadeyle, birden fazla sinüs fonksiyonunun toplamı şeklinde ifade edilir.

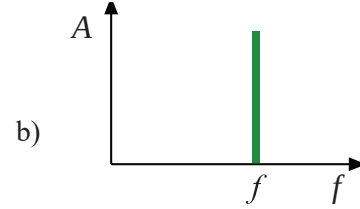
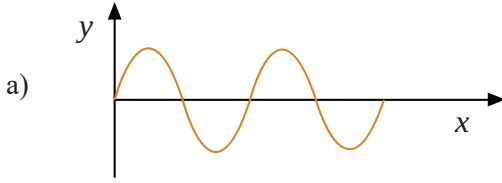
$$y = \sum_{n=1}^N A_n \sin(\omega_n t + k_n x),$$

burada A_n n'inci saf tonun genliğini; ω_n n'inci saf tonun açısal frekansını; k_n e ise n'inci saf tonun dalga sayısını ifade eder.

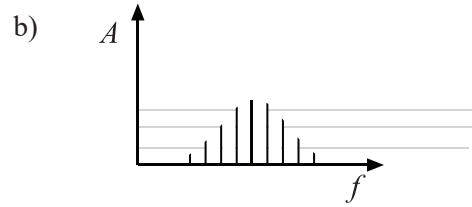
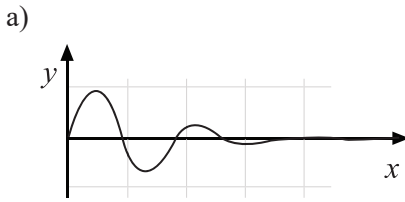
Karmaşık bir ses (Şekil 4a), saf tonlara ayrıştırılabilir. Bu ayrıştırmada en düşük frekanslı bileşen temel ton olarak adlandırılır. Diğer bileşenler ise üst harmonikler (üst tonlar) olarak adlandırılır. Üst harmoniklerin frekansları, temel frekansın tam sayı katlarıdır:

$$f_n = n f_1 \quad (n = 2, 3, 4, \dots).$$

Bir sesi oluşturan frekansların, karşılık gelen genlikleriyle birlikte oluşturdukları düzene sesin spektrumu denir. Şekil 3b ve 4b, saf ve karmaşık bir sesin spektrumlarını göstermektedir.



Şekil 3. a) Saf sesin grafiksel gösterimi b) Saf sesin spektrumu



Şekil 4. a) Karmaşık bir sesin grafiksel gösterimi b) Karmaşık bir sesin spektrumu



ETKİNLİK 1.

Saf ve karmaşık ses – harmoniklerin üst üste toplanması

Gerekli malzemeler:

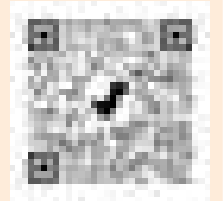
- Bilgisayar, tablet veya akıllı telefon

PhET simülasyonu Fourier Analizi: Dalga Oluşturma, aşağıdaki web sitesinde bulunabilir:

<https://phet.colorado.edu/mk/simulation/fourier-making-waves>

Bölüm 1: Saf Ton

1. Simülasyonu açın ve Ayrık (Discrete) modunu seçin.
2. Yalnızca bir harmonik (temel ton) etkinleştirin, böylece yalnızca ilk genlik değeri $A_1 = 1$, diğerlerinin hepsi sıfır olsun.



3. Sinyalin dalga formunu inceleyin. "Harmonikler" (Harmonics) ve "Toplam" (Sum) olarak etiketlenmiş iki grafiğin aynı olduğuna dikkat edin.

Bölüm 2: Karmaşık Ton

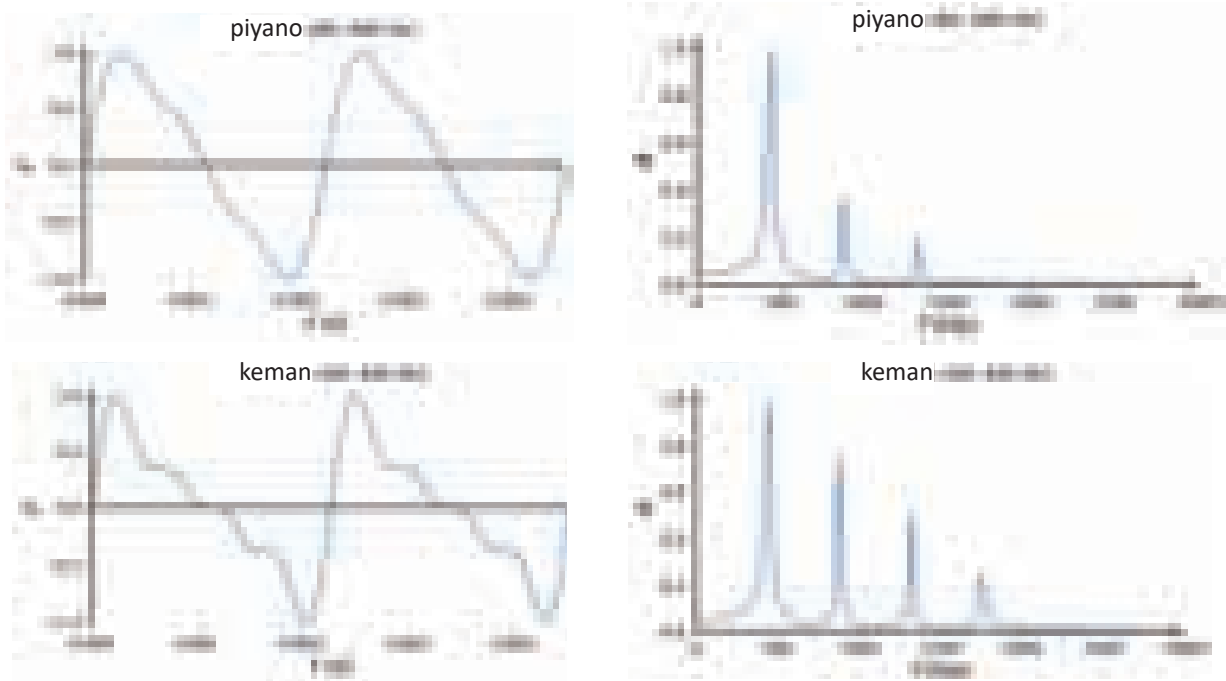
4. İkinci, üçüncü ve dördüncü harmonikleri kademeli olarak ekleyin ve genliklerin $A_2, A_3, A_4, \dots$
5. Sinyaldeki ve seste meydana gelen değişikliği gözlemleyin.
6. Sinyalin şekli değişse de periyodun aynı kaldığına dikkat edin.

Sorular:

- Karmaşık tonun periyodu, saf tonunkiyle aynı mıdır? Nedenini açıklayın.
- Sesin perdesini hangi frekans belirler? Açıklayınız
- Karmaşık ses dalgası neden sinüs dalgası değildir?
- Yüksek harmonikler eklendiğinde seste ne değişir, ne aynı kalır?
- Farklı enstrümanların farklı sesler çıkarmasının nedeni sizce nedir?

Bir sesin **perdesi** ve **tınısı** vardır. **Sesin perdesi**, temel frekans f_1 tarafından belirlenir. **Sesin tınısı** ise üst harmonikler ve bunların genlikleri tarafından belirlenir.

Tını sayesinde farklı müzik aletleri ve farklı kişilerin sesleri birbirinden ayırt edilebilir. Örneğin, keman ve piyano tarafından üretilen 440 Hz temel frekanslı (La notası) sesler aynı perdeye sahip olmalarına rağmen farklı tınıya sahiptir. Bunun nedeni, harmonik spektrumlarının farklı olmasıdır (Şekil 5).



Şekil 5. Bir piyano (sol üst) ve bir keman (sol alt) tarafından çalınan A4 notası (440 Hz) ve bunlara karşılık gelen spektrumlar (sağ üst ve sağ alt)

Gürültü, Patlama ve Ses kirliliği

Tonlar genel olarak dinlemesi hoş seslerdir; ancak hoş ya da rahatsız edici olabilen başka ses türleri de vardır. **Gürültü**, farklı genlik ve frekanslara sahip çok karmaşık ve periyodik olmayan titreşimlerin sonucudur. Belirli frekanslara sahip basit harmonik titreşimlere ayrıştırılamaz.

Patlama sesi, güçlü, kısa süreli ve ani bir gürültüdür. Çevresel gürültü (ses kirliliği) ise çoğunlukla yüksek şiddetli, insan için rahatsız edici veya zararlı birçok farklı gürültünün birleşiminden oluşur.

Ses şiddeti

Ses dalgaları enerji taşır. **Ses şiddeti**, ses dalgasının yayılma yönüne dik doğrultuda bulunan birim yüzeyden birim zamanda geçen enerji miktarıdır. Güç, birim zamanda aktarılan enerji olarak tanımlandığından, ses şiddeti aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$I = \frac{P}{S}$$

Burada P ses kaynağının gücünü; S ise enerjinin aktarıldığı yüzey alanını ifade eder. Ses şiddetinin birimi ise aşağıdaki gibidir:

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

Farklı ses kaynakları farklı şiddetlerde ses üretir. Örneğin, fısıltı düşük şiddetli, trafik orta şiddetli, kalkış yapan bir jet uçağı ise kulakta ağrıya neden olabilecek kadar yüksek şiddetli ses üretir.

Normal bir insan kulağının algılayabileceği en düşük ses şiddeti $I_{\min} = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$ olup buna **işitilebilirlik eşiği** denir. $I_{\max} = 1 \frac{W}{m^2}$ insan kulağının algılayabileceği en yüksek ses şiddetidir ve **ağrı eşiği olarak** adlandırılır.

Ses yüksekliği (gürlük)

Ses yoğunluğu fiziksel bir büyüklük olmasına karşın, ses düzeyi insan kulağının sesi algılamasına bağlı olduğundan öznel bir büyüklüktür. Ses düzeyi yalnızca ses yoğunluğuna değil, aynı zamanda sesin frekansına ve işitme duyusunun duyarlılığına da bağlıdır. İnsan kulağı sesleri doğrusal değil, logaritmik olarak algılar. Bu nedenle, ses yoğunluğu belirli bir oranda artırıldığında algılanan ses düzeyi aynı oranda artmaz. Bir sesin yaklaşık iki kat daha yüksek algılanabilmesi için ses yoğunluğunun yaklaşık on kat artırılması gerekir.

İşitme sisteminin bu özelliği nedeniyle akustikte, ile gösterilen ses düzeyi tanımlanmıştır. Ses düzeyi, işitme eşiği esas alınarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır: L ile gösterilen ses düzeyi tanımlanmıştır. Ses düzeyi, işitme eşiği esas alınarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$L = \log_{10} \frac{I}{I_{\min}}$$

Ses düzeyi bel (B) birimiyle ifade edilir. Uygulamada ise daha çok desibel (dB) birimi kullanılır. 1 B = 10 dB olduğundan, ses düzeyi desibel cinsinden aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$L = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_{\min}}$$

Bazı ses düzeyi değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Ses / ortam	Ses yüksekliği L (dB)	Yoğunluk I (W/m^2)
Duyulabilirlik eşiği	0	10^{-12}
Sessiz oda	≈ 30	10^{-9}
Normal konuşma	≈ 60	10^{-6}
Rock konseri	≈ 110	10^{-1}
Kulak ağrısı	≥ 120	≥ 1



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

İşitme eşiği 0 dB, ağrı eşiği ise 120 dB'dir.

Ağrı eşiğindeki ses şiddeti, işitme eşiğindeki ses şiddetinden kaç kat daha fazladır?

Verilen: $L_{\min} = 0 \text{ dB}$, $L_{\max} = 120 \text{ dB}$

İstenen: $\frac{I_{\max}}{I_{\min}} - ?$

Çözüm:

İki ses için gürlük (ses seviyesi) farkı şu şekilde verilir: $L_2 - L_1 = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$, Bizim durumumuzda $120 = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \right)$. Yoğunlukların oranını ifade edersek: $\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = 10^{12}$.

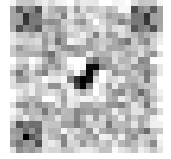
Ağrı eşiğindeki sesin yoğunluğu, işitme eşiğindeki sesin yoğunluğundan 10^{12} (bir trilyon) kat daha büyüktür. Bu sonuç, insan işitmesinin dinamik aralığının ne kadar geniş olduğunu ve ses şiddetinin (gürlüğü) neden logaritmik bir ölçekle ölçüldüğünü göstermektedir.



ETKİNLİK 2.

Aşağıdaki web sitesinde bulunan PhET Ses Dalgaları simülasyonunu kullanarak:

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/sound-waves/about>, adresinde bulunan PhET Ses Dalgaları simülasyonunu kullanarak ses dalgalarının özelliklerini inceleyin. Elde ettiğiniz sonuçları, daha önce çalıştığınız dalgaların genel özellikleriyle (dalga boyu, frekans, yayılma hızı, genlik) karşılaştırın.



Yankı

Diğer mekanik dalgalar gibi ses de yüzeylerden yansır. Ses dalgası, kaya, duvar veya bina gibi bir engelle çarptığında yansır ve tekrar dinleyiciye ulaşabilir. Yankı, yansıyan ses dalgasının belirli bir süre sonra dinleyiciye ulaşarak ilk sesin tekrarı olarak algılanmasıdır. Sesin yayılma hızı bilindiğinde, ses ile yankı arasındaki süre kullanılarak yansıtıcı engelle olan uzaklık belirlenebilir. Yankının ayrı bir ses olarak algılanabilmesi için, yansıyan sesin en az yaklaşık 0,10 s sonra dinleyiciye ulaşması gerekir. Bu süre daha kısa olduğunda, yansıyan ses ilk sesle birleşerek tek bir ses gibi algılanır. Ayrıca, yansıyan ses çevredeki yüzeyler tarafından soğurulduğundan yankı her zaman duyulmayabilir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Bir öğrenci, dikey bir uçurumdan x uzaklıkta durmaktadır. Ellerini çırpır ve yankının, çırpma anından 0,84 s sonra duyulduğunu ölçer. Öğrencinin kayaya olan uzaklığını hesaplayınız. Havada ses hızı 340 m/s'dir. Bu durumda, yankı açıkça ayırt edilebilir bir ses olarak duyulacak mıdır?

Verilenler: $t = 0,84 \text{ s}$, $v = 340 \text{ m/s}$

İstenen: $x - ?$

Çözüm:

Yankı, sesin kayaya gidip geri dönmesinden sonra öğrenciye ulaşır; dolayısıyla toplam yol $s = 2x$.

Hızın $s = vt$ tanımından, ses dalgasının kat ettiği mesafe $2x = vt = 340 \cdot 0,84 = 285,6$ m'dir. Dolayısıyla, kaya öğrenciden 285,6 m uzaklıkta bulunmaktadır. $x = 142,8$ m.

Yankının net ve belirgin bir ses olarak duyulabilmesi için, yansıyan sesin en az 0,10 s sonra ulaşması gerekir. Bu durumda süre 0,84 s olduğu için, yankı net ve belirgin bir ses olarak duyulacaktır.

İnfrases ve Ultrasesin Uygulama Alanları

İnfrases, frekansı **20 Hz'in altında** olan ve insan kulağı tarafından işitilemeyen ses dalgalarıdır. İnfrases; depremler, volkanik patlamalar, büyük okyanus dalgaları ve patlamalar gibi doğal olaylar sonucunda oluşabilir. Düşük frekansları ve uzun dalga boyları sayesinde, az zayıflayarak çok uzun mesafelere yayılabilir. Bu nedenle depremlerin ve volkanik faaliyetlerin izlenmesi ile atmosfer ve okyanus olaylarının incelenmesinde kullanılır. Fil gibi bazı hayvanlar da uzun mesafelerde iletişim kurmak için infrases üretir.

Ultrases, frekansı **20 kHz'in üzerinde** olan ve insan kulağı tarafından işitilemeyen ses dalgalarıdır. Yüksek frekansları nedeniyle dalga boyları kısadır. Bu özellik, ultrases dalgalarının hassas bir şekilde odaklanmasını ve küçük cisimlerden veya farklı ortamların ara yüzeylerinden belirgin biçimde yansımaları sağlar. Ultrasesin en yaygın kullanım alanlarından biri tıbbi görüntülemedir. **Ultrasonografi (ekografi)** yönteminde, ultrases dalgalarının doku ve organlardan yansımaları esas alınır. Yansıyan dalgalar (eko) değerlendirilerek iç organların görüntüsü elde edilir. Ultrases; gebeliğin takibinde, fetüsün gelişiminin izlenmesinde ve kan damarlarındaki kan akışının değerlendirilmesinde kullanılır (Şekil 6).

Ultrases, sonar sistemlerinde su altındaki derinliğin ölçülmesi ve cisimlerin tespit edilmesinde kullanılır. Ayrıca endüstride, parçaların ultrasonik yöntemle temizlenmesinde ve metal yapılardaki çatlak ile diğer kusurların belirlenmesinde de yaygın olarak kullanılır.



Şekil 6. Hamilelik sırasında yapılan ultrason taraması



DAHA FAZLA ÖĞREN

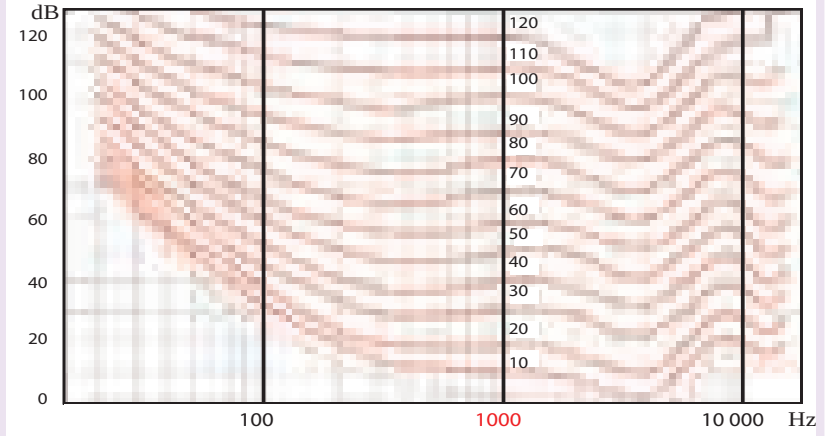
Fon Cinsinden Ses Düzeyi

Bir sesin algılanan düzeyi yalnızca ses şiddetine değil, aynı zamanda frekansına da bağlıdır. İnsan kulağı tüm frekanslara eşit duyarlılıkta değildir. Bu ilişki, Şekil 7'de verilen eşit ses düzeyi (izofon) eğrileri ile gösterilir. Her eğri, frekansları ve ses şiddetleri farklı olsa da insan kulağı tarafından aynı ses düzeyinde algılanan sesleri gösterir.

Fon (phon), sesin insan kulağı tarafından algılanan düzeyini ifade eden bir birimdir. Bir sesin fon değeri, 1 kHz frekanslı referans bir sesle karşılaştırılarak belirlenir. Bir sesin fon değeri, aynı ses düzeyinde algılanan 1 kHz frekanslı referans sesin desibel (dB) cinsinden değerine eşittir. Örneğin:

- 1000 Hz frekanslı ve 40 dB ses düzeyine sahip bir sesin fon değeri 40 ph'dir.

- 100 Hz frekanslı bir sesin 40 ph olarak algılanabilmesi için ses düzeyinin yaklaşık 50 dB olması gerekir. Bu durum, insan kulağının düşük frekanslı seslere karşı daha az duyarlı olduğunu gösterir. Bu nedenle, düşük frekanslı seslerin orta frekanslı seslerle aynı düzeyde algılanabilmesi için daha yüksek ses şiddetine sahip olmaları gerekir



Şekil 7. Eşit Ses Düzeyi Eğrileri



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

1 kHz frekansında ve 40 dB ses yüksekliğinde bir sesin ses yüksekliği 40 ph'dir. Eşit ses yüksekliği kontur grafiğinden, 100 Hz frekansındaki bir sesin, önceki sesle aynı ses yüksekliğine sahip olması için 50 dB olması gerektiği görülebilir. İkinci sesin şiddeti, ilk sesin şiddetinden kaç kat daha fazladır?

Verilenler: $L_1 = 40 \text{ dB}$ (1 kHz), $L_2 = 50 \text{ dB}$ (100 Hz)

İstenen: $\frac{I_2}{I_1} = ?$

Çözüm:

Ses yüksekliği (dB cinsinden) ile ses şiddeti arasındaki ilişki şöyledir: $\Delta L = 10 \cdot \log \frac{I_2}{I_1}$.

Ses yüksekliği farkı $\Delta L = 50 - 40 = 10 \text{ dB}$ 'dir, dolayısıyla şu sonuç çıkar:

$$10 = 10 \cdot \log \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow \log \frac{I_2}{I_1} = 1 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = 10.$$

100 Hz frekansındaki bir sesin, 1 kHz frekansındaki bir sesle aynı ses düzeyinde algılanabilmesi için ses şiddetinin yaklaşık on kat daha büyük olması gerekir.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Ses neden yalnızca boyuna (longitudinal) bir dalga olabilir?
2. Ortamın değişmesi (hava, su vb.) sesin hızını, dalga boyunu ve frekansını nasıl etkiler?
3. Titreşim genliğinin artması sesin şiddetini artırırken sesin perdesini (sesin ince veya kalınlığını) neden değiştirmez? Açıklayınız.
4. Yarasalarda ekolokasyon, ultrases (ultrasonik) dalgaların yayılması ve alınmasına dayanır. Yansıyan ses dalgaları, yarasanın gece uçarken böceklerin konumunu, büyüklüğünü ve şeklini belirlemesini sağlar. Yarasalar, 5 mm boyutunda bir böceği tespit etmek için ekolokasyon kullanırlar. Yarasalar 10 kHz ile 80 kHz arasında frekanslara sahip ultrasonik dalgalar yayabilirler (bazı yarasa türleri 200 kHz'e kadar ulaşabilir). Havada sesin hızı 340 m/s'dir.
 - a) İki frekans için ses dalgasının dalga boyunu hesaplayınız.

b) Hangi frekansın ekolokasyon için daha uygun olduğunu ve nedenini açıklayın (5 mm ile karşılaştırın). (Çözüm: 3,4 cm; 4,25 mm)

5. Bir hoparlör 0,15 W gücünde ses üretmektedir. Sesin her yöne eşit yayıldığı kabul edildiğinden, ses dalgalarının küresel olarak yayıldığı varsayılmaktadır.

a) Kaynaktan 2,5 m uzaklıktaki ses şiddetini hesaplayınız.

b) Kaynaktan uzaklık arttıkça şiddetin nasıl değiştiğini açıklayın.

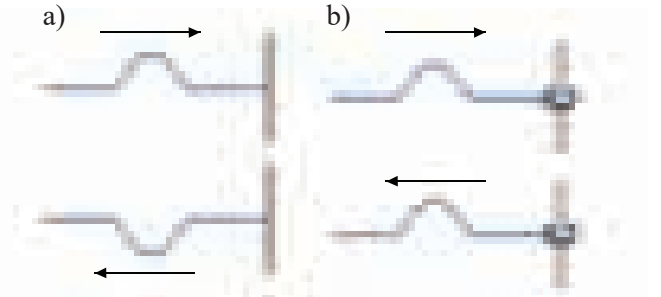
(Çözüm: a) $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$ b) $I \sim \frac{1}{r^2}$)

6. Bir kafede, öğleden sonra, müşteri sayısı az ve müzik sesi düşük olduğunda ses seviyesi 55 dB'dir. Akşam saatlerinde, kafe dolduğunda ve müzik ses seviyesi önemli ölçüde yükseldiğinde, ses seviyesi 85 dB'ye çıkar. Akşam saatlerinde ses yoğunluğunun öğleden sonraya kıyasla kaç kat daha fazla olduğunu hesaplayınız. (Çözüm: 1000 kat)

2.7. Dalgaların girişimi. Duran dalgalar

Dalga atması, gergin bir ipin ucunu tutan elin kısa bir süre yukarı ve aşağı hareket ettirilmesiyle oluşan bir dalgadır. Gergin bir ip boyunca ilerleyen bu tür bir dalga atması, ipin sabit bir duvara tutturulduğu bir sınırla karşılaştığında, yansıyan dalga ip boyunca geri döner. Dalga atması duvara ulaştığı anda, ip duvara dikey olarak yukarı doğru bir kuvvet uygular. Aynı anda duvar da ipin ucuna eşit büyüklükte ancak ters yönde bir kuvvet uygular (Newton'un Üçüncü Yasası geçerlidir) ve bu kuvvet, deformasyonun/uzamanın yönünü değiştirerek dalganın fazını π kadar değiştirir (şekil 1a).

İpin ucu sabit değil de serbestçe hareket edebiliyorsa (örneğin, dikey bir direk boyunca kayabilen bir halkaya bağlıysa), sınır koşulları tamamen farklıdır. Dalga atması serbest uca ulaştığında geri yansıtılır, ancak dalganın fazında herhangi bir değişiklik olmaz (Şekil 1b).

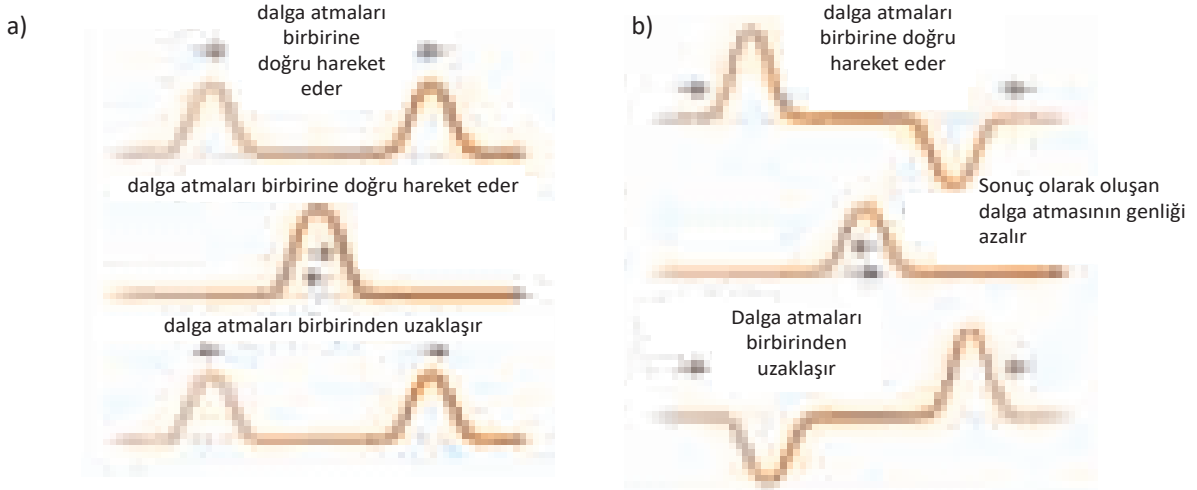


Şekil 1. Dalga atmasının yansıması:
a) Sert bir ortamdan b) Serbest bir uçtan

Dalgaların girişimi(şüperpozisyonu)

Aynı gergin ipin zıt uçlarından, birbirine doğru ilerleyen iki dalga atması oluşturalım. Dalga atmaları birbirinden uzakken her biri bağımsız olarak yayılır ve ipin taneciklerinin titreşmesine neden olur. Karşılaştıkları anda ise üst üste gelirler. Bu durumda, dalga atmalarının yönlerine bağlı olarak ipin deformasyonu artabilir veya azalabilir.

İki dalga atmasının genlikleri aynı yönlü ise, üst üste geldikleri bölgede oluşan bileşke dalganın genliği, dalga atmalarının genlikleri toplamına eşit olur (Şekil 2a). Dalga atmalarının genlikleri zıt yönlü ise, bileşke dalganın genliği genlikleri arasındaki farka eşit olur (Şekil 2b). Genlikleri eşit ancak zıt yönlü iki dalga atmasının üst üste gelmesi durumunda ise bileşke dalganın genliği sıfır olur. Üst üste gelme sona erdikten sonra her bir dalga atması, karşılaşma olmamış gibi yayılmaya devam eder.



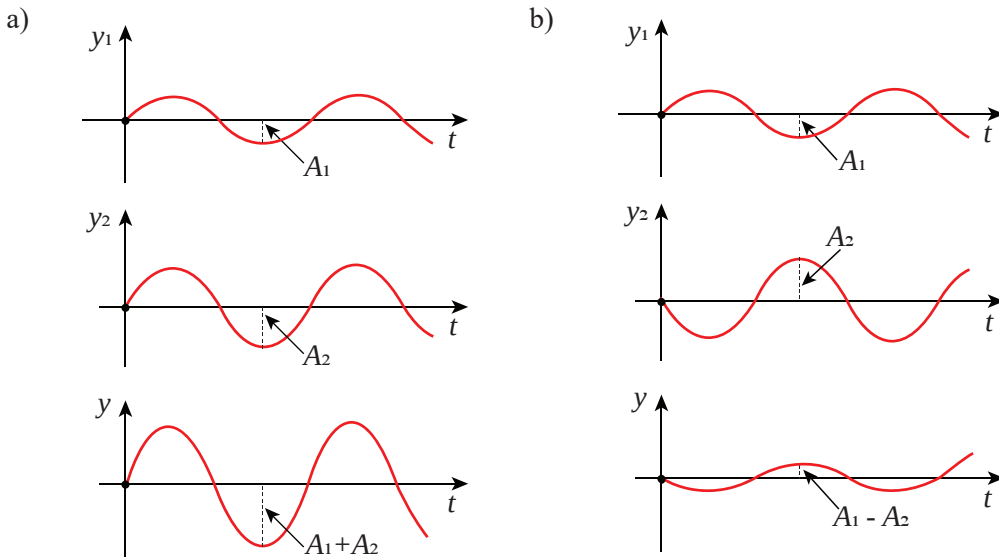
Şekil 2. Dalga atmalarının üst üste gelmesi a) Aynı yönde b) Zıt yönde

Şimdiye kadar tek tek dalga atmaları incelenmiş olsa da, aynı ilkeler harmonik dalgalar için de geçerlidir. İki veya daha fazla harmonik dalga aynı ortamda aynı anda yayıldığında birbirleriyle üst üste gelebilir. Bu etkileşim sonucunda ortam taneciklerinin titreşim genliği artabilir veya azalabilir.

Özellikle, aynı frekansa ve sabit faz farkına sahip iki veya daha fazla harmonik dalganın aynı ortamda aynı anda yayılması **durumunda girişim meydana gelir**. Her dalga tek başına ortam taneciklerinin denge konumları etrafında titreşmesine neden olur. Dalgalar aynı noktaya aynı anda ulaştığında, o noktadaki tanecikler bütün dalgaların etkisine aynı anda maruz kalır. **Bu durumda Dalgaların Üst Üste Gelme İlkesi geçerlidir. Bu ilkeye göre bileşke dalga, tek tek dalgaların cebirsel toplamına eşittir.** Bu durum aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$y = y_1 + y_2 + \dots + y_n$$

Dalgalar **aynı fazda** ise, ortamdaki parçacıkların salınım genliği artar. Bu olaya yapıcı girişim denir (Şekil 3a). Dalgalar **farklı fazda** ise, ortamdaki parçacıkların salınım genliği azalır. Özel bir durumda, eşit genliklere sahip iki dalga zıt fazlarda yayıldığında, dalgaların kesiştiği noktadaki parçacıkların salınım genliği sıfır olur, yani salınım olmaz. Bu olaya yıkıcı girişim denir (Şekil 3b).



Şekil 3. Aynı frekanslı dalgaların üst üste gelmesi: a) Dalgalar aynı fazdadır. b) Dalgalar zıt fazdadır.

Bu ilke mekanik dalgalar için geçerlidir ve **duran dalgaların** oluşumunun temelini oluşturur.



ETKİNLİK 1.

Oyuncak yay (slinky) ile dalgalar

Gerekli ekipman: Slinky yayları (şekil 4) ve yayları sabitlemek için bir stand. Slinky yayları metal ise, deney daha geniş bir frekans ve uzama aralığında tekrarlanabilir.

Bölüm 1: Dalga darbesi (impuls)

1. Yayı yere veya daha geniş bir çalışma tezgahına yerleştirin.

2. Yayın bir ucunu standla sabitleyin.

3. Diğer ucunu elinizle tutun ve yayı hafifçe gerin.

4. Elinizle kısa ve hızlı bir ileri-geri hareket yaparak tek bir dalga darbesi oluşturun. Eliniz, deney boyunca masa ile aynı yükseklikte kalmalıdır.

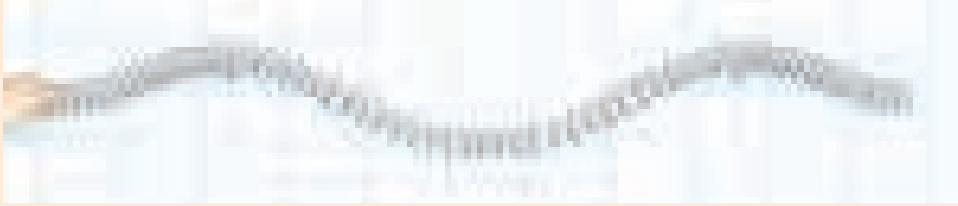
5. Dalga atmasının yay boyunca nasıl yayıldığını ve sabit uca ulaştığında ne olduğunu gözlemleyin. Hızlıca arka arkaya iki atma oluşturun ve girişim olgusunu gözlemlemeye çalışın.

Gözlemler:

- Dalga atmasına ne olur? İlerler mi, yoksa bulunduğu yerde mi kalır?
- Dalga paketi uçtan yansıdığında ne olur?
- Yayın parçacıkları atma ile birlikte hareket eder mi?

Bölüm 2: Farklı frekanslara sahip dalgalar

1. Kolunuzu ritmik bir şekilde hareket ettirerek, sabit bir frekansta periyodik salınımlar oluşturun.
2. Yay boyunca yayılan dalganın şeklini gözlemleyin.
3. Aynı frekansta devam edin ve dalga formunun zamanla değişip değişmediğini gözlemleyin.
4. Yayıdaki gerginliği önemli ölçüde değiştirmeden kol hareketinizin frekansını artırın veya azaltın.



Sorular:

- Kaynağın hareketi periyodik olduğunda nasıl bir dalga oluşur?
- Bitişik düğümler arasındaki mesafe aynı kalır mı?
- Yay boyunca iletilen nedir: madde mi, yoksa enerji mi?
- Frekans arttıkça dalgaların dalga boyu nasıl değişir?
- Frekans değiştiğinde hangi büyüklükler değişir, hangileri sabit kalır?

Bölüm 3: Gerilimi Değiştirme

1. Yayıdaki gerilimi artırın. Bunu, sadece son sargıyı değil, aynı anda daha fazla sargıyı tutarak yapın. Böylece yay aynı uzunlukta kalacak, ancak sargılar arasındaki boşluk değişecektir.

2. İkinci Bölümdeki deneyi, kolun farklı hareket frekansları için tekrarlayınız.

3. Bunu birkaç farklı gerginlik değeri için de tekrarlayın.



Şekil 4. Slinky yayları

Sorular:

- Kol hareketinin frekansını değiştirdiğinizde, dalgadaki değişiklikler 2. bölümdekiyle aynı mıdır, yoksa farklı mıdır? Açıklayın.
- Frekans aynı, ancak gerilim farklı olduğunda dalganın şekli nasıl olur?
- Peki, gerilim aynı, ancak frekans farklı olduğunda ne olur?
- Yay boyunca yayılan dalganın görünümünü elin hareketi mi, yoksa yayın özellikleri mi belirler?

Duran dalgalar

Bir önceki etkinlikte, slinky yay kullanılarak dalga atmasının ve harmonik dalgaların yayılması gözlemlendi. Yay, gerilmiş bir telin modeli olarak kullanıldı. Tele periyodik bir uyarma uygulandığında, tel boyunca yayılan ve sabit uca ulaştığında geri yansıyan bir dalga oluşur. Telin ucu sabit olduğundan, yansıyan **dalga π faz değişimiyle geri döner**. Böylece tel boyunca aynı anda iki dalga yayılır: kaynaktan sabit uca doğru ilerleyen dalga ile sabit uçtan geri dönen yansıyan dalga.

Bu iki dalga aynı frekansa ve aynı genliğe sahiptir. Dalgaların üst üste gelmesi sonucunda duran dalga oluşur. Duran dalga, bulunduğu yerde duruyormuş gibi görünen karakteristik bir dalga şeklindedir. Aynı bir dalga türü olmayıp, zıt yönlerde ilerleyen iki dalganın girişimi sonucunda oluşur. Duran dalgada net enerji aktarımı gerçekleşmez. Duran dalga üzerinde titreşim yapmayan noktalara düğüm, en büyük genlikle titreşen noktalara ise karın denir. Düğüm ve karınların sayısı; uyarma frekansına, telin uzunluğuna ve gerginliğine bağlıdır. Her iki ucu sabitlenmiş bir telde, telin uçları her zaman düğüm noktasıdır.

Ardışık iki düğüm noktası (ya da ardışık iki karın noktası) arasındaki uzaklık: $\frac{\lambda}{2}$.

Telin her iki ucu sabit olduğundan, duran dalgalar ancak telin uzunluğu L , yarım dalga boyunun tam sayı katı olduğunda oluşabilir, yani:

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

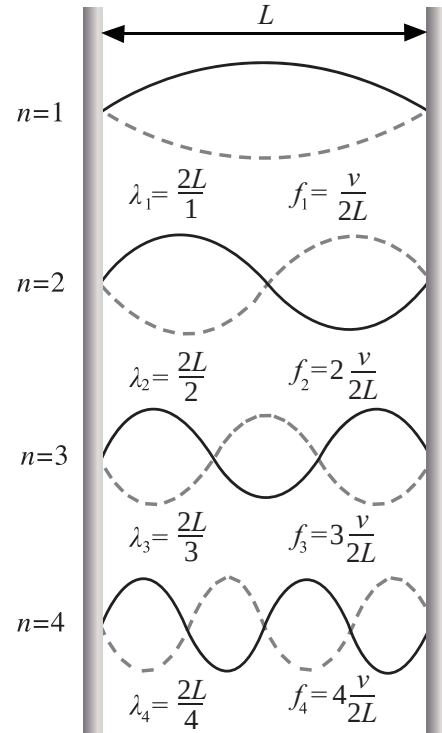
En büyük dalga boyu ($n = 1$), birinci harmoniğe karşılık gelir. **Birinci harmonikte** tel üzerinde uçlar dışında düğüm bulunmaz. Harmonik sıra numarası n arttıkça düğüm sayısı artar ve duran dalganın dalga boyu azalır (Şekil 5). Buna göre, herhangi bir harmoniğe ait dalga boyu aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$\lambda = \frac{2L}{n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Duran dalganın frekansı, telde yayılan dalganın hızı ve dalga boyu kullanılarak hesaplanabilir:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Bu formül, telli bir müzik aletinin ses yüksekliğinin neden çeşitli faktörlere bağlı olduğunu açıklar. Telin uzunluğu, duran dalganın dalga boyunu belirler; bu nedenle daha kısa teller daha yüksek sesler üretirken, daha uzun teller daha düşük sesler üretir. Telin doğrusal kütle yoğunluğu da duran dalganın özelliklerini etkiler. Doğrusal kütle yoğun-



Şekil 5. Bir tel üzerindeki duran dalga - temel mod ($n = 1$) ve yüksek harmonikler ($n > 1$)

luğu büyük olan tellerde dalga daha yavaş yayılır ve daha düşük frekanslı sesler oluşur. Doğrusal kütle yoğunluğu küçük olan tellerde ise dalga daha hızlı yayılır ve daha yüksek frekanslı sesler oluşur. Şekil 5. Bir tel üzerinde oluşan duran dalga: temel harmonik ($n = 1$) ve üst harmonikler ($n > 1$).



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Doğrusal kütle yoğunluğu $0,005 \text{ kg/m}$ olan bir tel, 2 kg 'lık bir ağırlık tarafından gerilir. Telin uzunluğu 1 m 'dir.

a) Tel boyunca yayılan dalganın hızını bulunuz.

c) Tel üzerinde 50 Hz frekansta 5. harmoniğin oluşabilmesi için telin ucuna asılması gereken kütleyi bulunuz.

Verilenler: $\mu = 0,005 \text{ kg/m}$, $L = 1 \text{ m}$, $m_1 = 2 \text{ kg}$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

İstenen: $v_1 = ?$, $f_1 = ?$, $m = ?$

Çözüm:

a) Dalga hızı denklemi kullanılarak elde edilir: $v_1 = \sqrt{\frac{F_1}{\mu}} = \sqrt{\frac{m \cdot g}{\mu}} = 62,6 \text{ m/s}$.

b) Uçları sabit bir tel için: $\lambda_1 = 2L$ olduğundan, temel frekans: $f_1 = \frac{v_1}{2L} = 31,3 \text{ Hz}$.

c) $n = 5$. Duran dalgalar için: $f = \frac{nv}{2L}$ buradan: $v = \frac{2Lf}{n}$

Ayrıca $v = \sqrt{F / \mu}$ olduğundan: $F = \mu v^2$. Son olarak, asılı ağırlığın kütlesi için: $m = \frac{\mu v^2}{g} = 0,2 \text{ kg}$ elde edilir.

Hava sütunundaki (tüplerdeki) duran dalgalar

Üflemeli çalgılarda titreşen tel değil, boru içindeki hava sütunudur. Hava tanecikleri, dalganın yayılma doğrultusunda denge konumları etrafında titreşerek boyuna dalgalar oluşturur. Boru içinde yayılan dalgalar uçlardan yansır ve gelen dalgalarla üst üste gelerek duran dalga oluşturabilir. Her iki ucu açık bir boruda, hava her iki uçta da serbestçe titreşebildiğinden bu noktalarda karın oluşur. İki karın arasında tam sayı kadar yarım dalga boyu bulunabilir (Şekil 6). Bu durum, her iki ucu sabit bir telde oluşan duran dalgalardan farklıdır.

Bu durumda duran dalganın oluşma koşulu, iki ucu sabit bir telde duran dalganın oluşma koşuluyla aynıdır.

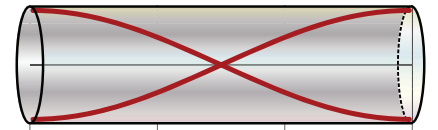
demek ki: $L = n \frac{\lambda}{2}$, $n = 1, 2, 3 \dots$

bundan şu sonuç çıkar:

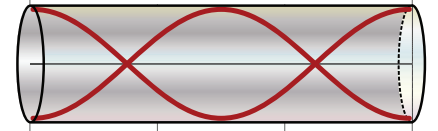
$$f = \frac{nv}{2L}$$

Bu tür duran dalga, flüt ve açık borulu diğer tüm müzik aletleri şeklindeki tüm enstrümanlarda oluşur.

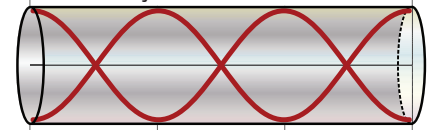
HER İKİ UCU AÇIK BORU
birinci harmonik



ikinci harmonik



üçüncü harmonik



Şekil 6. İki ucu açık hava kolonunda duran dalga temel ve yüksek harmonikler

Bir ucu kapalı bir boruda, kapalı uçtaki hava tanecikleri titreşemediğinden burada **düğüm oluşur**. Açık uça ise hava tanecikleri serbestçe titreşebildiğinden **karın oluşur** (Şekil 7). Bu nedenle, boru uzunluğu içine yalnızca tek sayılı çeyrek dalga boyları sığabilir.

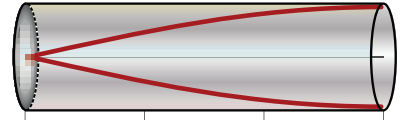
$$L = (2n-1)\frac{\lambda}{4} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Dolayısıyla, şu sonuç çıkar:

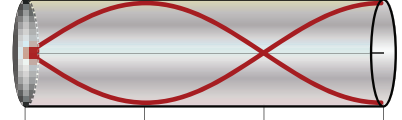
$$\lambda = \frac{4L}{(2n-1)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{ ve } f = (2n-1)\frac{v}{4L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Bu nedenle, bir ucu kapalı borularda yalnızca tek harmonikler oluşur. Bu durum, kamışlı üflemlî çalgıların kendine özgü tınıya sahip olmasının nedenlerinden biridir; çünkü **bu çalgılarda çift harmonikler oluşmaz**.

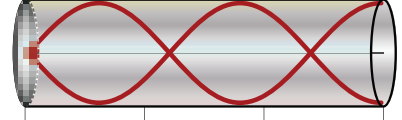
BİR UCU KAPALI BORU
birinci harmonik



üçüncü



beşinci harmonik



Şekil 7. Bir ucu kapalı hava sütununda oluşan duran dalga: temel harmonik ve üst harmonikler



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Her iki ucu açık, 0,75 m uzunluğundaki bir boruda ses hızı 340 m/s'dir.

a) Temel harmonik frekansını bulunuz.

b) İkinci harmonik frekansını bulunuz.

c) İkinci harmoniğe ait dalga boyunu bulunuz ve boru içindeki düğüm ile karın noktalarının yerlerini gösteriniz.

Verilenler: $L = 0,75 \text{ m}$, $v = 340 \text{ m/s}$

İstenen: $f_1 - ?$, $f_2 - ?$, $\lambda_2 - ?$

Çözüm:

Boru her iki ucundan açıktır; yani uçlarda karın noktaları (maksimum genlik noktaları) bulunur.

Açık bir boru için: $\lambda_n = \frac{2L}{n}$, $f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) a) Temel frekans ($n = 1$)

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{340}{2 \cdot 0,75} = \frac{340}{1,5} = 226,7 \text{ Hz.}$$

b) İkinci harmonik ($n = 2$): $f_2 = \frac{2v}{2L} = \frac{v}{L} = 453,3 \text{ Hz.}$

c) İkinci harmonik için dalga boyu: $\lambda_2 = \frac{2L}{2} = L = 0,75 \text{ m}$ $n = 2$ için:

- Karın noktaları: 0 , $L/2$ ve L konumlarında bulunur.
- Düğüm noktaları: $L/4$ ve $3L/4$ konumlarında bulunur.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Bir telin sabit ucundan ve serbest ucundan yansıyan dalgalar arasında (faz ve genlik açısından) ne gibi farklar vardır?
2. Duran dalgalar en çok hangi ortamlarda oluşur?

3. Duran dalgalar ile müzik aletleri arasındaki ilişki nedir?
4. Kaynağın frekansı değiştiğinde, duran dalgaadaki düğüm ve karın noktalarının konumları neden değişir? Açıklayınız.
5. Her iki ucu sabitlenmiş, 5,0 m uzunluğundaki gerilmiş bir telde oluşturulan bir dalga atmasının, telin bir ucundan diğer ucuna gidip geri dönmesi 3,0 s sürmektedir.
 - a) Dalga yayılma hızını bulunuz.
 - b) Aynı tel üzerinde 4 düğüm ve 5 karın bulunan bir duran dalga oluşmaktadır. Buna göre, telin titreşim frekansını bulunuz.
6. (Çözüm: 3,33 m/s; 1,33 Hz)
7. 1,8 m uzunluğundaki bir ip, her iki ucundan sabitlenmiştir. İp boyunca dalgaların hızı 60 m/s'dir. Birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerin dalga boyunu ve frekansını bulunuz. (Çözüm: $\lambda_1 = 3,6$ m, $f_1 \approx 16,7$ Hz; $\lambda_2 = 1,8$ m, $f_2 \approx 33,3$ Hz; $\lambda_3 = 1,2$ m, $f_3 = 50$ Hz)
8. Frekansı 256 Hz olan bir ses çatalı, bir ucu kapalı bir hava sütununun üzerine yerleştirilmiştir. Hava sütununun uzunluğu, tüp içindeki su seviyesi değiştirilerek ayarlanabilmektedir. En büyük ses şiddetinin duyulduğu hava sütununun en küçük uzunluğunu bulunuz. (Çözüm: 0,33 m)

2.8. Doppler etkisi

Sirenini çalarak yanınızdan geçen bir ambulansın sesini dinlediğinizde, sirenin perdesinin değiştiğini fark edersiniz. Ambulans yaklaşırken ses daha tiz, uzaklaşırken ise daha pes duyulur. Oysa sirenin ürettiği sesin frekansı değişmez. Peki, bu durum nasıl açıklanabilir?

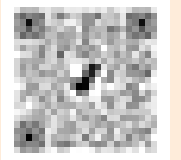
Ambulans dururken, gözlemci sirenin gerçek frekansını duyar. Ancak ambulans hareket ettiğinde, gözlemcinin algıladığı frekans değişir. Araç yaklaşırken ses daha yüksek frekanslı (daha tiz), uzaklaşırken ise daha düşük frekanslı (daha pes) algılanır. Bu değişim, ses kaynağı ile gözlemci arasındaki göreceli hareketten kaynaklanır.



ETKİNLİK 1.

Simülasyonla Doppler Etkisini İnceleme

Aşağıdaki web sitesinden Doppler etkisi simülasyonunu (Fizik: Sesle Doppler Etkisi – GeoGebra) açın: <https://www.geogebra.org/m/ffscYCRM>



Hazırlık

Sesi açın (Ses Açık)(Sound On).

Simülasyonu, kaynak ve gözlemci hareketsizken başlatın

(Source Velocity = 0 m/s ve Observer Velocity = 0 m/s olarak ayarlayın).

- Kaynak frekansını kaydedin (Kaynak Frekansı) (Source Frequency)
- Gözlemci tarafından algılanan frekansı kaydedin (Algılanan Frekans). (Perceived Frequency)
- Kaynağın etrafındaki dalga cephelerini tanımlayın (aralıkları eşit mi?).

Durum 1: Kaynak hareket halindeyken gözlemci sabittir

Aşağıdaki değerleri ayarlayın:

- Gözlemci Hızı –(Observer Velocity) 0 m/s
- Kaynak, (Source Velocity) +30 m/s, +60 m/s, +90 m/s hızında yaklaşıyor
- Kaynağın uzaklaşma hızı (Source Velocity) -30 m/s, -60 m/s, -90 m/s

Her bir değer için:

- Kaynak çevresindeki dalga cepheleri arasındaki mesafeyi not edin
- Gözlemci tarafından algılanan frekansı kaydedin (Algılanan Frekans) (Perceived Frequency)

Durum 2: Gözlemci hareket eder, kaynak sabit kalır

Ayarlayın:

- Kaynak Hızı (Source Velocity) 0 m/s
- Gözlemci, (Observer Velocity) +30 m/s, +60 m/s, +90 m/s hızında yaklaşır
- Gözlemci Hızı (Observer Velocity): -30 m/s, -60 m/s, -90 m/s Her değer için:

Dalga cepheleri arasındaki mesafeyi not edin

- Gözlemcinin algıladığı frekansı kaydedin (Algılanan Frekans) (Perceived Frequency)

Durum 3: Hem kaynak hem de gözlemci hareket halindedir

Aşağıdaki durumları içeren çeşitli kombinasyonlar oluşturun:

- Gözlemci farklı bir hızda (Observer Velocity) ± 30 m/s, ± 60 m/s, ± 90 m/s hareket ediyor
- Kaynak farklı hızlarda hareket ediyor (Source Velocity): ± 30 m/s, ± 60 m/s, ± 90 m/s.

Her değer için:

- Kaynakta dalga cepheleri arasındaki mesafeyi not edin
- Gözlemci tarafından algılanan frekansı kaydedin (Algılanan Frekans) (Perceived Frequency)

Sorular:

- Kaynak gözlemciye **yaklaştığında** dalgalar arasındaki mesafe nasıl değişir?
- Kaynak gözlemciden **uzaklaştığında** dalgalar arasındaki mesafe nasıl değişir?
- Kaynak hareket ettiğinde gözlemcinin duyduğu sesin frekansı değişir mi?

Araştırdığınız her durum için somut rakamlar verin.

- Kaynağın hızını artırdığınızda ne gözlemliyorsunuz? Bu durum, gözlemcinin algıladığı sesin frekansını nasıl etkiler?
- Gözlemci sabitken kaynak hareket ettiğinde ve kaynak sabitken gözlemci hareket ettiğinde, gözlemcinin algıladığı frekansta bir fark oluşur mu?
- Kaynak ve gözlemci birlikte hareket ettiğinde ne olur? Gözlemcinin algıladığı frekansın, kaynağın yaydığı frekanstan büyük ya da küçük olmasını hangi etken belirler?

Önceki etkinlikte, bir simülasyon kullanarak çeşitli hareket senaryoları altında ses dalga cephelerinin düzenindeki ve gözlemci tarafından kaydedilen ses frekansındaki değişiklikleri gözlemledik. Gözlemlerden, gözlemcinin duyduğu sesin frekansı sadece kaynak tarafından yayılan sesin frekansına değil, aynı zamanda kaynak ile gözlemci arasındaki göreceli harekete de bağlı olduğu sonucuna varılabilir. Aşağıdaki durumlarda değişiklikler gözlemlenir:

1. Sadece kaynak, gözlemciye göre hareket ettiğinde
2. Sadece gözlemci kaynağa göre hareket ettiğinde ve
3. Hem kaynak hem de gözlemci hareket ediyorsa.

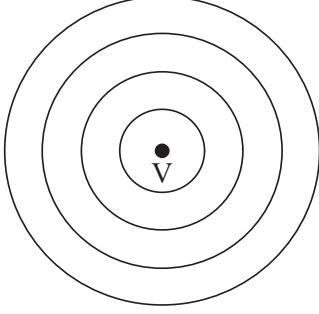
Kaynak ile gözlemci arasındaki göreceli hareket nedeniyle gözlemcinin algıladığı frekansın değişmesine **Doppler etkisi** denir. Bu etki yalnızca ses dalgalarında değil, ışık gibi elektromanyetik dalgalar da dâhil olmak üzere tüm dalga türlerinde görülür. Aşağıda bu üç durum ayrı ayrı incelenecektir.

1. Kaynak sabit, gözlemci hareket halinde

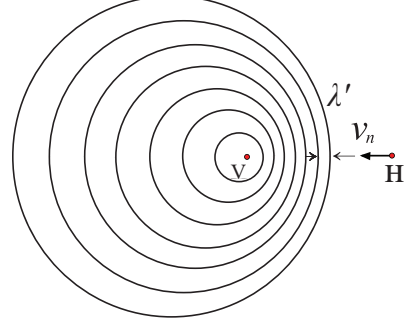
f frekansında ve λ dalga boyunda ses dalgaları yayan, hareketsiz bir nokta kaynağı ele alalım. Dalga cepheleri v hızında düzgün bir şekilde yayılır. Şekil 1'de, bunlar sabit nokta kaynağından yayılan eş merkezli daireler olarak gösterilmiştir.

Gözlemci de sabit duruyorsa, kaynağın frekansını şu şekilde hesaplar:

$$f = \frac{v}{\lambda}.$$



Şekil 1. Kaynak ve gözlemci sabittir



Şekil 2. Gözlemci kaynağa doğru hareket eder ve dalga kaynağı sabittir

Gözlemci, v_n hızıyla kaynağa doğru hareket ederse (Şekil 2), ses dalgaları gözlemciye $v + v_n$ bağlı hızıyla ulaşır. Bu durumda gözlemcinin algıladığı frekans aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$f' = \frac{v + v_n}{\lambda}.$$

Kaynak sabit olduğundan: $f = \frac{v}{\lambda}$ için şunu elde ederiz: $f' = f \frac{v + v_n}{v}$.

Gözlemci kaynaktan uzaklaşırsa, bağlı hız azalır ve ifade şu hale gelir:

$$f' = f \frac{v - v_n}{v}.$$

2. Gözlemci sabit, kaynak hareketli

Kaynak hareket halindeyken dalgalar aynı noktadan yayılmaz. Bu nedenle dalga cepheleri eş merkezli daireler oluşturmaz. Kaynağın hareket yönünde dalga boyu azalırken, ters yönde artar.

Belirli bir ortamda ses hızı sabit olduğundan, dalga boyundaki değişiklik frekansta bir değişikliğe yol açar, çünkü $v = \lambda f'$ 'dir. Kaynak, gözlemciye doğru hareket ederse, dalga boyu λ gözlemciye daha kısa görünür; ters yönde ise daha uzun görünür. Bu hareket

v_i hızında, T süre boyunca $v_i T$ mesafesini kat edecektir. Dolayısıyla, kaynaktaki dalga boyu $\lambda' = \lambda - v_i T$ olur; ya da frekans cinsinden ifade edersek

$$\frac{v}{f'} = \frac{v}{f_i} - \frac{v_i}{f_i}.$$

Kaynağın gözlemciye yaklaşması ve gözlemciden uzaklaşması durumları birlikte değerlendirildiğinde, gözlemcinin algıladığı f' frekansı aşağıdaki tek bağıntıyla ifade edilir ve bu bağıntı şu şekilde yazılır:

$$f' = f_i \frac{v}{v \mp v_i}$$



Şekil 3. Gözlemci sabittir, ses kaynağı ise gözlemciye doğru hareket etmektedir.

burada:

- kaynak yaklaşıyorsa "-" kullanılır;
- kaynak uzaklaşıyorsa "+" kullanılır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Bir polis arabası 90 km/s hızla düz bir çizgide ilerlemektedir ve sireni 750 Hz frekansında ses çıkarmaktadır. Ses hızı 340 m/s'dir. Bir bisikletçi yol kenarında hareketsiz durmaktadır.

a) Araç yaklaşırken bisikletçi sesi hangi frekansta algılar? b) Araç geçip uzaklaştıktan sonra gözlemci hangi frekansta sesi algılar?

Verilenler: $v_i = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$, $f_i = 750 \text{ Hz}$, $v = 340 \text{ m/s}$, $v_n = 0$

İstenen: $f' - ?$

Çözüm:

a) Kaynak yaklaşıyor:

$$f' = f_i \frac{v}{v - v_i} = 809 \text{ Hz.}$$

(b) Kaynak uzaklaşıyor:

$$f' = f_i \frac{v}{v + v_i} = 699 \text{ Hz.}$$

3. Hem kaynak hem de gözlemci hareket halindedir

En genel durumda, hem kaynak hem de gözlemci hareket hâlinindedir. Bu durumda, her iki hareketin etkisi birlikte değerlendirilir. Gözlemcinin algıladığı frekans, önceki iki durumun birleştirilmesiyle elde edilen aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$f' = f \frac{v \pm v_n}{v \mp v_i}$$

Burada: f : kaynağın yaydığı frekans, f' : gözlemcinin duyduğu frekans, v : ses hızı, v_g : gözlemcinin hızı, v_k : kaynağın hızı

Payda (üst kısım) için:

- "+" işareti, gözlemci kaynağa doğru hareket ediyorsa kullanılır.
- "-" işareti, gözlemci kaynaktan uzaklaşıyorsa kullanılır.

Pay (alt kısım) için:

- "-" işareti, kaynak gözlemciye doğru hareket ediyorsa kullanılır
- "+" işareti, kaynak gözlemciden uzaklaşıyorsa kullanılır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

İki tekne birbirlerine doğru düz bir çizgide hareket etmektedir. A teknesi 8 m/s hızla hareket etmektedir ve 600 Hz frekansında ses yayan bir hoparlöre sahiptir. B teknesi 5 m/s hızla hareket etmektedir ve 900 Hz frekansında ses yayan bir hoparlöre sahiptir. Gölün üzerindeki havada sesin hızı 340 m/s'dir.

- a) B teknesindeki yolcu, A teknesinin hoparlöründen gelen sesi hangi frekansta algılar?
b) A teknesindeki yolcu, B teknesinin hoparlöründen gelen sesi hangi frekansta algılar?

Verilenler:

Ses hızı: $v = 340 \text{ m/s}$, Tekne A: $v_A = 8 \text{ m/s}$, $f_A = 600 \text{ Hz}$,
Tekne B: $v_B = 5 \text{ m/s}$, $f_B = 900 \text{ Hz}$
Tekneler birbirlerine doğru hareket etmektedir.

İstenen:

$$f'_{A \rightarrow B} - ?,$$

$$f'_{B \rightarrow A} - ?$$

Çözüm:

Kaynak ve alıcı birbirine doğru hareket ettiğinde kullanılan genel Doppler formülü: $f' = f_i \frac{v + v_n}{v - v_i}$.

a) B aracındaki yolcunun, A aracındaki hoparlörden duyduğu frekans

$$f_i = f_A = 600 \text{ Hz, o zaman } v_i = v_A = 8 \text{ m/s, } v_n = v_B = 5 \text{ m/s.}$$

Buna göre: $\Rightarrow f'_{A \rightarrow B} = 623,5 \text{ Hz}$

b) A aracındaki yolcunun, B aracındaki hoparlörden duyduğu frekans $f_i = f_B = 900 \text{ Hz}$ o zaman $v_i = v_B = 5 \text{ m/s, } v_n = v_A = 8 \text{ m/s}$

Buna göre: $\Rightarrow f'_{B \rightarrow A} \approx 934,9 \text{ Hz}$

Sonuç

Her iki yolcu da, yayılan frekanstan daha yüksek bir frekans duyar. Bunun nedeni, ses kaynağı ile alıcının birbirlerine doğru hareket etmeleridir. Bu durumda Doppler etkisi nedeniyle algılanan frekans artar.

Astronomide Doppler etkisi

Doppler etkisi, elektromanyetik dalgalar da dahil olmak üzere tüm dalga türleri için geçerlidir. Bu, astronomi için özellikle önemlidir, çünkü gök cisimleri hakkında aldığımız bilgilerin neredeyse tamamı elektromanyetik radyasyon (ışık) şeklinde gelir.

Astronomide Doppler etkisi uygulanarak gök cisimlerinin hızları belirlenir. Örneğin, bir yıldızın Dünya'ya yaklaşıp yaklaşmadığı veya uzaklaşıp uzaklaşmadığı ve hangi hızda olduğu belirlenebilir. Bu, bir yıldızın yaydığı ışığın spektrumunun iyi bilinmesi sayesinde mümkündür. Aynı türdeki yıldızların tayfı (spektrumları) birbirine çok benzerdir, bu nedenle, gözlemlenen spektrum laboratuvar spektrumuyla karşılaştırılarak spektral çizgilerin kayması ölçülebilir. (Spektrum) tayf çizgileri tayfin mavi bölgesine doğru kaymışsa (maviye kayma), yıldız Dünya'ya yaklaşmaktadır. Tayf çizgileri tayfin kırmızı bölgesine doğru kaymışsa (kırmızıya kayma), yıldız Dünya'dan uzaklaşmaktadır.

Son yıllarda Doppler etkisi, ötegezegenlerin keşfinde de önemli bir rol oynamaktadır. Bir gezegen, bağlı bulunduğu yıldızın ortak kütle merkezi etrafında küçük ve periyodik bir hareket yapmasına neden olur. Bu hareket sonucunda, yıldızın tayfında küçük ve periyodik Doppler kaymaları meydana gelir. Bu yöntem, ötegezegenlerin belirlenmesinde en etkili yöntemlerden biridir (Şekil 4).

Klasik Doppler etkisinin yanı sıra astronomide kozmolojik kırmızıya kayma da gözlenir. Bu olgu ilk kez Edwin Hubble tarafından ortaya konmuştur. Hubble, uzak galaksilerin tayflarının sistematik olarak kırmızı bölgeye kaydığını belirlemiştir. Bu durum, uzak galaksilerin Dünya'dan uzaklaştığını göstermektedir.

Günümüzde bu kırmızıya kaymanın, klasik Doppler etkisinden değil, evrenin genişlemesinden kaynaklandığı bilinmektedir. Evren genişledikçe galaksiler de birbirinden uzaklaşır. Bu süreçte uzay genişlediği için, uzayda ilerleyen ışığın dalga boyu da uzar. Kaynak ne kadar uzaksa bunun anlamı ışığın genişleyen Evren'de kat ettiği mesafe o kadar uzun olur ve kozmolojik kırmızıya kayma o kadar büyük olur demektir (Şekil 5).

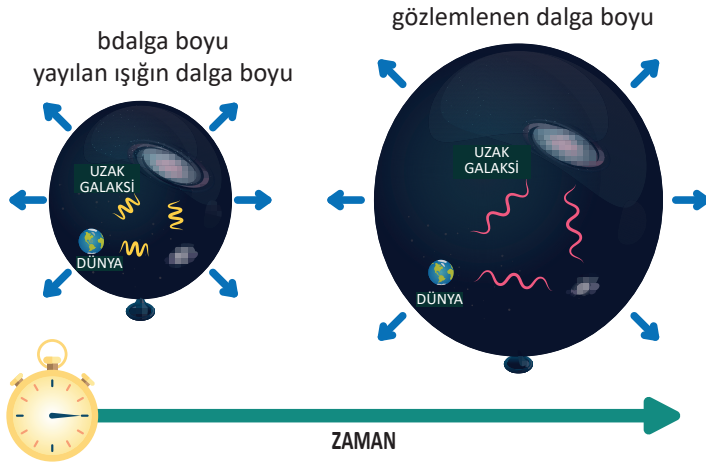


Şekil 4. Bir gezegenin etkisi altındaki yıldızın periyodik hareketi, periyodik Doppler kaymalarına neden olur. (Görsel: Avrupa Güney Gözlemevi - European Southern Observatory, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5168982>)

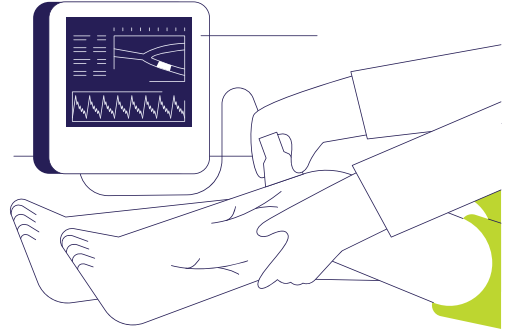
Tıpta Doppler etkisi

Ultrasonik Doppler yöntemi kullanılarak kan damarlarındaki kan akış hızı belirlenebilir. Prob tarafından gönderilen ultrases dalgaları, kanla birlikte hareket eden alyuvarlardan yansır. Alyuvarların hareketi nedeniyle, yansıyan ultrases dalgalarının frekansı gönderilen dalgaların frekansından farklı olur.

Prob, ultrases dalgalarını aynı anda hem gönderir hem de algılar. Böylece, gönderilen ve yansıyan dalgaların frekansları arasındaki fark ölçülür. Bu frekans farkı, Doppler etkisinin bir sonucudur ve kan akış hızı hakkında bilgi verir. Frekans farkı arttıkça kan akış hızı da artar.



Şekil 5. Kozmik Doppler kayması



Şekil 6. Tıpta ultrasonik Doppler etkisi



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Bir hastada abdominal aorttaki kan akış hızını belirlemek amacıyla Doppler ultrason ölçümü yapılmaktadır. Vücut yapısındaki farklılıklar ve damar derinliği nedeniyle iki farklı hastada farklı frekanslarda ultrases probu kullanılmaktadır.

Hasta 1: 3,5 MHz frekanslı prob

Hasta 2: 5,0 MHz frekanslı prob

Her iki durumda da ultrases demeti kan akışı yönünde gönderilmekte ve cihaz 2 kHz'lık aynı Doppler frekans kaymasını ölçmektedir. Kanda ses hızı 1540 m/s'dir.

a) Hasta 1 için kan akış hızını hesaplayınız.

b) Hasta 2 için kan akış hızını hesaplayınız.

c) Doppler frekans kayması aynı olmasına rağmen hesaplanan hızların neden farklı olduğunu açıklayınız.

Verilenler:

$$f_u = 2 \text{ kHz} = 2 \cdot 10^3 \text{ Hz}, v_z = 1540 \text{ m/s}, a) \\ f = 3,5 \text{ MHz} = 3,5 \cdot 10^6 \text{ Hz}, b) f = 5 \text{ MHz} = 5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

İstenen:

$$v - ?$$

Çözüm:

Birinci Doppler kayması (alyuvar gözlemci olarak kabul edildiğinde): $f' = f \frac{v_z - v}{v_z}$.

İkinci Doppler kayması (alyuvar kaynak, prob ise gözlemci olarak kabul edildiğinde):

$$f'' = f' \frac{v_z}{v_z + v}.$$

Yerine koyarsak: $f'' = f \frac{v_z - v}{v_z} \cdot \frac{v_z}{v_z + v} = f \frac{v_z - v}{v_z + v}$.

Doppler kayması: $f_u = f - f'' \Rightarrow f_u = f - f \frac{v_z - v}{v_z + v} \Rightarrow v = \frac{f_u}{2f - f_u} v_z$.

a) Hasta 1: $f = 3,5 \text{ MHz} = 3,5 \cdot 10^6 \text{ Hz} \Rightarrow v_1 = 0,44 \text{ m/s}$.

b) Hasta 2: $f = 5 \text{ MHz} = 5 \cdot 10^6 \text{ Hz} \Rightarrow v_2 = 0,31 \text{ m/s}$.

c) $v = \frac{f_u}{2f - f_u} v_z$ formülünden görüldüğü üzere, f_u ve v_z aynı olduğunda hız v , probun (sondanın)

frekansı f 'ye bağlıdır. f büyüdükçe $(2f - f_u)$ ifadesi de büyür; dolayısıyla elde edilen hız v daha küçük olur. Bu nedenle, Doppler kayması aynı olsa bile (2 kHz), farklı prob frekansları farklı hız değerleri verir.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Ses dalgaları söz konusu olduğunda, kaydedilen frekans değişimine rağmen ortamdaki ses hızı neden değişmez?
2. Diğer tüm koşullar aynı kalırken kaynağın frekansı artırılırsa Doppler kayması nasıl değişir?
3. Kaynak ve alıcı aynı hızda ve aynı yönde hareket ediyorsa Doppler etkisi gözlemlenebilir mi? Cevabınızı açıklayın.
4. Doppler etkisi, kaynağın hareket yönünü belirlemek için kullanılabilir mi? Nasıl olduğunu açıklayın.
5. Bir ses kaynağı sabit durmaktadır ve 1000 Hz frekansında bir ses yaymaktadır. Gözlemci A, kaynağa doğru 10 m/s hızla yaklaşmaktadır; gözlemci B ise kaynaktan 10 m/s hızla uzaklaşmaktadır.
6. Gözlemciler A ve B'nin duyduğu frekansları hesaplayınız. (Çözüm: 1029 Hz ve 971 Hz)
7. Bir kaynak, 500 Hz frekansında bir ses yayar ve bir gözlemciye doğru 15 m/s hızla hareket eder. Aynı anda, alıcı da kaynağa doğru 5 m/s hızla hareket eder. Alıcı hangi frekansı kaydeder? (Çözüm: 531 Hz)
8. Bir radar, 10 GHz frekansında bir elektromanyetik dalga yayar ve bir arabadan yansıdıktan sonra 1,2 kHz'lik bir Doppler kayması kaydeder. Arabanın hızını hesaplayınız. (Çözüm: 65 km/h)

Konu 2: SORULAR VE ÖDEVLER

1. İki harmonik salınıcı aynı periyotla salınmaktadır. Ancak ikinci salınıcının genliği, birinci salınıcının genliğinin iki katıdır. Aşağıdakileri karşılaştırınız:
 - a) Maksimum hızlarını.
 - b) Maksimum kinetik enerjilerini.
2. İki cisim aynı frekansla salınmaktadır; ikinci cismin genliği ise birinci cismin genliğinin iki katıdır. Salınım periyotları birbirine göre nasıldır? Cevabınızı açıklayın.
3. Farklı uzunluktaki iki basit sarkaç, Dünya koşullarında aynı periyotla salınabilir mi? Cevabınızı açıklayın.
4. Sönümlü salınım hareketinde genlik zamanla azalır. Salınımın frekansı da değişmek zorunda mıdır? Açıklayın.
5. Dalga hareketinin neden enerjiyi ilettiğini, ancak maddeyi iletmediğini açıklayın.
6. İki dalga aynı ortamda yayılmaktadır. İlk dalganın frekansı ikinci dalganın frekansının iki katı, ikinci dalganın genliği ise birinci dalganın genliğinin iki katıdır. Dalgaları aşağıdaki açılardan karşılaştırınız:
 - a) Hızları.
 - b) Her birinin taşıdığı enerji.
7. Bir dalga, daha az yoğun bir ortamdan daha yoğun bir ortama geçer. Dalganın kırılması mutlaka gerçekleşir mi? Cevabınızı gerekçelendirin.
8. Belirli bir dalga üzerindeki iki nokta, $\lambda/4$ uzaklıkla birbirinden ayrılmıştır. Bu iki nokta:
 - a) Aynı fazda mıdır?
 - b) Denge konumundan aynı anda geçebilirler mi?
9. Sabit bir ipte, iki ucunda düğüm noktaları bulunan bir duran dalga oluşur. Kaynağın salınım frekansı artırılırsa, yeni bir duran dalga oluşması için ne değişmelidir? Açıklayın.
10. Bir gözlemci ve bir ses kaynağı birbirlerine doğru hareket etmektedir. Doppler etkisi formüllerini kullanarak, gözlemci tarafından algılanan sesin frekansının ikisinin göreceli hareketine nasıl bağlı olduğunu açıklayın.
11. Bir öğrenci, uzunluğu 1,00 m olan matematiksel bir sarkacın periyodunu belirler ve periyot için 1,8 s sonucunu elde eder.
 - a) Formül kullanılarak hesaplanan basit sarkacın periyodunu belirtiniz.
 - b) Ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki farkın en az iki nedenini belirtiniz.
 - c) Öğrencinin daha doğru bir sonuç elde edebilmesi için ölçümün nasıl iyileştirilebileceğini öneriniz. (Çözüm: $T = 2,0$ s)
12. Kütlesi 0,50 kg olan bir cisim, salınım periyodu 1,0 s olan bir yaya bağlanmıştır. Cisim denge konumundan
 - a) Yayın yay sabitini bulun.
 - b) Salınımın genliğini bulun.
 - c) Basit harmonik salınıcının mekanik enerjisini hesaplayınız. (Çözüm: $k = 20$ N/m, $A = 0,13$ m, $E = 0,16$ J)

13. Bir cisim harmonik salınım yapmaktadır. Uzaması 3,0 cm olduğunda hızı 40 cm/s, uzaması 5,0 cm olduğunda ise hızı 20 cm/s'dir.
 a) Salınımların genliğini bulunuz.
 b) Açısal frekansı bulunuz.
 c) Salınımın periyodunu bulun. (Çözüm: $A = 5,5$ cm, $\omega = 8,7$ s⁻¹, $T = 0,72$ s)
14. Bir harmonik salınımcının genliği A 'dır. Uzama $A/2$ olduğu anda, toplam mekanik enerjinin ne kadarının potansiyel enerji olduğunu bulunuz.
 (Çözüm: %25)
15. Bir yay sarkacı, 0,50 s periyotla salınım yapmaktadır ve uzun, gerilmiş bir ipe bağlıdır. İp boyunca dalganın hızı 25 m/s ise, aşağıdakileri bulun:
 a) Dalganın dalga boyu.
 b) Birbirinden 3,0 m uzaklıktaki iki nokta arasındaki faz farkını.
 c) Bu iki nokta aynı fazda mı yoksa zıt fazda mı salınmaktadır?
 (Çözüm: $\lambda = 12,5$ m, $\Delta \phi = 1,5$ rad)
16. Bir dalga, homojen bir ortamda yayılmaktadır ve belirli bir anda dalga kaynağı frekansını iki katına çıkarır.
 a) Dalganın dalga boyuna ne kadar olur?
 b) Dalganın hızına ne olur?
 (Çözüm: $\lambda_2 = \lambda_1 / 2$, $v_2 = v_1$)
17. $t = 0$ anında kaynak 6 Hz frekansında salınmaya başlar. Dalganın hızı 15 m/s'dir. Salınımların başlamasından kaç saniye sonra, birbirinden 100 m uzaklıkta bulunan iki nokta aynı fazda olacaktır?
 (Çözüm: $t = 6,67$ s)
18. Bir tel, temel frekansı 100 Hz olacak şekilde gerilir. Frekansı 100 Hz ve genliği 3 cm olan bir salınım cihazı bu tele bağlanır.
 a) Telde duran dalga oluşur mu?
 b) İp üzerindeki gerilim dört katına çıkarılırsa, duran dalgaya ne olur ve hızı nasıl değişir?
 (Çözüm: a) evet; b) $v_2 = 2v_1$)
19. Bir salınımcının genliği, 5 salınım boyunca 6,0 cm'den 3,0 cm'ye düşer.
 a) Sönümleme faktörünü bulunuz.
 b) Genlik kaç salınımdan sonra 1,0 cm olacaktır?
 (Çözüm: $\beta = 1,15$; 13 salınım)
20. 500 Hz frekanslı bir ses kaynağı, 10 m/s hızla bir gözlemciye doğru hareket ederken, gözlemci de 5 m/s hızla kaynağa doğru hareket etmektedir. Gözlemcinin algıladığı sesin frekansını hesaplayınız.
 (Çözüm: $f' = 523$ Hz)

KONU 3:

Geometrik Optik

Işık, çevremizdeki dünyayı görmemizi sağlayan doğadaki en önemli fiziksel olgulardan biridir. Işık sayesinde cisimleri, şekillerini, renklerini ve uzaydaki konumlarını algılayabiliriz. Işığın davranışı fizik yasalarıyla açıklanabilir.

Işığın yayılma yasalarını ve fiziksel cisimlerle optik ortamlarla etkileşimini inceleyen fizik dalına optik denir. Bu bölümde, ışığın idealize edilmiş ışık ışınları modeliyle açıklandığı ve optik olayların basit ve anlaşılır bir şekilde incelenmesine olanak sağlayan geometrik optiği ele alacağız.

Geometrik optik, ışığın yansımaları ve kırılmasını, ayrıca aynalar ve mercekler aracılığıyla görüntü oluşumunu inceler. Bu bilgiler, çok sayıda optik cihazın çalışma prensibini anlamamızı temin eder. Geometrik optiği inceleyerek ışığın davranışını ve bu davranışların günlük yaşam, bilim ve teknolojiye uygulamalarını öğreneceksiniz.

Öğrenme çıktıları

Öğrenci aşağıdakileri yapabilecektir:

1. Işığın doğasına ilişkin farklı teorileri açıklayabilir ve karşılaştırabilir, farklı optik ortamlarda ışığın hızına ilişkin bağıntıyı uygulayabilir.
2. Işığın yansımaları açıklayabilir, yansıma yasasını ifade edebilir, düz aynada oluşan görüntüyü çizebilir ve özelliklerini açıklayabilir.
3. Ayna çeşitlerini ayırt edebilir, temel elemanlarını tanımlayabilir, görüntü oluşturabilir ve küresel ayna denklemini uygulayabilir.
4. Işığın farklı ortamlarda kırılmasını açıklayabilir, grafiklerle gösterebilir ve kırılma yasasını problemlerin çözümünde uygulayabilir.
5. Tam yansıma olayını açıklayabilir, sınır açısı bağıntısını uygulayabilir ve tam yansımanın doğası ile teknolojiye kullanım alanlarına örnekler verebilir.
6. İnce kenarlı ve kalın kenarlı mercekleri ayırt edebilir, temel elemanlarını belirleyebilir, görüntü oluşturabilir ve ince mercek denklemini uygulayabilir.
7. İnsan gözünde görüntü oluşumunu açıklayabilir, göz kusurlarının merceklerle düzeltilmesini açıklayabilir ve mikroskop ile teleskobun çalışma prensibini açıklayabilir.
8. Işığın dispersiyonunu açıklayabilir ve gösterebilir, prizmadaki sapmayı açıklayabilir, tek renkli ışık ile çok renkli ışığı ayırt edebilir.

3.1. Işığın doğasına ilişkin teoriler. Işığın hızı

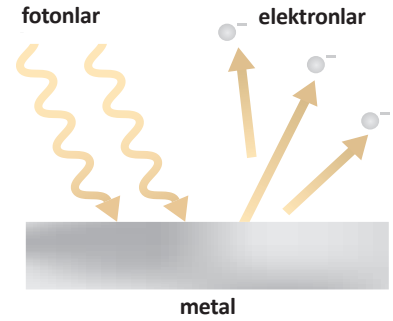
Işık nedir? Bu soru, yüzyıllardır insanların üzerinde düşündüğü temel sorulardan biridir ve bugüne kadar kesin bir şekilde yanıtlanamamıştır. Tarih boyunca bilim insanları, ışığın doğasını açıklamaya çalışmış ve ışığın davranışını açıklayan çeşitli modeller geliştirmiştir. Bu modellerden ikisi, ışıkla ilgili birçok olguyu başarıyla açıklayabilmektedir. Ancak bu modellerin hiçbiri tek başına ışığın tüm özelliklerini açıklamak için yeterli değildir. Bu bölümde, deneylerin ışığın doğasını tam olarak anlamak için neden birden fazla modele ihtiyaç duyulduğunu ve ışığın neden tek bir modelle açıklanamadığını nasıl ortaya koyduğunu inceleneyecektir.

Işığın parçacık özelliğini gösteren önemli örneklerden biri fotoelektrik etkidir. Bu konu bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak incelenecektir. Fotoelektrik etki (Şekil 1), ışığın parçacık özelliği de gösterebildiğini ortaya koyar. Yeterince yüksek frekanslı ışık bir maddenin yüzeyine düştüğünde, yüzeyden elektronlar kopar. Bu olay, ışığın şiddetine değil frekansına bağlıdır ve yalnızca ışığın dalga modeliyle açıklanamaz.

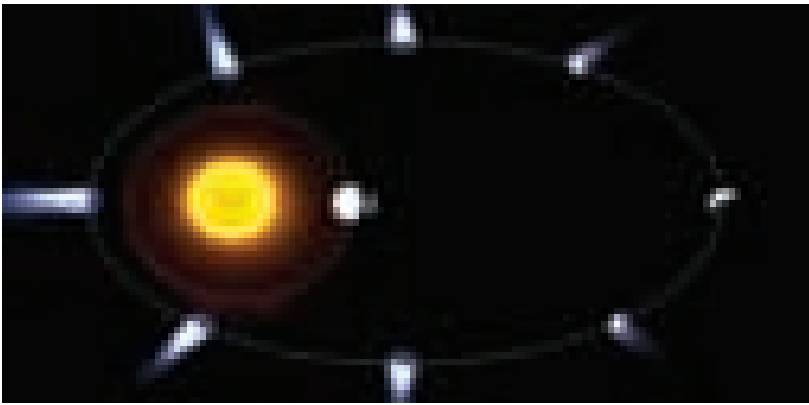
Işığın parçacık özelliğini gösteren bir başka örnek kuyruklu yıldızlardır. Bir kuyruklu yıldız Güneş'e yaklaştığında, hareket yönünden bağımsız olarak kuyruğu her zaman Güneş'ten uzağa yönelir (Şekil 2). Bu durum, kuyruklu yıldızdan kopan maddeler üzerine etki eden bir kuvvetin bu maddeleri Güneş'ten uzağa doğru ittiğini gösterir.

Gerçekte bu olay, iki etkinin sonucudur: Güneş tarafından yayılan elektrik yüklü parçacıklardan oluşan güneş rüzgârı, kuyruklu yıldızın iyonlaşmış gazları üzerinde etkili olarak iyon kuyruğunu oluşturur. Ayrıca Güneş ışığının uyguladığı ışınım basıncı, toz parçacıkları üzerinde etkili olarak toz kuyruğunun oluşmasına neden olur. Işık, toz parçacıklarıyla çarpıştığında onlara momentum aktarır. Işınım basıncı olarak bilinen bu etki, ışığın parçacık özelliği de gösterebildiğinin kanıtlarından biridir.

Işığın parçacıklardan oluştuğu teorisine **Parçacık Teorisi** denir. Bu parçacıklara **foton** denir. Fotonların enerji ve momentumu vardır, ancak kütleleri yoktur.



Şekil 1. Fotoelektrik etki

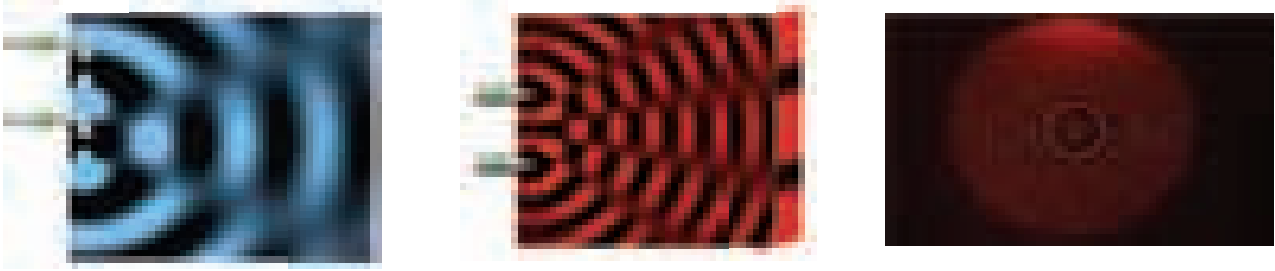


Şekil 2. Güneş etrafındaki yörüngesinde farklı konumlarda bulunan bir kuyruklu yıldız

Ancak Parçacık Teorisi ile açıklanamayan deneyler de vardır. Bu deneyler, ışığın dalga gibi davrandığını gösterir. Önceki bölümde, dalgaların üst üste gelebileceğini ve girişim oluşturabileceğini ifade eden Dalga Süperpozisyon İlkesi'ni öğrenmiştik.

Işık, koherent kaynaklardan yayıldığında (aynı frekansa ve genliğe sahip dalgalar üreten, aralarındaki faz farkı sabit kalan kaynaklar), ışık dalgaları girişim yapar ve ekranda parlak ve karanlık saçaklardan oluşan karakteristik bir girişim deseni meydana gelir (Şekil 3). Bu saçak-

lar, farklı kaynaklardan gelen ışık dalgalarının bazı bölgelerde birbirini güçlendirmesi, bazı bölgelerde ise söndürmesi sonucunda oluşur. Bu olay, ışığın yalnızca parçacık modeliyle açıklanamaz.

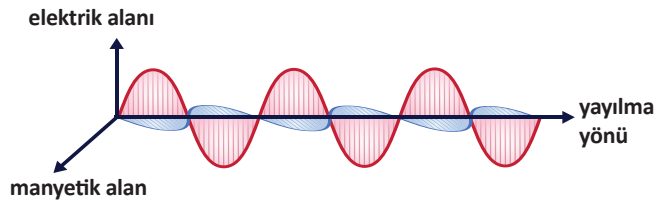


Şekil 3. Su dalgalarının (solda) ışık dalgalarıyla (ortada) karşılaştırılması ve ekranda elde edilen bir ışık girişim deseni (sağdaki fotoğraf)

Işık dalgaları, elektromanyetik dalgalar grubuna aittir. Ortamdaki parçacıkların salındığı mekanik dalgaların aksine, elektromanyetik dalgalarda elektrik ve manyetik alanlar salınır. Birbiriyle ilişkili bu iki alanın salınımı uzayda yayılır ve bir elektromanyetik dalga oluşturur (Şekil 4). Elektromanyetik dalgalar enine dalgalardır ve mekanik dalgaların aksine vakumda da yayılabilir. Tüm dalgalar gibi elektromanyetik dalgaların özellikleri de genlik, frekans, periyot, dalga boyu ve yayılma hızı ile tanımlanır.

Dalga Teorisi'ne göre ışık, elektromanyetik bir dalga gibi davranır. Bu sayede girişim, kırınım ve polarizasyon gibi olaylar başarıyla açıklanır.

Deneyler, ışığın hem dalga hem de parçacık özelliği gösterdiğini doğruladığından, ışığın dalga-parçacık ikiliğine sahip olduğu kabul edilir.



Şekil 4. Elektromanyetik dalga

Işık Hızı

Işığın doğasını inceledikten sonra, ışığın uzayda nasıl yayıldığı sorusu ortaya çıkar. Her dalga gibi ışık da belirli bir hızla yayılır ve en büyük hızına vakumda ulaşır.

Boşluktaki **ışık hızı c**, sabit bir değerdir ve tam olarak $299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Bu kesin değer metrenin tanımında kullanılırken, hesaplamalarda genellikle $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ gibi yaklaşık bir değer kullanılır. Işık dalga benzeri bir yapıya sahip olduğundan, dalga olaylarında kullandığımız formülleri burada da kullanacağız. Dolayısıyla, dalga hızı denklemi, dalgayı tanımlayan büyüklükler, yani frekans (f) ve dalga boyu (λ) cinsinden ifade edilir:

$$c = \lambda f,$$

burada elektromanyetik dalganın frekansı, dalgayı oluşturan kaynak tarafından belirlenir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Yeşil ışığın dalga boyu 550 nm'dir. O zaman frekansı nekadardır?

Verilenler:

$$\lambda = 550 \text{ nm} = 550 \cdot 10^{-9} \text{ m},$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

İstenen: f - ?

Çözüm:

Işık hızı denklemini kullanırız. Bu denklemi kullanarak frekansı şu şekilde ifade ederiz:

$$c = \lambda f \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda}.$$

Sayısal değerleri yerine koyarak

$$f = 545 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} = 545 \text{ THz} \text{ elde ederiz.}$$

Işık, maddi bir ortamda yayılırken hızı vakumdaki hızından daha düşüktür. Bunun nedeni, ışığın ortamı oluşturan atomlarla etkileşime girmesidir. Işığın hızı, Maxwell kuramına göre ortamın elektriksel ve manyetik özelliklerine bağlıdır. Bu kurama göre, belirli bir maddi ortamdaki ışık hızı aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}},$$

burada ϵ_r ortamın bağıl dielektrik sabiti, μ_r ise ortamın bağıl manyetik geçirgenliğidir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Modern telekomünikasyon sistemlerinde, özellikle optik fiberler aracılığıyla bilgi aktarımı için ışık kullanılır. Bir ışık sinyalinin 20 km mesafe boyunca iletilmesi gerekmektedir.

Işığın vakumdaki hızı $3 \cdot 10^8$ m/s'dir ve optik fiberde ise şu hızda ilerler: $2 \cdot 10^8$ m/s hızında ilerler.

Aşağıdakileri belirleyin:

a) Vakuma göre optik fiberdeki sinyal gecikmesi nedir?

b) Optik fiberin yapıldığı malzemenin bağıl dielektrik sabiti nedir? Bağıl manyetik geçirgenliğin 1 olduğu varsayılmaktadır.

Verilenler:

$$L = 20 \text{ km} = 2,0 \cdot 10^4 \text{ m},$$

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s},$$

$$v = 2,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}, \mu_r = 1$$

İstenen:

$$\Delta t = ?$$

$$\epsilon_r = ?$$

Çözüm:

a) Sinyalin vakumda bu mesafeyi katetmesi için gereken süre:

$$t_0 = \frac{L}{c} = 6,67 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Sinyalin aynı mesafeyi optik fiber içinde katetmesi için gereken süre:

$$t = \frac{L}{v} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Optik fiberdeki sinyalin, vakumdaki yayılıma göre gecikmesi:

$$\Delta t = t - t_0 = 3,33 \cdot 10^{-5} \text{ s}.$$

b) Elektromanyetik dalgaların hızı için Maxwell bağıntısına göre:

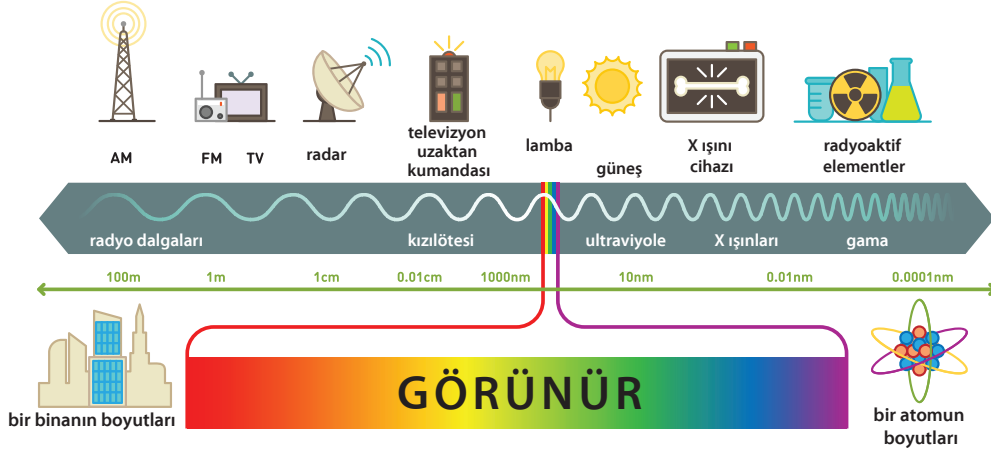
$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

$$\text{Buradan: } \epsilon_r = \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{c}{v} \right)^2 = 2,25$$



DAHA FAZLA ÖĞREN

Elektromanyetik dalgalar, farklı frekanslara ve buna bağlı olarak farklı özelliklere sahip olabilir. Bu nedenle elektromanyetik dalgalar; radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi ışınlar, görünür ışık, morötesi ışınlar, X ışınları ve gama ışınları olarak sınıflandırılır. Bunların tümü elektromanyetik dalgalar ve frekansları bakımından birbirinden ayrılır. Elektromanyetik dalgalar frekanslarına göre en düşükten en yükseğe doğru sıralandığında elektromanyetik spektrum elde edilir (Şekil 5).



Şekil 5. Elektromanyetik Spektrum ve Kullanıldığı Cihazlar



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Radyo cihazları birkaç yüz megahertz frekansta çalışmaktadır. Bu frekansa karşılık gelen dalga boyunu hesaplayınız.

Çözüm: Radyo dalgalarının kesin değeri verilmediğinden, aralığı incelemek için iki değer alacağız. Minimum değer olarak $f_1 = 100$ MHz'yi, maksimum değer olarak ise $f_2 = 300$ MHz'yi alıyoruz. Buna karşılık gelen dalga boyları şunlardır:

$$\lambda_{1,2} = \frac{c}{f_{1,2}},$$

$$\lambda_1 = 3 \text{ m} \quad \text{ve} \quad \lambda_2 = 1 \text{ m}.$$

Radyo dalgalarının dalga boyunun birkaç metre olduğu sonucuna varabiliriz. Bu nedenle, bu tür dalgalar için alıcıların uzunluğu da aynı büyüklük sırasındadır; çoğunlukla birkaç on santimetreden birkaç metreye kadar değişir.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Belirli bir ortamda yayılan bir elektromanyetik dalganın frekansı artarsa, dalga boyuna ne olur?
2. Elektromanyetik dalgalar vakumda yayılırken hangi büyüklükler salınır? Bu durum, ışığın dalga özelliği açısından neden bir sorun oluşturmaz?
3. İki elektromanyetik dalganın frekansı aynı, ancak dalga boyları farklıdır. Bu, vakumda mümkün müdür? Nedenini açıklayın.
4. Günlük yaşamda ışığın enerji taşıdığını nereden anlayabilirsiniz?
5. İki elektromanyetik dalga vakumda yayılır. Hangisi daha hızlı yayılır: frekansı daha yüksek olan mı, yoksa frekansı daha düşük olan mı?
6. Frekansı $5 \cdot 10^{14}$ Hz olan ışık vakumda yayılmaktadır. Bu ışığın dalga boyunu hesaplayınız. (Çözüm: 600 nm)
7. Bir radyo alıcısının anteni yaklaşık 75 cm uzunluğundadır. Alıcının çalıştığı dalga boyunun büyüklük sırasını belirleyiniz. (Çözüm: 1 m)

3.2. Işığın Yansıması. Düz Ayna

Şekil 1'de bulutların arasından görünen Güneş ışınları, ışığın doğrusal olarak yayıldığını gösterir. Işığın özelliklerini açıklamak için ışık ışınının idealize edilmiş bir modelini kullanırız. Işık ışını, ışığın yayılma yönünü gösteren hayali bir doğru parçasıdır. Aynı kaynaktan yayılan, aynı doğrultuda ve aynı yönde ilerleyen birden fazla ışık ışını bir **ışık demeti** oluşturur.

Işığın ikili doğası bağlamında:

- Parçacık modelinde ışık ışını, parçacığın izlediği yolu gösterir.
- Dalga modelinde ise ışık ışını, dalganın yayılma yönünü gösterir.

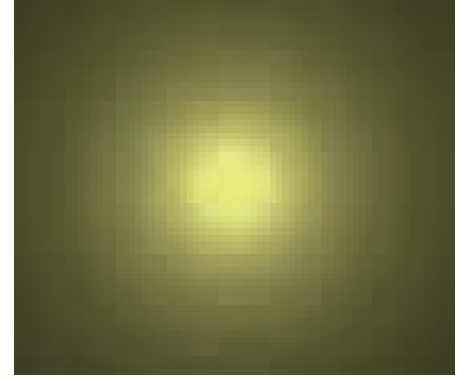
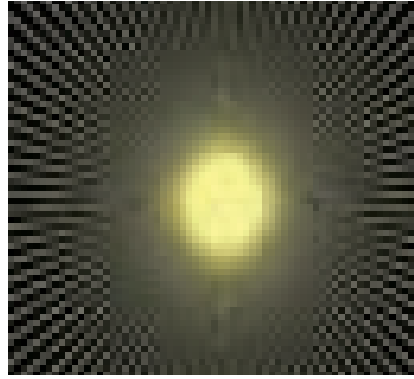
Sonraki derslerde, yayılma yönleri değiştiğinde ışık ışınlarının nasıl davrandığını inceleyeceğiz. Ancak önce paralel ışın demeti kavramını ele alacağız.

Uzak bir yıldız veya lamba gibi noktasal bir ışık kaynağı, her yöne ışık yayar. Işık ışını, ışığın yayılma yönünü gösteren hayali bir doğru parçasıdır. Bu nedenle tek bir kaynaktan farklı yönlerde sayısız ışık ışını yayılır (Şekil 2).

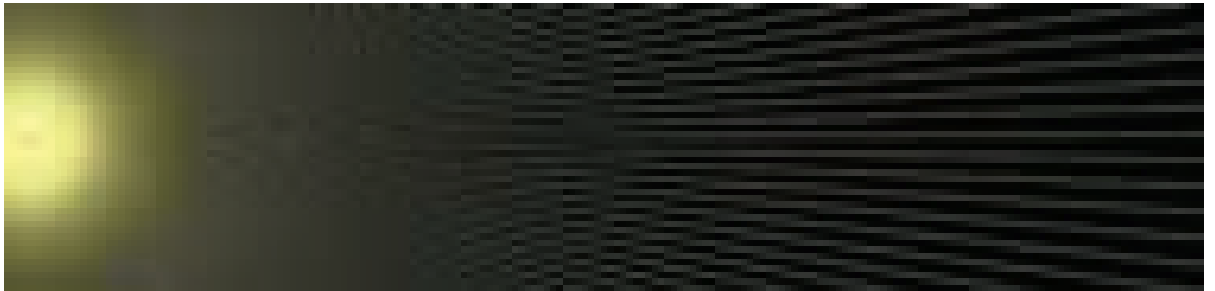
Işık kaynağına olan uzaklık arttıkça, ışık ışınlarının doğrultuları birbirine giderek daha fazla yaklaşır. Bu nedenle, yeterince büyük bir uzaklıkta ışık ışınları birbirine paralelmiş gibi kabul edilir (Şekil 3). Böyle bir durumda **paralel ışık ışını demetinin oluştuğu söylenir.**



Şekil 1. Güneş ışınları düz doğrular halinde ilerler



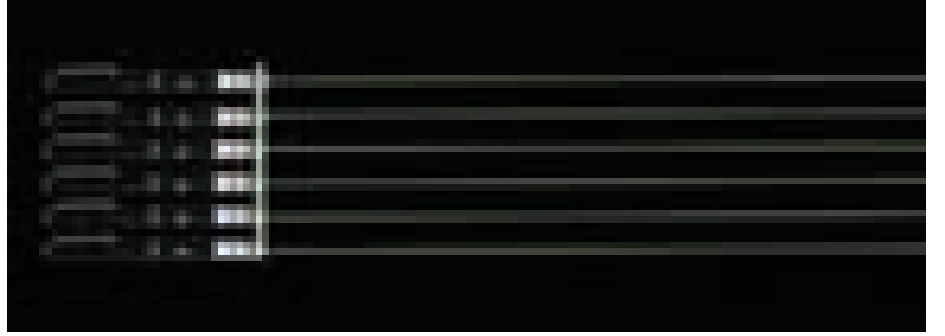
Şekil 2. Her yöne ışık ışınları yayan noktasal bir ışık kaynağı. Solda yalnızca ışınların bir kısmı gösterilmiştir. Sağda ise, tek bir kaynaktan sonsuz sayıda ışık ışını yayıldığı için gerçeğe daha yakın ve daha yoğun bir gösterim yer almaktadır.



Şekil 3. Uzak bir kaynaktan yayılan ışınlar neredeyse paraleldir

Gerçek koşullarda, Güneş'in Dünya'ya olan uzaklığının çok büyük olması nedeniyle, Güneş'ten gelen ışınlar Dünya yüzeyine ulaştıklarında birbirine paralel kabul edilir. Paralel ışık ışını demetleri, lazerler veya ışığın yayılma yönünü değiştiren optik düzenekler kullanılarak da elde edilebilir (Şekil 4).

Işık bir ortamdan diğere geçtiğinde yansiyabilir, ikinci ortama kırılabilir veya soğurulabilir. Bu olaylar aynı anda da gerçekleşebilir. Işığın bir ortamdan diğere geçerken geldiği ortama geri dönmesine yansıma denir. Bu bölümde yansıma olayı incelenecektir.

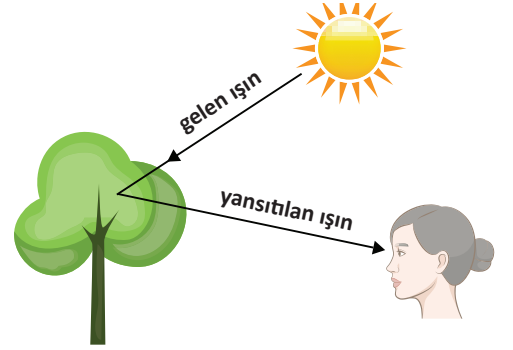


Şekil 4. Birden fazla lazerden gelen paralel ışık demeti

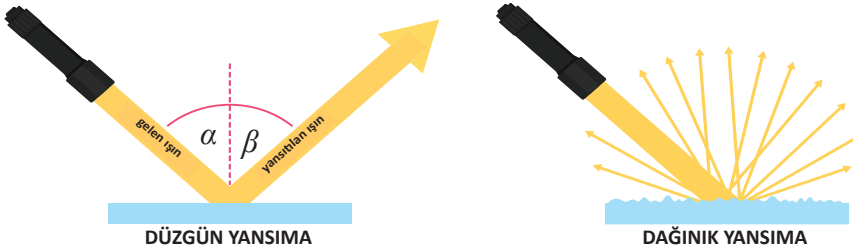
Yansıma sayesinde cisimler görülebilir (Şekil 5).

Işık pürüzlü bir yüzeye çarptığında, yansıyan ışınlar farklı yönlerde dağılır ve yansıma yönü yüzeyin yerel şekline bağlıdır. Bu tür yansımaya **dağınık yansıma** denir. Uygulamada, çoğu yüzey ışığı dağınık olarak yansıtır.

Bunun aksine, pürüzsüz bir yüzeye gelen paralel ışık ışını demeti, yansıdıktan sonra da paralellliğini korur. Bu tür yansımaya düzgün (ayna) yansıma denir. Dağınık yansıma ile düzgün yansıma arasındaki fark Şekil 6'da gösterilmiştir.

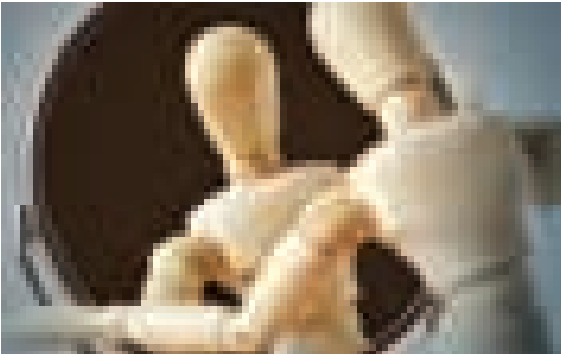


Şekil 5. Güneş ışınları ağaçtan yansıyarak ağaca bakan kişinin gözüne ulaşır.



Şekil 6. Işığın düzgün (solda) ve dağınık (sağda) yansıması

Paralel ışık ışınlarının yansıdıktan sonra da paralel kalmasını sağlayan düz ve pürüzsüz yüzeye düz ayna denir. Düz aynalar, ev aynalarında, cam yüzeylerde ve çeşitli teknik ile dekoratif uygulamalarda yaygın olarak kullanılır (Şekil 7).



Şekil 7. Düz aynadaki görüntü

Düz aynada ışığın yansımasını açıklamak için, ışığın aynaya ulaştığı noktadaki tek bir ışık ışınının davranışını incelemek yeterlidir. Bu noktada, ayna yüzeyine dik olan doğruya normal denir. Aynaya gelen ışık ışınına **gelen ışın**, aynadan yansıyan ışık ışınına ise **yansıyan ışın** denir (Şekil 8). Şekillerin daha kolay anlaşılabilmesi için çizimlerde aynanın arka yüzeyi genellikle taranarak gösterilir.

Gelen ışının normal ile yaptığı açıya **gelme açısı**, yansıyan ışının normal ile yaptığı açıya ise **yansımaya açısı** denir.

Yansımaya yasası



ETKİNLİK 1.

Düz aynadan ışığın yansımaya

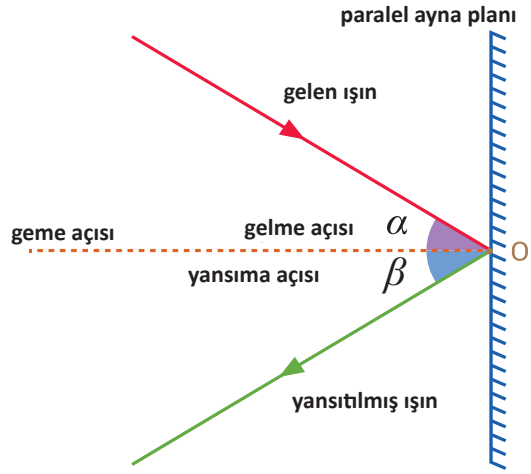
Amaç: Işık düz aynadan yansıdığında, gelme açısı ile yansımaya açısı arasındaki ilişkiyi belirlemek.

Aletler: Paralel ışık ışını demeti oluşturan bir ışık kaynağı (veya lazer), alt kenarı düz olan bir düz ayna, bir açıölçer, bir cetvel, bir kurşun kalem ve bir kâğıt.

Yöntem:

1. Kâğıda, ayna yüzeyini temsil eden düz bir çizgi çizilir. Bu çizgi üzerindeki bir noktadan, ayna yüzeyine dik olan doğru, yani normal çizilir.
2. Aynanın alt kenarı, ayna yüzeyini temsil eden çizgi üzerine tam olarak yerleştirilir. Lazer ışını, normale göre belirli bir açı yapacak şekilde, normalin ayna yüzeyiyle kesiştiği noktaya yönlendirilir.
3. Bir kâğıt üzerinde, hem gelen ışın hem de yansıyan ışın için iki nokta işaretlenir. Ardından kaynak kapatılır ve gelen ile yansıyan ışınlar cetvel kullanılarak çizilir. Farklı ölçümlerden elde edilen ışınlar, örneğin 1 ve 1', 2 ve 2' vb. şeklinde gösterilir.
4. Kaynağı hareket ettirerek gelme açısını değiştirerek, bu işlem en az beş farklı gelme açısı değeri için tekrarlanır.
5. Gelme açısı α ve yansımaya açısı β açı ölçer ile ölçülür.
6. Ölçülen değerler, aşağıdaki sütunları içeren bir tabloya kaydedilir:
7. Her ölçüm için α / β oranı hesaplanır ve sonuçlara dayalı olarak bir sonuç çıkarılır.

N	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\frac{\alpha}{\beta}$
1			
2			
...			



Şekil 8. Etkenleri etiketlenmiş düz aynada bir ışık ışınının yansımaya

Deney sonuçlarından, tüm ölçümlerde gelme açısı ile yansımaya açısı arasındaki oranın yaklaşık olarak 1'e eşit olduğu gözlemlenir. Bu, gelme açısı ile yansımaya açısının aynı değerlere sahip olduğu anlamına gelir.

Bu ilişki, Işığın Yansımaya Yasası olarak bilinir ve şu şekilde ifade edilir: Gelme açısı, yansımaya açısına eşittir. Gelen ışın, normal ve yansıyan ışın aynı düzlemde bulunur.

Bu yasa, Şekil 8'de gösterilen sembollerle matematiksel olarak şu şekilde de yazılabilir:

$$\alpha = \beta$$

Yansımaya yasası, ışığın yansımaya yasasının daha ayrıntılı analizinin temelini oluşturur ve düz aynanın önünde bulunan bir cismin görüntüsünün konumunun tahmin edilmesini sağlar.

Düz aynada görüntü oluşumu

Bir cisim düz aynanın önüne yerleştirildiğinde, cisimden yayılan veya cisim tarafından yansıtılan ışık ışınları ayna yüzeyine ulaşır ve Yansıma Yasası'na göre yansır. Aynaya bakıldığında, cisim gerçekte orada bulunmamasına rağmen aynanın arkasında yer almış gibi görünür.

Optikte görüntü, ışığın bir optik elemandan yansıması veya kırılması sonucunda, cismin bulunduğu yer-deymiş gibi algılanan nokta ya da nokta kümesidir.

Örneğin, düz aynada bir bitkinin görüntüsünün oluşumunu ele alalım. Basitlik açısından, bitkinin en üst ve en alt noktası gibi iki karakteristik noktayı inceleyeceğiz. Bu noktalardan çıkan ışık ışınları her yöne yayılır. Bu ışınların bir kısmı ayna yüzeyine ulaşır ve Yansıma Yasası'na göre yansır (Şekil 9). Şekilde yalnızca birkaç ışık ışını gösterilmiştir; ancak gerçekte bu noktalardan sonsuz sayıda ışık ışını yayılır.

Düz aynadan yansıyan ışık ışınları, cismin incelenen her noktası için yayılmaya devam eder ve aynanın önündeki uzayda kesişmez. Ancak, bu ışınların uzantıları aynanın arkasına doğru çizildiğinde, her nokta için tek bir noktada kesişiyormuş gibi görünür. Bu noktalar, cismin karşılık gelen noktalarının görüntülerini oluşturur. Bu görüntü noktaları birleştirildiğinde cismin görüntüsü elde edilir.

Görüntü, yansıyan ışınların uzantılarının kesiştiği noktada oluşur. Aynanın arkasında bulunur ve bir ekran üzerine düşürülemez. Bu nedenle **sanal görüntü olarak** adlandırılır.

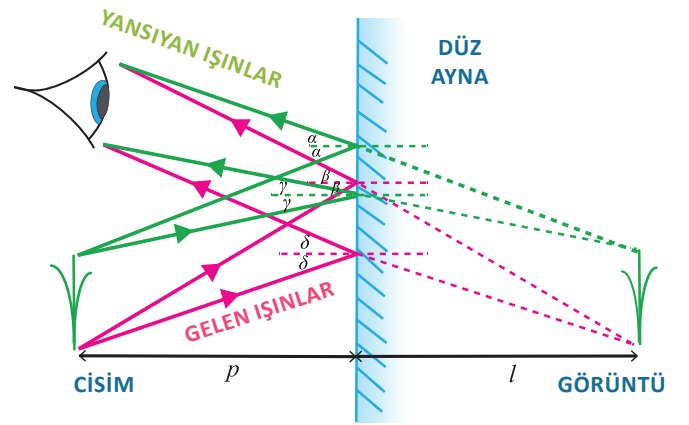
Işın geometrisinden, cismin aynaya olan uzaklığının görüntünün aynaya olan uzaklığına eşit olduğu görülür. **Düz aynalar** için aşağıdaki bağıntı geçerlidir:

$$p = l,$$

Burada p cismin aynaya olan uzaklığını, l ise görüntünün aynaya olan uzaklığını gösterir. Görüntünün yönü cismin yönüyle aynıdır; yani görüntü diktir.



Şekil 10. Düz Aynada Ayna Simetrisi



Şekil 9. Düz aynada bir cismin görüntüsünün oluşumu

Düz aynada, cismin sol tarafı sağ taraf olarak, sağ tarafı ise sol taraf olarak görünür. Bu özelliğe ayna simetrisi denir. Dolayısıyla, düz aynadaki görüntü cisme göre **ayna simetrisine** sahiptir (Şekil 10).

Düz aynada oluşan görüntü, aşağıdaki üç temel özelliğe sahiptir:

Boyut: Görüntü, cisimle aynı boyuttadır.

Yön: Görüntü diktir.

Görüntü türü: Görüntü sanaldır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

15 cm uzunluğundaki bir kurşun kalem, aynanın 0,5 m uzağına yerleştirilmiştir. Görüntünün uzaklığını belirleyin, özelliklerini belirleyin ve cisim, ayna ve görüntünün karakteristik ışınlarını gösteren bir çizim yapın.

Verilenler: $h_p = 15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}$ $p = 0,5 \text{ m}$	Çözüm: Düz ayna bağıntısına göre, cismin aynaya olan uzaklığı: $p = l$ $l = 0,5 \text{ m}.$ Görüntü, cisimle aynı boyutta, dik ve cisme göre ayna simetrisine sahip olacaktır. Ayrıca görüntü sanaldır.	
---	--	--



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Düz aynadaki görüntü neden her zaman sanaldır? Işıkların davranışını kullanarak açıklayın.
2. Ayna çok küçükse görüntü nasıl görünür? Hangi özellikler değişir, hangileri değişmez?
3. İki cisim, düz aynadan farklı mesafelerde bulunmaktadır. Görüntüleri üst üste binecek mi? Hangi koşullar altında?
4. Aşağıdaki resimde olduğu gibi bir analog saatin yansımaya bakarsanız, ibreler hangi yönde döner?
5. Bir lazer ışını, düz bir aynaya normale göre 30° 'lik bir açıyla gelir. Daha sonra ayna, gelen ışının yönü değiştirilmeden θ açısı kadar döndürülür. Aynanın döndürülmesinden sonra yansıma açısı nasıl değişir? Yansıma açısını θ 'nin bir fonksiyonu olarak ifade ediniz. (Çözüm: 2θ)
6. Bir cisim, düz aynadan 1,5 m uzaklığa yerleştirilmiştir.
 - a) Görüntünün cisme olan uzaklığını hesaplayınız.
 - b) Cisim aynaya 0,3 m yaklaştırılırsa, cisim ile görüntü arasındaki uzaklığı hesaplayınız. (Çözüm: 3 m; 2,4 m)



3.3. Küresel Aynalar

Önceki derste, ışık ışınlarının Yansıma Yasası'na göre düz aynadan nasıl yansıdığını ve yansıyan ışınların yardımıyla görüntünün konumunun nasıl belirlendiğini inceledik.

Şimdi, Şekil 1a'da gösterildiği gibi, paralel bir ışık ışını demetinin birkaç küçük, düz aynadan yansıması durumunu ele alalım. Çizimde sadece birkaç ışın gösterilmiş olsa da, gerçekte bunların sayısı sonsuzdur. Yansıma yasası her bir ayna için geçerlidir, ancak aynalar farklı açılarda yerleştirildiğinden yansıyan ışınlar farklı yönlerde yönelir. Bu olaya dağınık yansıma denir.

Küçük düz aynalar, bir çembere teğet olacak şekilde yerleştirilirse (Şekil 1b ve 1c), aynaların sayısı artırılıp boyutları küçültüldükçe ortak yüzeyleri giderek düzgün eğri bir yüzeye benzemeye başlar. Sınır durum-

da, aynaların sayısı çok fazla ve boyutları çok küçük olduğunda kesintisiz bir eğri yüzey elde edilir.

İnceleme iki boyutlu düzlemde yapıldığından, şekillerde kürenin değil, çemberin bir parçası gösterilmiştir. Gerçekte ise bu eğri yüzey, bir kürenin parçasını temsil eder. Yansıtıcı yüzeyi bir kürenin parçası olan aynaya **küresel ayna** denir.



Şekil 1. Paralel bir ışık ışını demetinin farklı biçimlerde yerleştirilmiş küçük düz aynalardan yansması:
a) Rastgele yerleştirilmiş aynalar, b) ve c) Bir çembere teğet olacak şekilde yerleştirilmiş aynalar.

Küresel aynalar, yansıtıcı yüzeyin küresel yüzeyin hangi tarafında bulunduğuyla ilgili olarak **dışbükey** veya **içbükey** olabilir. Yansıtıcı yüzey kürenin dış yüzeyindeyse ayna dışbükey, iç yüzeyindeyse içbükey aynadır. Aynı küresel yüzeyin her iki tarafı da yansıtıcı olabilir. Bunun günlük yaşamdaki yaygın örneklerinden biri metal mutfak kaşığıdır (Şekil 2).



Şekil 2. Aynanın her iki tarafında odak noktası

Küresel aynaların temel unsurları

Küresel aynalarda görüntü oluşumunu açıklamak için, önce aynaların temel elemanlarını tanıtacağız. Matematik derslerinden hatırlayacağınız gibi: bir çemberin veya kürenin herhangi bir noktasına dik olan normal, her zaman merkezin-den geçer.

Eğrilik merkezi C , aynanın bir parçası olduğu kürenin merkezidir.

Eğrilik yarıçapı R , eğrilik merkezi ile aynanın tepe noktası arasındaki uzaklıktır; yani aynanın ait olduğu kürenin yarıçapıdır.

T tepe noktası, dışbükey aynada yüzeyin en dış noktasını, içbükey aynada ise yüzeyin en iç noktasını gösterir.

Ana optik eksen, aynanın tepe noktası ile eğrilik merkezinden geçen doğrudur

Küresel aynaların temel elemanları Şekil 3'te gösterilmiştir.



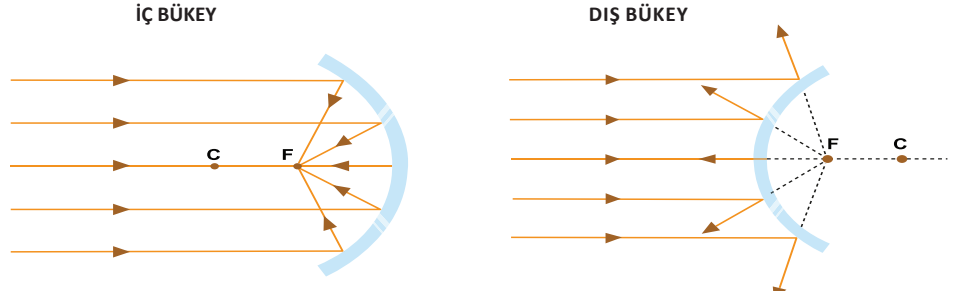
Şekil 3. Küresel aynaların temel elemanları: asal eksen (ana optik eksen),
 C – eğrilik merkezi, F – odak noktası ve T – tepe noktası.

Küresel aynalarda ışığın yansıması

Küresel aynalarda görüntünün konumunu belirlemek için Yansıma Yasası uygulanır. İçbükey bir küresel aynaya, ana optik eksene paralel bir ışık ışını demetinin geldiğini düşünelim (Şekil 4, sol).

Yansıma sonrasında tüm ışık ışınları, aynanın önünde bulunan tek bir noktada kesişir. Aynı işlem dışbükey ayna için de yapılabilir. Bu durumda yansıyan ışık ışınları farklı yönlere yayılır. Ancak, yansıyan ışınların uzantıları çizildiğinde, bunların aynanın arkasındaki tek bir noktada kesiştiği, yani ışınların bu noktadan geliyormuş gibi görüldüğü anlaşılır (Şekil 4, sağ).

İçbükey aynada, ana optik eksene paralel gelen ışık ışınlarının yansıdıktan sonra kesiştiği nokta; dışbükey aynada ise yansıyan ışınların uzantılarının kesiştiği nokta, **aynanın odak noktası (F) olarak adlandırılır.**



Şekil 4. İçbükey (solda) ve dışbükey (sağda) aynalarda paralel ışık ışını demetinin yansıması.

İçbükey aynanın odak noktası **gerçek**, dışbükey aynanın odak noktası ise **sanal** odaktır. Odak noktası ile ayna arasındaki uzaklığa odak uzaklığı denir. Odak noktası **F** harfiyle, odak uzaklığı ise **f** harfiyle gösterilir (Şekil 3).

Küresel aynalar için odak uzaklığı, eğrilik yarıçapının yarısı kadardır. Dolayısıyla, aşağıdaki bağıntı geçerlidir::

$$f = \frac{R}{2}$$

Küresel bir ayna tarafından oluşturulan görüntünün konumunu ve özelliklerini belirlemek için, aşağıdaki üç **karakteristik ışından** ikisi kullanılır (Şekil 5):

Işın 1

- İçbükey aynada, ana optik eksene paralel gelen ışık ışını yansıdıktan sonra odak noktasından geçer
- Dışbükey aynada: aynı ışın, yansıma sonrasında sanki sanal odak noktasından çıkmış gibi ıraksar.

Işın 2

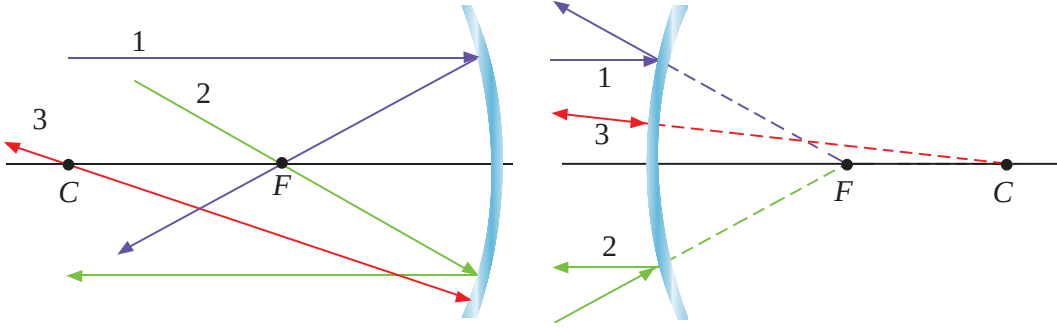
- İçbükey aynada: odak noktasından giren bir ışın, yansıma sonrasında optik eksene paralel olarak ilerlemeye devam eder.
- Dışbükey aynada: sanal odak noktasına doğru yönelen ışık ışını yansıdıktan sonra ana optik eksene paralel olarak ilerler.

Işın 3

- Her iki aynada da, eğrilik merkezinden geçen ışık ışını geldiği doğrultu boyunca geri yansır. Bu karakteristik ışınlar, Işığın Yansıma Yasası'ndan elde edilir.

İçbükey aynada ise yansıyan ışın ana optik eksene paralel olarak ilerler.

Dışbükey küresel aynada yansıyan ışınlar ıraksaktır. Bu nedenle görüntü oluşturulurken, aynanın arkasında kesişen yansıyan ışınların uzantıları kullanılır.



Şekil 5. Küresel aynaların karakteristik ışınları: içbükey (solda) ve dışbükey (sağda).

Küresel aynalarda görüntü oluşumu

Karakteristik ışınları kullanarak, küresel aynalarda bir cismin görüntüsünü oluşturabiliriz. Cisim, ana optik eksene dik bir ok ile gösterilir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Konkav küresel aynanın önünde, odak noktası F ile eğrilik merkezi C arasında bulunan bir ışınla temsil edilen bir cismin görüntüsünü oluşturmak.

Çözüm:

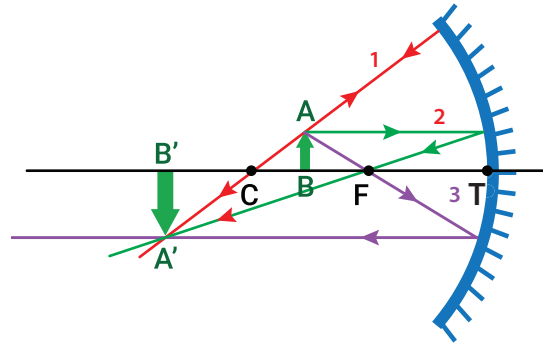
İlk olarak, optik eksen ve ayna çizilir; tepe noktası T, odak noktası F ve eğrilik merkezi C işaretlenir. Cisim, F ve C noktaları arasına yerleştirilen, optik eksene dik bir ok ile gösterilir. Okun ucundaki görüntü A, iki karakteristik ışın kullanılarak oluşturulur:

- Ana optik eksene paralel gelen ve yansıdıktan sonra odak noktasından geçen bir ışın (1),
- Odak noktasından geçerek aynaya gelen ve yansıdıktan sonra ana optik eksene paralel ilerleyen bir ışın (2).

Yansıtılan ışınların kesişme noktası A' noktasını belirler. Şu nedenle B noktası optik eksen üzerinde olduğundan, görüntüsü B' de optik eksen üzerindedir. A' ve B' noktalarını birleştirerek A'B' görüntüsü elde edilir.

Ortaya çıkan bu yapıdan, görüntünün aynanın önünde, cisimle aynı tarafta olduğu görülebilir; bu durumda:

- Eğrilik merkezinden daha uzakta yer alır.
- Cisme göre ters çevrilmiştir;
- Cisimden daha büyüktür.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Dışbükey küresel aynanın önünde bulunan ve bir okla gösterilen bir cismin görüntüsünü oluşturmak.

Çözüm:

İlk olarak ana optik eksen çizilir. Daha sonra tepe noktası (T), odak noktası (F) ve eğrilik merkezi (C) işaretlenir. Dışbükey aynada bu noktalar aynanın arkasında bulunur. Cisim, tabanı ana optik eksen üzerinde bulunan ve eksene dik bir ok ile gösterilir. Okun ucundaki B noktasının görüntüsü, iki karakteristik ışın kullanılarak oluşturulur:

- Ana optik eksene paralel gelen bir ışık ışını (2), yansdıktan sonra ıraksar. Bu ışının uzantısı aynanın arkasındaki odak noktasından geçer.
- Sanal odak noktasına doğru yönelen bir ışık ışını (3), yansdıktan sonra ana optik eksene paralel olarak ilerler.

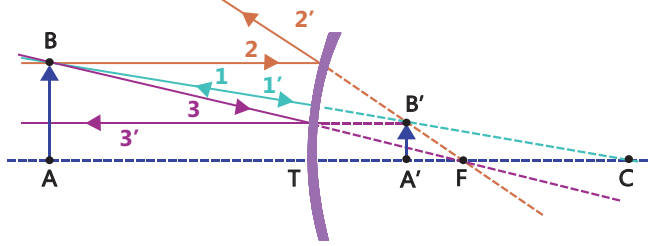
Yansıyan ışınlar aynanın önünde kesişmez. Ancak bu ışınların uzantıları aynanın arkasında bir noktada kesişir. Bu nokta, **B'** görüntüsünün konumunu belirler. İstenirse, eğrilik merkezine doğru yönelen üçüncü karakteristik ışın kullanılarak çizim kontrol edilebilir. Şekilde bu üç karakteristik ışın da gösterilmiştir.

Şekilden görüldüğü gibi görüntü aynanın arkasında oluşur. Buna göre görüntü:

Tepe noktası ile odak noktası arasında yer alır.

Cisme göre diktir.

Cisimden daha küçüktür.



Küresel aynalarda görüntü oluşturulurken, bazı durumlarda yansıyan ışınlar kesişirken, bazı durumlarda ise yalnızca bu ışınların uzantıları aynanın arkasında kesişir. Bu ayrım, görüntünün bir ekran üzerine düşürülüp düşürülemeyeceğini belirlediği için fiziksel açıdan önemlidir. Bu nedenle, gerçek görüntü ile sanal görüntü arasında ayrım yapılır. Gerçek görüntü, yansıyan ışınların kesiştiği noktada oluşur ve bir ekran üzerine düşürülebilir. Sanal görüntü ise yansıyan ışınların uzantılarının aynanın arkasında kesiştiği noktada oluşur ve bir ekran üzerine düşürülemez.

Görüntünün tam bir tanımını yapmak için aşağıdaki özellikleri dikkate alırız:

- görüntünün gerçek mi yoksa sanal mı olduğu;
- aynaya, odak noktasına ve eğrilik merkezine göre konumu;
- cisme kıyasla boyutu;
- yönü (dik veya ters).



ETKİNLİK 1.

Bir içbükey küresel aynanın önüne yerleştirilen bir cismin ve bir dışbükey küresel aynanın önüne yerleştirilen bir cismin görüntülerini oluşturunuz. Aşağıdaki durumlar için görüntülerin özelliklerini belirleyiniz:

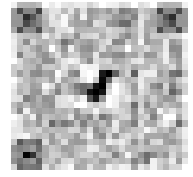
- Cisim eğrilik merkezinin dışında iken,
- Cisim eğrilik merkezinde iken,
- Cisim odak noktasında iken,
- Cisim odak noktası ile aynanın tepe noktası arasında iken.

Geometrik çizimden elde ettiğiniz sonuçları doğrulamak için PhET platformundaki Geometrik Optik (Geometric Optics) simülasyonunu kullanınız. Simülasyona aşağıdaki bağlantıdan ulaşabilirsiniz.

https://phet.colorado.edu/sims/html/geometric-optics/latest/geometric-optics_all.html

Simülasyonu kullanma talimatları

1. Simülasyonu açtıktan sonra **Ayna (Mirror)** modunu seçiniz.
2. Sunulan seçeneklerden İçbükey Ayna (**Concave Mirror**) veya Dışbükey Ayna (**Convex Mirror**) seçeneğini seçiniz.
3. Aşağıdaki seçenekleri etkinleştiriniz:



- Odak noktası (Focal Point)
 - Sanal görüntü (Virtual Image)
 - Işık ışınları (Rays → Principal Rays)
- Cisim olarak bir ok, iğne veya simülasyonda sunulan diğer şekiller kullanılabilir. Fareyi kullanarak cisim ana optik eksen boyunca hareket ettiriniz ve aşağıdaki özelliklerin nasıl değiştiğini gözlemleyiniz:
 - Görüntünün konumu,
 - Boyutu,
 - Yönü,
 - Görüntünün gerçek mi yoksa sanal mı olduğu.
 - Gözlemlerinizi, bu etkinliğin başından itibaren yaptığınız geometrik çizimlerle karşılaştırarak doğrulayınız.

Örneklerde ve Etkinlik 1'de elde edilen sonuçlara dayanarak, küresel aynalarda oluşan görüntülerin özellikleri sınıflandırılabilir. Tablo 1'de, her iki küresel ayna türü için cismin farklı konumlarında oluşan görüntülerin temel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Küresel aynalarda görüntünün özellikleri

Ayna türü	Cisim konumu	Görüntü türü	Görüntü konumu	Görüntü boyutu	Yön
İçbükey	F Odak noktasından daha uzakta	Gerçek	Aynanın önünde	Daha küçük veya daha büyük*	Ters
İçbükey	F Odak noktasında	—	Görüntü oluşmaz	—	—
İçbükey	F ile T arasında	Hayali	Aynanın arkasında	Daha büyük	Dik
Dışbükey	Herhangi bir konum	Hayali	Aynanın arkasında	Daha küçük	Dik

* Görüntünün boyutu, cismin eğrilik merkezine göre konumuna bağlıdır.

Küresel aynanın denklemi

Şimdiye kadar, karakteristik ışınları kullanarak geometrik bir yapı aracılığıyla görüntünün konumunu ve özelliklerini belirledik. Bu yaklaşım görüntüyü net bir şekilde ortaya koysa da, birçok pratik durumda konumunu ve boyutunu hesaplama yoluyla belirlemek daha elverişlidir. Özellikle, görüntünün aynadan uzaklığını hesaplamak önemlidir. Deneyler, cismin aynadan uzaklığı p , görüntünün aynadan uzaklığı l ve odak uzaklığı f arasında aşağıdaki ilişkinin olduğunu göstermiştir:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{l}$$

Küresel ayna denklemi olarak bilinen bu denklem, tüm küresel aynalar için geçerlidir.

İçbükey bir aynada odak uzaklığı pozitifken, dışbükey bir aynada odak noktası sanal olup odak uzaklığı negatif olarak kabul edilir. Görüntü, aynanın önünde oluşuyorsa (gerçek görüntü) görüntü uzaklığı l pozitif, aynanın arkasında oluşuyorsa (sanal görüntü) negatif olarak kabul edilir.

Görüntünün konumunun yanı sıra, cisme göre boyutu da bir başka önemli özelliktir. Görüntünün cisme göre kaç kat büyütüldüğünü veya küçültüldüğünü gösteren orana **büyütme oranı** denir.

Aynanın büyütme oranı (U), görüntünün yüksekliği (h_l) ile cismin yüksekliği (h_p) arasındaki oran olarak tanımlanır:

$$U = \frac{h_l}{h_p}$$

Küresel aynalar için büyütme oranı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$U = \frac{|l|}{p},$$

burada p cisimden aynaya olan uzaklığı; l ise aynadan görüntüye olan uzaklığı gösterir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Yüksekliği 2 cm olan bir cisim, odak uzaklığı 6 cm olan içbükey küresel bir aynadan 12 cm uzağa yerleştirilmiştir. Aşağıdakileri bulun:

- Görüntünün aynadan uzaklığı, l .
- Büyütme oranı, U .
- Görüntünün boyutu ve yönünü.

Verilenler:

$f = 6 \text{ cm},$
 $p = 12 \text{ cm},$
 $h = 2 \text{ cm}.$

Çözüm:

- Görüntünün uzaklığı, küresel aynanın bağıntısıyla belirlenir: $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{l}$
 Bu bağıntıdan görüntü uzaklığı l için: $\frac{1}{l} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p}$, dolayısıyla, $l = \frac{fp}{p-f} = 12 \text{ cm}.$
- Görüntünün büyütmesi şu şekilde hesaplanır: $U = \frac{l}{p} = \frac{12 \text{ cm}}{12 \text{ cm}} = 1.$
- Görüntünün yüksekliği: $h_l = Uh_p = 2 \text{ cm}.$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 4.

Yüksekliği 3 cm olan bir cisim, dışbükey küresel aynadan 24 cm uzaklıkta yerleştirilmiştir. Görüntünün büyütme oranı 0,4'tür. Aşağıdakileri belirleyin:

- Görüntünün aynadan uzaklığı;
- Odak uzaklığı;
- Görüntünün yüksekliği.

Verilenler:

$h_p = 3 \text{ cm},$
 $p = 24 \text{ cm},$
 $U = 0,40$

Çözüm:

- Küresel aynalarda büyütme şu bağıntıyla verilir: $U = \frac{|l|}{p}.$

Buradan: $|l| = U \cdot p, |l| = 0,4 \cdot 24 \text{ cm} = 9,6 \text{ cm}.$

Ancak, dışbükey aynada görüntü sanaldır ve aynanın arkasında oluşur. Bu nedenle görüntü uzaklığı negatiftir: $l = -9,6 \text{ cm}.$

- Küresel ayna denklemi: $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{l},$

Buradan: $f = \frac{pl}{p+l} = -16 \text{ cm}.$

- Büyütme, görüntü yüksekliğinin cisim yüksekliğine oranı olarak tanımlanır: $U = \frac{h_l}{h_p},$

Buradan: $h_l = Uh_p = 1,2 \text{ cm}.$

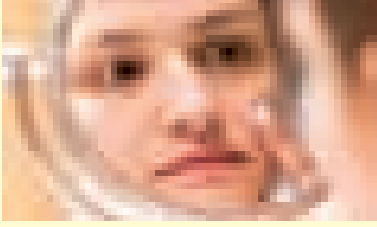
Sonuç:

Görüntü aynadan 9,6 cm uzaklıkta bulunur, yüksekliği 1,2 cm'dir ve cisimden daha küçüktür. Odak uzaklığının negatif olması, aynanın dışbükey ayna olduğunu doğrular. Görüntü sanaldır ve aynanın arkasında oluşur.

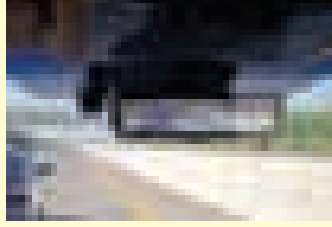


GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

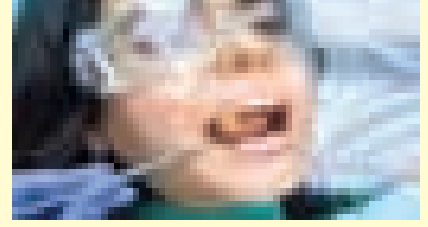
Küresel aynalar, günlük yaşamda sanıldığından çok daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun en yaygın örneklerinden biri, bir yüzeyi düz, diğer yüzeyi ise içbükey olan makyaj aynalarıdır. Yüz aynaya odak uzaklığından daha yakın tutulduğunda, düz, büyütülmüş ve sanal bir görüntü oluşur. Bu özellik, makyaj yaparken veya tıraş olurken ayrıntıların daha net görülmesini sağlar (Şekil 6).



Şekil 6. Makyaj aynasındaki yansıma



Şekil 7. Dikiz aynasındaki görüntü

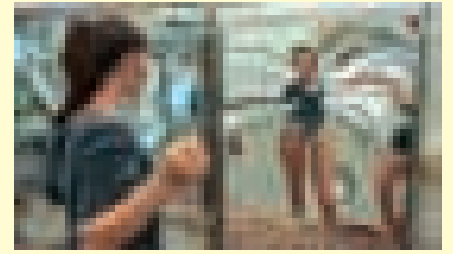


Şekil 8. Diş hekimi muayenehanesindeki içbükey ayna

Dışbükey küresel aynalar, temel amacı daha geniş bir görüş alanı sağlamak olan araç dikiz aynalarında kullanılır. Bu tür aynalardaki görüntü küçültülmüş ve sanal olsasına rağmen, sürücü arkasındaki cisimleri daha iyi görebilir ve bu da yol güvenliğini artırır (Şekil 7).

Tıpta, diş hekimleri dişlerin ulaşılması zor yüzeylerinin büyütülmüş görüntüsünü elde etmek için küçük içbükey aynalar kullanır (Şekil 8).

Çeşitli küresel aynalar, eğlence parklarındaki ayna labirentlerinde de bulunur; burada görsel etki ve eğlence amacıyla kasıtlı olarak farklı büyüklük ve biçimlerde görüntüler oluşturulur (Şekil 9).



Şekil 9. Sihirli aynalı bir odada deforme olmuş görüntü "sihirli ayna odası"



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Düz aynanın eğrilik yarıçapı kaçtır? Odak uzaklığı kaçtır? Açıklayınız.
2. Parlak bir çorba kaşığına kolunuzun uzanabileceği kadar uzağa tutun ve kaşığın arkasına bakın. Gördüğünüz görüntü dik mi yoksa ters mi? Görüntü büyütülmüş mü yoksa küçültülmüş mü? Görüntü gerçek mi yoksa sanal mı?
3. Bir cisim, odak uzaklığı 15 cm olan içbükey küresel aynadan 30 cm uzaklıktadır. Görüntünün aynaya olan uzaklığını ve görüntünün gerçek mi yoksa sanal mı olduğunu belirleyin. (Çözüm: 30 cm, görüntü gerçektir)
4. Yüksekliği 4 cm olan bir cisim, odak uzaklığı -10 cm olan bir dışbükey aynadan 20 cm uzağa yerleştirilmiştir.
 - a) Görüntünün uzaklığını bulun.
 - b) Görüntünün yüksekliğini bulun.
 - c) Görüntünün türünü, boyutunu ve yönünü belir?
 (Çözüm: 6,67 cm; 1,33 cm; görüntü sanal, küçültülmüş ve dik)
5. Bir cisim, içbükey küresel aynanın önünde eğrilik merkezinin dışından tepe noktasına doğru hareket etmektedir. Bu durumda görüntünün konumunun, boyutunun ve türünün nasıl değiştiğini açıklayınız.
6. Odak uzaklığının mutlak değeri, cismin aynaya olan uzaklığı yarısı olan bir küresel ayna verilmiştir.
 - a) Büyütme oranını p / f oranı cinsinden ifade edin.
 - b) İçbükey ve dışbükey aynaların durumlarını ayrı ayrı ele alın.
 - c) Her iki durumda da büyütme oranının mutlak değeri aynı olabilir mi?

3.4. Işığın Kırılması

Güneş ışığı berrak suya düştüğünde suyun dibi görülebilir. Ancak su bulanık olduğunda, ışık suyun içinden yeterince geçemez ve dip görünmez.

Işığın geçebildiği ortamlara saydam veya yarı saydam ortamlar denir. Buna karşılık, ışığı geçirmeyip emen ya da yansıtan ortamlara opak (saydam olmayan) ortamlar denir. Birçok madde ise ne tamamen saydam ne de tamamen opaktır. Genellikle üzerlerine düşen ışığın yalnızca bir kısmını geçirirler. Bir ortamdan geçen ışık miktarı, ortamın ışık geçirgenliği (T) ile ifade edilir. Işık geçirgenliği, geçen ışık şiddetinin (I), gelen ışık şiddetine (I_0) oranı olarak tanımlanır

$$T = \frac{I}{I_0}.$$

Tamamen saydam bir ortamda bu oran 1, ışığı hiç geçirmeyen bir ortamda ise 0'dır. Işığın yayılmasının incelendiği, belirli bir ışık geçirgenliğine sahip ortama **optik ortam** denir.

Işık bir saydam ortamdan diğerine geçtiğinde ilginç bir olay meydana gelir. Dalgaları incelerken, bir dalğanın bir ortamdan diğerine geçerken yayılma hızının değiştiğini görmüştük. Aynı durum ışık için de geçerlidir. Hava, su, cam ve elmas, ışığın içinden geçebildiği saydam ortamlara örnektir.

Işık bir **saydam ortamdan** diğerine geçtiğinde yayılma hızı değişir. Bu hız değişimi sonucunda ışığın yayılma yönü de değişebilir. Bu olaya ışığın kırılması denir. Bir ortamdaki ışık hızının vakumdaki ışık hızına göre ne kadar azaldığı, mutlak kırılma indisi adı verilen fiziksel büyüklükle ifade edilir. Mutlak kırılma indisi, vakumdaki ışık hızının bir ortamdaki ışık hızına oranı olarak tanımlanır:

$$n = \frac{c}{v}.$$

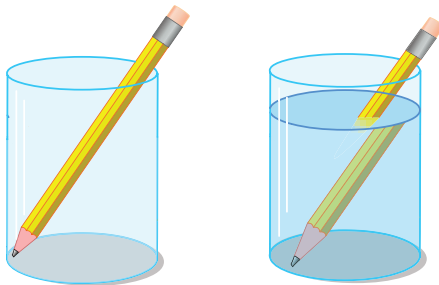
Mutlak kırılma indisinin (bundan sonra kısaca kırılma indisi olarak adlandıracamız) bazı değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Şekil 1'de gösterildiği gibi, suya daldırılmış bir kaleminden çıkan ışık ışınları, sudan havaya geçerken kırılır ve yayılma yönleri değişir. Bu nedenle, kırılan ışınların uzantıları kalemin su ile hava arasındaki sınır yüzeyinde kırılmış veya yer değiştirmiş gibi görünmesine neden olur.

Işığın bir ortamdan diğerine geçerken geliş **açısı ile kırılma açısı** arasındaki ilişkiyi incelemek için bir deney ele alacağız. Öncelikle bazı temel kavramları tanımlayalım. İki saydam ortam arasındaki ara yüzeye gelen ışık ışınına **geliş ışını** denir. Ara yüzeyi geçerek ikinci ortamda ilerleyen ışık ışınına **kırılan ışın** denir. Geliş noktasında ara yüzeye dik olarak çizilen doğruya **normal** denir. Geliş ışını ile normal arasındaki açı **geliş açısı**, kırılan ışın ile normal arasındaki açı ise **kırılma açısı** olarak adlandırılır.

Tablo 1. Bazı malzemelerin kırılma indisleri

Malzeme	Kırılma indisi
Hava	1,003
Su	1,33
Cam	1,5
Elmas	2,4



Şekil 1. Sudan havaya geçerken ışığın kırılmasının oluşturduğu etki



ETKİNLİK 1.

Işığın havadan suya geçerken kırılma açısının β , geliş açısına α bağıllığını araştırmak.

Gerekli malzemeler: lazer, şeffaf, düz kenarlı bir kap (akvaryum veya şeffaf bir kutu), bir açıölçer (iletke), su, az miktarda "sis oluşturuucu madde" (örneğin bir damla süt veya az miktarda deterjan), bant, bir sayfa kağıt/yüzey.

Not: "Sis oluşturuucu madde" yalnızca ışık ışınının su içinde görünür olmasını sağlar.

Su neredeyse şeffaf kalmalıdır.

Yöntem:

- Kabı suyla doldurun (yaklaşık üçte ikisi dolacak şekilde). Çok az miktarda "sis oluşturuucu madde" ekleyin ve hafifçe karıştırın. Su yüzeyinde kabarcık kalmadığından emin olun.
- Açıölçeri, aşağıdaki şekilde kabın dışına (bantla) yapıştırın:
- Açıölçerin merkezi, lazer ışınının yüzeye gireceği seviyede olmalıdır.
- Yatay çizgi ($0^\circ - 180^\circ$) su yüzeyine paralel olmalıdır.
- Dikey çizgi, yüzeye dik olan çizgiyi temsil etmelidir.
- Lazeri havadan su yüzeyine doğru yöneltin

Böylece ışın, açıölçerin merkezine mümkün olduğunca yakın bir noktaya düşecektir (şekil 2).

- Her ölçüm için:
- Geliş açısını α (gelen ışın ile havadaki normal arasındaki açı) ölçün.
- Kırılma açısını β (kırılan ışın ile sudaki normal arasındaki açı) ölçün.
- β için çeşitli değerlerde (örneğin $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, \dots 70^\circ$) ölçümü tekrarlayın.

Sonuçlar:

- Sonuçları bir tabloya kaydedin. Ardından $\sin \alpha$, $\sin \beta$ değerlerini ve, $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ oranını hesaplayın.

N	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$
1	20				
2	30				
...					

Sorular:

- Işık havadan suya geçtiğinde kırılma açısı β , geliş açısı α 'dan büyük mü yoksa küçük mü?
- $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ tüm ölçümler için yaklaşık olarak sabit midir?
- Bu sabit, hangi bilinen fiziksel büyüklükle karşılaştırılabilir?



Şekil 2. Deney düzeneğinin kurulumu

Işık havadan suya geçtiğinde, ışık ışını normale doğru kırılır. Bu durum, sudaki ışık hızının havadakinden daha düşük olduğunu gösterir. İki ortamın mutlak kırılma indisleri ile geliş açısı ve kırılma açısı arasındaki ilişki, **Snell'in Kırılma Yasası (Işığın Kırılma Yasası)** ile ifade edilir:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta.$$

Mutlak kırılma indisinin, bir optik ortamdaki ışığın yayılma hızıyla ilişkili olduğu $n_1 = c / v_1$ ve $n_2 = c / v_2$, göz önüne alındığında, Snell'in Kırılma Yasası aşağıdaki şekilde de yazılabilir:

$$\frac{\sin \alpha}{v_1} = \frac{\sin \beta}{v_2}.$$

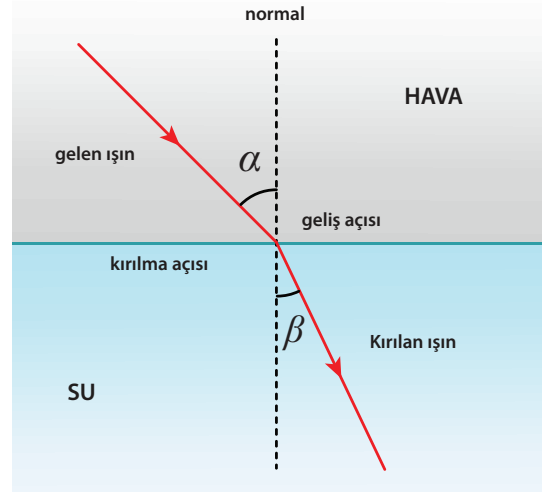
Bir ışık ışınının bir saydam ortamdan diğerine geçerken kırılması Şekil 3'te gösterilmiştir.

Peki, ışık ışını kırılma indisi daha büyük olan bir ortamdan kırılma indisi daha küçük olan bir ortama geçtiğinde ne olur? Bunu incelemek için aynı deneyi, bu kez lazer ışığını sudan havaya göndererek tekrarlayabiliriz. Kırılmanın geometrik gösterimi Şekil 3'tekiyle aynıdır ve Snell'in Kırılma Yasası yine geçerlidir. Ancak bu durumda, β açısı geliş açısı, α açısı ise kırılma açısı olur.

Günlük yaşamda, bir ışık ışını çoğu zaman art arda birden fazla saydam ortamdan geçer. Bu gibi durumlarda Snell'in Kırılma Yasası her ara yüzey için ayrı ayrı uygulanır.

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 = n_3 \sin \alpha_3 = \dots$$

Bu bağıntı, ışığın bir optik ortamdan diğerine hergeçişinde yönünün nasıl değiştiğini belirlemeyi sağlar.



Şekil 3. Işığın kırılmasının şematik gösterimi; ana unsurlar etiketlenmiştir

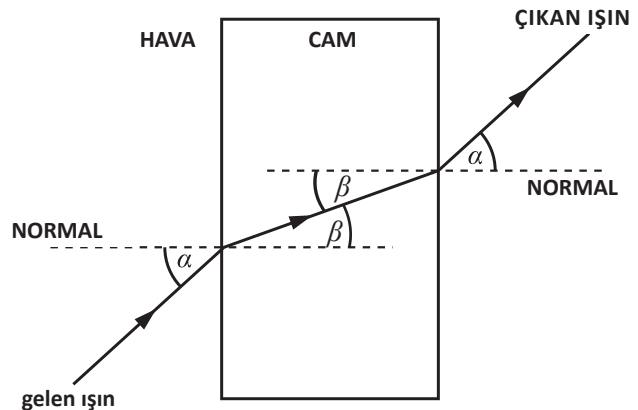
Düzlem-paralel plaka

Düzlem-paralel plaka, çevresindeki ortamdan farklı bir kırılma indisine sahip bir malzemedendir. birbirine paralel iki düz yüzeyden oluşan bir optik elemandır.

Bir ışık ışını düzlem-paralel bir levhadan geçtiğinde iki kırılma meydana gelir: - İlk kırılma, ışığın havadan levhaya girdiği ara yüzeyde meydana gelir.

- İkinci kırılma, ışığın levhadan çıkarak yeniden havaya geçtiği ara yüzeyde meydana gelir.

İlk kırılmada ışık ışını, Snell'in Kırılma Yasası'na göre yayılma yönünü değiştirir. İkinci kırılmada ise ışığın yayılma yönü yeniden değişir ve levhadan çıkan ışın, gelen ışına paralel olur (Şekil 4).



Şekil 4. Düzlem-paralel plakada ışığın kırılmasının şematik gösterimi



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Plakanın kırılma indisi 1,5 ve ilk arayüzdeki geliş açısı $\alpha = 30^\circ$ ise, düzlem-paralel plakanın son ara yüzündeki kırılma açısı nedir? Plaka havada bulunmaktadır.

Verilenler: $n_{\text{levha}} = 1,5$, ve levha hava ortamındadır ($n_{\text{hava}} \approx 1$)

İstenen: $\gamma - ?$

Çözüm:

Birinci ara yüz (hava $\rightarrow$ cam) Işığın kırılması için Snell Yasası uygulanır: $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$.

Verilen değerleri yerine yazalım: $1 \cdot \sin 30^\circ = 1,5 \cdot \sin \beta$, $\sin 30^\circ = 0,5$ sin

Buna göre, $\sin \beta = \frac{0,5}{1,5} = \frac{1}{3}$ Dolayısıyla, $\beta = \arcsin\left(\frac{1}{3}\right) \approx 19,47^\circ$

İkinci ara yüz (cam $\rightarrow$ hava)

Paralel yüzeyli bir cam levhada iki yüzey birbirine paraleldir. Bu nedenle ikinci yüzeye gelen iç geliş açısı, ilk kırılma açısına eşittir: $\alpha_2 = \beta \approx 19,47^\circ$

Yine Snell Yasası uygulanır: $n_{\text{cam}} = \sin \alpha_2 = n_{\text{hava}} \sin \gamma$

Yerine yazarsak: $1,5 \cdot \sin 19,47^\circ = \sin \gamma = \frac{1,5 \cdot \sin 19,47^\circ}{1} = 0,5$ Buna göre, $\gamma = \arcsin(0,5) = 30^\circ$

Sonuç Cam-hava sınırındaki kırılma açısı $\gamma = 30^\circ$ olur. Buna göre çıkan ışın, gelen ışına paraleldir; ancak yanal olarak yer değiştirmiş (kaymış) durumdadır.

Düzlem-paralel levhada bir başka önemli etki de ışık ışınının yanal sapmasıdır. Levhadan çıkan ışın, gelen ışına paralel olmasına rağmen aynı doğru üzerinde değildir (Şekil 5). Yanal sapmanın büyüklüğü aşağıdaki etkenlere bağlıdır:

- Düzlem-paralel levhanın kalınlığı.
- Düzlem-paralel levhanın yapıldığı malzemenin kırılma indisi.
- Işığın ilk ara yüzeye geliş açısı.

Levhanın kalınlığı biliniyorsa, yanal sapma dik üçgende trigonometrik bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 5. düzlem-paralel levha



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Düzlem-paralel plakanın kalınlığı 10 cm ise, önceki örnekteki lazer ışını ne kadar yer değiştirecektir?

Verilenler:

$d = 10 \text{ cm}$

$n = 1,5$

$n_1 \approx 1$

$\alpha = 30^\circ$

İstenen:

$\delta - ?$

Önceki sorudan şu sonucu elde etmiştik:

$\beta \approx 19,47^\circ$.

Işık ışınının yanal kayma miktarı: (δ) şu bağıntıyla hesaplanır:

$\delta = \overline{AB} \cdot \sin(\alpha - \beta)$, Burada: $\overline{AB} = \frac{d}{\cos \beta}$

olduğundan, ışının yanal kayması için son ifade:

$\delta = d \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} = 1,94 \text{ cm.}$

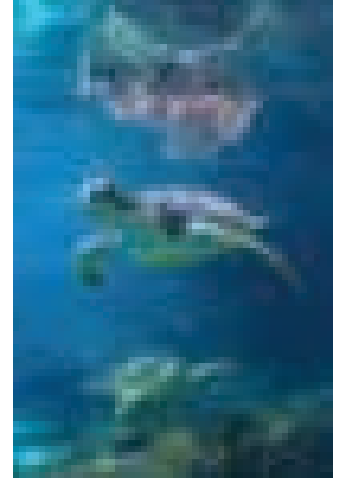


Tam yansım

Işığın, kırılma indisi daha büyük olan bir ortamdan kırılma indisi daha küçük olan bir ortama, örneğin sudan havaya geçişini ele alalım. Geliş açısı kademeli olarak artırıldığında, kırılma açısı da artar ve sonunda 90° olur. Kırılma açısının 90° olduğu geliş açısına kritik açı denir.

Geliş açısı kritik açıdan daha büyük olduğunda, ışık ara yüzeyden tamamen yansır (Şekil 6).

Tam yansım, ışığın kırılma indisi daha büyük olan bir ortamdan kırılma indisi daha küçük olan bir ortama geçerken, geliş açısının kritik açıdan büyük olması durumunda ara yüzeyden tamamen yansması olayıdır.



Şekil 6. Tam yansım



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Su ve hava arasındaki kritik açının değerini hesaplayınız.

Verilenler: $n_1 = 1,33$, $n_2 = 1$

İstenen: $\alpha_g - ?$

Çözüm:

Tanım gereği, ışığın kritik (sınır) geliş açısında, kırılma açısı $\beta = 90^\circ$ olur.

Buna göre Snell Yasası (Kırılma Yasası) şu şekilde yazılır: $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$
 $\beta = 90^\circ$ ve $\sin 90^\circ = 1$ olduğundan, geliş açısı kritik açı $\alpha = \alpha_g$ olur. Böylece: $n_1 \sin \alpha_g = n_2$

Buradan, $\sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{1,33} = 0,75$ elde edilir.

Dolayısıyla kritik(sınır) açı: $\alpha_g = 48,8^\circ$ olarak bulunur.

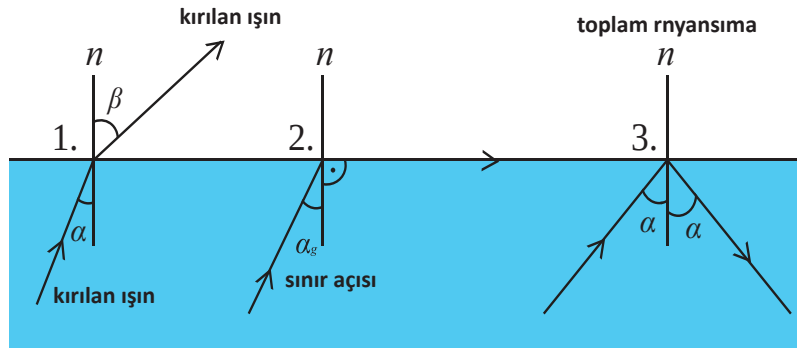
Sonuç:

Işık sudan havaya geçerken kritik açı $48,8^\circ$ 'dir. Geliş açısı bu değerden daha büyük olduğunda artık kırılan ışın oluşmaz; bunun yerine tam yansım (tam iç yansım) meydana gelir.

Genel olarak, kırılma indisi n_1 olan bir ortamdan kırılma indisi n_2 olan bir ortama geçişte, kritik(sınır) açı şu denklemle belirlenir:

$$\sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1}$$

Şekil 7, kırılma indisi daha yüksek olan bir ortamdan kırılma indisi daha düşük olan bir ortama geçen ışığın durumlarını göstermektedir (1). Aynı şekilde, kritik açı altında sınır yüzeyine düşen ışığın kırılması (2) ile ışığın kritik açıdan daha büyük bir açıyla sınır yüzeyine düşmesi, yani tam yansım olgusu (3) da gösterilmektedir.



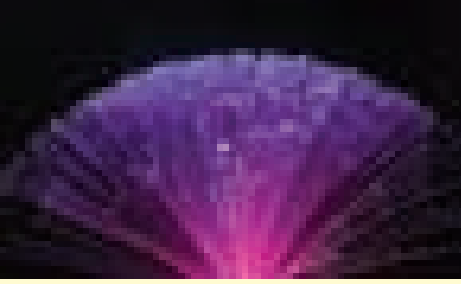
Şekil 7. Kırılma indisi daha yüksek olan bir ortamdan kırılma indisi daha düşük olan bir ortama geçiş. Kritik(sınır) açıda, kırılan ışın sınır yüzeyi boyunca ıraksak bir şekilde yayılır.



GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

Optik fiberler – tam yansımanın uygulaması

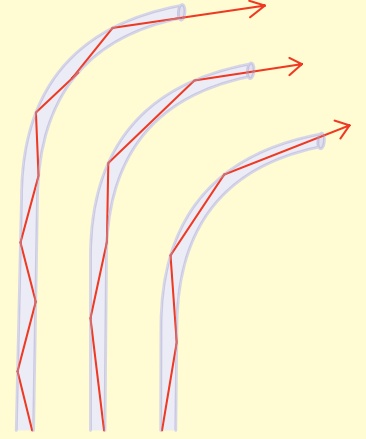
Tam yansıma olgusunun en önemli modern uygulamalarından biri optik fiberlerdir. Bunlar, kırılma indisi fiberin kılıfından daha yüksek olan cam veya plastikten (fiber çekirdeği) yapılır. Bir ışık demeti bir optik fiber içinden ilerlerken, çekirdek ile kılıf arasındaki sınır yüzeyine kritik açıdan daha büyük bir açıyla çarptığında, fiberden çıkmak yerine tamamen geri yansıtılır. Bu olay, fiberin tüm uzunluğu boyunca tekrarlanır, böylece ışık fiberin içinde hapsolür (şekil 8).



Şekil 9. Uçlarına ışık ileten aydınlatılmış optik fiberler

Tekrarlanan tam iç yansıma sayesinde, ışık, optik fiber bükülmüş olsa bile fiber içinden iletebilir ve enerjisinin sadece çok küçük bir kısmını kaybeder.

Bu özelliği sayesinde optik fiberler, telekomünikasyon, tıp ve modern bilgisayar ağlarında geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Şekil 9).



Şekil 8. Farklı açılarda bükülmüş bir optik fiberde tam iç yansıma



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Işığın kırılması neden ortamın kalınlığına değil, yalnızca kırılma indisine bağlıdır?
2. İki ortamın kırılma indisleri sırasıyla n_1 ve n_2 olup $n_1 > n_2$ 'dir. Kırılma indisleri arasındaki fark arttıkça kritik açı nasıl değişir?
3. Vakumda ışık hızı $3,0 \cdot 10^8$ m/s'dir. Saydam bir ortamda ışık hızı $2,0 \cdot 10^8$ m/s ise bu ortamın kırılma indisini hesaplayınız. (Çözüm: 1,5)
4. Bir ışık ışını, kırılma indisi 1,4 ve kalınlığı 2 mm olan düzlem-paralel bir cam levhadan geçmektedir. Geliş açısı 45° 'dir.
 - a) Levha içindeki kırılma açısını hesaplayınız.
 - b) Levhadan çıkan ışının geliş doğrultusuyla yaptığı açığı hesaplayınız.
 - c) Işığın levhadan çıkarken uğradığı yanal sapmayı hesaplayınız. (Çözüm: a) 30° b) 45° c) 0,59 mm)
5. Bir dalgıç, 20 m derinlikteki bir gölün dibindedir. Suyun kırılma indisi 1,33'tür.
 - a) Su-hava ara yüzeyi için kritik açığı hesaplayınız.
 - b) Dalgıç, tam yansıma gerçekleşmeden suyun dışını görebilmek için dikey doğrultudan en fazla kaç derecelik açıyla yukarı bakabilir?
 - c) Dalgıcın su yüzeyinde gördüğü "ışık çemberi"nin yarıçapını hesaplayınız. (Çözüm: a) $48,8^\circ$ b) $48,8^\circ$ c) 22,8 m)
6. Bir dalgıç, gölün dibinde yukarı doğru bakmaktadır. Normale göre 50° 'lik açıyla baktığında, su yüzeyinin altında bulunan bir deniz kabuğunu görmektedir. Gölün derinliği 15 m olduğuna göre, deniz kabuğu dalgıçtan yatay doğrultuda ne kadar uzaktadır? (Çözüm: 18 m)

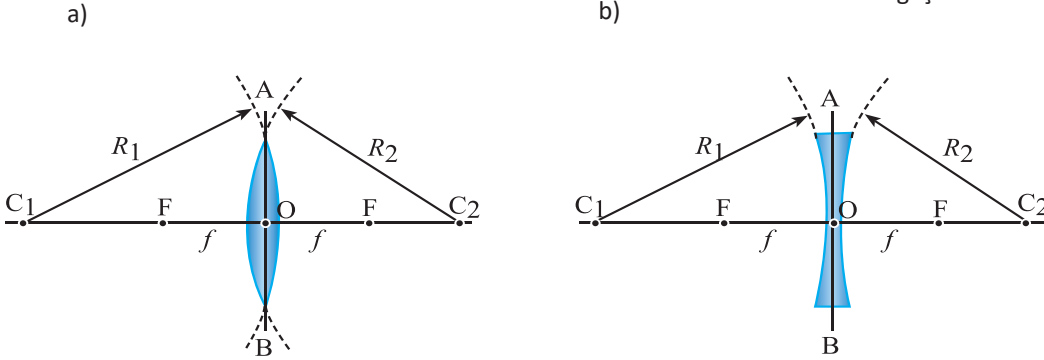
3.5. Optik Mercekler (Lensler)

Önceki derste, ışığın bir optik ortamdan diğerine geçerken nasıl kırıldığını incelemiştik. Bunun bir örneği olarak, günlük yaşamda sıkça karşılaşılan düzlem-paralel levhayı ele aldık. Peki, levhanın yüzeyleri düz değil de eğri olsaydı ne olurdu? Örneğin, suyla dolu silindirik bir bardaktan baktığımızda (Şekil 1), bardağın arkasındaki cisimlerin görüntülerinin bozulduğunu ve gerçek konumlarından farklı bir yerde gördüğünü fark ederiz. Bu durum, **optik merceklerin** çalışma ilkesine bir örnektir.

Optik mercek, çevresindeki ortamdan farklı bir kırılma indisine sahip, en az bir yüzeyi eğri olan saydam bir optik elemandır. Işık mercekten geçerken, düzlem-paralel levhada olduğu gibi merceğe girerken ve mercekten çıkarken kırılır. Ancak düzlem-paralel levhadan farklı olarak, merceklerde kırıcı yüzeyler birbirine paralel değildir. Bu nedenle mercekten çıkan ışık ışınları birbirine yaklaşabilir veya birbirinden uzaklaşabilir. Merceklerin temel elemanları; optik eksen, **optik merkez**, **ana düzlem** ve **odaktır**.



Şekil 1.
Işığın su dolu bir bardaktan geçerken kırılması



Şekil 2. Farklı yarıçaplara sahip iki küresel yüzey ile sınırlanan mercekler.

Optik eksen (ana optik eksen), merceği oluşturan küresel yüzeylerin eğrilik merkezlerinden geçen hayali bir doğrudur. Şekil 2'de bu eksen, C_1 ve C_2 noktalarını birleştiren doğru olarak gösterilmiştir.

Mercek, kenarlarından geçen ve optik eksene dik olan bir düzlemlle kesilmiş gibi düşünülebilir. Bu düzleme **ana düzlem** denir. Şekil 2'de ana düzlem, A ve B noktalarından geçmektedir.

Ana düzlemin optik eksenle kesiştiği noktaya optik merkez denir ve bu nokta genellikle O harfi ile gösterilir.

Işık mercekten geçerken her iki kırıcı yüzeyde de kırılır. Ancak **ince merceklerde**, bu iki kırılmanın ana düzlemde gerçekleşen tek bir kırılmaya eşdeğer olduğu kabul edilir.

Yakınsak ve ıraksak mercekler

Şekillerine göre iki ana mercek türü vardır: **yakınsak (dışbükey)** ve **ıraksak (içbükey)**.

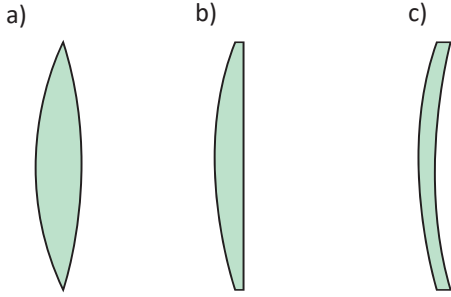
Yakınsak mercekler (dışbükey mercekler), merkezleri kenarlarına göre daha kalın olan merceklerdir. Şekil 3'te yakınsak merceklerin başlıca türleri gösterilmiştir. Yüzeylerinin şekline göre yakınsak mercekler;

çift dışbükey (Şekil 3a), düzlem-dışbükey (Şekil 3b) ve dışbükey-içbükey (pozitif menisküs) mercekler (Şekil 3c) olarak sınıflandırılır.

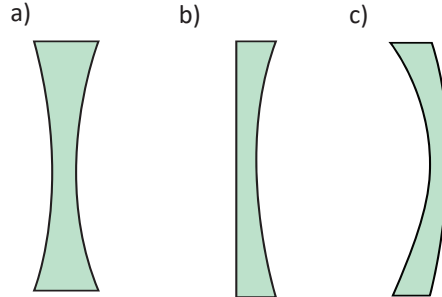
Yakınsak merceklerin en önemli optik özelliği, kendilerine paralel gelen ışık ışınlarını tek bir noktada toplayabilmeleridir. **Yakınsak merceğe** ana optik eksene paralel gelen ışık ışınları, kırıldıktan sonra merceğin **odak noktası** olarak adlandırılan noktada kesişir (Şekil 5a).

İraksak merceklerde ise merkezin kalınlığı kenarlara göre daha azdır. İraksak merceklerin başlıca türleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Yüzeylerinin şekline göre bu mercekler; çift içbükey (Şekil 4a), düzlem-içbükey (Şekil 4b) ve içbükey-dışbükey (negatif menisküs) mercekler (Şekil 4c) olarak sınıflandırılır.

İraksak merceklerde ise merkezin kalınlığı kenarlara göre daha azdır. İraksak merceklerin başlıca türleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Yüzeylerinin şekline göre bu mercekler; çift içbükey (Şekil 4a), düzlem-içbükey (Şekil 4b) ve içbükey-dışbükey (negatif menisküs) mercekler (Şekil 4c) olarak sınıflandırılır.

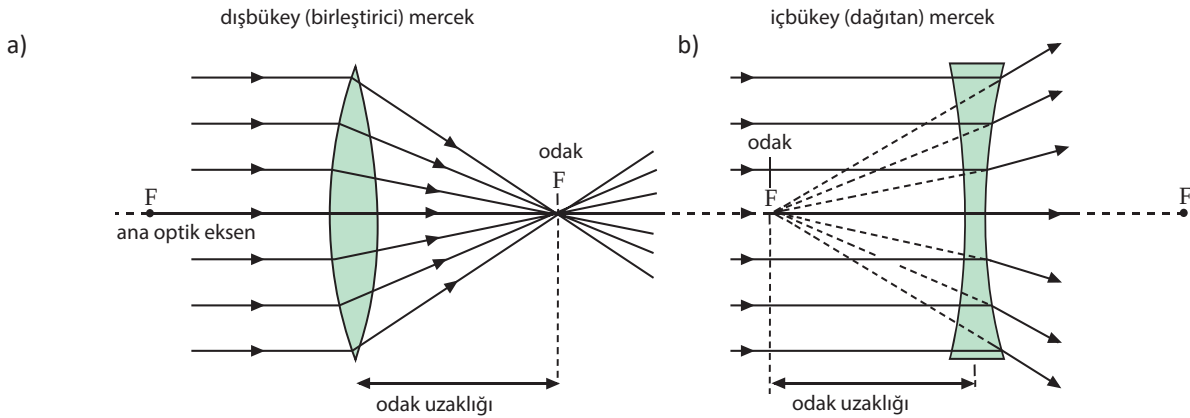


Şekil 3. Farklı şekillerdeki yakınsak mercekler:
a) Çift dışbükey mercek, b) Düzlem-dışbükey mercek,
c) Dışbükey-içbükey (pozitif menisküs) mercek.



Şekil 4. Farklı şekillerdeki ıraksak mercekler:
a) Çift içbükey mercek,
b) Düzlem-içbükey mercek,
c) İçbükey-dışbükey (negatif menisküs) mercek.

İraksak merceklerin temel özelliği, ışık ışınlarını bir noktada toplamak yerine dağıtmalarıdır. **İraksak merceğe** ana optik eksene paralel gelen ışık ışınları, mercekten geçtikten sonra birbirinden uzaklaşır. Kırılan ışınların uzantıları ise tek bir noktada kesişir. Bu noktaya ıraksak merceğin **odak noktası** denir. Bu durum Şekil 5b'de gösterilmiştir.



Şekil 5. a) Yakınsak mercek b) İraksak mercek

Bir merceğin yakınsak mı yoksa ıraksak mı davranacağı yalnızca şekline bağlı değildir. Merceğin yapıldığı malzemenin kırılma indisi ile içinde bulunduğu ortamın kırılma indisi de bu davranışı belirler. Bu nedenle, havada yakınsak mercek gibi davranan bir mercek, kırılma indisi mercek malzemesinin kırılma indisine yakın olan bir sıvıya daldırıldığında ıraksak mercek gibi davranabilir.

Merceklerin odak noktası ve odak uzaklığı

Paralel bir ışık demeti bir optik mercekten geçtiğinde, ışığın daha sonraki yayılımı merceğin türüne bağlıdır. Yakınsak merceğe ana optik eksene paralel gelen ışık ışınları, mercek tarafından odak noktasında toplanır. Bu noktaya odak denir ve uzayda ışığın gerçekten toplandığı bir noktadır. Bu nedenle, yakınsak merceğin odağı gerçek odaktır.

İraksak merceğe ana optik eksene paralel gelen ışık ışınları ise mercekten geçtikten sonra birbirinden uzaklaşır. Bu durumda odak, ışığın gerçekten toplandığı bir nokta değil, kırılan ışınların uzantılarının kesiştiği geometrik bir noktadır. Bu nedenle, ıraksak merceğin odağı **sanal odaktır** ve ışığın mercekten geçtikten sonraki yayılımını açıklamada kullanılır.

Odak noktası genellikle F harfiyle gösterilir. Odak noktası ile optik merkez arasındaki uzaklığa **odak uzaklığı** denir ve f harfiyle gösterilir.

Yakınsak merceklerde odak gerçek olduğundan odak uzaklığı pozitifdir. İraksak merceklerde ise odak sanal olduğundan odak uzaklığı negatiftir. Odak uzaklığı küçüldükçe merceğin ışığı kırma etkisi artar.

İnce merceklerin odak uzaklığı şu denklemle belirlenebilir:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n_0} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

burada n , merceğin yapıldığı malzemenin kırılma indisi, n_0 ise merceğin bulunduğu optik ortamın (örneğin hava veya su) kırılma indisi olup, R_1 ve R_2 ise küresel yüzeylerin eğrilik yarıçaplarıdır.

Tıp ve optikte, bir ışık demetini odaklama yeteneğini karakterize eden "mercek gücü" fiziksel büyüklüğü en yaygın olarak kullanılır.

Mercek gücü, odak uzaklığının tersi olarak tanımlanır ve aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$J = \frac{1}{f},$$

Burada odak uzaklığı f , metre (m) cinsinden ifade edilir. Odak uzaklığı pozitif veya negatif olabildiğinden, mercek gücü yakınsak mercekler için pozitif, ıraksak mercekler için ise negatiftir. Mercek gücü, metre üzeri eksi bir (m^{-1}) veya dioptri (D) birimiyle ifade edilir. Buna göre $1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$ olur. Odak uzaklığı 1 m olan bir merceğin gücü 1 D, odak uzaklığı 0,5 m olan bir merceğin gücü ise 2 D'dir. Dioptri SI birimi değildir. Bu nedenle literatürde D, d veya diop gibi farklı gösterimlerle karşılaşılabılır.



ETKİNLİK 1.

Yakınsak bir merceğin odak uzaklığının belirlenmesi

Gerekli ekipman: Yakınsak bir mercek (örneğin büyüteç veya okuma gözlüğü), uzaktaki bir ışık kaynağı (örneğin pencere veya tavan lambası) ve bir ekran (örneğin beyaz bir kâğıt).

Yöntem:

1. Merceği, ana optik ekseni ışık kaynağına doğrultulacak şekilde yerleştiriniz.
2. Merceği sabit tutarak ekranı, merceğin diğer tarafına, yani ışık kaynağının karşı tarafına yerleştiriniz.
3. Ekranı merceğe yaklaştırıp uzaklaştırarak, ışık kaynağının ekranda net ve belirgin bir görüntüsü oluşuncaya kadar konumunu ayarlayınız.

Deneyin analizi:

- a) Oluşan görüntünün özelliklerini belirleyiniz. Görüntünün dik mi yoksa ters mi, büyütülmüş mü yoksa küçültülmüş mü ve gerçek mi yoksa sanal mı olduğunu belirtiniz.

b) Görüntünün en net olduğu durumda, mercek ile ekran arasındaki uzaklık nedir? Bu uzaklığın yakınsak mercek için neyi ifade ettiğini açıklayınız.

Mercekler için karakteristik ışınlar

Karakteristik ışınlar, merceklerde görüntü oluştururken kullanılan ve mercekten geçtikten sonra nasıl ilerleyeceği önceden bilinen ışınlardır. Bir cismin görüntüsünü oluşturmak için aşağıda verilen üç karakteristik ışından herhangi ikisini kullanmak yeterlidir (Şekil 6).

1. Ana optik eksene paralel ışın

Yakınsak mercek: Ana optik eksene paralel gelen ışık ışını, mercekten kırıldıktan sonra merceğin ikinci odak noktasından (merceğin diğer tarafında) geçer.

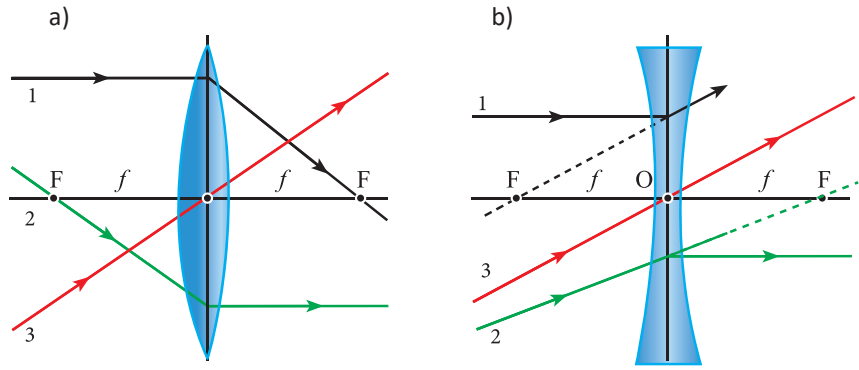
Iraksak mercek: Ana optik eksene paralel gelen ışık ışını, mercekten geçtikten sonra kırılan ışının uzantısı merceğin odak noktasından geçiyormuş gibi görünür.

2. Odak noktasından geçen ışın

Yakınsak mercek: Odak noktasından geçen ışık ışını, mercekten geçtikten sonra ana optik eksene paralel olarak ilerler.

Iraksak mercek: Gelen ışık ışını, merceğin odak noktasına doğru yönelmişse, mercekten kırıldıktan sonra ana optik eksene paralel olarak ilerler.

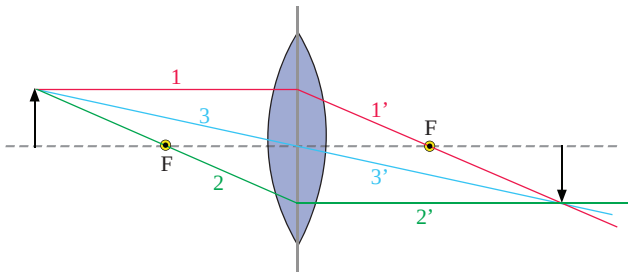
3. Optik merkezden geçen bir gelen ışık ışını, yayılma yönünü değiştirmez.



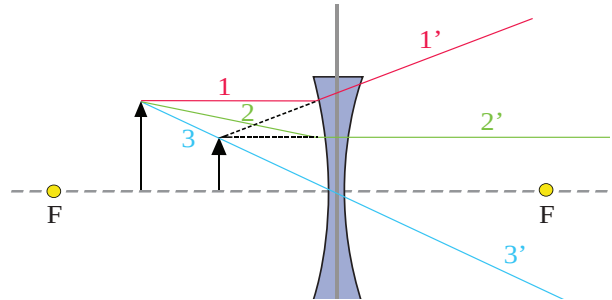
Şekil 6. a) Yakınsak mercek için karakteristik ışınlar
b) Iraksak mercek için karakteristik ışınlar

Merceklerde görüntü oluşumu

Kırılan ışınların veya bu ışınların uzantılarının kesiştiği nokta, cismin ilgili noktasının görüntüsünün konumunu belirler. Şekil 7 ve Şekil 8'de, karakteristik ışınlar kullanılarak yakınsak ve iraksak merceklerde görüntünün nasıl oluşturulduğu gösterilmiştir.



Şekil 7. Yakınsak mercek için görüntü oluşumu



Şekil 8. Iraksak mercek için görüntü oluşumu



ETKİNLİK 2.

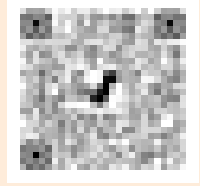
Bir yakınsak merceğin önüne yerleştirilen bir cismin görüntüsünü şu mesafelerde çizin:

- Çift odak uzaklığı;
- Odak noktasında;
- Odak noktası ile merkez arasında.

Web sitesinde sunulan simülasyonu kullanarak:

[Geometrik Optik - Optik | Mercekler | Aynalar - PhET Etkileşimli Simülasyonlar.](#)

Oluşturduğunuz görüntüleri kontrol edin.



İnce kenarlı mercek denklemleri

Önceki örneklerde, geometrik bir çizim kullanarak görüntünün nasıl görüneceğini ve merceğin hangi tarafında ortaya çıkacağını belirledik. Görüntüye olan mesafeyi doğru bir şekilde belirlemek için ince mercek denklemini kullanırız:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{l},$$

burada p , mercekten cisme olan mesafedir; l , mercekten görüntüye olan mesafedir; f ise merceğin odak uzaklığıdır. Odak uzaklığı, yakınsak mercek için pozitif, ıraksak mercek için negatif bir değere sahiptir. Görüntü sanal ise, l değeri negatiftir.

Görüntünün cisme göre ne kadar büyütüldüğünü veya küçültüldüğünü belirlemek için, görüntü yüksekliğinin cisim yüksekliğine oranı olan büyütme oranı kullanılır:

$$U = \frac{h_l}{h_p},$$

Burada h_l görüntü yüksekliğini, h_p ise cisim yüksekliğini gösterir. Büyütme oranı, cisim ile mercek arasındaki uzaklık ve görüntü ile mercek arasındaki uzaklık kullanılarak da hesaplanabilir:

$$U = \frac{|l|}{p}.$$

Büyütme oranı 1'den büyükse görüntü büyütülmüş, 1'e eşitse görüntü cisimle aynı boyutta, 1'den küçükse ise görüntü cisimden daha küçüktür.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Yüksekliği 10 cm olan bir cisim, merceğin optik merkezinden 5 cm uzağa yerleştirilmiştir. Görüntü, cisimle aynı tarafta, mercekten 3 cm uzakta oluşur. Aşağıdakileri belirleyin:

- Merceğin sağladığı büyütme oranı.
- Görüntünün yüksekliği.
- Odak uzaklığını ve merceğin türünü.

Verilenler: $P = 10 \text{ cm}$, $p = +5 \text{ cm}$, $l = -3 \text{ cm}$ **İstenen:** $U = ?$ $h_l = ?$ $f = ?$

a) İnce mercek için büyütme: $U = \frac{|l|}{p} = 0,6$ olur. $U < 1$ olduğundan görüntü küçülmüştür.

b) Görüntünün yüksekliği: $h_l = U \cdot h_p = 6 \text{ cm}$.

c) Odak uzaklığı f , ince mercek bağıntısından bulunur: $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{l}$

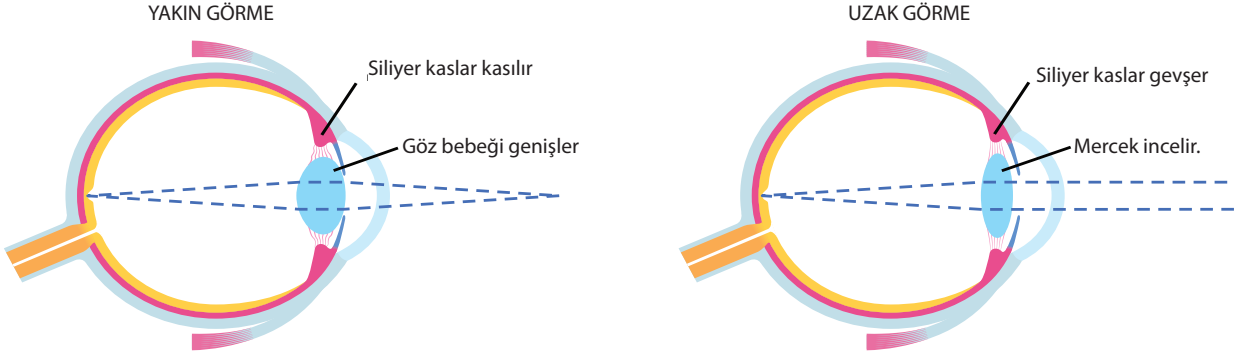
Buradan, $f = \frac{pl}{p+l} = -7,5 \text{ cm}$ elde edilir. Sonuç Odak uzaklığının negatif olması, kullanılan merceğin ıraksak (kalın kenarlı/konkav) mercek olduğunu gösterir.

Gözümüzle nasıl görürüz?

Mercekler günlük yaşamda çok yaygın olarak kullanılır. Bunlardan biri de görme olayında önemli rol oynayan göz merceğidir. Çevremizdeki cisimlerden yansıyan ışık ışınları göze ulaşır. Cisim uzakta olduğunda göze gelen ışınlar yaklaşık olarak paraleldir. Cisim yaklaştıkça ise ışınlar birbirinden uzaklaşarak göze ulaşır. Net bir görüş için bu ışınların, gözün arka kısmındaki ışığa duyarlı tabaka olan retinada gerçek bir görüntü oluşturması gerekir. Kornea ile göz merceği birlikte ince bir yakınsak mercek gibi davranır. Işığın büyük bölümü korneada kırılırken, göz merceği görüntünün retinaya tam olarak odaklanmasını sağlar.

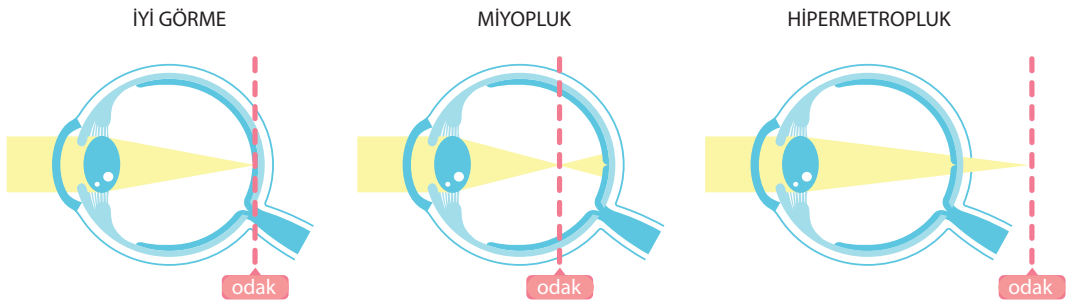
Göz merceği ile retina arasındaki uzaklık yaklaşık olarak sabit olduğundan, farklı uzaklıklardaki cisimlerin net görülebilmesi için göz merceğinin odak uzaklığı değişir. Göz merceğinin odak uzaklığını değiştirebilme yeteneğine akomodasyon denir. Bu olay, siliyer kasların etkisiyle gerçekleşir (Şekil 9). Yakındaki cisimlere bakıldığında göz merceği kalınlaşır ve odak uzaklığı azalır. Uzak cisimlere bakıldığında ise göz merceği inceler ve odak uzaklığı artar.

Göze giren ışık miktarı, loş ortamda genişleyen, parlak ortamda ise daralan göz bebeği tarafından düzenlenir. Görsel bilgiler optik sinir aracılığıyla beyne iletilir ve görme olayı burada gerçekleşir.



Şekil 9. Yakındaki (solda) ve uzaktaki (sağda) cisimlere bakarken gözün akomodasyonunun şematik gösterimi.

Ancak göz, kusursuz bir optik alet değildir. Birçok kişiye odaklanma hataları görülür; bu nedenle görüntü tam olarak retinada değil, retinanın biraz önünde veya arkasında oluşur. Böyle bir durumda algıladığımız görüntü bulanık olur. Bu durum, Etkinlik 1'de görüntünün tam olarak oluştuğu yere ekranın yerleştirilmediği durumda gözlemlediğimiz duruma benzemektedir. Bu tür odaklanma düzensizlikleri, miyop ve hipermetrop gibi göz bozukluklarına yol açar (Şekil 10). Miyoplukta göz, uzaktaki cisimlere net bir şekilde odaklanamaz. Uzak cisimlerin görüntüsü retinanın önünde oluşur. Hipermetropide ise yakındaki cisimleri görmek zordur. Bu durumda görüntü, retinanın arkasında oluşur.



Şekil 10. Normal göz (solda), miyop göz (ortada) ve hipermetrop göz (sağda).



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Miyop bir kişi, optik gücü -3 D olan gözlük kullanmaktadır. Gözlüğünü çıkardığında en fazla hangi uzaklığa kadar net görebilir? -3D .

Verilen: $J = -3\text{ D}$

İstenen: $r = ?$

Çözüm:

Miyop gözde, uzaktaki cisimlerin görüntüsü retinanın önünde oluşur. Bu nedenle miyopluk, iraksak merceklerle düzeltilir. Bu mercekler, uzaktaki cisimlerden gelen ışınların gözün uzak noktasından geliyormuş gibi göze ulaşmasını sağlar. Uzak nokta, gözün herhangi bir düzeltme olmadan net görebildiği en uzak noktadır. Gözlüğün odak uzaklığı $f = \frac{J}{\varepsilon} = -\frac{1}{3\text{ m}^{-1}} = -0,33\text{ m}$, olur. Buna göre gözün uzak noktası $r = |f| = 0,33\text{ m} = 33\text{ cm}$ olarak bulunur. Sonuç olarak, kişi gözlüğünü çıkardığında yalnızca 33 cm ' ye kadar olan uzaklıktaki cisimleri net görebilir. Daha uzaktaki cisimler ise bulanık görünür.



GÜNLÜK YAŞAMDA UYGULAMA

Optik cihazlar

Birçok kişinin her gün kullandığı gözlüklerin yanı sıra, yakın veya uzak cisimlerin daha iyi gözlemlenmesini sağlayan birçok başka optik cihaz da bulunmaktadır. **Optik cihaz**, insan gözünün tek başına net bir şekilde ayırt edemediği cisimlerin büyütülmesini veya daha net bir şekilde gösterilmesini sağlayan bir veya daha fazla mercekten (veya aynadan) oluşan bir sistemdir.

En basit optik alet **büyüteç** tir. Büyüteç, merceğin yakınına yerleştirilen küçük cisimleri gözlemlemek ve büyütme için kullanılan bir yakınsak mercekten oluşur (Şekil 11). Doğru kullanıldığında, büyüteç hayali, dik ve büyütülmüş bir görüntü oluşturur; bu, önceki bölümde ele alınan yakınsak mercek özelliklerinin doğrudan bir uygulamasıdır.

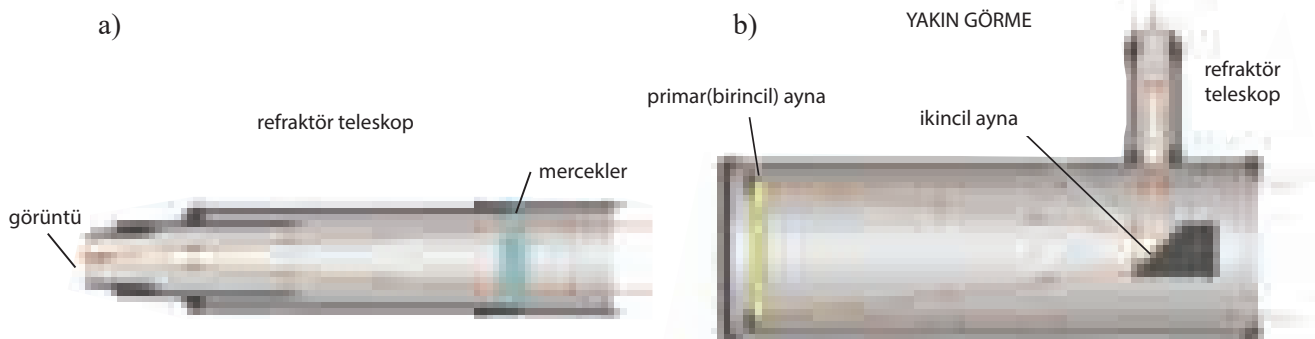
ha karmaşık optik cihazlar ise **teleskoplar** ve **mikroskoplardır**. Teleskop, çok uzak cisimleri gözlemlemek için mercekler, aynalar veya bunların bir kombinasyonundan oluşan bir sistem kullanan bir cihazdır.

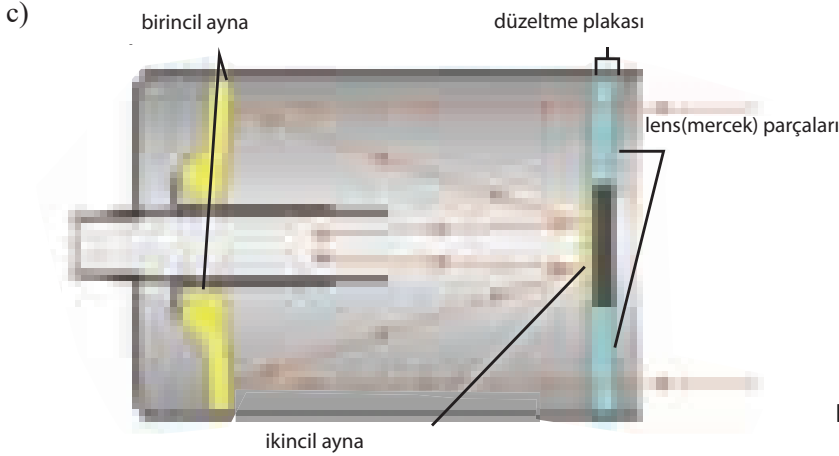
Optik yapısına göre teleskoplar; **refraktör** (mercekli), **reflektör** (aynalı) veya katadioptrik (hem mercek hem de ayna kullanan) teleskoplar olabilir. Bu türler **Şekil 12'de** gösterilmiştir.

Dürbün, her iki gözle aynı anda gözlem yapmayı sağlayan özel bir teleskop türüdür.



Şekil 11.
Büyüteç ile büyütme





Şekil 12. Farklı teleskop türleri:
a) Refraktör (mercekleli teleskop),
b) Reflektör (aynalı teleskop) ve
c) Katadioptrik teleskoplar (hem mercek hem de ayna kullanan teleskoplar) (altta)



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Bir refraktör teleskopta görüntünün çizimi.

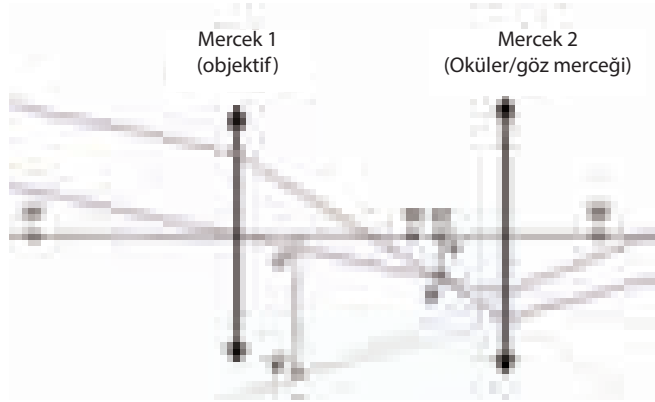
Çözüm:

Bir refraktör teleskop, iki adet yakınsak mercekten oluşur:

- Odak uzaklığı büyük olan objektif f_1 ;
- Önemli ölçüde daha kısa odak uzaklığına sahip göz sahip merceği f_2 , burada $f_1 \gg f_2$. Gözlemlenen cisimler çok uzak mesafelerde olduğundan, onlardan gelen ışık objektife yaklaşık olarak paralel bir ışın demeti halinde girer. Objektiften geçtikten sonra ışınlar, objektifin odak düzleminde toplanır,

burada **gerçek bir görüntü** A'B' oluşur. Bu görüntü, göz merceği için cisim görevi görür.

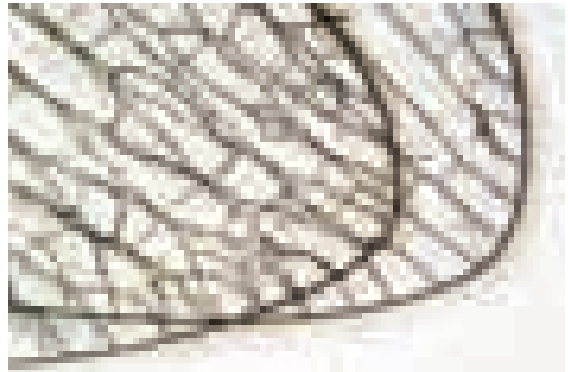
Oküler, A'B' görüntüsünün odak düzleminde veya ona çok yakın bir konumda kalacağı şekilde yerleştirilir. Okülerden geçtikten sonra ışınlar birbirinden uzaklaşarak çıkar ve geriye doğru uzantıları, gözle gözlemlenen nihai sanal görüntü A"B"yi oluşturur (şekil 13). Nihai görüntü, cisme göre ters çevrilmiştir ve bir ekrana yansıtılamaz.



Şekil 13. Teleskoptaki görüntü oluşumu

Mikroskoptaki mercekler, çok küçük cisimlerin yüksek büyütme oranında gözlemlenebilmesini sağlayacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 14). Teleskoptan farklı olarak, mikroskoptaki cisim cihaza çok yakındır ve büyütme, iki merceğin birleşimiyle sağlanır.

Şekil 14. Optik mikroskopla gözlemlenen bir böcek kanadı





ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 4.

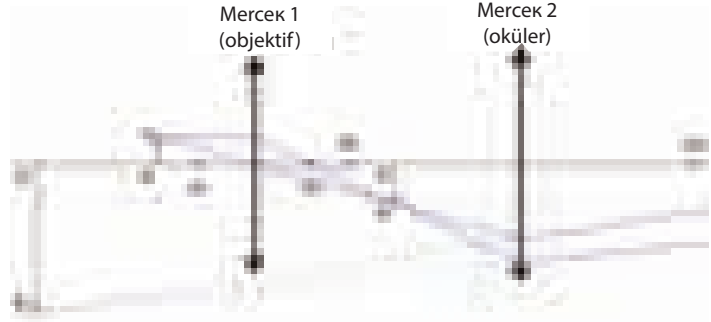
Mikroskopta görüntü oluşumunun çizimi.

Mikroskop, iki adet yakınsak mercekten oluşur:

- kısa odak uzaklığı f_1 olan bir objektif mercek;
- Daha büyük odak uzaklığına sahip bir göz merceği f_2 , burada $f_1 \ll f_2$.

Cisim, objekteye çok yakın, odak noktasının biraz dışında yerleştirilir. Cisimden çıkan ışık ışınları objektiften geçerve burada biraraya gelerek gerçek, ters ve büyütülmüş bir görüntü oluştururlar. Bu görüntü, göz merceğinin odak uzaklığından daha kısa bir mesafede bulunur ve göz merceğinin cismi görevi görür.

Oküler, bir büyüteç görevi görür ve bu görüntüden, gözle gözlemlenen nihai, sanal ve daha da büyütülmüş bir görüntü oluşturur (şekil 15). Nihai görüntü, cisme göre ters çevrilidir ve bir ekrana yansıtılamaz.



Şekil 15. Mikroskopta görüntü oluşumu



ETKİNLİK 3.

Simülasyon teleskop ve mikroskop şemaları

Işın Optik Simülasyonunu (Ray Optics Simulation) kullanarak, Şekil 12 ve 13'te gösterilen farklı teleskop türlerini ve Şekil 15'teki mikroskobu oluşturun. Farklı optik elemanlarla kendi tasarımlarınızı oluşturmak için" Launch Simulator "seçeneğini seçin. (Gallery) Galeri'de önceden hazırlanmış optik sistem örnekleri de mevcuttur.

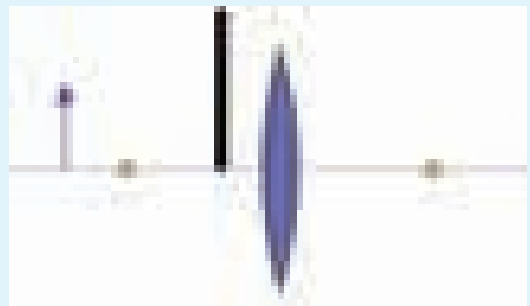
Simülasyona aşağıdaki bağlantıdan erişebilirsiniz:

<https://phydemo.app/ray-optics/>



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Yakınsak mercek kullanılan dürbünler, mercekleri yakınsak olmasına rağmen neden cisimleri büyütülmüş olarak göstermez?
2. Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, merceğin yarısı opak bir cisimle kapatılırsa görüntü nasıl değişir? Cevabınızı Ray Optics Simulation ile kontrol ediniz. (sağ alt köşedeki resme bakın).
3. İki mercek birbirine yapıştırılırsa odak uzaklığı nasıl değişir?
4. 6 cm yüksekliğindeki bir cisim, odak uzaklığı 9 cm olan bir yakınsak merceğin optik merkezinden 18 cm uzaklıkta bulunmaktadır. Aşağıdakileri belirleyin: a) görüntünün merceğe olan uzaklığı; b) merceğin büyütme oranı; c) görüntünün boyutu ve türü. (Çözüm: $l = 18$ cm, $U = 1$, görüntü cisimle aynı boyutta ve gerçektir)
5. 5 cm yüksekliğindeki bir cisim, odak uzaklığı -8 cm olan bir ıraksak merceğin 12 cm uzağına yerleştirilmiştir. Aşağıdakileri belirleyin: a) görüntünün mercekten uzaklığı



b) merceğin büyütme oranı

c) görüntünün boyutu ve türü. (Çözüm: a) $l = -4,8$ cm; b) $U = 0,4$; c) $hl = 2$ cm, küçültülmüş ve sanal)

6. 10 cm yüksekliğindeki bir cisim, bir yakınsak mercekten 25 cm uzaklıkta yerleştirilmiştir. Büyütme oranının mutlak değeri 0,5'tir. Aşağıdakileri belirleyin: a) görüntünün merceğe olan uzaklığı b) merceğin odak uzaklığı; c) görüntünün yüksekliği ve türü. (Çözüm: a) $l = 12,5$ cm; b) $f = 8,33$ cm; c) $hl = 5$ cm, küçültülmüş, gerçek)

7. Odak uzaklığı 10 cm olan bir yakınlştırıcı mercek ile odak uzaklığı -5 cm olan bir uzaklaştırıcı mercek, birbirinden 20 cm uzaklıkta yerleştirilmiştir. Bir cisim, ilk merceğin 30 cm önünde bulunmaktadır. a) İlk mercek tarafından oluşturulan görüntüyü bulun. b) Sistemin nihai görüntüsünü belirleyin. c) Toplam büyütme oranını bulun. (Çözüm: $l_1 = 15$ cm, $U_1 = 0,5$ (gerçek, küçültülmüş, ters), $l_2 = -2,5$ cm, $U_2 = 0,5$ (hayali, küçültülmüş, dik), $U = 0,25$).

3.6. Işığın renklerine ayrılması (Dispersiyon)

Güneşten gelen ışığın rengi nedir? Güneşi genellikle sarı, bazen de turuncu olarak görürüz. Bu soruyu daha kesin bir şekilde cevaplamadan önce, basit bir örnek üzerinde duralım.



Şekil 1. Beyaz ışıkla (solda) ve kırmızı ışıkla (sağda) aydınlatılmış aynı oda

Bir odaya yalnızca kırmızı LED'lerden oluşan bir aydınlatma yerleştirildiğini düşünelim. Bu odadaki cisimler hangi renkte görünür?

Şekil 1'de (sağda) oda kırmızı renkte görünmektedir. Cisimlerin gerçek rengi değişmez. Ancak ışık kaynağı yalnızca kırmızı ışık yaydığı için, cisimlerden yansıyan kırmızı ışık gözümüze ulaşır.

Çevremizdeki cisimler, aydınlatıldıkları ışığın özelliklerine bağlı olarak farklı renklerde görünebilir. Işık bir cismin üzerine düştüğünde, cisim bazı dalga boylarını soğurur, diğerlerini ise yansıtır. **Bir cismin görünen rengi, yansıyarak gözümüze ulaşan ışığın dalga boylarına bağlıdır.** Güneş, beyaz ışığın doğal bir kaynağıdır. Beyaz ışık, görünür bölgedeki tüm dalga boylarını içerir. Bu nedenle beyaz ışıkla aydınlatılan cisimler gerçek renklerinde görünür. Beyaz ışığın tayfı gökkuşağında gözlemlenebilir.

Her renk belirli bir dalga boyuna karşılık gelir. Tek bir dalga boyuna sahip **ışığa monokromatik**, birden fazla renkten oluşan ışığa ise polikromatik ışık denir. **Polikromatik ışık**, görünür bölgedeki tüm renkleri içermek zorunda değildir. Örneğin, kırmızı ve mavi ışığın birleşimi mor renk izlenimi oluşturur (Şekil 2).



Şekil 2. Mavi ve kırmızı lambalardan oluşan bir ışık kaynağıyla aydınlatılan bitkiler.

Kırılma indisinin önemli bir özelliği, vakum dışındaki tüm ortamlarda değerinin ışığın dalga boyuna bağlı olmasıdır. Kırılma indisi dalga boyunun bir fonksiyonu olduğundan, farklı dalga boylarına sahip ışık bir ortamdan diğerine geçerken farklı açılarla kırılır. Dalga boyu arttıkça kırılma indisi azalır. Bu nedenle, dalga boyu daha kısa olan ışık (örneğin mavi veya mor ışık) daha büyük bir kırılma indisine sahiptir ve dalga boyu daha uzun olan ışığa (örneğin kırmızı ışık) göre daha fazla kırılır.

Beyaz ışık bir prizmadan geçtiğinde, farklı renkler farklı açılarla kırılır ve beyaz ışık bileşen renklerine ayrılır. Böylece, dalga boyu büyükten küçüğe doğru sıralanmış kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi, indigo ve mor ışıklardan oluşan **görünür tayf** elde edilir.



Şekil 3. Üçgen prizma ile beyaz ışığın dispersiyonu.

Beyaz ışığın renklere ayrılmasına **ışığın dispersiyonu** denir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Bir ışık demeti, cam ortama 30° 'lik bir açıyla düşer. Aynı anda, dalga boyu 630 nm olan kırmızı ışık ve dalga boyu 440 nm olan mavi ışık da cam ortama düşer.

Kırılma indisleri: $n_c = 1,32$ ve $n_c = 1,38$. İki ışığın kırılma açıları arasındaki farkı bulunuz.

Çözüm:

Kırılma Yasasını kullanacağız: $\sin \alpha = n \sin \beta$.

$$\text{Kırmızı ışık: } \sin \beta_u = \frac{\sin 30^\circ}{1,32} = 0,379, \quad \beta_u = 22,3^\circ.$$

$$\text{Mavi ışık: } \sin \beta_c = \frac{\sin 30^\circ}{1,38} = 0,362, \quad \beta_c = 21,2^\circ. \text{ Kırılma açıları arasındaki fark şudur:}$$

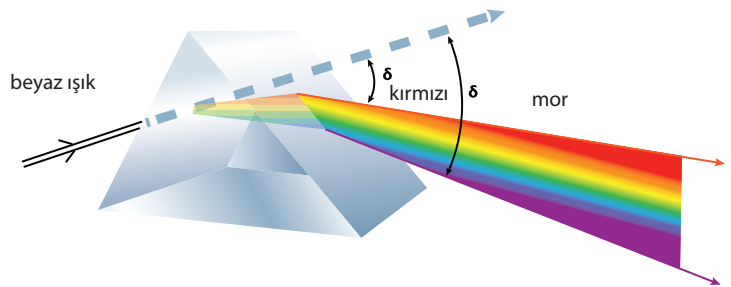
$$\Delta\beta = \beta_u - \beta_c = 1,1^\circ.$$

Her iki ışık da aynı açıyla girse de, kırılma indisi dalga boyuna bağlı olduğu için farklı açılarda kırılırlar. Dalga boyu daha kısa olan mavi ışık, kırmızı ışığa göre daha fazla kırılır. Kırılma açılarındaki bu fark, ışığın saçılma olgusunun fiziksel temelini oluşturur.

Işığın dispersiyonu, prizma kullanılarak açıklanabilir. Prizma, ışığın girişte ve çıkışta kırıldığı, iki düz ve eğimli kırıcı yüzeyle sınırlanmış saydam bir optik elemandır (Şekil 3). Çizimlerde prizma genellikle üçgen kesitli olarak gösterilir. Bunun nedeni, bu iki yüzey arasındaki açının ışık ışınının yönündeki toplam değişimi, yani sapmayı belirlemesidir.

Beyaz ışık prizmadan geçerken, farklı renkler ve farklı açılarda kırılır.

Gelen ışının doğrultusu ile çıkan (kırılan) ışının doğrultusu arasındaki açıya sap-

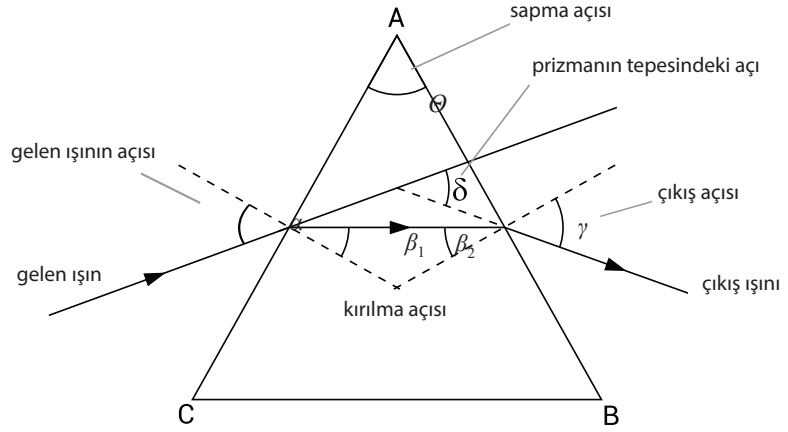


Şekil 4. Kırmızı ve mor ışık için sapma açısının şematik gösterimi.

ma açısı denir. Pratikte sapma açısı, gelen ve çıkan ışınların uzantıları arasındaki açı olarak

Kırılma indisi dalga boyuna bağlıdır ve sapma açısı tüm renkler için aynı değildir (Şekil 4).

Şekil 5, ışık ışınının prizma içinden geçme yolunu göstermektedir. Kullanılan semboller ve bunların anlamları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 5. Bir ışığın prizma içinden kırılması. Şemada ana unsurlar gösterilmiştir.

Tanım	Anlam
α	birinci arayüzdeki geliş açısı (gelen ışın ile normal arasındaki açı)
β_1	birinci arayüzün kırılma açısı
β_2	ikinci arayüzün geliş açısı
γ	çıkış açısı (çıkış ışını ile ikinci yüzeye dik olan normal arasındaki açı)
θ (okunuşu "teta")	prizmanın tepe noktasındaki açı
δ (okunuşu "delta")	sapma açısı (ışının yönündeki toplam değişim)

Tablo1. Bir prizma üzerinden ışığın kırılmasında kullanılan semboller ve anlamları

Tepe noktasında küçük bir açı θ bulunan bir prizma, havaya yerleştirildiğinde sapma açısı δ aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$\delta \approx (n-1)\theta.$$

Dolayısıyla, kırılma indisi ışığın dalga boyuna bağlı olduğundan, sapma açısı tüm renkler için aynı değildir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

İnce bir prizmanın tepe açısı $\theta = 6^\circ$ 'dir. Dalga boyu 630 nm olan kırmızı ışık ve dalga boyu 440 nm olan mavi ışık prizmadan geçer. Her iki ışığın kırılma indisi şöyledir. $n_{\text{mavi}} = 1,38$ ve $n_{\text{kırmızı}} = 1,32$. İnce bir prizma için yaklaşık ilişkiyi kullanarak, her iki ışığın minimum sapmasını ve aralarındaki farkı bulun.

Çözüm:

Mavi ışık için: $\delta_{\text{min,mavi}} \approx (1,38 - 1) \cdot 6^\circ = 0,38 \cdot 6^\circ = 2,28^\circ$

Kırmızı ışık için: $\delta_{\text{min,kırmızı}} \approx (1,32 - 1) \cdot 6^\circ = 0,32 \cdot 6^\circ = 1,92^\circ$

Sapma açıları arasındaki fark: $\Delta \delta_{\text{min}} = \delta_{\text{min,mavi}} - \delta_{\text{min,kırmızı}} = 2,28^\circ - 1,92^\circ = 0,36^\circ$.

Bu küçük açı farkı, beyaz ışığın tayfa (renklerine) ayrılmasının fiziksel nedenidir. Tek tek sapma açıları küçük olsa da, prizmadan yeterince uzak bir mesafede bu fark, renklerin belirgin biçimde birbirinden ayrılmasına yol açar. Bu nedenle prizmalar ve spektrometreler, fiziğin ve astronominin ışığın yapısını ve bileşimini incelemesinde kullanılan temel araçlardır.



ETKİNLİK 1.

Amaç: Sapma açısı δ 'nin, **prizma üzerindeki geliş açısı α 'ya** nasıl bağlı olduğunu araştırmak.

Gereçler: Doğrusal lazer kaynağı, prizma, açıölçer, kağıt ve kurşun kalem.

Dikkat! Asla lazer ışığına doğrudan bakmayın.

Yöntem:

Prizmayı bir kağıt üzerine yerleştirin ve dış hatlarını çizin.

Lazer ışını, prizmanın yüzlerinden birine yönlendirilir. Kağıt üzerinde, gelen ışının en az iki noktası ve çıkan ışının en az iki noktası işaretlenir. İki sınır yüzeyine dik çizgiler çizilir.

Prizma kaldırılır ve işaretlenen noktalar üzerinden gelen ve çıkan ışınlar çizilir. İki sınır yüzeyine dik çizgiler çizilir.

Açıölçer kullanılarak, geliş açısı α ile çıkış açısı γ , ilgili normallere göre ölçülür.

Sapma açısı δ işaretlenir ve açıölçer ile ölçülür.

Yeni bir geliş açısı elde etmek için lazer hareket ettirilir. Ardından, bu işlem çeşitli geliş açıları için tekrarlanır.

7. Sonuçlar bir tabloya yazılır:

8. Sapma açısı δ 'nin geliş açısı α 'ya bağlılığı grafikte gösterilmiştir.

9. Grafiğe dayanarak aşağıdaki soruları cevaplayınız:

N	α (°)	γ (°)	δ (°)
1	30°		
2	40°		
...			

a) Geliş açısının artmasıyla sapma açısı nasıl değişir?

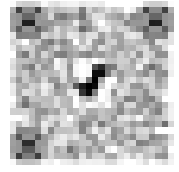
b) Sapma açısı hangi α değeri için en küçüktür?

c) Minimum sapma durumunda gelen açı ile kırılan açı arasındaki ilişki nedir?

d) Hangi α değeri için minimum sapma elde edilir? Bu geliş açısı için γ açısının değerini belirtiniz?

Not: Aynı etkinlik, PhET simülasyonu "Bending Light" (Prizmalar modunda) kullanılarak da gerçekleştirilebilir; burada açıları doğrudan ölçmek için "açıölçer" seçeneği etkinleştirilebilir. Simülasyona şu web sitesinden ulaşılabilir:

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/bending-light>.



SORULAR VE ÖDEVLER

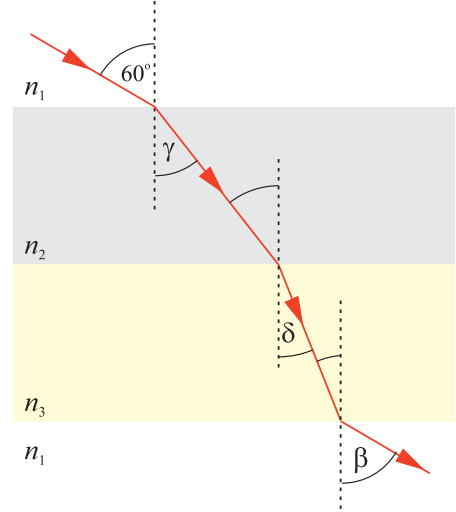
1. Beyaz ışık çok renkli midir? Peki, çok renkli ışık beyaz mıdır?
2. Tek renkli ışık, prizmadan geçerken neden renklere ayrılmaz?
3. Prizma, daha yüksek kırılma indisine sahip bir malzemeden yapılmışsa sapma açısı nasıl değişir?
4. Kırılma indisi dalga boyuna bağlı olmasaydı, dağılım(dispersiyon) nasıl olurdu?
5. İki farklı prizma, aynı dalga boyu için aynı sapma açısını verebilir mi? Bu neye bağlı olacaktır?
6. Üçgen bir prizma tepe açısı 50° 'dir. Bir deneyde geliş açısı 35° , sapma açısı ise 25° olarak ölçülmüştür.
 - a) Çıkış açısını belirleyiniz.
 - b) Aynı deneyde geliş açısı 10° artırılırken tepe açısı sabit tutulmaktadır. Çıkış açısı, a şıkkındaki değerle aynı kalırsa sapma açısı kaç derece olur? Açıklayınız.
(Çözüm: 40° , 35°)

7. Tepe açısı 45° olan üçgen bir prizmaya, kırmızı ve mavi renkli iki monokromatik ışık ışını 45° 'lik aynı geliş açısıyla düşmektedir. Malzemenin kırılma indisleri şunlardır: $n_{\text{kırmızı}} = 1,32$ ve $n_{\text{mavi}} = 1,38$. Çıkış açıları arasındaki farkı bulun. (Çözüm: $3,3^\circ$)

Konu 3: SORULAR VE ÖDEVLER

1. Işığın doğası ile ilgili hangi teoriler vardır? Bunları açıklayın ve karşılaştırın.
2. İki elektromanyetik dalga vakumda yayılır. Hangisi daha hızlı ilerler: frekansı daha yüksek olan mı, yoksa frekansı daha düşük olan mı?
3. Işık, farklı ortamlarda farklı hızlarda ilerler. Bu ortamları, içinden geçen ışık hızına göre, en yavaş olan ortamdan başlayarak sıralayın: hava, elmas, vakum, su.
4. Bir cismin sanal görüntüsünün çıplak gözle görülmesi veya fotoğraflanması neden mümkündür?
5. Bir içbükey ayna kullanarak güneş ışığını bir kağıt parçasına odaklayarak ateş yakmak istediğinizi hayal edin. En iyi sonuçları elde etmek için kağıt aynadan ne kadar uzakta tutulmalıdır?
6. Düzlem-paralel bir plaka için, çıkan ışın gelen ışına paraleldir. Bu, kırılma olmadığı anlamına mı gelir? Açıklayınız.
7. Düzlem-paralel bir cam levhanın kalınlığı 8 cm ve kırılma indisi 1,50'dir. Bir ışık ışını 30° 'lik bir açıyla girer. Işın, levhadan çıkarken yana doğru ne kadar kayacaktır? (Çözüm: 1,6 cm)
8. Neden iraksak bir mercek için görüntü her zaman mercek ile odak noktası arasında yer alır?
9. Iraksak bir mercek için, görüntünün uzaklığı 1 negatifse, cisme göre nerede bulunur?
10. Prizma, daha yüksek bir kırılma indisine sahip bir malzemeden yapılmışsa, sapma açısı nasıl değişir?
11. Bir radyo alıcısının anteni yaklaşık 75 cm uzunluğundaysa, alıcının çalıştığı frekansın büyüklük sırası nedir? (Çözüm: 300 MHz)
12. Işık yılı, ışık hızı cinsinden tanımlanır: bir ışık yılı, ışığın bir yıl içinde boşlukta kat ettiği mesafedir. Bir ışık yılında kaç metre olduğunu hesaplayınız. (Çözüm: $9,46 \cdot 10^{15}$ m)
13. Bir ışık ışını düz bir aynaya çarpar ve Yansıma Yasası'na göre yansır. Başlangıç konumunda, gelen ışın ile yansıyan ışın arasındaki açı 23° 'dir. Daha sonra, ışık kaynağının konumu değişmeden kalacak şekilde ayna, geliş açısı 10° artacak şekilde döndürülür. Ayna döndürüldükten sonra, gelen ışın ile yansıyan ışın arasındaki yeni açı ne olacaktır? (Çözüm: 43°)
14. Bir küresel aynada odak uzaklığı, cismin aynaya olan uzaklığının yarısına eşittir ($p = 2f$).
a) Büyütme oranını ifade ediniz.
b) İçbükey ve dışbükey ayna durumlarını ayrı ayrı inceleyiniz.
c) Her iki durumda da büyütme oranının aynı değeri alması mümkün müdür?
(Çözüm: a) $U = \frac{1}{\frac{p}{f} - 1}$; b) İçbükey: $U = 1$ (gerçek, ters, aynı büyüklükte); Dışbükey: $U = \frac{1}{3}$ (sanal, dik, küçültülmüş); c) Hayır.)
15. Bazı kameralar, objektif olarak mercek yerine ayna kullanır. Odak uzaklığı 0,8 m olan bir merceğin yerine bir içbükey aynanın kullanılması için hangi eğrilik yarıçapı gereklidir? (Çözüm: 1,6 m)
16. Bir kameranın zoom merceğinin odak uzaklığı 80,0 mm ile 200 mm arasında değişmektedir. Merceğin minimum ve maksimum büyütme oranlarını bulunuz. (Çözüm: $5 D < M < 12,5 D$)

17. 5 cm yüksekliğindeki bir cisim, odak uzaklığı 8 cm olan bir ıraksak mercekten 12 cm uzağa yerleştirilmiştir. Aşağıdakileri belirleyin:
 a) görüntünün mercekten uzaklığı; b) görüntü
 (Çözüm: a) $l = -4,8$ cm; b) $U = 0,4$; c) $h_l = 2$ cm, küçültülmüş ve sanal)
18. Havadan gelen bir lazer ışını, sağdaki şekilde gösterildiği gibi üst üste yerleştirilmiş iki düzlem-paralel levhadan geçmektedir. Birinci levhanın kırılma indisi 1,33, ikinci levhanınki ise 1,50'dir. Şekilde gösterilen bilinmeyen açıları bulunuz. Işık ışını ikinci düzlem-paralel levhadan hangi açıyla çıkar?
 (Çözüm: $\gamma = 40,6^\circ$, $\delta = 35,3^\circ$, $\beta = 60^\circ$)
19. Bir optik fiber, kırılma indisi 1,66 olan flint camdan yapılmış ve kırılma indisi 1,52 olan taç camla kaplanmıştır. Tam iç yansıma için kritik açı nedir? (Çözüm: 66°)
20. Bir yakınsak merceğin oluşturduğu görüntünün büyütme oranı 3'tür. Cisim mercekten 4 cm uzaklaştırıldığında büyütme oranı 1,5 olur. Merceğin odak uzaklığını bulunuz. (Çözüm: 12 cm)



KONU 4:

Atom ve Nükleer Fizik

Bizi çevreleyen madde, boyutları son derece küçük olan ve davranışları klasik fiziğin yasalarıyla tam olarak açıklanamayan parçacıklardan oluşur. Atomların yapısını ve çekirdeklerinde gerçekleşen süreçleri anlayabilmek için farklı bir fiziksel yaklaşıma ihtiyaç vardır.

Atomların yapısını ve özelliklerini inceleyen fizik dalına atom fiziği, atom çekirdeklerini ve bu çekirdeklerde gerçekleşen süreçleri inceleyen fizik dalına ise nükleer fizik denir. Bu konuda atom modelleri, enerji düzeyleri ve tayflar, ışınımın maddeyle etkileşimi ile atom çekirdeğinin yapısı ve özellikleri hakkında bilgi edineceksiniz.

Radyoaktif bozunma, nükleer tepkimeler ve iyonlaştırıcı ışınım gibi olayların yanı sıra bunların uygulamaları ve sonuçları da ele alınacaktır. Atom ve nükleer fizik alanındaki bilgiler; tıp, enerji, endüstri ve bilim açısından temel öneme sahiptir ve mikro dünyayı ve onun gözlemlediğimiz dünya üzerindeki etkisini daha derinlemesine anlamamızı sağlar.

Öğrenim çıktıları

Öğrenci aşağıdakileri yapabilecektir:

1. Isıl ışınım olayını açıklar ve ısı ışınım yasalarını günlük yaşamdan örnekler üzerinde uygular.
2. Fotoelektrik olayı açıklar, Einstein'ın fotoelektrik denklemine ilişkin yorum yapar ve fotosellerin çalışma ilkesini teknolojideki uygulamalarıyla ilişkilendirir.
3. Röntgen ışınlarının oluşumunu ve tayfını açıklar; röntgen ışınlarının kullanım alanlarına ve röntgen ışınına maruz kalmanın etkilerine örnekler verir.
4. Rutherford deneyini analiz eder ve Rutherford atom modeli ile Bohr atom modelini karşılaştırır.
5. Atomun soğurma ve emisyon tayflarını analiz eder ve bunları atomdaki elektron geçişleriyle ilişkilendirir.
6. Atom çekirdeğinin yapısını açıklar; izotop, izobar ve izotonları ayırt eder; atom çekirdeği gösterimini yorumlar ve güçlü nükleer kuvvetlerin çekirdeğin kararlılığı açısından önemini açıklar.
7. Radyoaktif bozunma yasalarını açıklar ve uygular; α , β ve γ ışınlarını karşılaştırır ve bunların enerjilerini ile nüfuz etme güçlerini değerlendirir.
8. Atom çekirdeğinin kütle kusurunu ve bağlanma enerjisini analiz eder; hesaplamalar yapar ve özgül bağlanma enerjisinin kütle numarasına bağlı değişimini gösteren grafiği yorumlar.
9. Nükleer tepkimeleri, fisyon ve füzyonu açıklar ve karşılaştırır; bunların enerji üretimi ve sürdürülebilir kalkınma üzerindeki çevresel etkilerini değerlendirir.

4.1. Siyah cismin ışıması

Önceki konuda, ışığın bir elektromanyetik dalga olduğunu ve farklı dalga boylarına sahip olabileceğini söylemiştik. Beyaz ışığın bir prizmadan geçerken farklı renklere ayrıldığını görmüştük. Bu olaya ışığın dispersiyonu adını vermiştik. Ancak gözümüzle gördüğümüz renkler, elektromanyetik tayfın yalnızca küçük bir bölümünü temsil eder. Görünür ışığın yanı sıra, göremediğimiz ancak hissedebildiğimiz elektromanyetik ışınlarda vardır. Bunun bir örneği ısı ışımasıdır. Örneğin, mutfağa girip ocağın üzerine bir şey koymak istiyorsunuz, ancak ocağın sıcak olup olmadığını bilmiyorsunuz. Dokunmak yerine avucunuzu yaklaştırıp ısı yayılıp yayılmadığını hissedersiniz. Ocakla doğrudan temas olmasa da, hissettiğiniz ısı ocağın sıcak olup olmadığını açıkça gösterir.

Isıl ışımayı hissedebilsek de doğrudan göremeyiz. Günümüzde bu ışımayı algılayan ve görüntüye dönüştüren cihazlar bulunmaktadır. Termal kamera, ısı ışımasını renklere dönüştürür; burada daha sıcak ve daha soğuk bölgeler farklı renk ve tonlarda gösterilir (Şekil 1).

Mutlak sıfırın üzerindeki sıcaklığa sahip bütün cisimler enerji yayar. Bir cismin yaydığı ışımanın miktarı ve özellikleri, cismin sıcaklığına bağlıdır. Sıcaklık düşük olduğunda yayılan ışıma genellikle çıplak gözle görülemez; ancak sıcaklık arttıkça görünür hâle gelir. Örneğin, bir metal ısıtıldığında önce koyu kırmızı, ardından daha parlak kırmızı, turuncu ve sarı renkte parlar; çok yüksek sıcaklıklarda ise beyaz ışık yayar. Bu durum, sıcaklığı arttıkça rengi değişen alev gibi yüksek sıcaklıklara ısıtılmış cisimlerde de çıplak gözle gözlemlenebilir. Bu olaya, sıcaklığa bağlı renk değişimiyle ortaya çıkan ışıma denir (Şekil 2).

Bir cisim ışıma yaydığı anda çevresine enerji verir. Aynı zamanda, üzerine düşen ışıma yoluyla enerji de alabilir. Bu iki ilişkili süreç **yayılım ve soğurma** denir. Bir cismin ne kadar enerji yaydığı veya soğurduğu, sıcaklığına ve yüzeyinin özelliklerine bağlıdır.

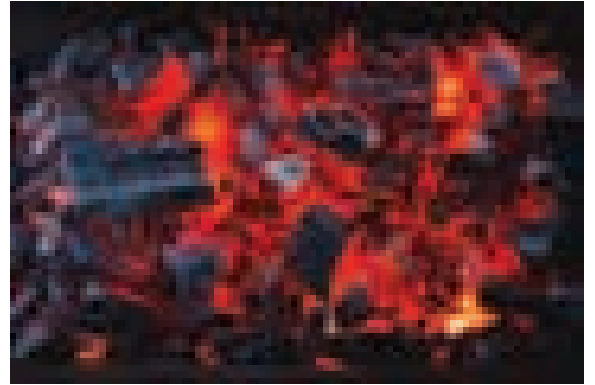
Bir cismin tüm dalga boylarında yaydığı toplam enerjiye integral emisivite (veya toplam ışıma gücü) denir. Bu büyüklük, elektromanyetik ışıma tayfındaki tüm dalga boyları boyunca yayılan enerjiyi dikkate alarak, cismin birim yüzey alanından birim zamanda ne kadar enerji yaydığını gösterir. Bu büyüklük aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$E_T = \frac{E}{St},$$

Burada E yayılan enerjiyi, S cismin yüzey alanını, t ise cismin E enerjisini yaydığı süreyi temsil eder.



Şekil 1. Ocak üzerinde bulunan bir su ısıtıcısının termal görüntüsü. Farklı renk ve tonlar, su ısıtıcısının farklı bölgelerindeki sıcaklıkları gösterir. Beyaz ve kırmızı renkli bölgeler en yüksek, mavi renkli bölgeler ise en düşük sıcaklığa sahiptir.



Şekil 2. Farklı sıcaklıklara ısıtılmış odun kömürü parçaları. Farklı renkler, farklı ısıtma sıcaklıklarını göstermektedir.

Cisimler, radyasyon yaymanın yanı sıra, üzerlerine gelen elektromanyetik radyasyonu da eşzamanlı olarak emerler. **İntegral emilim katsayısı (a_T), cisim tarafından emilen toplam gelen radyasyonun oranını gösterir.** Birim zaman ve birim alan başına E_{vk} enerjili radyasyon cismin üzerine düşerse ve cisim birim zaman ve birim alan başına E_a enerjisini emerse, o zaman integral emilim katsayısı şu şekilde hesaplanır:

$$a_T = \frac{E_a}{E_{vk}}.$$

İntegral emilim katsayısı boyutsuz bir büyüklüktür ve 0 ile 1 arasında değer alabilir:

- $a_T = 0$ ise, cisim yüzeyine düşen radyasyonun hiçbirini emmez.
- $a_T = 1$ ise, cisim yüzeyine düşen radyasyonun tamamını emer.

Ancak cisimler, elektromanyetik radyasyonun tüm dalga boylarını aynı şekilde yaymaz ve emmez. Bazı dalga boylarında daha fazla radyasyon yayılır ve cisim, yine bu dalga boylarındaki radyasyonu daha etkili bir şekilde emer.

Radyasyon şiddetinin dalga boyuna bağlılığını açıklamak için, spektral yayma gücü (veya spektral ışıma şiddeti) $E_{T\lambda}$ büyüklüğü tanımlanır. Bu büyüklük, cisima T sıcaklığına ısıtıldığında, birim alan ve birim zamanda, çok küçük bir $\Delta\lambda$ dalga boyu aralığında yayılan enerji miktarını ifade eder.

Benzer şekilde, **spektral emilim katsayısı ($a_{T\lambda}$)**, cismin çok küçük bir $\Delta\lambda$ dalga boyu aralığında üzerine gelen elektromanyetik radyasyonun ne kadarını emdiğini gösterir. Bu büyüklükler dalga boyuna, cismin sıcaklığına ve yüzeyinin özelliklerine bağlıdır. Özet olarak, bu büyüklükler Tablo 1'de verilmiştir.

Büyükölük	Neyi tanımlar	Neye bağılıdır?	Fiziksel anlamı
İntegral emisivite (E_T)	Cisim tarafından tüm dalga boyları boyunca yayılan toplam enerji	Yalnızca sıcaklığa (T) bağılıdır.	Cismin birim alanından birim zamanda yayılan toplam enerji.
Spektral emisivite ($E_{T\lambda}$)	Belirli bir $\Delta\lambda$ dalga boyu aralığında cisim tarafından yayılan enerji	Dalga boyuna (λ) ve sıcaklığa (T) bağılıdır.	Cismin belirli küçük bir dalga boyu aralığında, birim alanından birim zamanda yaydığı enerji
İntegral emme kapasitesi (a_T)	Gelen radyasyonun toplam enerjisinin cisim tarafından emilen kısmı	Malzemeye ve yüzey özelliklerine bağılıdır.	Cisme birim alan başına ve birim zamanda gelen toplam enerjinin emilen kısmı.
Spektral emilim katsayısı ($a_{T\lambda}$)	Belirli bir $\Delta\lambda$ dalga boyu aralığında emilen enerji	Dalga boyuna (λ) ve malzemenin özelliklerine bağılıdır.	Cismin belirli küçük bir dalga boyu aralığında, birim alan başına ve birim zamanda gelen enerjinin ne kadarını emdiğini gösterir.

Tablo 1. Isıl ışıma yayılım ve soğurma büyüklüklerinin özeti

Dünya, Güneş'ten sürekli olarak enerji alır; bu enerjinin bir kısmını emer ve Dünya'nın yüzeyini ve atmosferini ısıtır. Aynı zamanda, Dünya da çevresindeki uzaya termal enerji yayar. Dünya'nın sadece enerji emmekle kalmayıp aynı zamanda enerji yaydığı, Ay'dan yapılan ölçümlerle de kanıtlanabilir. Güneş, Ay'ın karanlık tarafını aydınlatmasa da, Dünya'nın yaydığı ısı ışıma bu taraftan kaydedilebilir (Şekil 3). Bu, enerji emen bir cismin aynı anda ısı ışıma (termal radyasyon) yoluyla enerji yaydığını açıkça gösterir.

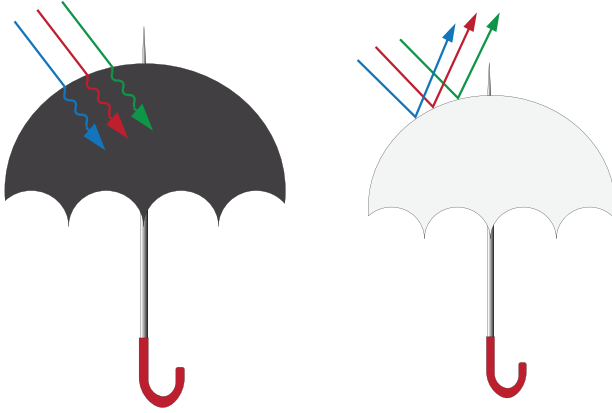
Işının yayılması ve emilimi söz konusu olduğunda, doğal olarak şu soru ortaya çıkar: Üzerine düşen tüm ışınımı emen bir cisim var mıdır? Böyle bir ideal cismin modeline siyah cisim denir. **Siyah cisim, radyasyonun dalga boyuna bakılmaksızın, üzerine gelen elektromanyetik radyasyonun tüm enerjisini emen bir cisimdir.** Bu, böyle bir cismin hiçbir radyasyonu yansıtmadığı ve dolayısıyla aydınlatıldığında siyah görünür (Şekil 4). Siyah cisim için tüm dalga boylarında spektral emilim katsayısı 1'dir; bundan da şu sonuç çıkar: integral emilim katsayısı 1'e eşittir.

Doğada siyah cisim yoktur.

ni, her cisim üzerine düşen enerjinin en azından bir kısmını yansıtır. Doğada siyah bir cisim bulunmasa da, bu kavram termal radyasyonu en basit haliyle incelememize olanak tanıdığı için son derece önemlidir. Siyah bir cisim, yüzeyine düşen radyasyonu yansıtmadığından, yaydığı toplam radyasyon yalnızca cismin kendisinden kaynaklanır ve sadece



Şekil 3. Ay'ın karanlık yüzü, görüldüğü kadar karanlık değildir

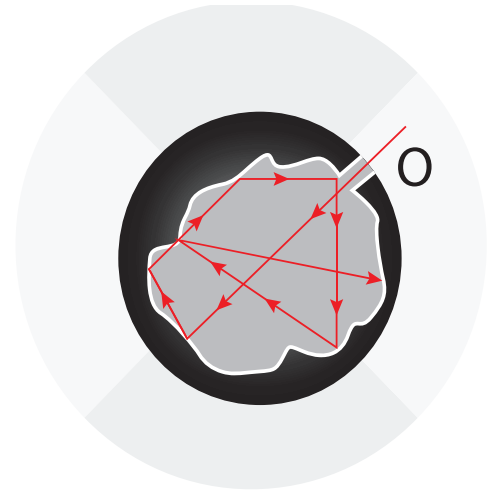


Şekil 4. Siyah cisimler tüm dalga boylarındaki ışığı emerken, beyaz cisimler ışığı yansıtır.

sıcaklığına bağlıdır. Fiziksel cisimlerde yayılan radyasyon genellikle kendi radyasyonu ile çevreden üzerine düşen yansıyan radyasyonun birleşimidir, ancak siyah bir cisimde böyle bir katkı yoktur.

Bu özelliği nedeniyle yıldızlar, siyah cisme en yakın doğal örneklerden biridir. Her ne kadar mükemmel siyah cisimler olmasalar da, yaydıkları radyasyon siyah cisim modeliyle çok iyi açıklanabilir. Çünkü yoğun ve sıcak katmanları, tüm dalga boylarındaki radyasyonu büyük ölçüde emer ve yayar.

Laboratuvar ortamında siyah cisim, iç yüzeyi is ile kaplanmış ve üzerinde küçük bir açıklık bulunan metal bir küre ile modellenenebilir. Küçük açıklıktan kürenin içine giren ışınım, iç yüzeyden birçok kez yansdıktan sonra tamamen soğurulur. Bu nedenle, kürenin açıklığı tüm dalga boylarındaki ışınımı soğuran bir yüzey gibi davranır; yani siyah cismin özelliklerini taşır. Termodinamik dengede, açıklıktan yayılan ışınım yalnızca boşluğun sıcaklığına bağlıdır ve kürenin iç yüzeyini oluşturan malzemeye bağlı değildir. Bu nedenle, açıklıktan yayılan ışınım, siyah cisimde olduğu gibi **ısı ışınımı** niteliğindedir.



Şekil 5. İçi is ile kaplı bir kürenin açıklığı, siyah cismin özelliklerine sahiptir.

Termal ışıınım yasaları

Termal radyasyon spektrumu

Bir cisim radyasyon yaydığında, tüm enerjisini tek bir dalga boyunda yaymaz. Aynı anda farklı dalga boylarında elektromanyetik dalgalar yayar. Yayılan enerjinin dalga boylarına göre dağılımına termal radyasyon spektrumu denir. Şekil 6, farklı sıcaklıklara ısıtılmış bir siyah cismin radyasyon spektrumu göstermektedir.

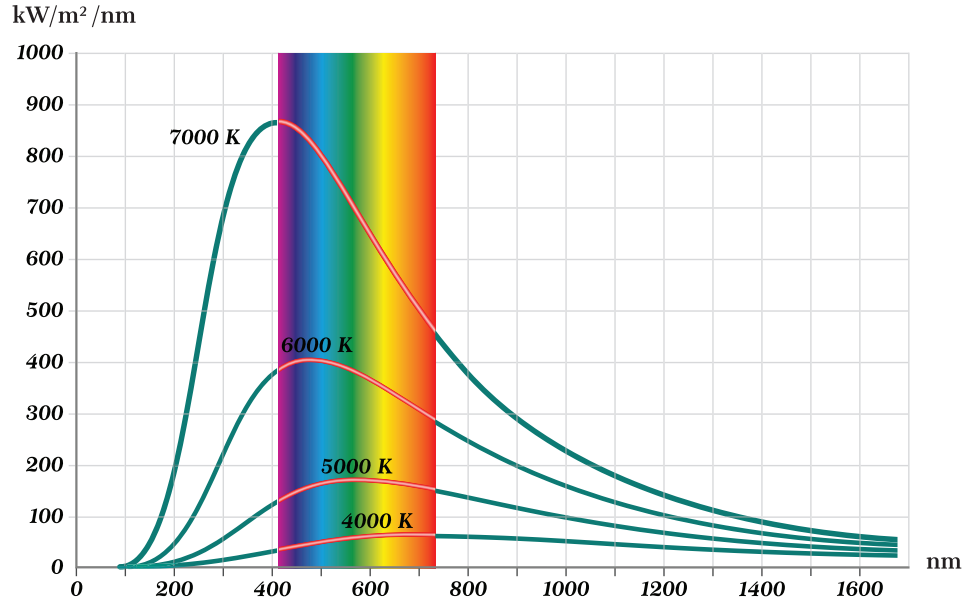
Grafikten, siyah cismin tüm dalga boylarında enerji yaydığı görülebilir. Ancak ışıının spektral şiddeti, tüm dalga boylarında aynı değildir; ayrıca aynı büyüklük, siyah cismin farklı sıcaklıklarında da değişir. ışıının tüm dalga boylarında bulunduğu bu tür spektruma **sürekli spektrum** denir.

Grafik, farklı dalga boyu aralıkları için cismin spektral emisivitesini okumak amacıyla kullanılabilir; yani her dalga boyu için, cismin birim zamanda ve birim alan başına ne kadar enerji yaydığını belirlemek mümkündür. Başka bir deyişle, belirli bir dalga boyu için eğrinin yüksekliği, o dalga boyundaki radyasyonun yoğunluğunu gösterir. Belirli bir sıcaklıkta eğrinin altındaki alandan, cismin integral emisivitesi, yani tüm dalga boyları boyunca yaydığı toplam enerji belirlenebilir.

Şekil 6'daki spektrumlardan, sıcaklığın termal radyasyon üzerindeki etkisi açıkça görülebilir. Cismin sıcaklığı arttıkça:

1. Cisim tarafından birim zamanda ve birim alandan yayılan toplam enerji artar (eğri altındaki alan daha büyüktür).
2. Radyasyon maksimumu daha kısa dalga boylarına doğru kayar.

Bu sonuçlar, siyah bir cismin sıcaklığının bir fonksiyonu olarak spektral emisivite grafiğinin analizinden doğrudan çıkarılmıştır ve termal radyasyon yasalarının formülasyonunun temelini oluşturur. Siyah cismin radyasyon spektrumunun yalnızca sıcaklığa bağlı olduğu ve cismin yapıldığı malzemeye bağlı olmadığına dikkat etmek önemlidir. Bu nedenle, mükemmel siyah cisim, termal radyasyonun incelenmesi ve tüm fiziksel cisimlerin radyasyonuna uygulanacak genel yasaların formüle edilmesi için temel bir model görevi görür.



Şekil 6. Spektral yayma gücünün dalga boyuna bağlı değişimi. Her bir eğri, farklı bir sıcaklıktaki siyah cismin yaydığı ışınımı göstermektedir. Arka plandaki renkli bölge ise görünür ışığın dalga boyu aralığını göstermektedir.



ETKİNLİK 1.

Termal radyasyon spektrumu

Araç: PhET Siyah Cisim Spektrumu Simülasyonu (Blackbody Spectrum)

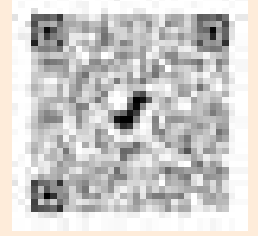
Bağlantı: https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_all.html

Bu etkinlikte, bir bilgisayar simülasyonu kullanarak ideal bir siyah cismin termal radyasyon spektrumunu inceleyeceksiniz.

1. Simülasyonu açın ve sıcaklığı 4000 K olarak ayarlayın. Spektrumun şeklini ve radyasyonun maksimum değerinin konumunu gözlemleyin.
2. Sıcaklığı kademeli olarak artırın (5000 K, 6000 K, 7000 K) ve spektrumları karşılaştırın.
3. Nasıl değiştiğine dikkat edin:
 - Eğrinin yüksekliği (ışınım yoğunluğu),
 - Dalga boyu açısından radyasyon maksimumunun konumu.
4. Spektrumun görünür kısmı için etiketlemeyi etkinleştirin ve enerjinin çoğunun hangi sıcaklıkta görünür bölgede yayıldığını belirleyin

Düşünmeye yönelik sorular:

- Cisim tarafından yayılan toplam enerji, sıcaklığın artmasıyla nasıl değişir?
- Sıcaklık arttıkça radyasyon maksimum değeri hangi yöne kayar?
- Neden birçok sıcak cisim görünür ışıqla parlayabilirken, daha soğuk olanlar parlayamaz?



Kirchhoff'un termal radyasyon yasası

Bir cisim çevresiyle termodinamik dengede bulunduğunda, aynı anda hem elektromanyetik ışıını soğurur hem de elektromanyetik ışıını yayar. Deneyler, bu iki sürecin birbirinden bağımsız olmadığını göstermektedir. Belirli bir dalga boyundaki ışıını iyi soğuran cisimler, aynı koşullar altında aynı dalga boyunda iyi ışıını da yayarlar. Bu ilişki, ısı ışıınına ilişkin Kirchhoff Yasası ile açıklanır. Buna göre, belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir dalga boyunda, spektral yayma gücünün spektral emilim katsayısına oranı tüm cisimler için aynıdır ve yalnızca sıcaklığa ve dalga boyuna bağlıdır. Kirchhoff Yasası matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{E_{T,\lambda}}{a_{T,\lambda}} = E_{T,\lambda}^{(0)}$$

Burada $E_{T,\lambda}$ everilen bir cismin **spektral yayma gücünü**; $a_{T,\lambda}$ **spektral emilim katsayısını**; $E_{T,\lambda}^{(0)}$ e ise aynı sıcaklığa kadar ısıtılmış **siyah cismin spektral yayma gücünü** ifade eder.

Bu eşitliğin fiziksel anlamı açıktır: Bir cisim belirli bir dalga boyundaki ışıını zayıf soğuruyorsa ($a_{T,\lambda}$ küçükse), aynı dalga boyunda zayıf ışıını yapar ($E_{T,\lambda}$ de küçüktür). Buna karşılık, ışıını iyi soğuran bir cisim, aynı zamanda iyi bir ışıını yayıcısıdır.

Sınır durumunda, siyah cisim için spektral emilim katsayısı $a_{T,\lambda} = a_T = 1$ olduğundan, yaydığı ışıını en büyük değerine ulaşır. Bu nedenle, siyah cismin ışıını spektrumu, tüm gerçek cisimlerin ışıını spektrumlarının karşılaştırılmasında **referans spektrum** olarak kullanılır.

Kirchhoff Yasası, siyah cismin ışıını spektrumunun malzemenin cinsine değil, yalnızca sıcaklığa bağlı olduğunu gösterir. Bu nedenle, **ısı ışıını yasalari** önce siyah cisim için elde edilir, ardından gerçek cisimlere uygulanır.

Stefan–Boltzmann yasası

Şekil 6'da gösterildiği gibi termal radyasyon spektrumlarından, cismin integral emisivitesi, yani tüm dalga boyları boyunca birim zamanda birim alan başına cisim tarafından yayılan toplam enerji belirlenebilir. Bu değer, spektral emisivite eğrisinin altındaki alana eşittir. Deneyler, siyah bir cisim için integral emisivitenin yalnızca cismin mutlak sıcaklığına bağlı olduğunu göstermiştir. Bu ilişki **Stefan–Boltzmann yasası** ile ifade edilir:

$$E_T = \sigma T^4,$$

burada T cismin mutlak sıcaklığı (kelvin cinsinden) ve σ ise **Stefan–Boltzmann sabitidir**; bu sabitin değeri

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}.$$

Bu yasadaki, daha yüksek bir sıcaklığa ısıtılan cisimlerin önemli ölçüde daha fazla enerji yaydığı sonucu çıkar. Örneğin, bir cismin sıcaklığı iki katına çıkarılırsa, birim zaman ve birim alan başına yaydığı enerji on altı kat artar. Bu sonuç, spektral emisivite grafikleriyle tutarlıdır; bu grafiklerde sıcaklıktaki artış, eğrinin altındaki alanı da artırır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Normal insan vücut sıcaklığı $36,5^\circ\text{C}$ olarak alınabilir.

$38,0^\circ\text{C}$ idi. İki durumdaki toplam radyasyon yoğunluğunun oranını hesaplayınız

Verilenler:

$$T_1 = (36,5 + 273,15)\text{K} = 309,65\text{K},$$

$$T_2 = (38,0 + 273,15)\text{K} = 311,15\text{K}$$

İstenen:

$$\frac{E_{T2}}{E_{T1}} = ?$$

Çözüm:

Stefan–Boltzmann yasasını kullanarak şunu elde ederiz:

$$\frac{E_{T2}}{E_{T1}} = \frac{\sigma T_2^4}{\sigma T_1^4} = \frac{T_2^4}{T_1^4} = 1,0195.$$

Sonuç, vücut sıcaklığındaki sadece %0,48'lik bir artışın, insan vücudu tarafından yayılan toplam enerjide %1,95'lik bir artışa yol açtığını göstermektedir. Bu nedenle, sıcaklıktaki nispeten küçük değişiklikler bile, birim zamanda vücut tarafından yayılan enerjide önemli değişikliklere neden olabilir.

Wien yasası

Şekil 6'da gösterilen termal radyasyon spektrumlarından, cismin sıcaklığı arttıkça sadece toplam emisivitenin değil, aynı zamanda dalga boyuna göre radyasyon dağılımının da değiştiği görülebilir. Spektral emisivite tüm dalga boyları için aynı değildir: bazı dalga boylarında radyasyon daha yoğundur, bazılarında ise daha az yoğundur. Herhangi bir sıcaklık için, spektral emisivitenin maksimum değerine ulaştığı, yani spektrumun belirgin bir maksimuma sahip olduğu bir dalga boyu vardır. Sıcaklık arttıkça, bu maksimumun dalga boyu azalır. Örneğin, 4000 K 'ye ısıtılmış siyah bir cisim için spektral emisivitenin maksimumu spektrumun kırmızı kısmında bulunur; daha yüksek bir sıcaklıkta ise maksimum değer kademeli olarak spektrumun sarı, yeşil ve ardından ultraviyole kısmına doğru kayar (şekil 6).

Bu bağımlılık, **Wien'in yer değiştirme yasası** ile açıklanır; bu yasa şöyledir:

$$\lambda_{\max} T = b,$$

Burada $\lambda_{\max}$ espektral emisivitenin maksimum değerine ulaştığı dalga boyu; T , cismin mutlak sıcaklığı; b ise Wien sabitidir ve değeri şöyledir:

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}.$$

Wien yasası, radyasyonun en yoğun olduğu dalga boyunun ölçülmesiyle bir cismin sıcaklığının basit bir şekilde belirlenmesine olanak tanır. Bu yasa, düşük sıcaklıklarda cisimlerin neden esas olarak kızılötesi bölgede ışıyım yaptığını, buna karşılık çok yüksek sıcaklıklarda ise ışıyımın önemli bir kısmının spektrumun görünür kısmında yer aldığını ve bu nedenle bu tür cisimlerin ışıık yaydığını açıklar.



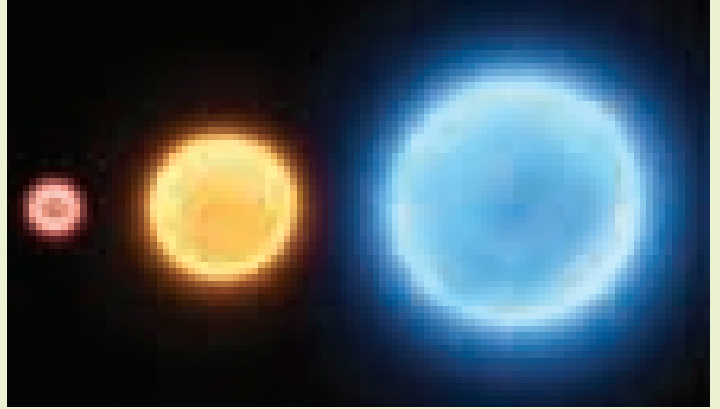
ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Şekil 7'de **kırmızı, sarı ve mavi** olmak üzere farklı renkteki üç yıldız gösterilmiştir. Yıldızların renkleri, radyasyonlarının en yoğun olduğu dalga boyuyla ilişkilidir.

- Kırmızı yıldızın maksimum spektral radyasyon yoğunluğu $\lambda_{1, \max} = 700 \text{ nm}$ 'de gerçekleşir.
- Sarı yıldızın maksimum spektral radyasyon yoğunluğu $\lambda_{2, \max} = 580 \text{ nm}$ 'de gerçekleşir.
- Mavi yıldızın maksimum spektral radyasyon yoğunluğu $\lambda_{3, \max} = 450 \text{ nm}$ 'de gerçekleşir.

İstenen:

- Her bir yıldızın yüzey sıcaklığı,
- Yıldızların sıcaklıklarına göre sıralaması.



Şekil 7. Farklı renkteki üç yıldız

Verilenler:

$$\lambda_{1, \max} = 700 \text{ nm},$$

$$\lambda_{2, \max} = 580 \text{ nm},$$

$$\lambda_{3, \max} = 450 \text{ nm}$$

İstenen:

$$a) T_1 - ?, T_2 - ?, T_3 - ?$$

b) Yıldızları

sıcaklıklarına göre sıralama.

Çözüm:

Wien'in Yer Değiştirme Yasası'na göre: $\lambda_{\max} T = b$,

burada $b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$.

$$\text{Kırmızı yıldızın sıcaklığı: } T_1 = \frac{b}{\lambda_{1, \max}} = 4,1 \cdot 10^3 \text{ K},$$

$$\text{Sarı yıldızın sıcaklığı: } T_2 = \frac{b}{\lambda_{2, \max}} = 5,0 \cdot 10^3 \text{ K},$$

$$\text{Mavi yıldızın sıcaklığı: } T_3 = \frac{b}{\lambda_{3, \max}} = 6,4 \cdot 10^3 \text{ K}.$$

İlk bakışta kırmızı yıldız "daha sıcak" gibi görünse de, hesaplamalar mavi yıldızın en yüksek sıcaklığa, kırmızı yıldızın ise en düşük sıcaklığa sahip olduğunu göstermektedir. Sıcaklık arttıkça, radyasyon maksimumu daha kısa dalga boylarına, yani kırmızıdan maviye doğru kayar; bu, Wien yasasının doğrudan bir sonucudur. Şekilden, daha büyük yıldızların daha yüksek sıcaklıklara sahip olduğunu da gözlemleyebiliriz.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Güneş'in yarıçapı $6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$ 'dir ve Güneş tarafından yayılan toplam güç (birim zaman başına enerji) $3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$ 'tır.

- Güneş'in yüzeyinin ideal bir siyah cisim gibi ısımlandığını varsayarak, yüzey sıcaklığını bulun.
- bendindeki sonucu kullanarak, radyasyonun en yoğun olduğu dalga boyu λ 'yi bulun.

Verilenler:

$$R = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m},$$

$$P = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W},$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4},$$

$$b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

İstenen:

- T - ?
- λ - ?

Çözüm:

a) Eğer cismin toplam yüzey alanı S ise, her bir metrekairelik yüzeyden E_T (integral yayma gücü) kadar ışıma yayılır. Buna göre, cismin tüm yüzeyinden yayılan toplam güç $P = E_T \cdot S$ olur. Burada P , yayılan ışımanın gücünü ifade eder.

Stefan-Boltzmann Yasası'na göre, $E_T = \sigma T^4$ olduğundan, bu ifade güç denkleminde yerine yazılırsa, $P = S \sigma T^4$ elde edilir. Güneş yaklaşık olarak bir küre kabul edildiğinden, $S = 4\pi R^2$ olur. Bu ifade yerine yazıldığında, $P = 4\pi R^2 \sigma T^4$ eşitliği elde edilir.

Buna göre, Güneş'in yüzey sıcaklığı $T = \sqrt[4]{\frac{P}{4\pi R^2 \sigma}} = 5780 \text{ K}$ olarak bulunur.

b) Güneş'in yüzey sıcaklığı kullanılarak, Wien'in Yer Değiştirme Yasası'na göre

$$\lambda_{\max} T = b$$

$$\text{olduğundan, } \lambda_{\max} = \frac{b}{T} = 5,01 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 501 \text{ nm} \text{ elde edilir.}$$

Açıklanan yasaların her biri, termal radyasyonun farklı bir yönünü ortaya koymaktadır. Stefan-Boltzmann yasası, bir cismin tüm dalga boyları boyunca yaydığı toplam enerjiyi verir. Wien yasası, radyasyonun en yoğun olduğu dalga boyunu belirler. Spektrumun şekli, yani dalga boyuna göre enerji dağılımı, siyah cismin radyasyon spektrumuyla gösterilir. Bunların temel özellikleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

İşinım yasası	Neyi açıklar?	Bundan neyi belirleyebiliriz?
Siyah cismin spektrumu	Belirli bir sıcaklığa ısıtılmış bir cismin, birim zamanda, birim alandan, birim dalga boyu aralığında yaydığı enerji	Belirli bir sıcaklık (T) için spektral emisivitenin dalga boyuna (λ) bağıllığı
Kirchhoff yasası $\left(\frac{E_{T,\lambda}}{a_{T,\lambda}} = E_{T,\lambda}^{(0)} \right)$	Bir cismin spektral emisivite ve spektral absorpsiyon özellikleri arasındaki ilişki	Belirli bir dalga boyunda, aynı koşullar altında radyasyonu iyi emen cisimler, o dalga boyunda da iyi yayılım gösterir.
Stefan-Boltzmann yasası ($E_T = \sigma T^4$)	T sıcaklığına ısıtılmış bir cismin, birim alandan birim zamanda yaydığı toplam enerji.	Bir cismin, birim alanda birim zamanda tüm dalga boylarının toplamından yaydığı toplam enerji.
Wien'in yer değiştirme yasası ($\lambda_{\max} T = b$)	Spektrumun maksimum değerinin konumu	Cisim, birim alandan birim zamanda hangi dalga boyunda en fazla enerji yayar?

Tablo 2. Termal radyasyon yasaları – özet

Klasik radyasyon modelinden kuantum radyasyon modeline

Stefan–Boltzmann ve Wien yasaları, cisim tarafından yayılan toplam enerjiyi ve spektrumun maksimum değerinin konumunu başarılı bir şekilde tanımlasa da, termal radyasyon spektrumunun tam bir matematiksel tanımını sunmazlar. Özellikle, spektral emisivitenin dalga boyuna ve sıcaklığa bağlılığını açıklamazlar.

Bu spektrumu klasik fizikle açıklamaya yönelik girişimler, enerjinin sürekli olarak değiş tokuş edildiği, yani keyfi olarak küçük değerlere sahip olabileceği varsayımına dayanıyordu. Bu, siyah cismin ışıması için de geçerli olsaydı, Şekil 8’de (en sağdaki eğri) gösterildiği gibi, küçük dalga boylarında (yüksek frekanslarda) spektral emisivite sınırsız bir şekilde artardı.

Ancak deneyler, kısa dalga boylu radyasyon için yoğunluğun artmak yerine azaldığını göstermektedir. Bu tutarsızlık, sürekli enerji değişimi konusundaki klasik varsayımın, emisyon ve absorpsiyon gibi mikroskobik süreçlere uygulanamayacağını açıkça göstermektedir.

Max Planck tarafından önerilen çözüm, radyasyon anlayışında köklü bir değişikliği temsil ediyordu. Planck enerjinin sürekli olarak yayılmadığını ve değiş tokuş edilmediğini, bunun yerine ayrık, kesin olarak belirlenmiş enerji paketleri hâlinde gerçekleştiğini varsaydı. O enerjinin sürekli olarak yayılmadığını ve değiş tokuş edilmediğini, bunun yerine ayrık, kesin olarak belirlenmiş 'porsiyonlar' veya 'kuantumlar' hâlinde gerçekleştiğini varsaydı. Işınım sırasında yayılabilen veya soğurulabilen en küçük enerji miktarına **kuantum** denir.

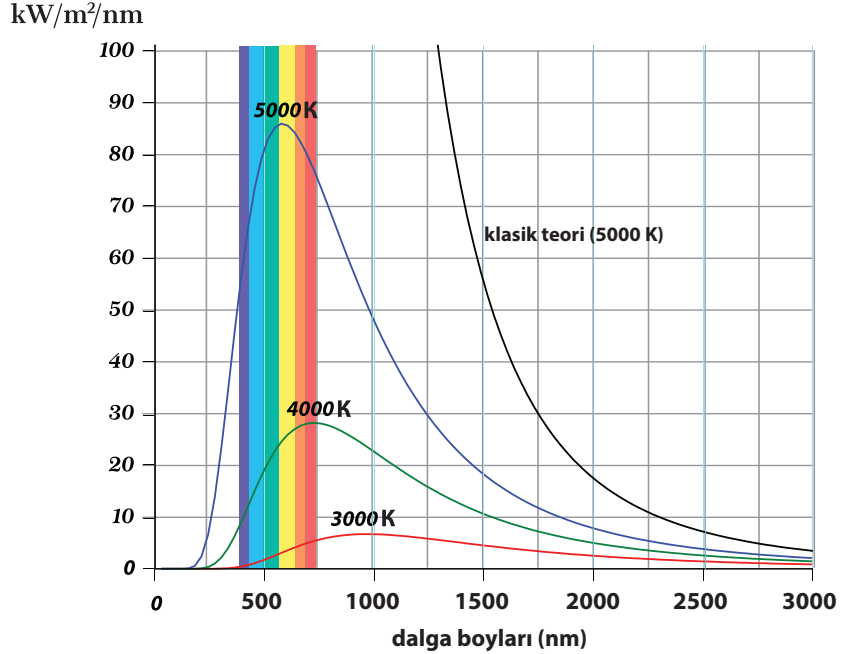
Buna göre, enerji keyfi değerlere sahip olamaz; yalnızca ayrı ve kesikli miktarlar hâlinde bulunur. Başka bir deyişle, enerji kuantalanmış bir büyüklüktür.

Bu fikrin daha kolay anlaşılabilmesi için, belirli bir yüksekliğe çıkma örneği verilebilir. Eğik bir düzlemde hareket edilirken yükseklik (dolayısıyla potansiyel enerji), keyfi olarak küçük adımlarla sürekli artabilir. Buna karşılık, merdiven çıkarken yükseklik (ve dolayısıyla potansiyel enerji) belirli basamaklar hâlinde artar; yani her seferinde bir basamak çıkılır. Yarım ya da basamağın bir kısmı kadar çıkmak mümkün değildir. Benzer şekilde, emisyon ve soğurma süreçlerinde de enerji sürekli olarak değişmez; ayrık miktarlar, yani kuantumlar hâlinde değişir.

Planck, bir kuantumun enerjisinin tüm ışınım türleri için aynı olmadığını, elektromanyetik dalganın frekansına bağlı olduğunu göstermiştir. Frekansı f olan bir ışınım için bir kuantumun enerjisi şu bağıntıyla verilir

$$E = hf ,$$

Burada h , fiziğin temel sabitlerinden biri olan Planck sabitidir ve değeri $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Elektromanyetik dalgaların frekansı f ile dalga boyu λ , ışık hızı c ile ilişkili olduğundan, bir kuantumun enerjisi dalga boyu cinsinden de ifade edilebilir:



Şekil 8. Farklı sıcaklıklarda siyah cismin termal radyasyon spektrumu. Klasik teori (siyah eğri), kısa dalga boylarında radyasyonun sonsuz bir artış göstereceğini öngörür, ancak bu durum deneysel olarak doğrulanmamıştır.

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

Bu ilişkilerden önemli bir sonuç çıkar: Işığın frekansı ne kadar yüksekse (veya dalga boyu ne kadar kısaysa), tek bir kuantumun enerjisi o kadar büyük olur. Bu nedenle, kısa dalga boylu radyasyon (ultraviyole gibi), uzun dalga boylu radyasyona (kızılötesi gibi) kıyasla kuantum başına çok daha fazla enerji taşır. Kuantumlaşma, cismin yalnızca tek bir kuantum yayabileceği anlamına gelmez. Aksine, cisim aynı frekansta çok sayıda kuantum yayabilir. Bu durumda, yayılan toplam enerji, tek tek kuantumların enerjilerinin toplamına eşittir, yani tek bir kuantumun enerjisinin tam sayı katıdır:

$$E = nhf \text{ burada } n \text{ bir doğal sayıdır.}$$

Bu fikir, kuantize edilmiş radyasyonun özünü açıklar: **belirli bir frekans için enerji, keyfi bir değere sahip olamaz**, ancak yalnızca kesin olarak belirlenmiş ayırık miktarlar hâlinde ortaya çıkar. Sonuç olarak, çok yüksek frekanslarda (kısa dalga boylarında), kuantumların enerjisi o kadar yüksektir ki, cismin bunları büyük sayılarda yayması olası değildir. Sonuç olarak, spektrumun kısa dalga kısmındaki spektral emisivite, klasik teoremin öngördüğü gibi sonsuza kadar artmak yerine azalır.

Kuantum kavramı ışığa doğrudan uygulandığında, elektromanyetik radyasyonun kuantumuna özel bir isim verildi: **foton**. Foton, ışığın kuantumudur; yani, $E = hf$ enerjisine sahip, ışık enerjisinin bölünemez en küçük parçasıdır. Maddeyle etkileşime girdiğinde ışık, enerjiyi kademeli olarak değil, tam fotonların yayılması veya emilmesi yoluyla aktarır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 4.

Tam karanlıkta insan gözü, ancak kendisine belirli bir en düşük şiddette ışık ulaştığında ışığı algılayabilir. Bu en küçük ışık şiddetine duyarlılık eşiği (veya görünürlük eşiği) denir. Dalga boyu 510 nm olan yeşil ışık için duyarlılık eşiği $4,20 \cdot 10^{-11} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ olarak verilmektedir. Karanlıkta göz bebeği en büyük çapı olan 8,20 mm'ye kadar genişlediğine göre, göze saniyede kaç foton girmektedir?

Verilenler:

$$I = 4,20 \cdot 10^{-11} \frac{\text{W}}{\text{m}^2},$$

$$\lambda = 510 \text{ nm} = 5,10 \cdot 10^{-7} \text{ m},$$

$$d = 8,20 \text{ mm} = 8,20 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s},$$

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

İstenen:

N - ? (saniye başına foton sayısı)

Çözüm:

Işık şiddeti (intensite), birim yüzeye düşen güç olarak tanımlanır:

$$I = \frac{P}{S}.$$

Buradan, göz bebeğinden geçen güç (birim zamanda göze ulaşan enerji) $P = I \cdot S$ olur. Göz bebeği, çapı d olan dairesel bir açıklık olarak kabul edilir. Buna göre yarıçapı $r = \frac{d}{2}$ olduğundan, alanı

$$S = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \text{ olur. Buradan, } S = 5,28 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ bulunur.}$$

Bu durumda göze ulaşan güç $P = I \cdot S = 2,22 \cdot 10^{-15} \text{ W}$ olur.

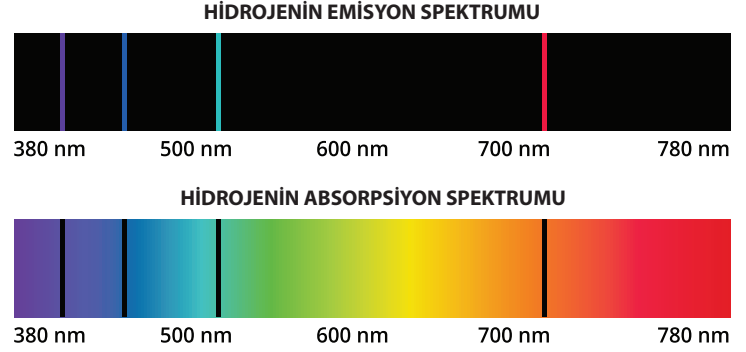
Bir fotonun enerjisi ise $E = \frac{hc}{\lambda} = 3,90 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ şeklinde hesaplanır.

Her saniye göze N foton girdiği kabul edilirse, 1 saniyede göze ulaşan toplam enerji $P = N \cdot E$ olur. Buradan, $N = \frac{P}{E} = 5,69 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ elde edilir.

Sonuç: Göze saniyede yaklaşık $5,69 \cdot 10^3$ foton girmektedir.

Enerjinin ayırık miktarlarda, yani kuantumlar halinde değiş tokuş edildiği fikrini kabul ettiğimizde, atomların da enerjiyi yalnızca bu ayırık şekilde değiş tokuş edip edemeyeceği sorusu ortaya çıkar. Bu sorunun cevabı atom spektrumları tarafından verilir..

Atom spektrumları sürekli değildir; Bu, atomların herhangi bir dalga boyunda sürekli olarak ışıınım yapmadığı anlamına gelir. Atomlar, istedikleri dalga boyunda ısı veya ışık yaymaz; bunun yerine tek tek çizgilerden oluşan çizgi spektrumları oluştururlar. Bu, bir atomun yalnızca belirli, ayırık enerji miktarlarını yayabileceğini veya emebileceğini gösterir. Şekil 9, radyasyonun görünür kısmında hidrojen atomunun emisyon ve absorpsiyon spektrumlarını göstermektedir. Emilim spektrumundaki koyu çizgiler, emisyon spektrumundaki parlak çizgilerle aynı yerlerde görülür; bu da atomların ışığı yalnızca kendilerinin de yayabildiği dalga boylarında emdiği anlamına gelir.



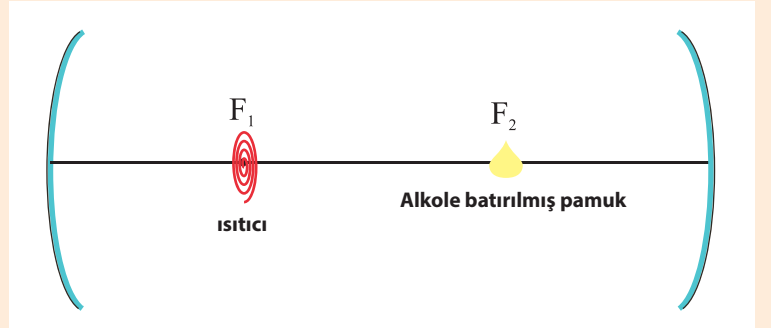
Şekil 9. Hidrojenin emisyon spektrumu (üstte) ve hidrojenin absorpsiyon spektrumu (altta)

Bu gerçekler, atomlardaki enerji değişiminin kuantize olduğunu gösterir ve enerji seviyeleri kavramının tanıtılması ile atom modellerinin geliştirilmesi için temel oluşturur; bunları sonraki derslerde ele alacağız.



ETKİNLİK 2.

Ana optik eksenleri çakışacak şekilde birbirine bakacak şekilde yerleştirilmiş iki özdeş içbükey ayna düşünün. İlk aynanın odak noktasında ısı yayan çok sıcak bir cisim (örneğin, bir ısıtıcı) ve ikinci aynanın odak noktasında ise küçük, yanıcı bir cisim, örneğin alkole batırılmış bir pamuklu çubuk bulunmaktadır. Aralarında herhangi bir temas veya alev olmamasına rağmen, kısa bir süre sonra ikinci aynanın odak noktasında bulunan pamuklu çubuk alev alabilir.



Bu etki, ısı (kızılötesi) radyasyonunun aynalar tarafından yansıtılıp ışıktaki olduğu gibi odak noktasında toplanmasının sonucudur. Böylece, sıcak cisimden gelen enerji doğrudan temas olmaksızın aktarılır; bu da ısı radyasyonunun bir dalga gibi davrandığını ve yönlendirilip odaklanabileceğini gösterir.

Önemli güvenlik uyarısı:

Bu deney yalnızca bir düşünce deneyi olarak listelenmiştir ve sadece laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Sıcak cisimler veya yanıcı malzemelerle gerçekleştirilmesi tehlikelidir ve evde denenmemelidir. Bir gösteri olarak gerçekleştirilecekse, bu işlem kesinlikle bir öğretmenin gözetimi altında ve uygun güvenlik önlemleri alınarak yapılmalıdır.

Yeni kavramları ve yasaları tanıttıktan sonra, şimdi öğrendiklerimizi kısaca özetleyebiliriz. Bu ders ilk bakışta soyut görünebilir, ancak termal radyasyon ve siyah cisim kavramları sadece teorik yapılar değildir; günlük yaşamda ve modern teknolojiye açık ve tanınabilir uygulamaları vardır.



Şekil 10. Termal kamera

DAHA FAZLA ÖĞREN

Siyah bir cismin spektral emisivitesi, yayılan enerjinin dalga boyuna ve cismin sıcaklığına nasıl bağlı olduğunu gösteren Planck formülü ile doğru bir şekilde tanımlanabilir. Bu formül, enerjinin kuantize bir büyüklük olduğu varsayımıyla teoriden türetilmiştir. Planck formülü, siyah bir cismin radyasyon spektrumunu tam olarak tanımlayabilir:

$$E_{T,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

Formülde h , Planck sabiti; c boşluktaki ışık hızıdır k_B Boltzman sabitidir.

SORULAR VE ÖDEVLER

1. Neden koyu renkli yüzeyler genellikle güneş altında açık renkli yüzeylerden daha fazla ısınır?
 2. Deneylerle, siyah bir cisim T_1 sıcaklığından T_2 sıcaklığına ısıtıldığında integral emisivitesi N kat artmıştır.
 3. Bu durumda siyah cismin sıcaklığının ne kadar arttığını belirleyin.
- Termal radyasyon yasaları astronomi için neden önemlidir ve bir yıldızdan kaynaklanan ışığın emisyon spektrumu kaydedildiğinde hangi büyüklüğün hesaplanabileceğini belirtiniz.
4. 650 K sıcaklığında karbonun integral emilim katsayısı 0,85'tir. Yüzey alanı 10 cm² olan bir karbon parçasının 1 dakika içinde yaydığı enerjiyi hesaplayınız. (Çözüm: 516 J)
 5. Bir siyah cismin spektral emisivitesinin maksimum değerini 700 nm'den 350 nm'ye kaydırmak için sıcaklığının ne kadar değişmesi gerektiğini belirleyin. (Çözüm: sıcaklık 4140 K artmalıdır)
 6. Siyah cismin sıcaklığı 400 °C'den 1400 °C'ye yükselmiştir. Aşağıdakileri belirleyin:
 - a) Siyah cismin integral emisivitesi kaç kat değişecektir?
 - b) Işınımın maksimum yoğunluğuna karşılık gelen dalga boyu ne kadar değişecektir?
 (Çözüm: a) 38,2 kat artar b) 2,6 µm azalır)
 7. Mars, yüzeyine düşen güneş ışınımının %25'ini yansıtıyorsa, ortalama sıcaklığını bulun. Güneş'in yarıçapının 695.700 km olduğu, Güneş'in yüzey sıcaklığının 5.780 K olduğu ve Güneş ile Mars arasındaki mesafe $2,28 \cdot 10^8$ km olduğu bilinmektedir. (Çözüm: 210 K)

4.2. Fotoelektrik etki

Önceki derste, klasik fiziğin ısı ışınımı tam olarak açıklayamadığını görmüştük. Ayrıca, klasik fiziğin sınırları içinde açıklanamayan başka fiziksel olayların da bulunduğunu, özellikle ışığın tek tek parçacıklarla doğrudan enerji alışverişinde bulunduğu durumlarda bunun daha belirgin olduğunu göreceğiz. Siyah cisim örneğinde, ısı ışınımının sürekli spektrumunu doğru biçimde açıklayabilmek için kuantum kavramının ortaya konulması zorunlu olmuştur. Bu derste ise, ışığın kuantum doğasının yalnızca kuramsal bir varsayım olmadığını, deneysel olarak doğrulanmış bir gerçek olduğunu ve bunun basit bir deneyle gösterilebileceğini göreceğiz.

Şekil 1'de gösterilene benzer bir örneği ele alalım. İlk olarak, başlığı çinko levhadan yapılmış bir elektroskop negatif yükle elektriklenir. Ardından, başlığı spektrumun ultraviyole bölgesinde yoğun ışık yayan bir lambadan gelen ışıkla aydınlatılır. Aydınlatma üzerine, yaprakların sapması azalır, yani elektroskop deşarj olur.

İlk konuda, negatif yüklü bir cismi, yani elektron fazlası olan bir cismi boşaltmak için, fazla elektronların cisimden uzaklaştırılması gerektiğini söylemiştik. Bu durumda elektroskop toprağa bağlı değildir, bu nedenle şu soru ortaya çıkar: ultraviyole ışık elektroskopun üzerine düştüğünde elektronlar nereye gitti? Cevap şudur: elektronlar, ışığın etkisiyle metalin yüzeyinden koparılır. **Işığın etkisiyle metal yüzeyinden elektronların kopması-na dış fotoelektrik etki** (veya kısaca **fotoelektrik etki**) **denir ve metalden yayılan elektronlara fotoelektron denir.** Bu olaya "dış" denmesinin nedeni, elektronların metalin yüzeyinden ayrılıp dışarı çıkmasıdır.

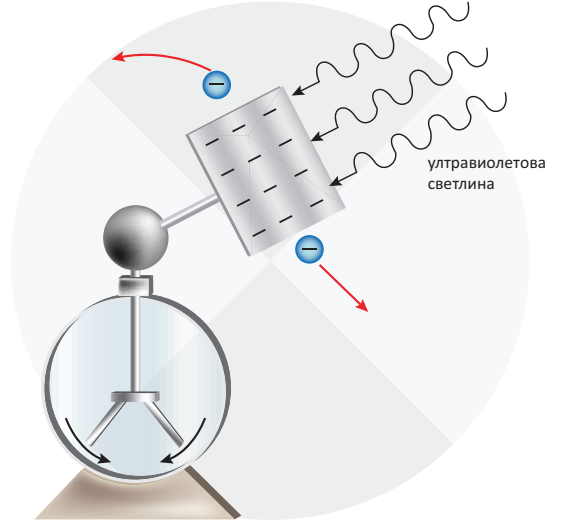
Dış fotoelektrik etkinin özelliklerini daha iyi anlamak için Şekil 1'deki deneyi genişletebiliriz. Işığın şiddeti artırılırsa (örneğin, iki lamba ile aydınlatarak), elektroskopun boşalması daha hızlı gerçekleşir. Bu, yayılan fotoelektron sayısının ışığın şiddetine bağlı olduğunu gösterir. Ancak, fotoetki meydana geldiğinde önemli olan sadece ışığın şiddeti değildir. Kullandığımız lamba, spektrumun ultraviyole bölgesinde ışınım yapmalıdır. Ultraviyole ışının yoluna bir cam levha yerleştirilirse, cam ultraviyole ışınlarını emdiği için elektroskop deşarj olmaz. Ancak deney bir kuvars levha ile tekrarlanırsa, elektronlar metalden tekrar koparılacak ve fotoelektrik etki yeniden gözlemlenebilecektir.

Bu olayları açıklamak için ışığın kuantum doğasını dikkate almak gerekir. Bu, sadece elektron emisyonunun gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirlemek için değil, aynı zamanda yayılan fotoelektronların kinetik enerjisini açıklamak için de çok önemlidir. Bu etkiler deneysel olarak doğrudan incelenebildiğinden, fotoelektrik etki ışığın kuantum doğasını incelemek için özellikle uygun bir örnektir.

Dış fotoelektrik etkinin incelenmesi

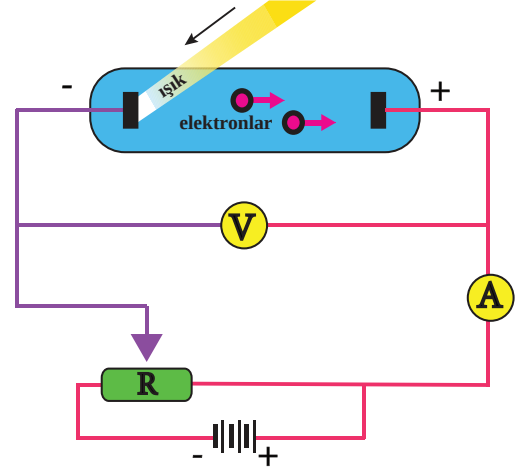
Dış fotoelektrik etkisini incelemek için, Şekil 2'de gösterildiği gibi, bir elektrik devresine bağlı bir **fotosel** en yaygın olarak kullanılır. En basit haliyle, fotosel iki elektrotlu bir vakum tüpünden oluşur: ışıqla aydınlatılan metal yüzey olan **fotokatot** ve fotokatottan yayılan elektronları toplamaya yarayan anot.

Fotokatot farklı dalga boylarında (yani frekanslarda) ışıkla aydınlatıldığında, ışığın dalga boyuna ve fotokatotun malzemesine bağlı olarak dış devrede akım akabilir veya akamayabilir. Akım şiddeti bir ampermetre



Şekil 1. Dış fotoelektrik etkinin gösterimi. Negatif yüklü bir elektroskop, ultraviyole ışıkla aydınlatılır

ile ölçülür. Aydınlatma üzerine bir fotoelektrik etki meydana gelirse, fotokatottan yayılan fotoelektronlar anoda doğru hareket eder ve devrenin dış kısmında bir akım akar. Bu akıma **fotoakım** denir ve varlığı, ışığın metalden elektron salınımına neden olduğunun doğrudan deneysel kanıtıdır.



Şekil 2. Dış fotoelektrik etkiyi inceleme düzeneği



ETKİNLİK 2.

Etkinliğin Amacı: Etkileşimli bir simülasyon kullanarak, fotoelektrik etkinin doğası hakkında sonuçlara varmak amacıyla, fotoakımın farklı fiziksel büyüklüklere nasıl bağlı olduğunu araştırmak. Bu etkinlikte şunları inceleyeceğiz:

- fotoakımın ışığın şiddetine nasıl bağlı olduğunu,
- fotoakımın ışığın dalga boyuna nasıl bağlı olduğunu,
- fotoakımın anot ile katot arasındaki gerilime nasıl bağlı olduğunu.

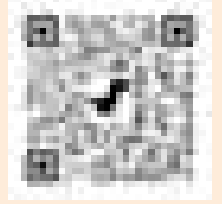
PhET Simülasyonu: Fotoelektrik Etki (Photoelectric Effect)

<https://phet.colorado.edu/sims/cheerpi/photoelectric/latest/photoelectric.html>

Hazırlık:

1. Simülasyonu açın.
2. "Hedef" ("Target") bölümünde "Sodyum" ("Sodium") metalini seçin.
3. Grafikler ("Graphs") bölümünde, üç seçeneğin hepsini etkinleştirin; üç koordinat sistemi görünmelidir.
4. Aşağıdaki ayarları yapın:
 - ışık yoğunluğu: %50,
 - elektrotlar arasındaki gerilim: 0 V,
 - dalga boyu: 350 nm.
5. Gözlemleyin:
 - fotokatot üzerinde elektronların ortaya çıkıp çıkmadığını,
 - yayılan fotoelektronların anoda ulaşp ulaşmadığını,
 - bunun devrede bir akım akmasına neden olup olmadığını (pilin yanındaki ampermetrede gösterilir),
 - elektronların bir kısmının fotokatoda geri dönüp dönmediğini.

Etkinlik kapsamında simülasyondaki fotoakımı gözlemlemeniz gerektiğinde kendinize bu soruları sorun.



Bölüm 1: Fotoakımın ışık yoğunluğuna bağlılığı

Işık yoğunluğunu değiştirin. Farklı yoğunluklarda (%0, %25, %50, %75, %100) akım şiddetini not edin. Işık yoğunluğu değiştikçe simülasyonda fotoelektronların nasıl davrandığını gözlemleyin.

Simülasyonun sağ tarafında, "current vs light intensity" etiketli bir grafik çizilmiştir; bu grafik, fotoakımın ışık yoğunluğuna bağlılığını göstermektedir.

- Bu grafiğe göre, akım şiddetinin ışık yoğunluğuna bağlılığı nasıldır?
- Mikroskobik düzeyde fotoakımdaki artış neyi temsil eder?

Bölüm 2: Fotoakımın dalga boyuna bağlılığı

Mıışığın dalga boyunu değiştirin. Farklı dalga boyları (100 nm, 200 nm, ..., 800 nm) için akım şiddetini not edin.

- Dalga boyu değiştirildiğinde simülasyonda fotoelektronların nasıl davrandığını gözlemleyin.
- Fotoakımın hangi dalga boyundan itibaren oluşmadığını not edin.
- "Elektron enerjisi ve ışık frekansı" başlıklı grafiği, yani elektronların kinetik enerjisinin ışığın frekansına bağlılığını analiz edin.

Simülasyonda dalga boyu değiştirilse de, grafikte frekans gösterilmektedir.

Bu büyüklükler arasındaki ilişkinin $\lambda f = c$ olduğunu unutmayın; burada c, ışık hızıdır. Dalga boyu arttıkça frekansın neden azaldığını açıklayın.

Grafiğin şekli nasıldır? Elektronların başlangıç kinetik enerjisinin sıfıra eşit olduğu bir frekans var mı? Aydınlatılan metali değiştirin; örneğin: çinko, bakır vb.

- Yine dalga boyunu değiştirin.
- Fotoakımın şiddetinin nasıl değiştiğini gözlemleyin.
- Aynı dalga boyu için (örneğin 350 nm), devredeki fotoakım yoğunluğu farklı metallerden yapılmış fotokatotlarda aynı mıdır?
- Her bir metal için fotoakımı hangi dalga boyunda akmayı durdurur?
- Bu, farklı metallerin özellikleri hakkında neyi gösterir?
- Bölüm 3: Fotokatot ile anot arasındaki gerilime bağlı fotoakım

Dalga boyunu en küçük değere (100 nm) ve yoğunluğu %100'e ayarlayın. Devreye bağlı pilin gerilimini minimum değere (-8 V) ayarlayın. Gerilimi yavaşça maksimum değere (8 V) yükseltin.

- Fotoakım yoğunluğunun nasıl değiştiğini gözlemleyin.
- Anot ile fotokatot arasına uygulanan gerilime karşı akımın grafiğinin nasıl görüldüğünü gözlemleyin ("current vs battery voltage").
- Anot ile fotokatot arasındaki gerilimi artırmanıza rağmen, fotoakımı neden belirli bir noktada artmayı durdurur?

Fotokatotun metalini değiştirin:

- Farklı metaller için akım-gerilim grafiğindeki farklılıkları analiz edin.
- Farklı metaller için, fotoakım akışı hangi gerilimde durur?

Etkinlikten elde edilen gözlemlere dayanarak, fotoakımı anot ile fotokatot arasındaki gerilime bağlılığını daha ayrıntılı olarak inceleyebilir ve fotoelektronların özelliklerini açıklayabiliriz. Anoda pozitif gerilim uygulandığında, fotokatottan yayılan elektronlar anoda doğru çekilir ve bunun sonucunda dış devreden bir fotoakım geçer. Gerilim arttıkça, fotoakım, **doygunluğa**, yani yayılan elektronların neredeyse tamamının

anoda ulaştığı ve gerilimin daha da artmasının fotoakımda artışa yol açmadığı bir duruma ulaşana kadar artar

Bu gözlem, **fotoakımın büyüklüğünün birim zamanda yayılan fotoelektron sayısına bağlı olduğunu ve bu sayının ışığın yoğunluğuna, yani birim zamanda fotokatoda çarpan foton sayısına bağlı olduğunu** gösterir.

Elektrotların kutupları tersine çevrilerek anotun katoda göre negatif hale gelmesi durumunda, elektrik alanı fotoelektronları yavaşlatmaya başlar ve bunların bir kısmı fotokatoda geri döner. Bununla birlikte, belirli bir negatif gerilim aralığı içinde fotoakım hala mevcuttur; bu da **fotoelektronların belirli bir kinetik enerjiyle yayıldığını** ve elektrik alanına karşı iş yapabildiğini gösterir.

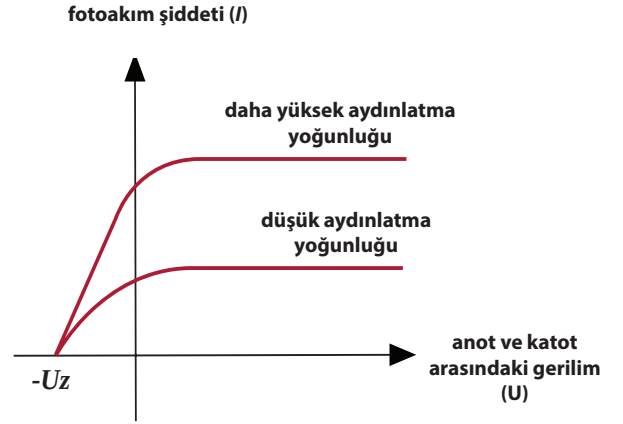
Fotoakımın sıfıra düştüğü gerilime U_z kesme gerilimi olarak adlandırılır. Kesme gerilimi, fotoelektronların maksimum kinetik enerjisi $E_{k,max}$ ile ilişkilidir.

Kinetik enerji negatif olamayacağından, formülde aşağıdaki ilişkiye göre bariyer geriliminin mutlak değeri kullanılır:

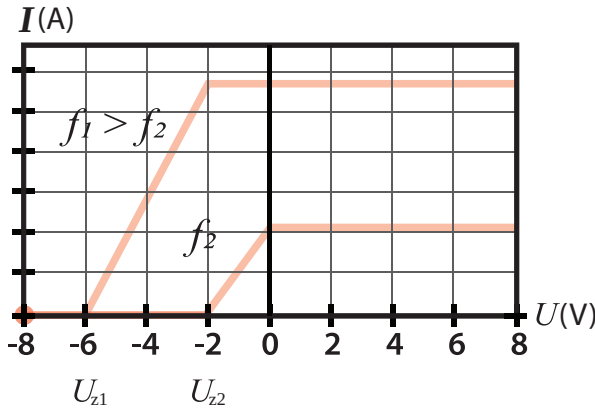
$$E_{k,max} = e|U_z|,$$

burada e , elektronun yüküdür.

Işık şiddeti arttıkça, fotoakımın büyüklüğü de artar; bu, birim zaman başına daha fazla sayıda fotoelektronun yayıldığı anlamına gelir. Anot ile fotokatod arasında yeterince yüksek bir pozitif gerilim olduğunda, fotoakım doygunluğa ulaşır; yani, yayılan elektronların neredeyse tamamının anota ulaştığı bir duruma gelir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, daha yüksek ışık şiddete aydınlanma olduğunda, fotoakım değeri daha büyüktür ve ters gerilim her iki yoğunluk için de aynı değere sahiptir. Bu durum, **ışığın şiddetinin yayılan elektronların sayısını etkilediğini, ancak elektronların maksimum kinetik enerjisini etkilemediğini** göstermektedir.



Şekil 3. İki farklı aydınlatma şiddeti (J_1 ve J_2) için fotoakım şiddetinin anot ile katot arasındaki gerilime bağlı değişimi.



Şekil 4. Durdurma geriliminin fotokatodu aydınlatan ışığın frekansına bağlı değişimi

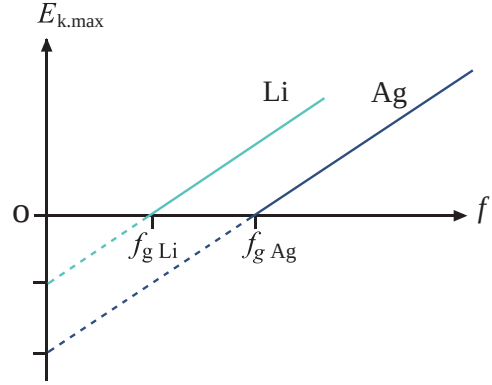
Işık şiddeti fotoakımın gücünü belirler, ancak fotoelektronların maksimum kinetik enerjisini etkilemez. Bu enerjinin neye bağlı olduğunu araştırmak için, fotokatod farklı frekanslardaki ışıkla aydınlatıldığında durdurma gerilimindeki değişim incelenir.

Bu bağımlılık, keyfi olarak düşük frekanslar için geçerli değildir. Her metal için, fotoelektrik etkinin gerçekleşebildiği bir eşik frekansı f_g (veya en büyük bir dalga boyu λ_g) vardır. Bu frekansa, fotoelektrik etkinin **eşik frekansı** denir.

Işığın frekansı eşik frekansından küçük olduğunda, ışığın şiddeti ne olursa olsun fotoelektrik etki gerçekleşmez. Bu durum Şekil 5'te gösterilmiştir.

Işığın frekansı eşik frekansından büyük olduğunda, fotoelektronlar metal aydınlatıldıktan hemen sonra, yaklaşık $3 \cdot 10^{-9}$ s'den daha kısa bir sürede ortaya çıkar. Bu durum, enerjinin sürekli ve kademeli olarak değil, çok kısa süreli ve kesikli enerji paketleri hâlinde aktarıldığını göstermektedir.)

Bu deneysel bulgular, ışığın yalnızca sürekli olarak enerji ileten bir dalga olarak tanımlanamayacağını, aynı zamanda fotoelektrik etkinin teorik açıklamasının temelini oluşturan bir **parçacık (kuantum) doğası** da sergilediğini açıkça göstermektedir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 5. İki farklı metal (Li ve Ag) için fotoelektronların maksimum kinetik enerjisinin, fotokatodu aydınlatan ışığın frekansına bağlı değişimi.

No.	Neler değişir	Deney sonucu	Sonuç
1.	Işık şiddeti	Şiddet arttıkça, fotoakım da artar; doygunluk noktasına kadar, ışık şiddeti ne kadar yüksekse fotoakım o kadar fazla olur.	Fotoakım, yayılan fotoelektron sayısına bağlıdır ve bu sayı da ışığın şiddetine bağlıdır.
2.	Işık şiddeti	Farklı ışık şiddetlerinde fotoakım, aynı durdurma gerilimi değerinde sifıra düşer.	Fotoelektronların maksimum kinetik enerjisi, ışığın şiddetine bağlı değildir
3.	Işığın frekansı (dalga boyu)	Fotokatodu aydınlatan ışığın farklı frekansları için, fotoakım farklı durdurma gerilimi değerlerinde durur	Fotoelektronların maksimum kinetik enerjisi, ışığın frekansına bağlıdır
4.	Metal türü ve ışığın frekansı	Işık frekansının belirli bir değerin altında kalması durumunda, şiddetine bakılmaksızın fotoelektrik etki gerçekleşmez	Her metal için, fotoelektrik etkinin bir eşik frekansı vardır.
5.	Fotoelektronların ortaya çıkma süresi	Fotoelektronlar, o metal için kesme frekansından daha yüksek frekanslı ışıkla aydınlatıldığında neredeyse anında ortaya çıkar.	Enerji kademeli olarak değil, ayrık (kuantum) olaylar halinde aktarılır.

Tablo 1. Dış fotoelektrik etki çalışmasından çıkarılan sonuçlar



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

J. J. Thomson, güneş ışığının saçılmasından yola çıkarak elektronun yarıçapını

$2,82 \cdot 10^{-15}$ m olduğunu hesaplamıştır. 520 W/m^2 yoğunluğundaki güneş ışığı, bu durumda bir disk olduğunu varsayacağımız elektrona düşer. Işığın klasik dalga modelinin fotoelektrik etkiyi açıklayıp açıklayamadığını kontrol etmek için, ışığın klasik bir dalga olduğunu ve enerjinin kademeli olarak emildiğini varsayacağız.

- a) Bu enerji 1,20 eV ise, elektronun metalden ayrılmak için yeterli enerjiyi kazanması ne kadar sürer?
 b) Bu süre, metale ışık tutulduktan sonra fotoelektronların gözlemlendiği süre olan $3 \cdot 10^{-9}$ s' den kaç kat daha uzundur?

Verilenler: $r = 2,82 \cdot 10^{-15} \text{ m}, I = 520 \frac{\text{W}}{\text{m}^2},$ $E = 1,20 \text{ eV}, t_f = 3 \cdot 10^{-9} \text{ s},$ $E = 1,20 \text{ eV} = 1,92 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$	Çözüm: a) Diskin yüzeyine I şiddetinde gelen ışık, $P = IS = I\pi r^2$, gücünü verir; burada S, diskin alanıdır. Güç, birim zamanda aktarılan enerjiyi temsil ettiğinden, 1,20 eV'lık enerjinin emilmesi için gereken süre şu ilişkiden elde edilir: $t = \frac{E}{P} = \frac{E}{I\pi r^2} = 1,48 \cdot 10^7 \text{ s} = 171 \text{ gün}.$ b) Klasik fiziğe göre enerji sürekli bir büyüklüktür. Bu nedenle, bu kadar küçük bir alan için birkaç elektron volt mertebesinde bir enerji biriktirmek çok uzun zaman alır. Ancak, deneysel olarak, metalin aydınlatılmasıyla fotoelektronların neredeyse anında yayıldığı gözlemlenmiştir. Klasik modele göre elde edilen süre ile fotoelektronun ortaya çıkması için deneysel olarak ölçülen süre arasındaki oran şöyledir: $n = \frac{t}{t_f} = 5 \cdot 10^{15} \text{ Bu devasa oran,}$ ışığın bir elektromanyetik dalga olduğu şeklindeki klasik görüşün fotoelektrik etkisini açıklayamadığını açıkça göstermektedir
İstenen: a) $t - ?$ b) $n - ?$	

Fotoelektrik etki için Einstein denklemi

Kuantum yorumuna göre, ışık foton adı verilen parçacıkların akışıdır. Bir fotonun enerjisi şöyledir:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

burada h Planck sabiti, c boşluktaki ışık hızı, f ışığın frekansı ve λ dalga boyudur.

Foton, metaldeki elektron tarafından emildiğinde, enerji kademeli olarak aktarılmaz, ancak bir kerede gerçekleşir – elektron, fotonun tüm enerjisini emer. Metal içindeki elektronlar, çekici Coulomb kuvvetleri tarafından kristal kafese bağlanmıştır; bu nedenle bir elektronun metalden çıkabilmesi için bir enerji bariyerini aşması gerekir. **Bir elektronun metalden kopabilmesi için gerekli olan en küçük enerjiye çıkış işi denir ve A ile gösterilir.** Çıkış işi metaller arasında farklılık gösterir: A değeri ne kadar büyükse, elektronlar metale o kadar güçlü bir şekilde bağlanmıştır. Buna göre, elektronun fotondan kazandığı enerji, elektronu kristal kafesinden kurtarmak için kullanılır ve geri kalanı fotoelektronun kinetik enerjisine dönüştürülür. Bu ilişki, **Einstein'ın Fotoelektrik etki denklemi** ile ifade edilir:

$$hf = A + E_{k,\max}, \text{ veya } hf = A + \frac{mv^2}{2},$$

Burada $E_{k,\max}$ fotoelektronların maksimum kinetik enerjisi; m , elektronun kütlesi; v ise fotoelektronun metalden ayrılırken sahip olabileceği maksimum hızdır.

Bu denklemde **maksimum kinetik enerji** ve maksimum hız yer alır, çünkü fotoelektronlar aynı kinetik enerjiyle yayılmazlar. Elektronların bir kısmı metalin daha derin katmanlarından kaynaklanır ve yüzeye doğru

ilerlerken çarpışmalarda enerji kaybeder; Ayrıca yüzey katmanlarından gelen elektronlar kinetik enerji kaybı çok az ya da hiç olmadan dışarı çıkarlar. Bu nedenle, Einstein denklemi yalnızca maksimum kinetik enerjiyi belirleyebilir.

Bu denklemden, ışığın şiddetinin artırılmasının fotoelektronların kinetik enerjisini neden artırmadığı açıkça anlaşılmaktadır. Foton enerjisi frekansa bağlıdır. Şiddetin artması, birim zamanda daha fazla foton olduğu anlamına gelir; dolayısıyla daha fazla elektron yayılır (daha büyük bir fotoelektrik akım), ancak tek tek fotoelektronların enerjisi, ışığın frekansı ve metalin çıkış işi tarafından belirlenir::

$$E_{k,\max} = hf - A.$$

Einstein'ın fotoelektrik etki denklemi, fotoelektrik etkinin bir eşik değeri olduğunu doğrudan gösterir. **Foton enerjisi, metalin çıkış işinden küçükse, yani $hf < A$ ise, metalden elektron yayılmaz.** Foton enerjisi metalin çıkış işine eşit olduğunda, fotoelektronlar yayılır, ancak kinetik enerji içermezler; yani bu durumda

$E_{k,\max} = 0$ olur. Bu sınır koşulundan, fotoelektrik etkinin hâlâ gerçekleşebildiği ışığın eşik (en küçük) frekansı elde edilir:

$$hf_g = A \Rightarrow f_g = \frac{A}{h}.$$

Elektromanyetik dalganın frekansı ile dalga boyu arasındaki ilişkiyi kullanarak, belirli bir metal için eşik dalga boyu (kırmızı sınır) belirlenebilir:

$$h \frac{c}{\lambda_g} = A \Rightarrow \lambda_g = \frac{hc}{A}.$$

Bu, ışığın frekansı yeterince yüksek değilse, yani dalga boyu eşik değerinden büyükse, ışık şiddeti ne kadar artırılırsa artırılсын fotoelektrik etkinin gerçekleşmeyeceğini bir kez daha göstermektedir. Işık şiddeti daha yüksekse, bu birim zamanda daha fazla fotonun geldiği anlamına gelir; ancak her fotonun enerjisi $hf < A$ ise, bunların hiçbiri tek başına bir elektronu serbest bırakamaz.

Son olarak, foton ile elektron arasındaki etkileşimin, enerji transferinin anında gerçekleştiği iki parçacığın çarpışmasına benzediği sonucuna varılabilir. Fotonun enerjisi, enerjinin uzaya yayıldığı klasik dalga modelinden farklı olarak, tek bir noktada toplanmıştır ve tek bir ayrık olayda aktarılır. $hf < A$,



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Molibdenin iş fonksiyonu 4,20 eV'dir.

- Bu metalde fotoelektrik etki için eşik dalga boyunu ve eşik frekansını bulun.
- Dalga boyu 185 nm olan radyasyon için durdurma gerilimi nekadardır?
- Fotoelektronların molibden'den fırlatılma hızını hesaplayınız.

Elektronun kütlesi ve yükü, ışık hızı ve Planck sabiti bilinmektedir.

Verilenler:

$\lambda = 185 \text{ nm}$,
 $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$,
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
 $A = 6,27 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

İstenen:

- λ_g -?
- U_z -?
- v -?

Çözüm:

a) Eşik dalga boyu, metal yüzeyinden elektronların fotoemisyonunun hala gerçekleştiği, ancak fotoelektronların kinetik enerjisi olmadığı en uzun dalga boyudur. Fotoelektrik etki denkleminde şunu elde ederiz:

$$\frac{hc}{\lambda} = A + E_k. \text{ ise } E_k = 0 \Rightarrow \frac{hc}{\lambda_g} = A \Rightarrow \lambda_g = \frac{hc}{A} = 295 \text{ nm}.$$

Elektromanyetik dalganın frekansı ile dalga boyu arasındaki ilişki dikkate alındığında, eşik frekansı için şu bağıntı elde edilir: $f_g = \frac{c}{\lambda_g} = \frac{c}{\frac{hc}{A}} = \frac{A}{h} = 1,0 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$.

b) Anot ile katot arasına kesme gerilimine eşit bir potansiyel farkı uygulandığında, fotoelektronların maksimum kinetik enerjisi elektriksel potansiyel enerjiye dönüşür ve anot ile katot arasında fotoakım oluşmaz, yani: $E_{k,\max} = eU_z$. Dolayısıyla, şunu yazabiliriz:

$$\frac{hc}{\lambda} = A + eU_z \Rightarrow U_z = \frac{1}{e} \left(\frac{hc}{\lambda} - A \right) = 2,5 \text{ V}.$$

c) Kinetik enerji ile elektronların hızı arasındaki ilişkiyi göz önünde bulundurursak, şunu elde ederiz:

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2}{m} \left(\frac{hc}{\lambda} - A \right)} = 9,4 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Dış fotoelektrik etkinin uygulamaları

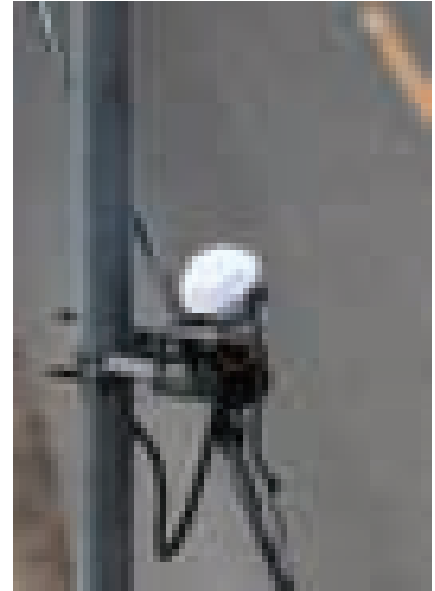
Dış fotoelektrik etki, ışığın yüksek hassasiyet ve hızlı tepki ile elektrik sinyaline dönüştürülmesi gereken cihazlarda kullanılır. Günlük yaşamda, bu etki en çok fotosellerde ve otomatik sistemlere entegre edilmiş ışık sensörlerinde görülür; örneğin, kapıların otomatik açılıp kapanması, üretim hatlarında cisimlerin sayılması ve ayrılması ve aydınlatma kontrolü gibi uygulamalarda. Örneğin, bir sokak lambasına bağlı fotosel (şekil 6), aydınlatmadaki azalmayı algılar ve lambanın şebeke güç kaynağını otomatik olarak açar.

İç Fotoelektrik Etki

İç fotoelektrik etki, ışığın malzemeden elektronları dışarı atmadığı (dış fotoelektrik etkide olduğu gibi), bunun yerine malzeme içinde değişikliklere neden olduğu bir olgudur.

Bir yarı iletken veya yalıtkan yeterli enerjiye sahip radyasyona maruz kaldığında, fotonlar malzemedeki elektronlara enerji aktarabilir ve bu da elektronların daha düşük enerjili durumlardan daha yüksek enerjili durumlara geçişine neden olur. Yarı iletkenlerde bu, çoğunlukla elektronların bağlı durumdan delokalize duruma geçişi anlamına gelir. Sonuç olarak, malzemede serbest yük taşıyıcıları oluşur: **elektron-delik çiftleri**. Delikler, ışığın etkisiyle elektronların uzaklaştırıldığı yerlerdir ve yükleri elektronun yüküne eşit olan pozitif yüklü taşıyıcılar olarak düşünülebilir. Artık serbest yük taşıyıcılarımız olduğuna göre, malzemenin elektriksel iletkenliğinde bir değişiklik meydana gelir, ancak elektronlar malzemenin yüzeyinden ayrılmaz.

İç fotoelektrik etki, teknolojiye özellikle önemli iki uygulamaya sahiptir. Bunlardan ilki **fotoiletkenlik olayıdır**. Işıkla aydınlatıldığında, bir yarı iletkenin elektriksel iletkenliği, daha fazla yük taşıyıcısı olduğu için artar; yani, yarı iletkenin uçlarına uygulanan gerilim aynı olduğunda, içinden daha büyük bir akım akar. Bu, birçok ışık sensörünün ve fotodetektörün çalışma prensibinin temelini oluşturur. İkinci olay ise bazı yarı iletken yapılarda meydana gelen **fotovoltajik etkidir**. p-tipi yarı iletken olarak adlandırılan, elektron eksikliği olan bir yarı iletken ile n-tipi yarı iletken olarak adlandırılan,



Şekil 6. Sokak lambasının anahtarı olarak kullanılan fotosel.

serbest elektron fazlalığı olan bir yarı iletken birbirine temas ettirildiğinde ve bu temas ışığa maruz kaldığında, **bir elektromotor kuvveti (veya fotovoltaik gerilim)** üretilebilir. Bu tür yarı iletken yapılara **fotovoltaik** hücreler veya **güneş hücreleri** de denir. Fotosel harici bir devreye bağlandığında, bir elektrik akımı akar. Fotoseller, **güneş panellerinin** temel yapı taşlarıdır.

İç fotoelektrik etkinin uygulamaları çok sayıdadır ve günlük yaşamda her yerde karşımıza çıkar. Güneş pilleri, güneş ışınımının bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürür ve küçük hesap makinelerinden büyük fotovoltaik enerji santrallerine kadar her alanda kullanılır. Bu şekilde, iç fotoelektrik etki, ışığın kuantum doğası ile modern elektronik arasındaki en önemli bağlantılardan birini temsil eder; çünkü ışığın elektrik sinyaline veya kullanışlı elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlar.

Güneş panellerinin kullanımına ilişkin çevresel gerekçeler

Güneş panellerinin çevresel gerekçesini değerlendirirken, yalnızca çalışma sırasındaki etkilerini dikkate almak yeterli değildir; üretim, kullanım ve atık, yani geri dönüşüm olanakları dahil olmak üzere tüm yaşam döngüsü dikkate alınmalıdır.

Güneş panellerinin en büyük avantajlarından biri, kullanım noktasında fosil yakıt yakmamaları ve zararlı gazlar ile partiküller salmamalarıdır. Bu durum, özellikle güneş enerjisi fosil kaynaklardan üretilen elektriğin yerini aldığı anda, hava kirliliğini ve sera gazı emisyonlarını azaltır. Ayrıca, paneller çoğunlukla mevcut çatılara veya diğer altyapı unsurlarına monte edildiğinden, kömür madenleri ve kömür yakıtlı elektrik santrallerinin kül depolama alanlarının aksine, çoğu durumda doğal çevreye kalıcı değişiklikler yaratmazlar.

Öte yandan, bu zorluklar göz ardı edilirse çevresel analiz tam sayılmaz. Güneş panellerinin üretimi hammadde ve önemli miktarda enerji gerektirir. Ayrıca, kullanım ömürlerinin sonunda toplama ve geri dönüşüm için organize sistemlere ihtiyaç duyulur. Güneş panellerinden elde edilen elektrik üretimi, günlük ve yıllık döngülere, bulut örtüsüne ve hava koşullarına bağlı olduğundan sabit değildir. Bu nedenle, enerji sistemlerinde güneş enerjisi diğer enerji kaynaklarıyla birlikte kullanılmalıdır. Ayrıca, gündüz veya yaz aylarında üretim yüksek olduğunda elde edilen elektrik enerjisinin daha sonra (örneğin gece) kullanılabilmesi için enerji depolama sistemlerine (örneğin pillere) ihtiyaç vardır. Buna göre, güneş panelleri; kaliteli üretildikleri, uzun kullanım ömrüne sahip oldukları, geri dönüşümleri uygun şekilde planlandığı ve fosil yakıtlardan elde edilen elektrik enerjisinin yerine kullanıldıkları durumlarda, iyi planlanmış bir enerji sisteminin parçası olarak çevresel açıdan uygun bir çözüm oluştururlar.



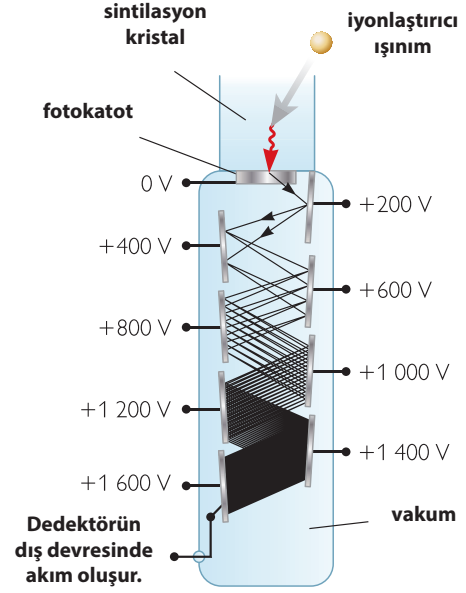
Şekil 7. Fotovoltaik enerji santrali



DAHA FAZLA ÖĞREN

Fotoçoğaltıcı tüpler

Bilimde, dış fotoelektrik etki, malzemelerin yüzeyinin kimyasal bileşimini ve elektronik yapısını incelemek için kullanılan bir yöntem olan fotoelektron spektroskopisinin temelini oluşturur. Ayrıca, çok zayıf ışık sinyallerini son derece hassas bir şekilde algılayan ve sintilatör deneylerinde ve parçacık dedektörlerinde kullanılan fotoçoğaltıcı tüplerinin çalışma prensibinin de temelini oluşturur. Bu tür dedektörlerde, yüksek enerjili iyonlaştırıcı radyasyon kuantumları sintilasyon kristaline çarpar. Işınının kristalle etkileşimi sonucunda, belirli bir enerjiye sahip fotonlar yayılır. Bu fotonlar, fotokatlayıcı tüpünün fotokatoduna çarparak fotoelektronları serbest bırakır. Ardından, tüpün içindeki çoklu elektrot (dinot) sistemi aracılığıyla, ikincil emisyon yoluyla elektron sayısı artırılır. Bu şekilde, ölçüm elektronu tarafından kaydedilebilecek kadar güçlü bir elektrik sinyali üretilir. Fotoçoğaltıcı tüp ile iyonlaştırıcı radyasyonun algılanma süreci Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. İyonlaştırıcı ışının algılanmasında kullanılan fotoçoğaltıcı tüp



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Dış fotoelektrik etkiyi incelemek amacıyla yapılan deneyde, metal fotokatodun yerine bir gaz konulursa ne gibi bir fark beklenebilir?
2. Farklı metallerin elektronlar için farklı bağlanma enerjileri vardır. Metallerin özellikleri hakkında ne gibi bir sonuca varabilirsiniz?
3. Bir fotoselde, eşik dalga boyu (kırmızı sınırı) 540 nm olan bir metal kullanılmaktadır:
 - a) Metalin iş fonksiyonunu hesaplayınız,
 - b) Katot 600 nm dalga boyundaki ışıkla aydınlatılırsa fotoelektrik etki meydana gelir mi? (Çözüm a) 2,3 eV, b) hayır)
4. Fotoelektrik etkiyi kullanarak Planck sabitini belirlemeye yönelik bir deneyde, 250 nm dalga boylu ışık kullanıldığında tüm elektronları durdurmak için 1,0 V durdurma potansiyeli gerektiği, 200 nm dalga boylu ışık kullanıldığında ise buna karşılık gelen potansiyelin 2,4 V olduğu bulunmuştur. Bu verilerden aşağıdakileri belirleyiniz:
 - a) Planck sabitini,
 - b) Fotokatodun iş fonksiyonunun değerini,
 - c) Gelen ışığın frekansını,
 - ç) Fotoelektronların kinetik enerjisini.
 (Cevap: b) 4,6 eV, c) $1,2 \cdot 10^{15}$ Hz ve $1,5 \cdot 10^{15}$ Hz, d) $1,6 \cdot 10^{-19}$ J ve $3,85 \cdot 10^{-19}$ J).

5. Aynı fotokatot, dalga boyu $\lambda_2 = 0,45\mu\text{m}$ olan ışıkla aydınlatıldığında fotoakım U_{z2} kesme geriliminde durmaktadır. İki kesme gerilimi arasındaki fark $1,7\text{ V}$ olduğuna göre, bilinmeyen dalga boyu λ_1 'i bulunuz. (Çözüm: 280 nm)
6. Bir metalin yüzeyi 320 nm ve 580 nm dalga boylarındaki ışıkla aydınlatıldığında, fotoelektronların maksimum hızları iki kat farklılık gösterir. Verilen metal için elektronların iş fonksiyonu nedir? Metalin eşik dalga boyunu (kırmızı sınırı) hesaplayınız. (Çözüm: $1,56\text{ eV}$ ve 795 nm)
7. Bir laboratuvarında, belirli bir metalin yüzeyinin elektron iş fonksiyonu belirlenmiştir. Deneyde, metale gelen ışığın dalga boyunun bir fonksiyonu olarak durdurma gerilimi ölçülmüş ve sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmiştir.

$\lambda[\text{nm}]$	100	120	140	160	180	200
$U_z(\text{V})$	7,5	5,6	4,0	2,9	2,1	1,4

Analizde, aşağıdaki sabitlerin sayısal değerleri kullanılacaktır: elektron yükü: $1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}$, boşluk-taki ışık hızı $2,998 \cdot 10^8\text{m/s}$.

- a) Sonuçları bir grafikte gösterin; x eksenine dalga boyunun tersini, y eksenine durdurma gerilimini çizin. Noktalar üzerinden geçen bir doğru çizin.
- b) Doğru çizgisinin eğimini ve y eksenine kesiştiği noktayı belirleyin. (Çözüm: $-4,74\text{ eV}$)
- c) Önceki sorudaki sonuçları kullanarak, Planck sabitinin değerini ve eV cinsinden ifade edilen metalin iş fonksiyonunu bulun. (Çözüm: $6,6 \cdot 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$, $4,7\text{ eV}$)
- d) Metalden hala elektronların yayılabileceği ışığın maksimum dalga boyunu bulun. (Çözüm: 260 nm)
- e) Maksimum kinetik enerjisi 10 eV olan fotoelektronlar üretebilen ışığın dalga boyunu belirleyin. (Çözüm: 83 nm)

4.3. Atom Modelleri

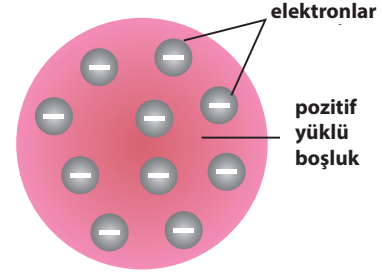
Önceki derslerde, ışık ve radyasyon konusunda klasik fiziğin ciddi sınırlamaları olduğunu görmüştük. Atomun yapısını tanımlamaya çalıştığımızda da benzer sorunlar ortaya çıkar. 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında fizikçiler ve kimyagerler tarafından yapılan deneyler, elementlerin temel yapı taşı olan atomun bir iç yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Periyodik Tablo ile katot ışınları, seyrek gazlardaki elektrik deşarjları, elektroliz ve radyoaktivite üzerine yapılan çalışmalar, atomun bölünmez bir parçacık olmadığını; elektrik yükü taşıyan parçacıklardan oluşan karmaşık bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

Günümüzde atomun, proton ve nötronlardan oluşan bir çekirdekten ve onu çevreleyen elektronlardan oluştuğunu biliyoruz. Ancak bu tablo hiçbir şekilde apaçık değildir. “Elektronlar atomda nasıl düzenlenmiştir ve atom neden karardır?” sorusu, bizi günümüzün atom modeline götüren uzun bir geçmişe sahiptir. **Atom modeli, gerçek bir atomun yapısını, yük ve kütle dağılımını idealize edilmiş bir şekilde fiziksel olarak temsil eden ve deney sonuçlarının açıklanmasını sağlayan bir modeldir.** Atom modellerinin gelişimi, bilimsel yöntemin tipik bir örneğidir. Her model, deneysel gerçekleri başarıyla açıkladığı sürece kabul edilir ve yeni bulgular ortaya çıktığında revize edilir veya yerini başka bir modele bırakır.

Thomson'un atom modeli

Elektronun keşfinden sonra, atomların negatif yüklü parçacıklar içerdiği anlaşıldı. Atomun bütünü elektriksel olarak nötr olduğu için, elektronların toplam negatif yüküne eşit büyüklükte bir pozitif yük de bulunmalıdır. Bu sonuca dayanarak, Joseph John Thomson 1897'de ilk atom modelini önerdi.

Thomson'un modeline göre atom, pozitif yükün atomun hacmi boyunca eşit olarak dağıldığı ve içine gömülü elektronların denge konumlarında salınım yaptığı küresel bir alandır (Şekil 1). Bu şekilde atom elektriksel olarak nötrdür. Bu model, atomun elektriksel nötrlüğünü açıklamış; ayrıca atomun kararlılığı ile pozitif ve negatif iyonların oluşumunu da basit bir şekilde açıklamıştır.



Şekil 1. Thomson'un atom modelinin basitleştirilmiş bir gösterimi

Rutherford'un saçılma deneyi

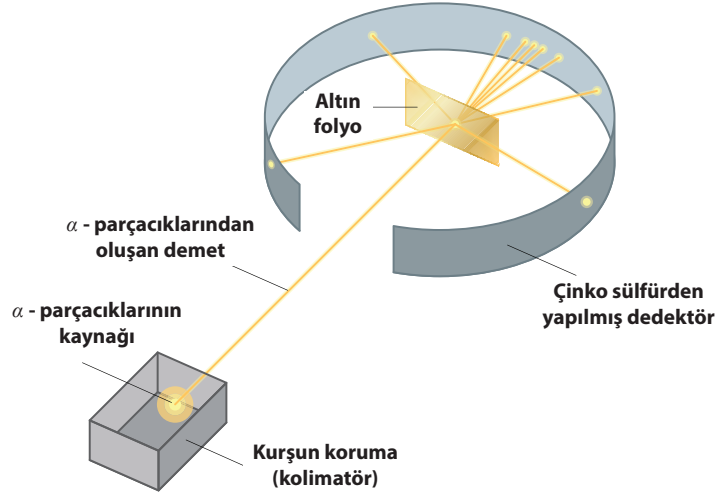
Thomson modeli, atomun elektriksel nötrlüğünü başarılı bir şekilde açıklasa da, atomun içindeki yük ve kütlenin dağılımını doğru bir şekilde tanımlayıp tanımlamadığı sorusu gündeme geldi. Bunu doğrulamak için, atom fiziğinin gelişiminde en önemli deneylerden biri gerçekleştirildi: Rutherford'un saçılma deneyi.

Deney, atomdaki yük ve kütle dağılımını deneysel olarak araştırmak ve Thomson modelinin saçılma sonuçlarını açıklayıp açıklayamadığını kontrol etmek amacıyla Ernest Rutherford'un laboratuvarında gerçekleştirildi. Deney, Hans Geiger ve Ernest Marsden tarafından, parçacığı kaynağı olarak radyoaktif polonyum (^{214}Po) kullanılarak gerçekleştirildi.

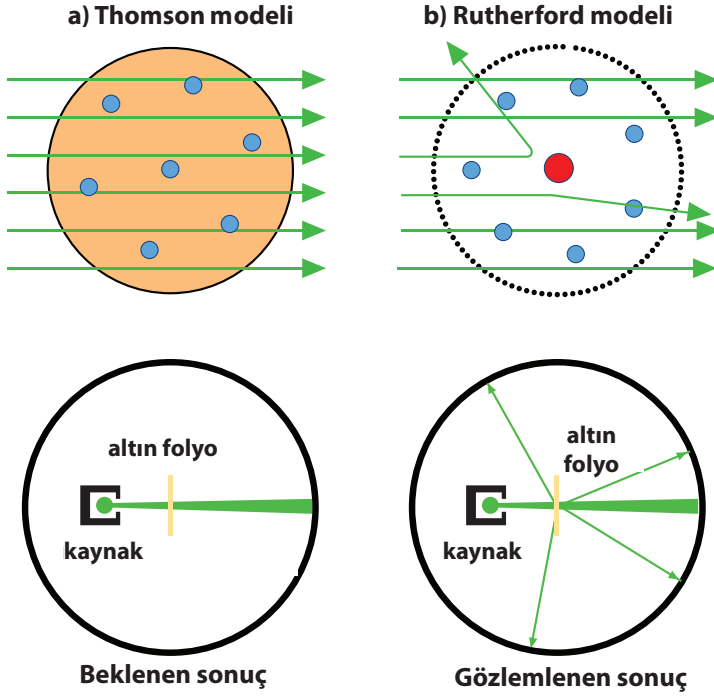
Polonyum, çift iyonize helyum (^4He) çekirdekleri olan alfa parçacıkları (α -parçacıkları) yayan bir maddedir. Alfa parçacıkları, dar ve yaklaşık olarak paralel bir demet elde etmek için bir kolimatörden geçirildi ve ardından çok

ince bir altın folyoya yönlendirildi. Folyonun etrafına, çinko sülfürden yapılmış bir floresan ekran olan bir dedektör yerleştirildi. Çinko sülfür, üzerine bir α - parçacığı çarptığında ışık yayar (Şekil 2).

Eğer Thomson atom modeli tamamen doğru olsaydı, α parçacıklarının atomlardan geçerken, pozitif yükün atom hacmine düzgün dağılmış olması ve uzayın herhangi bir bölgesinde güçlü bir elektrik alan bulunmaması nedeniyle, başlangıç doğrultularından yalnızca küçük sapmalar göstermesi beklenirdi. Ancak deney sonuçları bunun böyle olmadığını ortaya koymuştur. α parçacıklarının büyük çoğunluğu folyodan neredeyse hiç sapmadan geçmiştir. Bu durum, atomun büyük ölçüde boşluktan oluştuğunu, yani elektronlar ile pozitif yükün bulunduğu bölge arasındaki uzaklığın çok büyük olduğunu göstermektedir. Parçacıkların çok küçük bir kısmı ise çok büyük açılarla saçılmış, yaklaşık her 8000 α parçacığından biri ise kaynağa doğru geri dönmüştür. Bu beklenmedik sonuç, α parçacıklarının atom içinde çok küçük bir hacim kaplayan, büyük kütleli ve pozitif yüklü bir bölgeden geri itildiğini göstermiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Rutherford deneyinin şematik diyagramı. Basitlik amacıyla, dedektör altın folyoyu saran bir serit olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.

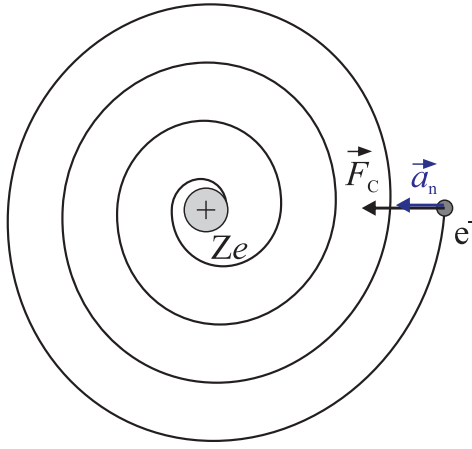
a) Thomson modelinin öngörüsü
b) Rutherford modeli ve gözlemlenen sonuçlar

cek yeni bir atom modeline ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, 1911 yılında Ernest Rutherford, atom fizikinin gelişiminde önemli bir adım olan ve çekirdek modeli olarak adlandırılan yeni bir atom modeli önermiştir.

Rutherford'un atom modeli

Rutherford'un modeline göre, pozitif yük ve atomun kütlelerinin neredeyse tamamı, **atom çekirdeği** adı verilen atomun çok küçük, merkezi bir bölümünde bulunur. Elektronlar, çekirdeğin boyutuna kıyasla çok daha uzak mesafelerde **çekirdeğin etrafında dolanırlar**; bu da, kütle ve pozitif yük dağılımı açısından atomun büyük çoğunluğunun boş olduğu anlamına gelir. Çekirdek, atom kütlelerinin çoğunu barındırır ve pozitif yüklüdür; negatif yüklü elektronlar ise atomun genel nötrlüğünü sağlar.

Bu model, birkaç önemli deneysel sonucu aynı anda açıklamıştır. İlk olarak, model, α parçacıklarının çoğunun neden orijinal yönlerinden neredeyse sapma göstermeden folyodan geçtiğini açıklamıştır: çoğu durumda, çekirdeğe yeterince yakın geçmedikleri için üzerlerindeki elektrostatik etkileşim zayıftır ve yörüngeleri yaklaşık olarak düz bir çizgi halinde kalır. İkincisi, model, büyük sapmaların görüldüğü nadir durumlara doğal bir açıklama getirir: Bir α -parçacığı çekirdeğe çok yakın geçtiğinde, güçlü Coulomb itme kuvveti hareket yönünü önemli ölçüde değiştirebilir ve bu da geniş açılarda saçılmaya yol açar. Üçüncü olarak, büyük sapmaların nadir olması gerçeğinden, çekirdeğin tüm atoma kıyasla çok küçük boyutlara sahip olması gerektiği sonucu çıkar. Bu şekilde, Rutherford modeli atomun çekirdek yapısını açıkça ortaya koydu ve nükleer olaylara ilişkin daha ileri araştırmaların temelini attı.



Şekil 4. Rutherford'un atom modelinde elektronun çekirdek etrafındaki ivmeli hareketi.

Klasik fizik kurallarına göre, böyle bir atom kararlı olamaz. Elektronlar çekirdeğin etrafında dairesel yörüngelerde hareket ediyorsa, sürekli merkezci ivmeye maruz kalırlar. Klasik elektrodinamiğe göre, belirli bir ivmeyle hareket eden herhangi bir elektrik yükü elektromanyetik radyasyon yaymak zorundadır. Bu durumda elektron kademeli olarak enerji kaybeder, çekirdeğe yaklaşır ve çok kısa bir süre içinde çekirdeğin üzerine düşerdi. Bu, atomların kararlı olduğu şeklindeki deneysel gerçekle çelişmektedir.

Ayrıca, bu model atomların çizgi spektrumlarını açıklayamaz. **Rutherford modelindeki** elektronun keyfi bir enerjiye sahip olabilmesi ve hareket ederken sürekli olarak ışınım yapması durumunda, çizgi spektrumu yerine sürekli bir atom spektrumu beklenirdi. Ders 4.1'de, hidrojen atomunun çizgi spektrumunun görünümüyle tanıştık. Bu, atomun kesin olarak tanımlanmış enerji durumlarına sahip olması gerektiğini ve radyasyonun yalnızca bu durumlar arasındaki geçişler sırasında meydana geldiğini gösterir;

bu ise Rutherford modelinin açıklayamadığı bir durumdur.

Bu nedenle, Rutherford modeli Atom Teorisi'nin gelişiminde gerekli, ancak yeterli olmayan bir adımı temsil eder. Model, atomun **çekirdek yapısını** ortaya koyar ve saçılma sonuçlarını başarıyla açıklar; ancak, atomun kararlılığını ve atomik spektrumların ayrık doğasını açıklayacak yeni fiziksel ilkelerin gerekliliğini açıkça ortaya koyar.

Atomun yapısını açıklamak için kuantum fikirlerinin ortaya çıkmasına yol açmıştır; bu fikirler, Bohr atom modeli aracılığıyla ele alınacaktır.

Bohr atom modeli

Rutherford modelinin atomun kararlılığını ve çizgi spektrumlarını açıklayamaması, klasik fiziğin atom içindeki süreçleri tanımlamak için yeterli olmadığını göstermiştir. Atomun kararlılığını ve elektronun çekirdek etrafındaki hareketini açıklarken, aynı zamanda atom spektrumlarının ayrık doğasını da açıklamak için yeni, klasik olmayan ilkelerin getirilmesi gerekiyordu.

Enerjinin kuantizasyonu fikrine dayanarak, 1913 yılında Niels Bohr, Rutherford tarafından ortaya konulan atomun çekirdek yapısını koruyan, ancak üzerine kuantum koşullarını ekleyen bir model önerdi. Bu iyileştirmelerle **Bohr atom modeli** geliştirildi. Bohr atom modeli, hidrojen atomunun ve çekirdeği $+Ze$ yüklü (burada Z , proton sayısıdır) olup çekirdeğin etrafında dolanan tek bir elektrona sahip atom ve iyonların kararlılığını başarıyla açıklar (^2H , ^3H , He^+ , Li^{2+} , Be^{3+} vb.). Bu tür atomlar veya iyonlara topluca **hidrojen benzeri atomlar** denir. Bohr modeli, hidrojen benzeri atomların ayrık (çizgi) spektrumlarını da açıklamıştır.

Bohr modeli, elektronun çekirdeğin etrafında yalnızca belirli **sabit yörüngelerde** hareket ettiğini varsayar. Aksine, yalnızca belirli kuantum koşullarının geçerli olduğu belirli yörüngelere izin verilir. Bu koşulların klasik mekanikte bir temeli yoktur, ancak atomun kararlılığını ve çizgi spektrumlarını açıklamak için gerekli olduğu kanıtlanmıştır. Her ne kadar "yörünge" terimi kullanılsa da, bunlar gerçek klasik yörüngeler olarak değil, daha çok basitleştirilmiş bir kuantum modelinin parçası olarak yorumlanmalıdır. Bohr'un atom teorisinin merkezinde, klasik fizikte hiçbir dayanağı veya bilimsel gerekçesi bulunmayan varsayımlardır ve günümüzde **Bohr postulatları** olarak bilinmektedir:

1. Sabit durum postulatı

Sabit durum postulatı: Atomun her sabit durumu, elektronun hareket ettiği kesin olarak tanımlanmış bir yörüngeye karşılık gelir. Elektron bu tür sabit durumlarda iken atom elektromanyetik radyasyon yaymaz.

2. Açısal momentumun kuantizasyonu postulatı

Elektron, çekirdeğin etrafındaki sabit yörüngeler boyunca hareket ederken, açısal momentum $L = m_e v r$ yalnızca aşağıdaki koşulu sağlayan belirli ayırık değerlere sahip olabilir:

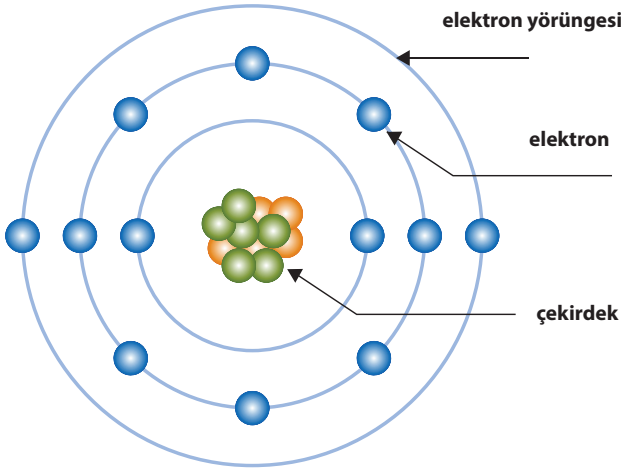
$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi},$$

burada m_e elektronun kütlesi, v_n elektronun söz konusu yörüngedeki hızı ve r_n yörüngenin yarıçapıdır. Planck sabiti h ile gösterilir ve $n = 1, 2, 3, \dots$ bu sayı, **ana kuantum sayısı** olarak bilinir.

3. Kuantum geçişleri için postulat

Işının yayılması veya emilmesi, yalnızca bir elektronun bir sabit durumdan başka bir sabit duruma geçişi sırasında gerçekleşir.

Bohr Postulatlarının Sonuçları



Şekil 5. Bohr atom modeli. Elektronlar, çekirdek etrafında kararlı dairesel yörüngelerde hareket eder.

Sabit yörüngelerin yarıçapları

İlk iki Bohr postulatı, hidrojen benzeri bir atomdaki elektronun sabit durumlarındaki yörüngelerin yarıçaplarının, hızlarının ve enerjilerinin belirlenmesine olanak tanır. Elektronun hareket edebileceği sabit yörüngelerin yarıçapı aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$r_n = \frac{a_0}{Z} \cdot n^2,$$

burada, $n=1,2,3, \dots$

$Z=1$ olan hidrojen atomu için, yörüngelerin yarıçapı aşağıdaki bağıntı ile verilir:

$$r_{n,H} = a_0 n^2$$

burada, $n=1,2,3, \dots$

$n=1$ için, hidrojen atomu etrafındaki ilk yörüngesinin yarıçapını elde ederiz; buna Bohr yarıçapı da denir:

$$r_{1,H} = a_0.$$

Bu bağıntıdaki sabitin değeri

$$a = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ m'dir.}$$

Bu değer çözümlü örnek 1'de gösterildiği gibi diğer temel sabitler aracılığıyla hesaplanır.

Hidrojen benzeri atomların yörünge yarıçaplarını veren bu bağıntıdan çıkarılması gereken önemli sonuç, sabit yörüngelerin yarıçaplarının keyfi değerler alamayacağı, aksine ana kuantum sayısının karesiyle artacağıdır. Bu durumda şu bağıntı yazılabilir:

$$r_1 : r_2 : r_3 : \dots : r_n = 1^2 : 2^2 : 3^2 : \dots : n^2.$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Ze yükündeki bir çekirdeğin Coulomb çekim kuvveti altında bulunan e yükündeki bir elektron için Newton'un İkinci Hareket Yasasını ve ayrıca İkinci Bohr Postulasını kullanarak, Bohr atom modelinde sabit yörüngelerin yarıçaplarını hesaplamak için ifadeleri türetin. Bohr yarıçapı a_0 değerini hesaplamak için bir ifade türetin.

Çözüm:

Dairesel harekete uygulanan Newton'un ikinci hareket yasasını kullanırsak:

$$\vec{F}_c = m_e \vec{a}_n,$$

burada a_n elektronun n . yörüngedeki merkezci ivmesini, m_e ise elektronun kütlesini göstermektedir. Coulomb çekim kuvveti

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2}$$

ve merkezci ivme $a_n = \frac{v_n^2}{r_n}$ ifadeleri yerine yazıldığında,

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r_n^2} = m_e \frac{v_n^2}{r_n}.$$

eşitliği elde edilir. Bu denklemde ϵ_0 , vakumun elektriksel geçirgenliğini göstermektedir. Elektronun n . kararlı yörüngedeki hızını Bohr'un ikinci postulasına göre $v_n = n \frac{h}{2\pi r_n m_e}$,

şeklinde ifade edip son denklemde yerine yazarsak, kararlı yörüngelerin yarıçapı için:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{Ze^2 m_e \pi} \cdot n^2, \quad n=1,2,3, \dots$$

bağıntısı elde edilir. Bu temel fizik sabitleri tek bir sabitte toplanabilir:

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{e^2 m_e \pi}.$$

Tüm sabitlerin sayısal değerleri yerine yazıldığında $a_0 = 0,529 \cdot 10^{-10}$ m. elde edilir.

Sonuç olarak, hidrojen benzeri atomlarda kararlı yörüngelerin yarıçapı $r_n = \frac{a_0}{Z} \cdot n^2$ şeklindedir. $n=1,2,3, \dots$

olmak üzere, n baş kuantum sayısını göstermektedir.

Sabit yörüngelerde elektron hızı

Bohr modelindeki sabit yörüngelerde **elektronun hızı**, ayrık değerlere sahiptir ve ana kuantum sayısı n 'ye bağlıdır. Hidrojen benzeri bir atom için, belirli bir sabit yörüngedeki elektronun hızı şu denklemle hesaplanabilir:

$$v_n = Z v_{1,H} \cdot \frac{1}{n}, \quad n=1,2,3, \dots$$

Elektronun hızı, aynı zamanda en küçük yarıçapa sahip olan ($n=1$) ilk yörüngede en yüksektir ve yörüngenin ana kuantum sayısı arttıkça azalır. Bu bağıntıdaki sabitin değeri, $v_{1,H} = 2,189 \cdot 10^6$ m/s dir ve elektronun hidrojen atomunun birinci sabit yörüngesinde hareket ettiği hızı temsil eder; Z ise proton sayısını ifade eder. Yukarıdaki denklemin nasıl türetildiği ve orantılılık sabitinin sayısal değerinin nasıl belirlendiği için çözümlü örnek 2'ye bakınız.

Hidrojen benzeri atomlarda elektron, sabit yörüngelerde istediği hızla hareket edemez. Elektronun sabit yörüngelerdeki hızı için aşağıdaki bağıntı geçerlidir:

$$v_1 : v_2 : v_3 : \dots : v_n = \frac{1}{1} : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \dots : \frac{1}{n}.$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

İkinci Bohr Postülası ve sabit yörüngelerin yarıçaplarına ilişkin ifadeyi kullanarak, hidrojen benzeri bir atomun sabit yörüngelerindeki elektronun hızına ilişkin bir ifade türetin. Hidrojen atomunun birinci sabit yörüngesindeki elektronun hızını belirleyin.

Çözüm:

İkinci Bohr Postulasına göre, sabit bir yörüngedeki elektronun açısal momentumu ayrık değerlere sahiptir ve şu şekilde verilir:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}.$$

Bu denklemden, n 'inci sabit yörüngedeki elektronun hızı şu şekilde ifade edilebilir:

$$v_n = \frac{nh}{2\pi r_n m_e}.$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{Ze^2 m_e \pi} \cdot n^2,$$

Bu, elektronun hızını verir ve şu şekilde yazılabilir:

$$v_n = \frac{Ze^2}{2\epsilon_0 h} \frac{1}{n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Bu ifadeden, sabit yörüngelerdeki elektronların hızının ayrık bir büyüklük olduğu ve hızın ana kuantum sayısı ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Elektron, en büyük hızına birinci sabit yörüngede, yani en küçük yarıçaplı yörüngede ulaşır. Hidrojen atomu için ($Z = 1$) olduğunda, n 'inci sabit yörüngedeki elektronun hızı şöyledir:

$$v_{n,H} = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h} \frac{1}{n}.$$

$n = 1$ olduğunda, ilk sabit yörüngedeki elektronun hızı şu şekilde bulunur:

$$v_{1,H} = 2,189 \cdot 10^6 \text{ m/s}.$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Bir elektron, hidrojen atomunun n 'inci Bohr yörüngesinde bulunmaktadır.

a) Çekirdek etrafındaki dönme periyodunun şu şekilde yazılabileceğini $T = t_0 n^3$ şeklinde t_0 sabitinin değerini hesaplayın. Elektronun kütlesi ve yükünün değerlerinin bulunduğu varsayılmaktadır.

b) Elektron, birinci yörüngeye geçmeden önce ortalama olarak ikinci yörüngede yaklaşık 12 μs kalır. Elektron, hidrojen atomunun birinci uyarılmış durumunda kaç tur (dairese dönüş) yapar?

Verilenler:

$$t = 12 \cdot 10^{-6} \text{ s}, m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg},$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}, h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s},$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{Nm}^2)$$

Çözüm:

$$\text{a) } t_0 - ? \text{ b) } N - ?$$

Çözüm:

a) Hidrojen atomunda elektronun çekirdek etrafında bir tam tur dönmesi için geçen süre (periyot): $T_n = \frac{2\pi r_n}{v_n}$, bağıntısıyla verilir.

Burada r_n n yörüngesinin yarıçapını, v_n ise elektronun bu yörüngedeki hızını göstermektedir. Yarıçap ve hız ifadeleri yerine yazıldığında,

$$T_n = \frac{2\pi r_n}{v_n} = \frac{2\pi \frac{\varepsilon_0 h^2}{e^2 m_e} \cdot n^2}{\frac{e^2}{2\varepsilon_0 h} \cdot \frac{1}{n}} = \frac{4\varepsilon_0^2 h^3}{e^4 m_e} \cdot n^3 = t_0 \cdot n^3.$$

bağıntısı elde edilir. t_0 sabitinin değeri:

$$t_0 = \frac{4\varepsilon_0^2 h^3}{e^4 m_e} = 1,52 \cdot 10^{-15} \text{ s} \text{ olarak bulunur.}$$

b) Birinci uyarılmış durumda elektronun yaptığı devir sayısı

$$N = \frac{t}{T_n} = \frac{t}{2^3 \cdot t_0} = 9,87 \cdot 10^9 \text{ olarak hesaplanır.}$$

Sabit yörüngelerdeki elektronun enerjisi

Bohr atom modelinde **elektronun enerjisi**, çekirdeğin elektrostatik alanında sahip olduğu kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamına eşittir. Hidrojen benzeri bir atomda n 'inci sabit yörüngede hareket eden bir elektron için enerji şu ifadeyle verilir:

$$E_n = -\frac{Z^2}{n^2} E_0, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

burada E_0 , temel fiziksel sabitlere bağlı olan pozitif bir sabittir. Değeri $E_0 = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 13,6 \text{ eV}$ 'dir. Elektronun sabit yörüngelerdeki enerjisine ilişkin denklemin nasıl elde edildiği, Çözümlü Örnek 4'te gösterilmiştir.

Bu ifade, sabit yörüngelerdeki elektronların enerjisinin ayrık (kuantize) olduğunu ve bu değerlerin ana kuantum sayısı n 'nin karesiyle ters orantılı olduğunu gösterir. Hidrojen benzeri atomlarda elektron, sabit yörüngelerde keyfi enerjilere sahip olamaz. Elektronun farklı sabit yörüngelerdeki enerjileri için aşağıdaki ilişki geçerlidir.

$$E_1 : E_2 : E_3 : \dots : E_n = \frac{1}{1^2} : \frac{1}{2^2} : \frac{1}{3^2} : \dots : \frac{1}{n^2}.$$

Ana kuantum sayısı arttıkça, elektronun enerjisi artar (daha az negatif hale gelir); bu, elektronun çekirdeğe daha az bağlı olduğu anlamına gelir. Elektron, **temel durum olarak** adlandırılan birinci sabit yörüngede ($n = 1$) hareket ederken en düşük enerjiye sahiptir. $n > 1$ olan tüm durumlara **uyarılmış enerji durumları** denir.

$n \rightarrow \infty$ olduğunda, elektronun enerjisi sıfıra yaklaşır; bu durum, elektronun **serbest** olduğu ve çekirdeğe bağlı olmadığı bir duruma karşılık gelir. Elektronun serbest bir elektron haline gelmesi, yani atomdan ayrılması için kazanması gereken enerjiye **iyonlaşma enerjisi** denir. Herhangi bir enerji durumunda bulunan bir elektronun iyonlaşma enerjisi şu denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$E_{\text{jon}} = E_{\infty} - E_n$$

Elektron temel enerji durumunda ($n = 1$) ise iyonlaşma enerjisi en yüksek seviyededir. Elektron uyarılmış durumlardan birindeyse, iyonlaşma enerjisi temel enerji durumundaki bir elektronun iyonlaşma enerjisinden daha düşüktür. İyonlaşma enerjisi aynı zamanda, serbest bir elektron hidrojen benzeri bir atomun çekirdeğine bağlandığında elektromanyetik dalga (foton) olarak yayılan enerjiye eşittir. Bu nedenle, sabit durumların enerjisine elektron bağlanma enerjisi de denir.

Bohr modeli tarihsel bir dönüm noktası oluşturmakla ve hidrojen atomunu ve diğer hidrojen benzeri atomları başarıyla açıklamakla birlikte, çok elektronlu atomları ve bunların spektrumlarını doğru bir şekilde açıklayamaz. Bu sınırlamalar, kuantum mekaniğinin gelişmesine zemin hazırlamıştır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 4.

Hidrojen benzeri bir atomdaki bir elektronun sabit durumdaki enerjisini türetiniz ve E_0 sabitinin değerini belirleyiniz.

Çözüm:

Elektronun çekirdeğin elektostatik alanındaki toplam enerjisi, kinetik enerji ile potansiyel enerjinin toplamına eşittir:

$$E_n = E_{k,n} + E_{p,n} = \frac{m_e v_n^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r_n}.$$

Hidrojen benzeri bir atom için elektronun hızı ve kararlı yörüngelerin yarıçapı ifadeleri yerine yazıldığında: $E_n = E_{k,n} + E_{p,n} = \frac{Z^2 m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} - \frac{Z^2 m_e e^4}{4\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$, buradan

$$E_n = -\frac{Z^2 m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{ ifadesi elde edilir. Bu bağıntı, } E_n = -\frac{Z^2}{n^2} E_0$$

şeklinde yazılırsa, E_0 sabiti için

$$E_0 = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 13,6 \text{ eV}$$

elde edilir.

Hidrojen atomu için ($Z = 1$)

$$E_{n,H} = -\frac{1}{n^2} E_0 = -2,18 \cdot 10^{-18} \frac{1}{n^2} \text{ J} = -13,6 \frac{1}{n^2} \text{ eV}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

olur.

$n = 1$ için, hidrojen atomunda elektronun birinci kararlı yörüngedeki enerjisi:

$$E_{1,H} = -E_0 = -13,6 \text{ eV olarak bulunur.}$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 5.

Hidrojen atomundaki elektronun iyonlaşma enerjisini, kararlı enerji düzeylerinin enerjisinin

$E_{n,H} = -13,6 \frac{1}{n^2} \text{ eV}$ bağıntısıyla verildiği durumda hesaplayınız. Elektronun temel enerji düzeyinde bulunduğunu kabul ediniz.

Çözüm:

Bohr modelinde, elektron çekirdekten çok uzaktayken pratik olarak serbesttir. Bu ana kuantum sayısı n 'nin çok büyük bir değerine karşılık gelir. Bu durumda $\frac{1}{n^2}$ terimi ihmal edilebilecek kadar küçülür; dolayısıyla $E_{\infty,H}$ enerjisi sıfıra yaklaşır. Bu nedenle, serbest bir elektron için şu ifade yazılabilir:

$$E_{\infty,H} = 0 \text{ eV.}$$

Hidrojenin temel enerji durumu $n = 1$ için şöyledir:

$$E_{1,H} = -13,6 \text{ eV.}$$

Temel durumdan iyonlaşma enerjisi, serbest bir elektronun enerjisi ile temel durumdaki enerji arasındaki farktır:

$$E_{\text{jon,H}} = E_{\infty,H} - E_{1,H} = 13,6 \text{ eV.}$$

**ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 6.**

2,34 eV enerjili bir foton, bir hidrojen atomu tarafından emilir.

- Hidrojen atomunun bu foton tarafından iyonize edilebilmesi için gereken en küçük ana kuantum sayısı n 'yi bulun.
- bendeki durumdan iyonlaşma sonucu serbest kalan elektronun hızını v belirleyin.

Verilen:

$$E_{\gamma} = 2,34 \text{ eV}$$

İstenen:

$$n - ?, v - ?$$

Çözüm:

- Hidrojen atomunda elektronun herhangi bir enerji düzeyindeki enerjisi

$$E_n = -13,6 \cdot \frac{1}{n^2} \text{ eV} \quad n=1,2,3, \dots \text{bağıntısıyla verilir.}$$

Atomun iyonlaşabilmesi için elektrona en az bu kadar enerji verilmelidir. Buna göre gerekli iyonlaşma enerjisi

$$E_i = +13,6 \cdot \frac{1}{n^2} \text{ eV}, \quad n=1,2,3, \dots \text{ olur.}$$

Buna göre iyonlaşma koşulu $E_{\gamma} \geq E_i$ veya $E_{\gamma} \geq +13,6 \cdot \frac{1}{n^2} \text{ eV}$ şeklinde yazılır.

$$\text{Buradan } n \geq \sqrt{\frac{13,6 \text{ eV}}{E_{\gamma}}} = 2,4 \text{ elde edilir.}$$

n yalnızca tam sayı değerleri alabildiğinden, fotonun iyonlaşma oluşturabilmesi için elektronun ikinci uyarılmış durumda, yani $n = 3$ enerji düzeyinde bulunması gerekir.

- Fotonun fazla enerjisi elektronun kinetik enerjisine dönüşür. Buna göre

$$E_k = E_{\gamma} - E_i \text{ veya } \frac{m_e v^2}{2} = E_{\gamma} - E_i \text{ olur. Buradan elektronun hızı}$$

$$v = \sqrt{\frac{2}{m_e} (E_{\gamma} - E_n)} = 5,4 \cdot 10^5 \text{ m/s olarak bulunur.}$$

**SORULAR VE ÖDEVLER**

- Bohr modeli, Rutherford atom modelinin hangi eksikliklerini gidermek amacıyla geliştirilmiştir? Bu modeli hangi temel varsayımlar üzerine kurmuştur?
- Bohr modelinde "sabit yörünge" neyi ifade eder? Elektron neden sabit bir yörüngede hareket ederken elektromanyetik ışınım yaymaz?

3. Elektronun durağan (kararlı) yörüngedeki enerjisi neden negatiftir? Bu durum, elektronun bağlılığı açısından fiziksel olarak ne ifade eder?
4. Bohr yörüngesindeki elektron, yarıçapı r_n ve hızı v_n olan dairesel bir hareket yapmaktadır.
- a) Hidrojen atomunda elektronun n . yörüngedeki dönme periyodu için $T_n = \frac{2\pi r_n}{v_n}$ ifadesini türetiniz.
- b) Hidrojen atomunda elektronun n . yörüngedeki açısal frekansı için $\omega_n = \frac{2\pi}{T_n}$ ifadesini türetiniz.
- c) T_1 ve T_3 değerlerini hesaplayınız.
- d) ω_1 ve ω_3 değerlerini hesaplayınız ve ω_3 / ω_1 oranını belirleyiniz.
- (Çözüm: c) $T_1 = 1,52 \cdot 10^{-16} \text{ s}$, $T_3 = 4,10 \cdot 10^{-15} \text{ s}$ ve d) $\omega_1 = 4,13 \cdot 10^{16} \text{ rad/s}$, $\omega_3 = 1,53 \cdot 10^{15} \text{ rad/s}$, $\frac{\omega_3}{\omega_1} = 0,037$)
5. a) Hidrojen atomu için $E_2 - E_1$ ve $E_{10} - E_9$ değerlerini hesaplayınız. Enerji düzeyleri arasındaki uzaklığın arttığı, azaldığı veya aynı kaldığı sonucuna varılabilir mi?
- b) $r_{n+1} - r_n$ farkı n 'ye nasıl bağlıdır? Durağan yörüngeler arasındaki radyal uzaklık, narttıkça artar mı, azalır mı, yoksa aynı mı kalır?
- (Çözüm: a) $E_2 - E_1 = 10,2 \text{ eV}$, b) $r_{n+1} - r_n = (2n-1)r_1$, $E_{10} - E_9 = 0,032 \text{ eV}$).



ÜNLÜ BİLİM İNSANI

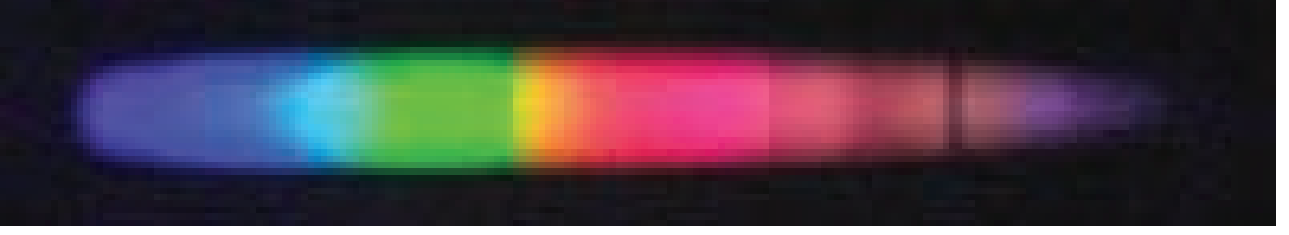
Niels Bohr (1885–1962), modern kuantum mekaniğinin gelişimine ve atomun yapısının anlaşılmasına önemli katkılarda bulunan Danimarkalı bir fizikçidir. Kopenhag'da eğitim görmüş ve çalışmalarını burada sürdürmüştür. Kariyerinin ilk yıllarında, atom çekirdeği kavramının yeni ortaya çıktığı dönemde **Ernest Rutherford** ile yakın iş birliği yapmıştır. **1913 yılında**, atom modelini ortaya koymuş; bu modelde sabit durum kavramını ve belirli fiziksel büyüklüklerin kuantizasyonunu ilk kez sistematik olarak kullanmıştır. Bu yaklaşımla hidrojen atomunun enerji düzeylerini ve spektrumunun temel özelliklerini başarıyla açıklamış, böylece klasik fiziğin atomu açıklamakta yetersiz kaldığını ve kuantum ilkeleriyle tamamlanması gerektiğini göstermiştir.



Bohr, çalışmalarını yalnızca atom modeliyle sınırlamamış, daha sonra kuantum mekaniğinin yorumlanmasına da önemli kavramsal katkılar sağlamıştır. Özellikle, ışığın dalga ve parçacık özellikleri gibi bazı kuantum özelliklerinin birbirini tamamladığını ve bunların tek bir deneyde aynı anda tam olarak gözlenemeyeceğini ifade eden **tamamlayıcılık ilkesini** geliştirmiştir. **1922 yılında**, atomların yapısı ve yaydıkları ışınım üzerine yaptığı çalışmalar nedeniyle **Nobel Fizik Ödülü'**ne layık görülmüştür. Kopenhag'da kurduğu teorik fizik okulu, 20. yüzyılın ilk yarısında kuantum fiziğinin en önemli araştırma merkezlerinden biri hâline gelmiş ve birçok fizikçinin yetişmesine önemli katkı sağlamıştır.

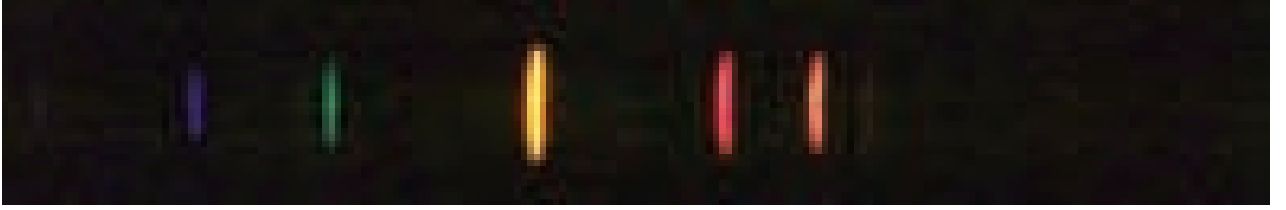
4.4. Atomların emisyon ve absorpsiyon spektrumları

Şekil 1'de Güneş ışığının spektrumu gösterilmektedir. Spektrumun büyük bir bölümü sürekli; görünür bölgedeki tüm dalga boylarını içerir. Bununla birlikte, spektrumun bazı bölgelerinde, özellikle kırmızı bölgede belirgin koyu çizgiler gözlenir. Bu çizgiler, Güneş atmosferindeki atomların belirli dalga boylarındaki ışığı soğurması sonucu oluşur.



Şekil 1. Güneş ışığının spektrumu(tayfı)

Bununla birlikte, bir gaz deşarj lambasındaki seyreltik gazın yaydığı ışık incelendiğinde, tamamen farklı bir spektrum elde edilir. Sürekli bir spektrum yerine, karanlık bir arka plan üzerinde yalnızca belirli dalga boylarında yer alan birkaç parlak çizgi gözlenir. Bu tür spektruma çizgi emisyon spektrumu denir (Şekil 2).



Şekil 2. Cıva buharlı lambanın emisyon spektrumu.(tayfı)

Spektrumlarda çizgilerin görülmesi, atomların yalnızca kesin olarak tanımlanmış dalga boylarında ışık yaydığını ve soğurduğunu(emdiğini) gösterir; bu da atomda ayırık enerji durumlarının varlığını doğrular. Bohr atom modeli, elektronun yalnızca belirli sabit enerji durumlarında bulunabileceğini öne sürerek bu olguyu açıklar.

Bohr'un ilk iki postulatı, hidrojen atomunun sabit durumlarının enerjilerini hesaplar. Bu durumlar, atomun yaydığı veya emdiği radyasyonla nasıl ilişkilidir? Niels Bohr, üçüncü postülasıyla bu konudaki fikri ortaya koymuştur.

Bohr'un üçüncü postulatı şöyledir: **Işının yayılması veya emilmesi, yalnızca elektronun bir sabit enerji durumundan diğerine geçiş yaptığı zaman gerçekleşir.** Bu postülatı göre, elektron keyfi miktarda enerji ememez veya yayamaz; bunu yalnızca **ayırık adımlarla**, yani elektronun bir sabit enerji durumundan diğerine geçişleriyle yapabilir. Sabit enerji durumlarına **enerji seviyeleri** de denir.

Yayılan veya soğurulan fotonun enerjisi ($E = hf$), elektronun geçiş yaptığı iki enerji seviyesi (E_n ve E_m) arasındaki enerji farkına eşittir:

$$hf = |E_n - E_m|.$$

Elektron, daha yüksek bir enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine geçiş yaparsa **bir foton yayılır**; daha düşük bir enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine geçiş yaparsa ise **bir foton emilir**. Fotonun frekansı, **geçiş frekansı olarak** adlandırılır ve yalnızca iki sabit enerji seviyesinin enerji farkı tarafından belirlenir.

Hidrojen benzeri atomlardaki enerji seviyeleri ayırık olduğundan, kuantum geçişleri sırasında yayılan veya emilen fotonların enerjilerinin de ayırık olduğu sonucu çıkar. Bu nedenle, hidrojen benzeri atomların spektrumu sürekli değildir; ayırık spektral çizgilerden oluşur. Elektronun daha yüksek bir enerji seviyesi n 'den daha düşük bir enerji seviyesi m 'ye ($n > m$) geçişi sırasında yayılan fotonun dalga boyu **Rydberg bağıntısıyla** belirlenir:

$$\frac{1}{\lambda_{n \rightarrow m}} = Z^2 R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

Burada R , hidrojen atomu için **Rydberg sabitini**, Zise hidrojen benzeri atomun çekirdeğindeki proton sayısını ifade eder. Hidrojen atomu için Rydberg sabitinin değeri $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ 'dir ve bu değer, Çözümlü Örnek 1'de gösterildiği gibi diğer temel fiziksel sabitler kullanılarak hesaplanır. Dalga boyu ile frekans arasındaki $\lambda f = c$ ilişkisi dikkate alındığında, elektronun bir sabit enerji durumundan diğerine geçişi sırasında yayılan fotonun frekansı için aşağıdaki bağıntı elde edilir

$$f_{n \rightarrow m} = Z^2 c R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Hidrojen benzeri bir atom için Rydberg formülünü türetin ve Rydberg sabitinin değerini belirleyin.

Çözüm:

Bohr modeline göre, hidrojen benzeri bir atomdaki sabit durumların enerjileri şunlardır:

$$E_n = -\frac{Z^2 m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}.$$

Elektronun daha yüksek bir enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine geçişi sırasında bir fotonun yayılması (yayılan fotonun frekansı) açısından ele alırsak, şu sonucu elde ederiz:

$$\begin{aligned} hf_{n \rightarrow m} &= E_n - E_m \\ hf_{n \rightarrow m} &= -\frac{Z^2 m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} - \left(-\frac{Z^2 m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{m^2} \right) \\ f_{n \rightarrow m} &= \frac{Z^2 m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \end{aligned}$$

Elektronun bir sabit durumdan diğerine geçişi sırasında yayılan fotonun frekansı ile dalga boyu arasındaki ilişkiyi ($\lambda f = c$) dikkate alırsak, şu sonucu elde ederiz:

$$\frac{1}{\lambda_{n \rightarrow m}} = \frac{Z^2 m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Parantezin önündeki ifade birkaç temel fiziksel sabit içerir. Bu ifadenin sayısal değeri, hidrojen atomu için Rydberg sabiti olarak adlandırılır ve değeri şöyledir:

$$R = \frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3 c} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}.$$

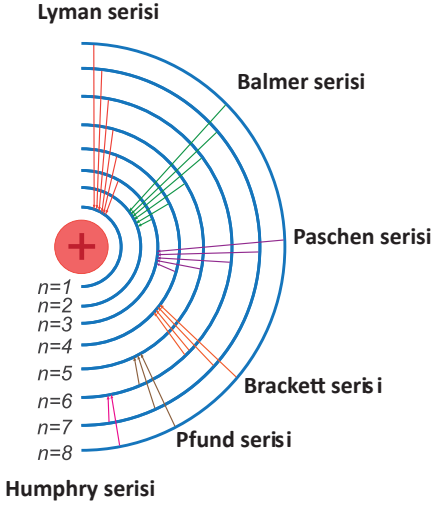
Şekil 3'te, hidrojen atomunun kararlı enerji düzeyleri ile elektronun bir kararlı enerji düzeyinden diğerine yaptığı kuantum geçişleri sonucunda oluşan spektral seriler şematik olarak gösterilmiştir.

Elektron, herhangi bir uyarılmış enerji düzeyinden temel enerji düzeyi olan $n=1$ düzeyine geçtiğinde **Lyman (Layman) spektral serisi** oluşur. Bu seriye ait çizgiler, spektrumun **morötesi (ultraviyole)** bölgesinde yer alır.

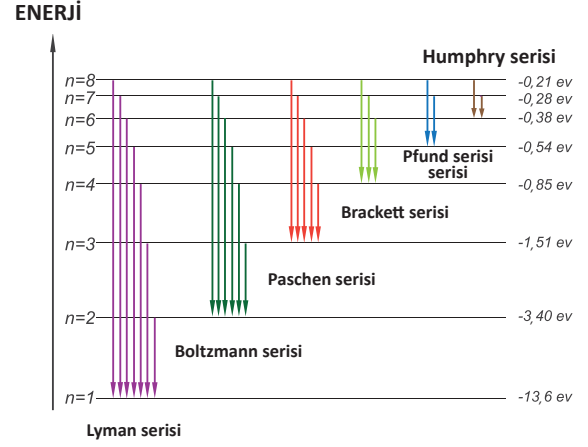
Elektronun $n=2$ enerji düzeyine geçişi sonucunda **Balmer serisi** oluşur. Bu seriye ait çizgiler, spektrumun **görünür bölgede(tayf)** bulunur.

Elektronun $n=3$ enerji düzeyine geçişleri **Paschen serisini** oluştururken, $n=4$, $n=5$ ve $n=6$ enerji düzeylerine yapılan geçişler sırasıyla Brackett, Pfund ve Humphreys serilerini oluşturur.

Bu son üç seri, spektrumun kızılötesi (infrared) bölgesine aittir.



Şekil 3. Hidrojen atomundaki sabit yörüngeler ve spektral seriler



Şekil 4. Hidrojen atomunun enerji seviyeleri ve spektral seriler

Sabit durumların enerjileri ve bu enerji düzeyleri arasındaki farklar incelendiğinde, her bir sonraki seride enerji düzeyleri arasındaki enerji farkı azaldığından, spektral çizgilerin enerjileri arasındaki farkların da giderek azaldığı gözlenir. Gözlenebilen ikinci bir özellik ise, aynı seri içinde spektral çizgilerin enerjileri arasındaki farkların giderek azalması, yani spektral çizgiler arasındaki aralıkların giderek daralmasıdır (Şekil 4 ve Çözümlü Örnek 2).



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Hidrojen atomunun ilk beş enerji seviyesinin enerjileri tabloda verilmiştir:

a) $m = 2, 3, 4, 5$ seviyelerinden temel durum $n = 1$ 'e geçişler sırasında yayılan fotonların enerjilerini belirleyin (Lyman serisi).

b) Fotonların enerjilerini karşılaştırın ve nasıl değiştiğine dair yorum yapın.

n	E_n (eV)
1	-13,6
2	-3,40
3	-1,51
4	-0,85
5	-0,54

Verilen:

$$E_n, \quad n = 1, 2, 3, 4, 5$$

İstenen:

- a) $\Delta E_{2 \rightarrow 1} - ?$, $\Delta E_{3 \rightarrow 1} - ?$,
 $\Delta E_{4 \rightarrow 1} - ?$, $\Delta E_{5 \rightarrow 1} - ?$,
 b) yayılan fotonların enerjilerinin karşılaştırılması.

Çözüm:

Yayılan fotonun enerjisi, iki seviyenin enerji farkına eşittir:
 $\Delta E_{m \rightarrow 1} = E_m - E_1$.

$$2 \rightarrow 1 \text{ atlaması: } \Delta E_{2 \rightarrow 1} = E_2 - E_1 = 10,2 \text{ eV.}$$

$$\text{Geçiş: } 3 \rightarrow 1: \Delta E_{3 \rightarrow 1} = E_3 - E_1 = 12,09 \text{ eV.}$$

$$\text{Geçiş: } 4 \rightarrow 1: \Delta E_{4 \rightarrow 1} = E_4 - E_1 = 12,75 \text{ eV.}$$

$$\text{Geçiş: } 5 \rightarrow 1: \Delta E_{5 \rightarrow 1} = E_5 - E_1 = 13,06 \text{ eV.}$$

Geçiş, daha yüksek bir enerji düzeyinden ($m > 1$) $n = 1$ enerji düzeyine gerçekleştiğinde, yayılan fotonun enerjisi daha büyük olur.

Ancak, yayılan fotonların enerjileri arasındaki farkın giderek azaldığı görülür:

$$\Delta E_{3 \rightarrow 1} - \Delta E_{2 \rightarrow 1} = 12,09 - 10,2 = 1,89 \text{ eV},$$

$$\Delta E_{4 \rightarrow 1} - \Delta E_{3 \rightarrow 1} = 12,75 - 12,09 = 0,66 \text{ eV},$$

$$\Delta E_{5 \rightarrow 1} - \Delta E_{4 \rightarrow 1} = 13,06 - 12,75 = 0,31 \text{ eV}.$$

Böylece, serideki spektral çizgiler giderek birbirine yaklaşır; yani m arttıkça fotonların enerjileri arasındaki fark azalır.

Ayrıca m arttıkça $\Delta E_{m \rightarrow 1}$ değerlerinin **13,6 eV** değerine yaklaştığı görülür. Bu değer, hidrojen atomunda bir elektron geçişi sırasında yayılan fotonun ulaşabileceği **en büyük enerjidir**. Aynı zamanda, serbest bir elektronun temel durumdaki hidrojen atomuna bağlanırken yaydığı enerjiye eşittir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Bir elementin atomundaki bir elektron, beşinci enerji seviyesinden ikinci seviyeye geçişte 530 nm dalga boyuna sahip bir foton yayar ve altıncı seviyeden ikinci seviyeye geçişte 420 nm dalga boyuna sahip bir foton yayar. Elektron, altıncı seviyeden beşinci seviyeye geçiş yaptığında yayılan fotonun dalga boyunu bulunuz.

Verilen:

$$\lambda_{5 \rightarrow 2} = 530 \text{ nm},$$

$$\lambda_{6 \rightarrow 2} = 420 \text{ nm}$$

İstenen:

$$\lambda_{6 \rightarrow 5} - ?$$

Çözüm:

Elektron, daha yüksek bir enerji düzeyinden daha düşük bir enerji düzeyine geçtiğinde, $E = \frac{hc}{\lambda}$ enerjisine sahip bir foton yayılır. Bu nedenle, verilen geçişler için aşağıdaki ifadeler yazılabilir: $\frac{hc}{\lambda_{5 \rightarrow 2}} = E_5 - E_2$, $\frac{hc}{\lambda_{6 \rightarrow 2}} = E_6 - E_2$. Birinci denklemi ikinci denklemden çıkarırsak, ortak olan E_2 enerji düzeyi elimine edilir

$$\frac{hc}{\lambda_{6 \rightarrow 2}} - \frac{hc}{\lambda_{5 \rightarrow 2}} = (E_6 - E_2) - (E_5 - E_2) \Rightarrow \frac{hc}{\lambda_{6 \rightarrow 2}} - \frac{hc}{\lambda_{5 \rightarrow 2}} = E_6 - E_5$$

Ancak $E_6 - E_5$ tam olarak elektronun $6 \rightarrow 5$ geçişi sırasında yayılan fotonun enerjisidir: $\frac{hc}{\lambda_{6 \rightarrow 5}} = E_6 - E_5$. Buna göre, $\frac{hc}{\lambda_{6 \rightarrow 5}} = \frac{hc}{\lambda_{6 \rightarrow 2}} - \frac{hc}{\lambda_{5 \rightarrow 2}}$. hc sadeleştirildiğinde elde edilir:

$$\frac{1}{\lambda_{6 \rightarrow 5}} = \frac{1}{\lambda_{6 \rightarrow 2}} - \frac{1}{\lambda_{5 \rightarrow 2}} \Rightarrow \lambda_{6 \rightarrow 5} = \frac{\lambda_{6 \rightarrow 2} \cdot \lambda_{5 \rightarrow 2}}{\lambda_{5 \rightarrow 2} - \lambda_{6 \rightarrow 2}} = 2024 \text{ nm}.$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 4.

Bir yıldızın spektrumunda, dalga boyu hidrojen spektrumundaki karşılık gelen çizgilerin dalga boyundan dört kat daha kısa olan spektral çizgiler gözlemlenmiştir. Bu çizgilerin hangi elemente (hidrojen benzeri bir atoma) ait olduğunu belirleyin.

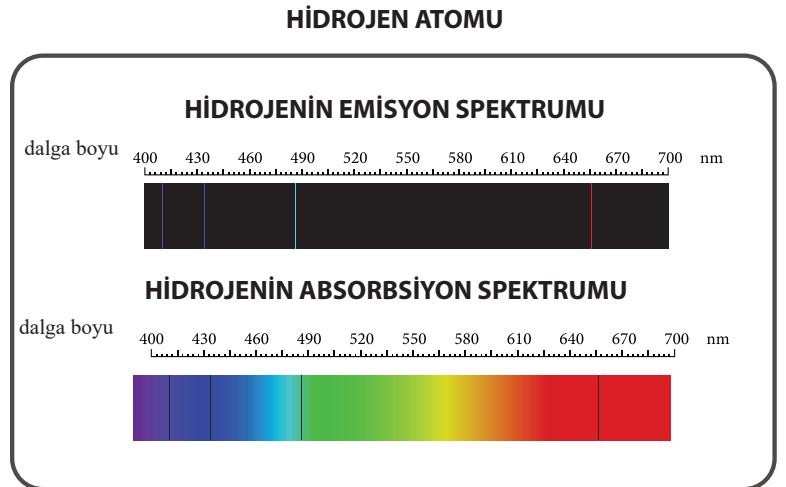
İstenen:	Çözüm:
$Z_x - ?$	Hidrojen için ($Z = 1$) Rydberg formülü şu şekildedir: $\frac{1}{\lambda_{H,n \rightarrow m}} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$. Hidrojen benzeri atomlar için Rydberg formülü aşağıdaki biçimi alır: $\frac{1}{\lambda_{X,n \rightarrow m}} = Z_x^2 R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ Denklemleri birbirine böldüğümüzde, parantez içindeki ortak terim sadeleşir: $\frac{1/\lambda_x}{1/\lambda_H} = Z_x^2 \Rightarrow \frac{\lambda_H}{\lambda_x} = Z_x^2$ $\lambda_x = \lambda_H / 4$ olduğundan, $\frac{\lambda_H}{\lambda_H / 4} = 4 = Z_x^2 \Rightarrow Z_x = 2$ Buna göre, spektral çizgiler tek elektronlu iyonlaşmış helyum atomundan (He^+) kaynaklanmaktadır.

Atomların emisyon ve absorpsiyon spektrumları

Atomların ayırık spektrumlarındaki çizgilerin, elektronların enerji seviyeleri arasındaki kuantum geçişlerinden kaynaklandığı anlaşıldığında, atomik spektrumların iki temel türünü tanımlamak kolaydır: emisyon spektrumu ve absorpsiyon spektrumu.

Emisyon spektrumu, uyarılmış atomlarda elektronların daha yüksek enerji seviyelerinden daha düşük enerji seviyelerine geçişi sırasında oluşur. Örneğin, seyreltik bir hidrojen gazı elektrik deşarjı yoluyla uyarılırsa, atomlar enerji kazanır ve elektronlar daha yüksek enerji seviyelerine geçer. Elektronlar daha düşük enerji seviyelerine geri döndüklerinde, kesin olarak belirlenmiş bir frekansta fotonlar yayılır. Sonuç olarak, spektrumda karanlık bir arka plan üzerinde **parlak çizgiler** gözlemlenir; her bir çizgi, iki enerji seviyesi arasındaki bir elektron geçişine karşılık gelir (Şekil 2). Hidrojen atomunda, spektrumun görünür kısmında, spektroskopla yalnızca Balmer serisinin geçişleri gözlemlenebilir; çünkü diğer serilerin fotonları spektrumun ultraviyole veya kızılötesi kısmına aittir. Hidrojenin görünür bölgedeki emisyon spektrumu Şekil 5'te (yukarıda) gösterilmiştir.

Ters bir durumda, yani sürekli bir spektruma sahip ışık seyreltik bir gazdan geçtiğinde **bir absorpsiyon (emilim) spektrumu** oluşur. Bu durumda atomlar, yalnızca enerjisi daha düşük bir enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine gerçekleşmesine izin verilen kuantum geçişine tam olarak karşılık gelen fotonları soğurabilir. Gazdan çıkan ışıkta bu emilen fotonlar bulunmadığından, spektrumda parlak, sürekli bir arka plan üzerinde **koyu çizgiler** oluşur (Şekil 1).

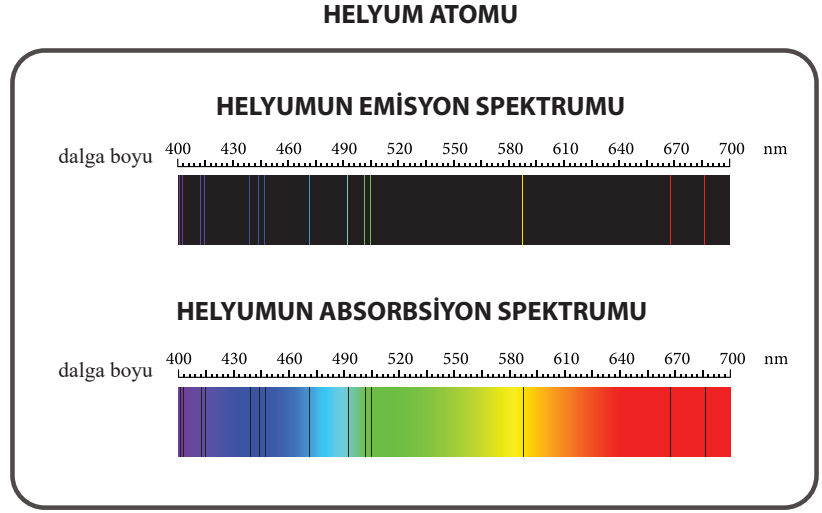


Şekil 5. Hidrojenin emisyon spektrumu (üstte) ve hidrojenin absorpsiyon spektrumu (altta).

Absorpsiyon spektrumundaki koyu çizgilerin konumları, aynı elementin emisyon spektrumundaki parlak çizgilerin konumlarıyla tam olarak örtüşür. Bunun nedeni, her iki durumda da enerji seviyeleri arasındaki aynı enerji farklarının söz konusu olmasıdır. Hidrojenin görünür bölgedeki absorpsiyon spektrumu Şekil 5'te (aşağıda) gösterilmiştir.

Emisyon ve absorpsiyon spektrumlarının analizi, atomda ayrık enerji durumlarının varlığı ve enerjinin emisyonu ile absorpsiyonunun (**yayılması ile soğurulmasının**) kuantum doğası hakkında doğrudan deneysel kanıt sağlar. Hidrojen spektrumu, en basit atomun spektrumu olması nedeniyle özel bir öneme sahiptir. Bu durumda, teorik model ile deneysel sonuçlar arasında açık bir ilişki vardır: elektronun ayrık enerji seviyeleri, ayrık kuantum geçişlerine yol açar; bu geçişler de yayılan veya soğurulan fotonların belirli frekans ve dalga boylarına sahip olmasını sağlar.

Şekil 6 da helyum atomunun emisyon ve absorpsiyon spektrumları gösterilmektedir. Hidrojenden farklı olarak, helyum atomunun elektron kabuğunda iki elektron bulunur ve bu elektronlar, çekirdekle etkileşime girmenin yanı sıra birbirleriyle de etkileşime girerler. Bu nedenle, Bohr modeli helyumda gözlemlenen daha fazla sayıda spektral çizgiyi tam olarak açıklayamaz; bu da bu modelin sınırlarını ve daha gelişmiş atom teorilerine duyulan ihtiyacı gösterir.



Şekil 6. Helyumun emisyon spektrumu (üstte) ve helyumun absorpsiyon spektrumu (altta)



DAHA FAZLA ÖĞREN

Yıldız ışığının spektral analizi

Yıldız ışınının spektral analizi, yıldızın ışığını bir prizmadan geçirerek spektrumunu elde etmek suretiyle gerçekleştirilir. Ortaya çıkan spektrumda, siyah cisim ışınımına benzer sürekli bir bölge ve yıldızın dış katmanlarındaki atomlar ile iyonların kesin olarak tanımlanmış dalga boylarındaki ışığı soğurması sonucu oluşan absorpsiyon çizgileri (koyu çizgiler) en sık gözlemlenir; bu durum Şekil 1'deki spektruma benzerdir.

Bu çizgilerin konumu ve şekli, laboratuvar koşullarında elde edilen spektrumlarla karşılaştırılarak, yıldızda hangi kimyasal elementlerin bulunduğu ve bunların iyonlaşma durumları belirlenebilir.

Spektral analiz, başka önemli bilgiler de sağlayabilir. Sürekli spektrumun şekli ve maksimum noktasının konumundan, yıldızın yüzey sıcaklığı (Wien yasası aracılığıyla) belirlenebilir. Spektral çizgilerin yoğunluğu ve genişliğinden, yıldızın atmosferindeki yoğunluk ve basınç tahmin edilebilir. Spektral çizgiler Doppler etkisi nedeniyle spektrumun kırmızı veya mavi ucuna doğru kaymışsa, yıldızın Dünya'dan uzaklaşma veya Dünya'ya yaklaşma hızı belirlenebilir. Ayrıca, spektral çizgilerin ayrışmasından yıldızın manyetik alanı hakkında da bilgi elde edilebilir.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Bohr atom modeli, tek kez iyonlaşmış helyum atomunun spektrumunu neden açıklayabilirken, helyum atomunun spektrumunu açıklayamaz?
2. Şekil 4'ü kullanarak, elektronun ikinci enerji seviyesine geçişi sırasında yayılan fotonların dalga boylarını, yani Balmer serisinin spektral çizgilerinin dalga boylarını belirleyin. Elde ettiğiniz değerler, Şekil 5'teki hidrojen emisyon spektrumundaki spektral çizgilerin dalga boylarına eşit mi? Farklılıklar varsa, bunların neden oluştuğunu açıklayın.
3. Elektron, m . yörüngeden $n = 2$ yörüngesine geçerken 487 nm dalga boyuna sahip bir foton yaymaktadır. Buna göre, m . yörüngenin yarıçapını hesaplayınız.
(Çözüm: 0,847 nm)
4. Hidrojen atomunun Balmer serisindeki ilk iki çizginin dalga boyları arasındaki fark 170 nm'dir. Rydberg sabitini hesaplayınız. (Çözüm: $1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$)
5. Hidrojen benzeri bir atomun spektrumunda dalga boyu 108,5 nm olan bir çizgi gözlenmektedir. Bu çizginin Balmer serisinin üçüncü çizgisi olduğu bilindiğine göre: a) Elektronun temel enerji düzeyindeki bağlanma enerjisini hesaplayınız. b) Atomun hangi elemente ait olduğunu belirleyiniz.
(Çözüm: 54,4 eV)

4.5. Röntgen ışınları ve uygulamaları

XIX yüzyılın sonlarına doğru, seyrek gazlardaki elektrik deşarjları ve vakum tüplerinde meydana gelen olaylar üzerine yapılan araştırmalar sırasında, **1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen**, o zamana kadar bilinen morötesi (ultraviyole), görünür ve kızılötesi ışınımına ait olmayan yeni bir ışınım türü keşfetti. Röntgen, katottan yayılan elektronların büyük bir potansiyel farkının etkisiyle anoda doğru hızlandırıldığı bir vakum diodunun yakınında, uygun bir maddeyle kaplanmış bir ekranda ışıldama meydana geldiğini gözlemledi.

Bu olay, **lümİnesans** olarak adlandırılan ve malzemenin yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmadan ışık yayması olgusundan kaynaklanır. Başka bir deyişle, ışık; elektronların UV ışığı, elektrik akımı, kimyasal tepkime, sürtünme gibi etkenlerle uyarılması sonucunda oluşur. Röntgen'in gözlemlediği lümİnesans türü **floresanstır**. Floresan olayında madde, yalnızca ışınımına maruz kaldığı sürece ışık yayar ve ışınım sona erdiğinde ışık yayması hemen durur. Özellikle dikkat çekici olan, floresansın vakum tüpü opak bir maddeyle kapatıldığında da meydana gelmesiydi. Bu durum, o zamana kadar bilinmeyen bir ışınımın varlığına işaret ediyordu. Bu nedenle Röntgen, bu ışınları **X** harfiyle gösterdi. Daha sonra bu ışınlar **X ışınları** olarak adlandırıldı ve günümüzde **Röntgen ışınları** olarak da bilinmektedir.

İlk deneyler, **Röntgen ışınlarının** büyük bir nüfuz etme gücüne sahip olduğunu göstermiştir. Bu ışınlar; kâğıt, ahşap ve yumuşak dokulardan geçebilir, ancak daha yoğun maddelerden geçerken şiddetleri daha fazla azalır. Ayrıca floresansa neden olur, fotoğraf plakalarını etkiler ve gazları iyonlaştırır. Bu özellikleri sayesinde tespit edilmeleri ve ölçülmeleri mümkündür. Daha sonraki araştırmalar, Röntgen ışınlarının **0,01 nm ile 10 nm** arasında çok kısa dalga boyuna ve yüksek foton enerjisine sahip elektromanyetik ışınım olduğunu ortaya koymuştur. Röntgen ışınları, elektrik ve manyetik alanlarda ilk yayılma doğrultularından sapmaz.

Röntgen ışınlarının maddeyle etkileşimi, görünür ışığa göre daha belirgindir; çünkü Röntgen fotonlarının enerjisi, malzemedeki atomları iyonlaştırmaya yetecek kadar büyüktür. Bu nedenle, Röntgen ışınları iyonlaştırıcı ışınım grubuna girer. Röntgen ışınlarının en önemli pratik özelliği, nüfuz etme gücüdür.

Bu özellik, ışınların enerjisine ve malzemenin özelliklerine bağlıdır.

Yoğunluğu ve atom numarası daha büyük olan maddeler, Röntgen ışınlarını daha güçlü soğurur. Bu nedenle Röntgen ışınları yumuşak dokulardan daha kolay geçerken, kemikler ve metaller tarafından daha fazla soğurulur. Soğurmadaki bu farklılık, röntgen görüntüsünün oluşmasının temelini oluşturur. Bu nedenle, röntgen görüntüsünde kemikler yumuşak dokulara göre daha açık (daha parlak) görünür (Şekil 1).

Röntgen ışınları bir maddeden geçerken, maddeyi oluşturan taneciklerle etkileşimleri nedeniyle ışının şiddeti azalır. Bu sırada iki temel olay meydana gelebilir: soğurma ve saçılma. Soğurma, Röntgen ışınlarının enerjisinin maddedeki taneciklere aktarılması olayıdır. Bu süreçte Röntgen fotonlarının bir kısmı demetten tamamen kaybolur. Saçılma olayında ise Röntgen fotonları soğurulmaz; ancak yayılma doğrultuları değişir ve enerjileri azalır. Her iki süreç de, maddeden geçtikten sonra ilk yayılma doğrultusunda ilerlemeye devam eden Röntgen demetinin şiddetinin azalmasına neden olur. Bu nedenle, soğurucunun arkasında ölçülen ışın şiddetindeki azalma, ilk yayılma doğrultusunda ilerlemeye devam eden foton sayısının azalması anlamına gelir.

Deneyisel olarak, homojen bir madde ve tek enerjili Röntgen ışınları (aynı enerjiye veya aynı dalga boyuna sahip Röntgen ışınları) için ışın şiddetindeki azalmanın üstel bir yasaya uyduğu belirlenmiştir. Buna göre, I_0 ışınımının maddeye girmeden önceki şiddeti, I ise kalınlığı x olan bir tabakadan geçtikten sonraki şiddeti olmak üzere, aşağıdaki bağıntı geçerlidir:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Burada μ , birimi m^{-1} olan **soğurma(emilim) katsayısını** ifade eder. Bu katsayı, Röntgen ışınlarının geçtiği malzemenin özelliklerine (yoğunluğu ve bileşimi) ile Röntgen ışınlarının enerjisine bağlıdır. Üstel bağıntı, malzemenin kalınlığı her eşit miktarda arttığında ışın şiddetinin aynı miktarda değil, kalan şiddetin aynı oranı kadar azaldığını gösterir. Bu nedenle, Röntgen ışını demetini tamamen durduran belirli bir malzeme kalınlığından söz edilemez. Işın demetinin zayıflamasını ifade etmek için uygulamada en yaygın olarak yarı soğurma kalınlığı ($x_{1/2}$) kullanılır. Yarı soğurma kalınlığı, ışın demetinin şiddetini başlangıç değerinin yarısına düşüren malzeme kalınlığı olarak tanımlanır:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2}.$$

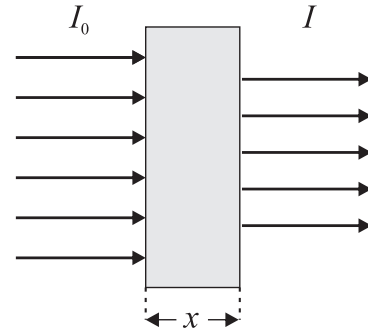
Bu eşitlik, yarı soğurma kalınlığına ilişkin ilk denklemde yerine konulduğunda, aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$\frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}}, \text{ односно } x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu}.$$

Yarı soğurma kalınlığının bilinmesi yararlıdır çünkü malzemelerin hızlı bir şekilde karşılaştırılmasına olanak tanır: Büyük bir soğurma katsayısına sahip bir malzeme, küçük bir yarı soğurma kalınlığına sahiptir, bu da Röntgen ışınlarını güçlü bir şekilde soğurduğu anlamına gelir; küçük bir katsayıya sahip bir malzeme ise büyük bir yarı soğurma kalınlığına sahiptir ve Röntgen ışınlarına karşı nispeten "saydamdır".



Şekil 1. Elin röntgen görüntüsü. Röntgen ışınlarını daha fazla soğuran kemikler görüntüde açık (parlak) olarak görülmektedir.



Şekil 2. Kalınlığı x olan bir maddeden Röntgen ışını demetinin geçişi

Soğurma katsayısı μ ile ifade edilen farklı maddelerin Röntgen ışınlarını farklı oranlarda soğurması, hem Röntgen ışınlarının uygulamalarının hem de bunlara karşı korunmanın temelini oluşturur. Tıbbi görüntülemede kemikler ile yumuşak dokular arasındaki kontrast, bu dokuların Röntgen ışınlarını farklı oranlarda zayıflatmasından kaynaklanır. Endüstride ise aynı özellik, metallerdeki kusurların belirlenmesi ve malzemelerin kalite kontrolünün yapılması amacıyla kullanılır. Bununla birlikte, Röntgen ışınlarının iyonlaştırıcı etkisi nedeniyle gerekli koruyucu önlemler alınmalıdır. Bu amaçla, atom numarası büyük olan maddeler (örneğin kurşun) etkili soğurucular olarak kullanılır.

Bir sonraki bölümde, Röntgen ışınlarının Röntgen tüpünde nasıl üretildiğini ve spektrumlarının sürekli ve karakteristik olmak üzere iki bileşenden oluştuğunu inceleyeceğiz. Bu inceleme, atomun iç yapısı hakkında da ek bilgiler sağlayacaktır.

Röntgen ışınlarının elde edilmesi

Röntgen ışınları, Röntgen tüpü adı verilen bir aygıtta üretilir (Şekil 4). Röntgen tüpü, **içinde katot ve anot olmak** üzere iki elektrot bulunan bir vakum tüpüdür. Katot, ısıtıldığında elektron yayan metal bir elektrottur. Bu olaya **termoelektronik emisyon** denir. Anot ise atom numarası büyük ve erime noktası yüksek bir metalden (genellikle tungsten) yapılmış bir hedef içerir. Katot ile anot arasına yüksek bir potansiyel farkı (gerilim) uygulanır. Bunun sonucunda elektronlar anoda doğru hızlanır. Elektronun yükü e olduğundan, U potansiyel farkı boyunca hareket ederken kazandığı kinetik enerji şu bağıntıyla verilir:

$$E_k = eU.$$

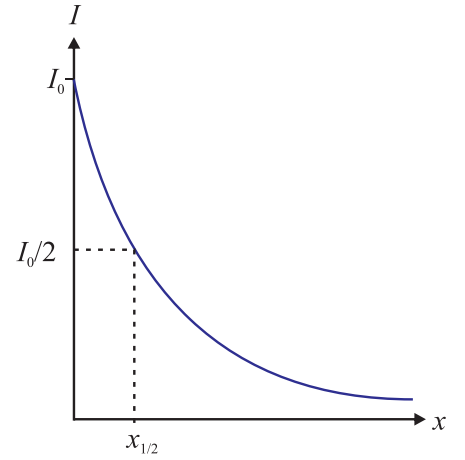
Vakum ortamı sayesinde elektronlar, katot ile anot arasında bulunan taneciklerle çarpışmadan anoda ulaşır. Elektronların hedefe çarpması sırasında iki olay gerçekleşir:

- Elektronların kinetik enerjisinin büyük bir kısmı ısı enerjisine dönüşür.
- Kinetik enerjinin küçük bir kısmı ise Röntgen ışınlarına dönüşür.

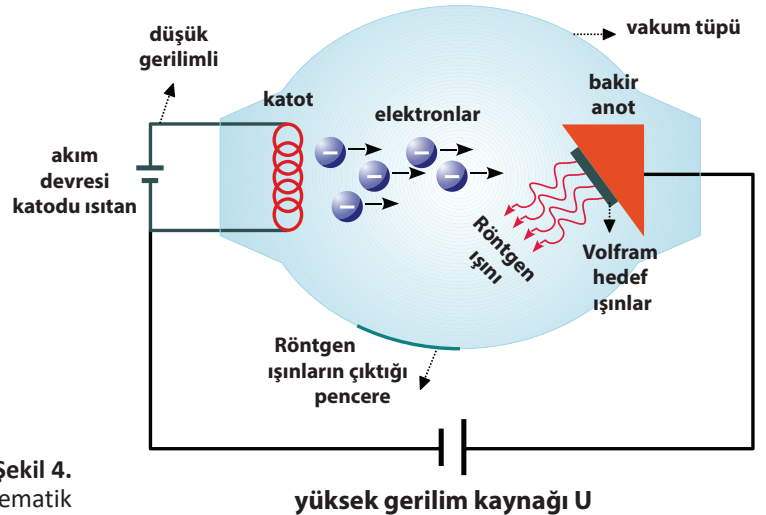
Anotta oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle, anotun etkili bir soğutma sistemine sahip olması gerekir.

Frenleme Röntgen ışınımı (sürekli tayf)

Klasik fiziğe göre, hızı değişen yüklü bir parçacık elektromanyetik ışınım yayar. Bu genel ilke, Röntgen tüpünde de geçerlidir. Büyük kinetik enerjiye sahip elektronlar, anottaki metal hedefe çarptıklarında, hedef atomlarının çekirdeklerinin oluşturduğu elektrik alanının etkisiyle hızlarını ve hareket doğrultularını aniden değiştirir. Bir elektron, pozitif yüklü bir atom çekirdeğinin yakınından geçerken ilk



Şekil 3. Röntgen ışını şiddetinin bir maddeden geçerken üstel olarak azalması ve yarı soğurma kalınlığının gösterimi



Şekil 4. Röntgen tüpünün şematik gösterimi vegen ışınlarının elde edilmesi.

hareket doğrultusundan sapar ve hızı azalır. Bu sırada kinetik enerjisinin bir kısmı Röntgen fotonunun enerjisine dönüşür.

Elektronların ani olarak yavaşlaması sonucu Röntgen ışınlarının oluşmasına **frenleme ışınımı** denir (Şekil 5).

Elektronlar, atom çekirdeklerinin yakınından farklı uzaklıklarda geçtikleri için kinetik enerjilerinin farklı miktarlarını kaybederler. Bu nedenle, yayılan fotonların enerjileri de farklıdır ve frenleme Röntgen ışınımı sürekli bir spektruma sahiptir.

En yüksek enerjili fotonlar, elektronun hedefe çarpması sırasında tüm kinetik enerjisini tek bir olayda aktardığı sınır durumunda oluşur. Bu durumda elektronun tüm kinetik enerjisi, tek bir fotonun enerjisine dönüşür.

Elektronun kinetik enerjisi, U potansiyel farkı boyunca hareketi sırasında kazandığı enerjiden kaynaklandığı için eU 'ya eşittir. Bu sınır durumunda aşağıdaki bağıntı geçerlidir

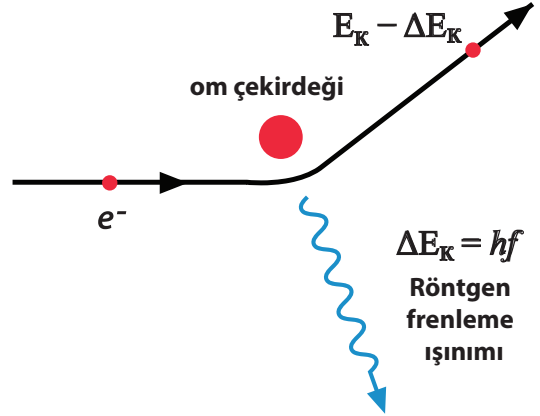
$$\frac{hc}{\lambda_{\min}} = eU,$$

bundan şu sonuç çıkar:

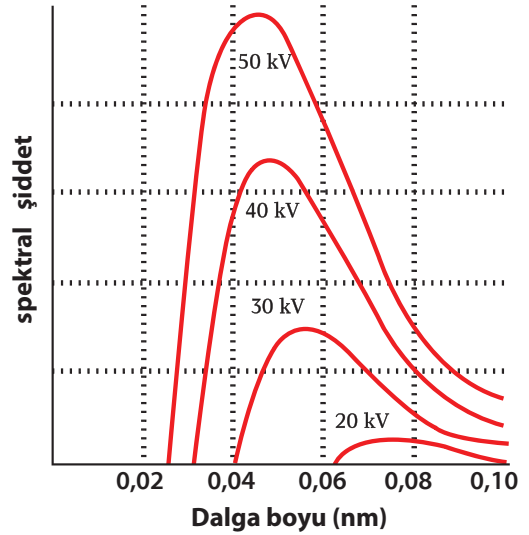
$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}.$$

Bu bağıntı, sürekli spektrumdaki Röntgen fotonlarının en küçük dalga boyunun (başka bir deyişle en büyük enerjisinin) yalnızca Röntgen tüpüne uygulanan gerilime bağlı olduğunu gösterir. Gerilim arttıkça, daha yüksek enerjili ve nüfuz etme gücü daha büyük olan fotonlar elde edilir.

$\lambda_{\min}$ değerinin spektrumun kesin alt sınırını temsil ettiği unutulmamalıdır. $\lambda_{\min}$ 'den daha küçük dalga boylarına sahip Röntgen ışınları bu yöntemle üretilemez. Gerçek bir Röntgen tüpünde ise elektronların büyük bölümü enerjilerini birden fazla atom çekirdeğiyle etkileşerek kademeli olarak kaybeder. Bu nedenle, sürekli spektrumun en şiddetli bölgesi daha büyük dalga boylarında yer alır (Şekil 6).



Şekil 5. Bir elektronun atom çekirdeğinin yakınından geçerken Röntgen fotonu yayması.



Şekil 6. Katot ile anot arasına uygulanan farklı gerilimlerde elde edilen sürekli Röntgen ışını spektrumları



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Bir Röntgen tüpünde, minimum dalga boyu 72,0 pm olan Röntgen ışınları elde edilebilmesi için katot ile anot arasına uygulanması gereken en küçük hızlandırma gerilimini hesaplayınız.

Verilenler:

$$\lambda_{\min} = 72 \cdot 10^{-12} \text{ m}, e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C},$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}, c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

İstenen:

$$U - ?$$

Çözüm:

Minimum dalga boyu, elektronun tüm kinetik enerjisinin tek bir Röntgen fotonunun enerjisine dönüştüğü sınır duruma karşılık gelir. Bu durumda aşağıdaki bağıntı geçerlidir:

$$\frac{hc}{\lambda_{\min}} = eU \Rightarrow U = \frac{hc}{e\lambda_{\min}} = 1,72 \cdot 10^4 \text{ V} = 17,2 \text{ kV}.$$

Karakteristik Röntgen ışıması (çizgi spektrumu)

Röntgen tüpünde hızlandırılan elektronlar anoda çarptığında, frenleme ışımasının yanı sıra karakteristik Röntgen ışıması da oluşur. Sürekli spektruma sahip olan frenleme ışımasından farklı olarak, karakteristik Röntgen ışıması belirli dalga boylarına sahip keskin spektral çizgilerden oluşur (Şekil 7).

Bu spektral çizgiler, anodun yapıldığı elemente özgüdür ve o elementin atomunun iç yapısından kaynaklanır. Bu nedenle karakteristik Röntgen ışıması, her kimyasal element için kendine özgü bir "parmak izi" niteliği taşır.

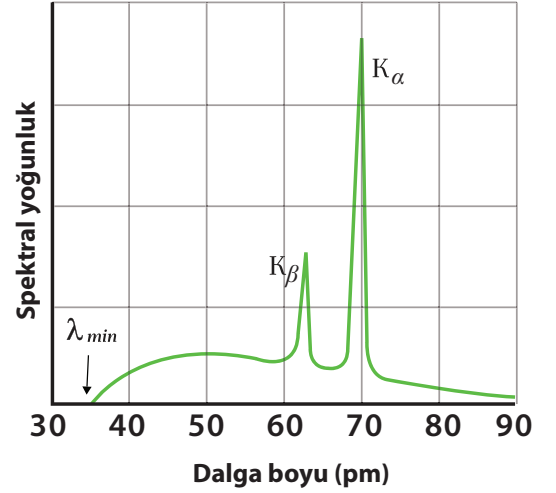
Karakteristik Röntgen ışıması, anotdaki hedef madde-nin atomlarının iyonlaşması sonucu oluşur. Yüksek enerjili elektronlar, atomun iç elektron kabuklarından bir elektronu kopararak atomda bir boşluk oluşturabilir. Bu durum atomun uyarılmış duruma geçmesine neden olur. Daha sonra, daha yüksek bir enerji düzeyindeki elektronlardan biri bu boşluğu doldurmak üzere daha düşük enerji düzeyine geçer.

Önceki derslerde, hidrojen atomunda olduğu gibi elektronun enerji düzeylerini ana kuantum sayısı $n = 1, 2, 3, \dots$ ile gösterdik. Çok elektronlu atomlarda ise aynı ana kuantum sayısına karşılık gelen birden fazla birbirine yakın enerji düzeyi bulunur. Bu enerji düzeyleri, elektron kabukları olarak adlandırılır. Fizikte bu kabuklar K, L, M, ... harfleriyle gösterilir. Buna göre K kabuğu en düşük enerji düzeyine, yani $n = 1$ e karşılık gelir. L kabuğu, ana kuantum sayısı $n = 2$ olan birbirine yakın enerji düzeylerinden; M kabuğu ise ana kuantum sayısı $n = 3$ olan birbirine yakın enerji düzeylerinden oluşur. Bu durum daha yüksek ana kuantum sayıları için de benzer şekilde devam eder. K kabuğunda bir boşluk oluştuğunda, daha yüksek bir elektron kabuğundan (örneğin L veya M kabuğundan) bir elektron K kabuğuna geçer. Bu geçiş sırasında, iki kabuk arasındaki enerji farkına eşit enerji açığa çıkar ve bir Röntgen fotonu olarak yayılır. Örneğin, L kabuğundan K kabuğuna gerçekleşen bir geçişte yayılan fotonun enerjisi, bu iki kabuk arasındaki enerji farkına eşittir:

$$\frac{hc}{\lambda_{L \rightarrow K}} = E_L - E_K.$$

İç elektron kabukları arasındaki enerji farkları büyük olduğundan, yayılan fotonların dalga boyları çok küçüktür. Bu nedenle bu fotonlar, Röntgen ışınları bölgesinde yer alır. Bu durum, atomun dış elektron kabukları arasındaki elektron geçişleri sonucunda oluşan optik spektrumlardan temel bir farklılıktır.

Karakteristik Röntgen ışımasının spektral çizgileri, Bohr atom modelindeki hidrojen spektral serilerine benzer şekilde, elektron geçişinin sonlandığı kabuğa göre seriler hâlinde gruplandırılır. Buna göre, K kabuğu-



Şekil 7. 35 kV anot-katot geriliminde molibden hedeften elde edilen sürekli ve karakteristik Röntgen ışıması

na yapılan geçişler **K serisini**, L kabuğuna yapılan geçişler ise **L serisini** oluşturur. Bir seri içindeki çizgiler, elektronun geçiş yaptığı başlangıç kabuğuna göre $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ harfleriyle gösterilir. Buna göre α , en yakın üst kabuktan gerçekleşen geçişi (L'den K'ya, M'den L'ye vb.), β ise bir sonraki kabuktan gerçekleşen geçişi (M'den K'ya, N'den L'ye vb.) ifade eder. Böylece $K_\alpha, K_\beta, L_\alpha, L_\beta$ gibi gösterimler elde edilir.

Karakteristik Röntgen ışınlamını oluşturan elektron geçişleri şematik olarak Şekil 8'de gösterilmiştir.

Belirli bir serinin (örneğin K serisinin) oluşabilmesi için, hızlandırılmış elektronların ilgili iç elektron kabuğundan (örneğin K kabuğundan) bir elektronu koparabilecek kadar büyük kinetik enerjiye sahip olması gerekir. Röntgen tüpüne uygulanan gerilim yeterince büyük değilse, bazı karakteristik spektral çizgiler oluşmaz. Karakteristik Röntgen ışınlamının dalga boyları yalnızca anot hedefinin yapıldığı elemente bağlıdır; Röntgen tüpüne uygulanan gerilime bağlı değildir.

Karakteristik Röntgen ışınlarının dalga boyları Moseley yasası kullanılarak hesaplanabilir. K kabuğu için ana kuantum sayısı $n = 1$, L kabuğu için ise $n = 2$ olduğundan, K_α çizgisinin dalga boyu aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

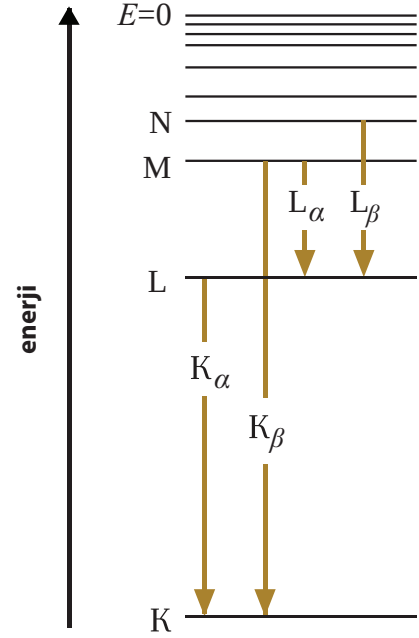
$$\frac{1}{\lambda_{K_\alpha}} = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right),$$

Burada R , Rydberg sabitidir. K_β çizgisi için ise şu bağıntı elde edilir:

$$\frac{1}{\lambda_{K_\beta}} = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2} \right).$$

Bu yasada merkezi bir yere sahip olan büyüklük, perdeleme sabiti σ 'dır. Bu sabitin fiziksel anlamı şudur: Geçiş katılan elektron, çekirdeğin $+Ze$ değerindeki toplam yükünü tam olarak hissetmez; çünkü bu yükün bir kısmı diğer elektronlar tarafından perdelenir. Perdeleme, incelenen seriye bağlıdır. K serisinde perdeleme nispeten küçüktür ($\sigma \approx 1$); çünkü bu seri, çekirdeğe en yakın olan birinci elektron kabuğuyla ilgilidir. L serisinde ise K kabuğundaki elektronların çekirdek yükünü kısmen perdelemesi nedeniyle perdeleme daha büyüktü ($\sigma \approx 7,5$).

Karakteristik Röntgen ışınlamı, atomun kuantum yapısının ve iç elektron kabuklarındaki ayrı enerji düzeylerinin doğrudan bir sonucudur. Bu nedenle, karakteristik Röntgen ışınlamının spektral çizgileri elementlerin tanımlanmasında ve maddelerin bileşiminin analiz edilmesinde güçlü bir yöntem olarak kullanılır. Aynı zamanda, atom yapısının kuantumlu ve ayrı olduğu güçlü bir deneysel kanıtını oluşturur.



Şekil 8. Elektronların daha yüksek enerji seviyelerinden daha düşük enerji seviyelerine geçişini ve bunun sonucunda karakteristik X ışını radyasyonunun oluşumunu gösteren şematik gösterim.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Gümüşün ($Z_{Ag} = 47$) ve molibdenin ($Z_{Mo} = 42$) K_α çizgilerine ait dalga boyları sırasıyla

$\lambda_{Ag} = 5,6348 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ ve $\lambda_{Mo} = 7,0939 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ olduğuna göre, Rydberg sabitini veya perdeleme sabitini bulunuz.

Verilenler: $Z_{\text{Ag}} = 47, Z_{\text{Mo}} = 42$ $\lambda_{\text{Ag}} = 7,0939 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ $\lambda_{\text{Mo}} = 5,6348 \cdot 10^{-11} \text{ m}$	Çözüm: Her iki metalde de karakteristik K_{α} ışınımı, L katmanından K katmanına, yani $n = 2$ düzeyinden $m = 1$ düzeyine gerçekleşen elektron geçişi sonucu oluşur. Buna göre, $\frac{1}{\lambda_{\text{Ag}}} = R(Z_{\text{Ag}} - \sigma)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = \frac{3}{4} R(Z_{\text{Ag}} - \sigma)^2,$ $\frac{1}{\lambda_{\text{Mo}}} = R(Z_{\text{Mo}} - \sigma)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = \frac{3}{4} R(Z_{\text{Mo}} - \sigma)^2.$ İki denklem birbirine bölündüğünde Rydberg sabiti sadeleşir. Böylece perdeleme sabiti $\text{için } \frac{\frac{1}{\lambda_{\text{Ag}}}}{\frac{1}{\lambda_{\text{Mo}}}} = \frac{\frac{3}{4} R(Z_{\text{Ag}} - \sigma)^2}{\frac{3}{4} R(Z_{\text{Mo}} - \sigma)^2} \Rightarrow \frac{\lambda_{\text{Mo}}}{\lambda_{\text{Ag}}} = \frac{(Z_{\text{Ag}} - \sigma)^2}{(Z_{\text{Mo}} - \sigma)^2} \Rightarrow \sigma = \frac{Z_{\text{Ag}} - \sqrt{\frac{\lambda_{\text{Mo}}}{\lambda_{\text{Ag}}}} Z_{\text{Mo}}}{1 - \sqrt{\frac{\lambda_{\text{Mo}}}{\lambda_{\text{Ag}}}}} = 1.$ Perdeleme sabitinin değeri ilk iki denklemden herhangi birinde yerine yazılarak Rydberg sabiti hesaplanabilir. $\text{Örneğin, } \frac{1}{\lambda_{\text{Ag}}} = \frac{3}{4} R(Z_{\text{Ag}} - \sigma)^2 \text{ olduğundan, } R = \frac{4}{3 \lambda_{\text{Ag}} (Z_{\text{Ag}} - \sigma)^2} = 1,12 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}.$
--	--

Elde edilen Rydberg sabiti, teorik olarak hesaplanan değerle aynı büyüklük mertebesinde; ancak tam olarak aynı değildir. Bu fark, özellikle ağır atomlarda elektron-elektron etkileşimlerinin daha karmaşık olması nedeniyle perdelemenin tam olarak sabit olmamasından kaynaklanır.

Röntgen-ışınlarının uygulaması ve koruma önlemleri

Röntgen ışınları, yüksek delme gücü ve çeşitli dokular tarafından farklı şekilde emilmeleri nedeniyle tıpta önemli uygulamalara sahiptir. Röntgen ışını görüntülemede kemikler, yumuşak dokulara göre Röntgen ışınlarını daha güçlü bir şekilde emer; bu nedenle görüntüde belirgin bir kontrast ortaya çıkar. Bu, kırıkların, akciğer hastalıklarının ve eklemlerdeki değişikliklerin tespit edilmesini sağlar. Geleneksel Röntgen ışını teşhis yöntemlerine ek olarak bilgisayarlı tomografi (BT) de kullanılmaktadır. Bu yöntemde bir dizi Röntgen ışını görüntüsü alınır ve bunlar bilgisayar ile işlenerek vücudun yüksek çözünürlüklü kesit görüntüleri elde edilir. Röntgen ışınları ayrıca diş hekimliğinde ve aletlerin konumunun izlenmesi gereken belirli tıbbi müdahaleler sırasında da kullanılır.

Endüstride Röntgen ışınları, malzemelerin tahribatsız muayenesi için kullanılır. Bu yöntemle, metal yapılarındaki ve kaynaklı birleşim yerlerindeki çatlaklar, boşluklar ve kusurlar, herhangi bir hasara yol açmadan tespit edilebilir. Benzer bir ilke, farklı emilim düzeyleri sayesinde cisimlerin tanınmasını sağlayan bagaj taraması gibi güvenlik sistemlerinde de uygulanır.

Röntgen ışınları iyonlaştırıcı radyasyon olduğundan, yüksek dozlarda veya sık maruz kalındığında zararlı biyolojik etkilere neden olabilirler. Dokulardaki iyonlaşma, bazı hücrelere ve deoksiribonükleik aside (DNA) zarar verebilir. Bu nedenle, Röntgen ışınları kullanılırken radyolojik korumanın temel kurallarına uyulur:

- Röntgen ışınlarına maruz kalma süresi mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır.
- Röntgen ışını kaynağından mümkün olduğunca uzak durulmalıdır.
- Uygun koruyucu önlemler alınmalıdır. Örneğin, perdeleme yöntemi kullanılır.

(Perdeleme, röntgen ışınlarını büyük ölçüde soğuran malzemelerin kullanılarak radyasyona maruziyetin azaltılmasıdır.) Bu amaçla kurşun veya özel koruyucu cam gibi malzemeler kullanılır. Tıpta ise sağlık çalışanları ile hastaların maruz kaldığı ışınımı azaltmak için kurşun bölmeler, koruyucu duvarlar ve kurşun önlükler kullanılır. Bu önlemler sayesinde Röntgen ışınlarının sağladığı yararlar oldukça büyüktür ve sağlık açısından oluşturduğu risk en düşük düzeye indirilir.



DAHA FAZLA ÖĞREN

Moseley Yasası

Karakteristik Röntgen tayfları üzerinde yapılan deneyler, önemli bir bağıntıyı ortaya koymuştur: Karakteristik Röntgen ışınlarının frekansı, elde edildikleri elementin atom numarasına (Z) bağlıdır. Bu bağıntı Moseley Yasası ile ifade edilir ve karakteristik tayf çizgileri için

$$f = A(Z - \sigma)^2,$$

şeklinde yazılır. Burada A , ait olunan seriye (örneğin K veya L serisi) bağlı bir sabit, σ ise perdeleme sabitidir.

Bu yasa, belirli bir seri için karakteristik tayf çizgisinin frekansının karekökünün atom numarasının doğrusal bir fonksiyonu olduğunu gösterir:

$$\sqrt{f} = \sqrt{A}(Z - \sigma)$$

Başka bir deyişle, bir karakteristik tayf çizgisinin (örneğin K_α çizgisinin) frekansı farklı elementler için ölçülüp $\sqrt{f}$ değerlerinin atom numarasına (Z) göre grafiği çizildiğinde, doğru bir grafik elde edilir.

Moseley Yasası, karakteristik Röntgen tayf çizgilerinin doğrudan atom numarasıyla ilişkili olduğunu göstermesi bakımından büyük önem taşır. Böylece atom numarasının (Z), çekirdeğin pozitif yükünün bir ölçüsü olduğu deneysel olarak doğrulanmıştır.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Röntgen ışınları elektromanyetik spektrumda nerede yer alır ve dalga boyları delme gücüyle nasıl ilişkilidir?
2. Röntgen ışınlarının yumuşak dokulardan neden daha kolay, kemiklerden ve metallerden ise neden daha zor geçtiğini açıklayın. Maddenin hangi özellikleri soğurmayı etkiler?
3. Bir Röntgen ışını demeti bir maddeden geçerken şiddeti nasıl azalır? Bu azalmaya hangi süreçler (soğurma ve saçılma) neden olur?
4. Röntgen ışınlarının geçtiği yol üzerine, kalınlığı 0,3 cm olan ve doğrusal soğurma katsayısı 52 cm^{-1} olan bir kurşun levha yerleştirilmiştir. Kurşun levha yerine doğrusal soğurma katsayısı $0,76 \text{ cm}^{-1}$ olan bir alüminyum levha kullanıldığında, Röntgen ışınlarının şiddetindeki azalma aynı kalacaksa alüminyum levhanın kalınlığı ne olmalıdır? (Çözüm: 20,5 cm)
5. Su tabakası 6 cm artırıldığında, Röntgen ışınlarının şiddeti dört kat azalır. Röntgen ışınları için suyun soğurma katsayısını bulun. (Çözüm: $0,23 \text{ cm}^{-1}$)
6. Röntgen tüpündeki hızlandırma potansiyel farkı 35 000 V ise, sürekli Röntgen ışınımının en küçük dalga boyunu hesaplayınız. (Çözüm: $3,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}$)
7. K_α çizgisi için perdeleme sabitinin 1 olduğu ve hidrojenin iyonlaşma enerjisinin 13,6 eV olduğu biliniyorsa, gümüş ($Z = 47$) için K_α çizgisinin dalga boyunu belirleyin. (Çözüm: $5,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}$)

4.6. Atom Çekirdeği ve Çekirdek Kuvvetleri

Atom çekirdeklerinin (nükleidlerin) yapısı ve özelliklerinin incelenmesi, 20. yüzyılın başından itibaren fiziğin ayrı bir dalı olarak gelişen **nükleer fiziğin** konusudur. Günümüzde her atomun bir atom çekirdeği ve bir elektron kabuğundan oluştuğunu biliyoruz. Çekirdek, atomun merkezinde yer alan, çok küçük ancak kütlesi büyük olan ve atomun kütlesinin neredeyse tamamının bulunduğu kısımdır. Protonlar ve nötronlar çekirdekte bulunur; bunlara birlikte **nükleon** denir. Protonlar $+e$ pozitif elektrik yüküne sahipken, nötronlar elektriksel olarak nötrdür. Bu nedenle, atom çekirdeği pozitif yüklüdür. Kabuktaki elektronlar negatif yüklüdür, dolayısıyla atomun bütünü elektriksel olarak nötrdür.

Atom numarası ve kütle numarası

Farklı atomların **çekirdeklerinin gösterimi** uluslararası olarak standartlaştırılmıştır ve aynı gösterim her yerde kullanılmaktadır.

Atom numarası (Z), atom çekirdeğindeki **proton sayısını** ifade eder. Atom numarasına **proton numarası** da denir. Ayrıca, elementi **Periyodik Sistem**'deki yerini belirlediği için **sıra numarası** olarak da adlandırılır.

Bir elementin hangi element olduğunu belirlemek için yalnızca **atom numarasının** bilinmesi yeterlidir. Örneğin, $Z = 6$ olan bütün atomlar **karbon**, $Z = 92$ olan bütün atomlar ise **uranyum** atomlarıdır. Tersine, element biliniyorsa, **Periyodik Sistem**'den atom numarası kolayca bulunabilir. Örneğin, oksijen için $Z = 8$, gümüş için ise $Z = 47$ 'dir.

Her protonun yükü, **pozitif işaretli bir elementer yüke** ($+e$) eşittir. Bu nedenle **çekirdeğin toplam elektrik yükü**:

$$Q = +Ze . \quad \text{şeklinde ifade edilir.}$$

Protonlara ek olarak, çekirdek aynı zamanda nötronlar da içerir. Bu nedenle, çekirdekteki toplam nükleon sayısını, yani proton ve nötronların toplamını ifade eden **kütle numarası** A kavramı ortaya çıkar::

$$A = Z + N ,$$

burada N , nötron sayısını ifade eder. Atom numarası ve kütle numarası biliniyorsa, nötron sayısı şu şekilde belirlenebilir

$$N = A - Z .$$

Atom çekirdeği için kullanılan gösterim ile **atomun kimyasal sembolü** arasında ayırım yapmak önemlidir. Kimya alanında elementler, kabuktaki elektron sayısı genellikle önemli olduğu için çoğunlukla sadece kimyasal sembolleri X ile gösterilir (örn. H, Na, O, U). Elektriksel olarak nötr bir atomda elektron sayısı, proton sayısına, yani atom numarasına eşittir.

Z Ancak nükleer fizikte, çekirdeklerin kararlılığı ve olası nükleer süreçler bunlara bağlı olduğundan, hem atom numarası Z hem de kütle numarası A bilinmelidir. Bu nedenle, atom çekirdekleri kimyasal sembol X ile atom numarası Z ve kütle numarası A kullanılarak şu şekilde gösterilir:

$${}^A_Z X .$$

Örneğin, 6 proton ve 6 nötron içeren karbon çekirdeği şu şekilde yazılır: ${}^{12}_6\text{C}$. Nötron içermeyen hidrojen çekirdeği ${}^1_1\text{H}$ olarak, çekirdeğinde 2 nötron bulunan helyum ise ${}^4_2\text{He}$ olarak yazılır. Bilinen en ağır çekirdek, oganesson çekirdeğidir: ${}^{294}_{118}\text{Og}$.

Uygulamada çekirdekler için en yaygın kullanılan gösterimde yalnızca kimyasal sembol ve kütle numarası yazılır. Örneğin, ${}^{14}\text{C}$ veya ${}^{238}\text{U}$ gibi. Kimyasal sembol atom numarasını belirlediği için, atom numarasının ayrıca yazılmasına gerek yoktur. Çekirdekler, karbon-14 ve uranyum-238 örneklerinde olduğu gibi, elementin adı ve kütle numarası kullanılarak da gösterilebilir.

İzotoplar ve İzobarlar

Önceki paragraflarda karbonun iki farklı **kütle numarasına** sahip çekirdeğiyle karşılaştığımızı fark etmiş olabilirsiniz: $^{12}_6\text{C}$ ve $^{14}_6\text{C}$. Her ikisi de karbon çekirdeğidir; ancak çekirdeklerindeki **nötron sayısı** aynı değildir.

Bu tür çekirdeklere **izotop** denir. **İzotoplar, atom numarası (Z) aynı, kütle numarası (A) farklı olan atom çekirdekleridir.**

İzotoplara örnek olarak doğada bulunan hidrojenin üç izotopu verilebilir: ^1_1H (**protiyum**), ^2_1H (**döteryum**) ve ^3_1H (**trityum**). Bu çekirdeklerden ilk ikisi kararlıdır; **trityum ise kararsız (radyoaktif) bir izotop-tur.** Karbonun da $^{11}_6\text{C}$, $^{12}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$ ve $^{14}_6\text{C}$ olmak üzere farklı izotopları vardır. Bu izotoplardan yalnızca $^{12}_6\text{C}$ ve $^{13}_6\text{C}$ çekirdekleri kararlıdır.

Farklı elementlerin birden fazla izotopu olabilir ve bunların yalnızca bir kısmı kararlıdır. Diğerleri kararsızdır ve belirli bir süre sonra bozunurlar. Bu nedenle bu çekirdeklere **radyoaktif çekirdekler** denir. Bu olayı bir sonraki derste inceleyeceğiz.

Hidrojen izotoplarına özel adlar verilmiştir; ancak bu durum bütün elementler için geçerli değildir. Hidrojen çekirdeği önemli bir özelliğe sahiptir. ^1_1H , **yalnızca bir protondan oluşan ve nötron içermeyen tek kararlı çekirdektir.** Yalnızca protonlardan ya da yalnızca nötronlardan oluşan başka bir kararlı çekirdek yoktur.

Kütle numarası (A) aynı, atom numarası (Z) farklı olan çekirdeklere izobar denir. İzobarlar, farklı elementlere ait atom çekirdekleridir. İzobarlara örnek olarak $^{14}_6\text{C}$ ve $^{14}_7\text{N}$; ayrıca $^{16}_8\text{O}$ ve $^{16}_9\text{F}$ ile $^{40}_{18}\text{Ar}$, $^{40}_{19}\text{K}$ ve $^{40}_{20}\text{Ca}$ verilebilir.

Nötron sayısı (N) aynı, atom numarası (Z) farklı olan çekirdeklere ise izoton denir. İzotonlar da farklı elementlere ait atom çekirdekleridir. İzotonlara örnek olarak $^{14}_6\text{C}$ ile $^{15}_7\text{N}$; ayrıca $^{15}_7\text{N}$, $^{16}_8\text{O}$ ve $^{17}_9\text{F}$ verilebilir.

Bu kavramların önemi, **radyoaktif bozunma** ve **çekirdek tepkimeleri** sırasında çekirdeklerde meydana gelen değişimleri incelerken daha iyi anlaşılacaktır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

$^{23}_{11}\text{Na}$ çekirdeğinde kaç proton ve kaç nötron vardır? Çekirdeğin elektrik yükü kaçtır?

Çözüm:

Atom numarası $Z = 11$ 'dir; bu, çekirdekte 11 proton olduğu anlamına gelir. Bu bilgi, periyodik tablodaki Na'nın konumundan da elde edilebilir. Kütle numarası $A = 23$ 'tür. Bundan yola çıkarak nötron sayısını şu şekilde belirleyebiliriz: $N = A - Z = 23 - 11 = 12$

Dolayısıyla, çekirdekte 11 proton ve 12 nötron bulunur. Çekirdeğin toplam elektrik yükü $Q = +11e$ 'dir.

Birleşik Atomik Kütle Birimi

Protonların, nötronların ve atom çekirdeklerinin kütleleri kilogram cinsinden ifade edilemeyecek kadar küçüktür. Bu nedenle çekirdek fiziğinde birleşik atomik kütle birimi adı verilen özel bir kütle birimi kullanılır. Bu birim u ile gösterilir. Birleşik atomik kütle birimi, karbon-12 izotopunun ($^{12}_6\text{C}$) bir atomunun kütlesinin on ikide biri olarak tanımlanır. Buna göre,

$$1u = \frac{1}{12}m(^{12}_6\text{C}).$$

Bu birimin yaklaşık değeri $1u = 1,66025 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ şeklindedir.

Einstein'ın teorisine göre, kütle ve enerji arasında bir eşdeğerlik vardır. Dolayısıyla, bir parçacığın tamamen enerjiye dönüşmesi mümkündür. Bu durumda, elde edilen enerji E (bir veya daha fazla enerji kuantumu şeklinde), şu formül kullanılarak hesaplanabilir:

$$E = mc^2,$$

burada m , parçacığın durgun kütleini, c ise ışık hızını gösterir. Bu ilişki kullanılarak, nükleonların ve çekirdeklerin kütlesi genellikle enerji cinsinden ifade edilir. Dolayısıyla, örneğin şunu yazabiliriz:

$$1u = 1,49225 \frac{\text{J}}{c^2} = 931,494 \frac{\text{MeV}}{c^2}.$$

Buna göre, protonun kütlesi m_p ve nötronun kütlesi m_n şunlardır:

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,0072 u = 938,27 \frac{\text{MeV}}{c^2},$$

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,0087 u = 939,57 \frac{\text{MeV}}{c^2}.$$

Proton ve nötronun kütleleri yaklaşık olarak eşittir, ancak yine de nötronun kütleinin biraz daha büyük olduğu gözlemlenebilir. Karşılaştırıldığında, elektronun kütlesi proton ve nötronunkinden yaklaşık 1.840 kat daha küçüktür. Bu nedenle, atomun tüm kütleinin çekirdeğinde yoğunlaştığı genel olarak kabul edilir. En hafif atom çekirdeği olan hidrojen-1 çekirdeğinin ^1_1H kütlesi yaklaşık 1,008'dir ve bilinen en ağır çekirdeğin $^{294}_{118}\text{Og}$, kütlesi ise yaklaşık 294,2'dir. **Kütle numarası A , çekirdek kütleinin birleşik atom kütle birimi cinsinden sayısal değerine yaklaşık olarak eşittir.**

Güçlü çekirdek kuvveti (nükleer kuvvet)

İlk bakışta, atom çekirdeğinin varlığı gizemli görünür: çok küçük bir alana çok sayıda parçacık sıkıştırılmıştır; bunların bazıları pozitif yüklü, diğerleri ise nötrdür. Şu soru ortaya çıkar: Protonlar arasındaki Coulomb itme kuvveti neden çekirdeği parçalamaz?

Kararlı bir çekirdeğin var olabilmesi için, çok kısa mesafelerde nükleonlar arasında daha da güçlü bir çekim kuvveti de etki etmelidir. Çekirdeği bir arada tutan bu kuvvete **güçlü nükleer kuvvet** (veya güçlü nükleer etkileşim) denir. Bu kuvvet tüm nükleonlar arasında etki eder: proton–proton, proton–nötron ve nötron–nötron.

Buna ek olarak, doğada **zayıf nükleer kuvvet** de mevcuttur, ancak bu kuvvet çekirdeğin kararlılığına katkıda bulunmaz.

- Güçlü nükleer kuvvet, özünde elektrostatik kuvvetten farklıdır. Başlıca özellikleri şunlardır:
- Güçlü nükleer kuvvet, çekirdek içindeki protonlar arasındaki elektrostatik itme kuvvetinden çok daha yoğundur.
- Sadece birkaç femtometre (fm) mertebesinde çok kısa mesafelerde etki eder.
- Doygunluk özelliğine sahiptir: her bir nükleon, çekirdekteki tüm nükleonlarla değil, yalnızca en yakın nükleonlarla etkileşime girer.
- Daha da küçük mesafelerde, güçlü nükleer kuvvet itici hale gelir ve bu da nükleer maddenin sıkışmasını engeller.
- Güçlü nükleer kuvvet, nükleonların elektrik yüküne yaklaşık olarak bağlı değildir: aynı mesafede, iki proton, iki nötron veya bir proton ve bir nötron etkileşime girse de kuvvet aynıdır.

Güçlü nükleer kuvvetin bu özellikleri, atom çekirdeklerinin neden sonlu bir boyuta sahip olduğunu, yoğunluklarının çekirdeğin büyük bir kısmında neden yaklaşık olarak sabit olduğunu ve çekirdeklerin kararlılığının neden proton ve nötron sayıları arasındaki orana bağlı olduğunu açıklar.

Çekirdeklerin yoğunluğu ve yarıçapı

Atom çekirdeğinin yoğunluğu, çekirdeğin yüzeyine yakın ince bir tabaka hariç, hacminin büyük bir kısmında yaklaşık olarak eşittir. Bu beklenen bir durumdur, çünkü güçlü nükleer kuvvet karmaşık bir yapıya sahiptir: kısa mesafelerde çekici bir etkiye sahiptir, ancak nükleonlar daha da kısa mesafelerde bulunduklarında itici hale gelir ve böylece nükleer maddenin daha fazla sıkışmasını engeller.

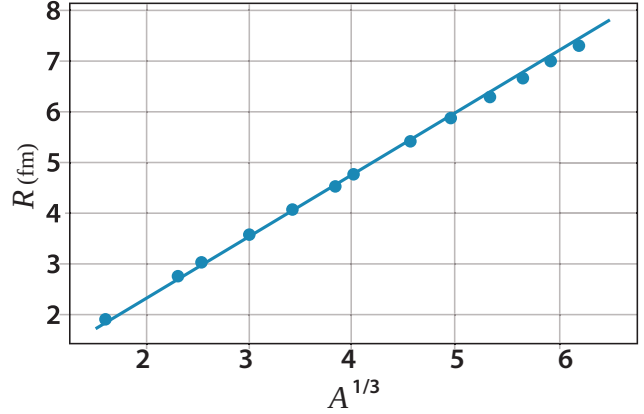
Atom çekirdekleri nükleon sayısı bakımından farklılık gösterse de, yoğunlukları (çekirdek yoğunluğu olarak da adlandırılır) tüm çekirdekler için yaklaşık olarak aynıdır. Bu nedenle, çekirdeğin hacmi nükleon sayısı ile, yani kütle numarasıyla orantılıdır: $V \sim A$. Çekirdek, yarıçapı R d an lı r k ır e d arak l a lı ed ilir se hacmi $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ olur. Buna göre, $R \sim A^{1/3}$ elde edilir.

Orantılılığı bir eşitlikle değiştirmek için bir orantı sabiti kullanılır R_0 , böylece çekirdeğin yarıçapı şu şekilde yazılır:

$$R = R_0 A^{1/3}.$$

Dolayısıyla, atom çekirdeğinin yarıçapı, kütle numarasının küp kökü ile artar. Sabit R_0 deneysel olarak belirlenir ve yaklaşık değeri $R_0 = 1,2$ fm'dir.

Şekil 1, farklı çekirdeklerin yarıçaplarının kütle numarasının küp köküne bağıllığını göstermektedir. Grafiğin doğrusal görünümü, çekirdek yarıçapı formülünün geçerli olduğunu ve çekirdek maddesinin yoğunluğunun hemen hemen tüm çekirdekler için yaklaşık olarak aynı olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 1. Bazı çekirdeklerin yarıçapının, kütle numaralarının küpköküne bağıllı olarak değişimi.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Nükleer maddenin yoğunluğunu ve hacmi 1 cm^3 olan bir küpün kütlesini, bu küpün yoğunluğu nükleer maddenin yoğunluğuna eşit olan bir malzemeden yapılmışsa, belirleyin. Çekirdeğin kütlesi $m = A u$ şeklinde yazılabilir ve orantılılık sabiti $R_0 = 1,2$ fm'dir.

Verilenler:

$$\begin{aligned} m &= A u, \\ 1 \text{ fm} &= 10^{-15} \text{ m}, \\ 1 u &= 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, \\ V_1 &= 1 \text{ cm}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3 \\ R_0 &= 1,2 \text{ fm} \end{aligned}$$

İstenen:

$$\rho - ?, M - ?$$

Çözüm:

$$R = R_0 A^{1/3} \Rightarrow R^3 = R_0^3 A.$$

Yoğunluk bağıntısı ile kürenin hacim bağıntısı

$$\begin{aligned} V &= \frac{4}{3}\pi R^3 \text{ dikkate alındığında,} \\ \rho &= \frac{m}{V} = \frac{uA}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{uA}{\frac{4}{3}\pi (R_0^3 A)} = \frac{u}{\frac{4}{3}\pi R_0^3} = 2,3 \cdot 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ elde edilir.} \end{aligned}$$

Nükleer maddeden yapılmış ve hacmi 1 cm^3 olan bir küpün kütlesi

$$M = \rho \cdot V_1 = 2,3 \cdot 10^{11} \text{ kg olur.}$$

Bu çok büyük değer, nükleer maddenin yoğunluğunun, günlük yaşamda karşılaşılan maddelerin yoğunluklarından ne kadar büyük olduğunu göstermektedir.



DAHA FAZLA ÖĞREN

1905 yılında Albert Einstein, Özel Görelilik Kuramı kapsamında, kütle ve enerjinin birbirinden bağımsız iki fiziksel büyüklük olmadığını, aynı fiziksel gerçeğin iki farklı şekilde ifade edilmesi olduğunu göstermiştir. Einstein'ın yaptığı analiz, bir cisim enerji yaydığı anda veya enerji soğurduğunda, buna bağlı olarak kütlesinin de değişmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Bu ilişki, kütle-enerji eşdeğerliği olarak bilinen bağıntıyla ifade edilir ve en basit hâliyle

$$E = mc^2$$

Burada E , cismin durgunluk enerjisini (yalnızca kütlesinin varlığından kaynaklanan iç enerjisini), m cismin kütlesini ve c ise boşluktaki ışık hızını gösterir. Görelilik mekaniğinde, ışık hızına yakın hızlarla hareket eden parçacıklar incelenirken bu bağıntı, enerji ile momentum arasındaki daha genel ilişkinin özel bir durumu olarak ortaya çıkar. Kütlesi m ve momentumu p olan bir parçacığın toplam enerjisi

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \text{ bağıntısıyla verilir. Bu bağıntıdan,}$$

parçacık durgun hâlde olduğunda ($p = 0$), durgunluk enerjisinin

$$E = mc^2$$

olduğu görülür. Parçacık hareket ettiğinde ise toplam enerjisi mc^2 değerinden daha büyüktür. Bu durumda $E = mc^2$ farkı, parçacığın kinetik enerjisini ifade eder.

Nükleer fizikte $E = mc^2$ bağıntısı büyük önem taşır. Çünkü radyoaktif bozunma ve çekirdek tepkimeleri sırasında çok küçük kütle değişimleri meydana gelir. Bu küçük kütle değişimleri, çok büyük miktarda enerjinin açığa çıkmasına veya soğurulmasına karşılık gelir.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Atom numarası Z 'nin fiziksel anlamını açıklayınız. Atom numarasının elementi neden belirlediğini açıklayınız.
2. $^{31}_{15}\text{P}$ çekirdeği için nötron sayısını N hesaplayınız ve çekirdeğin elektrik yükünü yazınız.
3. $^{58}_{28}\text{Ni}$ ve $^{58}_{26}\text{Fe}$ çekirdekleri verilmiştir. Bunlar izotop mu, izobar mı? Gerekçesiyle açıklayınız.
4. $R = R_0 A^{1/3}$, $R_0 = 1,2 \text{ fm}$ ve $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ bağıntısını kullanarak, $A_1 = 27$ ve $A_2 = 216$ kütle numaralarına sahip çekirdeklerin yarıçaplarını karşılaştırınız. İkinci çekirdeğin yarıçapı, birinci çekirdeğin yarıçapının kaç katıdır? (Cevap: 2 kat)
5. Yarıçapı, $^{230}_{88}\text{Ra}$ çekirdeğinin yarıçapının yaklaşık üçte ikisine eşit olan bir çekirdeğin kütle numarasını belirleyiniz. Bu bilgilere göre söz konusu çekirdeğin hangi elemente ait olduğu belirlenebilir mi? Cevabınızı gerekçelendiriniz. (Cevap: $A = 68$)
6. Kütlesi Güneş'in kütlesinin 4 ila 8 katı arasında olan bir yıldızın, yaşamının sonunda önce çöktüğü, ardından da süpernova patlaması oluşturduğu kabul edilmektedir. Süpernova patlamasıyla dış katmanlar uzaya saçıldıktan sonra geriye kalan kısımda protonlar ile elektronlar birleşerek, kütlesi yaklaşık Güneş'in kütlesinin iki katı olan bir nötron yıldızı oluşur. Nötron yıldızı, dev bir atom çekirdeği olarak düşünülebilir. Nötron yıldızının yarıçapının, çekirdek yarıçapı için kullanılan bağıntıyla hesaplanabileceğini kabul ederek yarıçapını bulunuz. Nötron yıldızının kütlesi $4 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ve yıldızın tamamen nötronlardan oluştuğu kabul edilmektedir. $m_n = 1,674 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ (Cevap: $1,6 \cdot 10^4 \text{ m}$)

4.7. Doğal Radyoaktivite

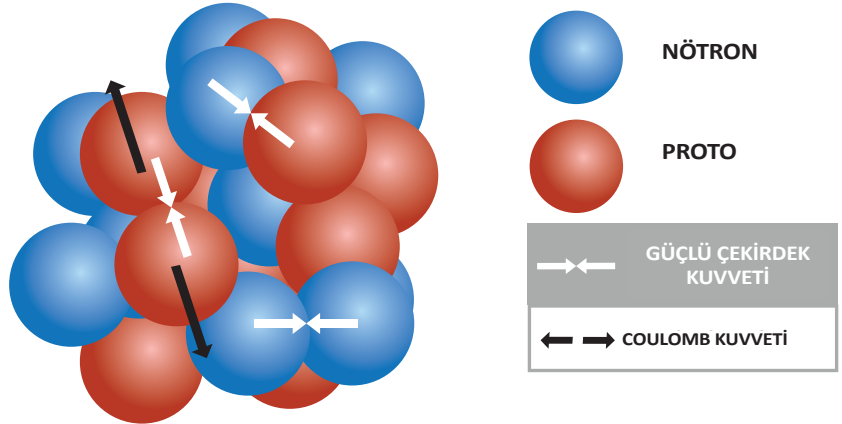
19. yüzyılın sonlarında fizikçiler, ışık, elektrik ve yeni keşfedilen ısımlar ile ilgili olayları yoğun olarak araştırıyorlardı. 1896 yılında **Henri Becquerel**, uranyum tuzlarının, görünür ışığı engelleyen opak bir maddeyle sarılmış olsalar bile, kendiliğinden bir fotoğraf plağını karartabildiğini gözlemledi. Bu gözlem, bazı maddelerin dış etkenlere bağlı olmaksızın kendiliğinden ışıyım yaydığını gösteren ilk açık kanıtı. Bu yönüyle, dışarıdan bir etki sonucu ortaya çıkan lüminesans gibi olaylardan farklıdır.

Daha sonra, Marie Skłodowska-Curie ve Pierre Curie, bu olgunun belirli maddelerin atomlarının bir özelliği olduğunu kanıtladılar ve bu özelliği **radyoaktivite** adını verdiler.

Doğal radyoaktivite, bazı atom çekirdeklerinin kendiliğinden başka çekirdeklere dönüşerek parçacıklar ve elektromanyetik radyasyon yaydığı bir olgudur. "Doğal" kelimesi, sürecin dış etkenler olmaksızın gerçekleştiğini vurgular: çekirdek, ışığa maruz kalma, ısıtma veya kimyasal reaksiyona girme sonucu değil, kendiliğinden bozunur. Bu sürece **kendiliğinden bozunma** da denir.

Radyoaktif bozunma sırasında, **ana** çekirdek enerji salarak **bir kız çekirdeğe** dönüşür. Bu enerji, yayılan parçacıkların kinetik enerjisi ve/veya yayılan enerji olarak ortaya çıkar. Radyoaktivite, elektron kabuğundaki değişikliklerden ziyade çekirdeğin bileşiminde ve enerjisinde değişiklikler içerdiğinden, tamamen **nükleer bir süreçtir**.

Bazı çekirdeklerin kararlı, bazılarının ise radyoaktif olmasının nedeni, çekirdek içindeki iki zıt etkileşim arasındaki denge de yatmaktadır (Şekil 1). Bir yandan, protonlar, yoğunluğu proton sayısı ile artan elektros-tatik **Coulomb(Kulon) kuvveti** nedeniyle birbirlerini iterler. Öte yandan, nükleonlar arasında, çekici olan ve **Coulomb(Kulon) kuvvetinden** çok daha güçlü olan; ancak yalnızca çok küçük mesafelerde etkili olan güçlü nükleer kuvvet etki eder. Bu nedenle güçlü nükleer kuvvetin kısa menzilli bir kuvvet olduğu söylenir.



Şekil 1. Atom çekirdeğinde etkili olan çekici güçlü çekirdek kuvveti ve itici Coulomb kuvveti

Belirli bir kütle numarası A değeri için, proton ve nötron sayısının farklı kombinasyonlarına sahip çekirdekler olabilir. Atom çekirdeklerinin **kararlılığı**, Etkinlik 1 kullanılarak deneysel olarak incelenebilir.



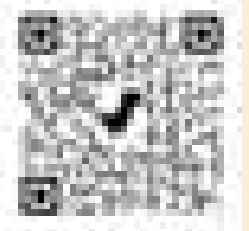
ETKİNLİK 1.

Atom Çekirdeğinin Kararlılığı

Etkinliğin Amacı: Proton ve nötron sayısına bağlı olarak belirli atom çekirdeklerinin kararlı mı yoksa kararsız mı olduğunu araştırmak.

Araç: PhET simülasyonu: Aşağıdaki web sitesinde bulunan (Build a nucleus) çekirdek oluşturma simülasyonuna bakabilirsiniz:

(https://phet.colorado.edu/sims/html/build-a-nucleus/latest/build-a-nucleus_all.html).



Simülasyonda, bir sonraki derste ele alınacak olan “ (Half-life) ” değeri gösterilmektedir. Bu etkinlikte, yarılanma süresi sayısal değeri analiz edilmez; yalnızca çekirdeğin gösterilen ölçek üzerindeki konumu incelenir: sol tarafta *less stable* – daha az kararlı çekirdekler, sağ tarafta ise *more stable* – daha çok kararlı çekirdekler yer alır. Simülasyon ayrıca çekirdeğin **kararlı** mı yoksa **kararsız** mı olduğunu da açıkça gösterir (*Stable / Unstable*).

Sadece atom çekirdeğini göstermek için Elektron bulutu seçeneğini kapatın.

Bölüm 1. Az sayıda nükleon içeren çekirdekler

Tablodaki proton ve nötron sayılarına göre çekirdekleri tek tek birleştirin:

Protonlar	Nötronlar
1	0
1	1
1	2
2	2
2	3
3	3
4	4
4	5
5	5
5	6

Sorular:

Hangi bileşik çekirdekler kararlı, hangileri kararsızdır?

Proton sayısı sabit tutulurken sadece nötron eklenirse çekirdeğin kararlılığı nasıl değişir?

Belirli bir proton sayısı için, çekirdeğin kararlı olduğu tek bir nötron sayısı var mıdır?

Bir proton ve bir nötron aynı anda eklendiğinde kararlılık her zaman artar mı?

Çekirdeğin kararlılığında nötronların rolü hakkında ne gibi bir sonuç çıkarılabilir?

Etkinlik sonuçlarından, atom çekirdeğinin kararlılığının sadece içindeki parçacık sayısına değil, aynı zamanda proton ve nötronlar arasındaki orana da bağlı olduğu sonucuna varılabilir. Bazı kombinasyonlarda çekirdekler kararlıyken, diğerlerinde kararsızdır ve kendiliğinden bozunmaya maruz kalırlar.

Element	Sembol	Z
Zirkonyum	Zr	40
Molibden	Mo	42
Gümüş	Ag	47
İyot	I	53
Tungsten	W	74
Platin	Pt	78
Bizmut	Bi	83
Polonyum	Po	84
Radon	Rn	86
Uranyum	U	92

Bölüm 2. Çok sayıda nükleon içeren çekirdekler

Aşağıdaki tablodaki elementler için en az bir kararlı izotop olup olmadığını bulmaya çalışın. Kararlı izotopu olan elementler için karşılık gelen kütle numarasını kaydedin. Atom numarası Z ye dikkat edin ve elementleri birbirleriyle karşılaştırın.

Atom numarası ile çekirdeklerin kararlılığı arasındaki ilişki hakkında ne fark ettiniz?

Kararlı izotopların bulunmadığı net bir sınır tespit edilebilir mi?

Atom numarası daha düşük olan tüm izotoplar kararlı mıdır? Teknesyum ($Z = 43$) ve prometyum ($Z = 61$) için kontrol edin.

Etkinlik 1’den çıkarılan sonuçlar, atom çekirdeklerinin kararlılığının, elementin atom numarasının yanı sıra proton ve nötron arasındaki orana da bağlı olduğunu göstermektedir. Atom numarası arttıkça kararlı çekirdekler giderek daha nadir hale gelir ve atom numarası yüksek elementler için sadece radyoaktif izotoplar mevcuttur. Ancak, atom numarası daha düşük olmasına rağmen kararlı izotopları bulunmayan teknesyum ve prometyum gibi istisnalar olduğu için kesin bir sınır yoktur.

Radyoaktif bozunma yoluyla kendiliğinden dönüşebilen çekirdeklere **radyoaktif çekirdekler** denir. **Bu nedenle radyoaktif bozunma (veya dönüşüm), kararsız bir çekirdeğin kendiliğinden daha kararlı bir çekirdeğe dönüşmesi ve bu sırada fazla enerjinin iyonlaştırıcı ışınım olarak yayılması şeklinde gerçekleşen doğal bir süreçtir.** Her kimyasal elementin birden fazla izotopu vardır; bunların bazıları kararlı, bazıları ise radyoaktiftir.

Ayrıca, hiç kararlı izotop olmayan elementler de vardır.

Kurşun ($Z = 82$), Periyodik Tabloda kararlı bir izotopa sahip olan son elementtir.

Polonyum ($Z = 84$) ile başlayan ve kararlı izotopları olmayan daha ağır kimyasal elementler, doğada yaygın olarak bulunmaz. Bazıları Dünya'daki minerallerde ve kayalarda bulunurken, diğerleri doğal olarak oluşmaz ve sentetik olarak üretilmiştir. En ağır elementlerin doğal bolluğu çok düşüktür; ancak, doğal bozunmalardan kaynaklanan izler olarak, bunlardan bazıları örneğin uranyum cevherlerinde bulunabilir.

Bir izotopun radyoaktif olduğunu vurgulamak istediğimizde, **radyoizotop** terimini kullanırız. Radyoizotopların bozunumu sırasında yayılan radyasyon, iyonlaşmaya, yani atomlardan elektronları koparmaya yetecek kadar enerjiye sahiptir ve bu nedenle **iyonlaştırıcı radyasyon** olarak adlandırılır. Radyoaktivite, radyasyonun değil, atom çekirdeklerinin bir özelliğidir; bu nedenle "radyoaktif radyasyon" terimi yanlıştır ve kullanılmamalıdır.

Atom çekirdeklerinden kaynaklanan iyonlaştırıcı radyasyon, yalnızca doğal bir olay ve çekirdeğin yapısı hakkında bilgi kaynağı olarak değil, aynı zamanda potansiyel biyolojik etkileri nedeniyle kendimizi korumamız gereken bir olay olarak da önemlidir.

Radyoaktif Bozunmada Korunum Yasaları

Her radyoaktif bozunmada, temel korunum yasaları sağlanmalıdır. Bu yasalar sayesinde oluşan yeni çekirdek ve radyoaktif bozunma sırasında açığa çıkan enerji doğru biçimde belirlenebilir.

Genel olarak, ana çekirdek A_ZX bozunarak kız çekirdek ${}^A_{Z_1}Y$ yi oluşturur ve ${}^{A_2}_{Z_2}b$ parçacığını yayar. Bu süreç ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}b$ şeklinde gösterilir. Ok işareti ($\rightarrow$), sürecin tek yönde gerçekleştiğini, yani geri dönüşü olmayan bir süreç olduğunu ifade eder. Bundan sonraki bölümlerde çekirdek tepkimeleri de aynı gösterimle yazılacaktır. Genellikle kız çekirdek ile yayımlanan parçacığa birlikte radyoaktif bozunma ürünleri denir. Bazı radyoaktif bozunmalarda birden fazla parçacık yayımlanabilir. Ancak, konunun daha kolay anlaşılması amacıyla burada yalnızca tek bir parçacığın yayımlandığı durum ele alınacaktır.

Her nükleer bozunuma dört korunum yasası uygulanır:

1. **Nükleon sayısı korunumu yasası.** Bozunma öncesi ve sonrası toplam nükleon sayısı eşittir, yani aşağıdaki eşitlik geçerlidir:

$$A = A_1 + A_2.$$

2. **Elektrik yükü korunumu yasası.** Bozunma öncesi toplam elektrik yükü, bozunma sonrası toplam elektrik yüküne eşittir. Çekirdeğin ve parçacığın elektrik yükü atom numarasıyla belirlendiğinden, bu koşul şu şekilde yazılır:

$$Z = Z_1 + Z_2.$$

3. **Momentumun korunumu yasası.** Ana çekirdeğin momentumu, kız çekirdeğin ve yayılan parçacığın momentumlarının vektörel toplamına eşittir:

$$\vec{p}_X = \vec{p}_Y + \vec{p}_b.$$

4. **Enerji korunumu yasası.** Radyoaktif bozunma sırasında sistemin toplam enerjisi korunur.

$$E_X = E_Y + E_b.$$

Ancak burada, yalnızca mekanik enerjinin değil, süreçteki toplam enerjinin dikkate alındığı vurgulanmalıdır. Bu nedenle, parçacığın sahip olduğu enerji de hesaba katılmalıdır; çünkü Einstein'ın kütle-enerji eşdeğerliği bağıntısına göre $E = mc^2$ her kütlenin bir enerji karşılığı vardır.

Radyoaktif bozunmada yer alan parçacıkların her biri kinetik enerjiye sahip olabilir. Bu nedenle enerjinin korunumu yasası uygulanırken, ana çekirdeğin kinetik enerjisi $E_{k,X}$ ile bozunma ürünlerinin kinetik enerjileri $E_{k,Y}$ ve $E_{k,b}$ de dikkate alınmalıdır.

$$M_X c^2 + E_{k,X} = M_Y c^2 + m_p c^2 + E_{k,Y} + E_{k,b}.$$

Korunum Yasası'na göre, radyoaktif bozunma sırasında açığa çıkan enerji Q , ana çekirdek ile bozunma ürünlerinin kütle farkının c^2 ile çarpılmasıyla hesaplanabilir:

$$Q = (M_X - M_Y - m_b) c^2.$$

Bozunma, ancak $Q > 0$ olduğunda enerjisel olarak mümkündür; dolayısıyla bu enerji, kız çekirdeğin kinetik enerjisi ve yayılan parçacık arasında dağıtılır

$$Q = E_{k,Y} + E_{k,b} - E_{k,X}.$$

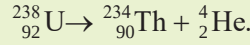
Bazı durumlarda, bu enerjinin bir kısmı kız çekirdekte tutulabilir ve daha sonra bir veya daha fazla enerji kuantumu şeklinde yayılabilir. Bu tür çekirdeklerin uyarılmış enerji durumunda olduğu söylenir.

Nükleonların Korunumu Yasası, Elektrik Yükünün Korunumu Yasası, Momentumun Korunumu Yasası ve Enerjinin Korunumu Yasası olmak üzere bu dört yasa, sadece radyoaktif bozunumların değil, aynı zamanda nükleer reaksiyonların da analizinin temelini oluşturur.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Aşağıdaki radyoaktif bozunmada ne kadar enerji açığa çıkar?



Parçacıkların kütleleri şunlardır: $M_{\text{U}} = 238,0508 \text{ u}$, $M_{\text{Th}} = 234,0436 \text{ u}$ ve $M_{\text{He}} = 4,0026 \text{ u}$.

Verilen: $M_{\text{U}} = 238,0508 \text{ u}$, $M_{\text{Th}} = 234,0436 \text{ u}$, $1 \text{ u} \cdot c^2 = 931,5 \text{ MeV}$, $1 \text{ u} \cdot c^2 = 931,5 \text{ MeV}$, $M_{\text{He}} = 4,0026 \text{ u}$	İstenen: $Q - ?$
Çözüm: Bozulma sırasında açığa çıkan enerji şöyledir: $Q = (M_X - M_Y - m_b) c^2.$ ${}_{92}^{238}\text{U}$ 'nun bozunumu için bu değer şöyledir: $Q = (238,051 - 234,044 - 4,003) \text{ u} \cdot c^2 = 0,004 \text{ u} \cdot c^2 = 3,7 \text{ MeV}.$	

En yaygın radyoaktif bozunma türleri

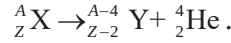
Radyoaktif süreçlerde, kararsız çekirdek birkaç karakteristik şekilde bozunabilir. Her bozunma türü, çekirdeğin bileşiminde ve enerjisinde belirli değişikliklere yol açar. En yaygın radyoaktif bozunma türleri alfa (α) bozunması, beta (β) bozunması ve gama (γ) bozunmasıdır. Alfa bozunmasında çekirdek bir alfa parçacığı yayar; bunun sonucunda hem kütle numarası A hem de atom numarası Z azalır. Beta (β) bozunmasında kütle numarası A değişmez; ancak çekirdekteki bir nükleonun başka bir nükleona dönüşmesi nedeniyle atom numarası Z (dolayısıyla nötron sayısı N) değişir. Gama (γ) bozunmasında ise alfa veya beta bozunması sonucunda oluşan yeni çekirdek, A ve Z değerleri değişmeden fazla enerjisini bir enerji kuantumu (gama fotonu) olarak yayar.

Alfa bozunması

Alfa bozunması, ağır çekirdekler, yani kütle numarası büyük olan çekirdekler için en yaygın radyoaktif dönüşüm biçimidir. 'Ağır çekirdekler' terimi, kütlesi büyük olan çekirdekler için kullanılır; kütle numarası küçük olan çekirdeklere ise *hafif çekirdekler* denir.

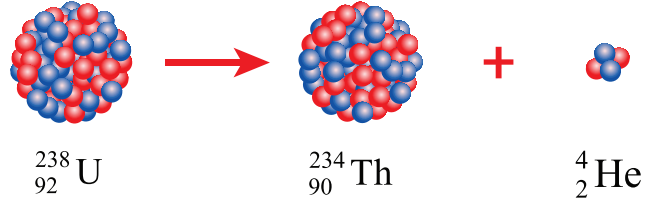
Etkinlik 1'de, ağır çekirdeklerin çoğunlukla kararsız olduğunu görmüştük. Daha kararlı bir enerji durumuna geçmek için, iki proton ve iki nötrondan oluşan ve **alfa parçacığı** (veya çift iyonize helyum atomu) olarak adlandırılan bir nükleon grubu yayarlar. Genel olarak, alfa bozunması, ana çekirdeğin

${}^A_Z X$ 'ten, kız çekirdek ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ 'ye dönüşmesi ve bir alfa parçacığı ${}^4_2 \text{He}$ yaymasıyla gerçekleşir. Bu süreç aşağıdaki çekirdek denklemiyle gösterilir. Alfa bozunmasını tanımlayan genel ilişki şöyledir:

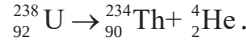


Bu bağıttan, nükleon sayısının korunumu yasası ile elektrik yükünün korunumu yasasının sağlandığı doğrudan görülmektedir. Alfa bozunması sonucunda element her zaman değişir. Oluşan kız çekirdek, ana çekirdeğin ait olduğu elementten farklı bir elemente aittir ve Periyodik Sistem'de ana çekirdeğin bulunduğu elementin iki sıra solunda yer alır. Alfa bozunması sırasında çekirdeğin kütle numarası ve elektrik yükü (atom numarası) da değişir. Çoğu durumda kız çekirdek, temel enerji düzeyinde oluşur; ancak bazen uyarılmış enerji düzeyinde de oluşabilir.

Bu durumda daha sonra gama ışınımı yayımlanabilir. Alfa bozunmasına örnek olarak aşağıdaki çekirdek tepkimesi verilebilir:



Şekil 2. ${}^{238}_{92} \text{U}$ 'nun alfa bozunmasının grafiksel gösterimi



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Hareketsiz durumda olan ${}^{213}_{84} \text{Po}$ radyoizotopu, 8,376 MeV kinetik enerjili bir alfa parçacığı yayar.

a) Nükleer reaksiyonu yazın ve bozunma ürünlerini belirleyin.

b) Kız çekirdek temel durumunda bulunmaktadır. Bu süreçte açığa çıkan enerjiyi bulun. Kız çekirdeğin kinetik enerjisi ile alfa parçacığının kinetik enerjisi arasındaki oranın bir ifadesini türetin. Bozunmadan sonra, bozunma ürünü çekirdeğin ve alfa parçacığının aynı yönde ancak zıt yönlerde hareket ettiğini ve ana çekirdeğin bozunmadan önce hareketsiz olduğunu varsayalım.

Radyoizotop ${}^{213}_{84} \text{Po}$ 'nun kütlelerini 213u, kız çekirdeğin kütlelerini 209 u ve alfa parçacığının kütlelerini 4u olarak alalım; burada u, birleşik kütle birimini ifade eder. Şunu varsayalım

burada $1 \text{ uc}^2 = 931,5 \text{ MeV}$ 'dir.

Verilenler: $E_\alpha = 8,376 \text{ MeV}$, $m_1 = 213\text{u}$, $m_2 = 209\text{u}$, $m_\alpha = 4\text{u}$ $1 \text{ uc}^2 = 931,5 \text{ MeV}$	Çözüm: Alfa parçacığı iki proton içerir, bu nedenle kız çekirdeğin atom numarası: $Z = 84 - 2 = 82$. Periyodik tabloya göre bu, bir kurşun çekirdeğidir. Alfa parçacığı 4 nükleon içerir, dolayısıyla kütle numarası 4 azalacaktır: $A = 213 - 4 = 209$.
İstenen: Nükleer bozunumun ürünleri nelerdir? a) $Q - ?$	

Buna göre, bozunma denklemi aşağıdaki şekilde yazılır:



b) Bozunma sırasında açığa çıkan toplam enerji Q , alfa parçacığının ve kız çekirdeğin kinetik enerjisine dönüşür. Momentumun korunumu yasasına göre (ana çekirdeğin başlangıçta durduğu kabul edildiğinde) $|\vec{p}_\alpha| = |\vec{p}_{\text{Pb}}|$ olur.

$$\text{Kız çekirdeğin ve alfa parçacığının kinetik enerjileri } E_\alpha = \frac{p_\alpha^2}{2m_\alpha} \text{ ve } E_{\text{Pb}} = \frac{p_{\text{Pb}}^2}{2m_2}, \text{ olduğundan, } \frac{E_{\text{Pb}}}{E_\alpha} = \frac{m_\alpha}{m_2}$$

bağıntısı elde edilir. Buna göre kız çekirdeğin kinetik enerjisi $E_{\text{Pb}} = E_\alpha \cdot \frac{m_\alpha}{m_2}$ şeklinde yazılabilir.

Alfa bozunması sırasında açığa çıkan toplam enerjinin, bozunma ürünlerinin kinetik enerjisine dönüştüğü dikkate alındığında, $Q = E_{\text{Pb}} + E_\alpha$ olur. Buradan, bozunma sırasında açığa çıkan enerji

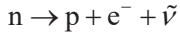
$$Q = E_\alpha \left(1 + \frac{m_\alpha}{m_1}\right) = 8,541 \text{ MeV} \text{ olarak bulunur.}$$

Beta bozunması

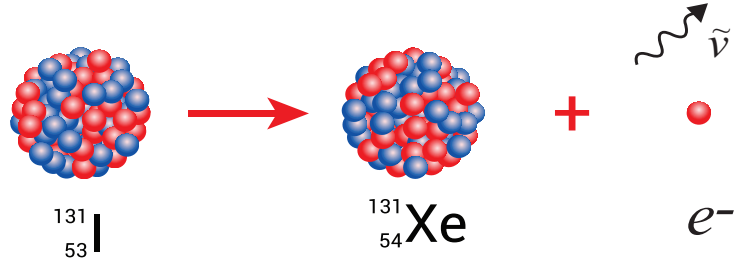
Beta bozunması, radyoaktif çekirdeklerin daha kararlı bir enerji durumuna geçişinde yaygın olarak görülen mekanizmalardan biridir; özellikle de nötron-proton oranının kararlılık açısından "elverişsiz" olduğu çekirdekte (çok fazla sayıda nötrona sahip çekirdekler veya çok sayıda protona sahip çekirdekler). Alfa bozunmasından farklı olarak, beta bozunmasında kütle numarası A değişmez. Toplam nükleon sayısı değişmediğinden, sadece çekirdeğin bileşimi değişir; yani bir nükleon başka bir nükleona dönüşür (şekil 3).

Üç farklı beta bozunma türü vardır:

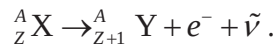
β^- bozunması: β^- bozunmasında, ana çekirdekte bir nötron bir protona dönüşür ve bu sırada bir elektron ile bir antinötrino yayılır:



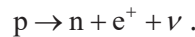
Atom numarası, 1 artarken, kütle numarası değişmeden kalır. Oluşan kız çekirdek, ana çekirdekle izobar olup Periyodik Sistem'de ana çekirdeğin bulunduğu elementin bir sıra sağında yer alır. β^- bozunmasının genel gösterimi aşağıdaki gibidir:



Şekil 3. ${}_{53}^{131}\text{I}$ 'in β^- bozunmasının şematik gösterimi



β^+ bozunması: β^+ bozunmasında, ana çekirdekte bir proton, bir pozitron ve bir nötrino yayarak bir nötrona dönüşür:

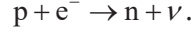


Atom numarası 1 azalırken, kütle numarası değişmeden kalır. Oluşan kız çekirdek, Periyodik Sistem'de ana çekirdeğin bulunduğu elementin bir sıra solunda yer alır. β^+ bozunmasının genel gösterimi aşağıdaki gibidir:

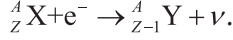


Pozitron e^+ , elektronun karşıt parçacığıdır: elektronla aynı kütleye sahiptir, ancak pozitif bir temel elektrik yükü taşır. Pozitronun varlığı, bu bozunumda elektrik yükünün korunmasını sağlar.

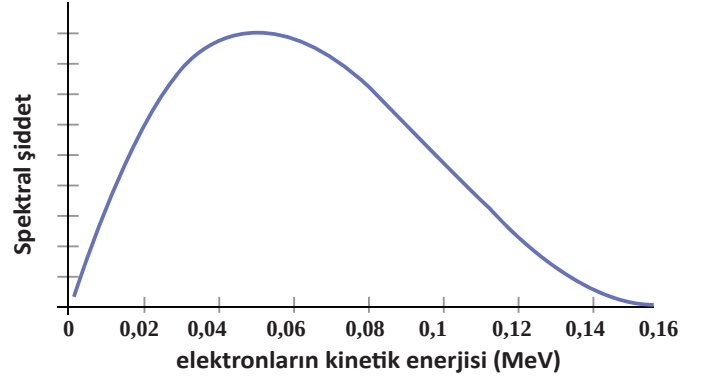
Elektron yakalanması (EC): Elektron yakalamada, çekirdek kendi atomunun iç elektron kabuklarından bir elektronu "yakalar". Bu süreçte proton bir nötrona dönüşür ve bir nötrino yayılır.



Atom numarası 1 azalır ve kütle numarası aynı kalır. β^+ bozunmasında olduğu gibi, kız çekirdek Periyodik Sistem'de ana çekirdeğin bulunduğu elementin bir sıra solunda yer alır. Elektron yakalamanın genel formu şöyledir:



Alfa bozunumundan farklı olarak, beta bozunumunda elektronlar ve pozitronlar çekirdekten kesin olarak belirlenmiş bir kinetik enerjiyle değil, sürekli bir kinetik enerji spektrumuyla ayrılırlar (Şekil 4). Bu, durum, bozunum sırasında enerjinin ve momentumun bir kısmını **nötrino** (veya **antinötrino**) taşımasından kaynaklanır. **Böylece enerji ve momentum korunumu yasaları sağlanmış olur.**



Şekil 4. ${}_{6}^{14}\text{C}$ çekirdeklerinin β^- bozunması sonucu yayımlanan elektronların kinetik enerjilerinin sürekli spektrumu



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Doğada, üç farklı beta bozunması türünün tümüyle bozunabilen radyoizotoplar da bulunmaktadır. Bunlardan biri, tıpta tanı ve tedavi amacıyla kullanılan bakır (${}_{29}^{64}\text{Cu}$) radyoizotopudur. Bakır'ın β^- -bozunması, β^+ bozunması ve elektron yakalanması (EC) süreçlerine ait çekirdek denklemlerini yazınız.

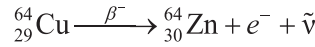
Çözüm:

Her üç beta bozunması türünde de kütle numarası değişmez; yani $A = 64$ olarak kalır.

1) β^- bozunması

Bu bozunmada bir nötron, protona dönüşür. $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

Nötron protona dönüştüğü için çekirdekteki proton sayısı bir artar. Buna bağlı olarak atom numarası da $Z = 29 + 1 = 30$ olur. Dolayısıyla bakır-64 çekirdeği, çinko-64 çekirdeğine dönüşür. Çekirdek denklemi aşağıdaki gibidir:

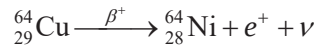


2) β^+ bozunması

Bu bozunmada bir proton, nötrona dönüşür. $p \rightarrow n + e^+ + \nu$

Proton nötrona dönüştüğü için çekirdekteki proton sayısı bir azalır. Buna bağlı olarak atom numarası

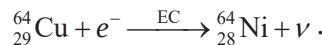
$Z = 29 - 1 = 28$ olur. Bu nedenle bakır-64 çekirdeği, nikel-64 çekirdeğine dönüşür. Çekirdek denklemi aşağıdaki gibidir:



3) Elektron yakalanması (EC)

Bu olayda çekirdekteki bir proton, atomun iç yörüngelerinden yakaladığı bir elektron ile birleşerek nötrona dönüşür. $p + e^- \rightarrow n + \nu$

Bu durumda da proton nötrona dönüştüğü için çekirdekteki proton sayısı bir azalır. Dolayısıyla atom numarası $Z = 29 - 1 = 28$ olur. Sonuç olarak bakır-64 çekirdeği, nikel-64 çekirdeğine dönüşür. Çekirdek denklemi şu şekilde yazılır:

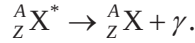


Gama bozunması

Tıpkı bir atomdaki elektronların yalnızca belirli enerji durumlarında var olabilmesi gibi, atom çekirdeğinin de izin verilen enerji durumları vardır. Bunlardan en düşük olanına temel durum denir; daha yüksek enerjili durumlara ise uyarılmış durumlar denir. Atomlarda, bir elektron daha yüksek bir enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine geçtiğinde, aradaki enerji farkı bir foton olarak yayılır. Benzer bir süreç atom çekirdeklerinde de meydana gelir.

Gama bozunması, bir çekirdeğin daha yüksek bir enerji durumundan daha düşük bir enerji durumuna geçerek, fazla enerjiyi **gama fotonu** şeklinde saldırdığı radyoaktif bir süreçtir. Bu uyarılmış durum çoğunlukla alfa veya beta bozunması sonucunda oluşur; bu nedenle gama ışınımı genellikle radyoaktif dönüşümün ilk adımı değil, çekirdeğin daha kararlı hale geldiği son geçiş aşamasıdır.

Gama emisyonu için genel nükleer reaksiyon, uyarılmış çekirdeği bir yıldız işareti ile göstererek şu şekilde yazılır:



Burada ${}^A_ZX^*$ uyarılmış enerji durumundaki çekirdektir; A_ZX ise daha düşük (veya temel) durumda bulunan aynı çekirdektir, γ ise gama fotonudur.

Gama bozunmasında ne kütle numarası (A) ne de atom numarası (Z) değişir. Bu nedenle Nükleon Sayısının Korunumu Yasası ile Elektrik Yükünün Korunumu Yasası sağlanmış olur. Açığa çıkan enerji büyük ölçüde gama fotonunun enerjisi olarak yayımlanır. Çekirdeğin kütlesi çok büyük olduğundan geri tepme sonucu kazandığı kinetik enerji ihmal edilebilir. Bu nedenle, çekirdeğin iki enerji düzeyi arasındaki enerji farkı yaklaşık olarak yayımlanan gama fotonunun enerjisine eşittir:

$$\Delta E \approx E_\gamma.$$

İyonlaştırıcı radyasyonun canlı organizmalar üzerindeki etkisi

İyonlaştırıcı radyasyon, atom ve moleküllerden bir elektronu koparacak kadar yeterli enerjiye sahip olan ve böylece iyonlar oluşturan radyasyondur. Bu süreç, canlı organizmalardaki biyolojik moleküllere ve hücrelere zarar verebilir. Canlı organizmalar üzerindeki etki derecesi, radyasyonun türüne, enerjisine ve maruz kalma şekline (dışsal veya içsel) bağlıdır.

Alfa radyasyonu

Alfa radyasyonu, çift pozitif elektrik yüküne sahip nispeten kütleli parçacıklar olan alfa parçacıklarından oluşan bir akımdır. Bu nedenle, maddeden geçerken atom ve moleküllerdeki elektronlarla güçlü bir etkileşime girerler ve geçtikleri yol boyunca çok sayıda **iyon çifti** oluştururlar. Alfa radyasyonunun **iyonlaştırma gücü yüksek**, ancak nüfuz etme gücü düşük olduğu söylenir.

Havada alfa parçacıklarının menzili birkaç santimetre, katı maddelerde ise sadece birkaç mikrometredir. Bu parçacıklar ince bir kağıt yaprağı veya cildin yüzey tabakası tarafından kolayca durdurulur ve dış maruziyet açısından ciddi bir tehlike oluşturmazlar.

Bununla birlikte, **alfa yayıcı madde vücuda girerse** (solunarak veya yutularak), alfa radyasyonu son derece tehlikeli olabilir. Bu durumda, tüm enerji küçük bir doku hacmi içinde serbest kalır ve bu da yoğun lokal iyonlaşma ve ciddi biyolojik hasara yol açar.

Beta ışınımı

Beta radyasyonu, hızlı elektron veya pozitron akımıdır. Kütleleri daha düşük ve tek elektrik yüküne sahip olmaları nedeniyle, beta parçacıkları alfa parçacıklarına göre daha az iyonlaştırma gücüne sahiptir, ancak delme gücü daha yüksektir.

Havada, beta parçacıkları (β -bozunması sonucu üretilen elektron ve pozitronların genel adı), enerjilerine bağlı olarak daha uzun mesafeler kat edebilirler; katı malzemelerde ise genellikle birkaç milimetre ila birkaç santimetre kalınlığındaki malzemeler tarafından durdurulurlar. Beta radyasyonuna karşı korunmak için, plastik veya alüminyum gibi daha düşük atom numaralı malzemeler en yaygın olarak kullanılır.

Biyolojik açıdan bakıldığında, beta radyasyonu dış maruziyet durumunda (özellikle cilt ve gözlerde) hasara yol açabilir; ayrıca, beta yayıcıları vücut içinde birikirse de tehlikelidir, çünkü parçacıklar enerjilerini yol üzerindeki dokulara doğrudan aktarır.

Gama Işınımı

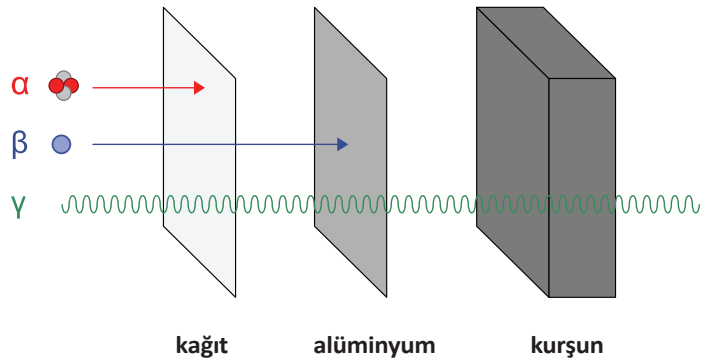
Gama ışıını, çok yüksek enerjili bir elektromanyetik ışıınıdır. Alfa ve beta ışıınıından farklı olarak gama fotonlarının kütlesi veya elektrik yükü yoktur, bu nedenle doğrudan iyonlaştırma yapmazlar. Madde atomlarıyla etkileşime girerek ikincil elektronların salınmasına yol açarak dolaylı olarak iyonlaşmaya neden olurlar.

Bu nedenle gama ışıını, üç ışıını türü arasında en düşük iyonlaştırma gücüne sahip olmakla birlikte en yüksek delme gücüne sahiptir. Önemli kalınlıktaki malzemeleri geçebilir ve korunması için kurşun veya beton gibi yüksek yoğunluklu malzemeler kullanılır.

olduğu gibi malzeme kalınlığı arttıkça kademeli olarak azalır. Bir gama foton demetinin zayıflama yasası, bir Röntgen ışıını demetinin zayıflama yasasıyla aynıdır; tek fark, malzemelerin gama ışıını için emilim katsayısının Röntgen ışıınıları için olan emilim katsayısından daha düşük olmasıdır.

Biyolojik açıdan bakıldığında, gama ışıını vücutta kolayca nüfuz ettiği ve iç organlara ve dokulara zarar verebileceği için özellikle dış maruziyet durumunda tehlikelidir.

Şekil 5, farklı iyonlaştırıcı radyasyon türlerine karşı koruma için gerekli malzemeleri göstermektedir.



Şekil 5. Farklı iyonlaştırıcı radyasyonların delme gücünün şematik gösterimi. Alfa ve beta radyasyonunun geçebileceği malzemenin kalınlığı, bu radyasyonların enerjisine bağlıdır. Gama ışıınıında, ışıını demetinin şiddeti üstel zayıflama yasasına göre azalır.

Alşar: Jeoloji ile nükleer fizik arasında doğal bir bağlantı

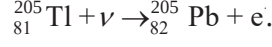
Kojuf Dağı'ndaki Alşar maden bölgesi, jeoloji ve nükleer fiziğin aynı yerde "buluştuğu" dünyadaki birkaç örnekten biridir. Burası, arsenik, antimon ve talyum açısından zengin bir hidrotermal cevher yatağıdır ve burada **lorandit** adı verilen nadir bir mineral bulunur (Şekil 6).



Şekil 6. Alşar sahasından çıkarılan, mineral matrisi içerisine gömülü küçük ve belirgin kristallere sahip bir **lorandit** örneği. Kristallerin boyutu birkaç milimetreye kadar ulaşabilmektedir. Bu tür kristallere nadiren rastlanır. Çünkü **talyum** içeren mineraller genellikle belirgin ve gözle görülebilen kristaller oluşturmaz.

Lorandit (TlAsS₂) talyum içeren bir mineraldir. Bu mineral, yapısında $^{205}_{81}\text{Tl}$ talyum izotopunu doğal olarak bulundurması nedeniyle özel bir öneme sahiptir. Bu izotop, Güneş'ten Dünya'ya sürekli olarak ulaşan **güneş nötrinoları** ile çekirdek tepkimesine girebilme özelliğine sahiptir.

Bir nötrininonun soğurulması sonucunda, talyum çekirdeği bir kurşun izotopuna dönüşür ve bu süreçte bir elektron yayımlanır. Bu olay aşağıdaki çekirdek denklemi ile gösterilebilir:



Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için yaklaşık 52 keV enerji gereklidir ve güneş nötrinolarının önemli bir kısmı bu enerjiye sahiptir. Alşar'ın önemi, buradaki loranditin birkaç milyon yıldan fazla bir süredir var olmasından kaynaklanmaktadır. Böylece, zamanla bu mineral, güneş nötrinolarına maruz kalma hakkında bilgi "toplar".

Alşar'ın bir diğer önemi, doğanın özünde milyonlarca yıldır çalışan bir 'dedektör' sağlamış olmasından kaynaklanmaktadır. Lorandit oluşumunun yaşı yaklaşık 4,31 milyon yıldır. Bu nedenle oluşan $^{205}_{82}\text{Pb}$ miktarı, loranditin uzun bir zaman boyunca güneş nötrinolarına maruz kalmasının bir göstergesidir. Bunun yanı sıra, $^{205}_{82}\text{Pb}$ radyoizotopunun yarılanma süresi 15,3 milyon yıl olduğundan, bu izotop lorandit içinde uzun süre varlığını koruyabilmektedir. Bu nedenle, saf olarak ayrıştırılmış bir lorandit örneğinde $^{205}_{81}\text{Tl}$ ile $^{205}_{82}\text{Pb}$ izotoplarının miktarları arasındaki oran ölçülerek, güneş nötrino akısı hakkında bilgi elde edilebilir. Böylece, Güneş'in zaman içindeki etkinliği hakkında da önemli bilgiler edinilebilir.



DAHA FAZLA ÖĞREN

Alfa parçacıklarının ayırık enerjileri ve alfa bozunmasında çekirdeğin uyarılmış enerji düzeyleri

Belirli bir radyoizotoptan yayımlanan alfa parçacıkları, **her zaman aynı enerjiye sahip olmayabilir**. Bunun nedeni, ana çekirdeğin, kız çekirdeğin farklı enerji düzeylerine bozunabilmesidir. Eğer alfa bozunması sonucunda kız çekirdek temel enerji düzeyinde oluşursa, bozunma sırasında açığa çıkan Q enerjisinin tamamı (çekirdeğin çok küçük olan geri tepme enerjisidışında) alfa parçacığının kinetik enerjisine dönüşür. Bu durumda alfa parçacığı **en büyük kinetik enerjiye sahip olur**.

Buna karşılık, kız çekirdek uyarılmış bir enerji düzeyinde oluşursa, Q enerjisinin bir bölümü kız çekirdekte depolanmış olarak kalır. Bu nedenle alfa parçacığı daha küçük bir kinetik enerjiyle yayılır. Bunun sonucunda, **alfa yayıcı çekirdeklerde çoğu zaman birkaç farklı, ancak ayırık enerjiye sahip alfa parçacıkları gözlenir**.

Uyarılmış durumdaki kız çekirdek kararlı değildir ve kısa bir süre sonra daha düşük bir enerji düzeyine, çoğunlukla temel enerji düzeyine, geçer. Bu geçiş sırasında fazla enerji **gama fotonları** şeklinde yayılır.

Şekil 7'de, $^{238}_{92}\text{U}$ 'nun alfa bozunmasına ait enerji düzeyi diyagramı gösterilmektedir. Bu bozunma sonucunda kız çekirdek $^{234}_{90}\text{Th}$, aşağıdaki durumlardan birinde oluşabilir:



Şekil 7. $^{238}_{92}\text{U}$ çekirdeği, alfa bozunması sırasında farklı enerjilere sahip üç alfa parçacığı grubu yayarak çekirdeğine dönüşür. Oluşan toryum $^{234}_{90}\text{Th}$ çekirdeği, iki farklı uyarılmış enerji düzeyinde bulunabilir ve gama ışınımı yayarak temel enerji düzeyine geçer.

- **Temel enerji düzeyinde (0^+),**
- **İki farklı uyarılmış enerji düzeyinde (2^+ ve 4^+ ile gösterilir).**

Bu nedenle, $^{238}_{92}\text{U}$ 'nun alfa bozunması sırasında, kinetik enerjileri farklı olan üç grup alfa parçacığı yayılır: $E_{\alpha 1} = 4,111 \text{ MeV}$ (olayların yaklaşık %0,1'inde), $E_{\alpha 2} = 4,224 \text{ MeV}$ (olayların yaklaşık %20,9'unda), $E_{\alpha 3} = 4,274 \text{ MeV}$ (olayların yaklaşık %79'unda).

Kız çekirdek uyarılmış bir enerji düzeyinde oluştuğunda, temel enerji düzeyine geçerken ayrıca gama fotonları yayar. Fotonlarının enerjileri sırasıyla $E_{\gamma 1}$ ve $E_{\gamma 2}$ ile gösterilir. Bu gama geçişleri, diyagramda mavi oklarla gösterilmiştir. Bu gama fotonlarının enerjileri, geçişin gerçekleştiği iki enerji düzeyi arasındaki enerji farkından hesaplanabilir:

$$E_{\gamma 1} \approx 0,113 \text{ MeV}, E_{\gamma 2} \approx 0,050 \text{ MeV}.$$

Beta bozunumunda uyarılmış durumlar

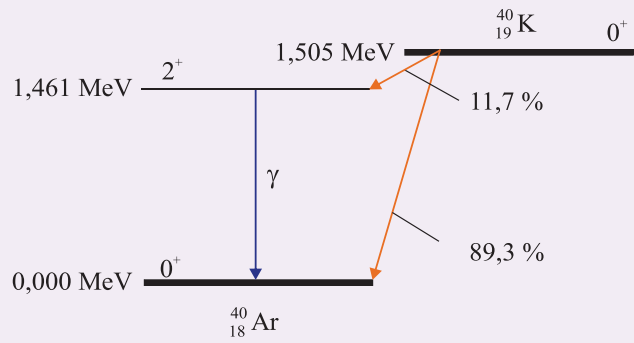
Benzer bir durum beta bozunmasında da görülür. Beta bozunması sırasında açığa çıkan enerjinin bir bölümü kız çekirdekte kalabilir. Bu durumda, kız çekirdeğin uyarılmış enerji düzeyinde bulunduğu söylenir.

Şekil 8'de, $^{40}_{19}\text{K}$ 'nin elektron yakalanması gösterilmektedir. Bu süreç sonucunda oluşan $^{40}_{18}\text{Ar}$ çekirdeği;

- temel enerji düzeyinde (0^+) veya
- uyarılmış enerji düzeyinde (2^+)

bulunabilir.

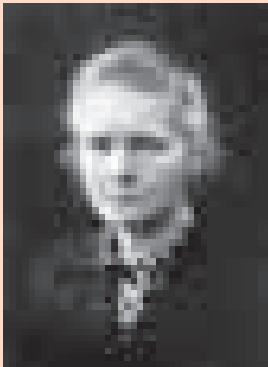
Çekirdek, uyarılmış enerji düzeyinden temel enerji düzeyine geçerken, enerjisi $E_{\gamma} \approx 1,461 \text{ MeV}$ olan bir gama fotonu yayar.



Şekil 8. $^{40}_{19}\text{K}$ çekirdeği, elektron yakalanması sonucunda $^{40}_{18}\text{Ar}$ çekirdeğine dönüşür. Oluşan argon-40 çekirdeği, temel enerji düzeyinde veya uyarılmış enerji düzeyinde bulunabilir.



ÜNLÜ BİLİM İNSANI



Marie Skłodowska - Curie (1867-1934), fizik ve kimya tarihinin en önemli kadın bilim insanlarından biridir ve radyoaktivite araştırmalarında kilit bir figürdür. Eşi Pierre Curie ile birlikte, Henri Becquerel'in başlattığı araştırmaları sürdürmüş ve belirli elementlerin yaydığı kendiliğinden radyasyonu tanımlamak için "radyoaktivite" terimini ilk kez kullanmıştır. Marie Curie, radyoaktivitenin kimyasal reaksiyonların bir sonucu değil, atom çekirdeğinin doğasında var olan bir özellik olduğunu kanıtladı; bu, o dönemde maddeye ilişkin yaygın anlayışta devrim niteliğinde bir değişiklikti.

Çalışmaları sırasında Marie Curie, iki yeni kimyasal element keşfetti: polonyum (adını memleketi Polonya'dan almıştır) ve Radium. Cevherden, özellikle de uranyum cevheri pechblende'den radyoaktif elementleri izole etmek için karmaşık ve son derece hassas yöntemler geliştirdi. Bu araştırma uzun sürdü ve fiziksel olarak yorucuydu, ancak sonuçta saf radium ilk kez izole edildi; bu da çekirdeklerden kaynaklanan radyasyonun doğasının daha iyi anlaşılmasını mümkün kıldı.

Marie Curie'nin çalışmaları, bilimsel ve pratik açıdan muazzam bir öneme sahiptir. Fizik dalında (1903, Pierre Curie ve Henri Becquerel ile ortak olarak) ve Kimya dalında (1911, tek başına) olmak üzere iki kez Nobel Ödülü'nü kazanan Curie, iki farklı bilim dalında Nobel Ödülü'ne layık görülen tek kadın olmuştur.

Araştırmaları, nükleer fizik ve radyokimyanın temellerini attı ve radyoaktif elementlerin uygulaması daha sonra tıpta, özellikle de kötü huylu hastalıkların teşhis ve tedavisinde önemli bir rol oynadı.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Radyoaktivitenin, dış etkenlerin bir sonucu değil de maddenin içsel bir özelliği olduğunu açıklayınız.
2. Ana çekirdek ve kız çekirdek kavramlarından ne anlaşılır?
3. Ağır çekirdeklerde proton sayısı arttıkça kararsızlığın neden arttığını açıklayınız. (Coulomb itmesi ile güçlü çekirdek kuvveti arasındaki ilişkiyi dikkate alınız.)
4. Güçlü çekirdek kuvvetinin neden kısa menzilli olduğu söylenir? Bunun çekirdeğin kararlılığı açısından önemi nedir?
5. $^{226}_{88}\text{Ra}$ radyoizotopu alfa bozunmasına uğramaktadır.
 - a. Çekirdek denklemini yazınız ve bozunma sonucunda oluşan çekirdeği belirleyiniz.
 - b. $^{226}_{88}\text{Ra}$ çekirdeğinin kütlesi 226,0254 u, kız çekirdeğin kütlesi 222,0176 u ve alfa parçacığının kütlesi 4,006 u olduğuna göre, alfa bozunması sırasında açığa çıkan enerjiyi hesaplayınız.

$$1\text{u} \cdot c^2 = 931,5\text{MeV} \text{ (Cevap: 1,68 MeV)}$$

6. Aşağıdaki şekilde, $^{38}_{17}\text{Cl}$ çekirdeğinin bozunması şematik olarak gösterilmiştir.

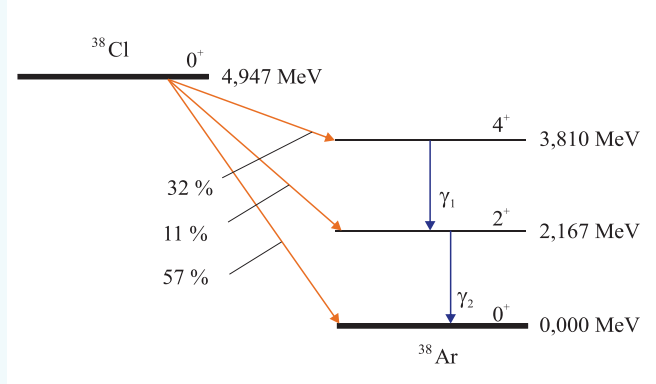
- a. $^{38}_{17}\text{Cl}$ çekirdeğinin beta bozunmasına ait çekirdek denklemini yazınız ve oluşan Ar izotopunun atom numarasını belirleyiniz.
- b. Şemadan görüldüğü gibi, $^{38}_{17}\text{Cl}$ çekirdeğinin beta bozunması sonucunda oluşan ^{38}Ar çekirdeği;

olayların %57'sinde temel enerji düzeyinde,
%11'inde birinci uyarılmış enerji düzeyinde,

%32'sinde ise ikinci uyarılmış enerji düzeyinde oluşmaktadır.

Buna göre, $^{38}_{17}\text{Cl}$ çekirdeğinin her 100 bozunması için kaç gama fotonu yayımlanacağını hesaplayınız.

(Cevap: 75)



4.8. Radyoaktif Bozunma Yasası

Radyoaktif çekirdeklerde, α , β ve γ olmak üzere farklı bozunma türleri olduğunu daha önce görmüştük. Ancak bu, hemen birkaç önemli soruyu gündeme getirir: Belirli bir çekirdeğin bozunması tam olarak ne zaman gerçekleşecektir? Her bir atomun bozunma anı önceden tahmin edilebilir mi? Ve eğer bu mümkün değilse, çok sayıda çekirdeğin davranışından sistemin durumu hakkında bilgi edinebilir miyiz?

İlk bakışta radyoaktif bozunma, tamamen rastgele ve öngörülemez bir süreç gibi görünür. Herhangi bir radyoizotopun tek bir çekirdeği için, bir saniye içinde mi, bir yıl içinde mi yoksa çok daha uzun bir sürede mi bozunacağını söyleyemeyiz. Ancak, çok sayıda özdeş radyoaktif çekirdeğimiz olduğunda, bunların toplu davranışı net bir örüntü gösterir.

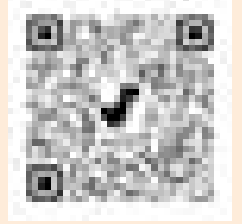
Bu olguyu incelemek için, öncelikle bir bilgisayar simülasyonu kullanarak radyoaktif bozunmayı “deneysel olarak” gözlemleyeceğiz. Bu sayede, tek bir çekirdeğin bozunma sırasında neler olduğunu ve çok sayıda çekirdeğin zaman içinde nasıl davrandığını göreceğiz.



ETKİNLİK 1.

Etkinlik 1: Beta Bozunması ve Bozunmanın İstatistiksel Doğası (PhET)

Bu etkinlik için, PhET platformundaki Beta Bozunumu simülasyonunu kullanacağız; bu simülasyona şu web adresinden ulaşabilirsiniz: <https://phet.colorado.edu/mk/simulations/beta-decay>



Bölüm 1: Tek bir hidrojen-3 (trityum) atomu - ne zaman bozunur?

Yöntem:

Simülasyonu açın ve "One Atom" (Tek Atom) seçeneğini seçin. Bir trityum (Hidrojen-3, ^3H) çekirdeği seçin.

Bozunma gerçekleşene kadar gözlem yapın.

"Reset nucleus" (Çekirdeği sıfırla) seçeneğine tıklayın ve gözlemi en az 10 kez tekrarlayın

Sorular:

1. Bozunma öncesinde ve sonrasında çekirdekte ne değişmiştir? Bozunma öncesi ve sonrasında elementin proton sayısını ve nötron sayısını yazınız.

2. Bozunmadan hemen sonra, olayı görebilmek için duraklat (pause) düğmesine tıklayınız. Çekirdekten hangi parçacıklar yayılmaktadır? Sağ üst köşedeki göstergiyi (lejanti) kullanarak bu parçacıkları adlandırınız.

3. Bu olay hangi tür beta bozunmasına örnektir?

Unutmayın: Tritiyum neden farklı bir elemente bozunur?

Unutmayın: Nükleid sayısı A neden değişmez?

Bozunma süresi grafiğine (pencerenin üst kısmı) bakın. Her bozunma için, bozunmanın gerçekleştiği zaman eksenindeki nokta kaydedilir. Bozunmalar düzenli bir örüntü izliyor mu? Bir sonraki çekirdeğin ne zaman bozunacağını tahmin edebilir miyiz?

Bölüm 2: Gözlem - birden fazla hidrojen-3 atomunun bozunumu

İzlenecek yol:

"Multiple Atoms" sekmesini seçiniz. Etkinliğe başlamadan önce Pause düğmesine basınız.

"Add 10" düğmesine, atom sepeti boşalana kadar art arda tıklayarak ekranı atomlarla doldurunuz.

Start düğmesine tıklayarak simülasyonu başlatınız ve aşağıdakileri gözlemleyiniz:

- Çok sayıda çekirdeğin aynı anda nasıl bozunduğunu,
- Üst taraftaki grafiğin neyi gösterdiğini.

Açıklayınız: Bu durum, "One Atom" durumundan hangi yönleriyle farklıdır?

"Reset All Nuclei" düğmesine tıklayınız. İşlemi birkaç kez tekrarlayınız. Her seferinde aynı davranışı gözlemliyor musunuz?

Bölüm 3. Gözlem – Çok sayıda trityum atomunun bozunması

Bu bölümde, trityum atomlarının sayısının zamanla nasıl azaldığını belirlemek amacıyla bir ölçüm yapacağız.

İzlenecek yol:

Reset All Nuclei düğmesine tıklayarak bütün çekirdekleri sıfırlayınız, simülasyonu duraklatınız ve çalışma alanını yeniden atomlarla doldurunuz.

Zamanla kaç trityum çekirdeğinin bozunmadan kaldığını belirleyeceğiz. Toplam atom sayısı, grafiğin bulunduğu alanın sağ üst köşesinde, ${}^3\text{H}$ simgesinin hemen yanında gösterilmektedir.

Tablonun ilk satırına $t = 0$ anındaki değeri yazınız. Bu simülasyonda bu değerin $N_0 = 99$ olması beklenir. Ancak farklı bir değer elde ederseniz, gözlemlediğiniz değeri yazınız.

Simülasyonu çalıştırınız ve üstteki grafikte yer alan zaman eksenini takip ediniz. Grafik $t = 5$ yıl değerine ulaştığında simülasyonu duraklatınız ve ${}^3\text{H}$ çekirdeklerinin sayısı N değerini tabloya kaydediniz. Simülasyonu yeniden çalıştırınız ve aynı işlemi $t = 10, 15, 20, 25, 30$ yıl için tekrarlayınız. Aşağıdaki tabloyu doldurunuz.

t (год.)	N (${}^3\text{H}$)
0	
5	
10	
...	

Daha sonra, x eksenine zamanı t (yıl), y eksenine ise N değerini yerleştirerek bir grafik çizin.

Sorular:

Elde ettiğiniz grafiğin şekli nasıldır? (Doğru mu, eğri mi?)

Grafik en iyi hangi matematiksel fonksiyonla ifade edilebilir?

Eşit zaman aralıklarında, aynı sayıda çekirdek mi, yoksa kalan çekirdeklerin aynı oranı mı bozunmaktadır?

Simülasyondan elde edilen gözlemler, radyoaktif bozunmanın ikili bir doğaya sahip olduğunu göstermektedir. Tek bir çekirdeğin bozunması öngörülemez olsa da, bozunmanın tam olarak ne zaman gerçekleşeceğini belirleyen bir kural yoktur. Ancak, çok sayıda özdeş radyoaktif çekirdek söz konusu olduğunda, zaman içinde kaç çekirdeğin değişmeden kalacağını tanımlamak ve tahmin etmek mümkündür.

Radyoaktivite, kararsız atom çekirdeklerinin kendiliğinden (dış etkenler olmaksızın) daha yüksek enerjili bir durumdan daha düşük enerjili bir duruma geçerek parçacıklar ve/veya elektromanyetik radyasyon yaydığı bir olgudur. Radyoaktif bozunmanın temel bir özelliği **istatistiksel doğasıdır**: Tek bir çekirdeğin bozunması öngörülemez olsa da, çok sayıda özdeş radyoaktif çekirdek (aynı maddenin çekirdekleri) için, zaman içinde **bozunmamış çekirdek** sayısındaki değişimin hesaplanmasına olanak tanıyan bir yasa formüle edilebilir.

Deneysel olarak, eşit zaman aralıklarında aynı sayıda çekirdeğin bozunmadığı, bunun **yerine kalan radyoaktif çekirdeklerin aynı oranda bozunduğu** belirlenmiştir. Bu nedenle, zaman içinde bozunmamış çekirdek sayısındaki azalma **doğrusal değil, üstel bir seyir** izler.

Sürecin başında, kararsız çekirdeklerin sayısı çok fazla olduğunda, belirli bir zaman aralığında çok sayıda bozunma meydana gelir. Zamanla, bozunmamış çekirdeklerin sayısı azalır, bu nedenle aynı zaman aralıklarında bozunan çekirdek sayısı giderek azalır. Bu, çekirdeklerin 'daha yavaş bozunduğu' anlamına gelmez; daha ziyade bozunmaya hazır çekirdek sayısının giderek azaldığı anlamına gelir.

Radyoaktif bozunmanın ne kadar hızlı gerçekleştiğini tanımlamak için, her bir radyoizotopa özgü bir büyüklük kullanılır. Belirli bir radyoizotopta, geçen süre ne olursa olsun başlangıçtaki çekirdek sayısından bağımsız olarak, belirli bir süre sonunda bozunmamış çekirdeklerin sayısı her zaman başlangıçtaki sayının yarısına düşer. Bozunmamış çekirdek sayısının başlangıç değerinin yarısına düştüğü bu süreye **yarılanma süresi** denir ve $T_{1/2}$ ile gösterilir. Yarılanma süresi değeri, radyoaktif maddelere göre farklılık gösterir ve bu maddelerin temel özelliğidir. Örneğin, ${}^{131}\text{I}$ 'nin radyoaktif çekirdeklerinin yarısının bozunacağı süre 8,02 gündür ve ${}^{137}\text{Cs}$ 'nin radyoaktif çekirdeklerinin yarısının bozunacağı süre 30,7 yıldır. Herhangi bir ${}^{131}\text{I}$ veya ${}^{137}\text{Cs}$ örneğinde, belirtilen sürelerin sonunda bozunmamış çekirdeklerin sayısı başlangıçtaki sayının yarısı olacaktır.

Başlangıç anındaki ($t = 0$) bozunmamış çekirdek sayısını N_0 ile gösterirsek, bir yarılanma süresi sonunda bozunmamış çekirdek sayısı

$$N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2} \text{ olur.}$$

Aynı uzunluktaki bir zaman aralığı daha geçtiğinde, kalan çekirdeklerin yine yarısı bozunur. Bu durumda bozunmamış çekirdek sayısı $N(2T_{1/2}) = \frac{N_0}{2^2}$ olur. Üç yarılanma süresi sonunda ise

$$N(3T_{1/2}) = \frac{N_0}{2^3} \text{ elde edilir.}$$

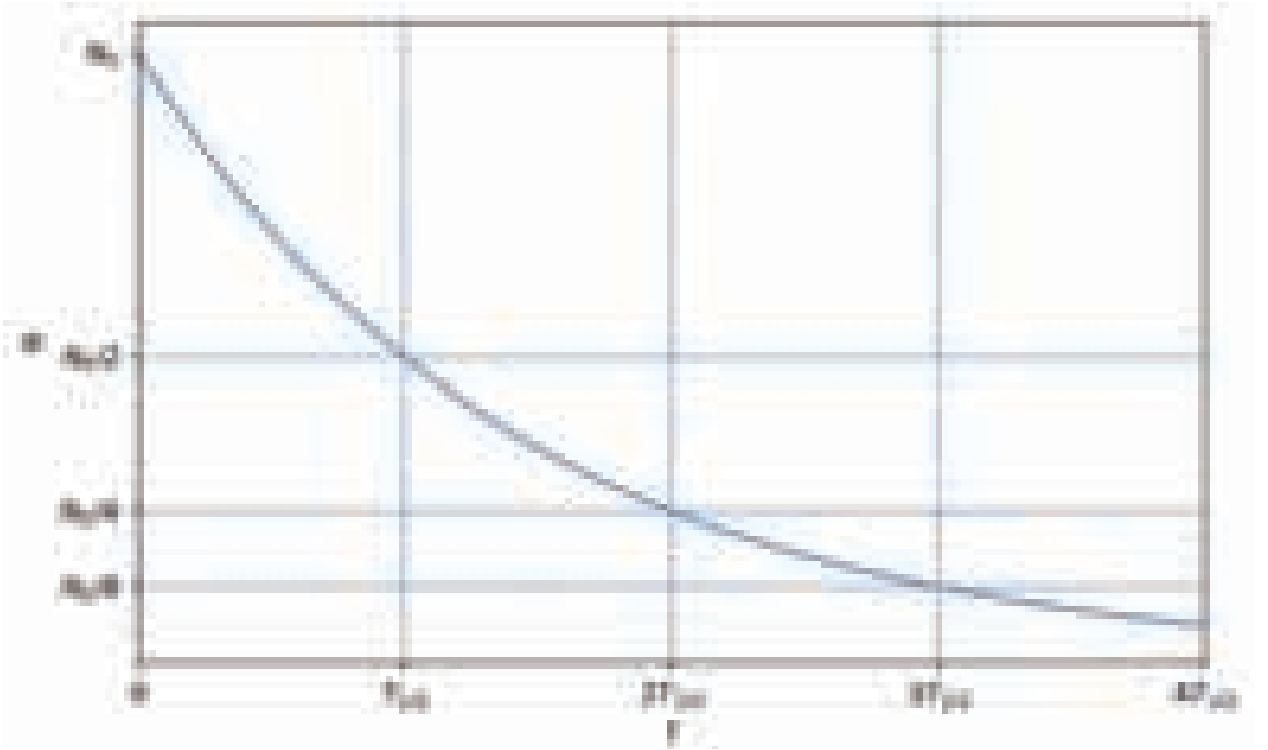
Bu bağıntılardan, bozunmamış çekirdek sayısının geçen süreye bağlı olarak geçen yarılanma süresi sayısına göre değiştiği ve çekirdek sayısındaki azalmanın belirli bir matematiksel yasaya uyduğu sonucuna varılır. Bu yasa şu şekilde ifade edilir:

$$N(t) = \frac{N_0}{2^n}.$$

Burada n , geçen yarılanma süresi sayısını gösterir ve $n = \frac{t}{T_{1/2}}$ şeklinde tanımlanır.

Buna göre radyoaktif bozunma yasası aşağıdaki biçimde yazılabilir: $N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$ veya eşdeğer olarak, $N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$.

Bu yasa grafik üzerinde gösterildiğinde, y ekseninde bozunmamış çekirdek sayısı, x ekseninde ise zaman yer alır. Eğri, başlangıçta hızlı, daha sonra ise giderek daha yavaş azalan bir değişim gösterir.



Şekil 1. Bozunmamış çekirdek sayısının zamana bağlı değişimi

Bu, yasanın en kullanışlı biçimlerinden biridir; çünkü her radyoizotop için tablolarda bulunabilen yarılanma süresi değerleri doğrudan kullanılır. Bazen bu yasayı üstel biçimde yazmak daha kullanışlı olabilir.

$2 = e^{\ln 2}$ olduğundan, şöyle yazabiliriz:

$$N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$$

Eğer $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$, büyüklüğü tanımlanırsa, buna radyoaktif bozunma sabiti denir. Bu durumda radyoaktif bozunma yasası daha sade bir biçimde yazılabilir: $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

Radyoaktif bozunma sabiti, birimi s^{-1} olan bir büyüklüktür ve radyoaktif bozunmanın hızını belirler. λ değeri ne kadar büyük olursa, bozunmamış çekirdek sayısı o kadar hızlı azalır.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Kobalt-60'ın yarılanma süresi 5,27 yıldır. Başlangıçta örnekte $3,0 \cdot 10^{15}$ çekirdek bulunmaktadır. 10 yıl sonra kaç çekirdek bozunmadan kalır? Kaç çekirdek bozunmuştur?

Verilenler:

$$T_{1/2} = 5,27 \text{ a},$$

$$N_0 = 3,0 \cdot 10^{15}, \quad t = 10 \text{ a}$$

İstenen:

$$N(t) - ?, \quad \Delta N(t) - ?$$

Çözüm:

Önce bozunmadan kalan çekirdek sayısını, daha sonra ise bozunan çekirdek sayısını hesaplayalım.

$$\text{Bozunmadan kalan çekirdek sayısı: } N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 8,1 \cdot 10^{14}.$$

$$\text{Buna göre, bozunan çekirdek sayısı: } \Delta N(t) = N_0 - N(t) = 2,19 \cdot 10^{15}.$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

Uygulamada, radyoaktif maddelerle çalışılırken, bozunmadan kalan çekirdek sayısı yerine çoğu zaman, belirli bir süre sonunda **radyoaktif maddenin kalan kütlesi** bilinir. Bir radyoaktif maddenin başlangıç kütlesi 2 g'dır. Bu maddenin radyoaktif bozunma sabiti $\lambda = 0,023 \text{ a}^{-1}$ olarak verilmektedir.

20 yıl sonra radyoaktif maddenin kütlesinin ne kadar olacağını hesaplayınız.

Verilen:

$$m_0 = 2,0 \text{ g},$$

$$\lambda = 0,023 \text{ a}^{-1},$$

$$t = 20 \text{ a}$$

İstenen:

$$m(20 \text{ a}) - ?$$

Çözüm:

Kütlesi m olan bir örnekte bulunan **radyoaktif çekirdek sayısı** N , **molar kütle** M ve **Avogadro sayısı** N_A ile aşağıdaki bağıntıyla ilişkilidir: $N = \frac{m}{M} N_A$.

Başlangıç anında, yani maddenin kütlesi m_0 iken,

$$N = \frac{m}{M} N_A \text{ olur.}$$

Zamanla, **bozunmadan kalan çekirdek sayısı**, **radyoaktif bozunma yasasına** göre değişir: $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$.

İlk iki bağıntı üçüncü bağıntıda yerine yazılıp ortak büyüklükler sadeleştirilirse, **kütlenin de aynı yasaya göre azaldığı** elde edilir: $m(t) = m_0 e^{-\lambda t}$.

$$\text{Buna göre, } m(20 \text{ a}) = 1,26 \text{ g}.$$

Radyoaktif bir maddenin aktivitesi

Tıpta, endüstride ve radyasyondan korunmada radyoaktif maddeler kullanılırken, çekirdeklerin bozunma hızını, yani birim zamanda kaç bozunma meydana geldiğini bilmek genellikle daha önemlidir. Bir radyoaktif kaynağın bozunma hızını tanımlayan büyüklüğe **aktivite** denir ve A ile gösterilir. Aktivite şu denklem kullanılarak hesaplanabilir:

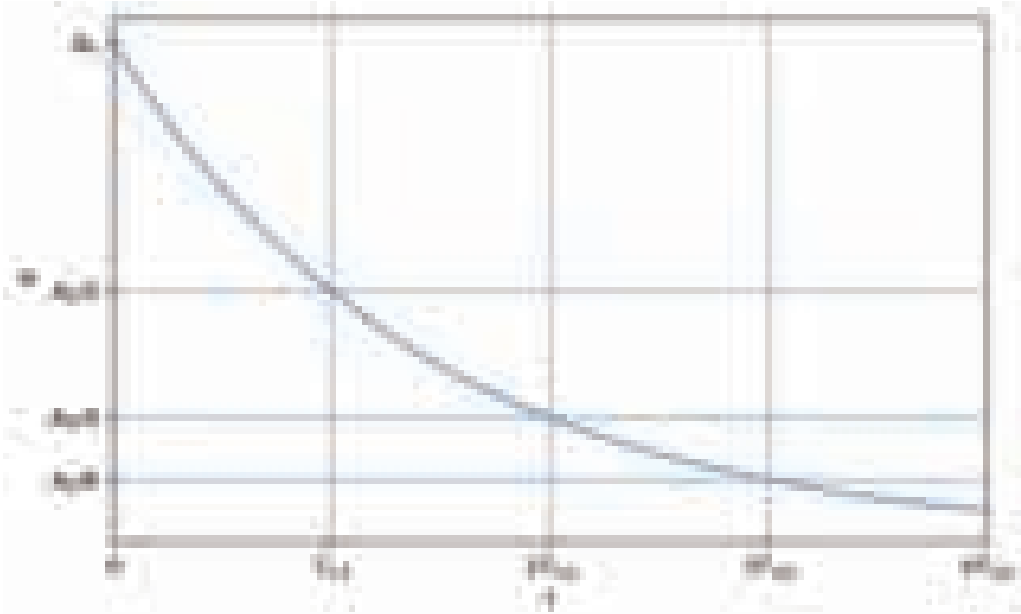
$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

$A_0 = \lambda N_0$ değeri, radyoaktif maddenin **başlangıç aktivitesi** olarak adlandırılır. Dolayısıyla, aktivite için şu ifade geçerlidir

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}.$$

Bu denklemden, radyoaktif maddenin aktivitesinin, yani bozunma hızının, bozunmamış çekirdeklerin sayısı gibi zamanla üstel olarak azaldığı görülebilir (Şekil 2).

Aktivitenin ölçü birimi becquerel (Bq)'dir. Bir becquerel (Bq), bir saniyede bir çekirdeğin bozunmasına karşılık gelen aktivitedir. Dolayısıyla, $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ dir



Şekil 2. Zamanla radyoaktif maddenin aktivitesindeki üstel azalma.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 3.

Oluşumundan 100 yıl sonra 2,0 mg ^{137}Cs 'nin aktivitesini hesaplayınız. Yarılanma süresinin 30,17 a olduğu ve mol kütlelerinin 137 g/mol olduğu bilinmektedir; Avogadro sabiti ise $6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 'dir.

Verilenler:

$$m = 2,0 \text{ mg}, T_{1/2} = 30,17 \text{ a} = (30,17 \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60) \text{ s} = 9,5 \cdot 10^8 \text{ s},$$

$$M = 137 \text{ g/mol}, N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$t = 100 \text{ a} = (100 \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ s} = 3,15 \cdot 10^9 \text{ s}$$

İstenen:

$$A - ?$$

Çözüm:

Örneğin başlangıçtaki aktivitesi: $A_0 = \lambda N_0 = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A = 6,40 \cdot 10^6 \text{ Bq}$.

100 yıl sonraki aktivite: $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$

Buna göre, $A(100 \text{ a}) = 6,43 \cdot 10^5 \text{ Bq} = 0,64 \text{ MBq}$.

Tıpta radyoizotopların kullanımı

Tıpta, radyoaktif bozunma yasası, radyofarmasötiklerin aktivitesinin ve zamanla nasıl değişeceğini keşsin olarak planlanmasına olanak tanıdığı için doğrudan pratik bir değere sahiptir. Bir hastaya radyoaktif izotop verildiğinde, preparatın kullanım anında ne kadar aktiviteye sahip olacağını önceden bilmek çok önemlidir. Bu, özellikle yarılanma süresi kısa olan izotoplar için tedarik, nakliye ve uygulama süreçlerinin organize edilmesi açısından büyük önem taşır.

Nükleer tıpta, teknesyum-99 sıklıkla sintigrafik incelemelerde kullanılır. Nispeten kısa yarılanma süresi, net bir tanı görüntüsü elde edilmesini sağlarken, tarama tamamlandıktan sonra gereksiz radyasyonun hızla azalmasını da garanti eder. Terapötik amaçlarla ise, örneğin iyot-131 tiroid hastalıklarının tedavisinde kullanılır; bu durumda aktivite hesaplamaları, dozun ve etki süresinin değerlendirilmesinde kullanılır. Aktivitenin üstel olarak azalması, hastanın özel kısıtlamalara tabi kalması gereken süreyi ve vücuttaki aktivitenin güvenli düzeylere düşeceği zamanı belirlemeye yardımcı olur.

Arkeolojide radyoizotopların kullanımı

Arkeolojide, radyoaktif bozunma yasası, tarihleme yöntemlerinin, yani arkeolojik buluntuların yaşının belirlenmesinin temelini oluşturur. En iyi bilinen örnek, ahşap, kemik veya tekstil gibi organik malzemelere uygulanan karbon-14 tarihlemesidir. Karbonun bu radyoizotopu, atmosferde nükleer reaksiyonlar yoluyla oluşur. Bitkiler, fotosentez sırasında atmosferdeki karbonu alırken karbon-14 izotopunu da bünyelerine katarlar.

Organizma hayatta olduğu sürece, dış çevreyle yapılan değişim yoluyla içinde karbon-14 ile kararlı karbon-12 arasında kabaca sabit bir oran korunur. Canlının ölümünden sonra bu değişim durur ve karbon-14 çekirdeklerinin sayısı, radyoaktif bozunmanın üstel yasasına göre azalmaya başlar. Reaksiyona girmemiş çekirdeklerin sayısı ile orantılı olan numunedeki karbon-14'ün kalan aktivitesini ölçerek, organizmanın ölümünden bu yana ne kadar zaman geçtiğini tahmin etmek mümkündür.

Bu yöntem, organik maddelerin yaşının belirlenmesine ve kültürlerin ve yerleşim yerlerinin kronolojisinin yeniden oluşturulmasına olanak tanır. En iyi sonuçlar, 5.730 yıl olan karbon-14'ün yarılanma süresinin yaklaşık iki katına kadar olan maddeler için elde edilir.

Ekolojide radyoizotopların kullanımı

Ekoloji ve çevre izleme alanlarında, radyoaktif bozunma yasası, radyoaktif kirlenmenin zamansal dinamiklerini tahmin etmek ve toprak, su ve canlı organizmalardaki maddelerin taşınmasını ve birikimini izlemek için kullanılır. Bir radyonüklid çevreye girdiğinde, aktivitesi zamanla üstel olarak azalır; bu da riskin süresinin ve kademeli olarak azalmasının değerlendirilmesine olanak tanır.

Çernobil (1986) ve Fukuşima (2011) gibi radyolojik kazaların ardından, çeşitli radyoizotoplar geniş alanlara yayılmıştır. Yarılanma süresi kısa olan radyoizotoplar çevreden hızla kaybolur, ancak kısa vadede güçlü etkilere sahip olabilirken, yarılanma süresi daha uzun olan izotoplar on yıllar boyunca ortamda kalır ve uzun vadeli bir risk oluşturur. Başlangıç aktivitesini ölçerek ve üstel bozunma yasasını kullanarak, bir, beş veya on yıl sonraki aktivite tahmin edilebilir; bu da iyileştirme çalışmaları, kaynak kullanım kısıtlamaları veya halkın korunmasına yönelik kararların alınmasına olanak tanır.

Ayrıca, radon, kurşun-210 ve berilyum-7 gibi doğal radyoizotoplar, doğal süreçlerin (nehirler, göller, yeraltı suları, topraklar ve çökeltirler) incelenmesinde kullanılır. Bunlar, 'doğal izleyiciler' işlevi görürler; çünkü aktiviteleri ölçülebilir ve çevredeki davranışları izlenebilir. Bu izleyiciler, suyun ne kadar süredir hareketsiz kaldığı, su katmanlarının ne kadar hızlı karıştığı, taban üzerinde maddenin ne kadar hızlı biriktiği veya belirli bir maddenin nereden geldiği ve nereye gittiği gibi sorulara yanıt sağlar. Örneğin, suda radon bulunması yeraltı suyunun akışını veya suyun kayalarla temasını gösterebilir; öte yandan, tortullardaki kurşun-210 dağılımı birikim hızının tahmin edilmesini sağlar. Berilyum-7 ise kısa yarılanma süresi nedeniyle, yakın zamanda gerçekleşen çökme veya erozyon gibi çok yeni süreçleri gösterir.



ETKİNLİK 2.

Gazlı içecek köpüğüyle radyoaktif bozunmasını simüle etme.

Radyoaktif bozunma yasası, bir beher içindeki alkolsüz bira köpüğünün yüksekliğindeki azalmanın gözlemlendiği basit ve güvenli bir deney ile gösterilebilir. Bu benzetmede, köpükteki her bir kabarcık tek bir radyoaktif çekirdek olarak kabul edilebilir. Her bir kabarcığın ne zaman kaybolacağı tahmin edilemese de, köpüğün bir bütün olarak davranışı tanımlanabilir; bu da radyoaktif bozunmanın temel özelliklerinden biridir.

Ölçümler sırasında beher sallanmamalı ve içine hiçbir şey eklenmemelidir. Radyoaktif bozunmada olduğu gibi, süreç dış etkenler olmaksızın kendiliğinden ilerlemelidir.

Yöntem:

500 ml'lik bir ölçü silindiri alın ve üzerine alkolsüz bira dökün, böylece açıkça görülebilen bir köpük tabakası oluşsun.

Döktükten hemen sonra köpüğün başlangıç yüksekliğini ölçün ve kaydedin. Aynı anda bir kronometreyi çalıştırın.

Ardından, eşit zaman aralıklarında (örneğin, her 10 saniye veya 15 saniyede bir), köpüğün yüksekliğini yeniden ölçün ve elde edilen değerleri bir tabloya kaydedin.

Analiz:

Toplanan verilerden, köpüğün yüksekliğini zamana göre gösteren bir grafik çizin. Köpüğün yüksekliğinin zamanla daha yavaş azaldığını fark edeceksiniz; bu, radyoizotoplarda bozunmamış radyoaktif çekirdeklerin sayısının azalmasına benzer.

Grafikten, köpüğün yüksekliğinin başlangıç değerinin yarısına düştüğü zamanı belirlemeye çalışın. Bu zaman, radyoaktif maddelerin yarılanma süresine benzemektedir.

Sonuç:

Bu basit deney, radyoaktif bozunmanın istatistiksel bir süreç olduğunu gösterebilir; bu süreç, tek bir çekirdek için tahmin edilemez, ancak çok sayıda çekirdek için başarıyla açıklanabilir. Bu şekilde, Radyoaktif Bozunma Yasası, gerçek radyoaktif maddeler kullanılmadan açık ve güvenli bir şekilde modellenir.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Radyoaktif bozunma neden istatistiksel bir süreç olarak kabul edilir?
2. Yarılanma süresini tanımlayınız. "Kalan çekirdeklerin yarısı" ifadesi ne anlama gelir?

3. Şekil 1'deki grafiğe göre, yarılanma süresi iki katına çıkarılırsa eğride nasıl bir değişiklik meydana gelir?
4. Bir örnekte başlangıçtaki çekirdek sayısı $3,0 \cdot 10^{18}$, radyoaktif bozunma sabiti ise $1,5 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ olarak verilmiştir.
 - a) Başlangıç aktivitesini hesaplayınız.
 - b) 90 gün sonraki aktiviteyi hesaplayınız.
 (Cevap: a) $4,5 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$, b) $1,4 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$)
5. Arkeolojik bir örnekte ^{14}C izotopunun aktivitesi $A = 0,62 A_0$ olarak ölçülmüştür. (Burada A_0 , canlı bir organizmadaki aktiviteyi ifade etmektedir.) Karbon-14'ün yarılanma süresi 5730 yıl olduğuna göre, örneğin yaşını tahmin ediniz. (Cevap: 3950 yıl)
6. Çevre çalışmalarında, yarılanma süresi 30,1 yıl olan bir radyonüklit izlenmektedir. 2026 yılında, toprakta aktivite $A_0 = 12 \text{ kgBq/kg}$ olarak ölçülmüştür. Topraktaki radyoaktif maddenin yağış vb. etkilerle ortamdaki uzaklaşmadığı, yalnızca radyoaktif bozunma nedeniyle azaldığı kabul edilirse, 2046 yılında topraktaki aktivitenin ne kadar olması beklenir? (Cevap: 7,6 kBq/kg)

4.9. Radyoaktif Bozunma Dizisi

Önceki derste, basit radyoaktif bozunmayı, yani radyoaktif bir çekirdeğin bozunarak kararlı bir çekirdeğe dönüşmesi durumunu incelemiştik. Ancak doğada, bozunması tek bir adımda sona ermeyen birçok radyoaktif çekirdek vardır. İlk bozunma sonucunda oluşan çekirdek de radyoaktif olabilir ve o da bozunarak başka bir çekirdeğe dönüşebilir. Bu süreç, kararlı bir çekirdek oluşuncaya kadar birbirini izleyen bir dizi radyoaktif bozunma şeklinde devam eder. Bu tür süreçlere **karmaşık radyoaktif bozunma** denir.

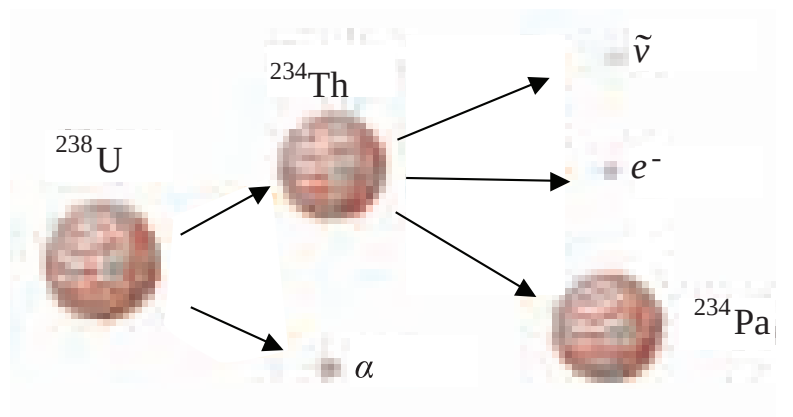
Karmaşık radyoaktif bozunma, kararlı bir çekirdekle sonuçlanan ardışık bozunmalardan oluşur. Bu tür dizilerde, yarılanma süreleri birbirinden çok farklı olan radyoaktif çekirdekler bulunur. Bazılarının yarılanma süresi milyarlarca yıl iken, bazıları ise saniyenin çok küçük bir kesrinde bozunur

($T_{1/2} (^{214}\text{Po}) = 1,643 \cdot 10^{-4} \text{ s}$). Süreç, kararlı bir çekirdek oluştuğunda sona erer.

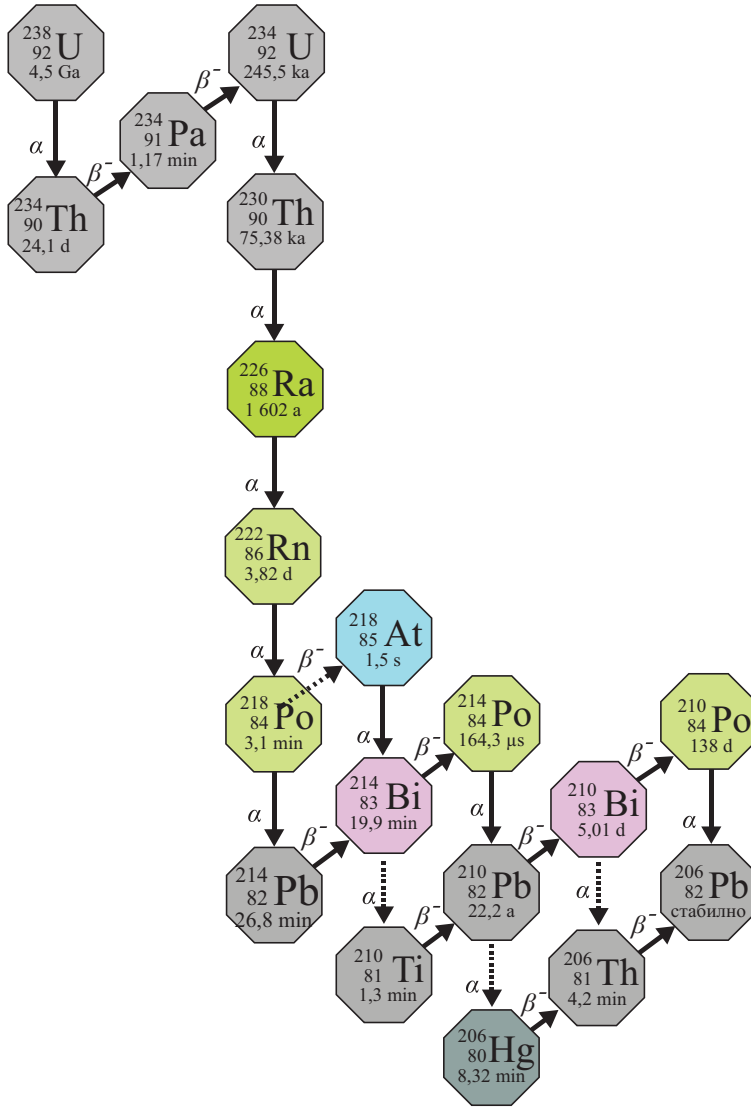
Şekil 1'de, üç çekirdeğin yer aldığı basit bir radyoaktif bozunma dizisi gösterilmektedir. Uranyum-238 ($^{238}_{92}\text{U}$), ana çekirdek olup alfa bozunması sonucunda Toryum-234 ($^{234}_{90}\text{Th}$) çekirdeğini oluşturur.

Toryum-234 çekirdeği de radyoaktiftir ve beta bozunmasına uğrayarak Protaktinyum-234 ($^{234}_{91}\text{Pa}$) çekirdeğini, bir elektron ve bir antinötrino $\bar{\nu}$ oluşturur.

Bu bozunma sonucunda oluşan ($^{234}_{91}\text{Pa}$) çekirdeği de kız çekirdek konumundadır.



Şekil 1. Uranyum-238'in bir dizi bozunması



Şekil 2. Uranyum-238'den kararlı kurşun-206 çekirdeğine uzanan radyoaktif bozunma dizisi.

Bu bozunma dizisi burada sona ermez. $^{234}_{91}\text{Pa}$ çekirdeği de radyoaktiftir. Tüm bozunma dizisi, 14 farklı kız çekirdekten geçer. Dizi, uranyum-238 $^{238}_{92}\text{Pb}$ izotopuyla başlar ve Şekil 2'de gösterildiği gibi, kararlı kurşun-206 $^{206}_{82}\text{Pb}$ izotopuyla sona erer.

Radyoaktif bozunma dizileri(radyoaktif aileler)

Doğal radyoizotoplarda karmaşık radyoaktif bozunma meydana geldiğinde, bunlar radyoaktif bozunma serileri halinde gruplandırılır. Hemen hemen tüm doğal radyoaktif elementler **dört radyoaktif seriye** aittir. Tam olarak dört seri olmasının nedeni, α ve β^- bozunmasında, yeni oluşan çekirdeklerin kütlelerini ve atom numaralarını değiştirme biçimiyle ilgilidir.

α bozunmasında, oluşan çekirdeğin kütle numarası (A) 4 birim, atom numarası (Z) ise 2 birim azalır.

β^- bozunmasında, oluşan çekirdeğin kütle numarası (A) değişmez, atom numarası (Z) ise 1 artar. Bu nedenle, karmaşık radyoaktif bozunumda sırasında **kütle numarası yalnızca 4'er birimlik adımlarla değişir** ve aynı radyoaktif seride yer alan çekirdeklerin kütle numaraları aynı kalır. Her radyoizotop, **yalnızca bir radyoaktif seriye aittir**.

Dört radyoaktif bozunma dizisi

Tablo 1'de gösterilmiştir. Her bir dizi için başlangıçtaki radyoizotop, yarılanma süresi, dizideki kız çekirdeklerin bozunmaları sonucunda oluşan kararlı çekirdek ve ayrıca her dizide yer alan çekirdeklerin kütle numaralarının nasıl değiştiği verilmiştir.

Radyoaktif seriler	Ana nükleid	Ana nükleidin yarılanma süresi (yıl) (a)	Bozunma serisinin sonunda oluşan kararlı izotop	Serideki çekirdeklerin kütle numarası (A)
Toryum	$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,41 \cdot 10^{10}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$	$4n$
Neptunyum	$^{238}_{93}\text{Np}$	$2,14 \cdot 10^6$	$^{209}_{83}\text{Bi}$	$4n+1$
Uranyum	$^{238}_{92}\text{U}$	$4,47 \cdot 10^9$	$^{206}_{82}\text{Pb}$	$4n+2$
Aktinyum	$^{235}_{92}\text{U}$	$7,04 \cdot 10^8$	$^{207}_{83}\text{Pb}$	$4n+3$

Doğada bulunan dört radyoaktif seriden günümüzde yalnızca üçünün radyoizotopları doğal olarak bulunmaktadır. ^{238}Np ve tüm bozunma ürünlerinin yarılanma sürelerinin Dünya'nın yaşına kıyasla kısa olması nedeniyle, günümüzde bu seriye ait radyoizotopların hiçbiri doğada bulunmamaktadır. Bilim insanları bu seriyi yapay olarak oluşturmuştur. Tablonun son sütununda verilen kütle numarası biçimleri ($4n$, $4n+1$, $4n+2$ ve $4n+3$), Çözümlü Örnek 1'de gösterildiği gibi, belirli bir radyoizotopun hangi radyoaktif seriye ait olduğunu belirlememize yardımcı olur.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Doğal bir cevher örneğinin analizinde aşağıdaki üç radyoizotop tespit edilmiştir:

a) $^{226}_{88}\text{Ra}$ b) $^{228}_{90}\text{Th}$ c) $^{219}_{86}\text{Rn}$. Her bir radyoizotopun hangi radyoaktif aileye ait olduğunu belirleyin.

Çözüm:

Her bir izotopun hangi radyoaktif seriye ait olduğunu belirlemek için, kütle numarasının nasıl yazılabileceğini belirlememiz gerekir. Kütle numarası $4n$ şeklinde yazılabiliyorsa, radyoizotop Toryum serisine aittir; kütle numarası $4n+1$ şeklinde yazılabiliyorsa, Neptunyum serisine aittir. Kütle numarası $4n+2$ olarak yazılabiliyorsa, o radyoizotop uranyum serisine aittir. Son olarak, kütle numarası $4n+3$ olarak yazılabiliyorsa, radyoizotop aktinyum serisine aittir.

a) $^{226}_{88}\text{Ra}$ 'nın atom numarası $226 = 4 \cdot 56 + 2$ şeklinde yazılabilir. Bunun kütle numarası $4n+2$ şeklinde yazılabilirse, bu radyoizotop uranyum serisine aittir.

b) $^{228}_{90}\text{Th}$ 'nin kütle numarası $228 = 4 \cdot 57$ şeklinde yazılabilir. Kütle numarası $4n$ şeklinde yazılabileceğini ve bu da bu radyoizotopun toryum serisine aittir.

c) $^{219}_{86}\text{Rn}$ 'nin kütle numarası $219 = 4 \cdot 54 + 3$ şeklinde yazılabilir. Kütle numarası $4n+3$ şeklinde yazılabilir; bu durumda bu radyoizotop aktinyum serisine.

Karmaşık Radyoaktif Bozunma Yasası

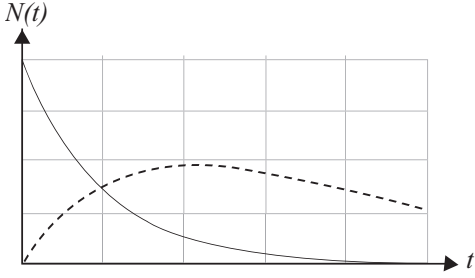
Radyoaktif seride yer alan her bir radyoaktif çekirdek için, basit radyoaktif bozunmada olduğu gibi, **Radyoaktif Bozunma Yasası** bağımsız olarak geçerlidir. Serideki her bir radyoizotopun aktivitesi zamanla üstel olarak değişir. Ancak bu durumda, belirli bir zaman aralığında her bir kız çekirdeğin aktivitesi önce artar, daha sonra ise azalır. Radyoaktif seride yer alan her radyoizotop, kendine özgü özelliklere göre bağımsız olarak bozunur:

- Kendine özgü yarılanma süresi,
- - $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ üstel yasasıyla tanımlanan bozunmanın istatistiksel doğası.

Radyoaktif serilerde, belirli bir kız çekirdeğin bozunmamış çekirdek sayısı iki sürecin etkisiyle değişir. Aynı zaman aralığında çekirdeklerin bir kısmı bozunurken, ana çekirdeğin bozunması sonucunda yeni kız çekirdekler oluşur. Böylece, kız çekirdeklerin sayısı zamanla değişir ve aynı anda iki etkene bağlıdır:

- Ana çekirdeklerin bozunması,
- Kız çekirdeklerin kendi bozunmaları.

Kız çekirdeğin de radyoaktif olduğu durumda, ana ve kız çekirdeklerin sayısının N , zamana (t) bağlı değişimi grafiksel olarak gösterilebilir (Şekil 3). Ana çekirdeklerin sayısı, Radyoaktif Bozunma Yasası'na göre zamanla azalır. Buna karşılık, kız çekirdeklerin sayısı başlangıçta artar; çünkü bunlar ana çekirdeklerin bozunması sonucu oluşurlar. Bir süre sonra kız çekirdeklerin sayısı **en büyük** değerine ulaşır ve ardından azalmaya başlar. Bunun nedeni, bu andan itibaren kız çekirdeklerin bozunma hızının, ana çekirdeklerin bozunmasıyla oluşan yeni kız çekirdeklerin oluşma hızından daha büyük olmasıdır.



Şekil 3. Ana çekirdeklerin (kesiksiz çizgi) ve kız çekirdeklerin (kesikli çizgi) sayısının zamana bağlı değişimi



SORULAR VE ÖDEVLER

Basit ve karmaşık radyoaktif bozunma arasındaki fark nedir?

Toryum-234'ün çekirdeği neden aynı anda hem yavru çekirdek hem de ana çekirdek olarak kabul edilir?

Karmaşık radyoaktif bozunmada kütle numarası neden 4'er birimlik adımlarla değişir?

Ana çekirdeğin yarılanma süresi çok kısa olsaydı, yavru çekirdeklerin eğrisi nasıl görünürdü?

Aşağıdaki radyoizotopların hangi radyoaktif seriye ait olduğunu belirleyin: ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{219}Rn , ^{237}Np , ^{233}Pa , ^{210}Po , ^{228}Ac , ^{223}Ra .

4.10. Çekirdeğin bağlanma enerjisi

Atom çekirdeği, proton ve nötronlardan oluşur (nötron içermeyen ^1_1H çekirdeği hariç). Bu parçacıklar tek tek ele alındığında, her birinin belirli bir kütlesi vardır. Bu nedenle, atom çekirdeğinin kütesinin, onu oluşturan proton ve nötronların kütlelerinin toplamına eşit olmasını beklemek doğaldır. Ancak, deneyler bunun böyle olmadığını ortaya koymuştur: **çekirdeğin kütlesi, bağlanmamış proton ve nötronların kütlelerinin toplamından daha azdır.**

“Çekirdeğin, kendisini oluşturan parçaların toplamından daha küçük bir kütleyle sahip olması” sorusu bizi önemli bir fiziksel kavrama, yani Einstein'ın kütle ve enerji arasındaki eşdeğerlik ilkesine götürür. Atom fiziğinde bu tür bir olguyla daha önce karşılaşmıştık. Serbest bir elektron, bir protona bağlanarak bir hidrojen atomu oluşturduğunda, foton şeklinde enerji yaymak zorundadır. Yayılan enerji miktarı, elektronun bağlandığı enerji seviyesine bağlıdır. Elektron en düşük enerji seviyesine bağlanırsa, $E_\gamma = 13,6 \text{ eV}$ enerjili bir kuantum yayar. **Hidrojen atomunun kütlesi, Einstein'ın $\Delta m_a = E_\gamma / c^2$ ilkesine göre, serbest bir proton ve serbest bir elektronun toplam kütesinden daha küçüktür.** Aynı sonuç, serbest nükleonlardan bir çekirdeğin oluşumu için de geçerlidir: **bir bağlı durum oluştuğunda, sistem daha kararlı bir duruma geçer. Bu durumun enerjisi daha düşüktür. Fazla enerji serbest bırakılmalıdır ve bu enerji salınımının sonucu olarak çekirdeğin kütlesi, bağlanmamış nükleonların kütesinden daha azdır.**

Bir çekirdek oluştuğunda sistemden salınan enerjiye **çekirdeğin bağlanma enerjisi** denir. Bu enerjinin salınması, protonların etkileştiği güçlü elektrostatik itme kuvvetine rağmen çekirdeklerin kompakt ve kararlı sistemler olarak var olmalarını sağlar. Çekirdeğin tamamen serbest protonlara ve nötronlara bozunması için çekirdeğe aynı miktarda enerji sağlanmalıdır.

Kütle kusuru Δm , serbest nükleonların kütleleri toplamı ile bu nükleonların oluşturduğu çekirdeğin kütlesi arasındaki farktır. Z proton ve N nötrondan (kütle numarası A) oluşan bir çekirdek için kütle kusuru aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{j,A,Z}.$$

Burada; m_p : protonun kütlesi,

m_n : nötronun kütlesi,

$m_{j,A,Z}$: çekirdeğin kütlesidir.

Kütle kusuru, proton ve nötronların çekirdeği oluştururken kütlelerinin bir kısmının enerjiye dönüşmesinin bir ölçüsüdür. Kütle kusuru ile çekirdeğin bağlanma enerjisi arasındaki ilişki, Einstein'ın kütle-enerji eşdeğerliği ilkesi ile ifade edilir: $E = mc^2$, burada c , boşluktaki ışık hızıdır.

Bir atom çekirdeği için bağlanma enerjisi, $B(A, Z)$ veya $B({}_Z^AX)$ ile gösterilir ve **kütle kusuru** kullanılarak aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$B(A, Z) = \Delta m c^2 = (Zm_p + Nm_n - m_{j,A,Z})c^2,$$

Bu denklemdeki kütleler kilogram cinsinden ifade edilirse, bağlanma enerjisi joule (J) cinsinden elde edilir. Bilimde, çekirdeklerin (veya atomların) kütleleri çoğunlukla birleşik atom kütleleri u cinsinden ifade edilir, öyle ki

$$1u = 931,49 \frac{\text{MeV}}{c^2}.$$

Bu şekilde, bağlanma enerjisi kolayca MeV cinsinden ifade edilir.

Nükleer fizikte, çekirdeklerin kütleleri çoğu zaman doğrudan verilmez; bunun yerine atomların kütleleri bilinir. Bu nedenle, bağlanma enerjisi hesaplanırken genellikle atom kütleleri kullanılır.

$m_a({}^1\text{H})$ sembolü, bir proton ve bir elektrondan oluşan hidrojen-1 atomunun atom kütlelerini gösterir. Protonun kütlesi, yaklaşık olarak hidrojenin atom kütlesi ile elektronun kütlesi arasındaki fark olarak ifade edilebilir. Elektronun bağlanma enerjisi, çekirdek enerjilerine kıyasla çok küçük olduğu için ihmal edilir. Benzer şekilde, $m_{a,A,Z}$ sembolü, kütle numarası A ve atom numarası Z olan, Z elektron içeren atomun atom kütlelerini belirtir. Z proton ve A nükleon içeren bir atomun çekirdeğinin kütlesi, yine elektronların bağ enerjisi göz ardı edilerek, atomun kütlesi ile elektronların kütleleri arasındaki fark olarak düşünülebilir. Elektronlar hem hidrojenin atom kütlelerine hem de incelenen atomun atom kütlelerine katkıda bulundukları için, çıkarma işlemi sırasında bu katkı birbirini ortadan kaldırır. Dolayısıyla, bağlanma enerjisi için yukarıdaki denklemden yararlanarak aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

$$B(A, Z) = (Z m_a({}^1\text{H}) + N m_n - m_{a,A,Z})c^2.$$

İkinci denklem, atomların kütleleri biliniyorsa çekirdeklerin bağ enerjilerinin hesaplanmasına olanak tanır; nükleer teknolojide atomların kütleleri, çekirdeklerin kütlelerine göre daha kolay ölçülebilir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Döteryumun ${}^2_1\text{H}$ kütle eksikliği ve bağlanma enerjisini hesaplayınız.

Verilenler: $m_a({}^1\text{H}) = 1,007825u$ $m_n = 1,008665u$ $m_a({}^2\text{H}) = 2,014102u$ $1u = 931,49 \text{ MeV} / c^2$	Çözüm: Deuteriumun $Z = 1$ proton ve $N = 1$ nötron vardır. Atom kütleleri kullanıldığında, kütle eksikliği şu şekilde hesaplanır: $\Delta m = m_a({}^1\text{H}) + m_n - m_a({}^2\text{H}).$ Değiştirerek: $\Delta m = (1,007825 + 1,008665 - 2,014102)u = 0,002388u.$ O halde, bağlanma enerjisi şöyledir: $B({}^2_1\text{H}) = \Delta m c^2 = 2,224 \text{ MeV}.$ Dolayısıyla, döteryum oluşumu sırasında açığa çıkan enerji yaklaşık olarak 2,224 MeV; çekirdeğin tamamen bir proton ve bir nötrona bozunması için de aynı enerjinin sağlanması gerekir.
İstenen: $\Delta m - ?$, $B({}^2_1\text{H}) - ?$.	

Özgül bağlanma enerjisi

Özgül bağlanma enerjisi (ϵ), nükleon başına düşen bağlanma enerjisi olup, çekirdeğin toplam bağlanma enerjisinin nükleon sayısı (A)'ya bölünmesiyle hesaplanır:

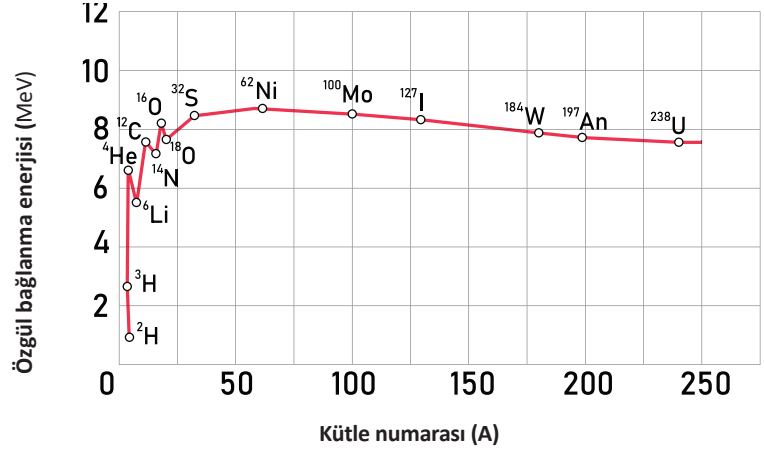
$$\epsilon = \frac{B(A, Z)}{A}.$$

Özgül bağlanma enerjisi, çekirdekten bir nükleonu ayırmak için gereken ortalama enerjinin bir ölçüsüdür. "Ortalama enerji" ifadesi kullanılır; çünkü bir protonu ya da bir nötronu çekirdekten ayırmak için gereken enerji her zaman aynı değildir.

Bağlanma enerjisi $B(A, Z)$ genellikle MeV cinsinden ifade edildiğinden, özgül bağlanma enerjisi ε de MeV cinsinden ifade edilir. (Burada A boyutsuz bir büyüklüktür.

Özgül bağlanma enerjisi, farklı büyüklükteki çekirdeklerin kararlılıklarının karşılaştırılmasına olanak sağlar. Genel olarak, özgül bağlanma enerjisi ne kadar büyükse, nükleonlar çekirdeğe o kadar güçlü bağlanmıştır ve çekirdek o kadar karardır.

Şekil 1, özgül bağlanma enerjisi ε 'nin kütle numarası A 'ya bağlılığını göstermektedir. Eğri önce artar (hafif çekirdeklerde küçük salınımlarla), orta-ağır çekirdeklerde maksimuma ulaşır ve ardından ağır çekirdeklerde daha hızlı bir şekilde azalır.



Dolayısıyla, özgül bağlanma enerjisinin grafiği, her bir çekirdeğin kararlılığı için mutlak bir kural değil, genel bir eğilim gösterir. Örneğin, döteryum çekirdeği çok düşük bir özgül bağlanma enerjisine sahip olmasına rağmen kararlıdır. Buna karşılık, ${}_{92}^{238}\text{U}$, çekirdeği önemli ölçüde daha yüksek özgül bağlanma enerjisine sahip olmasına rağmen radyoaktiftir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

a) ${}^4_2\text{He}$ б) ${}^{62}_{28}\text{Ni}$ в) ${}^{238}_{92}\text{U}$ и в) ${}^{238}_{92}\text{U}$. çekirdekleri için kütle kusurunu, bağlanma enerjisini ve özgül bağlanma enerjisini hesaplayınız.

Hesaplamalarda, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{62}_{28}\text{Ni}$ и ${}^{238}_{92}\text{U}$.

Verilen:

$$m({}^1_1\text{H}) = 1,00782503 \text{ u}$$

$$m_n = 1,00866491 \text{ u},$$

$$1 \text{ u} = 931,4941 \text{ MeV}/c^2.$$

$$m({}^4_2\text{He}) = 4,0026033 \text{ u}$$

$$m({}^{62}_{28}\text{Ni}) = 61,928345 \text{ u}$$

$$m({}^{238}_{92}\text{U}) = 238,05079 \text{ u}$$

İstenen:

$$\text{a) } \Delta m({}^4_2\text{He}) - ?,$$

$$B({}^4_2\text{He}) - ?,$$

$$\varepsilon({}^4_2\text{He}) - ?$$

$$\text{б) } \Delta m({}^{62}_{28}\text{Ni}) - ?,$$

$$B({}^{62}_{28}\text{Ni}) - ?,$$

$$\varepsilon({}^{62}_{28}\text{Ni}) - ?$$

$$\text{в) } \Delta m({}^{238}_{92}\text{U}) - ?,$$

$$B({}^{238}_{92}\text{U}) - ?,$$

$$\varepsilon({}^{238}_{92}\text{U}) - ?$$

Çözüm:

Her bir çekirdek için kütle kusuru bağıntısını kullanırsak:

$$\Delta m({}^4_2\text{He}) = Zm({}^1_1\text{H}) + (A - Z)m_n - m({}^4_2\text{He}) = 2m({}^1_1\text{H}) + 2m_n - m({}^4_2\text{He}) = 0,030 \text{ u},$$

$$\Delta m({}^{62}_{28}\text{Ni}) = Zm({}^1_1\text{H}) + (A - Z)m_n - m({}^{62}_{28}\text{Ni}) = 28m({}^1_1\text{H}) + 34m_n - m({}^{62}_{28}\text{Ni}) = 0,585 \text{ u},$$

$$\Delta m({}^{238}_{92}\text{U}) = Zm({}^1_1\text{H}) + (A - Z)m_n - m({}^{238}_{92}\text{U}) = 92m({}^1_1\text{H}) + 146m_n - m({}^{238}_{92}\text{U}) = 1,934 \text{ u}.$$

Her bir çekirdeğin bağlanma enerjisi:

$$B({}^4_2\text{He}) = \Delta m({}^4_2\text{He})c^2 = 28,296 \text{ MeV},$$

$$B({}^{62}_{28}\text{Ni}) = \Delta m({}^{62}_{28}\text{Ni})c^2 = 545,262 \text{ MeV},$$

$$B({}^{238}_{92}\text{U}) = \Delta m({}^{238}_{92}\text{U})c^2 = 1801,689 \text{ MeV}.$$

Her bir çekirdeğin özgül bağlanma enerjisi ise:

$$\varepsilon({}^4_2\text{He}) = \frac{B({}^4_2\text{He})}{4} = 7,074 \text{ MeV},$$

$$\varepsilon({}^{62}_{28}\text{Ni}) = \frac{B({}^{62}_{28}\text{Ni})}{62} = 8,795 \text{ MeV},$$

$$\varepsilon({}^{238}_{92}\text{U}) = \frac{B({}^{238}_{92}\text{U})}{238} = 7,570 \text{ MeV}.$$

Sonuçlardan, uranyum radyoizotopunun özgül bağlanma enerjisi helyum çekirdeğinin özgül bağlanma enerjisinden daha büyük olmasına rağmen, kararlı olmadığı sonucuna varılabilir.



ÜNLÜ BİLİM İNSANI



Maria Goeppert-Mayer (1906-1972), 20. yüzyılın en önemli teorik fizikçilerinden biri ve nükleer fizikğin gelişiminde kilit rol oynayan bilim insanlarından biridir. Katowice'de (günümüzde Polonya sınırları içinde) doğmuş, Göttingen Üniversitesi'nde fizik öğrenimi görmüş ve 1930 yılında Max Born'un danışmanlığında doktorasını tamamlamıştır.

Kariyerinin büyük bir bölümünde, dönemin toplumsal ve kurumsal engelleri nedeniyle resmî bir akademik kadroda görev alamamış olmasına rağmen bilimsel araştırma-

larını sürdürmüş ve nükleer fiziğe önemli katkılarda bulunmuştur.

En büyük bilimsel başarısı, Hans Jensen ile paralel olarak ve bağımsız bir şekilde geliştirdiği atom çekirdeğinin kabuk modelidir. Bu model sayesinde, çekirdekteki nükleonların (protonlar ve nötronlar), atomdaki elektronların elektron kabuklarında dizilmesine benzer biçimde, belirli enerji düzeylerinde yer aldığı gösterilmiştir. Model, özellikle kararlı çekirdeklere karşılık gelen "sihirli sayıları" başarıyla açıklamaktadır.

Bu modelin temel unsurlarından biri, nükleonlar arasındaki spin-yörünge etkileşiminin ortaya konmasıdır. Bu yaklaşım, belirli çekirdeklerin deneysel olarak gözlenen yüksek kararlılığını ilk kez tutarlı bir biçimde açıklamıştır. Bu önemli çalışması nedeniyle Maria Goeppert-Mayer, 1963 yılında Hans Jensen ve Eugene Wigner ile birlikte Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüştür. Böylece, Marie Curie'den sonra Nobel Fizik Ödülü'nü kazanan ikinci kadın olmuştur.



DAHA FAZLA ÖĞREN

Bağlanma Enerjisi İçin Yarı Ampirik Formül

Bağlanma enerjisi için yarı ampirik formül, diğer adıyla Bethe-Weizsäcker formülü, atom çekirdeğinin sıvı damla modelinin en önemli sonuçlarından biridir.

Bu modele göre atom çekirdeği, kısa menzilli çekici nükleer kuvvetlerin etkisi altında bulunan bir nükleer madde damlası olarak ele alınır. Aynı zamanda protonlar arasında elektrostatik (Coulomb) itme kuvveti de vardır.

Bu modele göre toplam bağlanma enerjisi $B(A, Z)$, kütle numarası A ve atom numarası Z 'ye bağlı çeşitli katkıların toplamı şeklinde ifade edilir.

- **Hacim terimi** ($\alpha_v A$): Nükleon sayısı arttıkça bağlanma enerjisini artırır. Bunun nedeni, her nükleonun güçlü nükleer kuvvet aracılığıyla komşu nükleonlarla etkileşmesidir.

Yüzey terimi ($\alpha_s A^{2/3}$): Bağlanma enerjisini azaltır. Çünkü çekirdeğin yüzeyindeki nükleonların etkileşebildiği komşu nükleon sayısı daha azdır.

Coulomb terimi ($\alpha_c Z(Z-1) / A^{1/3}$): Protonlar arasındaki elektrostatik itme nedeniyle bağlanma enerjisini azaltır. Bu etki atom numarası Z arttıkça büyür.

Asimetri terimi ($\alpha_{as} (A-2Z)^2 / A$): Nötron sayısının proton sayısından farklı olduğu çekirdeklere bağlanma enerjisini azaltır.

Eşleşme (pairing) terimi (δ): Proton ve nötron sayıları çift olan çekirdeklerin, tek sayıda nükleon içeren veya hem proton hem de nötron sayıları tek olan çekirdeklere göre daha kararlı olmasını dikkate alır.

Eşleşme terimi;

- proton ve nötron sayıları çift olan çekirdekler için pozitif değer,
- tek kütle numarasına (A) sahip çekirdekler için sıfır,
- proton ve nötron sayıları tek olan çekirdekler için ise negatif değer alır.

Formül genel olarak aşağıdaki şekilde yazılır:

$$B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_{as} \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta(A, Z)$$

Burada; a_v, a_s, a_c, a_{as} ampirik katsayılar, $\delta(A, Z)$ ise eşleşme (pairing) terimidir.

Katsayıların sayısal değerleri şöyledir:

$a_v = 15,8 \text{ MeV}$, $a_s = 18,3 \text{ MeV}$, $a_c = 0,71 \text{ MeV}$, $a_{as} = 23,2 \text{ MeV}$, $a_p = \pm 11,2 \text{ MeV}$, ve $a_p = 0$ (A tek sayıdır).

Belirli bir kütle numarası A için, bu formül kullanılarak hangi çekirdeğin en kararlı olduğu belirlenebilir. Çekirdeğin kütle numarasının bağlanma enerjisiyle ilişkili olduğu göz önüne alındığında, kütle numarası A olan en kararlı çekirdeğin proton sayısı Z_0 'ın yaklaşık olarak aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabileceği gösterilebilir:

$$Z_0(A) \approx \frac{A}{2 + \left(\frac{a_c}{2a_{as}} \right) A^{2/3}}.$$

Uygulamalarda yapılan hesaplamalarda, Z_0 'ın ondalıklı bir değer elde edilirse, bu değer en yakın tam sayıya yuvarlanır. Çünkü doğada 56,85 protona sahip çekirdekler bulunmaz.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Bağlı bir durum oluştuğunda, sistemin "daha düşük enerjili" bir duruma geçmesi ne anlama gelir?
2. Bir çekirdeğin bağlanma enerjisinin ne olduğunu ve bunun neden kararlılığın bir ölçüsü olduğunu kendi kelimele-
rinizle açıklayın.
3. Farklı çekirdeklerin kararlılığını karşılaştırırken, neden sadece toplam bağlanma enerjisi yerine özgül bağlanma
enerjisi kullanılır?
4. Yüksek bir özgül bağlanma enerjisi, çekirdeğin kararlı olduğunu neden garanti etmez?
5. 56 nükleondan oluşan bir çekirdeğin özgül bağlanma enerjisi 8,79 MeV'dir.
6. Çekirdeğin bağ enerjisini hesaplayınız.
7. b) Kütle birimlerinde kütle eksikliğini hesaplayınız.
8. c) Çekirdek oluştuğunda nükleon kütlelerinin yüzde kaçının enerji olarak serbest kaldığını hesaplayınız. (Çözüm:
a) 492,24 MeV; b) 0,53 u; c) 0,94 %)

4.11. Nükleer Reaksiyonlar

Önceki derslerde, kararsız bir atom çekirdeğinin **kendiliğinden** başka bir çekirdeğe dönüştüğü süreçler olan radyoaktif bozunmayı ele almıştık. Radyoaktif bozunma, daha kararlı bir çekirdek oluşur ve parçacıklar ile radyasyon yayılır. Radyoaktif bozunma, ısıtma, ışıklandırma veya kimyasal reaksiyonlar gibi dış etkenlerle tetiklenemeyen veya durdurulamayan **doğal bir olgudur**. 1934 yılında, Irène Joliot-Curie ve Frédéric Joliot-Curie nükleer fizikte çığır açan bir keşif yaptılar. Radyoaktivitenin **sadece doğal bir olgu olmak zorunda olmadığını, laboratuvarla yapay olarak da yaratılabileceğini** gösterdiler. Kararlı alüminyum atom çekirdeklerini α -parçacıklarıyla bombardıman ederek, yeni ve kararsız çekirdekler oluşturmayı başardılar. Yeni çekirdekler, α -parçacık kaynağı kaldırıldıktan sonra bile radyoaktif bozunmaya devam etti. Bu olaya **yapay (indüklenmiş) radyoaktivite** denir.

Bu keşifle birlikte ilk kez şu gerçek açıkça anlaşılmış oldu:

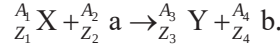
- Atom çekirdeğinin bileşimi değiştirilebilir,
- Doğada bulunmayan radyoizotoplar üretilir,
- Bu, tıp, bilim ve endüstride yeni araştırmaların ve sayısız uygulamanın önünü açmıştır.

Atom çekirdeğinin değiştiği süreçlere **nükleer reaksiyonlar** denir. Bunun nedeni, **başka bir parçacıkla veya başka bir çekirdekle etkileşim** olabilir. Radyoaktif bozunumdan farklı olarak, nükleer reaksiyon kendiliğinden gerçekleşen bir olgu değildir. Bir etkileşimin sonucu olarak meydana gelir. Daha doğrusu,

Nükleer tepkimeler, birbirine çok küçük uzaklıklara kadar yaklaştırılmış parçacıklar arasında gerçekleşir. **Güçlü nükleer kuvvetlerin** etkili olabilmesi için parçacıkların yaklaşık 10^{-15} m mertebesindeki uzaklıklara kadar yaklaşmaları gerekir. Nükleer tepkimelerde de **enerjinin korunumu, momentumun korunumu, elektrik yükünün korunumu ve nükleon sayısının korunumu** yasaları geçerlidir. Bu yasalar, radyoaktif bozunmalarda olduğu gibi uygulanır. Böylece, tepkime sonucunda oluşan ürünler doğru şekilde belirlenebilir ve bir nükleer tepkimenin gerçekleşip gerçekleşmeyeceği analiz edilebilir.

Kimyadaki gibi, tepkimeye giren maddelere **reaktanlar**, tepkime sonunda oluşan maddelere ise ürünler denir. Nükleer tepkimeler en basit biçimde, **çekirdek düzeyinde gerçekleşen parçacık çarpışmaları** olarak düşünülebilir. Bu nedenle reaktanlardan biri **mermi parçacık (projectile)**, diğeri ise **hedef parçacık (target)** olarak adlandırılır. Bir parçacık, aynı zamanda **bir atom çekirdeği** de olabilir.

Genellikle **hedef parçacık**, daha büyük kütleli olan veya çarpışmadan önce durgun durumda bulunan parçacıktır. Daha önce olduğu gibi, bilinmeyen elementlerin çekirdekleri A_ZX ve A_ZY ile gösterilir. Kimliği bilinmeyen parçacıklar ise benzer şekilde A_Za ve A_Zb ile gösterilir. Buna göre genel bir nükleer tepkime şu şekilde yazılabilir:



Bir nükleer tepkimeye örnek olarak aşağıdaki tepkime verilebilir: ${}^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$.

Bu tepkime, döteryum ile trityum çekirdeklerinin birleşerek helyum-4 çekirdeği ve bir nötron oluşturduğu bir füzyon tepkimesidir.

Nükleer reaksiyonların sınıflandırılması

Nükleer reaksiyonlar,

Atıcı parçacığın türüne ve atıcı parçacık ile hedef çekirdek arasındaki etkileşime göre sınıflandırılır. **Başlıca birkaç nükleer reaksiyon türü vardır.**

1. Nötronlarla gerçekleşen nükleer reaksiyonlar

Nötronlar, özellikle etkili atıcı parçacıklardır. Elektrik yükü taşımadıkları için Coulomb itme kuvvetinden etkilenmezler. Bu nedenle çekirdeğe kolayca nüfuz eder ve nükleer dönüşümleri başlatırlar. Bu tür reaksiyonlar, nükleer reaktörlerde ve nötron aktivasyon analizinde yaygın olarak kullanılır. Bu reaksiyonlarda, çekirdeğin bir nötronu yakalaması sonucunda radyoaktif bir izotop oluşabilir.

Örnek: ${}^{59}_{27}Co + n \rightarrow {}^{60}_{27}Co + \gamma$.

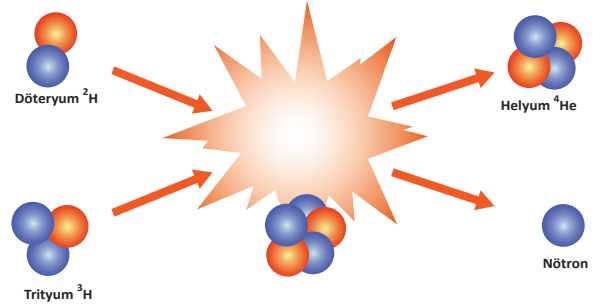
Yüklü parçacıklarla (protonlar ve α -parçacıkları) reaksiyonlar

Mermi parçacığı (projectile) yüklü ise, **çekirdeğe yaklaşabilmesi için** Coulomb itme kuvvetini yenebilecek kadar büyük bir kinetik enerjiye sahip olması gerekir. **Güçlü nükleer kuvvet ancak parçacıklar yaklaşık 10^{-15} m mertebesindeki uzaklıklara kadar birbirine yaklaştığında etkili olabilir.**

Örnek: ${}^{18}_8O + {}^1_1p \rightarrow {}^{18}_9F + {}^1_0n$.

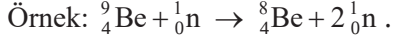
3. Saçılma tepkimeleri

Saçılma tepkimelerinde **mermi parçacık (projectile)**, hedef çekirdekte kalıcı olarak tutulmaz. Mermi parçacık, esnek olarak saçılabilir ya da enerjisinin bir kısmını çekirdekteki nükleonlara aktarabilir; bu nükleonlar daha sonra çekirdekten yayılır. Buna örnek olarak, berilyum ile gerçekleşen ve bir nötronla bombardı-



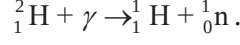
Şekil 1. Bir nükleer reaksiyon örneği

man sonucunda iki nötronun yayıldığı tepkime verilebilir. Bu özellik, nötron sayısını çoğaltmak (çoğaltılmış nötron üretmek) amacıyla kullanılabilir.



4. Fotonükleer reaksiyonlar (γ -uyarılı reaksiyonlar)

Bir çekirdek, yüksek enerjili bir γ fotonunu soğurduğunda bir nükleon yayabilir. Bu tür bir reaksiyona örnek olarak şu reaksiyon verilebilir:



Nükleer reaksiyon enerjisi

Nükleer fizikte, bir **nükleer reaksiyonun enerjisi** incelenirken özellikle şu sorular önem taşır:

Enerji açığa çıkar mı, yoksa

Reaksiyonun gerçekleşmesi için dışarıdan **enerji verilmesinin** gerekip gerekmediği.

Radyoaktif bozunmalarda olduğu gibi, "enerji" terimi, $E = mc^2$ ilişkisine göre parçacıkların kütlesiyle ilişkili enerjileri de içeren **toplam enerjiyi** ifade eder.

Bir nükleer reaksiyonun enerjisi, Q değeri olarak adlandırılan büyüklükle tanımlanır. Bu değer, reaksiyon öncesi ve sonrası parçacıkların enerjileri arasındaki farkı temsil eder. Q değeri, reaktiflerin ve ürünlerin kütlelerinden hesaplanır: $Q = \left(m_{\text{reaktanlar}} - m_{\text{ürünler}} \right) c^2$.

Q değeri pozitif veya negatif olabilir ve bunun açık bir fiziksel anlamı vardır:

$Q > 0$ ise, reaksiyon **ekzotermiktir**. Reaksiyon sırasında enerji açığa çıkar ve bu enerji, ürünlerin kinetik enerjisine dönüştürülür.

$Q < 0$ ise, reaksiyon **endotermiktir**. Reaksiyonun gerçekleşmesi için, fırlatılan parçacığın Coulomb itme kuvvetinin etkisini aşacak kadar yeterli başlangıç kinetik enerjisine sahip olması gerekir. Her iki durumda da, enerjinin reaksiyon ürünleri arasında nasıl paylaşılacağını belirleyen momentumun korunumu yasası geçerlidir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Genel olarak bir nükleer reaksiyonda ne kadar enerji açığa çıkar?

Çözüm:

Aşağıdaki reaksiyonu ele alalım: ${}^A_1\text{X} + {}^A_2\text{a} \rightarrow {}^A_3\text{Y} + {}^A_4\text{b}$. Enerjinin korunumu yasasına göre, reaksiyona giren taneciklerin toplam enerjisi, reaksiyon sonucunda oluşan ürünlerin toplam enerjisine eşittir. Bu durum $E_1 = E_2$, şeklinde ifade edilir. Burada E_1 , reaktiflerin toplam enerjisini; E_2 ise ürünlerin toplam enerjisini göstermektedir. Her bir taneciğin toplam enerjisi, durgun kütle enerjisi ile kinetik enerjisinin toplamına eşittir $E = mc^2 + E_k$. Bu ifade enerji korunumu denkleminde yerine yazılırsa,

$$m_1c^2 + m_2c^2 + E_{k,X} + E_{k,a} = m_3c^2 + m_4c^2 + E_{k,Y} + E_{k,b},$$

eşitliği elde edilir. Burada m_1 , m_2 , m_3 , ve m_4 sırasıyla ${}^A_1\text{X}$, ${}^A_2\text{a}$, ${}^A_3\text{Y}$ ve ${}^A_4\text{b}$ taneciklerinin kütleleridir.

Denklem düzenlenerek durgun kütle enerjileri bir tarafta, kinetik enerjiler ise diğer tarafta toplanır:

$$(m_1 + m_2 - m_3 - m_4)c^2 = (E_{k,Y} + E_{k,b}) - (E_{k,X} + E_{k,a}).$$

Sol taraftaki ifade, reaksiyonun **Q değeri** olarak adlandırılır ve $Q = (m_X + m_a - m_Y - m_b)c^2$ şeklinde tanımlanır. Buna göre, reaksiyonun Q değeri, ürünlerin toplam kinetik enerjisi ile reaktiflerin toplam kinetik enerjisi arasındaki fark olarak da ifade edilebilir:

$$Q = (m_{k,Y} + m_{k,b}) - (E_{k,X} + m_{k,a}).$$



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

1934 yılında Joliot-Curie, alüminyuma α parçacıkları bombardımanı uygulandığında radyoaktif fosfor oluştuğunu göstermiştir: ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + {}_0^1\text{n}$,

- a. Reaksiyonun **Q değeri**ni hesaplayınız. Nükleer reaksiyonda yer alan reaktiflerin ve ürünlerin bağlanma enerjileri aşağıdaki gibidir: $B({}_{13}^{27}\text{Al}) = 224,95 \text{ MeV}$, $B({}_2^4\text{He}) = 28,30 \text{ MeV}$, $B({}_{15}^{30}\text{P}) = 252,20 \text{ MeV}$, $B({}_0^1\text{n}) = 0 \text{ MeV}$ Alfa parçacığının kinetik enerjisi ise $E_{k,\alpha} = 5,0 \text{ MeV}$ olarak verilmiştir.
- b. Alüminyum çekirdeğinin başlangıçta durgun olduğu kabul edilirse, reaksiyon sonucunda oluşan ürünlerin kinetik enerjilerini hesaplayınız.
- c. Nükleer reaksiyon sonucunda oluşan ürünlerin birbirine zıt yönlerde, **180°** açıyla hareket ettiği kabul edilerek ürünlerin kinetik enerjilerini belirleyiniz. Bunun için aşağıdaki kütle değerleri verilmiştir: $m_\alpha = 4,0015 \text{ u}$, $m_n = 1,0087 \text{ u}$, $m_p = 29,9738 \text{ u}$, $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$.

Verilen:

$$B({}_{13}^{27}\text{Al}) = 224,95 \text{ MeV},$$

$$B({}_2^4\text{He}) = 28,30 \text{ MeV},$$

$$B({}_{15}^{30}\text{P}) = 252,20 \text{ MeV},$$

$$B({}_0^1\text{n}) = 0 \text{ MeV}.$$

$$E_{k,\alpha} = 5,0 \text{ MeV}.$$

$$m_\alpha = 4,0015 \text{ u},$$

$$m_n = 1,0087 \text{ u},$$

$$m_p = 29,9738 \text{ u},$$

$$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2.$$

Çözüm:

a) Reaksiyonun **Q değeri**, nükleer reaksiyona giren ve reaksiyon sonucunda oluşan çekirdeklerin kütleleri kullanılarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$Q = (m_{\text{Al}} + m_\alpha - m_p - m_n)c^2.$$

Çekirdeklerin kütleleri doğrudan verilmediğinden, bunları proton ve nötron kütleleri ile bağlanma enerjileri cinsinden yazabiliriz:

$$m_{\text{Al}} = 13m_p + 14m_n - \frac{B({}_{13}^{27}\text{Al})}{c^2},$$

$$m_{j,\alpha} = 2m_p + 2m_n - \frac{B({}_2^4\text{He})}{c^2},$$

$$m_p = 15m_p + 15m_n - \frac{B({}_{15}^{30}\text{P})}{c^2}.$$

Bu ifadeler **Q değeri** denkleminde yerine yazıldığında,

$Q = B({}_{13}^{27}\text{Al}) - (B({}_{15}^{30}\text{P}) + B({}_2^4\text{He})) = -1,05 \text{ MeV}$ elde edilir. **Q** değerinin negatif çıkması, reaksiyonun endotermik olduğunu, yani gerçekleşebilmesi için dışarıdan enerji alması gerektiğini gösterir.

b) Enerjinin korunumu yasasına göre (hedef çekirdeğin başlangıçta durgun olduğu kabul edilirse), $Q = E_{k,p} + E_{k,n} - E_{k,\alpha}$ olur.

Buradan, $E_{k,p} + E_{k,n} = Q + E_{k,\alpha} = 3,95 \text{ MeV}$ sonucu elde edilir.

c) Momentumun korunumu yasasına göre, $\vec{p}_{\text{Al}} + \vec{p}_\alpha = \vec{p}_p + \vec{p}_n$.

Alüminyum çekirdeği başlangıçta durgun olduğundan ve reaksiyon ürünleri birbirine zıt yönlerde 180° hareket ettiğinden, aynı doğrultudaki momentum bileşenleri için $p_\alpha = p_p - p_n$ yazılabilir.

Bir taneciğin kinetik enerjisi ile momentumu arasındaki ilişki

$$p = \sqrt{2mE_k}$$

Bu denklem ile (b) şıkkında bulunan $E_{k,p} + E_{k,n} = 3,95 \text{ MeV}$.

eşitliği birlikte çözüldüğünde,

$$E_{k,n} = 2,70 \text{ MeV},$$

$$E_{k,p} = 1,25 \text{ MeV}$$

sonuçları bulunur.

İstenen:

a) $Q - ?$, b) $E_{k,p} + E_{k,n} - ?$

b) $E_{k,p} - ?$, $E_{k,n} - ?$

Tıpta nükleer reaksiyonlar

Nükleer reaksiyonlar, öncelikle teşhis ve tedavi amaçlı radyoizotopların üretimi ve kullanımı yoluyla tıpta önemli uygulamalara sahiptir. Yaydıkları iyonlaştırıcı radyasyon, gama spektrometrisi gibi yöntemlerle niteliksel ve niceliksel olarak analiz edilebilir; bu da vücuda verilen radyoizotopların izlenmesini ve ölçülmesini sağlar.

Nükleer reaksiyonlar yoluyla, uygun yarılanma süresine sahip radyonüklidler üretilir. Bu tür reaksiyonlar, çoğunlukla siklotronlarda (parçacık hızlandırıcılarında) gerçekleştirilen radyofarmasötik üretiminin temelini oluşturur. Bu radyofarmasötikler, modern nükleer tıbbın önemli bir parçasıdır (Şekil 2).

Radyoterapide yüksek enerjili foton radyasyonu kullanılır. Bu tür tesislerde, radyasyondan korunma planlaması yapılırken radyasyonun nükleer etkileşimleri de dikkate alınmalıdır. Foton saçılma reaksiyonlarında çekirdek değişmez. Ancak bu reaksiyonlar, hastanelerde kullanılan radyasyonun ölçülmesi ve radyasyona karşı uygun korumanın sağlanması açısından önemlidir.



Şekil 2. Radyoizotop üretimi için kullanılan siklotron kompleksi

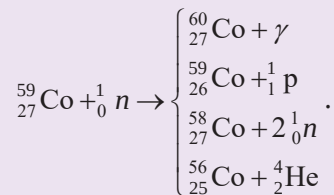


DAHA FAZLA ÖĞREN

Aynı atıcı parçacıkla bombardıman edilen aynı hedef çekirdek, her zaman aynı ürünleri oluşturmaz. Bunun nedeni, nükleer reaksiyonun farklı reaksiyon kanalları üzerinden gerçekleşebilmesi ve farklı ürünler oluşturabilmesidir. Hangi reaksiyon kanalının gerçekleşeceği ise öncelikle atıcı parçacığın enerjisine bağlıdır.

Atıcı parçacık düşük enerjili bir nötron olduğunda, en yaygın olarak çekirdek tarafından yakalanır ve bu sırada bir γ fotonu yayılır. Atıcı parçacığın enerjisi arttıkça, çekirdeğin bir proton, bir α parçacığı veya bir ya da daha fazla nötron yaydığı reaksiyonlar da gerçekleşebilir. Her reaksiyon kanalı için bir enerji eşiği vardır. Bu eşik, reaksiyonun gerçekleşebilmesi için atıcı parçacığın sahip olması gereken en düşük enerji değeridir. Atıcı parçacığın enerjisi bu eşik değerinin altında kalırsa, enerji ve momentumun korunumu yasaları sağlanamayacağı için reaksiyon gerçekleşemez. Bu nedenle, nötronların enerjisi arttıkça yeni reaksiyon kanalları kademeli olarak açılır ve farklı ürünler elde edilir.

Aşağıda, $^{59}_{27}\text{Co}$ çekirdeğinin nötronlarla bombardıman edilmesi sonucunda gerçekleşebilecek farklı nükleer reaksiyonlar, reaksiyonun gerçekleşmesi için nötronun sahip olması gereken enerjiye göre (en düşükten en yükseğe doğru) sıralanmıştır.





ÜNLÜ BİLİM İNSANI

Irène Joliot-Curie (1897-1956), nükleer fiziğin gelişimine önemli katkılarda bulunmuş Fransız bir fizikçi ve kimyagerdir. Nükleer fiziğin bağımsız bir bilim dalı olarak gelişmeye başladığı dönemde, Paris'teki Radyum Enstitüsü'nde çalışmış; burada radyoaktivite üzerine araştırmalar yapmış, radyasyonu ölçmüş ve radyoaktif kaynaklar hazırlamıştır. En önemli keşfi, yapay radyoaktivitenin keşfidir.

1934 yılında eşi Frédéric Joliot-Curie ile birlikte, kararlı atom çekirdeklerinin α parçacıklarıyla bombardıman edilmesi sonucunda, bombardıman sona erdikten sonra bile bozunmaya devam eden yeni ve kararsız çekirdeklerin oluşturulabileceğini göstermiştir.

Bu keşif, radyoaktivitenin yalnızca doğal bir olgu olmadığını, laboratuvar da oluşturulabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, doğada bulunmayan çok sayıda radyoizotopun üretilmesine ve bunların bilim ile tıp alanlarında kullanılmasına olanak sağlamıştır. Yapay radyoaktivitenin keşfi nedeniyle Irène ve Frédéric Joliot-Curie, 1935 yılında Nobel Kimya Ödülü'ne layık görülmüştür. Yaşamı nispeten kısa sürmüş olsa da, çalışmaları nükleer fiziğin gelişimine ve modern nükleer tıbbın ilerlemesine kalıcı katkılar sağlamıştır.



SORULAR VE ÖDEVLER

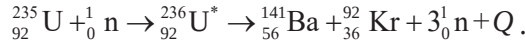
- Yüklü mermilerle gerçekleşen reaksiyonlarda, nükleer reaksiyona neden olmak için neden nötron reaksiyonlarına kıyasla çok daha fazla mermi kinetik enerjisi gerekir?
- Hangi durumlarda reaksiyon ekzotermik, hangilerinde ise endotermik olur? Bu, parçacığın sahip olması gereken minimum kinetik enerji açısından ne anlama gelir?
- Hedefin sabit olduğu bir nükleer reaksiyonda, ürünlerin kinetik enerjilerinin dağılımı neden kütlelerine büyük ölçüde bağlıdır?
- Aynı atıcı parçacıkla bombardıman edilen aynı hedef çekirdek, neden farklı nükleer reaksiyon ürünleri (farklı reaksiyon kanalları) oluşturabilir?
- Aşağıdaki her bir durumda, nükleon sayısı ve yükünün korunumu yasalarını kullanarak bilinmeyen parçacığı/çekirdeği belirleyin. Ayrıca Periyodik Tablo'yu da kullanın.
 - $X + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{24}_{12}\text{Mg} + {}^4_2\text{He}$, b) ${}_4^9\text{Be} + {}^4_2\alpha \rightarrow X + {}^1_0\text{n}$
 - ${}^{16}_8\text{O} + x \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$, d) ${}^{63}_{29}\text{Cu} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{64}_{30}\text{Zn} + x$
- $a + A \rightarrow b + B$ nükleer reaksiyonu için aşağıdaki bilgiler verilmiştir: $m_a + m_A = 15,0000\text{u}$, $m_b + m_B = 14,9985\text{u}$. Reaksiyonun Q değerini hesaplayınız ve sonucu MeV cinsinden ifade ediniz. Reaksiyonun endotermik mi yoksa ekzotermik mi olduğunu belirleyiniz.
Verilen: $1\text{uc}^2 = 931,5\text{MeV}$. Cevap: $Q = 1,40\text{MeV}$.
- ${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$ nükleer reaksiyonu için $Q = 2,79\text{MeV}$ olduğu bilinmektedir. Hedef çekirdeğin başlangıçta durgun olduğu ve nötronun kinetik enerjisinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu kabul edilmektedir.
 - Ürünlerin toplam kinetik enerjisi kaç MeV'dir?
 - Reaksiyon ürünleri aynı doğru üzerinde birbirine zıt yönlerde 180° hareket ediyorsa, her bir ürünün kinetik enerjisini hesaplayınız. Çekirdek kütleleri, $M = A\text{u}$ bağıntısı kullanılarak hesaplanabilir.
Verilen: $1\text{uc}^2 = 931,5\text{MeV}$. Cevap: a) $2,79\text{MeV}$ b) $E_{k,\alpha} = 1,78\text{MeV}$, $E_{k,\text{Li}} = 1,01\text{MeV}$.
- ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{p} \rightarrow X + {}^4_2\text{He}$ nükleer reaksiyonunun Q değeri $Q = -1,64\text{MeV}$ olarak verilmiştir. Hedef çekirdeğin başlangıçta durgun olduğu kabul edilmektedir.

- a) Nükleer reaksiyonun ürün çekirdeğini belirleyin. Protonun sahip olması gereken minimum kinetik enerjinin aşağıdaki ilişki kullanılarak hesaplanabileceğini gösterin $E_{p,min} = -Q(1 - \frac{m_p}{m_{Li}})$ kullanılarak hesaplanabileceğini gösterin.
- b) 2,0 MeV kinetik enerjiye sahip bir proton bu reaksiyonu tetikleyebilir mi? Şu varsayımı yapalım: $m_p/m_{Li} \approx 1/7$ olduğunu varsayalım.

4.12. Fisyon, füzyon ve nükleer reaktörler

Önceki derste gördüğümüz gibi, nükleer reaksiyonlar; bir çekirdeğin başka bir parçacık veya başka bir çekirdekle etkileşime girerek değişime uğradığı süreçlerdir. Bu süreçlerde nükleon sayısının, elektrik yükünün, enerjinin ve momentumun korunumu yasaları geçerlidir. Nükleer reaksiyonları, atıcı parçacığın türüne ve atıcı parçacık ile hedef çekirdek arasındaki etkileşime göre sınıflandırmıştık. Nötronların yer aldığı nükleer reaksiyonlar arasında en önemli süreçlerden biri **fisyondur**. **Fisyon, ağır bir çekirdeğin iki orta kütleli çekirdeğe bölünmesi ve bu sırada birkaç nötronun açığa çıkması olayıdır**. Bu reaksiyon sırasında önemli miktarda enerji açığa çıkar. Nükleer fisyon, nükleer reaktörlerin ve nükleer santrallerde elektrik enerjisi üretiminin temelini oluşturur.

Fisyon, çoğunlukla bir nötronun ağır bir çekirdek (örneğin uranyum veya plütonyum) tarafından soğurulmasıyla başlayan **uyarılmış bir nükleer reaksiyondur**. Nötron elektrik yükü taşımadığından çekirdeğe kolayca girebilir ve onu uyarılmış bir enerji durumuna geçirebilir. Uyarılmış çekirdek kararsız olduğundan, fisyon ürünleri olarak adlandırılan iki daha hafif çekirdeğe bölünür. Bu süreçte ayrıca birkaç serbest nötron da açığa çıkar. Uyarılmış nükleer reaksiyona tipik bir örnek, aşağıdaki fisyon tepkimesidir:

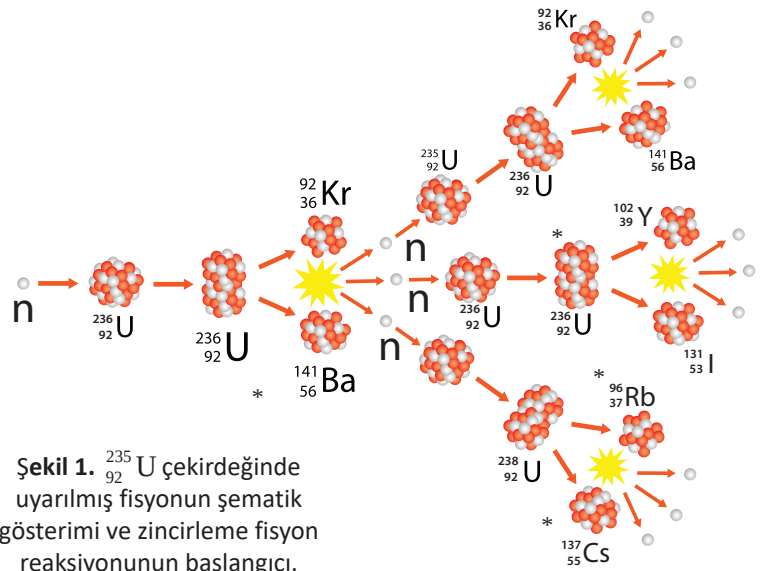


Verilen reaksiyon denklemi, **çekirdek fisyonunun gerçekleşebileceği olası kanallardan yalnızca birini** göstermektedir. Bu durum, uyarılmış ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ çekirdeğinin her zaman aynı fisyon ürünlerine ayrılacağı anlamına gelmez. Farklı fisyon ürün kombinasyonları oluşabilmesine rağmen, fisyon olayının temel özelliği değişmez.

Her fisyon olayında ağır bir çekirdek, **iki orta kütleli çekirdeğe** ayrılır; bununla birlikte **2 veya 3 nötron** açığa çıkar ve **Q** kadar enerji serbest kalır.

Fisyon sırasında açığa çıkan enerji, çekirdeklerin **bağlanma enerjisinden** kaynaklanır. Oluşan fisyon ürünlerinin **bir nükleon başına düşen bağlanma enerjisi**, başlangıçtaki ağır çekirdeğin bir nükleon başına düşen bağlanma enerjisinden daha büyüktür. Bu nedenle, bağlanma enerjisindeki artışa karşılık gelen **enerji farkı**, fisyon ürünlerinin kinetik enerjisi ve elektromanyetik ışıma şeklinde dışarıya verilir.

Dolayısıyla fisyon, sistemin **bir nükleon başına daha düşük bağlanma enerjisine sahip bir durumdan, bir nükleon başına daha yüksek bağlanma enerjisine sahip daha kararlı bir duruma** geçtiği ve bu geçiş sırasında enerji açığa çıkardığı bir nükleer reaksiyondur.



Şekil 1. ${}_{92}^{235}\text{U}$ çekirdeğinde uyarılmış fisyonun şematik gösterimi ve zincirleme fisyon reaksiyonunun başlangıcı.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Yukarıda verilen nükleer reaksiyona göre, bir $^{235}_{92}\text{U}$ çekirdeğinin fisyonunda salınan enerjiyi hesaplayınız. Uranyum çekirdeğinin özgül bağlanma enerjisi 7,59 MeV, baryum ve kripton çekirdeklerinin özgül bağlanma enerjileri ise sırasıyla 8,34 MeV ve 8,60 MeV'dir. Nötronun ve uranyum çekirdeğinin kinetik enerjisini ihmal edin. Çekirdekleri fisyonla uğramış 1 g uranyumdan ne kadar enerji açığa çıkacağını hesaplayınız. Uranyumun mol kütlesi 235 g/mol'dür.

Verilenler:

$$\varepsilon(^{235}_{92}\text{U}) = 7,59 \text{ MeV},$$

$$\varepsilon(^{141}_{56}\text{Ba}) = 8,34 \text{ MeV},$$

$$\varepsilon(^{92}_{36}\text{Kr}) = 8,60 \text{ MeV},$$

$$M_{\text{U}} = 235 \text{ g/mol},$$

$$N_{\text{A}} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

İstenen:

$$Q = ?, E = ?$$

Çözüm:

Q değeri, ürünlerin toplam bağlanma enerjisi ile reaktiflerin toplam bağlanma enerjisi arasındaki fark olarak hesaplanabilir.

$$Q = (m_{\text{U}} + m_{\text{n}} - m_{\text{Ba}} - m_{\text{Kr}} - 3m_{\text{n}})c^2,$$

$$Q = (92m_p + 143m_n - \frac{B(^{235}_{92}\text{U})}{c^2} + m_n - 56m_p - 85m_n + \frac{B(^{141}_{56}\text{Ba})}{c^2} - 36m_p - 56m_n + \frac{B(^{92}_{36}\text{Kr})}{c^2} - 3m_n)c^2,$$

Benzer terimler sadeleştirildiğinde,

$$Q = B(^{141}_{56}\text{Ba}) + B(^{92}_{36}\text{Kr}) - B(^{235}_{92}\text{U}), \text{ elde edilir.}$$

Çekirdeğin bağlanma enerjisi ile nükleon başına düşen bağlanma enerjisi arasındaki ilişki $\varepsilon = \frac{B(A, Z)}{A}$ olduğundan,

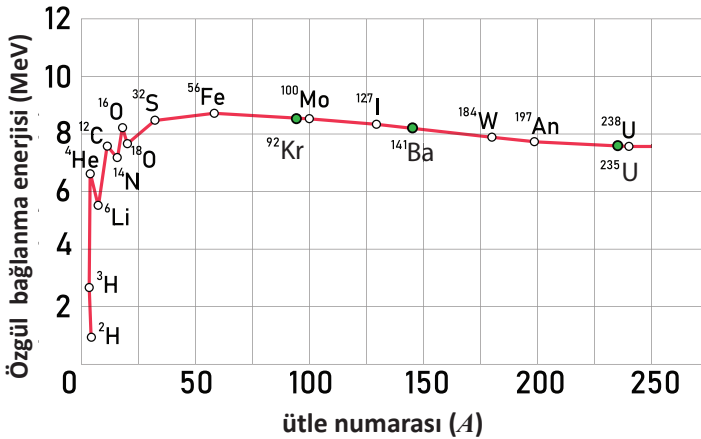
$$Q = 141 \cdot \varepsilon(^{141}_{56}\text{Ba}) + 92 \cdot \varepsilon(^{92}_{36}\text{Kr}) - 235 \cdot \varepsilon(^{235}_{92}\text{U}).$$

$$Q = 141 \cdot 8,34 + 92 \cdot 8,60 - 235 \cdot 7,59 = 183,49 \text{ MeV}$$

Fisyona uğrayan 1 g uranyumdan açığa çıkan enerji: $E = NQ = \frac{m}{M} N_{\text{A}} \cdot Q$

$$E = \frac{1}{235} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 183,49 \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} \quad E = 7,52 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

Bu enerji, ısı değerine bağlı olarak yaklaşık 5 ton linyitin yanmasıyla açığa çıkan enerjiye eşdeğerdir.



Şekil 2. Çekirdeklerin bir nükleon başına düşen bağlanma enerjisi. Fisyon olayında, bir nükleon başına düşen bağlanma enerjisi daha düşük olan $^{235}_{92}\text{U}$ çekirdeği, bir nükleon başına düşen bağlanma enerjisi daha yüksek olan $^{141}_{56}\text{Ba}$ ve $^{92}_{36}\text{Kr}$ çekirdeklerine ayrılır.

Füzyon olayında ise, bir nükleon başına düşen bağlanma enerjisi daha düşük olan ^2_1H ve ^3_1H çekirdekleri birleşerek, bir nükleon başına düşen bağlanma enerjisi daha yüksek olan ^4_2He çekirdeğini oluşturur.

Fisyonun en önemli pratik sonuçlarından biri, **zincirleme reaksiyonun** gerçekleşebilmesidir. Bir fisyon olayında açığa çıkan nötronlar, komşu çekirdeklerde yeni fisyonlara neden olabilir. Ortalama olarak bu nötronlardan en az biri başka bir çekirdekte yeni bir fisyon başlatırsa, süreç kendi **kendini sürdürülebilir**; yani dışarıdan ek nötron sağlanmasına gerek kalmaz.

Zincirleme reaksiyon, önceki bir fisyonun kaç yeni fisyonla yol açtığını gösteren **çoğalma katsayısı** k ile tanımlanır:

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{N_3}{N_2} = \frac{N_4}{N_3} = \dots = \frac{N_n}{N_{n-1}}$$

Burada $N_1, N_2, \dots, N_n$ değerleri, her bir jenerasyonda (kuşakta) meydana gelen fisyon olaylarının sayısını göstermektedir.

Bu büyüklük, çoğalma katsayısı k olarak adlandırılır ve reaksiyonun zincirleme reaksiyon hâline gelip gelmeyeceğini belirlemede önemli bir ölçüttür.

$k < 1$ ise zincir reaksiyonu **sönümlenir**;

$k = 1$ ise, reaksiyon **kritik** durumdadır ve birim zaman başına filyon sayısı sabittir;

$k > 1$ ise, reaksiyon **süperkritik** durumdadır ve patlayıcı bir şekilde ilerler.

Felaketlerin önlenmesi için, nükleer reaktörlerde filyon süreçlerini tetikleyen nötron sayısı sabit olmalıdır, yani $k \approx 1$. Bu durumda, kontrollü ve istikrarlı enerji üretimi sağlanır. Bu kontrol, kontrol çubukları ile reaktördeki nötronların hareketini ve enerjisini etkileyen fiziksel koşullar sayesinde sağlanır. Enerji yönünün yanı sıra, filyonun önemli bir radyolojik yönü de vardır. Filyon parçacıkları çoğunlukla radyoaktiftir ve β^- bozunumu ile γ -emisyonu yoluyla bozunurlar. Bu nedenle, filyon sırasında anlık olarak açığa çıkan enerjiye ek olarak, bozunma ürünlerinden de ilave enerji açığa çıkar. Bu enerjinin açığa çıkışı, filyon durduktan sonra da bir süre devam edebilir; bu husus, güvenlik sistemlerinin tasarımı ve kullanılmış nükleer yakıtın yönetimi sırasında dikkate alınmalıdır.



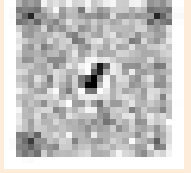
ETKİNLİK 1.

PhET simülasyonu ile zincir reaksiyonu için gerekli koşulların araştırılması

Etkinliğin amacı: Malzemenin izotop bileşiminin oranı (gerekli ^{235}U / ^{238}U) bileşiminin, kendi kendini sürdürebilen bir zincir reaksiyonun gerçekleşme olasılığı, yani çarpım faktörü k üzerinde nasıl bir etki yarattığını araştırmak.

Araç: PhET simülasyonu (Nuclear Fission) "Nükleer Filyon"

<https://phet.colorado.edu/sims/cheerpi/nuclear-physics/latest/nuclear-physics.html?simulation=nuclear-fission>



Bölüm 1. ^{235}U ve ^{238}U 'nun davranışını gözlemlenme

1. Bu simülasyonda, "Zincir Reaksiyonu" sekmesini seçin. (Chain Reaction)
2. Bir adet ^{235}U çekirdeği yerleştirin. Nötron yayıcısındaki kırmızı düğmeye tıklayarak çekirdeğe doğru bir nötron gönderin.
3. Nötron çekirdekle çarpıştıktan sonra simülasyonu duraklatın.
 - Ne gözlemliyorsunuz?
 - Sonuç, Şekil 1'de gösterilen filyon şemasıyla uyuyor mu?
4. Aynı işlemi, bu sefer bir uranyum-238 çekirdeği ile tekrarlayın.
 - Nötron yayıcısını farklı yönlerde yönlendirebilirsiniz.
 - Bir nötron bu çekirdeğe çarptığında ne olur?

Bölüm 2. Malzeme bileşiminin çarpım faktörü k üzerindeki etkisi

1. Bölüm'de, ^{235}U çekirdeğinin filyon sonucu yeni nötronlar saldı ve bu sayede başka filyonlara yol açabileceği belirtilmişti. Dolayısıyla, Zincir reaksiyonunun "tetikleyicisi" olarak ^{235}U 'yu kullanacağız. ^{238}U 'nun çekirdeği kolayca filyona uğramaz; bunun yerine, bir nötronla çarpıştığında onu emer ve ^{239}U çekirdeğine dönüşür. Böylece, yeni filyonlar için kullanılabilir nötron sayısını azaltır. Dolayısıyla, ^{238}U , zincir reaksiyonunu kontrol etmek için kullanılabilir.

Deneyin tamamı boyunca:

Başlangıç anındaki toplam çekirdek sayısı şöyledir: $N_0 = N_0(^{235}\text{U}) + N_0(^{238}\text{U}) = 100$

İki izotopun oranını değiştireceksiniz,

Simülasyonun sağ alt köşesinde gösterilen, filyona uğramış çekirdeklerin yüzdesini ölçeceksiniz,

Çoğalma katsayısını (k) belirleyiniz.

İzlenecek işlem basamakları:

1. Simülasyonda 20 adet ^{235}U çekirdeği ve 80 adet ^{238}U çekirdeği yerleştiriniz.

Nötron kaynağını ^{235}U çekirdeğine yöneltiniz ve simülasyonu başlatınız.

Ne gözlemliyorsunuz?

Fisyona uğrayan çekirdeklerin yüzdesini tabloya kaydediniz.

Çoğalma katsayısının $k < 1$, $k \approx 1$ veya $k > 1$ durumlarından hangisine karşılık geldiğini belirleyiniz.

2. ^{235}U çekirdeklerinin sayısını 10 artırınız, ^{238}U çekirdeklerinin sayısını ise 10 azaltınız.

Aynı işlemleri tekrarlayınız ve elde ettiğiniz sonuçları tabloya yazınız.

3. ^{235}U ile ^{238}U çekirdekleri arasındaki oranı, her seferinde 10'ar adet değiştirerek, $N_0(^{235}\text{U}) = 100$ değerine ulaşıncaya kadar işlemi sürdürünüz.

4. $N_0(^{235}\text{U}) = 100$ olduğunda gerçekleşen sürece ne ad verilir? Bu süreç bir nükleer reaktör için istenen bir durum mudur? Açıklayınız.

$N_0(^{235}\text{U})$	$N_0(^{238}\text{U})$	Fisyona uğramış çekirdekler (%)	$k < 1 / k \approx 1 / k > 1$
20	80	10	$k < 1$
30	70		
40	60		
...			

Bölüm 3. Bir nükleer reaktör için istenen k değerinin belirlenmesi

Kararlı bir zincir reaksiyonda ($k \approx 1$), fisyon sayısı ani bir artış göstermez ve hızla azalmaz.

Amaç, reaksiyonun kontrol altında tutulması ve sürdürülmesidir.

Zincir reaksiyonunun aşağıdaki koşulları sağladığı ^{235}U ve ^{238}U çekirdeklerinin yaklaşık oranını bulun:

Süperkritik duruma geçmez,

ama aynı zamanda patlayıcı hale de gelmez.

Şunu göz önünde bulundurun: kararlı ve kontrollü bir reaksiyon için, bir nesilden diğerine geçen nötron sayısı yaklaşık olarak eşit olmalıdır. Fisyon sırasında, ^{235}U çekirdeği ortalama olarak 2-3 nötron salar. $k \approx 1$ olduğunda, bu nötronlardan sadece birinin yeni bir fisyonla neden olması gerekir; geri kalanlar

ise emilir veya kaybolur. $k \approx 1$ değerine ulaşmak için ^{235}U ile ^{238}U arasındaki yüzde oranı ne olmalıdır?

Cevabınızı simülasyonla kontrol edin.

Nükleer Fisyon Reaktörleri

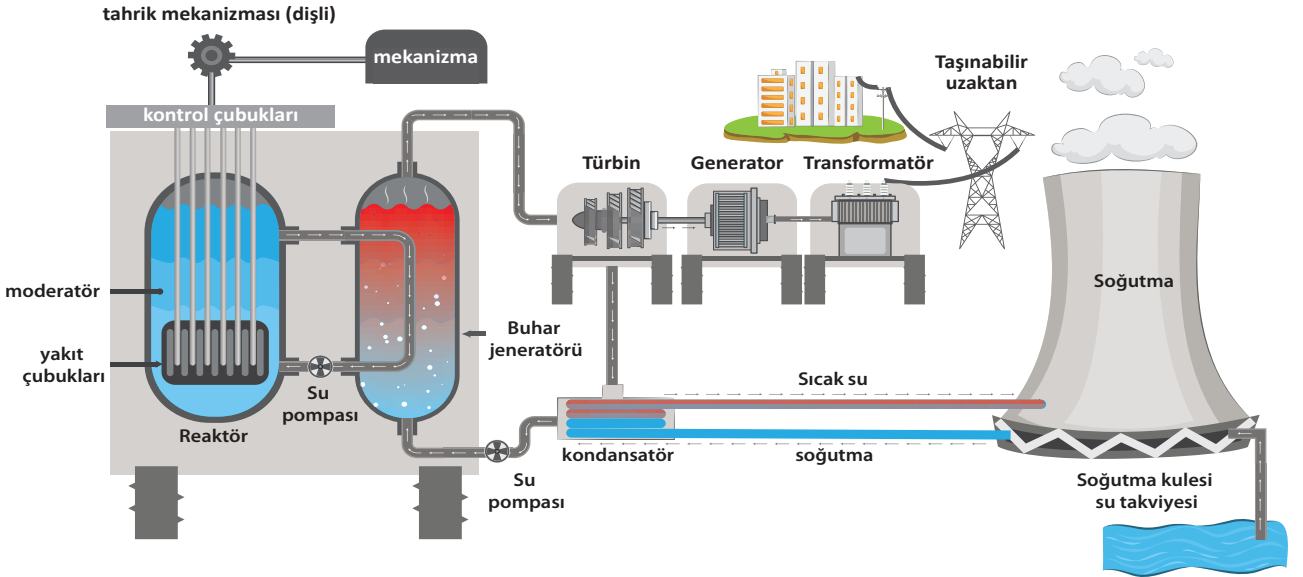
Nükleer fisyon reaktörleri, nükleer fisyonun kontrollü bir şekilde gerçekleştiği cihazlardır; böylece açığa çıkan enerji kademeli olarak ısıya, ardından da elektrik enerjisine dönüştürülür. Reaktörün merkezinde nükleer yakıt bulunur; burada her fisyonla birlikte, enerji, fisyon parçacıklarının kinetik enerjisi ve radyasyon olarak açığa çıkar. Bu enerji, yakıt malzemesi ve çevresinde çok hızlı bir şekilde ısıya dönüştürülür. Reaktörün istikrarlı bir şekilde çalışabilmesi için, kendi kendini sürdüren zincir reaksiyonunun kritik durumda ($k \approx 1$) tutulması gerekir.

Genel olarak, bir fisyon reaktörünün birkaç temel bileşeni vardır. Reaktör çekirdeği, yakıtın bulunduğu kısımdır ve çoğu zaman yakıt çubukları şeklindedir. Yakıtın çevresinde bir moderatör bulunur. Moderatör, nötronları yavaşlatarak (termal nötronlar hâline getirerek) belirli çekirdeklerde fisyon olasılığını artırır. Birçok nükleer reaktörde moderatör olarak sıradan su kullanılır.

Reaktör ayrıca, nötronları verimli bir şekilde emen malzemelerden (örneğin bor veya kadmiyum) yapılmış kontrol çubuklarını da içerir. Bu çubukların çekirdeğe sokulması, fisyona neden olan nötron sayısını azaltır; çıkarılması ise reaksiyonu yoğunlaştırır. Çekirdekten gelen ısı, bir soğutma sistemi vasıtasıyla buhar jeneratörüne aktarılır. Tüm sistem, çevreye radyasyon yayılmasını önleyen koruyucu bir kabuk ve biyolojik kalkanla çevrilidir. Tüm bileşenler Şekil 3'teki şematik diyagramda gösterilmiştir.

Nükleer enerjinin elektriğe dönüştürülmesi, termoelektrik santrallerinkine benzer bir prensiple gerçekleşir. Reaktörden gelen ısı, yüksek basınçlı su buharı üretmek için kullanılır; bu buhar türbini döndürür ve türbin de elektrik jeneratörünü çalıştırır. Türbinden geçen buhar soğutulur, tekrar suya yoğunlaşır ve döngüye geri döner. Bu nedenle reaktör, doğrudan bir elektrik enerjisi kaynağı değil, bir ısı kaynağıdır.

Zincir reaksiyon durdurulduktan sonra bile, filyon ürünlerinin radyoaktif bozunmasından kaynaklanan artık ısıнын reaktör çekirdeğinde kaldığını vurgulamak önemlidir. Bu nedenle, soğutma sistemleri reaktör kapatıldıktan sonra bile çalışmaya devam etmelidir; bu, nükleer reaktörlerin güvenli çalışması için büyük önem taşır.



Şekil 3. Filyon nükleer reaktörlü bir nükleer santralin şematik diyagramı

Nükleer füzyon

Nükleer füzyon, hafif atom çekirdeklerinin birleşerek daha ağır bir çekirdek oluşturduğu ve bu sırada enerji açığa çıkardığı bir tür nükleer reaksiyondur. Enerji açığa çıkmasının temel nedeni fisyondakiyle aynıdır. Ancak bu kez süreç, özgül bağlanma enerjisi eğrisinin hafif çekirdeklere karşılık gelen bölümünde gerçekleşir (Şekil 2).

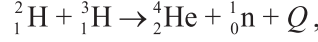
Kütle numarası düşük olan çekirdeklerde, özgül bağlanma enerjisi düşüktür. Bunların birleşmesiyle, daha yüksek özgül bağlanma enerjisine sahip, yani enerji bakımından daha kararlı bir çekirdek oluşur.

Aradaki enerji farkı, nükleer reaksiyon enerjisi Q olarak serbest kalır. Başka bir deyişle, başlangıçtaki çekirdeklerin toplam bağlanma enerjisi, oluşan çekirdeğin bağlanma enerjisinden daha küçüktür.

Doğada, nükleer füzyon yıldızların başlıca enerji kaynağıdır. Güneş ve diğer yıldızlar, bir dizi füzyon reaksiyonu sonucunda enerji üretir. Bu enerji, yıldızın içini ısıtır ve gezegenlere ulaşan ışıının kaynağını oluşturur. Dolayısıyla füzyon, yıldızların evrimini ve kararlılığını sağlayan temel bir süreçtir.

Döteryum ve trityum füzyonu

Dünya'da pratik uygulama için değerlendirilen en önemli füzyon reaksiyonu, döteryum ve trityumun birleşmesidir:



burada Q , açığa çıkan enerjiyi gösterir. Bu reaksiyon, önemli miktarda enerji açığa çıkardığı ve diğer füzyon reaksiyonlarına kıyasla daha düşük bir sıcaklıkta gerçekleştirilebildiği için pratik uygulamalar için özellikle uygundur. Başka olası füzyon reaksiyonları da vardır, ancak bunlar daha katı koşullar gerektirir ve şu anda pratikte gerçekleştirilmesi daha zordur

Dünya'da füzyondan enerji elde etmenin önündeki en büyük zorluk, pozitif yüklü çekirdekler arasında etki eden Coulomb itme kuvvetidir. Çekirdeklerin füzyona girmesi için, güçlü nükleer kuvvetin etkili olduğu çok kısa mesafelerde bir araya getirilmeleri gerekir. Bu da parçacıkların çok yüksek hızlara sahip olmasını gerektirir; yani füzyon malzemesi, son derece yüksek bir sıcaklıkta (on milyonlarca kelvin mertebesinde) plazma durumuna getirilmelidir.

Enerji açısından bakıldığında, füzyonun muazzam bir potansiyeli vardır. Döteryum sudan elde edilebilir ve trityum, lityum ve füzyon reaksiyonu sırasında salınan nötronlar kullanılarak reaktörün içinde üretilebilir. Fisyonun farklı olarak, füzyon reaksiyonu kendiliğinden kontrolsüz bir zincir reaksiyona dönüşmez, çünkü gerekli koşulların sürekli olarak sağlanması gerekir.

Ancak füzyon, radyolojik sorunlardan tamamen muaf değildir. Füzyon reaksiyonlarından kaynaklanan nötronlar, reaktör malzemelerinde radyoizotoplar oluşturabilir; bu nedenle malzeme seçimi ve bileşenlerin yönetimi önemli güvenlik unsurlarıdır. Bu zorluklara rağmen, nükleer füzyon, gelecekteki enerji üretimi için en umut verici seçeneklerden biri olarak kabul edilmektedir.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 2.

İki döteryum çekirdeğinin füzyonu sonucu bir helyum-3 çekirdeği ve bir nötron oluşurken açığa çıkan enerjiyi hesaplayınız. Döteryum çekirdeklerinin kinetik enerjisi ihmal edilebilir. Döteryumun bağ enerjisi 1,112 MeV, helyum-3'ün bağ enerjisi ise 2,573 MeV olarak verilmiştir.

Verilenler:	Çözüm:
$\varepsilon({}^2_1\text{H}) = 1,112 \text{ MeV}$, $\varepsilon({}^3_2\text{He}) = 2,573 \text{ MeV}$	Önceki örnekte uygulanan yöntem izlenerek, reaksiyonun Q değeri aşağıdaki şekilde elde edilir:
Gerekli:	$Q = (2m_{j,H} - m_{j,He} - m_n)c^2,$
$Q - ?$	$Q = B({}^3_2\text{He}) - 2B({}^2_1\text{H}) = 3 \cdot \varepsilon({}^3_2\text{He}) - 2 \cdot 2 \cdot \varepsilon({}^2_1\text{H}) = 3,271 \text{ MeV}.$

Nükleer enerji kullanımının çevresel sonuçları

Nükleer enerjinin çevresel etkileri değerlendirilirken, kullanımının hem yararları hem de riskleri birlikte ele alınmalıdır. Normal çalışma koşullarında, elektrik fosil yakıtların yakılmasıyla üretilmediğinden nükleer santrallerin doğrudan karbondioksit emisyonları çok düşüktür. Nükleer santraller genellikle sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve iklim değişikliğinin hafifletilmesine katkıda bulunabilecek bir teknoloji olarak kabul edilir. Ayrıca, nükleer santraller hava koşullarından bağımsız olarak istikrarlı ve kesintisiz bir elektrik tedariki sağlar; bu da elektrik şebekesinin güvenilirliği açısından önemlidir. Öte yandan, nükleer enerjinin kullanımı belirli çevresel ve güvenlik sorunlarıyla ilişkilidir. Bunların en önemlisi, dikkatli, uzun vadeli ve güvenli bir şekilde depolanması gereken **radyoaktif atıkların** oluşmasıdır.

Ciddi kazalar durumunda radyoaktif kirlenme riski söz konusudur; ancak bu tür kazalar nadirdir ve modern reaktörler yüksek güvenlik standartlarına göre tasarlanmıştır. Ayrıca, nükleer santraller soğutma amacıy-

la büyük miktarda su kullanır. Bu durum, su ekosistemlerinde sıcaklığın artması gibi yerel çevresel etkilere yol açabilir.

Sürdürülebilir elektrik tedariki bağlamında nükleer enerji, genellikle az miktarda yakıttan büyük miktarda enerji üretilmesini sağlayan ve doğrudan sera gazı emisyonları düşük olan bir teknoloji olarak görülür; ancak bu teknoloji, sıkı düzenlemeler, teknik standartlar ve sürekli denetim gerektirir. Gelecekteki enerji sistemindeki rolü, toplumun istikrarlı enerji üretimi ve düşük emisyonları ile atık, güvenlik ve kamuoyunun kabulüyle ilgili zorluklar arasında nasıl bir denge kuracağına bağlıdır. Bu nedenle, nükleer enerjiye yönelik modern yaklaşım; güvenlik teknolojilerinin geliştirilmesini, radyoaktif atıkların sorumlu bir şekilde yönetilmesini ve nükleer enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte değerlendirilmesini esas almaktadır.



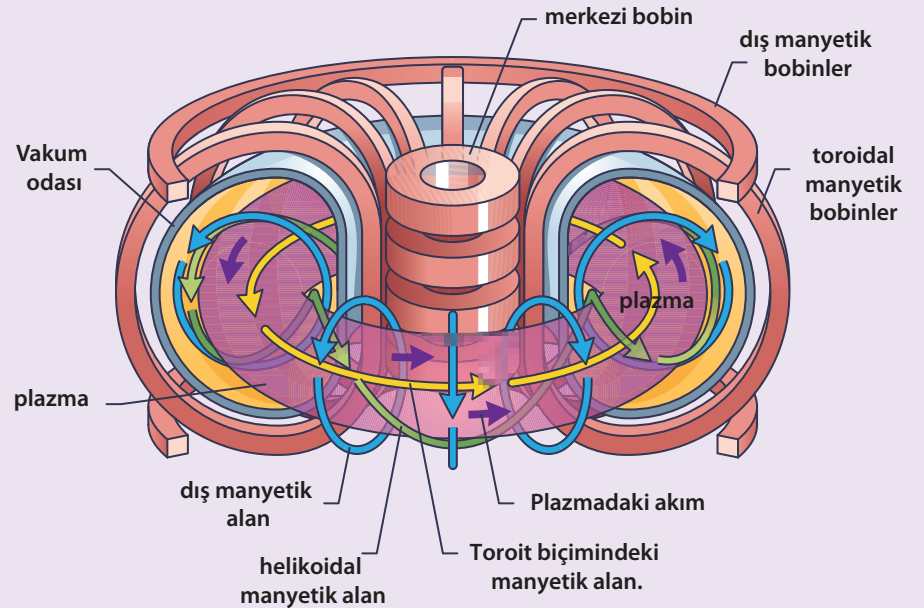
DAHA FAZLA ÖĞREN

Döteryum ve trityumun füzyon reaksiyonunda, açığa çıkan enerjinin büyük kısmı nötronun kinetik enerjisi olarak ortaya çıkar. Bu durum, mühendislik ve güvenlik açısından önemli sonuçlar doğurur. Nötronlar yüksek nüfuz etme gücüne sahiptir, malzemeleri ısıtır ve kararlı çekirdekleri radyoaktif izotoplara dönüştürebilir; bu nedenle füzyon sistemleri, uygun koruma ve nötron hasarına dayanıklı malzemelerle donatılmalıdır.

Yıldızlarda, füzyon koşulları muazzam yer çekimsel sıkıştırma ve maddenin yüksek yoğunluğu sayesinde sağlanır. Dünya'da bu tür bir sıkıştırma elde etmek mümkün olmadığından, plazma başka yöntemlerle yapay olarak oluşturulmalı ve sürdürülmelidir. Ayrıca, füzyon için gerekli koşullar sağlansa bile, reaksiyonların plazmayı ısıtmak ve sürdürmek için harcanan enerjiden daha fazla enerji üretmesi sağlanmalıdır. Bu, füzyon reaktörlerinin enerji başabaş noktasına ulaşabilmesi için temel bir koşuldur.

Bu zorluklar nedeniyle, Dünya'da kontrollü füzyon araştırmaları iki ana yönde ilerlemektedir. İlk yön, plazmanın manyetik hapsedilmesidir. Plazma yüklü parçacıklardan oluştuğu için güçlü manyetik alanlar tarafından hapsedilebilir ve yönlendirilebilir. Bu amaçla, plazmanın vakum odasının duvarlarından ayrı tutulduğu tokamak (şekil 4) ve stellarator gibi cihazlar kullanılır. Bu, plazmanın ani soğumasını önler ve füzyon reaksiyonlarının yeterince uzun süre devam etmesini sağlar. İkinci yaklaşım ise plazmanın ataletle hapsedilmesidir; bu yöntemde, küçük bir füzyon yakıtı topacı, güçlü lazer darbeleriyle çok hızlı bir şekilde sıkıştırılır. Reaksiyon çok kısa bir sürede gerçekleşmesine rağmen, bu süre içinde sıcaklık ve yoğunluk füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesine yetecek kadar yüksek değerlere ulaşır.

Önemli ilerlemelere rağmen, her iki teknoloji de hâlâ yoğun



Şekil 4. Bir tokamak füzyon reaktörünün bileşenleri. Birkaç farklı manyetik alanın birleştirilmesiyle plazma, vakum odasının merkezinde hapsedilir.

araştırma konusudur. Fiziksel gerçekleştirmenin yanı sıra, plazma kararlılığı, malzeme seçimi, nötron kal-kanı ve üretilen enerjinin elektrik akımına verimli bir şekilde dönüştürülmesi ile ilgili ciddi mühendislik zorlukları bulunmaktadır. Bu nedenle, nükleer füzyon günümüzün en önemli bilimsel ve teknolojik hedef-lerinden biri olarak kabul edilmektedir.



SORULAR VE ÖDEVLER

1. Enerjinin hem çekirdek füzyonu hem de çekirdek fisyonu yoluyla serbest bırakılabilmesinin fiziksel nedenini açıklayın.
2. Fisyon neden çoğunlukla protonlar tarafından değil de nötronlar tarafından tetiklenir?
3. Reaktörlerde kontrol çubukları neden kullanılır? Bunlar çekirdekten aniden çekilirse ne olur?
4. Zincir reaksiyon durdurulduktan sonra bile reaktör neden soğutulmalıdır? "Artık ısı"dan ne kaynaklanır?
5. Enerji sisteminde nükleer santrallerin kullanılmasının bir faydasını ve bir riskini örnek vererek açıklayın.
6. Bir füzyon reaktörü neden fisyondaki gibi klasik bir zincir reaksiyonla "patlayamaz"? Füzyonun devam etmesi için hangi koşulların sürekli olarak sağlanması gerekir?
7. Bir fisyon neslinde 1000 nötron salınırsa, $k = 2$ olduğunu bilerek 8 nesil sonra salınan nötron sayısını bulun. (Çözüm: 128000)

4.13. Dozimetri ve dozimetrik büyüklükler

İyonlaştırıcı radyasyon, maddeden geçerken atomlar ve moleküllerle etkileşime girerek enerjisinin bir kısmını veya tamamını maddi ortama aktarır. Bu enerji aktarımı, atomların ve moleküllerin iyonlaşmasına ve uyarılmasına yol açar. Yüklü parçacıklardan (α ve β parçacıkları) oluşan radyasyonda, enerji esas olarak ortamdaki atomların elektronlarıyla doğrudan çarpışmalar yoluyla aktarılır. Bu çarpışmalar, ortamdaki atom ve moleküllerin iyonlaşmasına ve uyarılmasına neden olarak, parçacığın izlediği yol boyunca iyon çiftleri ve serbest elektronlar oluşturur.

Foton radyasyonunda (γ fotonları ve Röntgen ışınları), enerji üç temel süreç aracılığıyla iletilir:

Fotoelektrik etki: Bu süreçte foton, atomdan bir elektronu koparır.

Compton saçılması: Fotonun enerjisinin bir kısmını bir elektrona aktardığı ve yönünü değiştirdiği sü-reçtir (Şekil 1).

Çekirdekle etkileşim (çift olu-şumu): Bu olayda foton yok olur ve bir **elektron-pozitron çifti** oluşur. Bu süreç yalnızca fotonların enerjisinin yeterince yüksek olması durumunda gerçekleşebilir.

Nötronlar, elektrik yüküne sahip olmadıkları için **doğrudan iyonlaş-maya neden olmazlar**.

Nötronlar ise enerjilerini, atom çekirdekleriyle çarpışmaları veya çe-kirdek tarafından soğurulmaları sıra-



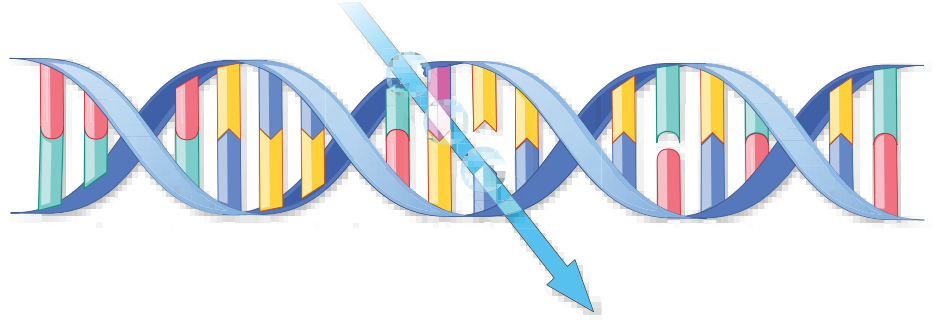
Şekil 1. Compton saçılmasının şematik gösterimi

sında aktarır. Bu tür etkileşimler, maddede iyonlaşmaya neden olan ikincil yüklü parçacıklar (örneğin, protonlar veya α -parçacıkları) oluşturabilir.

Canlı organizmalarda, bu mikroskobik fiziksel süreçler moleküler düzeyde değişikliklere yol açar ve bu da hücrelere ve dokulara zarar verebilir. İyonlaştırıcı radyasyon biyolojik dokudan geçerken, yol boyunca iyonlar ve uyarılmış moleküller oluşturur. Radyasyonun bu birincil ürünleri, son derece kısa zaman aralıklarında meydana gelen bir dizi kimyasal reaksiyonun başlangıcını temsil eder.

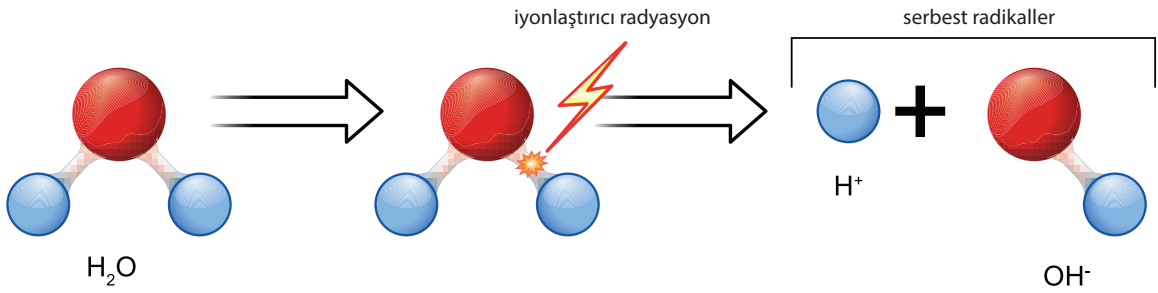
İyonlaştırıcı radyasyon, enerjisini kritik biyomoleküllere aktardığında, kovalent bağların kopması, fonksiyonel gruplarda değişiklikler, anormal kimyasal bağların oluşumu ve hücresel bileşenlerde yerel hasar gibi yapısal değişiklikler meydana gelebilir. Deoksiribonükleik asit (DNA) hasarı özellikle önemlidir; çünkü DNA genetik bilgiyi taşır ve zarar görmesi uzun vadeli biyolojik sonuçlara yol açabilir. Radyasyon, DNA'nın bir parçası olan bir molekülü doğrudan iyonize ettiğinde veya uyardığında, **doğrudan etki** söz konusudur. Bu durumda, bazlarda değişiklikler, tek bir polinükleotid zincirinde kopma veya daha ciddi durumlarda her iki zincirin kopması meydana gelebilir (Şekil 2).

Hasar dolaylı olarak da meydana gelebilir. **Do-laylı etki**, su içeriği yüksek dokularda baskındır. Işınlama sonucunda su moleküllerinin **radylolizi**, yani iyonlaştırıcı radyasyonun etkisiyle suyun ayrışması gerçekleşir (Şekil 3).



Şekil 2. İyonlaştırıcı ışınlar, polinükleotid zincirinde kopmalara ve bazlar arasındaki hidrojen bağlarının kırılmasına neden olur.

Bu süreçte, biyomoleküllerle kimyasal olarak reaksiyona girme yeteneği oldukça yüksek olan serbest radikaller adı verilen reaktif kimyasal parçacıklar oluşur. Bu radikaller DNA, hücre zarları veya proteinlerle reaksiyona girerek oksidatif hasara neden olabilir. Bu nedenle radyasyon, DNA'ya doğrudan zarar vermese bile, su moleküllerinde oluşan kimyasal süreçler aracılığıyla biyolojik hasara neden olabilir.



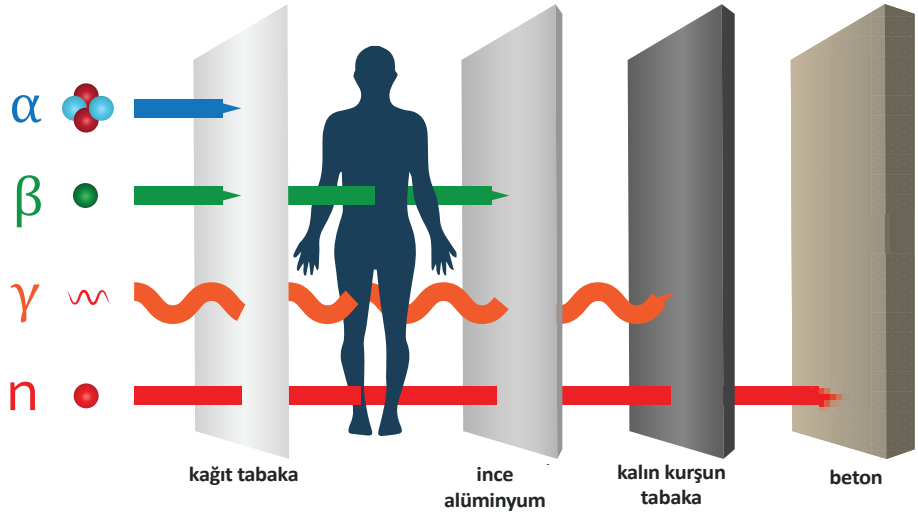
Şekil 3. Bir su molekülünün radyolizi sonucu serbest radikallerin oluşumunun şematik gösterimi

İyonlaştırıcı radyasyonun biyolojik etkileri şunlara bağlıdır:

- Radyasyonun birim kütle başına bıraktığı enerji miktarı,
- Radyasyonun türü,
- Enerjinin doku içinde nasıl aktarıldığı.

Farklı radyasyon türlerinin iyonlaştırıcı etkilerini karşılaştırmak için, radyasyonun birim yol boyunca oluşturduğu iyon çifti sayısını ifade eden "ölgül iyonlaşma" kavramı kullanılır (Şekil 4).

Alfa parçacıkları yüksek ölgül iyonlaşmaya sahiptir. Kısa bir yol boyunca çok sayıda iyon çifti oluşturdıkları için, DNA'da kümelenmiş hasarlar ve çift zincir kırıkları gibi ciddi biyolojik hasarlara daha kolay yol açarlar. Buna karşılık, γ ve X ışınlarının ölgül iyonlaşması daha düşüktür.



Şekil 4. Farklı ışın türlerinin farklı maddelerden geçebilme özellikleri

Buna karşılık, dokuda daha uzun bir yol katetmelerine rağmen daha az sayıda iyon çifti oluştururlar. Bu nedenle meydana gelen hasarlar genellikle daha seyrek ve onarılmaları daha kolaydır. Radyasyon etkilerinin pratik değerlendirmesi için, ölgül iyonlaşma, radyasyon türü ve maruz kalan dokunun duyarlılığını dikkate alan fiziksel büyüklükler kullanılır. Örneğin, α -radyasyonuna düşük düzeyde dış maruz kalma, penetrasyon gücünün düşük olması nedeniyle genellikle önemli değildir. Ancak, bir α -yayıcı vücuda girerse (solunum veya yutma yoluyla), enerji çok kısa bir mesafede hassas dokularda birikir ve risk önemli olabilir. Öte yandan, γ -ışınımı çok yüksek penetrasyon gücüne sahiptir ve dış maruziyet sırasında birden fazla doku ve organı etkileyebilir (Şekil 4).

Bu nedenle, iyonlaştırıcı radyasyondan kaynaklanan riskin değerlendirilmesinde her zaman biriken toplam enerji, radyasyon türü, maruz kalma geometrisi ve maruz kalan dokunun biyolojik duyarlılığı dikkate alınmalıdır. Bu amaçla, vücut tarafından alınan radyasyon dozunu tanımlayan **dozimetrik büyüklükler** kullanılmaktadır. Ölçülebilir bir fiziksel büyüklük mevcut olduğunda, iyonlaştırıcı radyasyondan korunmaya ilişkin kurallar netleşir ve daha yüksek bir güvenlik düzeyi sağlanır.

Dozimetrik büyüklükler – Radyasyonun etkisini nasıl tanımlarız?

İyonlaştırıcı radyasyon bir ortamdan geçtiğinde, enerjisi kaybolmaz; ortamın atom ve moleküllerine aktarılır. Mikroskobik düzeyde bu enerji, atom ve moleküllerin iyonlaşmasına ve uyarılmasına neden olur. Makroskobik düzeyde ise bu durum, radyasyon enerjisinin bir kısmının vücutta veya içinden geçtiği maddede soğurulduğu anlamına gelir. Dozimetrinin ilk ve en temel adımı, şu soruya yanıt vermektir: Ne kadar enerji aktarılmıştır ve bu enerji hangi kütlede soğurulmuştur?

Emilen doz

Emilen doz, dozimetride temel bir fiziksel büyüklüktür. Çünkü iyonlaştırıcı radyasyondan ne kadar enerjinin maddeye aktarıldığını, radyasyonun türü ve bunun biyolojik etkisi dikkate alınmaksızın belirler. Emilen doz D , iyonlaştırıcı radyasyonun belirli küçük bir hacimdeki maddeye aktardığı ortalama enerji $\Delta \bar{E}$ 'nin, bu hacmin kütlesi Δm 'ye oranı olarak tanımlanır:

$$D = \frac{\Delta \bar{E}}{\Delta m}$$

Emilen dozun SI birimi gray (Gy)'dir. Bir gray, 1 kg madde tarafından 1 J enerjinin soğurulmasına karşılık gelir.

Bu değer makroskobik düzeyde bakıldığında küçük görünebilir, ancak radyobiyojide mikroskobik düzeyde 1 J'nin, doku içinden geçen parçacıkların veya fotonların yolları boyunca dağılmış çok sayıda **iyonlaşmaya** karşılık geldiğini dikkate almak önemlidir. Soğrulan(emilen) doz, farklı malzemeler (hava, su, doku, metal) ve farklı radyasyon türleri için tanımlanabilir ve ölçülebilir. Ancak, aynı emilen dozun farklı radyasyon türleri için mutlaka aynı biyolojik etkiyi oluşturmayaacağı unutulmamalıdır. Bu nedenle, emilen doz; biyolojik etkinlik farklılıklarını dikkate alan eşdeğer doz ve etkin doz gibi dozimetrik büyüklüklerin temelini oluşturur. Bu büyüklükler, farklı radyasyon türlerinin aynı emilen dozda oluşturduğu biyolojik etkiyi değerlendirmek için kullanılır.

Soğrulan doz neden tek başına yeterli bir dozimetrik büyüklük değildir? Aşağıdaki iki durumu düşünelim:

- Bir doku alfa ışınlarına maruz kalmaktadır.
- Aynı doku gama ışınlarına maruz kalmaktadır, ancak her iki durumda da soğrulan doz aynıdır.

Birim kütle başına depolanan enerji aynı olsa da, biyolojik sonuçlar çok farklı olabilir. Bunun nedeni, **enerjinin dokuya aktarılma biçimidir**. Alfa parçacıkları çok küçük bir alanda çok sayıda iyonlaşma çifti oluştururken, gama ışınları enerjilerini daha uzun bir mesafeye yayar.

Bu nedenle, risk değerlendirmesi yapılırken sadece toplam enerji değil, **radyasyonun türü** de dikkate alınmalıdır.

Eşdeğer doz

Farklı radyasyon türlerinin farklı biyolojik etkinliklerini hesaba katmak için, radyasyondan korunma alanında **eşdeğer doz** kavramı kullanılmaktadır. Eşdeğer doz, emilen dozu, belirli bir radyasyon türünün göreceli biyolojik etkinliğini ifade eden **kalite faktörü** ile ilişkilendirir. Bu faktör boyutsuz bir büyüklüktür ve radyasyonun maddeyi yolu boyunca ne ölçüde iyonlaştırdığına ve çift zincirli DNA kırıkları gibi karmaşık hasarlar oluşturma olasılığına bağlıdır.

Doku veya organ T'deki **eşdeğer doz** H_T ile gösterilir ve şu çarpımın sonucu olarak tanımlanır:

o organdaki emilen doz ve boyutsuz olan iyonlaştırıcı radyasyon kalite faktörü ω_R .

Doku veya organ tek bir radyasyon türüne maruz kalırsa, eşdeğer doz şöyle ifade edilir:

$$H_T = \omega_R D_{T,R} .$$

Bir organ veya doku birden fazla radyasyon türüne maruz kalıyorsa, her bir radyasyon türünün katkısı ayrı ayrı hesaplanır ve toplam eşdeğer doz bu katkıların toplamı olarak belirlenir.

$$H_T = \omega_{R1} D_{T,R1} + \omega_{R2} D_{T,R2} + \dots ,$$

Burada $D_{T,R1}$, $D_{T,R2}$ vb., farklı R_1 , R_2 türündeki radyasyonların T doku veya organında oluşturduğu emilen dozu ifade eder. ω_{R2} , ω_{R2} ise, bu ışınım türlerinin göreceli biyolojik etkinliğini gösteren boyutsuz ağırlık faktörleridir. Eşdeğer dozun birimi sievert (Sv) olup, $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg'dır}$.

Emilen ve eşdeğer dozlar aynı birimi paylaşırsa da, anlamları temelde farklıdır. Örneğin, alfa radyasyonundan ve gama radyasyonundan alınan aynı emilen doz, alfa radyasyonu için çok daha yüksek bir eşdeğer doza yol açacaktır. Örnek olarak, farklı iyonlaştırıcı radyasyonların kalite faktörleri Tablo 1'de verilmiştir:

Tablo 1. Farklı iyonlaştırıcı ışınım türleri için kalite faktörü. Nötron ışınımının kalite faktörü, nötronların enerjisine bağlı olarak değişir.

İyonlaştırıcı radyasyon türü	Kalite faktörü
Fotonlar (Röntgen ışınları ve gama ışınları)	1
Elektronlar	1
Protonlar	2
α parçacıkları, fisyon parçacıkları ve ağır iyonlar	20
Nötronlar	5-20

Ancak, eşdeğer doz, kişinin maruz kaldığı toplam riski değerlendirmek için tek başına yeterli değildir. Bunun nedeni, farklı organ ve dokuların iyonlaştırıcı radyasyona karşı aynı duyarlılığa sahip olmamasıdır. Örneğin, kemik iliği veya hızlı hücre bölünmesinin gerçekleştiği dokuların ışınlanması, cilt gibi daha az duyarlı dokuların aynı eşdeğer doza maruz kalmasına göre kanser gelişimi açısından daha yüksek risk taşır. Bu nedenle, hem radyasyonun türünü hem de dokuların duyarlılığını dikkate alan etkin doz kavramı ortaya çıkmıştır.

Etkin doz

Bir doku veya organın etkin dozu E_T ile gösterilir ve o doku veya organdaki eşdeğer doz H_T 'nin, **doku ağırlık faktörü** ω_T ile çarpımı olarak tanımlanır ω_T , boyutsuz bir büyüklüktür:

$$E_T = \omega_T H_T .$$

Birden fazla doku veya organ iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalırsa, toplam etkin doz, tek tek organların etkin dozlarının toplamına eşittir:

$$E_T = \omega_{T1} H_{T1} + \omega_{T2} H_{T2} + \dots$$

Burada H_{T1} , H_{T2} vb., sırasıyla $T1$, $T2$... , a ω_{T1} , ω_{T2} , ise bu doku veya organlara ait doku ağırlık faktörleridir. Etkin dozun birimi sievert (Sv) olup, $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ 'dır.

Etkin dozun pratik önemi, tüm vücut veya birden fazla organın ışınladığı durumlarda toplam biyolojik riski tek bir büyüklükle ifade etmesidir ve radyasyondan korunma sistemlerinde kullanılır (örneğin, izin verilen sınırların belirlenmesinde, tanı prosedürlerinde maruziyetin değerlendirilmesinde ve radyolojik kazalarda riskin değerlendirilmesinde). Etkin doz, belirli bir organdaki dozu değil; radyasyonun türü ile doku ve organların radyasyona duyarlılığı dikkate alınarak hesaplanan **toplam biyolojik riskin bir ölçüsünü ifade eder**. Tablo 2'de bazı doku ve organlar için doku ağırlık faktörleri verilmiştir.

Tablo 2. İnsanlarda bazı doku ve organlar için doku ağırlık faktörleri

Organ	Doku ağırlık faktörleri
Deri	0,01
Beyin	0,01
Tiroid bezi	0,04
Cinsel organlar	0,08
Akciğerler	0,12
Kemik iliği	0,12

Doku ağırlık faktörü ne kadar büyükse, doku veya organın radyasyona karşı duyarlılığı da o kadar fazladır. Tüm organlar için doku ağırlık faktörlerin toplamı 1'e eşittir.

Emilen, eşdeğer ve etkin doz kavramlarının ortaya çıkmasıyla birlikte, iyonlaştırıcı radyasyon artık soyut bir tehlike olmaktan çıkar. Bu, nicelendirilebilen ve üzerinde çalışılabilen bir **olgu haline** gelir, böylece farklı durumlar karşılaştırılabilir ve korunma için net kurallar belirlenebilir.

nebilir. Üç farklı büyüklüğü karşılaştıran animasyonlara aşağıdaki bağlantıdan ulaşabilirsiniz: https://remm.hhs.gov/dose_animations.htm

Bir fiziksel büyüklüğün ölçülebilmesi, **onun kontrol edilmesini, karşılaştırılmasını ve gerekli koruma önlemlerinin** alınmasını sağlar. Bu, radyasyondan korunmanın temelini oluşturur.



ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK 1.

Bir röntgen çekimi (fotonlar) sırasında, akciğerlerde 0,20 kg kütleli dokuya $5,0 \cdot 10^{-4}$ J enerji aktarılmaktadır. Tablo 1 ve Tablo 2'de verilen, ilgili ışınım kalite faktörü ile doku (organ) ağırlık faktörü değerlerini kullanarak akciğerlerdeki: soğurulan dozu (D), eşdeğer dozu (H) ve etkin dozu (E) hesaplayınız.

Verilenler: $\Delta E = 5,0 \cdot 10^{-4}$ J , $m = 0,20$ kg , $w_R = 1$, $w_T = 0,12$	Çözüm: a) Emilen doz: $D = \frac{\Delta E}{m} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ J/kg} = 2,5 \text{ mGy.}$ 6) Akciğerlerdeki eşdeğer doz: $H_T = w_R \cdot D = 2,5 \text{ mSv.}$ c) Etkin dozun akciğerlerden kaynaklanan katkısı: $E_T = w_T \cdot H_T = 0,30 \text{ mSv.}$
İstenen: a) $D - ?$, 6) $H_T - ?$ B) $E_T - ?$	

İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalma

İnsanlar sürekli olarak doğal arka plan radyasyonuna, yani çevrede bulunan ve insan faaliyetlerinden kaynaklanmayan radyasyona maruz kalmaktadır. Bunun iki ana kaynağı, kozmik radyasyon ve yerkabuğundaki doğal radyonüklidlerdir. Kozmik radyasyon uzaydan (Güneş ve Güneş Sistemi dışındaki kozmik kaynaklardan) gelir ve atmosfere girdiğinde, yüzeye ulaşan ikincil iyonlaştırıcı parçacıklar üretir. Bu tür iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalma, uçuşlar sırasında olduğu gibi, irtifa arttıkça artar.

Veryüzündeki radyoaktif maddeler (uranyum, toryum ve bunların bozunma ürünleri ile ^{40}K gibi) α , β ve γ radyasyonu yayar. Önemli doğal radyasyon kaynaklarından biri, uranyumun radyoaktif bozunma zincirinde oluşan ve kapalı ortamlarda birikebilen radon gazıdır. Radon, insanların aldığı toplam doğal radyasyon dozuna önemli ölçüde katkıda bulunur. Dünya genelinde doğal arka plan radyasyonu dozu yılda ortalama birkaç mSv olup, jeolojik yapı ve yaşam koşullarına bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilir.

Doğal arka plan radyasyonuna ek olarak, insanlar yapay radyasyon kaynaklarına da maruz kalabilir. Bunların bazıları, Ukrayna'daki Çernobil (1986) ve Japonya'daki Fukushima Daiichi (2011) gibi nükleer radyolojik kazalardan kaynaklanır. Bu tür olaylarda radyoaktif maddeler atmosfere salınabilir ve kaza yerinden çok uzak mesafelere yayılabilir; bu nedenle maruz kalma hem dışsal (zemine biriken radyoizotoplardan) hem de içsel (solunum yoluyla ve yiyecek-su yoluyla) olabilir. Bir radyolojik kaza durumunda, tahliye, gıda kontrolü ve kontamine alanlarda geçirilen sürenin sınırlandırılması gibi önlemler alınır.

Bununla birlikte, barış zamanında nüfus için en önemli yapay maruz kalma kaynağı, iyonlaştırıcı radyasyon kullanılan tıbbi muayeneler ve işlemlerdir. Bunlar arasında Röntgen(X) ışını görüntülemeleri, bilgisayar tomografisi, girişimsel radyoloji ve nükleer tıp yer alır. Bu işlemler büyük bir tanınal ve terapötik değere sahiptir, ancak her biri, muayene türüne ve cihazın parametrelerine bağlı olarak belirli bir doza maruz kal-

mayı gerektirir. Bu nedenle, tıpta radyasyondan korunma; gerekçelendirme (bir işlemin ancak sağlayacağı yarar riskinden fazla ise uygulanması) ve optimizasyon (gerekli tanınal bilginin en düşük makul dozla elde edilmesi) ilkelerine dayanır.

ALARA - принцип на оптимизација во радијациската заштита

Radyasyondan korunmada, maruz kalmanın yasal sınırların altında olması yeterli değildir. **ALARA** (As Low As Reasonably Achievable - Makul Olarak Ulaşılabılır En Düşük Seviye) ilkesi de uygulanır; bu ilkeye göre, faaliyetin amacından ödün vermeden, teknik, ekonomik ve sosyal faktörler dikkate alınarak maruz kalma, makul olarak ulaşılabilir en düşük seviyede tutulmalıdır.

Uygulamada **ALARA** şu yollarla gerçekleştirilir:

- Maruz kalma süresinin kısaltılması,
- Kaynaktan uzaklığın artırılması,
- Koruyucu malzemelerin (kalkanlama) kullanılması,
- Uygun teknik ve parametrelerin seçilmesi,
- Kontaminasyon kontrolü,
- Düzenli dozimetrik izleme.



Şekil 5. İyonlaştırıcı ışınım kaynaklarını, radyoaktif maddelerin depolandığı kapları ve iyonlaştırıcı ışınım kaynaklarının bulunduğu alanları işaretlemek için kullanılan uyarı işareti.

Doz sınırları

Doz sınırları (izin verilen en yüksek dozlar), planlı maruziyet durumları (radyasyon kaynaklarıyla çalışma, endüstri ve araştırma gibi) için belirlenir ve radyasyon riskini sınırlandırmayı amaçlar. En önemli sınır, vücuda maruz kalmanın toplam riskini gösteren etkin dozdur. Genel nüfus için (mesleği gereği iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarıyla çalışmayan kişilerde) etkin doz sınırı yılda $E \leq 1 \text{ mSv/a}$ 'dır. Özel durumlarda, birkaç yılın ortalaması bu sınır içinde kalmak koşuluyla, tek bir yılda daha yüksek bir doza izin verilebilir.

Eşdeğer doz sınırları (dokular ve organlar için) da sıklıkla belirtilir; örneğin, genel halk için cilt ve göz merceği sırasıyla 15 mSv/yıl ve 50 mSv/yıl'dır. Mesleki olarak radyasyona maruz kalan çalışanlar için etkin doz sınırı, 5 ardışık yıl boyunca ortalaması alınmış $E \leq 20 \text{ mSv/a}$ 'dır (yani, doz 5 yıl boyunca 100 mSv'den az olmalıdır), ancak tek bir yılda doz 50 mSv/yıl'ı aşmamalıdır.

Tıbbi amaçlı maruziyetlerde (tanı ve tedavi uygulamalarında), beklenen sağlık yararı esas alındığından hastalar için doz sınırı uygulanmaz. Ancak doz sınırları, radyasyon kaynaklarıyla çalışan sağlık personeli için geçerlidir.



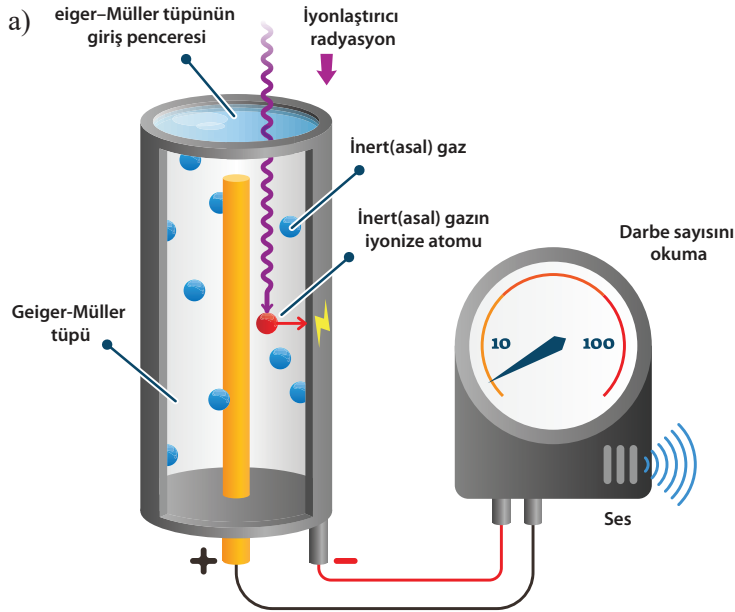
DAHA FAZLA ÖĞREN

Geiger-Müller sayacı, iyonlaştırıcı radyasyonu algılamak için en yaygın kullanılan dedektörlerden biridir. Bir **Geiger-Müller tüpü** ile güç kaynağı ve elektrik darbelerini sayan elektronik bir devreden oluşur. Geiger-Müller tüpü, merkezinde ince bir anot bulunan silindirik metal bir katottan oluşur. Tüp, düşük basınçlı bir gaz (genellikle argon) ile kendi kendine deşarjı önlemek amacıyla az miktarda söndürücü gaz veya alkol buharı içerir. İyonlaştırıcı radyasyon tüpün içinden geçtiğinde, gazda birincil iyon çiftleri oluşur. Güçlü elektrik alanının etkisiyle elektronlar anoda doğru hızlanır ve **çığ iyonlaşmasına** neden olur. Bunun sonucunda kısa süreli bir elektrik darbesi oluşur.

Geiger-Müller sayacında, algılanan parçacığın veya fotonun başlangıç enerjisinden bağımsız olarak oluşan elektrik darbeleri yaklaşık aynı büyüklüktedir. Bu nedenle sayaç, algılanan parçacık veya fotonların sayısını belirleyebilir; ancak bunların enerjisini ölçemez.

Geiger-Müller sayacı, laboratuvarlarda, sanayide ve radyasyondan korunma hizmetlerind ışınının tespiti ve izlenmesi amacıyla kullanılır. Örneğin; yüzeylerdeki radyoaktif kirlenmenin kontrol edilmesi, belirli bir kaynağın yaydığı ışınım şiddetinin yaklaşık olarak ölçülmesi, çalışma ortamının denetlenmesi ve ışınım kaynağının hızlı bir şekilde yerinin belirlenmesi için kullanılır.

Geiger-Müller sayacı, günlük kullanımda dozimetre olarak adlandırılan taşınabilir cihazların önemli bir parçasıdır. Ancak burada farklı ölçüm cihazlarını birbirinden ayırt etmek gerekir. Dozimetre, dar anlamıyla, doz hızını ölçen bir cihazdır. Yani bir kişinin birim zamanda aldığı etkin dozu ölçer. Doz hızı genellikle mikrosievert/saat ($\mu\text{Sv/h}$) birimiyle ifade edilir. Buna karşılık Geiger-Müller sayacı, ışınım şiddetini, yani tütün yüzeyine ulaşan parçacıkların sayısını ölçer. Cihaz uygun şekilde kalibre edildiğinde (özellikle gama (γ) ve X ışınlarının enerjisi bilindiğinde), doz hızı yaklaşık olarak belirlenebilir. Bu nedenle, Geiger-Müller tüpü içeren dozimetreler, hızlı değerlendirme yapmak ve uyarı vermek açısından oldukça kullanışlıdır. Ancak hassas dozimetri ve ışınım türünün belirlenmesi için, ölçüm amacına bağlı olarak iyonlaşma odaları, sintilasyon dedektörleri veya yarı iletken dedektörler gibi farklı dedektörler kullanılır.



Şekil 5. a) Geiger-Müller tüpünün şematik gösterimi
b) Geiger-Müller tüpü içeren dozimetre

SORULAR VE ÖDEVLER

1. İyonlaştırıcı radyasyonun maddeye "enerji bırakması" ne anlama gelir?
2. Fotonların (Röntgen (X) ışını/gama) madde ile etkileşiminin üç ana mekanizmasını ve bunların birbirinden farklarını açıklayınız.
3. Nötronlar neden dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon olarak kabul edilir?
4. Aynı emilen doz, α ve γ radyasyonu için neden farklı biyolojik etkilere yol açabilir?
5. ALARA ilkesini tıbbi görüntülemenden bir örnek vererek açıklayınız.
6. Cilt, α ve γ radyasyonuna aynı anda maruz kalmaktadır. γ radyasyonundan emilen doz 2,0 mGy, α radyasyonundan emilen doz ise 0,1 mGy'dir. Gerekli verileri Tablo 1 ve Tablo 2'den yararlanarak cildin eşdeğer dozunu ve etkin dozunu hesaplayınız. (Çözüm: 0,040 mSv)

Konu 4: SORULAR VE ALIŞTIRMALAR

1. İki yıldız siyah cisim gibi ışıma yapmaktadır ve yüzeylerinin birim alanından birim zamanda eşit miktarda enerji yaymaktadır. Yıldızlardan daha soğuk olanın yüzey sıcaklığı T , çapı ise daha sıcak olan yıldızın çapının iki katıdır.
 - a) Daha sıcak olan yıldızın sıcaklığını, daha soğuk olan yıldızın sıcaklığı cinsinden ifade ediniz.
 - b) Her iki yıldız için spektral ışıma şiddetinin en büyük olduğu dalga boylarının oranını bulunuz.
 (Cevap: a) $T_1 = \sqrt{2}T$; b) $\lambda_1 = (1/\sqrt{2})\lambda$)
2. Belirli bir durdurma potansiyeli değerinde, dalga boyu λ_0 olan ışıkla aydınlatılan lityum yüzeyinden geçen fotoelektrik akımı kesilmektedir.

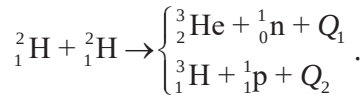
Lityum yüzeyini aydınlatan ışığın dalga boyu 1,6 kat artırıldığında, fotoelektrik akımın yeniden kesilebilmesi için durdurma potansiyelinin 2,2 kat azaltılması gerekmektedir.

Buna göre λ_0 dalga boyunu hesaplayınız. Lityumun iş fonksiyonu (çıkış işi) 2,39 eV'tur. (Cevap: 520 nm)
3. Bir kez iyonlaşmış helyum atomundaki elektron, beşinci enerji düzeyinden üçüncü enerji düzeyine geçmektedir.

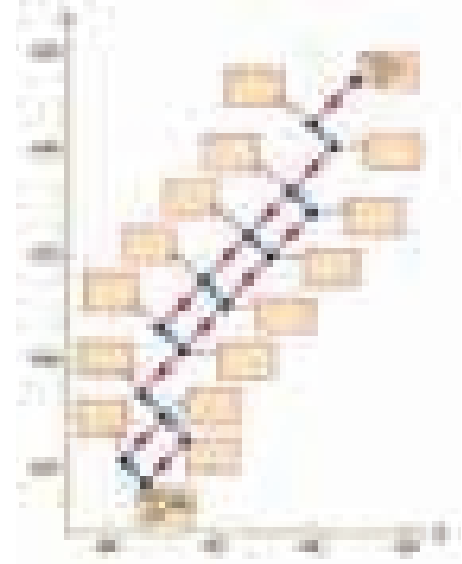
Bu geçiş sırasında yayılan fotonun dalga boyu kaçtır? (Cevap: 320 nm)
4. Rutherford saçılma deneyinde, 5,27 MeV enerjili alfa parçacıkları, $^{118}_{79}\text{Au}$ altın çekirdeklerinden saçılmaktadır. Bir alfa parçacığının çekirdeğe tam doğrultuda yaklaştığını, 180° açıyla geri saçıldığını ve altın çekirdeğinin tüm süreç boyunca hareketsiz kaldığını kabul ediniz.
 - a) Alfa parçacığının çekirdeğe en fazla yaklaşabileceği uzaklığı bulunuz.
 - b) Alfa parçacığı çekirdeğe en yakın konumdayken üzerine etki eden en büyük kuvveti hesaplayınız.
 (Cevap: a) $4,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$; b) 20 N)
5. Aşağıdaki ifadelerden hangisi Bohr'un hidrojen atomu modelinin temel postül (ilkelerinden) biri değildir?
 - a) Yalnızca belirli elektron yörüngeleri kararlı ve izinlidir.
 - b) Elektron, protonun etrafında Coulomb kuvvetinin etkisiyle dairesel yörüngelerde hareket eder.
 - c) Elektronun yükü kuantalanmıştır.
 - d) Elektron daha yüksek enerjili bir durumdan daha düşük enerjili bir duruma geçtiğinde atom ışıma yayar.
 - e) Çekirdeğin yükü kuantalanmıştır.
6. Hidrojen atomunda elektronun toplam enerjisi $-E$ olsun.
 - a) Elektronun kinetik enerjisi kaçtır?
 - b) Atomun potansiyel enerjisi kaçtır?

Soruları yanıtlarken aşağıdaki seçeneklerden uygun olanını seçiniz. 1) $2E$, 2) E 3) 0 , 4) $-E$, 5) $-2E$.
(Cevap: a) E b) $-2E$)
7. a) Temel hâlde bulunan bir hidrojen atomundaki elektron, 13,6 eV'den daha küçük enerjili bir fotonu soğurabilir mi?
b) Elektron, 13,6 eV'den daha büyük enerjili bir fotonu soğurabilir mi?
8. Bir atom foton yaydığı anda aşağıdakilerden hangisi gerçekleşir?
 - a) Elektronlarından biri atomu terk eder.
 - b) Atom daha yüksek enerjili bir duruma geçer.
 - c) Atom daha düşük enerjili bir duruma geçer.
 - d) Elektronlarından biri başka bir parçacıkla çarpışır.

9. Ana kuantum sayısı 3 olan sabit bir enerji durumunda bulunan hidrojeni iyonize etmek için ne kadar enerji gerekir? (Çözüm: 1,51 eV)
10. Bir hidrojen atomu beşinci sabit durumdan üçüncü sabit duruma geçtiğinde bir foton yayılır. Aşağıdakileri hesaplayınız:
 a) Fotonun dalga boyu.
 b) Fotonun enerjisi.
 c) Yayılan fotonun frekansı. (Çözüm: a) 1,28 μm b) 0,97 eV c) $2,3 \cdot 10^{14}$ Hz)
11. Hidrojen atomunun Balmer serisi, kuantum sayısı 2 olan temel duruma sonlanan elektronik geçişlere karşılık gelir. Bu seride yayılan fotonların olası en uzun ve en kısa dalga boylarını belirleyin. (Çözüm: 656 nm, 365 nm)
12. Bir elementin karakteristik X ışını spektrumunda L_{β} , L_{γ} , M_{α} ve M_{β} çizgileri gözlemleniyorsa, geçiş hangi iki enerji seviyesi arasında gerçekleşir?
13. Tungsten anotlu bir X ışını tüpünde, sürekli spektrumun maksimum enerjisine karşılık gelen dalga boyu, X ışını radyasyonunun ayırık spektrumundaki K_{α} çizgisiyle çakışmaktadır. X ışını tüpündeki gerilimi bulunuz. (ZW= 74, $\sigma = 1$). (Çözüm: 70 kV)
14. ^{125}Sb , ^{125}Te 'ye bozunduğunda çekirdekte ne gibi değişiklikler meydana gelir ve çekirdekten hangi parçacıklar yayılır?
15. Radyum-224'ün yarılanma süresi yaklaşık 3,6 gündür. Dört hafta sonra numunenin ne kadarlık bir kısmı bozunmamış olarak kalacaktır? (Çözüm : % 0,4)
16. $^{235}_{92}\text{U}$ 'in radyoaktif bozunma serisinde oluşan radyoizotopları belirleyiniz. Bu bozunma serisi, kararlı Kurşun-207 $^{207}_{82}\text{Pb}$ izotopuyla sona ermektedir. Şekilde; Düşey ekseninde nötron sayısı (N), Yatay ekseninde atom numarası (Z) gösterilmektedir. Mor oklar, alfa (α) bozunmasını, Mavi oklar ise beta (β^-) bozunmasını göstermektedir. Soruyu çözerken Periyodik Tablo'dan yararlanınız.
17. Aşağıdaki çekirdek tepkimesinin Q değerini hesaplayınız:
 $^9_4\text{Be} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{12}_6\text{C} + ^1_0\text{n}$ Tepkimedeki bütün taneciklerin kütlelerini yaklaşık olarak kütle numaraları (A) kadar kabul ediniz. Verilen: $1u = 931,5 \text{ MeV}$ (Cevap: 5,6 MeV).
18. Aşağıdaki çekirdek tepkimelerinde bilinmeyen X çekirdeğini bulunuz.
 a) $X + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{24}_{12}\text{Mg} + ^1_0\text{n}$,
 b) $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{93}_{38}\text{Sr} + X + 2^1_0\text{n}$
19. Aşağıdaki çekirdek tepkimeleri verilmektedir:
 $^9_4\text{Be} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{10}_4\text{Be} + \gamma$, $Q_1 = 6,812 \text{ MeV}$ ve $^9_4\text{Be} + \gamma \rightarrow ^8_4\text{Be} + ^1_0\text{n}$, $Q_2 = -1,665 \text{ MeV}$
 Bu bilgilerden yararlanarak ^9_4Be ve $^{10}_4\text{Be}$ çekirdeklerinin kütlelerini atomik kütle birimi (u) cinsinden, üç ondalık basamak değerinde duyarlılıkla hesaplayınız. (Cevap: 9,012u, 10,013u)
20. Aşağıdaki füzyon tepkimelerinde açığa çıkan Q_1 ve Q_2 enerjilerini hesaplayınız:



Çekirdeklerin bağlanma enerjileri aşağıdaki gibidir: $B(^2_1\text{H}) = 2,225 \text{ MeV}$, $B(^3_2\text{He}) = 7,718 \text{ MeV}$, $B(^3_1\text{H}) = 8,481 \text{ MeV}$. (Cevap: 3,27 MeV, 4,03 MeV)





Ders Kitapları ve Öğretim Araçları Yayımlayan Anonim Şirketi,
PROSVETNO DELO-AŞ, Üsküp, Dimitriye Çupovski Caddesi No: 15

Yayımlayan: Yüksek Lisans Mezunu (M-r) **Pavle Petrov**
Genel Müdür

Lise İkinci Sınıflar (II) için Fizik Ders Kitabı

Orijinal başlık:

Физика за II година гимназиско образование

Yazarlar:

Prof. Dr. Lambe Barandovski,
Marija Velevska

Genel Yayın Yönetmeni: **Vesna Dukoska**

Alan Uzmanı: **Doç. Dr. Jana Bogdanoska**

Makedoncadan Türkçeye çeviri: **Sezen Taip**

Grafik, Kapak Tasarımı ve Sayfa Düzeni: **Suzana Tomovska**

İllüstrasyonlar: Freepik

ISBN: 978-608-228-590-0

Sayfa Sayısı: 296 sayfa. Format: 200 × 270 mm. Baskı Adedi (Tiraj): 192

Kitap aşağıdaki matbaada basılmıştır:

EVROPA 92 DOOEL MATBAASI Krijevska Caddesi No: 52, 2300 Koçani

I Baskı

Basım Yeri ve Yılı: Üsküp, 2026

CIP - Каталогизација во публикација
Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје

53(075.3)=512.161

BARANDOVSKI, Lambe

Lise ikinci sınıflar (II) için fizik ders kitabı / Lambe
Barandovski, Marija Velevska ; [makedoncadan türkçeye çeviri Sezen
Taip]. - Üsküp : Prosvetno delo, 2026. - 296 стр. : илустр. ; 27 см

Превод на делото: Физика за II година гимназиско образование

ISBN 978-608-228-590-0

Velevska, Marija [автор]

COBISS.MK-ID 69318917

