



# 5. ÜNİTE

## MODERN FİZİK

1.



2.



3.



4.



Bu ünite de Michelson-Morley deneyinin amacı ve sonuçları açıklanıp Einstein'ın özel görelilik teorisinin postülatları ifade edilerek görelî zaman ve görelî uzunluk kavramları ile kütle-enerji eşdeğerliği açıklanacaktır.

Siyah cisim ışıması, foton kavramı ve fotoelektrik olayı açıklanıp farklı metaller için maksimum kinetik enerji-frekans grafiğinin çizilmesi sağlanacaktır. Fotoelektronların sahip olduğu maksimum kinetik enerji, durdurma gerilimi ve metalin eşik enerjisi arasındaki matematiksel ilişki ile fotoelektrik olayının günlük hayattaki olumlu ve olumsuz etkileri üzerinde durularak fotoelektrik olayıyla ilgili hesaplamalar yapılacaktır.

Compton olayında foton ve elektron etkileşimi açıklanarak, Compton ve fotoelektrik olaylarının benzer yönleri belirtilerek ışığın tanecik doğası hakkında çıkarım yapılması sağlanacaktır.

Işığın ikili doğası ile madde ve dalga arasındaki ilişki açıklanacaktır.

**1. BÖLÜM: ÖZEL GÖRELİLİK**

**2. BÖLÜM: KUANTUM FİZİĞİNE GİRİŞ**

**3. BÖLÜM: FOTOELEKTRİK OLAYI**

**4. BÖLÜM: COMPTON SAÇILMASI VE DE BROGLİE DALGA BOYU**

# 1. BÖLÜM

## ÖZEL GÖRELİLİK

### Konular

- 5.1.1. Michelson-Morley Deneyinin Amacı ve Sonuçları
- 5.1.2. Einstein'ın Özel Görelilik Teorisinin Temel Postülaları
- 5.1.3. Görelî Zaman ve Görelî Uzunluk Kavramları
- 5.1.4. Kütle-Enerji Eşdeğerliği

### Anahtar Kavramlar

- Özel Görelilik

- Zamanda yolculuk mümkün müdür?
- Aralarında yaş farkı olan ikiz kardeş olabilir mi?

Bu bölümde Michelson-Morley deneyinin yapıışı ve deneyin farklı bilim insanları tarafından farklı koşullarda çok kez tekrarlanmasının nedenleri üzerinde durulacaktır. Bilimde sabır ve kararlılığın kazandırdıklarından bahsedilerek Einstein'ın özel görelilik teorisinin postülaları hakkında bilgi verilecektir.

Görelî zaman ve görelî uzunluk kavramları ile kütle-enerji eşdeğerliği açıklanacaktır.

### 5.1.1. Michelson-Morley Deneyi

John C. Maxwell (Con Maksvel) tarafından 1861 yılında ışığın bir elektromanyetik dalga olduğunun ispatlanmasından sonra bazı bilim insanları, mekanik dalgaların yayılması için nasıl maddesel bir ortama ihtiyaç duyuluyorsa elektromanyetik dalgaların yayılması için de maddesel bir ortama ihtiyaç olduğunu düşünmüş ve uzayın ether adı verilen bir ortamla dolu olduğunu öne süren ether hipotezini ortaya atmışlardır. Bu hipoteze göre evren tamamen ağırlığı olmayan bir maddeyle doludur ve evrendeki her şey bu maddenin içindedir.

Bilim insanlarına göre evreni dolduran bir ether ortamı varsa ortamda yapılan hareketler, suya atılan bir taşın su ortamında dalgalanmalara sebep olduğu gibi etherde de dalgalanmalara sebep olmalıdır. Dünya'nın Güneş çevresinde yaptığı dönme hareketi etherde dalgalanmalara neden olmalı ve Güneş'ten gelen ışınlar, dalgalanma doğrultusunda ve zıt yönde hareket ediyorsa bir dirençle karşılaşır hızını azaltmalıdır.

Farklı doğrultularda hareket eden ışının farklı hız değerlerinin olması etherin varlığının ispatı olduğunu düşünen Albert Abraham Michelson (Albert Abraham Mişelson) (Görsel 5.1) ve Edward Morley (Edvird Morley) (Görsel 5.2) ışık hızındaki değişimleri ölçmek ve ether ortamının varlığını ispatlamak için 1887 yılında ünlü Michelson-Morley deneyini yapmışlardır. Deneyde A. A. Michelson tarafından keşfedilen Michelson girişimölçerini (interferometre) kullanmışlardır.

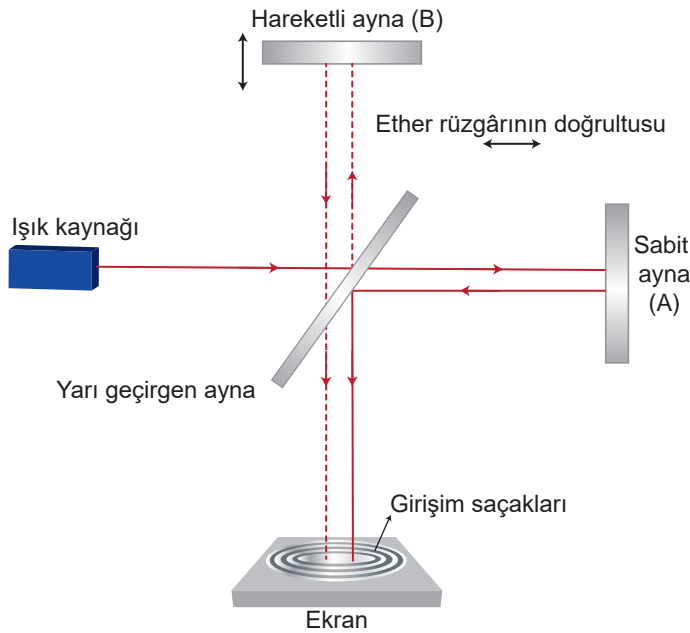
Girişimölçerler, tek renkli ışığı bir yarı geçirgen ayna yardımıyla iki ışık demetine ayırıp bu ışınların tekrar birleşmesiyle ekranda girişim deseninin oluşmasını sağlayan düzeneklerdir (Şekil 5.1). Girişimölçerler, dalga boylarının doğru ölçümlerinde veya bazı hassas uzunluk ölçümlerinde kullanılmaktadır.



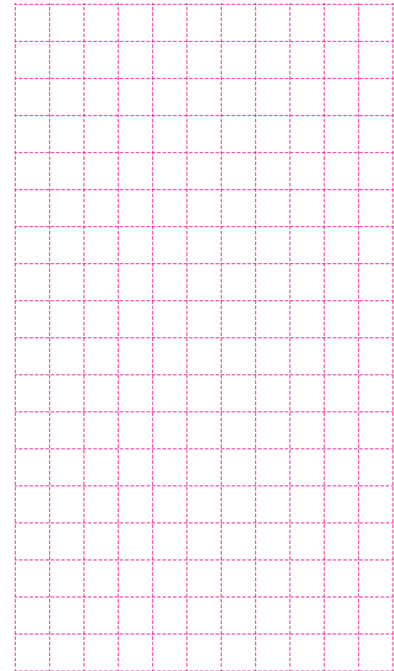
Görsel 5.1: Albert A. Michelson



Görsel 5.2: Edward Morley



Şekil 5.1: Michelson girişimölçerinin şematik görünümü



Ayrılan iki ışık demetinin eşit miktarda yol almasını sağlayacak şekilde aynaları ayarlanmış Michelson girişimölçeri çalıştırıldığında gözlenen olaylar aşağıda verilmiştir.

- Yarı geçirgen çift taraflı aynaya gönderilen ışığın bir bölümü yansırken bir bölümü geçer ve geçen ışınlar A aynasına ulaşır. Bu aynadan yansıyan ışık, tekrar yarı geçirgen aynadan yansarak ekrana ulaşır.
- Yarı geçirgen aynaya gönderilen ve aynadan yansıyan diğer ışık demeti B aynasına ulaşır. Bu aynadan yansıyan ışık, çift taraflı yarı geçirgen aynadan geçerek ekrana ulaşır.

Işınlar ekrana ulaştığında bir girişim deseni meydana getirir. Dünya ether ortamıyla aynı doğrultuda hareket ettiğinde hareket doğrultusunda gönderilen ışığın hızı ortam dolayısıyla değişmeli; Dünya'nın hareketine dik olarak gönderilen ışığın hızı etherden etkilenmediğinden değişmemeli ve bu iki ışık demeti ekran üzerine düşürüldüğünde ise farklı girişim desenleri oluşmalıydı. Ancak ekranda farklı girişim desenlerinin oluşmadığını gördüler. Daha sonra deney düzeneği  $90^\circ$  döndürülerek tekrar yapıldı ve sonucun değişmediği görüldü. Işığın farklı doğrultudaki eşit uzunluktaki yolları alma süresinde bir değişiklik olmadığından etherin varlığını gösteren bir kanıt ortaya konulamadı.

Michelson ve Morley sabır ve kararlılık içinde 1929 yılına kadar 42 yıl boyunca ether rüzgârının doğrultu ve şiddet değiştirmesini bekledikleri için yılın değişik zamanlarında ve farklı coğrafik bölgelerde deneylerini tekrarladılar. Fakat sonuç hep aynı oldu. Beklenen saçak kayması gözlenemedi.

Michelson-Morley deneyinin bu şekilde sonuçlanmasına Dünya'nın ether ile sürüklenmesinin neden olabileceğine inanan bazı bilim insanları da Dünya'nın farklı yerlerinde Michelson-Morley deneyini birçok kez tekrarladılar. Ancak saçak kayması hiçbir zaman gözlenemedi.

Michelson-Morley deneyi sonucuna göre

1. Ether hipotezinin geçerli olmadığı ispatlandı.
2. Boşluktaki ışık hızının her doğrultu ve yönde aynı değere sahip olduğu ortaya konuldu.
3. Işığın yayılmak için hiçbir ortama gerek duymayan bir elektromanyetik dalga olduğu görüşü ağırlık kazanmıştır.

Daha sonraki yıllarda Michelson-Morley deneyinin sonucu, Einstein tarafından farklı bir şekilde yorumlanarak özel görelilik teorisinin önermelerinden biri hâline getirildi.

#### Örnek

Michelson-Morley Deneyi'nin yapılış amacını açıklayınız?



Yapılan deneyler ile ışık hızının; ışık kaynağının ya da gözlemcinin hareketinden bağımsız olduğu ve ışığın her koşulda  $c$  ışık hızıyla hareket ettiği görüldü.

1905 yılında Einstein özel görelilik kuramını açıklar. Einstein, özel görelilik kuramını sadece eylemsiz gözlem çerçevesinde açıkladığı için **özel görelilik kuramı** olarak da adlandırılır.

Bu kuram iki postülayla açıklanabilir.

1. Postüla: Fizik yasaları tüm eylemsiz (ivmesiz) referans sistemlerinde aynıdır.

2. Postüla: Işık hızı, gözlemci ve ışık kaynağının hızından bağımsızdır, tüm eylemsiz referans sistemlerinde aynıdır. Işık boşlukta  $2,99792458 \cdot 10^8$  m/s (yaklaşık  $3 \cdot 10^8$  m/s) hızla hareket eder.

Einstein, Lorentz dönüşümlerini kullanarak Newton mekaniğinin temeli olan mutlak uzay (uzunluk) ve mutlak zamanın var olmadığını ortaya koymuştur. Einstein, zamanın ve uzunluğun gözlemcinin kullandığı gözlem sisteminin hızına bağlı olarak değiştiğini göstermiş, momentum ve enerji tanımlarına farklı bir bakış açısı getirmiştir.

#### Örnek

**Modern fiziğin gelişmesinde önemli bir yeri olan Einstein'ın özel görelilik kuramının temel postülaları**

- I. Fizik yasaları tüm eylemsiz referans sistemlerinde aynıdır.
- II. Işık hızı, gözlemci ve ışık kaynağının hızından bağımsızdır ve tüm eylemsiz referans sistemlerinde aynıdır.
- III. Işığın yayılması için maddesel ortama ihtiyaç vardır.

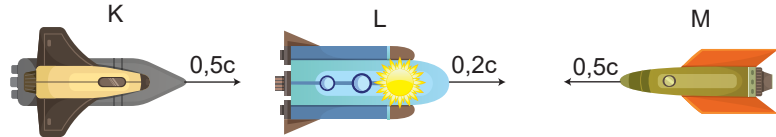
**verilenlerden hangileridir?**

#### Çözüm

I ve II. öncüller Einstein'ın özel görelilik kuramının postülalarındandır. Işığın yayılması için maddesel bir ortama ihtiyaç yoktur. Bu nedenle III. öncül yanlıştır.

#### Örnek

Hızlarının büyüklükleri sırasıyla  $0,5c$ ,  $0,2c$  ve  $0,5$  olan K, L ve M araçları şekildeki gibi hareket etmektedir.



L aracının üzerindeki ışık kaynağından  $c$  hızıyla yayılan ışığın hızını K aracındaki gözlemci  $\vartheta_K$ , M aracındaki gözlemci  $\vartheta_M$  olarak ölçtüğüne göre  $c$ ,  $\vartheta_K$  ve  $\vartheta_M$  arasındaki büyüklük ilişkisi nedir?

## Çözüm

Einstein'ın özel görelilik kuramının 2. postülasına göre ışık hızı, gözlemci ve ışık kaynağının hızından bağımsız olarak tüm eylemsiz referans sistemlerinde aynıdır. Bu nedenle  $c = v_K = v_M$  olur.

## Sıra Sizde - 2

Michelson-Morley deneyi ile Einstein'ın özel görelilik kuramı arasındaki ilişkisi nedir?

## Çözüm

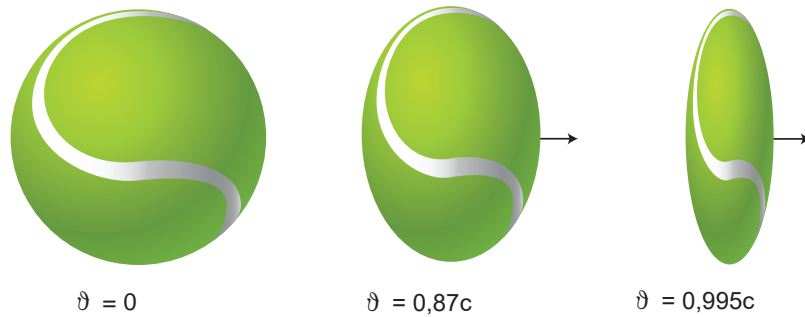
## 5.1.3. Görelî Uzunluk ve Görelî Zaman Kavramları

## Görelî Uzunluk

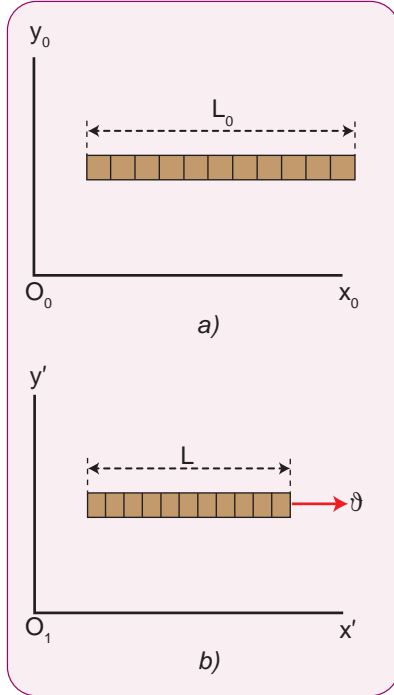
Lorentz dönüşümlerinin uzayla ilgili ortaya koyduğu sonuçlardan biri de hareket eden cisimlerin hızları arttıkça boylarının değişeceğiyle ilgilidir. Bir cismin durgun olduğu referans sisteminde ölçülen uzunluğuna **mutlak uzunluk** denir. Mutlak uzunluk hareketli bir gözlem çerçevesinde farklı ölçülür. Hareketli gözlem çerçevesinde ölçülen bu farklı uzunluğa **görelî uzunluk** denir.

Durgun bir gözlemci,  $L_0$  olarak ölçtüğü çubuğun boyunu (Şekil 5.2: a) ışık hızına yakın ve çubukla aynı doğrultuda  $v$  hızıyla hareket ettiğinde  $L_0$  dan daha kısa bir  $L$  uzunluğunda ölçer (Şekil 5.2: b). Bu olaya **uzunluk büzülmesi** denir.

Uzunluk büzülmesi sadece cismin hareket doğrultusunda meydana gelir. Hareket doğrultusuna dik boyda büzülme olmaz. Bir tenis topu ışık hızına yakın hızlarda hareket ederse topun görünümü Şekil 5.3'teki gibi olur.



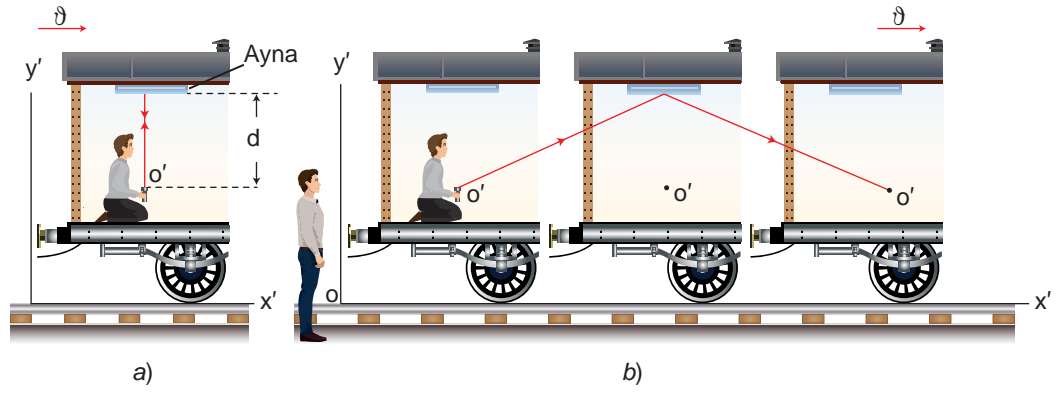
Şekil 5.3: Tenis topunun rölativistik hızına göre hareket doğrultusundaki çapında meydana gelen kısalma



Şekil 5.2: a) Durgun cisim  
b) Rölativistik hızla hareket eden cisim

## Görelî Zaman

Einstein, ışık hızının hep aynı ölçülebilmesi için farklı gözlem çerçevelerinde zamanın farklı akması gerektiğini düşünür. Işık hızına yakın hızlarla hareket eden araç içinde ışığın hızının yine  $c$  değerinde ölçülebilmesi için araç içindeki zamanın daha yavaş akması gerektiğini ifade eder. Einstein'ın bu düşüncesi Şekil 5.2'de tavanına ayna yerleştirilmiş  $\vartheta$  büyüklüğünde sabit hızla hareket eden vagon düşünülerek gösterilebilir. Vagona göre durgun  $O'$  gözlemcisi (Şekil 5.4: a) elindeki kaynaktan çıkan ışığın  $2d$  yol aldığını gözlemlerken yerde bulunan durgun  $O$  gözlemcisi aynı sürede ışığın  $2d$  den daha fazla yol aldığını gözlemler (Şekil 5.4: b). Işık hızı tüm referans sistemlerinde  $c$  olduğuna göre  $O'$  gözlemcisi için geçen sürenin  $O$  gözlemcisi için geçen süreye göre daha az olması gerekir. Bu durum hareketli vagon içerisindeki  $O'$  gözlemcisi için zamanın daha yavaş aktığını gösterir.



Şekil 5.4: a) Vagon içerisindeki durgun gözlemci b) Yere göre durgun gözlemci

Bir olayın gerçekleştiği durgun gözlem çerçevesinde ölçülen zaman aralığına **mutlak zaman** denir. Aynı zaman aralığı hareketli bir gözlem çerçevesinde daima farklı ölçülür. Hareketli gözlem çerçevesinde ölçülen bu farklı zaman aralığına **görelî zaman** denir.

Eş zamanlı olarak kurulan iki farklı saatten biri yüksek hızla hareket ettirildiğinde zaman yavaşladığından saat geri kalır. Bu durum atomik kronometreler kullanılarak deneysel olarak kanıtlanmıştır. Sonuç olarak durgun bir gözlemciye göre hareket hâlindeki bir saat, durgun bir saate göre daha yavaş çalıştığı görülür. Bu olaya **zaman genişlemesi** denir.

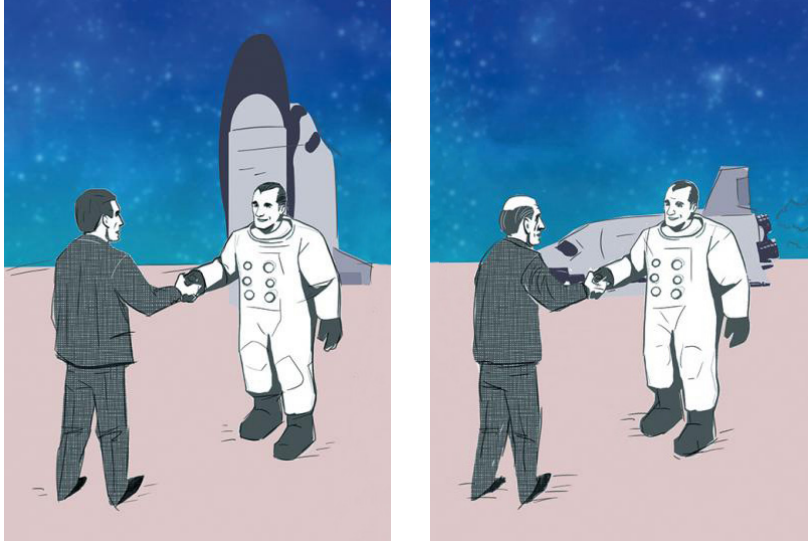
Zamanın hareketli cisimlerde yavaşlamasına bir örnek de parçacık hızlandırıcılarıdır. Normal şartlarda iki parçacık çarpıştığında ortaya çıkan yeni parçacıklar gözlemlenemeyecek kadar büyük bir hızla kaybolur. Ancak bu parçacıklar hızlandırılırsa parçacığın zamanı gözlemciye göre daha yavaş geçecek ve gözlemcinin bu parçacıkları gözlemlemesine yetecek kadar zaman kalacaktır. Bir başka ifadeyle gözlemciye göre olayın gerçekleşme süresi uzamış olacaktır.

## İkizler Paradoksu

Doğruluğu ve yanlışlığı kanıtlanabilen düşüncelere **paradoks** denir. Fiziğin en ünlü paradokslarından biri olan ikizler paradoksu zaman genişlemesinin ilginç bir sonucudur.



İkiz kardeşler Ahmet ve Ali 25 yaşındadır. Ahmet görev gereği Dünya'dan 20 ışık yılı uzaklıktaki X galaksisini yakından görüntülemek için ışık hızına yakın bir hızla uzaya gönderilir. Ali, Dünya'da kalır (Şekil 5.5: a). Ahmet, Dünya'ya döndüğünde ikizi Ali'den daha gençtir (Şekil 5.5: b).



a) b) Şekil 5.5: a, b) İkizler paradoksu

Bu olaydaki paradoks, "İkizlerden hangisi ışık hızına yakın bir hızla hareket etmiştir?" şeklindeki sorudur.

Ali'nin referans sisteminden bakıldığında Ahmet büyük bir hızla yolculuk yaparken kendisi durgun kalmıştır. Ahmet'in referans sisteminden bakıldığında ise Ali ve Dünya yüksek bir hızla kendisinden uzaklaşmaktadır. Dünya'nın dönüş hareketleri ihmal edildiğinde eylemsiz referans sistemi içindeki Ali'ye göre Ahmet, Dünya'ya döndüğünde daha gençtir.

### 5.1.4. Kütle-Enerji Eşdeğerliği

20. yüzyıl fiziğinde çığır açan Einstein'ın fizik yasaları ve ışık hızının tüm referans sistemlerinde aynı olduğu şeklindeki varsayımından hareketle geliştirdiği kütle-enerji eşdeğerliği, kendisiyle adeta bütünleşmiş

$E = m \cdot c^2$  formülüyle ifade edilir.

Yukarıdaki eşitlik madde ile enerjinin birbirine dönüşebileceğini ifade eder.  $m$  kütleli bir madde ışık hızına ulaştığında  $E = m \cdot c^2$  büyüklüğünde bir enerji açığa çıkar. Bu bağıntıdaki  $c$  ışık hızı, çok büyük bir değere sahip olduğu için küçük bir madde kütlelerinin yok olması büyük miktarda enerjinin açığa çıkmasına sebep olur.

Denklemin en önemli uygulama alanı, çekirdek ve parçacık fiziğidir. Çekirdek dönüşümlerinde ortaya yüksek enerjili fotonlar çıkar ve çekirdekten ayrılır. Bu da geride kalan çekirdeğin kütlelerinin ayrılan enerjinin eşdeğeri kadar küçülmesi demektir.

İkizler paradoksu

## Örnek

İkizler paradoksundan nasıl bir sonuca ulaşılabilir?

- A) Uzunluklar görelidir.
- B) Yörüngeler kuantumludur.
- C) Kütle görelidir.
- D) Zaman görelidir.
- E) Işığın hızı boşlukta sabittir.

## Çözüm

Belirli bir zaman aralığı, durgun ve hareketli referans sistemlerinde farklı ölçülür. İkizler paradoksunda da durgun referans sistemi olarak kabul edilen Dünya'daki ikizlerden biriyle ışık hızına yakın bir hızla hareket eden diğerinin belirli bir süre sonra yaşlarının farklı olması zaman göreliliğinden kaynaklanır. Doğru cevap D seçeneğidir.

## Sıra Sizde - 3

Özdeş X, Y ve Z çubukları şekilde verilen hızlarla hareket ettiriliyor.



- a) Durgun bir gözlemci tarafından ölçülen boyları  $L_x$ ,  $L_y$  ve  $L_z$  arasındaki büyüklük ilişkisi nedir?
- b) X, Y ve Z çubuklarının farklı boylarda ölçülmesinin sebebi nedir?

## Çözüm



## Sıra Sizde - 4

Aşağıda numaralar ile verilen ifadeleri, harf ile verilen ifadelerle eşleştiriniz.

1. Belirli bir zaman aralığının hareketli gözlem çerçevesinde farklı ölçülmesine denir. ( )	a) paradoks
2. Bir cismin durgunken ölçülen boyunun hareketli gözlem çerçevesinde farklı uzunlukta ölçülmesine denir. ( )	b) görelî zaman
3. Kendi içinde çelişkili gözükken hem doğruluğu hem de yanlışlığı kanıtlanabilen düşüncelere verilen addır. ( )	c) görelî uzunluk

## Çözüm


## Sıra Sizde - 5

Bir astronot ışık hızına yakın, sabit bir hızla hareket eden uzay mekiğinde kolundaki saatle mekik içindeki başka bir saatin aynı zamanı gösterdiğini görür. Dünya'daki merkez ile konuştuğunda oradaki saatlerin daha ileride olduğunu öğrenir.

Mekikteki saatler ile Dünya'daki saatlerin farklı olmasının sebebi nedir? Kısaca açıklayınız.

## Çözüm


## Sıra Sizde - 6

Çekirdek tepkimelerinde etrafa yüksek enerjili fotonlar yayılır. Fotonun kütlesi olmamasına rağmen geride kalan çekirdek kütlelerinin azaldığı görülür.

Yukarıdaki olayın kütle-enerji eşdeğerliği ile bir ilişkisi var mıdır? Kısaca açıklayınız.

## Çözüm


## 2. BÖLÜM

# KUANTUM FİZİĞİNE GİRİŞ

### Konular

5.2.1. Siyah Cisim Işıması

### Anahtar Kavramlar

• Siyah cisim ışıması

- Çevrenizdeki cisimlerin ışıma yaptığını biliyor musunuz? Bunun sebebi ne olabilir?
- Bir cismin yaptığı ışımadan yararlanarak sıcaklığı tespit edilebilir mi?

Bu bölümde Planck hipotezi açıklanacak, dalga boyu-ışıma şiddeti grafiğinden hareketle klasik yaklaşımla modern yaklaşımın çelişkisi ve bu çelişkinin kuantum fiziğinin doğuşuna etkisi üzerinde durulacaktır.

### 5.2.1. Siyah Cisim Işıması

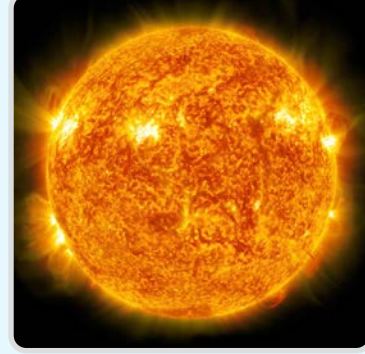
Sıcaklığı mutlak sıcaklığın üstünde olan bütün maddeler, elektromanyetik ışımaya yapar. Bu ışımaya, madde hangi fiziksel hâlde olursa olsun maddeyi oluşturan taneciklerin titreşim hareketi yapması sonucunda meydana gelir. Maddelerin yaydığı elektromanyetik ışımaya etkisi taneciklerin titreşim hareketinin şiddetine, taneciklerin titreşim hareketinin şiddeti de maddenin sıcaklığına bağlı olarak değişir.

Maddenin sıcaklığına bağlı olarak farklı frekanslarda ışımaya yapmasına **termal ışımaya** denir.

Üzerine düşen ışığın tamamını soğuran ve sıcaklığa bağlı olarak her dalga boyunda ışımaya yapan cisimlere **siyah cisim** denir. Siyah cisimler tarafından cismin sıcaklığına bağlı olarak yapılan ışımaya da **siyah cisim ışımaya** denir. Güneş ve yıldızların yaptığı ışımaya, kor hâline gelmiş kömür parçaları arasındaki ışımaya (Görsel 5.4), yüksek sıcaklığa kadar ısıtılan demirden yayılan ışımaya (Görsel 5.5) siyah cisim ışımaya örnek olarak gösterilebilir. Siyah cisimler görünür bölgede kırmızı ışımaya yaparken cismin sıcaklığı arttıkça turuncu, sarı, yeşil ve maviye doğru değişen ışımalar yapar.

#### Meraklısına Bilgi

Kara cisimlerin mutlaka siyah cisim olması gerekmez. Güneş'in yüzeyi gelen ışınların çok küçük bir kısmını yansıttığından kara cisim olarak değerlendirilir.



Görsel 5.3: Güneş'in ışımaya



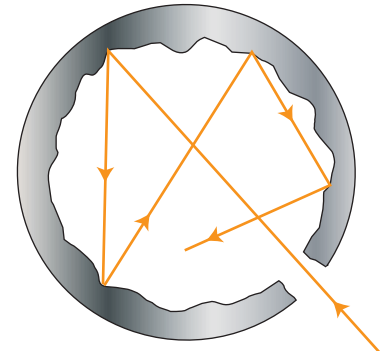
Görsel 5.4: Kor hâlindeki kömürün ışımaya



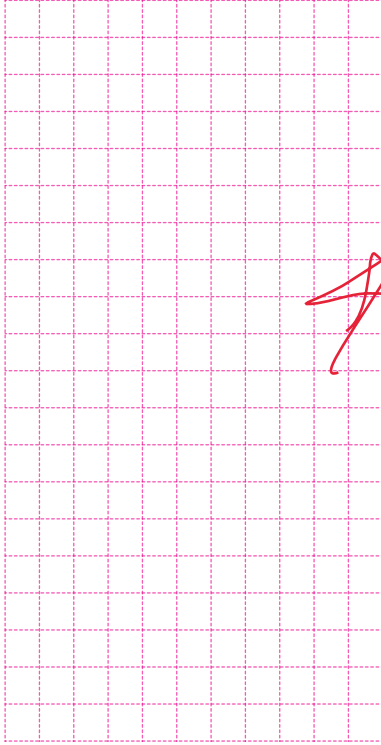
Görsel 5.5: Yüksek sıcaklıktaki demirin ışımaya

Duvarında küçük bir boşluk açılmış içi boş bir cisim, siyah cisim gibi davranır (Şekil 5.6). Bu cismin içine gelen ışınlar çoklu yansımaya sonucunda tamamen soğurulur. Oyuktan çıkan ışın sadece duvardaki yüklerin termal hareketinden kaynaklanır. Bu ışımaya siyah cisim ışımayadır.

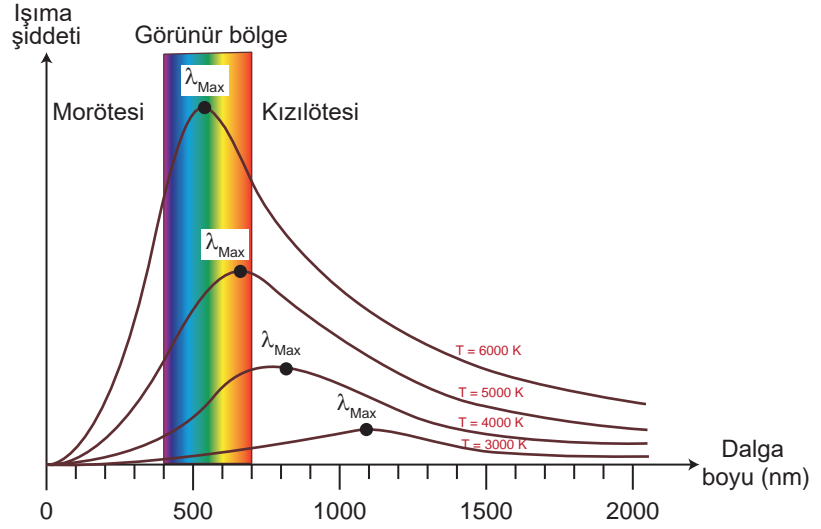
Yapılan deneyler ile siyah cisimlerin bütün dalga boylarında ışımaya yaptığı, bazı dalga boylarında ise ışımaya daha büyük şiddette olduğu kanıtlandı. Işımanın maksimum şiddette olduğu dalga boyu ise cismin sıcaklığıyla ters orantılı olarak azalır.



Şekil 5.6: Siyah cisim modeli



Siyah cisimlerin yaptığı ışımının, sıcaklığın artışıyla ışınım şiddetinin, ışınımın dalga boyuna bağlı değişim grafiği Şekil 5.7'deki gibidir.



Şekil 5.7: Farklı sıcaklıklar için siyah cismin ışınım şiddetinin ışınımın dalga boyuna bağlı değişim grafiği

### Simülasyon



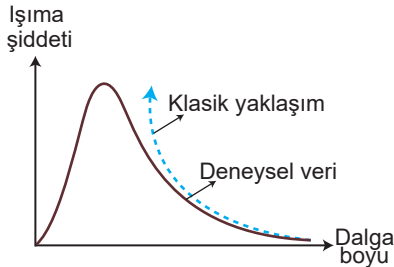
Farklı sıcaklıklar için siyah cismin ışınım şiddetinin, ışınımın dalga boyuna bağlı değişimini karekoddan yararlanarak inceleyiniz.

Grafikten aşağıdaki çıkarımlar yapılır.

1. Sıcaklık arttıkça ışınım şiddeti artar, yayınlanan ışınımın dalga boyu küçülür ve ışınım şiddetinin maksimum olduğu tepe noktası daha kısa dalga boyuna doğru yaklaşır. Bu durum matematiksel olarak Wien kayma yasasıyla (Wien yer değiştirme yasası) ifade edilir.  
T ışınımı yapan cismin sıcaklığı ve eğrinin tepe noktasına karşılık gelen en büyük dalga boyu  $\lambda_{Max}$  olmak üzere bu yasa

$$\lambda_{Max} \cdot T = 0,2898 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

2. Cismin sıcaklığı arttıkça yayınladığı ışımının frekansı ile birlikte ışınım gücü de artar. Işınım şiddetinin ışınımın dalga boyuna bağlı değişim grafiğinin altında kalan alan, toplam ışınım gücünü verir. Bu nedenle sıcaklık arttıkça grafiğin altında kalan alan dolayısıyla ışınım gücü de artmaktadır.



Şekil 5.8: Farklı sıcaklıklar için siyah cismin ışınım şiddetinin ışınımın dalga boyuna bağlı değişim grafiğinin klasik yaklaşımla karşılaştırılması

Klasik yaklaşıma göre cismin yapacağı ışınım şiddeti, frekansa bağlı olarak sürekli artış göstermelidir (Şekil 5.8). Bu durum ışınımın dalga boyu küçüldükçe maddenin yayacağı enerjinin sonsuz bir değere yaklaşması demektir.

Deneyler sonucunda siyah cisimden yayılan ışımının dalga boyu ile enerjisi arasındaki ilişki, klasik yaklaşımın öngördüğü sonuçlardan farklı görülür. Klasik yaklaşım, uzun dalga boylarında deneysel verilere oldukça uyumludur. Ancak deneysel verilerde de dalga boyu sıfıra yaklaştıkça ışınım şiddetinin de sıfıra yaklaştığı Şekil 5.8'de görülür. Bu durum kısa dalga boylarında klasik fizik ile deneysel veriler arasında uyumsuzluk olduğunu gösterir.

Morötesi felaket olarak adlandırılan bu uyumsuzluk klasik yaklaşım tarafından açıklanamamış ve kuantum fiziğinin doğmasına sebep olmuştur. Işıma enerjisinin sürekli değil de kesikli olduğu düşünüldüğünde siyah cisim ışınması olayının açıklanabileceğini ifade eden Planck, bu uyumsuzluğa çözüm getirmiştir.

## Planck Hipotezi

Fiziğin tarihsel gelişiminde elektromanyetik dalgaları başarılı şekilde açıklayan elektromanyetik teorisinin, siyah cisim ışınmasını açıklamakta yetersiz kalması, fizik bilimi açısından yeni teori arayışlarının başlamasına neden olmuştur. Bu dönemde Max Planck (Maks Plank, 1858-1947) (Görsel 5.6), enerjinin kuantumlu yayıldığı fikrini açıklamıştır. Bu açıklama kuantum fiziğinin temeli hâline gelmiştir.

Akkor hâlindeki katıların yaydığı ışınmaları inceleyen Planck'ın bulduğu matematiksel fonksiyon, büyük dalga boylarında klasik fizik yasalarıyla aynı sonuçları verirken küçük dalga boylarında da deneysel sonuçlarla uyum göstermektedir.

Planck hipotezinde iki varsayımda bulundu.

1. Işıma enerjisinin ancak belirli büyüklüklerde yani kuantumlar hâlinde soğurulup yayınlanabileceğini ve ışınımın frekansı ile doğru orantılı olduğunu ifade etmiştir.

Işınım yapan cisimlerden salınan ışınım enerjisi atomun kuantum sayısı  $n$ , ışınımın frekansı  $f$  ve Planck sabiti  $h$  olmak üzere

$$E_n = n \cdot h \cdot f$$
 ifadesiyle bulunur.

Buradan kuantum sayısı adı verilen  $n$  pozitif bir tam sayı,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  büyüklüğünde Planck tarafından bulunan evrensel bir sabittir. Her bir kesikli enerji değeri atom için farklı bir kuantum durumuna karşılık gelir. Örneğin atom  $n = 1$  kuantum durumunda iken enerjisi  $h \cdot f$ ,  $n = 2$  kuantum durumunda iken enerjisi  $2 \cdot h \cdot f$  olur.

2. Atomlar, sonradan foton adını alacak kesikli paketler hâlinde enerji yayar veya soğurur. Bu olay atomların bir enerji düzeyinden bir başka enerji düzeyine geçişi sırasında olur.

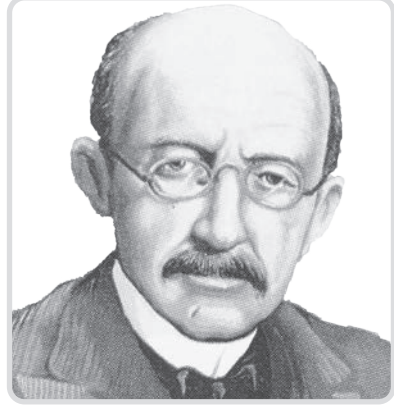
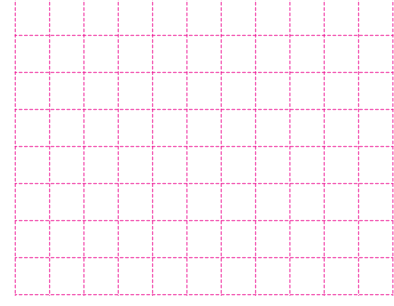
Ardışık iki kuantum düzeyi arasındaki enerji farkı

$$E = h \cdot f$$
 eşitliği ile hesaplanır.

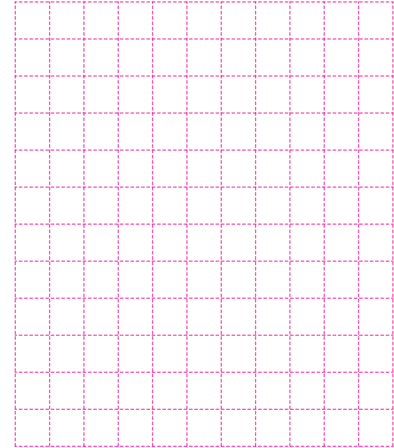
Planck, yaptığı çalışmalardan ve siyah cisim ışınmasına yaptığı katkıdan dolayı 1918 yılında Nobel Ödülü almıştır.

### Meraklısına Bilgi

Einstein, fotoelektrik olayını açıklarken Planck'ın kuantum fikrini kullanmış ve yaptığı bu çalışma ile Nobel ödülünü almıştır.

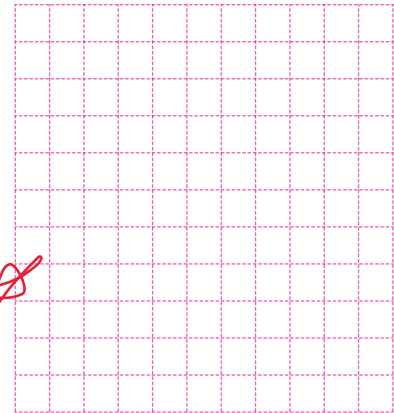


Görsel 5.6: Max Planck



### Meraklısına Bilgi

Bohr, atom teorisi fikrini geliştirirken Planck'ın kuantum fikrinden yararlanmıştı.



## Örnek

**Siyah cisim ışınımında klasik teoriye karşılık neden kuantumlu bir öneri getirilmiştir?**

## Çözüm

Klasik fizik, atomların sadece büyük dalga boylarında her frekansta ışınım yaptığını ileri sürerken düşük dalga boylarında sonsuz şiddette bir enerji yaymasını öngörür. Ancak bu durum deneysel sonuçlarla örtüşmediğinden Planck tarafından siyah cisim ışınımında deneysel sonuçlarla örtüşen kuantumlu bir öneri getirilmiştir.

## Sıra Sizde - 7

Üzerine düşen ışığın tamamını soğuran ve sıcaklığa bağlı olarak her dalga boyunda ışınım yapan cisimlere siyah cisim denir.

**Siyah cisimlerin ışınım yapmasının nedenini kısaca açıklayınız.**

## Çözüm

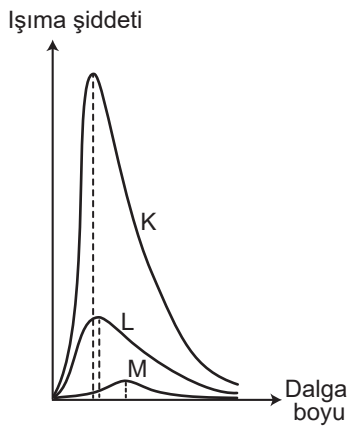
Empty grid for the solution to the question above.

## Sıra Sizde - 8

K, L ve M cisimlerine ait ışınım şiddeti dalga boyu grafiği verilmiştir.

**L cisminin yaptığı ışınımın rengi yeşil ise K ve M cisimlerinin yaptığı ışınımın rengi aşağıdakilerden hangisi gibi olamaz?**

- |    | K    | M       |
|----|------|---------|
| A) | Mavi | Kırmızı |
| B) | Mor  | Turuncu |
| C) | Mavi | Sarı    |
| D) | Sarı | Kırmızı |
| E) | Mor  | Sarı    |



## Çözüm

Empty grid for the solution to the question above.



# 3. BÖLÜM

## FOTOELEKTRİK OLAYI

### Konular

- 5.3.1. Foton Nedir?
- 5.3.2. Fotoelektrik Olayı
- 5.3.3. Farklı Metaller için Maksimum Kinetik Enerji-Frekans Grafiği
- 5.3.4. Fotoelektronların Sahip Olduğu Maksimum Kinetik Enerji, Durma Gerilimi ve Metalin Eşik Enerjisi Arasındaki İlişki
- 5.3.5. Fotoelektrik Olayının Günlük Hayattaki Uygulamaları
- 5.3.6. Fotoelektrik Olayla İlgili Hesaplamalar

### Anahtar Kavramlar

- Fotoelektrik olayı

- Sokak lambalarının havanın kararmasıyla kendiliğinden yanıp havanın aydınlanmasıyla kendiliğinden sönmemesinin sebebi ne olabilir?
- Otomatik kapılara yaklaşıldığında kapıların kendiliğinden açılmasının nedenini hiç düşündünüz mü?

Bu bölümde foton kavramı ve fotoelektrik olayı açıklanıp Hertz'in çalışmaları ve Einstein'ın fotoelektrik denklemi üzerinde durularak fotoelektrik olayına etki eden değişkenler gözlemlenip yorumlanacaktır.

Farklı metaller için maksimum kinetik enerji-frekans grafiğinin çizilmesi sağlanıp fotoelektronların sahip olduğu maksimum kinetik enerji, durdurma gerilimi ve metalin eşik enerjisi arasındaki matematiksel ilişki açıklanacaktır.

Fotoelektrik olayının günlük hayattaki olumlu ve olumsuz etkileri üzerinde durulup fotoelektrik olayıyla ilgili matematiksel hesaplamalar yapılacaktır.



## 5.3.1. Foton Nedir?

Modern fiziğin önemli çalışma alanlarından biri olan kuantum fiziği; molekülleri, atomları ve atom altı parçacıkların enerjilerini ve bu parçacıkların davranışlarını inceler. Kuantum fiziğinin uğraş alanı içerisinde yer alan pek çok büyüklük, belirli değerler alabilir. Bu tür büyüklüklere **kesikli** veya **kuantumlu** denir.

Max Planck 1900 yılında ışığın kuantum adını verdiği küçük enerji paketlerinden oluştuğunu ileri sürmüştür.

Albert Einstein (1879-1955) (Görsel 5.7) ışığın foton adını verdiği enerji paketleri hâlinde ilerlediğini ifade etmiştir. Einstein'ın ileri sürdüğü fikirler, Planck'ın fikirleriyle de uyumaktadır. Bir ışık demetinde enerji taşıyan küçük enerji paketlerine **foton** denir.

Fotonların özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Işık hızıyla hareket eder.
- Kütleleri ve durgun enerjileri yoktur.
- Frekans veya dalga boylarına bağlı olarak enerji ve momentuma sahiptir.
- Soğurulduğunda yok olur.
- Kütle olmamasına rağmen madde ile etkileşime girebilir.
- Hiçbir sistemde durgun hâlde bulunamaz.
- Elektrikçe yüksüz oldukları için elektrik ve manyetik alandan etkilenmez.

Einstein'a göre frekansı  $f$  olan bir fotonun enerjisi

$$E_f = h \cdot f \text{ şeklindedir.}$$

Fotonun frekansı yerine  $f = \frac{c}{\lambda}$  ifadesi yazılırsa fotonun enerjisini dalga boyu cinsinden veren  $E_f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$  ifadesi bulunur. Böylece

$$E_f = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \text{ olur.}$$

Fotonun enerjisinin ( $E$ ) SI'da birimi Joule dür (J). Planck sabitinin değeri  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s, frekansın ( $f$ ) biriminin  $\text{sn}^{-1}$ , ışık hızının ( $c$ ) biriminin m/s ve dalga boyunun ( $\lambda$ ) biriminin m olarak alınması gerekir. Eğer dalga boyunun birimi Å (Angstrom) olarak verilirse  $1\text{Å} = 10^{-10}$  metre eşitliği kullanılarak metreye dönüştürülebilir.

Bir fotonun enerjisi çok küçük değere sahip olduğu için elektronvolt (eV) cinsinden de ifade edilebilir. Bir elektronun bir voltluk potansiyel farkı altında kazandığı enerjiye **elektronvolt** denir.  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  J dür.

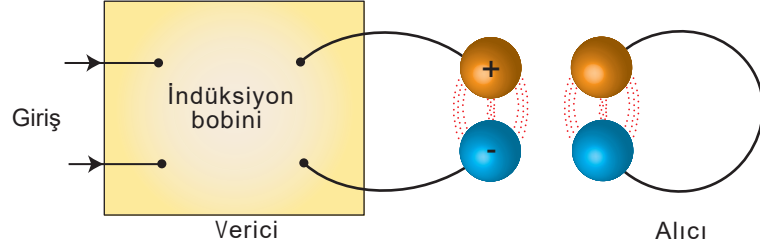
Planck sabitinin birimi eV cinsinden ışık hızının birimi Å cinsinden ifade edilirse ( $h \cdot c$ ) çarpımı yaklaşık olarak  $12\,400 \text{ eV} \cdot \text{Å}$  olarak bulunur.



Görsel 5.7: Albert Einstein



akım oluşur. Hertz'in oluşturduğu bu düzenek fotoelektrik olayının ilk kez gözlemlendiği düzendir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9: Hertz'in elektromanyetik dalgaları üreten ve algıladığı düzenek şematik gösterimi

Hertz yaptığı deneyler sonucunda ürettiği dalgaların kırınım, kırılma, yansıma ve kutuplanma gibi ışık olaylarını gerçekleştirdiğini kanıtlar. Ayrıca elektromanyetik dalgaların hızlarının ışık hızına eşit olduğu Hertz tarafından ortaya konmuştur.

Bir metal yüzeyine düşürülen ışığın metalden elektron koparması olayına **fotoelektrik olayı**, fotonlar tarafından koparılan elektronlara ise **fotoelektron** denir.

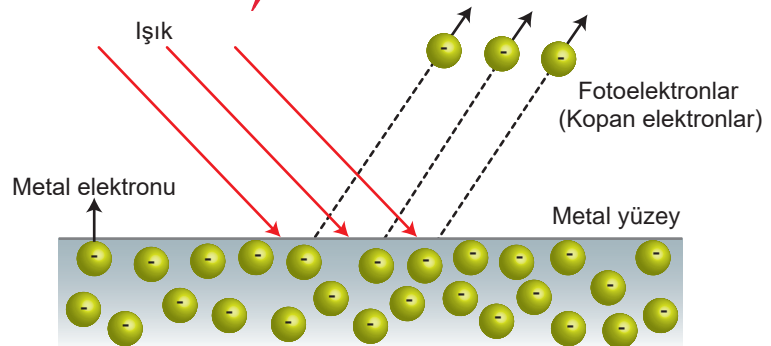
Bir metalin yüzeyine düşürülen her ışık o metalden elektron koparmaz. Elektronların metalden koparabilmesi için sahip olması gereken en küçük enerjiye **eşik enerjisi** ( $E_0$ ) denir. Tablo 5.1'de bazı metallerin eşik enerjileri verilmiştir.

Bir fotonun enerjisi ne kadar yüksek olursa olsun bu enerji tek elektrona aktarılır ve elektron metal yüzeyden koparılır.

Fotoelektrik olayı ile ilgili pek çok çalışma yapılsa da en başarılı çalışma 1905 yılında Einstein tarafından yapılmıştır.

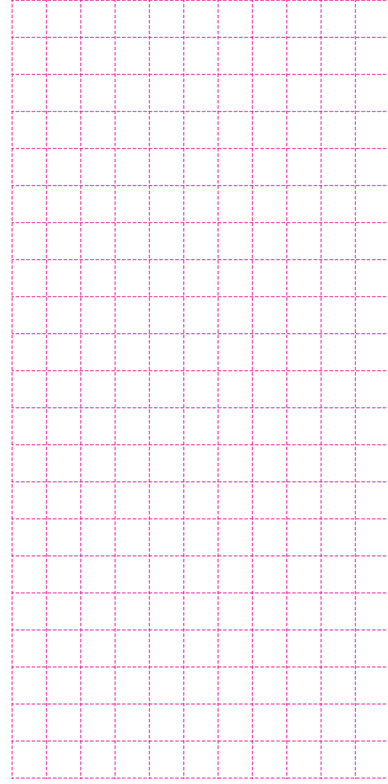
Einstein'ın fotoelektrik modeline göre bir fotonun enerjisi ( $E_f$ ) metalin eşik enerjisinden ( $E_0$ ) büyük ise fotonun enerjisinin eşik enerjisi kadarlık kısmı ile elektron koparılır, kalan enerji koparılan elektrona kinetik enerji ( $E_k$ ) olarak aktarılır (Şekil 5.10). Böylece foton soğurulmuş olur.

Bu durum  $E_f = E_0 + E_k$  şeklinde ifade edilir.

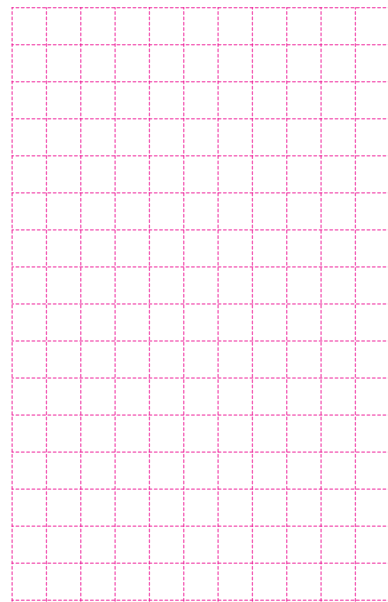


Şekil 5.10: Gelen fotonların metal yüzeyinden elektron koparması

Fotoelektrik olayını etkileyen değişkenlerin neler olduğunu incelemek için "Fotoelektrik olayını etkileyen değişkenler" etkinliğini yapınız.



Tablo 5.1: Bazı Metallerin Eşik Enerjileri	
Metal Cinsi	Eşik Enerjisi (eV)
Sodyum	2,6
Bakır	4,70
Gümüş	4,73
Demir	4,14
Alüminyum	4,08
Çinko	4,31
Platin	6,35
Demir	4,50



## 1. ETKİNLİK

<b>Etkinliğin Adı</b>	Fotoelektrik olayını etkileyen değişkenler
<b>Etkinliğin Amacı</b>	Fotoelektrik olayını etkileyen değişkenlerin incelenmesi
<b>Kullanılan Malzemeler</b>	Tablet veya etkileşimli tahta



## Etkinliğin Hazırlanışı ve Yapılışı

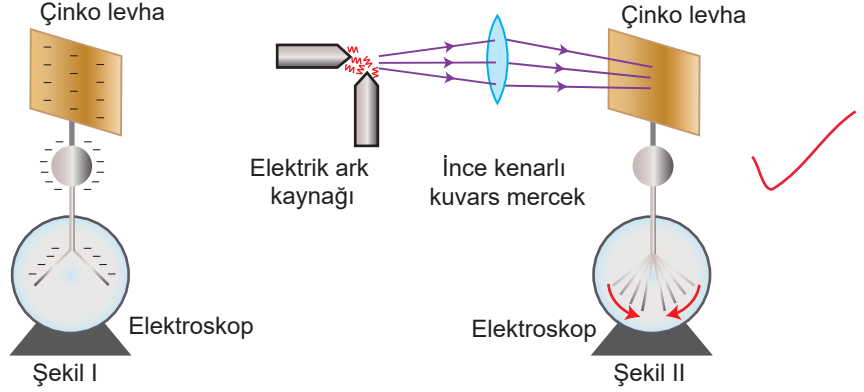
- Adım:** Karekodu okutarak fotoelektrik olayı simülasyonunu açınız.
- Adım:** Simülasyonda “Hedef” butonundan “Sodyum” metalini seçiniz. Işık şiddetini %50 ye, ışığın dalga boyunu 200 nm seviyesine ayarlayınız. Ampermetrede oluşan akımın şiddetini defterinize yazınız.
- Adım:** “Hedef” butonundan “Bakır” metalini seçerek ampermetrede oluşan akımın şiddetini defterinize yazınız.
- Adım:** “Hedef” butonundan “Sodyum” metalini seçiniz. Işık şiddetini %100 e, ışığın dalga boyunu 200 nm seviyesine ayarlayınız. Ampermetrede oluşan akımın şiddetini defterinize yazınız.
- Adım:** Hedefte sodyum metali varken ışık şiddetini %100 e, dalga boyunu 100 nm seviyesine ayarlayınız ve ampermetrede oluşan akımın şiddetini defterinize yazınız.
- Adım:** Işık şiddetini %50 ye düşürüp dalga boyunu 500 nm seviyesine ayarlayınız ve ampermetrede oluşan akım şiddetini defterinize yazınız.
- Adım:** Işık şiddetini %100 e, dalga boyunu 500 nm seviyesine ayarlayınız ve ampermetrede oluşan akım şiddetini defterinize yazınız.

## Etkinliğin Sonuçlandırılması

- Etkinliğin 2 ve 3. adımlarında ampermetrede okunan değerleri karşılaştırarak farklılığın nedenini arkadaşlarınızla tartışınız.
- Etkinliğin 4 ve 5. adımlarında ampermetrede okunan değerleri karşılaştırarak farklılığın nedenini arkadaşlarınızla tartışınız.
- Etkinliğin 2 ve 6. adımlarında ampermetrede okunan değerleri karşılaştırarak farklılığın nedenini arkadaşlarınızla tartışınız.
- Etkinliğin 6 ve 7. adımlarında ampermetrede okunan değerleri karşılaştırdığınızda farklılık oldu mu? Olmadysa nedenini arkadaşlarınızla tartışınız.

## Sıra Sizde - 10

Elektroskobun topuzuna bağlanmış negatif yüklü Şekil I'deki çinko levha-haya ince kenarlı kuvars mercekten geçen yeterince enerjiye sahip fotonlar Şekil II'deki gibi çinko levha üzerine düşürüldüğünde elektroskobun yapraklarının kapandığı görülür.



**Elektroskobun yapraklarının kapanmasının sebebi nedir? Açıklayınız.**

## Çözüm

## Örnek

Eşik enerjisi 5 eV olan bir metalin yüzeyine 8 eV enerjili fotonlar düşürülüyor.

**Buna göre koparılan elektronların maksimum kinetik enerjisi kaç eV olur?**

## Çözüm

Einstein'ın fotoelektrik denklemine göre

$$E_f = E_0 + E_k \text{ ifade edilir. Buradan } E_k = E_f - E_0 \text{ olur.}$$

Bilinen değerler denklemde yerine yazılırsa

$$E_k = 8 - 5 = 3 \text{ eV bulunur.}$$

## Örnek

Bir metalin yüzeyine 2200 Å dalga boyulu ışık düşürüldüğünde metalden kopan elektronların maksimum kinetik enerjileri  $6 \cdot 10^{-19}$  J oluyor.

**Buna göre metalin eşik enerjisi kaç J dür?**

$$(h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}, c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}, 1\text{Å} = 10^{-10} \text{ m alınız.})$$

## Çözüm

Gelen fotonun dalga boyu  $\lambda = 2200 \text{ \AA} = 2,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$  olur. Bu değer enerji denkleminde yerine yazılırsa

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,2 \cdot 10^{-7}} = 9 \cdot 10^{-19} \text{ J olur.}$$

Bulunan değer fotoelektrik denkleminde yerine yazılırsa

$$E_f = E_0 + E_K \Rightarrow E_0 = E_f - E_K = 9 \cdot 10^{-19} - 6 \cdot 10^{-19} = 3 \cdot 10^{-19} \text{ J bulunur.}$$

## Sıra Sizde - 11

Eşik enerjisi 3 eV olan bir metal yüzeyine ışık düşürüldüğünde metalden kopan elektronların maksimum kinetik enerjileri 1 eV oluyor.

**Buna göre yüzeye düşürülen fotonların dalga boyu kaç Å olur?**

( $h \cdot c = 12\,400 \text{ \AA} \cdot \text{eV}$ )

## Çözüm

### 5.3.3. Fotoelektronların Maksimum Kinetik Enerjileri ile Gelen Fotonların Frekansı Arasındaki İlişki

Eşik enerjisine sahip bir fotonun frekansına **eşik frekansı ( $f_0$ )** denir. Bu frekansa karşılık gelen dalga boyuna ise **eşik dalga boyu ( $\lambda_0$ )** denir. Eşik enerjisi fotonun sahip olması gereken enerji olduğu için

$$E_0 = h \cdot f_0 \text{ ya da } E_0 = \frac{h \cdot c}{\lambda_0} \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

Her metal farklı bir eşik enerjisi değerine sahiptir. Bu nedenle eşik enerjisi ( $E_0$ ), eşik frekansı ( $f_0$ ) ve eşik dalga boyu ( $\lambda_0$ ) sadece metalin cinsine bağlıdır. Her foton ancak bir elektronla etkileştiği için metal yüzeyine düşürülen fotonların enerjileri eşik enerjisinden büyükse fotonun enerjisinin bir kısmı ile elektron koparılır. Kalan enerji de koparılan elektronlara kinetik enerji olarak kullanılır. Elektron metal yüzeyinden bu enerji ile ayrılır. Elektronların yüzeyi terk ettikleri anda sahip oldukları kinetik enerjiye **maksimum kinetik enerji** denir.

Einstein'ın fotoelektrik denklemi

$$E_f = E_0 + E_K \text{ frekansa bağlı olarak yazılırsa}$$

$$h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2} m \cdot v^2 \text{ olur.}$$

Denklemden görüldüğü gibi

- $f < f_0$  ise metal yüzeyinden elektron koparılamaz. Fotoelektrik olayı gerçekleşmez.
- $f = f_0$  ise metal yüzeyden elektron koparılır. Ancak fotoelektronların kinetik enerjisi sıfır olur.
- $f > f_0$  ise metal yüzeyden elektron koparılır. Fotoelektron kazandığı kinetik enerjiyle hareket eder.

Bir metal yüzeyine gönderilen fotonların frekansı artırıldığında metal yüzeyinden koparılan elektronların kazanacağı maksimum kinetik enerji de artacaktır.

Fotoelektrik denkleminin ışığın dalga boyu cinsinden ifadesi

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{h \cdot c}{\lambda_0} + \frac{1}{2} m \cdot v^2 \text{ şeklinde olur.}$$

Yapılan çalışmalarda metalden kopan elektronların kinetik enerjisinin metal yüzeye düşürülen ışığın şiddetine bağlı olmadığı, frekansına ya da dalga boyuna bağlı olduğu görülmüştür.

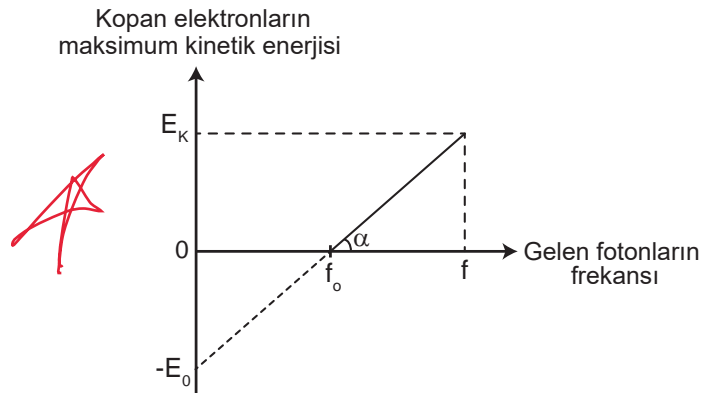
Fotonun frekansına bağlı fotoelektrik denkleminin göre

$$E_f = E_0 + E_k$$

$$h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

- $f = 0$  ise denklemin matematiksel olarak çözümünden elektronların kinetik enerjisi  $E_k = -E_0$  olur.
- $f = f_0$  ise kopan elektronların kinetik enerjisi  $E_k = 0$  olur.
- $f > f_0$  ise kopan elektronlar bir  $E_k$  kinetik enerjisine sahip olur.

Bu ifadelerden yola çıkılarak kopan elektronların sahip olduğu maksimum kinetik enerjinin fotonun frekansına bağlı değişim grafiği elde edilir ( Şekil 5.11).



Şekil 5.11: Kopan elektronların kinetik enerjilerinin gelen fotonların frekansına bağlı değişim grafiği



Grafiğin eğimi sabit olup Planck sabitini ( $h$ ) verir. Bu nedenle kopan elektronların maksimum kinetik enerjilerinin gelen fotonların frekansına bağlı değişim grafiği hangi metal için çizilirse çizilsin eğimleri birbirine eşittir (Şekil 5.12).

### Sıra Sizde - 12

Demir, çinko ve bakır metallerinin eşik enerjileri ve eşik frekansları tabloda verilmiştir.

Metal	Eşik Enerjisi (eV)	Eşik Frekansı ( $s^{-1}$ )
Demir	4,14	$1,004 \cdot 10^{15}$
Çinko	4,31	$1,04 \cdot 10^{15}$
Bakır	4,70	$1,134 \cdot 10^{15}$

Buna göre

- Bu metallere ait kopan elektronların kinetik enerjilerinin gelen fotonların frekansına bağlı değişim grafiklerini çiziniz.
- Bu metallere  $1,12 \cdot 10^{15} s^{-1}$  frekanslı fotonlar düşürüldüğünde hangi metallerde fotoelektrik olayı gerçekleşir?

### Çözüm

### Örnek

Bir metal yüzeyine  $f$  frekanslı fotonlar düşürüldüğünde kopan elektronların maksimum kinetik enerjilerinin gelen fotonların frekansına bağlı değişim grafiği şekildeki gibi oluyor.

Buna göre gelen fotonların enerjileri kaç eV olur?

### Çözüm

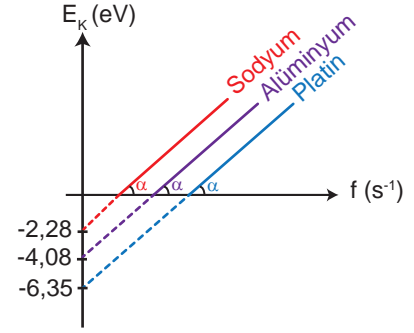
Grafiğin eğimi Planck sabitini verir.  $\tan \alpha = \frac{2}{f - f_0} = h$

$$2 = h \cdot f - h \cdot f_0$$

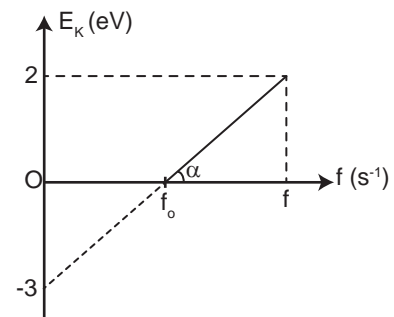
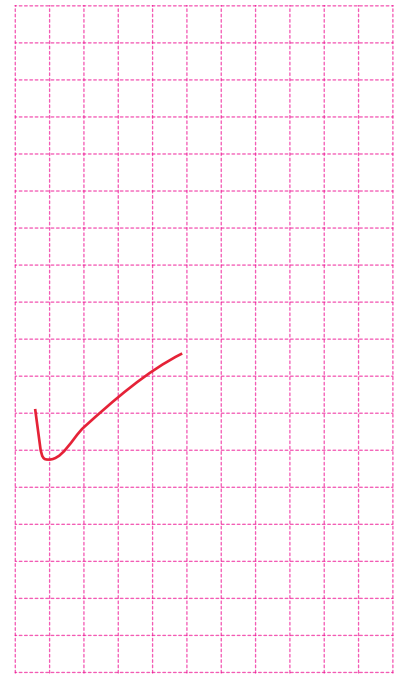
$h \cdot f$  gelen fotonların enerjisi ve  $h \cdot f_0$  metalin eşik enerjisidir.

Grafikten  $E_0 = 3$  eV olarak alınır. Bu değer yerine yazılırsa

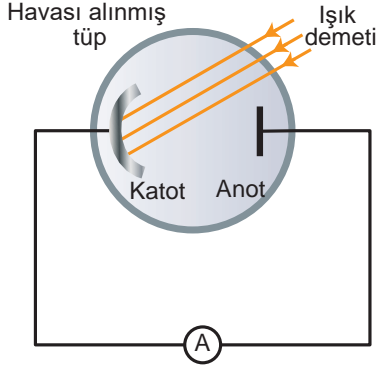
$$2 = E_f - E_0 \Rightarrow 2 = E_f - 3 \Rightarrow E_f = 2 + 3 = 5 \text{ eV bulunur.}$$



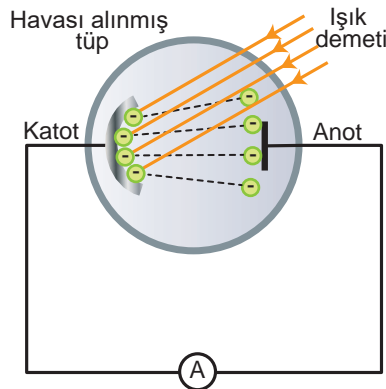
Şekil 5.12: Farklı metallere koparılan elektronların kinetik enerjilerinin gelen fotonların frekansına bağlı değişim grafiği



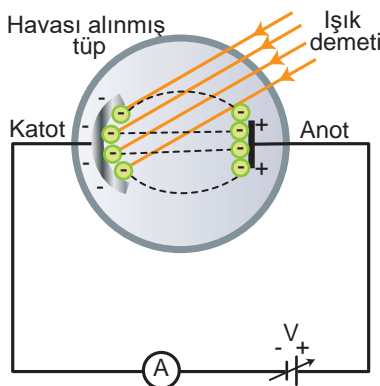
### 5.3.4. Fotonların Sahip Olduğu Maksimum Kinetik Enerji, Durma Gerilimi ve Metalin Eşik Enerjisi Arasındaki İlişki



Şekil 5.13: Fotoselin şematik gösterimi



Şekil 5.14: Fotoselde akım oluşması



Şekil 5.15: Bir fotocele üreteç bağlanması

Fotoelektrik olayının daha iyi anlaşılabilmesi için fotosellerin çalışma prensibi incelenmelidir. Üzerine düşürülen ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren düzeneklere **fotosel** denir (Şekil 5.13). Fotoseller havası alınmış bir tüp ve içerisine konulan iki metal levhadan oluşur. Alkali metallere seçilen ve üzerine ışığın düşürüldüğü levhaya **katot**, katottan kopan elektronların ulaştığı karşı levhaya ise **anot** denir.

Fotosel karanlık bir ortamda iken devrede herhangi bir akım oluşmaz. Katot levhası üzerine ışık düşürüldüğünde gelen fotonların enerjileri metalin eşik enerjisinden küçükse fotonlar katot yüzeyinden elektron sökmez. Bu durumda akım oluşmaz.

Katot yüzeyine düşürülen fotonların enerjileri eşik enerjisine eşitse katot yüzeyinden elektron koparılır ancak elektrona kinetik enerji kazandırılmadığı için elektron katot yüzeyinde kalır. Bu durumda da akım oluşmaz.

Katot yüzeyine düşürülen fotonların enerjisi metalin eşik enerjisinden büyükse metal tarafından soğurulan fotonun enerjisi Einstein denklemine göre hem elektrona koparır hem de koparılan elektrona kinetik enerji kazandırır. Elektronlar kazandığı kinetik enerjinin etkisi ile metal yüzeyi terk eder. Bu elektronlardan bir kısmı sapar, bir kısmı anot levhasına ulaşır ve devrede bir akım dolaşmasına neden olur. Oluşan akıma **fotoelektrik akım ( $I_0$ )** denir (Şekil 5.14).

Oluşan  $I_0$  akımını artırmak için

- Metal yüzeyine düşürülen ışığın şiddetini (foton sayısını) artırmak
- Katot yüzeyini büyütme
- Anot-katot levhaları arasındaki uzaklığı azaltmak
- Katot yüzeyine düşürülen fotonların enerjilerini artırmak
- Bağlanma enerjisi küçük metal kullanmak
- Işık kaynağı noktasal ise ışık kaynağını katot levhasına yaklaştırmak
- Anot yüzeyini büyütme

Bu olaylar anot levhasına ulaşan elektron sayısının ve devrede oluşan  $I_0$  fotoelektrik akımının artmasına neden olabilir.

Ayarlanabilir üreticinin pozitif kutbu fotoselin anot, negatif kutbu fotoselin katot levhasına bağlandığında (Şekil 5.15) katot ve anot levhaları arasında oluşan elektrik alan etkisiyle katot yüzeyinden koparılan elektronlar hızlandırılarak sapmaları azalır ve  $I_0$  akımı artar.

Gerilim belirli bir değere ulaştığında katot metalinden kopan bütün elektronlar, elektrik alanının etkisi ile anot levhasına ulaşır. Bu durumda akım maksimum ve sabit bir değer alır.

Akımı maksimum yapan gerilime **doyma gerilimi** denir. Doyma gerilimine ulaşıldıktan sonra gerilim artırılrsa da oluşan maksimum akımın ( $I_{Max}$ ) büyüklüğü değişmez (Şekil 5.16).

Şekil 5.15'teki gibi oluşturulan devrede

- Katot yüzeyine düşürülen fotonların enerjisi metalin eşik enerjisine eşit ise ( $E_f = E_0$ ) metalden elektron koparılır. Kopan elektronlar anot-katod arasında oluşan elektrik alan içerisinde hızlanır. Elektronların kazandığı kinetik enerji elektriksel kuvvet tarafından yapılan iş ( $W = e \cdot V$ ) kadar olur. Elektronlar  $E_K = e \cdot V$  büyüklüğünde kinetik enerjisiyle anot levhasına ulaşır ve devrede akım oluşur.
- Katot yüzeyine düşürülen fotonların enerjisi metalin eşik enerjisinden büyükse ( $E_f > E_0$ ) katot levhasından elektron koparılır. Kopan elektronlar  $E = E_K + e \cdot V$  büyüklüğündeki kinetik enerjiyle anot levhasına çarpar ve devrede akım oluşur.

Maksimum akımı artırmak için katot yüzeyine düşen ışık şiddeti bir başka ifadeyle foton sayısı artırılmalıdır. Kaynak noktasal bir kaynağa katot yüzeyine yaklaştırılmalı ya da katot yüzeyinin alanı artırılmalıdır.

Anot yüzeyinin artırılması, anot-katod arası uzaklığın azaltılması ve katot levhasına düşürülen fotonların frekansının artırılması maksimum akımın büyüklüğünü değiştirmez. Çünkü maksimum akımın belirleyicisi anot levhasına ulaşan elektron sayısıdır.

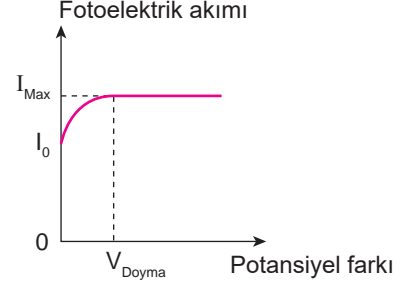
Ayarlanabilir üretcin pozitif kutbu fotoselin katot, negatif kutbu fotoselin anot levhasına bağlandığında (Şekil 5.17) metal yüzeyini maksimum kinetik enerji ile terk eden elektronlar, elektrik alan nedeni ile yavaşlatılır. Bu durumda anot levhasına ulaşan elektron sayısında ve buna bağlı olarak devrede oluşan akımda azalma olur.

Üretcin gerilimi artırıldığında anot levhasına ulaşan elektron sayısı giderek azalır. Bu da devrede oluşan akımın iyice azalmasına neden olur. Üretcin gerilimi artırılarak belli bir değere ulaştığında hiçbir elektron, anot levhasına ulaşamaz ve devredeki akım kesilir.

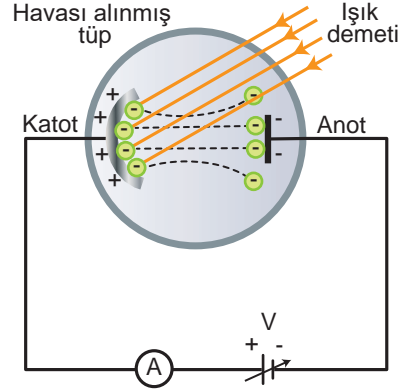
Anot levhasına ulaşan elektron sayısını sıfırlayarak devreden geçen akımın kesilmesine neden olan gerilim değerine **kesme potansiyeli** (durdurma gerilimi) denir (Şekil 5.18).

Şekil 5.17'deki gibi oluşturulan devrede katot yüzeyine düşürülen fotonların enerjisi metalin eşik enerjisinden büyükse ( $E_f > E_0$ ) katot levhasından elektron koparılır. Kopan elektronlar metalden bir  $E_K$  kinetik enerjisiyle ayrılır.

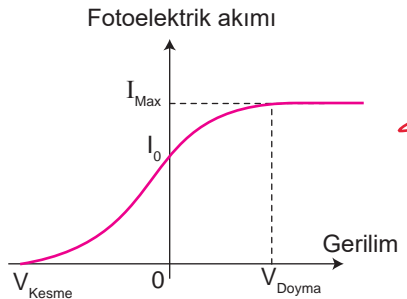
- $E_K > e \cdot V$  ise koparılan elektronlar anot levhasına  $E = E_K - e \cdot V$  kinetik enerjisi ile çarpar ve devrede akım oluşur.
- $E_K < e \cdot V$  ise koparılan elektronlar anot levhasına ulaşamaz ve devrede akım oluşmaz.
- $E_K = e \cdot V$  ise koparılan elektronlar anot levhasına ulaşamaz ve devrede akım oluşmaz. Bu durumda uygulanan gerilim durdurma gerilimine eşit olur.



Şekil 5.16: Fotoelektrik olayında doyma gerilimi



Şekil 5.17: Fotoselli devreye ters bağlanmış üretç



Şekil 5.18: Durma geriliminin akımı kesmesi

Kesme gerilimi, fotoelektronların metal yüzeyi terk ettikleri anda sahip oldukları maksimum kinetik enerjiye bağlıdır. Anot-katod arasındaki elektrik alanının yaptığı iş, maksimum kinetik enerjiye eşit olduğunda elektronlar anoda ulaşamaz. Bu durum

$$E_K = e \cdot V_{\text{Kesme}} \text{ bağıntısı ile ifade edilir.}$$

$e$  : Elektronun yükü (Coulomb)

$V_{\text{Kesme}}$  : Kesme potansiyeli (Volt)

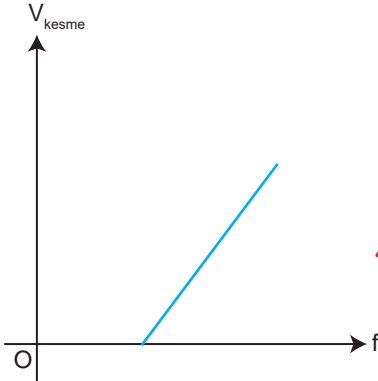
Einstein'ın fotoelektrik denklemini yeniden ele alınırsa

$$E_f = E_0 + E_K \text{ bağıntısında}$$

$$E_f = h \cdot f \text{ ve } E_K = e \cdot V_{\text{Kesme}} \text{ den}$$

$$h \cdot f = E_0 + e \cdot V_{\text{Kesme}} \text{ olur. Buradan}$$

$$V_{\text{Kesme}} = \frac{h \cdot f - E_0}{e} \text{ şeklinde ifade edilir.}$$



Şekil 5.19: Durma geriliminin frekans ile değişimi

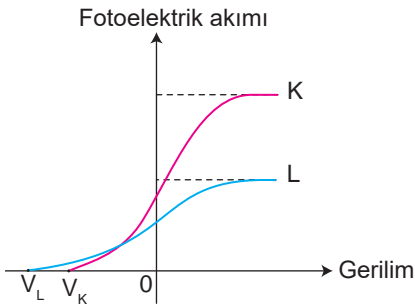
Bağıntı incelendiğinde kesme potansiyelinin gelen fotonların frekansına bağlı olduğu görülür. Fotonların frekansları artırıldığında uygulanması gereken kesme potansiyelinin değeri de artar. Kesme potansiyelinin frekansa bağlı değişim grafiği Şekil 5.19'daki gibidir.

Kesme potansiyelini etkileyen diğer bir faktör de metalin eşik enerjisidir. Eşik enerjisi daha büyük metal kullanılırsa kopan elektronlara kazandırılan maksimum kinetik enerji azalacağından kesme potansiyeli de azalır.

Kesme potansiyeli uygulanmış bir fotoselin yüzeyine düşürülen ışığın şiddeti artırılrsa da devrede akım oluşmaz. Kaynağın ışık şiddeti artırılsın ya da azaltılsın kopan elektronların maksimum kinetik enerjileri değişmediğinden kesme potansiyeli değişmez.

#### Örnek

Bir fotocele K ve L kaynaklarından ışık düşürüldüğünde akım şiddeti gerilim grafiği şekildeki gibi oluyor.



K kaynağının ışık şiddeti  $I_K$ , kaynaktan çıkan fotonların frekansı  $f_K$ , L kaynağının ışık şiddeti  $I_L$  kaynaktan çıkan fotonların frekansı  $f_L$  olduğuna göre

- $I_K$  ve  $I_L$  arasındaki büyüklük ilişkisi nedir?
- $f_K$  ve  $f_L$  arasındaki büyüklük ilişkisi nedir?

#### Çözüm

- Devrede oluşan  $I_{\text{Max}}$  ışık şiddetine bağlıdır. K kaynağının oluşturduğu akım daha büyük olduğundan  $I_K > I_L$  dir.
- Bir fotoseldeki kesme potansiyeli fotonların frekansına bağlıdır. İki kaynaktan çıkan fotonlar aynı yüzeye düştüklerinden eşik enerjisi ikisi için de aynıdır. Kesme potansiyeli daha büyük olan kaynaktan çıkan fotonların frekansı daha büyüktür. Buna göre  $f_L > f_K$  bulunur.

## Örnek

Eşik enerjisi 3 eV olan bir metale 1550 Å dalga boylu ışık düşürülüyor.

**Buna göre kesme potansiyeli kaç V tur?** ( $h \cdot c = 12\,400 \text{ eV} \cdot \text{Å}$ )

## Çözüm

Gelen fotonların enerjisi  $E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{12\,400}{1550} = 8 \text{ eV}$  olur.

Bulunan bu değer Einstein'ın fotoelektrik denkleminde yerine yazılırsa

$$E_f = E_0 + E_k \Rightarrow 8 = 3 + E_k \Rightarrow E_k = 8 - 3 = 5 \text{ eV} \text{ olur.}$$

Kesme potansiyeli ile kinetik enerji arasında  $E_k = e \cdot V_{\text{kesme}}$  olduğuna göre  $V_{\text{kesme}} = 5 \text{ V}$  bulunur.

## Sıra Sizde - 13

Katot metalinin eşik enerjisi 2 eV olan fotosele 9 eV enerjili fotonlar düşürülüyor.

**Buna göre kopan elektronların anoda çarptıkları andaki kinetik enerjileri kaç eV olur?**

## Çözüm

Empty grid for solution.

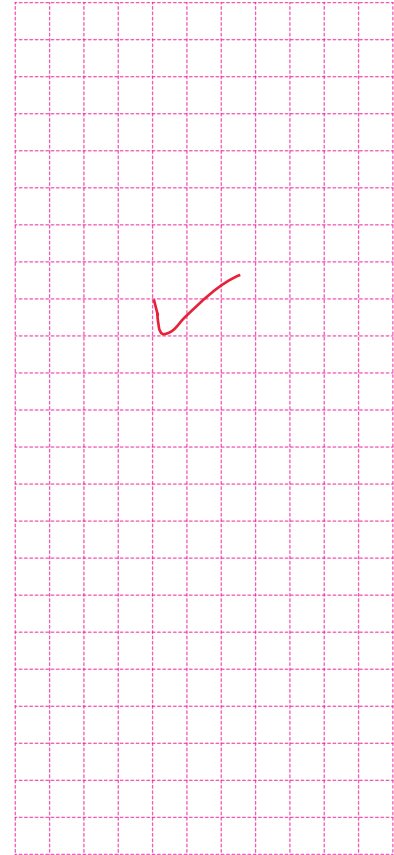
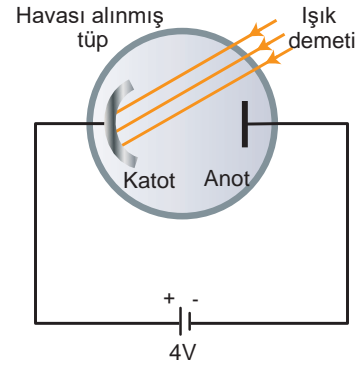
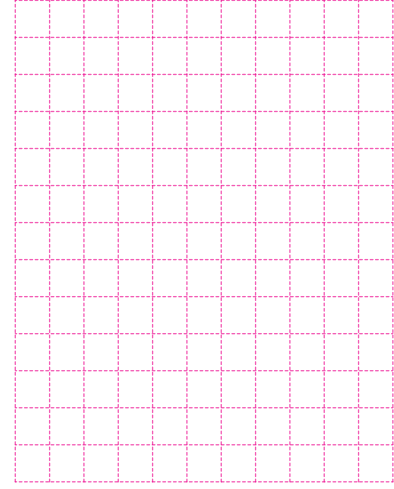
## Sıra Sizde - 14

Eşik dalga boyu 3100 Å olan fotosele dalga boyu 1240 Å olan fotonlar düşürülüyor.

- Fotonun enerjisi kaç eV tur?
- Metalin eşik enerjisi kaç eV tur?
- Metalden sökülen fotoelektronların maksimum kinetik enerjisi kaç eV tur?
- Oluşan akımın değerini sıfıra düşürmek için uygulanması gereken kesme potansiyeli kaç V olmalıdır? ( $h \cdot c = 12\,400 \text{ eV} \cdot \text{Å}$ )

## Çözüm

Empty grid for solution.

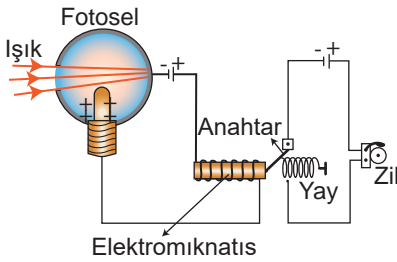


### 5.3.5. Fotoelektrik Olayının Günlük Hayattaki Uygulamaları

Fotoelektrik olayının günlük hayatta en yaygın kullanım şekli fotosellerdir. Fotoseller üzerlerine düşürülen ışık nedeniyle gerilim oluşturan ışık algılayıcılarıdır. Fotoseller kullandıkları devrede anahtar görevi görür. Hava karardığında sokak lambalarının kendiliğinden yanması veya aydınlandığında sönmesi fotoseller sayesinde olur.



Görsel 5.8: Fotoselli Musluk



Şekil 5.20: Hırsız alarmı şematik görünümü



Görsel 5.9: Pozometre



Görsel 5.10: Güneş gözlüğü

Fotoselli muslukta kızılotesi bölgeden ışık yayan bir LED lamba ile bir algılayıcı bulunur. Lambadan yayılan ışık ele çarpıp tekrar fotosele döndüğünde algılayıcı tarafından alınır. Algılanan hareket valfe aktarılır ve valf hareketli kısmını çekerek su yolunu açar (Görsel 5.8). Böylece toplu kullanım alanlarında bulunan lavabolarda musluklara dokunmadan su akıtılarak kişisel hijyen sağlanmış olur.

Su ve enerji kaynaklarının hızla tükendiği dünyada tasarruflu olmanın önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Fotoseller sayesinde elektrik akımı veya musluktaki su kontrol edilerek tasarruf yapılması sağlanabilir.

Fotosellerin kullanım alanlarından biri de hırsız alarmlarıdır (Şekil 5.20). Fotosele ışın düşürülüp fotoelektrik akımı oluşturulur. Oluşan akım bobinin mıknatıslanmasını sağlar ve anahtar çekilir. Işık kaynağı ile fotosel arasına bir kişi girdiğinde fotosele ışık düşmez ve akım kesilir. Bu durumda bobin mıknatıslık özelliğini kaybeder ve anahtar yayın uyguladığı kuvvet nedeniyle kapanır. Zil devresinden geçen akım alarmın çalmasına neden olur.

Fotoseller, sinema filmlerinin ses kayıt okumasında, otomatik açılıp kapanan kapılarda, elektronik dizgi makinelerinde, yangın ve duman dedektörlerinde kullanılır.

Fotoelektrik olayının kullanım alanlarından biri de fotoğraf makinelerinin pozometrelerindeki dedektörlerdir (Görsel 5.9). Pozometreler fotoğraf çekilecek ortamdaki ışık şiddetini ölçmek için kullanılır. Pozometre üzerine düşen ışığın oluşturduğu akım miktarına göre ortamın ışık şiddeti belirlenir.

Güneş ışığı atmosferi geçerken ozon tabakasında süzülür. Bu süzülme sırasında ozon tabakası ultraviyole (morötesi) ışınlarının çok zararlı olanlarını tutar. Ancak ozon tabakasının incilmesi veya delinmesi nedeniyle ultraviyole ışınlar yeryüzüne ulaşır. Bu ışınlar özellikle göze ve cilde zarar verir. Bu ışınların göze zarar vermemesi için güneş gözlüklerinin kullanılması gerekir (Görsel 5.10). Çünkü güneş gözlükleri ultraviyole ışınlarını yansıtır ve göze ulaşmasını engeller. Güneş gözlüğü takıldığında ya da hava karardığında gözün daha net görebilmesi için göz bebekleri büyür. Sahte güneş gözlükleri ultraviyole ışınlarını yansıtamaz ve büyüyen göz bebeklerinin içine bu ışınlar düştüğünde göz sinirleri zarar görür. Bu durumdan da göz sağlığı olumsuz etkilenir.

## Sıra Sizde - 15

Eşik frekansı  $2 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$  olan metal yüzeye ışık düşürüldüğünde kopan elektronların maksimum kinetik enerjileri  $2,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  oluyor.

**Buna göre metal yüzeyine düşen fotonların enerjileri kaç Joule olur?** ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

Çözüm

## Sıra Sizde - 16

Eşik enerjisi  $1 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  olan metal yüzeyine ışık düşürüldüğünde kopan elektronlara uygulanan kesme potansiyeli  $5 \text{ V}$  oluyor.

**Buna göre metal yüzeyine düşen fotonların dalga boyu kaç Å dür?** ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ,  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ )

Çözüm

## Sıra Sizde - 17

**Günlük hayatta karşılaşılan**

- I. Asansörlerin kata ulaştığında durması
- II. Otomatik kapı bariyerlerine araç yaklaştığında bariyerin açılması
- III. Alışveriş merkezinde kullanılan dedektörlerin metalleri tespit etmesi

**olaylarından hangilerinde fotoelektrik olay yer alır?**

Çözüm

# 4. BÖLÜM

## COMPTON SAÇILMASI VE DE BROGLİE DALGA BOYU

### Konular

- 5.4.1. Compton Olayında Foton ve Elektron Etkileşimi
- 5.4.2. Compton ve Fotoelektrik Olaylarının Benzer Yönleri
- 5.4.3. Işığın İkili Doğası
- 5.4.4. Madde ve Dalga Arasındaki İlişki

### Anahtar Kavramlar

- Compton saçılması
- De Broglie dalga boyu

- Dalga karakteri gösteren ışık, tanecik özelliği gösterebildiği gibi bir tanecik de dalga karakteri gösterebilir mi?
- Işıқта kırılma ve yansıma olayları ışığın tanecik özelliği ile de açıklanabilir mi?

Bu bölümde Compton saçılması açıklanıp Compton ve fotoelektrik olaylarının benzer yönleri belirtilecek ve ışığın tanecik doğası hakkında çıkarımlar yapılacaktır.

Işığın tanecik, dalga hem tanecik hem de dalga doğasıyla açıklanan olaylar vurgulanıp De Broglie bağıntısı verilecektir.



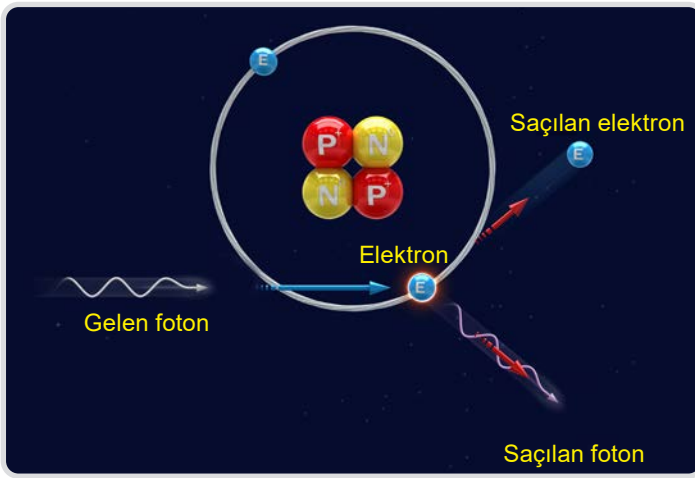
### 5.4.1. Compton Saçılması

1919 yılında Einstein, ışık fotonlarının doğrusal bir momentuma sahip olduğunu ileri sürmüştü, fotonların atom ile etkileşimlerinde soğurulmalar veya yayınlanmalar olabilmesi için atoma enerji ve momentum aktarılması gerektiğini söylemiştir. Einstein, enerjisi  $E_f = h \cdot f$  olan bir fotonun momentumu için  $P = \frac{E_f}{c} = \frac{h \cdot f}{c}$  bağıntısını ileri sürmüştür.

Arthur Holly Compton (Arthur Holy Kamptın, 1892-1962) (Görsel 5.11), fotonların hem enerji hem de momentum taşıdığı fikrini destekleyen bir deney yapar. Bir karbon hedefe X-ışınları gönderir. Compton, elektrona çarpıp saçılan X-ışınlarının (Görsel 5.12) şiddetini ve dalga boyunu ölçerek saçılmanın klasik dalga teorisi ile açıklanamayacağını gösteren önemli sonuçlara ulaşır.

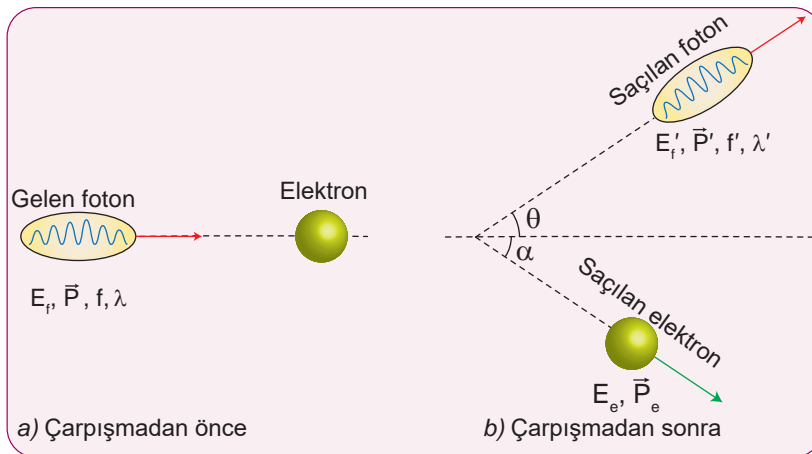


Görsel 5.11: Arthur Holly Compton

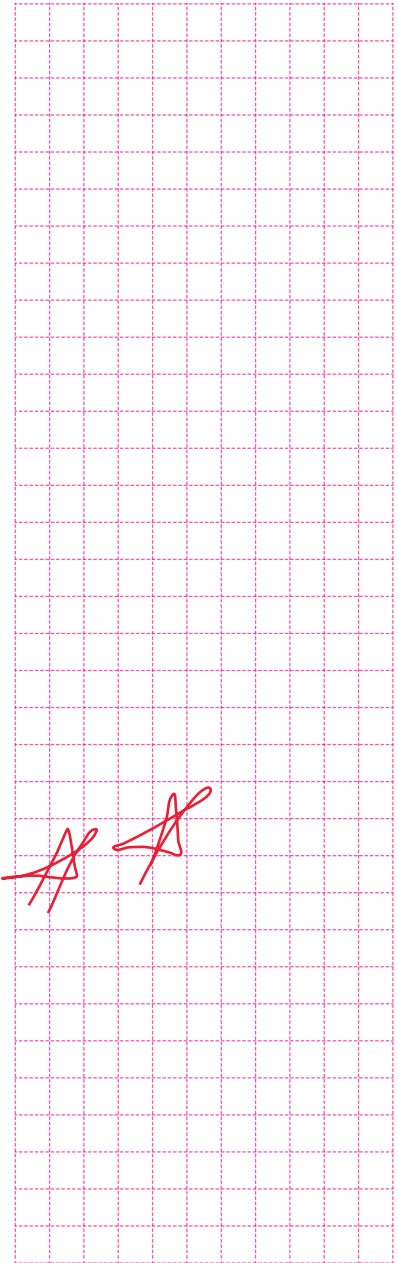


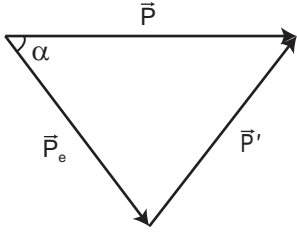
Görsel 5.12: Compton olayı

Bir elektrona Şekil 5.21: a'daki gibi gönderilen enerjisi  $E_f$  frekansı  $f$  ve dalga boyu  $\lambda$  olan X-ışını fotonu bu çarpışma sırasında bir parçacık gibi davranarak Şekil 5.21: b'deki gibi elektronun saçılmasını sağlar.



Şekil 5.21: a, b) X-ışını fotonunun elektrona çarpıp saçılması modeli





Şekil 5.22: Saçılmadan sonra gelen foton, saçılan foton ve elektronun momentum vektörlerinin toplamı

Foton ve elektronun çarpışması, merkezi olmayan esnek çarpışma şeklinde gerçekleşir. Momentumun korunumu yasası gereği gelen fotonun momentumu ( $\vec{P}$ ), saçılan fotonun momentumu ( $\vec{P}'$ ) ile saçılan elektronun momentumunun ( $\vec{P}_e$ ) vektörel toplamına eşittir (Şekil 5.22).

Enerjinin korunumu yasasından gelen fotonun enerjisi ( $E_i$ ) saçılan fotonun enerjisi ( $E'$ ) ile saçılan elektronun kinetik enerjisinin ( $E_e$ ) toplamına eşit olur ve  $E_0 = E + E_e$  şeklinde ifade edilir.

Bu durumda gelen fotonun enerjisi saçılan fotonun enerjisinden büyüktür. Fotonların enerjileri frekansları ile doğru orantılı olduğundan gelen fotonun frekansı ( $f$ ) saçılan fotonun frekansından ( $f'$ ) daha büyük olur ( $f > f'$ ).

Fotonların enerjileri dalga boyları ile ters orantılı olduğundan saçılan fotonun dalga boyu ( $\lambda'$ ), gelen fotonun dalga boyundan ( $\lambda$ ) daha büyük olur. ( $\lambda' > \lambda$ ).

Compton saçılması sırasında fotonun dalga boyu ve frekansı değişse de aynı ortamda ilerleyen fotonların hızlarının büyüklükleri eşit olduğundan gelen ve saçılan fotonların hızlarının büyüklükleri de eşit olur. Elektronun hızı ise fotonların hızından daha küçüktür.

Compton saçılması sırasında meydana gelen olayların incelenmesi için "Compton saçılması modeli" etkinliğini yapınız.

## 2. ETKİNLİK

### ETKİNLİK

<b>Etkinliğin Adı</b>	Compton saçılması modeli
<b>Etkinliğin Amacı</b>	Compton saçılmasının modelinin çizilerek incelenmesi
<b>Kullanılan Malzemeler</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A4 kâğıdı</li> <li>Renkli kalemler</li> </ul>

### Etkinliğin Hazırlanışı ve Yapılışı

Compton saçılması sırasında gerçekleşen enerji ve momentumun korunumu ilkesinden yola çıkarak ideal bir ortam için Compton saçılmasına benzer bir etkileşim modeli oluşturunuz. Oluşturduğunuz modelde, gelen fotonun rengini mavi, saçılan fotonun rengini kırmızı ve saçılan elektronun rengini yeşil seçerek çiziniz.

### Etkinliğin Sonuçlandırılması

Hazırladığınız modeli ve elde ettiğiniz bilgileri kullanarak Compton saçılması olayını arkadaşlarınızla tartışınız.



Eşik frekansından daha küçük frekansa sahip fotonlardan oluşan ışık demetinin ışık şiddeti artırılrsa da fotoelektrik olayı gözlenmez. Bu durum ışığın dalga doğası tarafından açıklanamaz. Işık dalga ise elektrona aktarılan enerjinin dalganın şiddetine bağlı olması gerekir. Işık şiddeti artırıldığında dalganın enerjisi artacağından elektron kopması beklenir.

Aynı durum metal yüzeyinden koparılan fotoelektronların maksimum kinetik enerjileri için de geçerlidir. Işık şiddeti artırıldığında yüzeye düşen foton sayısı artar, buna bağlı olarak yüzeyi terk eden fotoelektronların sayısı da artar. Ancak fotoelektronların maksimum kinetik enerjilerinde bir değişiklik olmaz. Fotoelektronların maksimum kinetik enerjileri sadece fotonların frekansının artmasıyla mümkündür.

Fotoelektrik olayında dalga doğasının açıklayamadığı bir nokta da fotoelektronların metalden ayrılma sürecidir. Fotonlar metal yüzeyine düştüğü anda (yaklaşık  $10^{-9}$  s) fotoelektronlar metal yüzeyi terk eder.

Fotoelektrik olayı gibi Compton olayı da ışığın dalga doğası tarafından açıklanamamıştır. Dalga teorisine göre ışık elektromanyetik dalgadır ve enine titreşir. Dalganın elektrik alanının uyguladığı kuvvet nedeni ile elektron titreşmelidir. Titreşen elektron ivmeli hareket yapacağından elektromanyetik dalgalar yaymalı ve yayılan dalgaların frekans ve dalga boyları gelen X-ışını fotonununkine eşit olmalıdır.

Compton olayında klasik fizik tarafından açıklanamayan bir diğer nokta da saçılan elektronların gelen fotonların doğrultusunda olmayıp bu doğrultu ile belli bir açı yapmasıdır.

Fotoelektrik olayında da Compton olayında da ışık dalga olarak değil tanecik olarak davranmıştır. Her iki olayda da fotonlarının enerjileri  $E_f = h \cdot f$  ve momentumları  $P = \frac{h \cdot f}{c}$  olan parçacık olarak değerlendirilmiş ve bu olaylar açıklanmıştır.

### Sıra Sizde - 19

#### Fotoelektrik olayı ve Compton saçılması incelendiğinde

- I. Foton soğurulur.
- II. Işığın tanecik doğası ile açıklanır.
- III. Gelen fotonlar elektronlara kinetik enerji kazandırır.

ifadelerinden hangileri iki olay için de kesinlikle ortaktır?

#### Çözüm



## Sıra Sizde - 20

Compton ve fotoelektrik olaylarının benzer yönlerini yazınız. Bu iki olay sonucunda ışığın nasıl bir karakter gösterdiği söylenebilir?

## Çözüm

## 5.4.3. Işığın Doğası

Işık, insanlar için temel bir enerji çeşididir. Işık enerjisi eski zamanlardan beri insanların ilgisini çekmiş, insanlar tarafından ışığın doğası ve özellikleri hakkında tartışmalar yapılmıştır.

Newton, ışığın tanecik yapısını kullanarak kırılma ve yansıma olaylarını açıklamıştır. Newton'ın tanecik teorisi, uzun yıllar kullanılmış ve çoğu bilim insanı tarafından bu teori desteklenmiştir.

1648 yılında Christian Huygens (Kıristiyan Huygins, 1624-1695), ışığın dalga teorisinin yansıma ve kırılma olaylarını da açıkladığını kanıtlamış ancak bu görüş destek görmemiştir.

1801 yılında Thomas Young (1773-1829), girişim deneyini yaparak ışığın dalga doğasını açıkça ortaya koymuştur. Einstein, ortaya koyduğu teoriyle ışığın foton adı verilen enerji paketlerinden oluştuğunu belirtmiştir.

Bu durumlar ışığın ikili doğaya sahip olduğunu gösterir. Işık bazı olaylarda tanecik gibi davranırken bazı olaylarda dalga yapısına sahiptir. Tablo 5.2'de bazı ışık olaylarının ışığın hangi doğası tarafından açıklandığı verilmiştir.

Tablo 5.2: Işığın Dalga ve Tanecik Doğasının Açıkladığı Işık Olayları

Işık Olayı	Tanecik Doğası	Dalga Doğası	Işık Olayı	Tanecik Doğası	Dalga Doğası
Gölge oluşması	✓	✓	Yansıma	✓	✓
Kırılma	✓	✓	Işık akısı	✓	✓
Işığın doğrusal yol boyunca yayılması	✓	✓	Işık basıncı	✓	✓
Fotoelektrik olayı	✓		Compton saçılması	✓	
Girişim		✓	Kırınım		✓
Ortam değiştiren ışığın bir kısmının kırılıp bir kısmının yansıması		✓	Polarizasyon (Kutuplanma)		✓
Işığın renklere ayrılması		✓	Işığın birbiri içerisinde etkilenmeden geçmesi	✓	✓



Görsel 5.13: Louis de Broglie

#### 5.4.4. Madde ve Dalga Arasındaki İlişki

Klasik fizik penceresinden bakıldığında bazı şeyler bütünüyle dalga, bazı şeyler ise yalnızca parçacık olarak görülür. Ancak kuantum fiziği penceresinden mikroskobik parçacıkların dünyasına bakılırsa bu ayrım kesin çizgilerle yapılamaz. Bazı durumlarda parçacık olarak isimlendirilen şeylerin, dalga özelliği de gösterdiği kanıtlanmıştır.

Louis de Broglie (1892-1967) (Görsel 5.13) 1923 yılında doktora tezinde fotonların hem parçacık hem de dalga doğasına sahip oldukları gibi maddenin her türlü hâlinin de iki özelliğe sahip olabileceğini belirtmiştir. De Broglie'ye göre elektronlar tıpkı ışık gibi hem parça hem de dalga doğasına sahiptir ve her elektrona bir dalga eşlik etmektedir.

Einstein'ın modeline göre fotonlar hiçbir sistemde durgun olamaz. Dolayısı ile durgun kütleleri sıfırdır. Bir fotonun momentumu enerjisine bağlı olarak

$$P = \frac{E_f}{c} \text{ bağıntısı ile bulunur.}$$

Bir fotonun enerjisini veren

$$E_f = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \text{ bağıntısı momentum denkleminde yerine yazılırsa}$$

$$P = \frac{E_f}{c} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot c} \Rightarrow P = \frac{h}{\lambda} \text{ ifadesi bulunur.}$$

Bu eşitlikte bir fotonun momentumunun dalga boyuna bağlı olduğu görülmektedir.

Broglie'ye göre elektronlar da ışık gibi ikili parçacık-dalga yapısına sahiptir. Hareket eden her elektrona bir dalga eşlik eder. Parçacıklara eşlik eden dalgalara **madde dalgası** denir. Momentumu P olan maddesel parçacıkların dalga boyu Broglie tarafından  $\lambda = \frac{h}{P}$  şeklinde ifade edilmiştir.

Kütlesi m, hızı  $\vartheta$  olan parçacığın momentumunun büyüklüğü  $P = m \cdot \vartheta$  olduğundan Broglie dalga boyu

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{m \cdot \vartheta} \text{ olur.}$$

Fotonlar durgun kütleleri sıfır olan parçacıklardır ve enerjileri  $E_f = h \cdot f$  dir. De Broglie, madde dalgaları enerjilerinin de fotonlarındaki gibi Einstein bağıntısına uyması gerektiğini belirtir.

Parçacığın enerjisi E ise frekansı

$$f = \frac{E}{h} \text{ olur.}$$

De Broglie tarafından ortaya konan bağıntılar maddenin ikili yapıda olduğunu gösterir.

## Sıra Sizde - 21

## Işığın ikili doğasıyla ilgili

- I. Işığın doğrusal yol boyunca yayılması
- II. Polarizasyon (Kutuplanma)
- III. Işığın birbiri içerisinde etkilenmeden geçmesi
- IV. Fotoelektrik olayı

verilen olaylardan hangileri sadece ışığın tanecik modeliyle açıklanabilir?

## Çözüm

## Örnek

De Broglie, hareket hâlindeki taneciklerin de fotonlar gibi hem tanecik hem de dalga doğasına sahip olduğunu belirtmiştir.

Buna göre atom çekirdeğinin çevresinde dolanan bir elektron için

- I. Elektronla eşlik eden dalgaların enerjileri Einstein bağıntısına uygundur.
- II. Momentümları dalga boyuyla ters orantılıdır.
- III. Momentümları kütleleriyle doğru orantılıdır.

ifadelerinden hangileri doğrudur?

## Çözüm

De Broglie'ye göre madde dalgalarının enerjileri fotonları gibi Einstein bağıntısına uymalıdır (I. öncül doğru).

De Broglie'nin  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$  bağıntısına göre II. ve III. öncüller de doğrudur.

## Sıra Sizde - 22

De Broglie tarafından ortaya konan bağıntıdan yola çıkarak madde ve dalga enerjisi arasındaki ilişkiyi açıklayınız.

## Çözüm

## A) Aşağıdaki cümlelerde boş bırakılan yerlere doğru sözcüğü/sözcükleri yazınız.

foton	ether	momentum
ışık şiddeti	tanecik	mutlak uzunluk
gözlemci	eşik enerjisi	elektron
siyah	enerji paketi	dalga

1. Max Planck, ışığın küçük ..... oluştuğunu ileri sürmüştür.
2. Einstein, fotoelektrik olayında enerjinin elektronlara ..... tarafından aktarıldığını ortaya koydu.
3. Bir ışık demetinde fotonlar enerji taşır ve ..... sahiptir.
4. Fotoelektrik olayında metal yüzeyinden ayrılan fotoelektronların maksimum kinetik enerjileri ..... bağlı değildir.
5. Fotoelektrik olayı ve Compton saçılması ışığın ..... doğası ile izah edilebilmiştir.
6. Bir metal yüzeyine düşürülen ışığın metalden elektron koparması için gerekli en küçük enerjiye ..... denir.
7. Compton olayında gelen fotonun enerjisi, saçılan fotonun ve saçılan ..... enerjileri toplamına eşittir.
8. De Broglie durgun kütleleri sıfır olmayan parçacıklarında hem tanecik hem de ..... doğasına sahip olduklarını ortaya koymuştur.
9. Michelson-Morley deneyi ışığın yayılması için ..... adı verilen ortama ihtiyaç olmadığını ortaya koymuştur.
10. Işığın hızı eylemsiz referans sistemlerinde kaynağın ve ..... hareketinden bağımsızdır.
11. Bir cismin durgun olduğu referans sisteminde ölçülen uzunluğuna ..... denir.
12. Bir cisim üzerine düşen tüm ışınları soğurursa bu tür cisimlere ..... cisim adı verilir.

## B) Aşağıdaki soruların cevaplarını boş bırakılan alana yazınız.

13. Bir elektrik devresinde anahtar görevi gören ve üzerine düşen ışık nedeni ile gerilim oluşturan ışık algılayıcılarına ne ad verilir?

Cevap: .....

14. Fiziksel olayların izahında korunum yasaları önemli yer alır.

**Compton olayında enerji ile birlikte hangi fiziksel nicelik korunmuştur?**

Cevap: .....

15. Fotoelektrik deneyi yapan bir öğrenci, metal yüzeyine düşen fotonların devrede fotoelektrik akımı oluşturmadığını gözlemliyor.

**Devrede akım oluşabilmesi için öğrencinin kullanması gereken fotonların hangi fiziksel niceliği önceki fotondan küçük olmalıdır?**

Cevap: .....

16. Işık olaylarına göre ışığın davranışı değişebilir. Bazı olaylarda tanecik gibi davranan ışık, bazı olaylarda dalga gibi davranır.

**Fotoelektrik ve Compton olayı ışığın hangi doğası ile izah edilemez?**

Cevap: .....

17. 1887 yılında A. A. Michelson ve Edward Morley tarafından etherin varlığı ile ilgili ilk bilimsel çalışma yapılmıştır. 1929 yılına kadar Michelson ve Morley dışında birçok bilim insanı sabır ve kararlılık içinde etherin varlığı konusunda deneylerini farklı koşullar altında sürdürmüştü ama olumlu bir sonuç elde edememiştir.

**Bu bilgiler ışığında bilimsel çalışmaların bu kadar uzun sürmesi bilim insanlarının hangi yönünü ortaya koyar?**

Cevap: .....



**C) Aşağıdaki çoktan seçmeli soruları okuyunuz ve doğru seçeneği işaretleyiniz.**

18. Eşik enerjisi  $7,2 \cdot 10^{-19}$  J olan bir metal yüzeyine frekansı  $1,5 \cdot 10^{15} \text{ sn}^{-1}$  olan ışık düşürülüyor.

**Buna göre yüzeyden kopan fotoelektronların maksimum kinetik enerjileri kaç J olur?** ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J · s alınız.)

- A)  $2,7 \cdot 10^{-19}$  B)  $2,9 \cdot 10^{-19}$  C)  $3 \cdot 10^{-19}$   
D)  $4,5 \cdot 10^{-19}$  E)  $5,2 \cdot 10^{-19}$

19. I. Ether hipotezinin geçerli olmadığı ispatlanmıştır.  
II. Boşlukta ışık hızının kaynak ve gözlemcinin hareketinden etkilenmediğini ve her yönde aynı değere sahip olduğunu göstermiştir.  
III. Işığın yayılmak için hiçbir ortama gerek duymayan bir elektromanyetik dalgaya olduğu görüşü ağırlık kazanmıştır.

**Yukarıdaki ifadelerden hangileri Michelson-Morley deneyinin sonuçlarındandır?**

- A) Yalnız I B) Yalnız II C) Yalnız III  
D) I ve II E) I, II ve III

20. Michelson-Morley deneyinin yapılış amacı

- I. Dünya'nın hareketinden dolayı oluşan ether hareketlenmesinin ışık hızına etkisi var mıdır?  
II. Mekanik dalgalarda olduğu gibi ışığın yayılması için maddesel bir ortam gerekli midir?  
III. Işık dalgasal yapıya sahip midir?

**sorularından hangilerine cevap aramak içindir?**

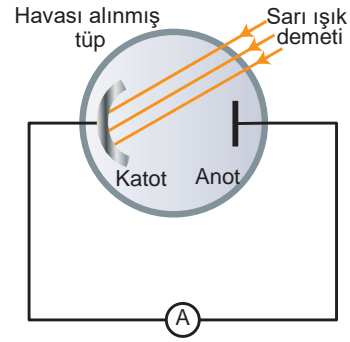
- A) Yalnız I B) I ve II C) II ve III  
D) I ve III E) I, II ve III

21. Bir metal yüzeyine 2,5 eV enerjili fotonlar düşürüldüğünde yüzeyden kopan elektronların maksimum kinetik enerjileri  $1,2 \cdot 10^{-19}$  J oluyor.

**Buna göre metalin eşik enerjisi kaç J dür?** ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J · s)

- A)  $2 \cdot 10^{-19}$  B)  $2,5 \cdot 10^{-19}$  C)  $2,8 \cdot 10^{-19}$   
D)  $3 \cdot 10^{-19}$  E)  $3,2 \cdot 10^{-19}$

22. Bir fotoselin metal yüzeyine sarı ışık düşürüldüğünde devrede akım oluşmuyor.



**Buna göre metal yüzeye**

- I. Turuncu ışık  
II. Yeşil ışık  
III. Mor ışık

**hangileri düşürülürse akım oluşabilir?**

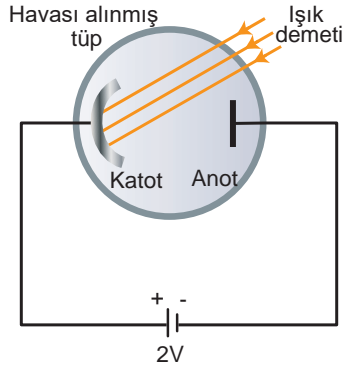
- A) Yalnız I B) I ve II C) I ve III  
D) II ve III E) I, II ve III

23. I. Fizik yasaları, tüm eylemsiz (ivmesiz) referans sistemlerinde aynıdır.  
II. Işık hızı gözlemci ve ışık kaynağının hızından bağımsızdır.  
III. Işığın tüm eylemsiz referans sistemlerinde hızı boşluktaki ile aynıdır.

**Yukarıdaki ifadelerinden hangileri Einstein'ın görelilik teorisinin postülleri içindir?**

- A) Yalnız I B) Yalnız II C) Yalnız III  
D) I ve II E) I, II ve III

24. Metalin eşik enerjisi 5 eV olan fotocele gerilimi 2 V olan bir üreteç şeklindeki gibi bağlanıyor.



Buna göre metal yüzeyine 9 eV enerjili fotonlar düşürülürse kopan elektronların anoda çarptıkları andaki kinetik enerjileri kaç eV olur?

- A) 2 B) 3 C) 4 D) 5 E) 6

25. Michelson-Morley deneyinin sonucu Einstein tarafından farklı bir şekilde yorumlanarak özel görelilik teorisinin önermelerinden biri hâline getirilmiştir.

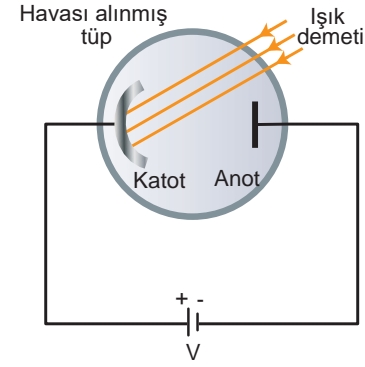
Eylemsiz referans sistemleri için geçerli olan bu teori hangisidir?

- A) Işık hızına yakın hızlarda hareket eden cisimlerin kütleleri enerjiye dönüşür.  
 B) Hareket hâlindeki gözlemcinin hızı ışık hızına doğru artırıldıkça bir cismin boyunu durgunken ölçtüğü değerden daha kısa ölçer.  
 C) Işığın hızı her koşulda aynıdır.  
 D) Bir gözlemci, hızını ışık hızına doğru artırıldıkça gözlemcinin ölçtüğü zaman kısalmış olur.  
 E) Işığın yayılması için ether gibi bir ortama gerek yoktur.

26. Aşağıdaki ışık olaylarından hangisi ışığın yalnızca dalga doğası tarafından izah edilebilmiştir?

- A) Kırılma  
 B) Fotoelektrik olayı  
 C) Yansıma  
 D) Girişim  
 E) Compton olayı

27. Eşik enerjisi 5 eV olan fotosel yüzeyine şekildedeki gibi 8 eV enerjili ışık düşürülüyor.



Buna göre yüzeyden kopan fotoelektronların durma gerilimleri kaç V tur?

- A) 2 B) 3 C) 4 D) 5 E) 6

28. Wien kayma yasasına göre

- I. Sıcaklık arttıkça ışımanın gücü de artar.  
 II. Sıcaklık arttıkça ışımaya frekansı artar.  
 III. Sıcaklık arttıkça ışımaya dalga boyu azalır.

ifadelerinden hangileri doğrudur?

- A) Yalnız I B) Yalnız II C) Yalnız III  
 D) I ve II E) I, II ve III

29. Aynı fotosele K, L ve M kaynaklarından ışık düşürüldüğünde fotoelektronların durma gerilimleri ve oluşan maksimum akım şiddeti tablodaki gibi oluyor.

Işık Kaynağı	Durma Gerilimi	Oluşan Maksimum Akım Şiddeti
K	3V	2I
L	2V	3I
M	4V	I

Kaynakların yaydığı fotonların frekansları sırası ile  $f_K$ ,  $f_L$ ,  $f_M$  olduğuna göre bu frekanslar arasındaki büyüklük ilişkisi nedir?

- A)  $f_M > f_K > f_L$                       B)  $f_K > f_L > f_M$   
 C)  $f_M > f_L > f_K$                       D)  $f_K > f_M > f_L$   
 E)  $f_L > f_K > f_M$

30. Einstein'ın  $E = m \cdot c^2$  kütle ve enerjinin eşdeğerliği ilkesine göre

- I.  $m$  kütleli bir madde yok olursa  $E = m \cdot c^2$  büyüklüğünde bir enerji ortaya çıkar.  
 II. Çift oluşum tepkimelerinde enerjinin maddeye dönüştüğü gözlemlenir.  
 III. Madde ile enerji birbirine dönüşebilir.

ifadelerinden hangileri doğrudur?

- A) Yalnız I    B) Yalnız II    C) I ve II  
 D) I ve III    E) I, II ve III

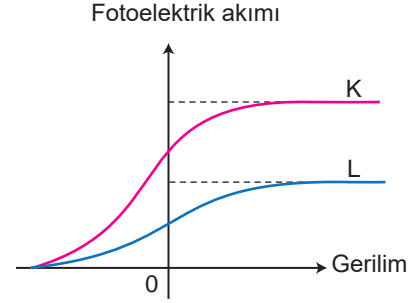
31. Einstein'ın ışığın yapısını açıklamak için ortaya koyduğu fotonlar ile ilgili

- I. Enerji taşır.  
 II. Momentumları vardır.  
 III. Durgun kütle enerjileri vardır.

ifadelerinden hangileri yanlıştır?

- A) Yalnız I    B) Yalnız II    C) Yalnız III  
 D) I ve III    E) II ve III

32. Bir fotosele K ve L kaynaklarından ayrı ayrı ışık düşürüldüğünde akımın gerilimle değişim grafiği şekildeki gibi oluyor.



Buna göre

- I. K ve L kaynaklarından yayılan fotonların frekansları eşittir.  
 II. K kaynağından çıkan fotonların frekansı daha büyüktür.  
 III. K kaynağının ışık şiddeti L kaynağının ışık şiddetinden büyüktür.

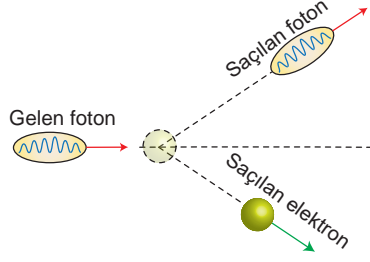
ifadelerinden hangileri doğru olur?

- A) Yalnız I    B) Yalnız II    C) I ve II  
 D) I ve III    E) II ve III

33. Siyah cisim ışıınımı ile ilgili olarak aşağıdaki yargılardan hangisi yanlıştır?

- A) Siyah cisim, üzerine düşen tüm ışınları soğurur.  
 B) Işımanın şiddeti arttıkça dalga boyu kısalır.  
 C) Siyah cisim soğurduğu ışımayı dışarıya geri verir.  
 D) Cismin sıcaklığı artırıldıkça ışıınının frekansı azalır.  
 E) Siyah cisim ışıınmasında sıcaklık ile dalga boyu ters orantılıdır

34. Compton olayında gönderilen bir foton, elektron ile etkileşerek sapmaktadır.



**Buna göre**

- I. Gelen fotonun frekansı saçılan fotonun frekansından büyüktür.
- II. Saçılan fotonun dalga boyu gelen fotonun dalga boyundan büyüktür.
- III. Gelen fotonun hızı saçılan fotonun hızından büyüktür.

**ifadelerinden hangileri doğrudur?**

- A) Yalnız I    B) I ve II    C) I ve III  
D) II ve III    E) I, II ve III

35. Eşik enerjisi  $2,6 \cdot 10^{-19}$  J olan bir fotocele  $3000 \text{ \AA}$  dalga boyulu ışık düşürülüyor.

**Buna göre fotoelektronların durma gerilimi kaç V tur?**

( $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  ve  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

- A) 2,5    B) 3    C) 3,2  
D) 3,8    E) 4

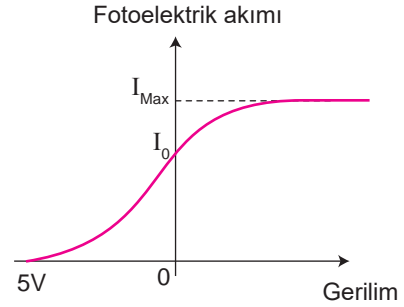
36. Einstein'ın özel görelilik kuramına göre

- I. Fizik yasaları tüm eylemsiz referans sistemlerinde geçerlidir.
- II. Işık hızına yakın bir hızla hareket eden cismin boyu, durgun hâldeki boyundan daha kısa ölçülür.
- III. Işık hızı, gözlemci ve ışık kaynağının hızından bağımsızdır.

**verilen ifadelerden hangileri doğrudur?**

- A) Yalnız I    B) Yalnız II    C) Yalnız III  
D) I ve II    E) I, II ve III

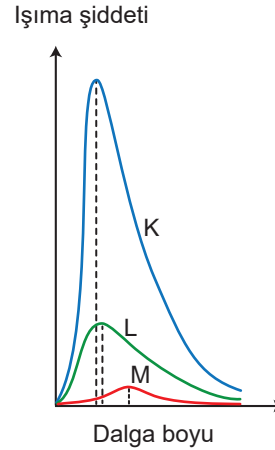
37. Bir fotosel yüzeye  $7 \text{ eV}$  enerjili fotonlar düşürüldüğünde oluşan akımın gerilimle değişim grafiği şekildeki gibi oluyor.



**Buna göre fotoselde kullanılan metalin eşik enerjisi kaç J dür?** ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )

- A)  $1,6 \cdot 10^{-19}$     B)  $2 \cdot 10^{-19}$     C)  $3,2 \cdot 10^{-19}$   
D)  $3,6 \cdot 10^{-19}$     E)  $4,8 \cdot 10^{-19}$

38. K, L ve M cisimlerinin ışıma şiddetlerinin dalga boyuyla değişim grafiği verilmiştir.



**Cisimlerin yaptığı ışımaların maksimum dalga boyuna karşılık gelen sıcaklıkları  $T_K$ ,  $T_L$  ve  $T_M$  ise bunların büyüklükleri arasındaki ilişki nedir?**

- A)  $T_M > T_K > T_L$     B)  $T_K > T_L > T_M$   
C)  $T_M > T_L > T_K$     D)  $T_K > T_M > T_L$   
E)  $T_L > T_K > T_M$

D) Aşağıdaki açık uçlu soruların cevabını boş bırakılan alana yazınız.

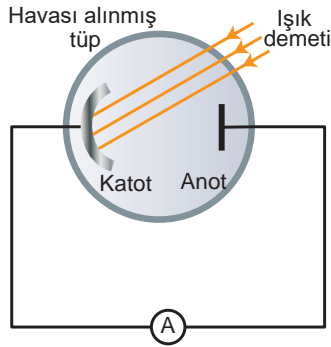
39. Verilen ışık olaylarından ışığın hem dalga hem de tanecik modeli tarafından ortak olarak açıklanabilenlerin karşısına “✓” işareti koyunuz?

Işık Olayı	
Gölge oluşması	
Kırılma	
Fotoelektrik olayı	
Girişim	
Yansıma	

40. Planck hipotezi nedir? Kısaca açıklayınız.

Çözüm

41. Bir fotocele şekildeki gibi ışık düşürüldüğünde devreden akım oluşmuyor.



Buna göre

- I. Gelen fotonların dalga boyu küçültülmeli.
- II. Işık şiddeti artırılmalı.
- III. Eşik enerjisi daha küçük olan bir metal yüzey seçilmeli.

önerilerinden hangileri yapılırsa devreden akım oluşur?

Çözüm

42. Michelson–Morley deneyinin sonuçları nelerdir? Yazınız.

Çözüm

43. Galileo-Newton fiziği ile Einstein'ın özel görelilik fiziği arasındaki fark kısaca nasıl ifade edilebilir?

Çözüm

44. Dalga boyu ışınım şiddetinin klasik yaklaşımı ile modern yaklaşımı farkı fizik alanında nasıl bir gelişmeye sebep olmuştur? Kısaca açıklayınız.

Çözüm

45. Göz bebeği, göze giren ışık miktarını ayarlayan sensör gibi davranır. Ortam aydınlığı arttığında göz bebeği küçülerek içeri giren ışık miktarını azaltırken ortam karanlık olduğunda büyür ve göze giren ışık miktarı artar. Güneşten gelen UV ışınlarını süzecek şekilde tasarlanan güneş gözlüklerinin camları göze giren ışık miktarını azaltmak için fazladan koruma sağlar. Koyu renkli sahte güneş gözlükleri ise karanlık bir ortam oluşturduğu için göz bebeklerinin büyümesine ve göz içine daha fazla UV ışının girmesine neden olur. Bunun sonucunda gözün yapısında bozulmalar ve korneada yanıklar oluşabilir.

Yukarıdaki bilgilerden hareketle sahte güneş gözlüklerinin kullanılmasının neden sakıncalı olduğunu fotoelektrik olayıyla ilişkilendirerek açıklayınız.

Çözüm

