

BÖLÜM 3

KUANTUM FİZİĞİNE GİRİŞ

1. Bölümde ışık hızına yakın parçacık hızlarıyla hareket eden parçacıklarının hareketlerini açıklamak için Newton mekaniği yerine Einstein'ın Özel Görelilik kuramının kullanılması gerektiği açıklandı

Atomik ölçekte, maddenin davranışını açıklamak için klasik fizik yasaları yetersiz kaldı. Siyah cismin ışıması, fotoelektrik olay, ve bir gaz deşarjında atomlar tarafından keskin spektrum çizgilerinin yayınlanması gibi bazı olaylar klasik fizik çerçevesinde anlaşılamadı.

1900-1930 yılları arasında kuantum mekaniği atom molekül ve çekirdeklerin davranışlarını açıklamada başarılı oldu. Kuantum kuramı da makroskopik sistemlere uygulandığında klasik fiziğe indirgenir.

Kuantum kuramının temel fikirleri önce Max Planck tarafından ortaya atıldı. Daha sonra matematiksel açıklamalar, Einstein Bohr, Schrodinge, deBroglie, Heisenberg, Born ve Dirac tarafından yapıldı.

Siyah Cismin Işıması ve Planck Hipotezi

Herhangi bir sıcaklıktaki cisim, termik (ısısal) radyasyon da denilen bir radyasyon yayınlar. Bu radyasyonun özellikleri cisim sıcaklığına ve özelliklerine bağlıdır. Temel problem bir siyah cisim tarafından yayınlanan radyasyondaki dalgaboylarının gözlenen dağılımını anlamaktır.

Alçak sıcaklıklarda termik radyasyonun dalga boyları kızılötesi bölgededir., bu nedenle gözle gözlenemez. Cismin sıcaklığı yükseltince, sonunda cisim kızarmaya başlar. Yeteri kadar yüksek sıcaklıklarda cismin, bir ampulün sıcak tungsten filamanının parıldaması gibi, beyaz olduğu görülür. Termik radyasyonun dikkatli bir incelemesi, spektrumun kızıl ötesi, görünür ve morötesi dalgaboylarının sürekli bir dağılımından oluştuğunu gösterir.

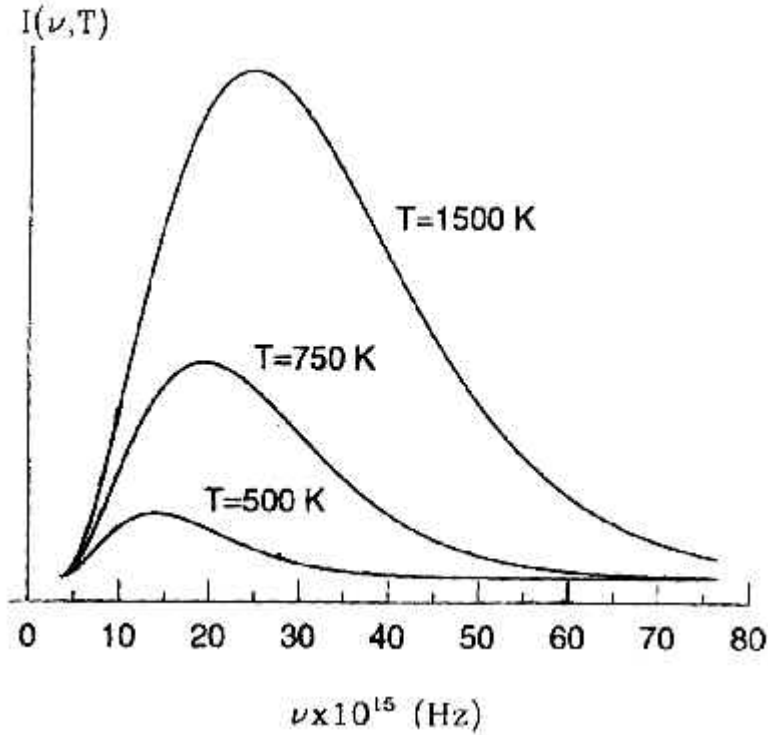
Siyah cisim, ideal bir ışın soğurucusu, böyle bir cisim ısıtıldığında, yayınladığı ışımaya *siyah cismin ışınması* denir.

Tanım olarak kara cisim, üzerine düşen bütün ışınları soğuran bir cisimdir. Hiçbir ışını yansıtmadığı veya geçirmedığı için de kara bir görüntü olur. Bu tanıma uyan gerçek bir cisim yoktur



Klasik elektromanyetik teori kullanılarak verilen bir frekansta ne kadar enerji ışıdığını hesaplamak mümkündür. Bu hesabın sonucu Rayleigh-Jeans formülü olarak ifade edilir.

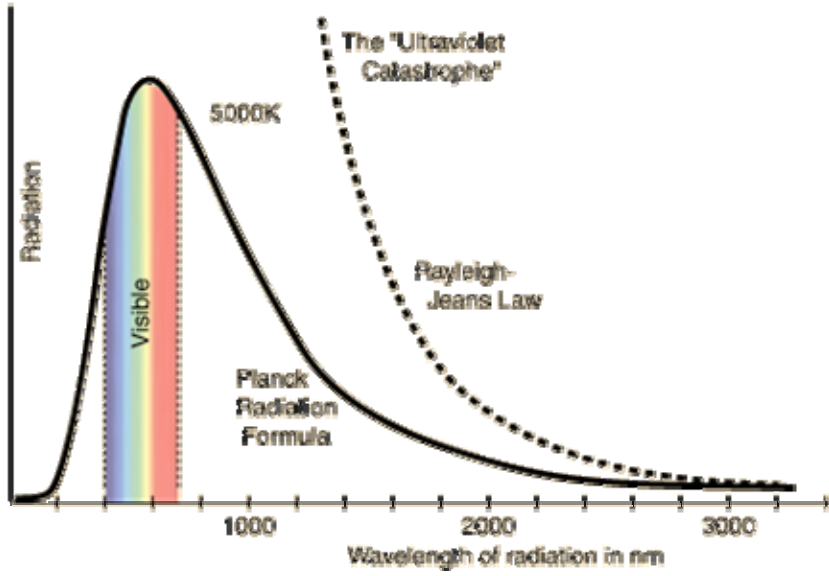
$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4} \quad k, \text{ Boltzman sabiti}$$



T=500K,750K,1500K sıcaklıklarında siyah cismin ışınmasının dalga boyuna göre şiddeti

Eğriden de görüleceği gibi, yayınlanan radyasyon miktarı (eğri altında kalan alan) sıcaklık arttıkça artmaktadır. Sıcaklık arttıkça dağılımın tepe noktası daha kısa dalgalınlara kaymaktadır (Wien kayma yasası: $\lambda_{\max} \cdot T = 0.2898 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$).

Rayleigh-Jeans formülü alçak frekanslarda (kızılötesi) deneysel gözlemlerle uyuşuyor, ancak yüksek frekanslarda (morötesi) yanlış sonuç veriyordu. Üstelik Rayleigh-Jeans formülüne göre tüm frekanslardaki ışınım enerjilerinin toplamının sonsuz olması gerektiği gibi yanlış bir sonuç çıkıyordu. (Morötesi felaket!!!)



$\lambda \rightarrow 0$ giderken $I \rightarrow \infty$ yaklaşıyor.

Max Planck 1900'de siyah cismin ışınımı için, tüm dalga boylarında deneyle tam bir uyuşma halinde olan bir formül buldu. Planck karacisim ışınımının kuantlaşmış olduğunu varsaymak gerektiğine inanıyordu.

Planck varsayımına göre, "frekans f olan bir ışın, hf kadar bir enerji kuantasının tam katları olarak salınabilir"

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$

$E = 0, hf, 2hf, \dots$ h : (Planck sabiti) $= 6.63 \cdot 10^{-34}$ Joule.s

Yani enerji kuantumu frekansa bağlıdır. Bu durum elektrik yük kuantası e nin her yük için aynı oluşundan farklıdır.

Planck kendi teorisinde kovuğun duvarlarında titreşen moleküllerin doğasını ilgilendiren iki çarpıcı ve tartışmalı varsayım yaptı.

1- Işınım yayan, titreşen moleküller yalnızca

$E_n = nhf$ ile verilen E_n enerjili kesikli birimlere sahip olabilirler. (n kuantum sayısı, f moleküllerin titreşim frekansı) Bu ifade ile moleküllerin enerjilerinin kuantalandığı söylenir, izinli enerji düzeylerine de *kuantum düzeyleri* denir.

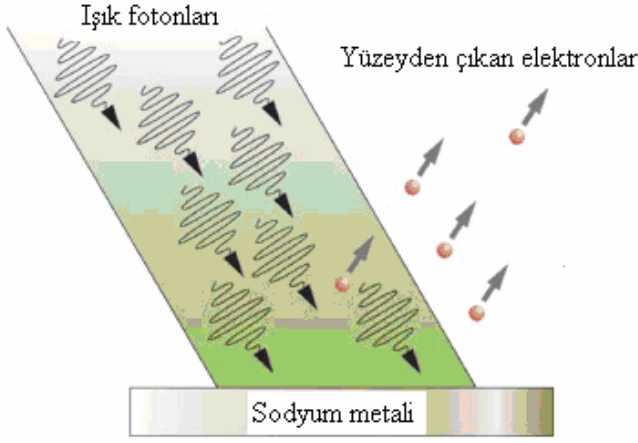
2- Moleküller, kuanta(ya da foton) denen ışık enerjisinin kesikli birimleri cinsinden enerji yayarlar ya da soğururlar. Bu ise, bir kuantum düzeyinden diğerine sıçrayarak gerçekleştirilir. Kuantum sayısı, n, bir birim değişirse, $E_n = nhf$ bağıntısı molekül tarafından yayınlanan ya da soğurulan enerjinin hf 'e eşit olduğunu gösterir. Ardışık iki kuantum düzeyi arasındaki enerji farkına karşı gelen bir fotonun enerjisi $E = hf$ 'dir.

Molekül yalnızca kuantum durumları değiştiği zaman enerji yayınlayacak ya da soğuracaktır. Eğer molekül bir kuantum durumunda kalırsa, enerji soğurulmaz ya da yayımlanmaz.

Planck ışımının neden hf 'iin tam katları olduğunu açıklayamadı. Bulduğu sonucungeçici bir varsayım olduğuna inanıyordu; oysa, bu sonuç elektromanyetik ışımının temel evrensel bir özelliği olarak kalacaktı.

Fotoelektrik Olay:

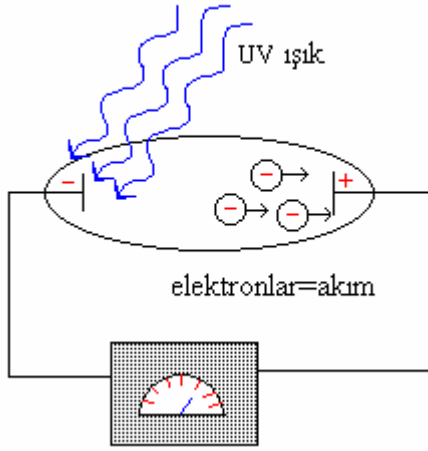
Einstein, Planck'ın fikirlerini ele alarak bunları geliştirdi ve birçok olayın açıklanmasında bunların kullanılabileceğini gösterdi. Bu olayların en önemlilerinden biri fotoelektrik olaydı. Bu olay 1877 yılında Hertz tarafından bulundu. Bir metal üzerine ışık ışınları düşürüldüğünde, elektronların koparıldığı gözlenmekteydi.



Bu etki ilk bakışta klasik elektromanyetik teori ile uyumlu gibidir. Işık dalgalarının salınan elektrik ve manyetik alanlar şeklinde enerji taşıdığı biliniyordu; böylece metaldeki elektronların bu enerjinin bir bölümünü soğurabileceği akla uygundu. Ancak ciddi bir inceleme sonucu bu olayın birçok açıdan klasik teoriyle çeliştiği anlaşıldı.

Fotoelektrik olayın araştırıldığı aygıt şeması şekildeki gibidir:

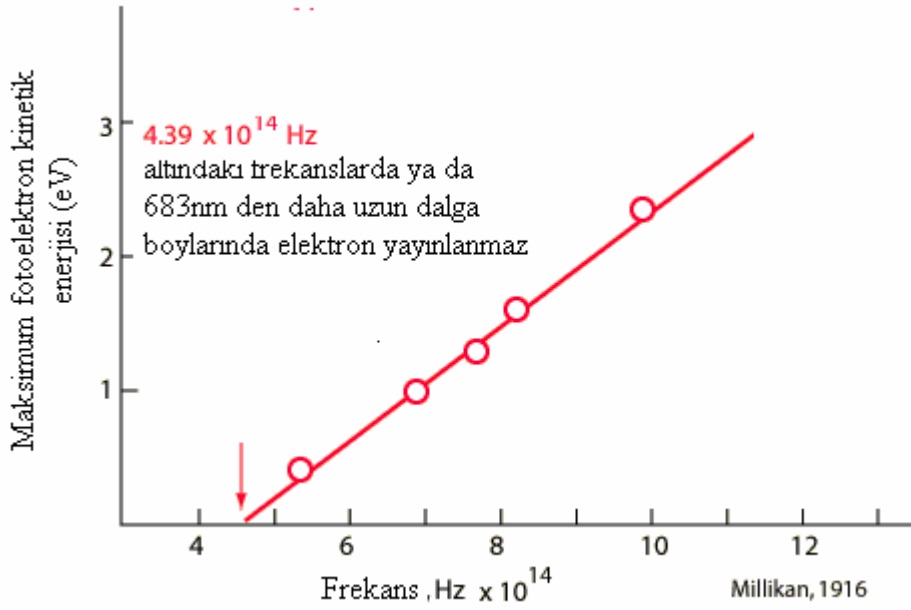
Fotoelektrik Olay



Havası boşaltılmış bir cam tüpteki metal elektrotlardan birine ışık gönderildiğinde, metalden elektronlar kopmaktadır. Diğer elektrot daha yüksek bir potansiyelde tutulursa, bu elektronları çeker ve böylece koparılan elektron sayısına orantılı bir akım oluşur. Diğer elektrot daha düşük potansiyelde tutulursa, elektronları iter ve sadece bu itici V potansiyelini yenebilecek kinetik enerjiye sahip olan elektronlar itici elektroda ulaşabilirler. İtici potansiyel artırıldığında, akım gittikçe azalır ve öyle bir V_s durdurucu potansiyel değerine ulaşıldığında, akım sıfır olur. Koparılan elektronların(fotoelektronların) maksimum kinetik enerjisi K_{maks} ile gösterilirse, V_s potansiyelinin değeri:

$$V_s e = K_{maks}$$

Durdurucu potansiyel ölçülürse, K_{maks} bulunur.



Bu yöntemle koparılan elektronların sayısı ve kinetik enerjisi araştırıldığında iki önemli sonuç çıkar:

- 1- Gönderilen ışığın şiddeti arttırıldığında, koparılan elektronların sayısı artar, ancak elektronların kinetik enerjisi değişmez.
- 2- Gönderilen ışığın frekansı azaltıldığında, kritik bir f_0 değerinin altında, ışığın şiddeti arttırılsa bile elektron kopmaz.

Bu iki sonuç, ışığı salınan elektrik ve manyetik alanlar olarak ele alan klasik bakış açısıyla uyumlu değildir. Klasik görüş geçerli olsaydı, ışığın şiddeti arttırıldığında, alan şiddeti de artacağından, koparılan elektronların daha büyük kinetik enerjiye çıkması gerekirdi. Aynı şekilde, alçak frekanslı elektromanyetik dalgaların neden elektron koparmadığı da açıklanamaz. Einstein, “bir ışık demetindeki enerji, uzayda sürekli dağılmış olmayıp sonlu sayıda noktasal enerji kuantumlarından oluşur; bölünemeyen bu enerji kuantumları tam olarak salınır veya soğurulur” varsayımını öne sürmüştür.

Einstein bu ışık kuantumunun yani fotonun enerjisini hf olarak aldı. Bu düşünce, Planck’ın ışığın hf ’in tam katları olarak salındığı ve soğurulduğu varsayımını da içerir, ama ışığın kendisinin enerjisinin hf ’in tam katları olduğunu söylemek daha ileri bir düşüncedir.

Einstein’e göre iki fotonun aynı anda bir elektrona çarpma olasılığı çok zayıf olduğundan, bir elektron kendisine çarpan tek fotonun hf enerjisini alarak kopar. Bu varsayımlarla fotoelektrik olayın özellikleri açıklanabilir.

1. özelliğin açıklaması: Einstein varsayımına göre, ışığın şiddeti arttırıldığında, foton sayısı artar, ancak fotonun enerjisi değişmez. Daha çok foton gönderildiğinde, daha çok foton koparılır, ama her fotonun enerjisi aynı kaldığından elektronların kinetik enerjileri, dolayısıyla K_{maks} değişmez.

2. özelliğın açıklaması: Verilen bir metalden elektron koparılması için minimum bir enerjiye ihtiyaç vardır. Bu minimum enerjiye o metalin iş fonksiyonu denir ve ϕ ile gösterilir. Fotonun enerjisi ϕ 'den küçükse elektron koparmaya yeterli olmaz, yani öyle bir kritik f_0 frekansı olmalıdır ki

$hf_0 = \phi$ bu eşik frekansı altında hiçbir elektron koparılmaz.

$f > f_0$ ise, fotonun çarptığı elektron hf enerjisini alacak ama ϕ kaybederek metalden kopacaktır. Çıkan elektronun enerjisi:

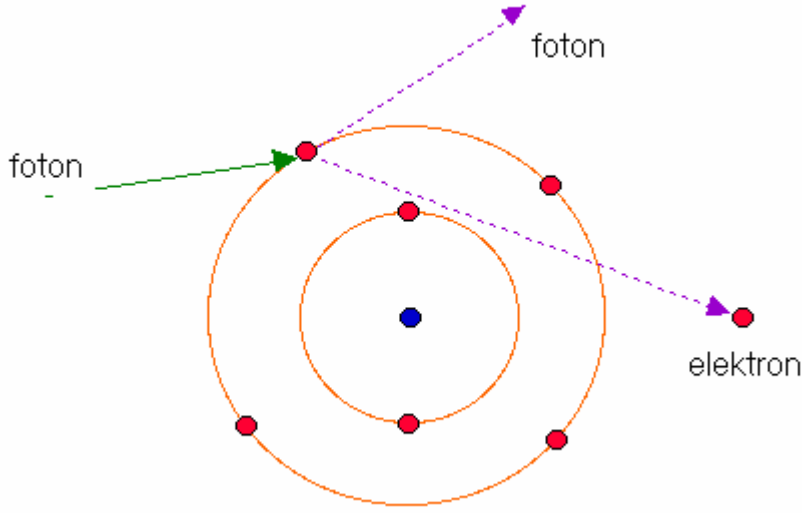
$$V_s = K_{maks} = hf - \phi \text{ olmalıdır}$$

Diğer bir deyişle, koparılan elektronun maksimum enerjisi ışık frekansının doğrusal bir fonksiyonu olup, bu fonksiyonun eğimi Planck sabiti h 'e eşit olmalıdır. Bu öngörüşün deneysel kanıtlanması Millikan tarafından gerçekleştirildi. Grafikten, Millikan'ın bulduğu h değeri Planck'ın kara cisim ışımasından bulduğu değerle uyumludur. Günlük yaşam ölçeğimize göre, bir fotonun hf enerjisi çok küçük bir değerdir, o yüzden bunun makroskopik boyutta farkedilmesi mümkün değildir.

Compton Olayı:

Atom veya elektron gibi bir yük sistemi üzerine ışık düşürüldüğünde, ışığın bir kısmı değişik yönlerde saçılır. Bu tür saçılmanın klasik açıklaması şöyledir: Gelen ışığın salınımlı elektrik alanı etkisiyle yükler titreşmeye başlar, bu titreşen yükler değişik yönlerde ikinci bir elektromanyetik ışınım üretirler. Klasik teorinin öngördüğüne göre, saçılan dalganın f' frekansı yüklerin titreşim frekansına dolayısıyla gelen dalganın f frekansına eşit olmalıdır. Ancak, 1912 yılından itibaren yayılan haberlere göre, yüksek frekanslı X-ışınlarının elektronlardan saçılması üzerine yapılan deneylerde, saçılan ışının frekansının gelen ışığın frekansından küçük olduğu gözlemlendi.

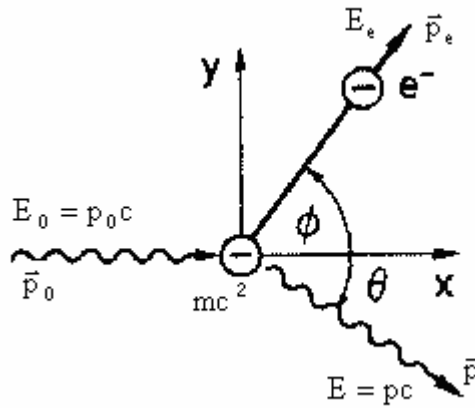
1912'ye kadar bu fikir ciddiye alınmadı ancak 1912'de Compton, eğer ışığın kuantalandığı doğruysa $f < f'$ olması gerektiğini öne sürdü



Compton'un düşüncesine göre fotonlar enerji taşıyabiliyorsa, momentum da taşıyabilirlerdi. Compton ayrıca, ışınımın elektronlardan saçılması sırasında her fotonun bir elektronla çarpıştığını, bu çarpışma sırasında enerji ve momentum korunumu yasalarının geçerli olduğunu ileri sürdü.

Frekansı f olan bir foton serbest ve durgun bir elektrona çarptığında, elektron enerji kazanır, foton enerji kaybeder. Buna göre fotonun son enerjisi hf' , başlangıçtaki hf den daha küçük olur. Enerjisi E_0 ve momentumu \vec{p}_0 olan bir fotonun, enerjisi mc^2 ve momentumu sıfır olan (duran) durgun bir elektron üzerine gönderildiğini düşünelim. (Elektronları görelilik olarak alıyoruz!!!)

Çarpışma sonunda fotonun enerjisi hf olsun ve \vec{p} , ile \vec{p}_0 arasındaki açı θ olsun.



Enerji ve momentum korunumuna göre,

Çarpışmadan önce

Çarpışmadan sonra

Gelen fotonun enerjisi + elektronun durgun enerjisi=saçılan fotonun enerjisi + saçılan elektronun enerjisi

$$E_0 + mc^2 = E_e + E \quad (1)$$

Gelen fotonun momentumu +elektronun momentumu=saçılan fotonun momentumu + saçılan elektronun momentumu

$$\vec{p}_0 + 0 = \vec{p} + \vec{p}_e \quad (2)$$

$$\text{Gelen fotonun enerjisi} \quad E_0 = p_0 c$$

$$\text{Saçılan fotonun enerjisi} \quad E = pc$$

$$\text{Enerji momentum bağıntısı} \quad E_e^2 = (p_e c)^2 + (mc^2)^2 \quad (3)$$

$$(1) \text{ den} \quad E_e = mc^2 + p_0 c - pc$$

$$(3) \text{ den} \quad E_e = c\sqrt{p_e^2 + (mc)^2}$$

$$(1)=(3)$$

$$mc + p_0 - p = \sqrt{p_e^2 + (mc)^2}$$

$$\vec{p}_e = \vec{p}_0 - \vec{p}$$

$$p_e^2 = \vec{p}_e \cdot \vec{p}_e = (\vec{p}_0 - \vec{p}) \cdot (\vec{p}_0 - \vec{p}) = p_0^2 + p^2 - 2\vec{p}_0 \cdot \vec{p} = p_0^2 + p^2 - 2p_0 p \cos \theta$$

(3) de yerine koyarak

$$mc^2 + p_0 c - pc = c\sqrt{p_0^2 + p^2 - 2p_0 p \cos \theta + (mc)^2}$$

Her iki tarafı c ile sadeleştirip karesi alınır, tekrar sadeleştirilirse,

$$mc(p_0 - p) = p_0 p (1 - \cos \theta)$$

$$\frac{p_0 - p}{p_0 p} = \frac{1}{mc} (1 - \cos \theta)$$

$$p_0 = \frac{h}{\lambda_0} \quad \text{ve} \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

İfadeleri kullanılarak,

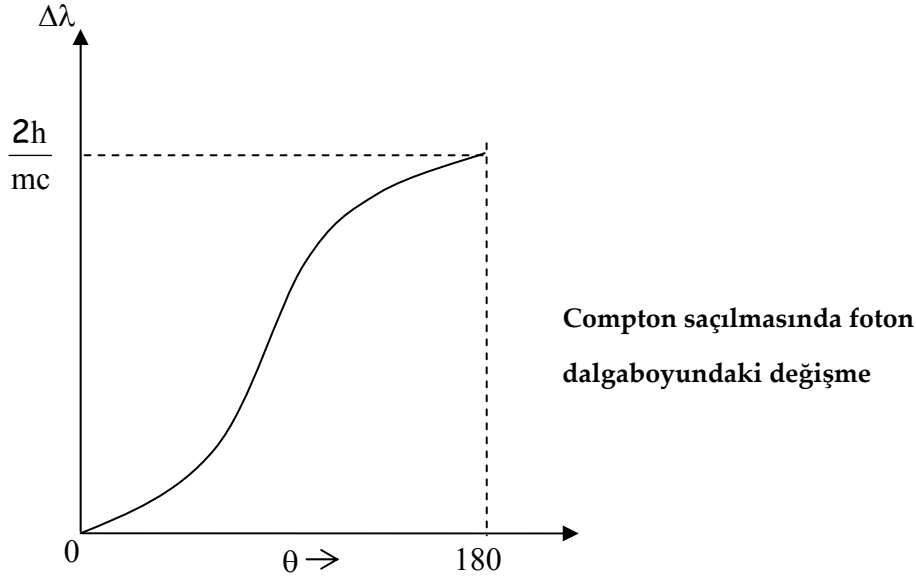
$$\Delta \lambda \cong \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

$\Delta \lambda \geq 0$ olduğundan dalga boyu daima artacak frekans azalacaktır.

$$\theta = 0 \quad \text{için} \quad \Delta \lambda = 0$$

$$\theta = 180 \quad \text{için} \quad \Delta \lambda = \frac{2h}{mc} \text{ olur}$$

Compton dalga boyu: $\frac{h}{mc} = 0.00243\text{nm}$ Saçılan fotonun dalgaboyundaki kaymayı belirtir.



Dalga Parçacık İkilemi:

Fotoelektrik olay ve Compton olayı gibi deneyler ışığın parçacık yapısına sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Ancak ışığın daha önceden bilinen dalga karakterini doğrulayan deneysel gözlemler vardır. Bu durumda ***ışığın hem dalga hem de parçacık karakteri vardır.***

Işığın bu ikli yapısı

$$E = hf \quad (1) \quad \text{ve}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (2) \quad \text{bağıntılarıyla özetlenebilir.}$$

E , p fotonun parçacık özelliklerini; f ve λ ise dalga yapısını belirtmektedir.

Uzun dalga boylu radyo dalgalarını gözönüne alırsak, (örneğin 2.5MHz) bu frekansa sahip bir fotonun enerjisi 10^{-8}eV civarındadır. Pratik olarak bu enerji tek bir fotonu gözleyemeyecek kadar küçüktür. Çok duyarlı bir radyo alıcısı gözlenebilir bir işaret oluşturmak için 10^{10} tane fotona ihtiyaç duyar. Bu kadar çok sayıda foton ortalama

olarak sürekli bir dalga gibi görünecektir. Her saniye sayaca ulaşan bu kadar çok sayıda fotonla sayaç sinyalinde herhangi bir tanecikli yapının ortaya çıkması beklenemez. Daha yüksek frekanslara çıkıldığında görünür bölgede ışığın hem foton hem de dalga özelliklerini görmek mümkündür. Işık demeti girişim olayları gösterir ve aynı zamanda foto-elektronlar üretebilir. Foto-elektronlar Einstein'ın foton kavramını kullanarak en iyi şekilde anlaşılabilir. Daha yüksek frekanslarda fotonun enerjisi ve momentumu artar. Dolayısıyla ışığın tanecik doğası dalga doğasından daha açık olarak ortaya çıkar. Örneğin, bir X-ışını fotonunun soğurulması bir tek olay olarak kolayca gözlenebilir. Bununla birlikte dalga boyu küçüldükçe girişim ve kırınım gibi dalga olaylarının gözlenmesi daha güç olur. Elektromanyetik ışınının tüm biçimleri iki görüş noktasından anlatılabilir. Bir uçta elektromanyetik dalgalar çok sayıda fotonun oluşturduğu ayrıntılı girişim desenleri tasvir ederler. Diğer uçta çok kısa dalga boylu ve yüksek enerjili fotonlarla uğraşıldığında foton tasvirleri öne çıkmaktadır.

Madde Dalgaları:

Büyük ölçekli gözlemlerde, dalga açıklaması ya da bir tanecik açıklaması olarak gözönüne alınarak açıklanır. Fakat mikroskopik dünyada ayrımlar genel olarak ortadan kalkar. Belli koşullar altında elektronlar gibi taneciklerin dalga özellikleri sergiledikleri bir gerçektir.

1923 yılında L.V.de Broglie fotonların dalga ve tanecik özelliklerine sahip olmalarından dolayı belki bütün madde biçimlerinin tanecik özellikleri olduğu kadar dalga özelliklerine de sahip olacakları önerisini ileri sürdü. De Broglie'e göre elektronlar hem tanecik hem de dalga olmak üzere ikili doğaya sahiptir. Her elektrona ona uzayda yol gösteren veya yörünge çizen bir dalga(mekanik) eşlik ediyordu. 1929'da Nobel ödülü aldı.

Bir fotonun enerjisi

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Momentumu ise

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hc}{\lambda c} = \frac{h}{\lambda}$$

Kütlesi m ve hızı v olan bir taneciğin momentumu $p=mv$ olduğundan, taneciğin de Broglie dalga boyu

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

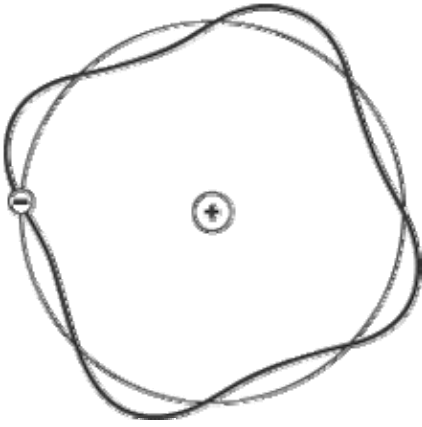
De Broglie ayrıca, fotonlara benzer şekilde, madde dalgalarının(yani durgun kütlesi sıfır olmayan taneciklere eşlik eden dalgalar) frekanslarının

$E=hf$ biçimindeki Einstein bağıntısına uyarak

$$f = \frac{E}{h} \text{ olacağını önerdi.}$$

De Broglie bağıntılarını kabul edersek, elektronun E enerjisinin kuantumlanması demek f frekansının kuantumlanması anlamına gelir. Klasik fizikten bilinen sonuca göre bir bölgede yerleşmiş dalgalar (flüt borusu veya gitar teli) sadece belli frekanslarda titreşebilirler. Bu düşünce atom içindeki elektron dalgalarının belirli frekanslarda olması yani kuantumlanmasına yol açar.

Elektron dalgası atomun çevresinde dolanıyor gibi düşünülürse, yörünge çemberi içine tam sayıda dalga boyu sığmalıdır. Dairesel yörüngeye tam dalga boyu sığdırabilmek için



$$2\pi r = n\lambda \quad (n=1,2,3,\dots)$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$2\pi r = \frac{nh}{p} \Rightarrow rp = \frac{nh}{2\pi}$$

$$L = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar \quad (n=1,2,3,\dots)$$

Açısal momentumun bu açıklaması günümüzde yeterli görülmemektedir. Şekilde gösterilen dalga belirli bir r yarıçaplı çember üzerinde hareket eden bir tür tek boyutlu dalgadır. Modern kuantum mekaniğinde tüm atom içinde yayılmış üç boyutlu bir dalga söz konusudur. Yine de de Broglie'nin elektron dalgaları kavramıyla açısal momentumun kuantalanacağını düşünmesi doğrudur.

Belirsizlik İlkesi

Herhangi bir anda bir parçacığın konumu ve hızı ölçülmek istenirse, ölçümlerde daima deneysel belirsizliklerle karşı karşıya kalınır. Klasik mekaniğe göre, deney aletlerini ve deney yöntemlerini son derece hassaslaştırmaya hiçbir engel yoktur. Bununla beraber ***kuantum teori, bir parçacığın konumunu ve hızını aynı anda son derece doğrulukla ölçmenin olanaksız olduğunu öngörür.***

1927 yılında Heisenberg, ilk kez parçacığın konumunu ve momentumunu aynı anda son derece doğrulukla belirlemenin olanaksız olacağını öne sürdü.

“Eğer bir konum ölçümü Δx duyarlılığıyla ve momentumun ölçümü de aynı anda bir Δp duyarlılığıyla yapılırsa, o zaman iki belirsizliğin çarpımı asla \hbar mertebesinde bir sayıdan daha küçük olamaz.” (Belirsizlik İlkesi)

Yani
$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2\pi} = \hbar$$

Parçacığın konum ve momentumundaki belirsizlikler ona özgüdür. Δx veya Δp den biri istenildiği kadar küçültülse bile bunların çarpımı \hbar den küçük olamaz. Bu belirsizlikler daha ziyade maddenin kuantumlu yapısından kaynaklanır.

Belirsizlik ilkesi doğanın dalga parçacık ikileminden kaynaklanan genel bir sonuçtur.

Ancak bu ilke yine makroskopik düzeyde önemsizdir.

Eğer ölçüm için sonlu bir zaman aralığı verilirse, bir sistemin ölçülebilen ΔE enerjisinin doğruluğu üzerinde de bir sınır vardır.

Belirsizlik İlkesine göre:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

şeklindedir.

Foton Etkileşmeleri

Foton bir maddeden geçerken, o maddenin atom ve elektronları ile etkileşir:

- Foton elektrondan (veya çekirdekten) saçılır ve bir kısım enerjisini kaybeder; (Compton olayı) ama foton yavaşlamaz yine c hızıyla hareket eder ama frekansı azalır.
- Fotoelektrik olayda foton elektronu atomdan koparır ve kendisi yok olur.
- Eğer fotonun enerjisi elektronu atomdan tamamen koparmaya yetmiyorsa, elektronu bir üst enerji düzeyine çıkarır Bu durumda da foton kaybolur ve enerjisi atoma verilir. Bu atoma eksite (uyarılmış) atom denir.
- Foton elektron ve pozitron çifti gibi bir madde üretebilir, buna çift oluşumu denir.(pozitron elektronla aynı fakat zıt yüklü parçacıktır) Foton elektron-pozitron çifti yaratınca yok olur.

Foton tek başına elektron yaratamaz çünkü yük korunumu söz konusudur. Elektron da pozitronla birleşince ikisi de yok olur ve enerji ve kütleleri fotonun enerjisine dönüşür. Bu yüzden pozitronlar doğada çok uzun süre yaşamazlar.