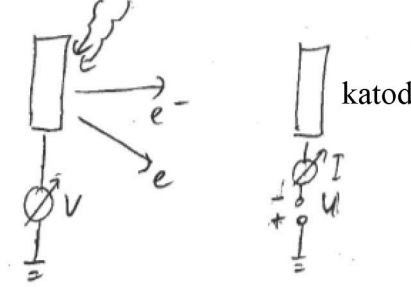


Fotoelektrik Etki

1888 de gözlemlendi; izahı, Einstein 1905. Negatif yüklü metal bir levha ışıkla aydınlatıldığında yükünü yavaş yavaş kaybederken, pozitif bir yük geriye kalır.



Şekil I: Fotoelektrik etki. Tek dalga boylu bir ışıkla aydınlatılan metal bir levhadan elektronlar koparılır. Açığa çıkan elektronların enerjisi ölçülür.

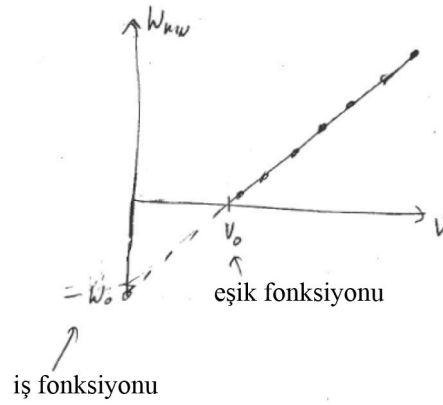
Yeterince kısa dalga boylu ışık elektronları koparır, elektrik akımı ise ışığın şiddetiyle orantılıdır. Işık şiddeti ne kadar yüksek olsa bile, belli bir eşik frekansı ν_0 altında elektron koparamaz. Açığa çıkan elektronların enerjisi, onların katoda ulaşmasını engelleyecek olan V geriliminin tayini ile ölçülebilir. Elektronun W_{kin} kinetik enerjisi ile gelen ışığın frekansı ν arasında doğrusal bir bağıntı bulunmuştur. Elektronların kinetik enerjisi gelen ışığın şiddetine bağımlılık göstermez.

Klasik öngörü

Birim alan başına düşen güç, gelen ışığın şiddetiyle orantılıdır ve frekanstan bağımsızdır. Böylece elektronun kinetik enerjisi, ışık şiddetiyle orantılıdır (ν den bağımsız) ve hiçbir eşik frekansı söz konusu olmamalıdır.

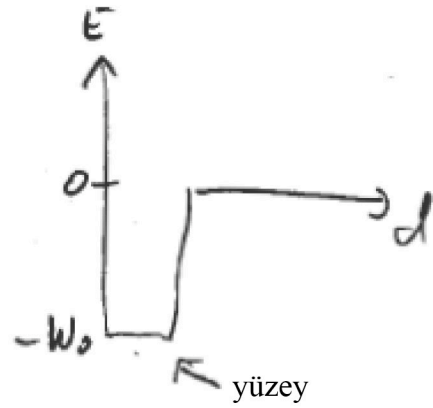
Einstein'ın izahı, 1905

1921, Nobel ödülü. Einstein, Planck'ın matematiksel çabaları (ışığın kuantumlanması) na fiziksel gerçeklik kazandırmıştır.



Şekil II: ν_0 eşik frekansının değeri metale bağlıdır. Eğim bağlı değildir.

1. Işık enerjinin en küçük enerji birimlerinden (kuantumlar, fotonlar) oluşur. $E=h\nu$
2. Elektron metale bir W_0 bağlanma enerjisiyle bağlanmıştır.
3. Herbir elektron, tek bir fotonla fırlatılır.



Şekil III: İş fonksiyonu

Yukarıdaki üç kabullenme gözlemlenen tüm özellikleri açıklayabilir:

- Süreçteki enerji korunumu

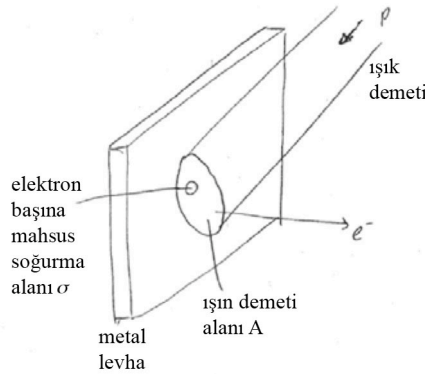
$$h\nu = W_0 + W_{\text{kin}}$$

olmasını gerektirir.

- Işık frekansı ν , elektronun kinetik enerjisine doğrusal bağımlı olup, düşey ekseni kesim noktası $-W_0$ olur.
- W_{kin} grafiğinin eğimi Planck sbt. h ile verilir.

- Değeri metale bağlı olan $\nu_0 = \frac{W_0}{h}$ eşik frekansı altında hiçbir elektron açığa çıkamaz. W_0 birkaç eV kadardır.
- Fotoelektrik akımı foton geliş hızına, yani ışığın şiddetine bağlıdır.

Einstein'ın izahı bu deneylerle ilgili olarak kuantumlanma varsayımının raslantısal doğası ve parçacık ikilemini de ortaya çıkarmıştır:

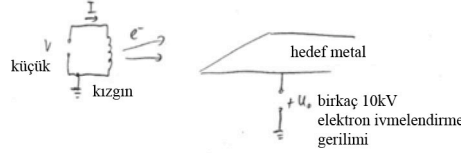


Şekil IV: Fotoelektrik etki ve dalga-parçacık ikilemi

Gelen ışığın gücünü bir P düzeyine indirgersek ki bu $R = \frac{P}{h\nu}$ foton geliş hızına karşı gelir, ilk foton çıkışı ortalama olarak $t_0 = \frac{1}{R}$ de vuku bulur. Bu durum oldukça bir sürpriz ortaya koyar zira, bir atomdaki elektron küçük bir $\sigma \ll A$ alanını işgal eder. $r \approx 1\text{\AA}$ atomun yarıçapı olmak üzere bu alan $\sigma = \pi r^2$ olarak düşünülebilir. Bununla beraber, bu düşünce yanlışdır zira titreşen elektron bir dipol anteni teşkil eder ki $\sigma \sim \lambda^2 \sim (1\mu\text{m})^2 \gg \pi \approx (1\text{\AA})^2$ olur (8 kat daha büyüklükte). Ancak, $\sigma / A \ll 1$ ($\sigma = 10^{-8} \text{ cm}^2$, $A = 1 \text{ cm}^2$) olduğundan, bir t_0 zamanından sonra σ alanı içinde ortalama olarak yeterince enerjinin depolanması pek mümkün değildir. Buradan foton enerjisinin tamamının ışın alanı A içerisinde bir yerde (gelişigüzel) yerleşik olması gerekir ki leke büyüklüğü σ 'ya eşit veya küçük olmalıdır: ışın demetinin raslantısal yerleşmesi bize fotonların parçacık gibi bir doğasını gösterir. Bununla beraber, aynı ışık bir dalga gibi davranır, yani kırınım, girişim gibi olayları gösterir: **dalga-parçacık ikilemi**.

Fotoelektrik olayında fotonlar, kinetik enerjisi foton frekansına bağlı olan ve enerji korunumundan ileri gelen elektronları meydana getirirler. Şimdi bu olayın tersini ele alalım, yani e.m dalgaların (fotonların) elektron çarpışmasıyla üretimi. Enerjinin korunumu şimdi foton spektrumunu belirler: x-ışınları

X-ışını üretimi



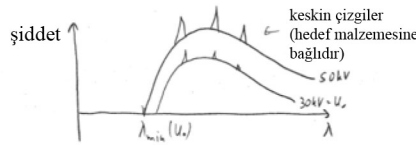
Şekil V: X-ışını üretimi

Elektronlar bir elektrik alan içerisinde ivmelendirilirler ve $W_{\text{kin}} = qV_0$ kinetik enerjisini kazanırlar ve bunlarda hedefe çarptıklarında (yavaşlayarak) elektromanyetik ışımaya (fotonlara) dönüştürülebilirler. Neşredilen ışımının gözlemlenen spektrumu: λ_{min} hedef malzemeden bağımsız olup, enerjinin korunumu ile kısıtlanmıştır: elektronun toplam KE tek bir x-ışını fotonuna dönüştürülmüştür:

$$q_e V_0 = h\nu_{\text{max}} = h \frac{c}{\lambda_{\text{min}}} \quad (6-1)$$

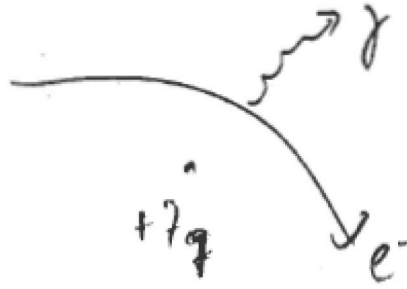
Kısa dalga boylu kesik x-ışınları için:

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{hc}{q_e V_0} = \frac{1.24 \text{ Å}}{V_0/10 \text{ kV}} \quad (6-2)$$



Şekil VI: Neşredilen x-ışınlarının spektrumu

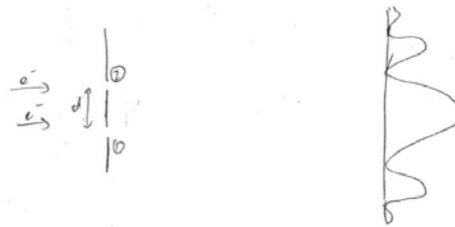
X-ışını yayılımı, çekirdeğin alanındaki elektronların yavaşlamasından ileri gelir. Klasik olarak, çok kısa zaman aralığı Δt 'de elektron dönüş yapabildiğinden, çok yüksek frekanslara $\Delta = \frac{1}{\Delta t}$ uzanan sürekli bir spektrumu bekleyebiliriz. Bunun yerine, enerji korunumundan dolayı bir kesiklik gözlemleriz: elektronun KE'nin tamamı tek bir fotona dönüşmüştür. Süperempoze çizgi spektrumu atomlardaki geçişlerden (çok sıkı bağlı iç-kabuk elektronlar) ileri gelir. X-ışın spektrumu, kristalleri kırınım ağı gibi kullanarak ölçülebilir.



Şekil VII: Almanca: Bremsstrahlung “frenleme emisyonu” bir çekirdek alanındaki elektrondan ileri gelir.

Çift-yarık deneyi, dalgalar gibi elektronlar

Parçacıkların dalga davranışını gözlemlemek için öyle bir duruma gereksinim duyarız ki artık tek bir klasik yol parçacığa yüklenemez. Bunlardan birisi tek-yarık kırınımı, diğeri ise daha ilginç bir örnek olmak üzere çift-yarık girişimidir: Girişim deseni, verilen bir zamanda ışın demeti yeterince soğurulursa ölçüm aletinde tek bir foton kalması halinde de gözlemlenir. Bu bölünemez elektron 1. yarık ve 2. yarıktan geçer. Elektronun gerçekten hangi yarıktan geçtiğini belirlemek için yapılan herhangi bir ölçüm girişim desenini bozar. Yarıklardan bir tanesini kapatmak girişimi yok eder. Daha kuvvetli yöntemler, yani optiksel gözlem (ışık saçınımı) neler ortaya çıkarabilir?

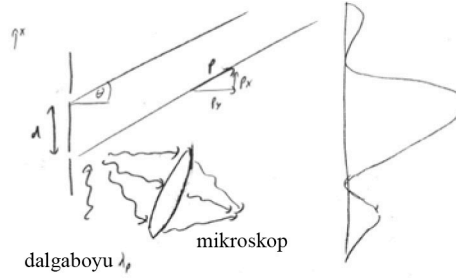


Şekil VIII: Çift yarıktaki girişim deseni. Girişim deseni alette verilen bir zamanda sadece tek bir elektronun kalmasında bile vuku bulur.

Hangi –yol ölçümleri ve girişimin yok edilmesi

$\lambda_p < d$ olmak üzere kısa dalga boylu ışık, elektronun hangi yarıktan geçtiğini optiksel olarak çözündürmek için gerekir. Ancak Compton saçınımından bildiğimiz üzere elektronun momentumu 0 değeri (fotonun ileri yönde saçınması ve elektrona hiçbir

momentum aktarımsız) ve $2\hbar k_p$ (fotonun geri saçınımı) arasında değişme gösterir. Böylece elektronun x -yönü momentum değişimi $\Delta p_x \sim 2\hbar k_p$ mertebesinde olup, bilinemez (öngörülemez) dir. y -yönü momentum değişimi daha az uygundur. Diğer yandan, ilk maksimum ($d \sin \theta_1 = \lambda_{dB}$) üzerindeki yapıcı girişime karşı gelen x -momentumu $p_x = p \sin \theta_1 = p \frac{\lambda_{dB}}{d} = \frac{h}{\lambda_{dB}} \frac{\lambda_{dB}}{d} = \frac{h}{d}$ olur.



Şekil IX: Girişim deseni elektronun ışığı saçındırmasıyla ortadan kalkabilir öyle ki bu durumda onun hangi yarıktan geçtiğini tayin etmek olasıdır (optiksel görüntüleme)

Foton saçınımından dolayı momentumdaki belirsizlik $\Delta p_x \sim 2\hbar \frac{2\pi}{\lambda_p} = \frac{h}{\lambda_p}$ ve $\lambda_p \ll d$ olduğundan, elektronun hangi yarıktan geçtiğini gözlemlemek için foton saçınımı sırasında konumsal gözlemle ilgili olarak momentum belirsizliği Δp_x 'den ötürü girişim deseni tamamen yağla kaplanmış gibi olacaktır. Tek-yarık halinde olduğu gibi, parçacığın yerleşik olması bir apertür (yarık) veya foton saçınımı olsun veya olmasın, momentuma ters etki yapar ve deseni karartır. Bu durum elektronun hangi yarıktan geçeceğini size söyleyecek şekilde bir deneyin yapılması ve herhangi bir ölçümün yapılmasında da geçerlidir.

Hangi-yol bilgisi

Gerçekten elektronun hangi yolu aldığına dair yapılan bir özel deneyin gerçekleştirilmesi, **girişim desenini yok eder**. Eğer ışığın dalga boyunu arttırsak, yani mikroskobun çözünürlüğünü düşürürsek, $\lambda > d$ olduğunda tekrardan girişim desenine kavuşabiliriz. Yani, elektronun hangi yarıktan geçtiğini çözündüremediğimiz zamanda bu durum ortaya çıkar. Bunun yerine, ışığın şiddetini ortama olarak sadece elektronların yarısı kadar bir fotonu saçındırması halinde ne olur?

Girişim deseninin zıtlığı (kontrast) $\frac{1}{2}$ ye düşer. Ancak, girişim ve saçınım arasında bire bir olay bazında eşilişki vardır: Hiçbir fotonun gözlemlenmediği elektron gelişlerinden yapılan nihai seçim tam zıtlık ortaya çıkarırken, elektronların bir fotonu saçındırması halindeki denemeler ise hiçbir zıtlık ortaya çıkarmaz. Şayet bir elektron bir fotonu saçındırıldığı zaman, saçınan fotonun yönü, elektronun yolu ile karşılıklı ilintiye sahip olur (dolaşıklık). Bir sistemin farklı parçaları arasındaki bu karşılıklı bağımlılık (dolaşıklık) KM'nin esaslı bir özelliğinin yanında ölçüm sürecinde esasını teşkil eder. Ölçüm süreci, ölçüm aletinin parçaları ve serbestlik derecelerinde ortalama alma ("üzerinde izleme")yı içerir ki bunlar gözlemlenmemiş olabilir.

("hangi-yol bilgisi") ölçümü girişim desenini yok ederse ne zaman ölçüm gerçekten vuku bulmuş olur?

- elektronun fotonu saçındırıldığı anda,
- fotonun fotodetektöre çarptığı anda,
- sonucu öğrendiğimiz anda (tık sesini duymak).