

Aula 12: Física Quântica

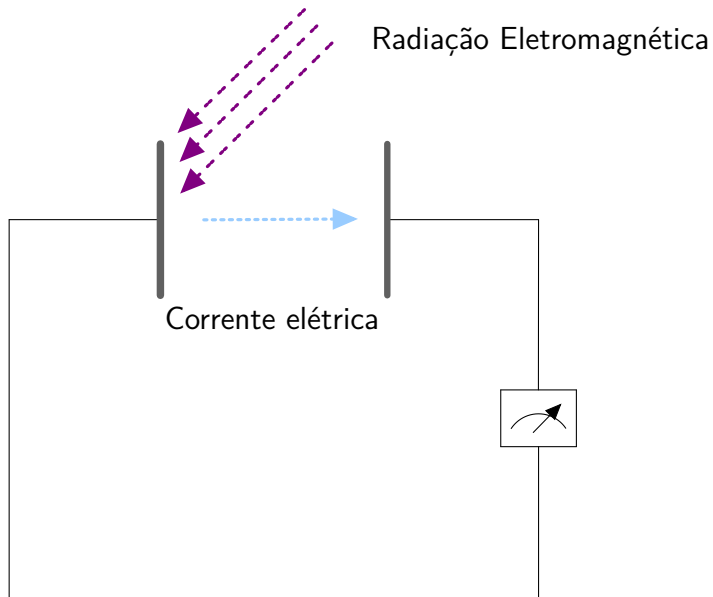
Bárbara Amaral
Instituto de Física da USP

O efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico

Emissão de elétrons que ocorre quando ondas eletromagnéticas incidem sobre uma superfície.

O efeito fotoelétrico



A atração das cargas positivas produz uma barreira de energia potencial que mantém os elétrons confinados no interior do material.

A energia mínima necessária para arrancar os elétrons do material é chamada **função trabalho** ϕ .

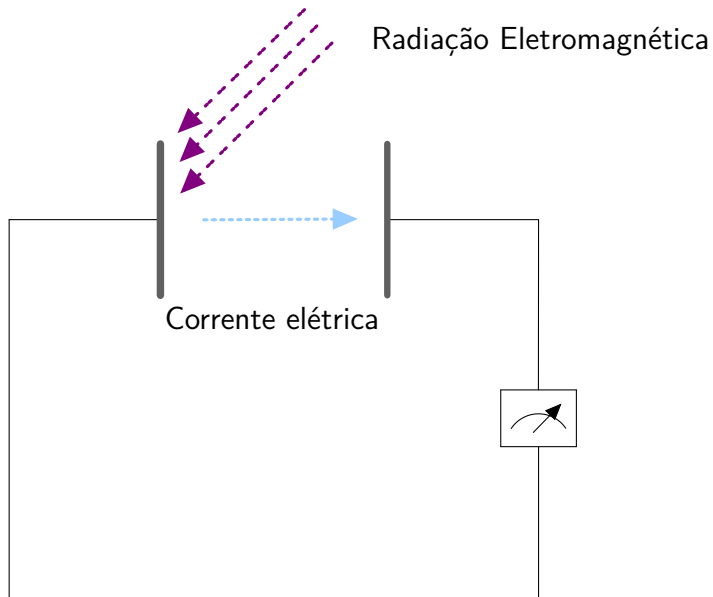
Os elétrons absorvem energia da radiação incidente e podem superar essa barreira de potencial.

Esse fato em si não é surpreendente.

No entanto, as observações experimentais mostraram vários resultados inesperados que não podem ser explicados pela física clássica.

O que se esperava

O efeito fotoelétrico



Estudamos como a corrente varia com a voltagem.

Aplicando um potencial que se opõem ao movimento dos elétrons, podemos determinar a energia cinética máxima dos elétrons.

O potencial necessário para parar a corrente é chamado **potencial de corte** V_0 .

Classicamente esperava-se que V_0 dependesse da intensidade da luz.

Esperava-se que luz de qualquer frequência fosse capaz de produzir o efeito.

Esperava-se que os elétrons levassem um longo tempo para atingir a energia necessária para vencer a barreira de potencial a partir de feixes de baixa intensidade.

O que é observado

V_0 depende apenas da frequência da luz e não da intensidade.

A intensidade da luz afeta a quantidade de elétrons emitidos e não sua energia.

Existe uma frequência de corte f_0 a partir da qual o efeito acontece.

Se $f < f_0$ nenhuma corrente é observada.

Os elétrons são emitidos instantaneamente após a incidência da radiação com $f \geq f_0$.

Como explicar esses efeitos teoricamente?

6. *Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.*

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwell'schen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten seiner ausserordentlich kleinen, jedoch unzähligen Atome vorstellen, so betrachten wir in der elektromagnetischen Theorie den Zustand eines Raumes durch die Verteilung der elektrischen und magnetischen Kräfte.

If we restrict ourselves to investigating the dependence of the entropy on the volume occupied by the radiation and denote the entropy of radiation by S_0 when the latter occupies the volume v_0 , we obtain

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta v} \lg \left[\frac{v}{v_0} \right] .$$

This equation shows that the entropy of a monochromatic radiation of sufficiently low density varies with the volume according to the same law as the entropy of an ideal gas or that of a dilute solution. The equation just found shall be interpreted in the following on the basis of the principle introduced into physics by Mr. Boltzmann, according to which the entropy of a system is a function of the probability of its state.

§8. *On the generation of cathode rays by illumination of solid bodies*

The usual conception, that the energy of light is continuously distributed over the space through which it travels, meets with especially great difficulties when one attempts to explain the photoelectric phenomena; these difficulties are presented in a pioneering work by Mr. Lenard.¹

According to the conception that the exciting light consists of energy quanta of energy $(R/N)\beta\nu$, the production of cathode rays by light can be conceived in the following way. The body's surface layer is penetrated by

Einstein utilizou a **hipótese de quantização** de Plank.

Um feixe de luz é constituído por pequenos pacotes de energia, chamados **fótons**.

A energia de cada fóton é

$$E = hf.$$

Com essa hipótese podemos explicar satisfatoriamente o que observamos no efeito fotoelétrico.

Um fóton que atinge uma superfície é absorvido por um elétron.

Ou o elétron ganha a energia total do fóton ou ele não absorve nenhuma energia.

Quando essa energia é maior que ϕ , o elétron pode escapar da superfície.

Energia cinética máxima

$$K_{\text{max}} = hf - \phi$$

Potencial de corte

$$eV_0 = hf - \phi$$

Espalhamento Compton

THE
PHYSICAL REVIEW

A QUANTUM THEORY OF THE SCATTERING OF X-RAYS
BY LIGHT ELEMENTS

BY ARTHUR H. COMPTON

ABSTRACT

A quantum theory of the scattering of X-rays and γ -rays by light elements.
—The hypothesis is suggested that when an X-ray quantum is scattered it spends all of its energy and momentum upon some particular electron. This electron in turn scatters the ray in some definite direction. The change in

Momento linear do fóton

De acordo com a teoria da relatividade, um fóton tem massa de repouso igual a zero.

De acordo com a teoria da relatividade, toda partícula que possui energia também possui momento linear, mesmo que sua massa seja zero.

Energia do fóton

$$E = hf$$

Relação entre momento e energia

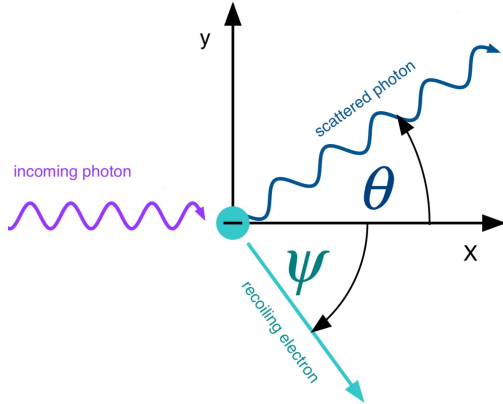
$$E^2 = (m_0 c^2)^2 + (pc)^2$$

Momento linear do fóton

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

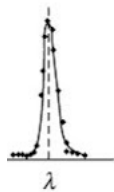
Espalhamento Compton

Quando os raios X colidem com a matéria uma parte da radiação é espalhada.

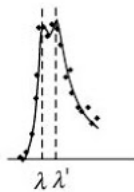


Uma parte da radiação espalhada possui frequência menor do que a radiação incidente e a diferença depende do ângulo de espalhamento.

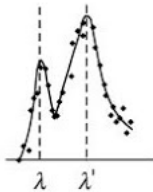
$\theta = 0^\circ$



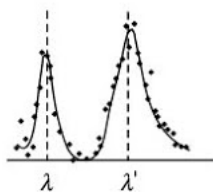
$\theta = 45^\circ$



$\theta = 90^\circ$



$\theta = 135^\circ$



Segundo a teoria eletromagnética clássica, a onda espalhada deveria ter sempre o mesmo comprimento de onda da luz incidente.

Esse efeito também só pode ser explicado com a hipótese da quantização da energia eletromagnética.

Hipótese da quantização

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

Podemos fazer uma analogia entre esse processo e a colisão de duas **partículas**: o fóton e o elétron.

O fóton incidente desaparece, fornecendo parte da sua energia e de seu momento linear para o elétron, que recua por causa do “impacto”.

A parte restante da energia e do momento fica com o novo fóton espalhado, que possui energia menor que o fóton incidente e portanto uma frequência menor.

Como em uma colisão de duas partículas, analisamos o problema usando a conservação da energia e do momento.

Espalhamento Compton

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos(\phi))$$