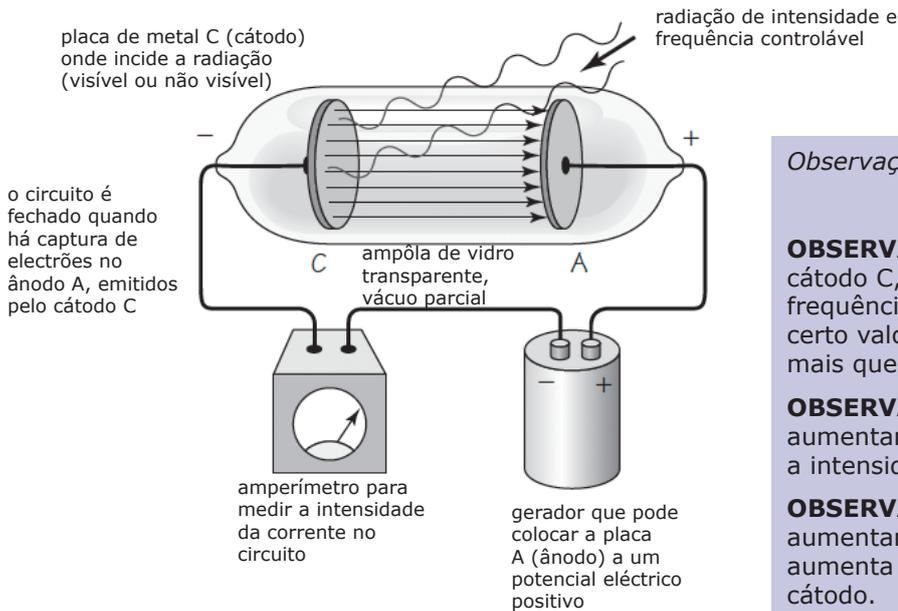


# Efeito fotoelétrico, os factos e a interpretação de Einstein



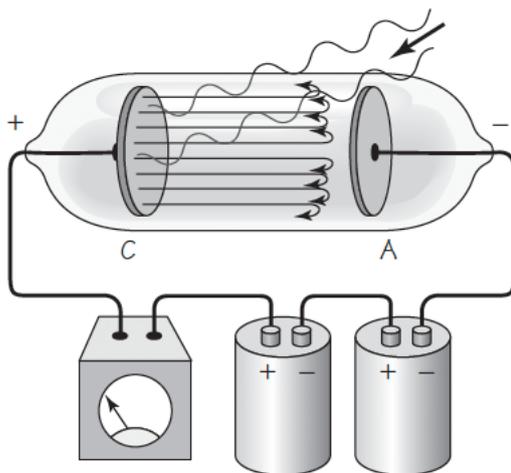
## Observações experimentais:

**OBSERVAÇÃO 1:** para cada tipo de metal no cátodo C, só se observa corrente quando a frequência da radiação é igual ou superior a um certo valor mínimo, característico do metal, por mais que se aumente a intensidade da radiação.

**OBSERVAÇÃO 2:** quando há corrente, aumentando a intensidade da radiação aumenta a intensidade da corrente eléctrica.

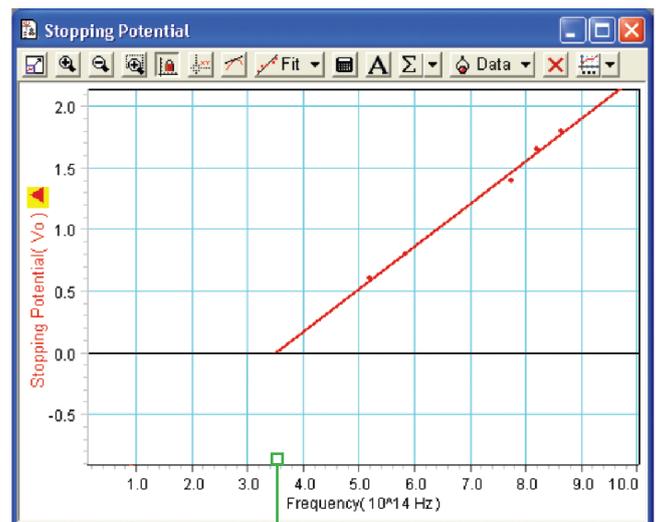
**OBSERVAÇÃO 3:** quando há corrente, aumentando a intensidade da radiação não aumenta a energia dos electrões emitidos pelo cátodo.

**OBSERVAÇÃO 4:** quando há corrente, aumentando a frequência da radiação aumenta a energia máxima dos electrões emitidos pelo cátodo.



A energia máxima dos electrões emitidos pelo metal onde incide a radiação pode ser medida aplicando um potencial eléctrico negativo na placa A, repelindo o fluxo de electrões e anulando a corrente eléctrica.

Resultados experimentais típicos, para um certo metal (potencial eléctrico necessário para anular a corrente eléctrica, aplicado na placa A, em função da frequência da radiação que incide no metal):



para valores inferiores a esta frequência não há corrente eléctrica



Sistema de detecção de aproximação baseado no efeito fotoelétrico. Inclui um emissor de luz, uma célula fotoelétrica e um circuito electrónico.  
<http://www.taleng.com>

O potencial eléctrico necessário para interromper a corrente no circuito aumenta proporcionalmente à frequência da radiação que incide no metal, a partir de um certo valor mínimo, a chamada "frequência de corte", representada por  $f_0$ .

There is no explanation clearer or more direct than Einstein's. A quote from his first paper (1905) on this subject is given here. Only the notation is changed, in order to agree with modern practice (including the notation used in this text):

. . . According to the idea that the incident light consists of quanta with energy  $hf$ , the ejection of cathode rays [photoelectrons] by light can be understood in the following way. Energy quanta penetrate the surface layer of the body, and their energy is converted, at least in part, into kinetic energy of electrons. The simplest picture is that a light quantum gives up all its energy to a single electron; we shall assume that this happens. . . . An electron provided with kinetic energy inside the body may have lost part of its kinetic energy by the time it reaches the surface. In addition, it is to be assumed that each electron, in leaving the body, has to do an amount of work  $W$  (which is characteristic of the body). The electrons ejected directly from the surface and at right angles to it will have the greatest velocities perpendicular to the surface. The maximum kinetic energy of such an electron is

$$KE_{\max} = hf - W.$$

If the plate C is charged to a positive potential,  $V_{\text{stop}}$ , just large enough to keep the body from losing electric charge, we must have

$$KE_{\max} = hf - W = eV_{\text{stop}},$$

where  $e$  is the magnitude of the electronic charge. . . .

If the derived formula is correct, then  $V_{\text{stop}}$ , when plotted as a function of the frequency of the incident light, should yield a straight line whose slope should be independent of the nature of the substance illuminated.

The first equation in the above quotation is usually called *Einstein's photoelectric equation*.

A interpretação de Einstein...

- (1) A luz é constituída por partículas (fotões)
- (2) Um fotão de frequência  $f$  tem uma energia dada por  $E = hf$ , onde  $h$  é a chamada constante de Planck (constante de Planck =  $6,6 \times 10^{-34}$  J s)
- (3) Um electrão do metal é emitido quando é atingido por um fotão com energia suficiente, no mínimo  $W$ , para o arrancar do metal
- (4) O valor máximo da energia dos electrões emitidos é a diferença entre a energia do fotão que arrancou o electrão e a energia mínima  $W$  que é necessária para arrancar o electrão
- (5) Para parar a corrente de electrões devida ao efeito fotoeléctrico é necessário aplicar um potencial eléctrico positivo,  $V_{\text{stop}}$

A teoria de Einstein (publicada em 1905) foi objecto de enorme controvérsia durante cerca de 10 anos, até um grupo de físicos experimentais ter verificado a validade da equação, através de medidas rigorosas.

#### Observações experimentais:

**OBSERVAÇÃO 1:** para cada tipo de metal no cátodo C, só se observa corrente quando a frequência da radiação é igual ou superior a um certo valor mínimo, característico do metal, por mais que se aumente a intensidade da radiação.

**OBSERVAÇÃO 2:** quando há corrente, aumentando a intensidade da radiação aumenta a intensidade da corrente eléctrica.

**OBSERVAÇÃO 3:** quando há corrente, aumentando a intensidade da radiação não aumenta a energia dos electrões emitidos pelo cátodo.

**OBSERVAÇÃO 4:** quando há corrente, aumentando a frequência da radiação aumenta a energia máxima dos electrões emitidos pelo cátodo.

#### Teoria de Einstein:

**AFIRMAÇÃO 1:** a radiação é constituída por fotões, tendo cada fotão um valor de energia proporcional à frequência da radiação,  $E = hf$ .

**AFIRMAÇÃO 2:** um electrão é arrancado por um fotão, quando este colide com o electrão.

**AFIRMAÇÃO 3:** para que um fotão arranque um electrão de um átomo é que necessário que o fotão tenha energia igual ou superior à energia de ligação do electrão no átomo.

**AFIRMAÇÃO 4:** aumentando a intensidade da radiação, aumenta o número de fotões, mas não aumenta a energia de cada fotão.

**AFIRMAÇÃO 5:** aumentando a frequência da radiação, aumenta a energia de cada fotão incidente.

**AFIRMAÇÃO 6:** a energia de um electrão emitido é a diferença entre a energia do fotão que nele incidiu e a energia mínima que é necessária para o remover do átomo.

1. Qual é a importância da teoria de Einstein acerca do efeito fotoeléctrico?
2. Esboça esquemas/desenhos que ajudem a explicar cada uma das observações, de acordo com a teoria de Einstein.
3. Que afirmações da teoria de Einstein interpretam cada uma das observações experimentais?
4. Qual é a frequência de corte  $f_0$  no caso do metal do gráfico da página anterior? Qual é o significado desse valor?
5. Verifica que o valor de energia mínimo de um fotão para arrancar um electrão é  $W = hf_0 = 2,3 \times 10^{-19}$  J.
6. Conhecendo o valor da carga do electrão ( $e = 1,6 \times 10^{-19}$  C) e tendo em conta a equação de Einstein, é possível determinar o valor da constante de Planck,  $h$ , a partir dos dados do gráfico. Verifica que o valor obtido é  $h = 1,8 \times 10^{-33}$  J s e calcula o respectivo erro percentual.

## Respostas

1. Foi decisiva para a aceitação das teorias quânticas, isto é, das teorias que afirmam que quer a luz quer a matéria são constituídas por partículas que obedecem a regras de descontinuidade, apesar de quer a luz quer a matéria parecerem contínuas.
2. Ver página seguinte.
3. Ver ao lado.
4.  $f_0 = 3,5 \times 10^{14}$  Hz

Este valor é a frequência mínima que a radiação deve ter para haver emissão de electrões para aquele metal.

5. Utilizando os valores de  $h$  e da frequência de corte  $f_0$ , vem:

$$\begin{aligned}W &= 6,6 \times 10^{-34} \text{ J s} \times 3,5 \times 10^{14} \text{ Hz} \\ &= 6,6 \times 3,5 \times 10^{-34} \times 10^{14} \text{ J} \\ &= 23,1 \times 10^{-19} \text{ J} \\ &= \frac{23,1}{10} \times 10 \times 10^{-19} \text{ J} \\ &= 2,31 \times 10^{-18} \text{ J}\end{aligned}$$

6. A equação de Einstein pode ser escrita do seguinte modo:

$$E_{c, \max} = h f - h f_0$$

Tendo em conta a informação no texto de Einstein, vem:

$$e V = h f - h f_0$$

Resolvendo em ordem a  $h$ , obtém-se:

$$\begin{aligned}e V &= h(f - f_0) \\ h &= \frac{e V}{f - f_0}\end{aligned}$$

Tendo em conta os dados do gráfico, para  $f = 9,4 \times 10^{14}$  Hz vem  $V = 2,0$  V.

Utilizando estes valores, obtém-se:

$$\begin{aligned}h &= \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 2,0}{9,4 \times 10^{14} - 3,5 \times 10^{14}} \\ &= \frac{3,2 \times 10^{-19}}{5,9 \times 10^{14}} \\ &= \frac{3,2}{5,9} \times 10^{-19-14} \\ &= 0,54 \times 10^{-33} \\ &= 0,54 \times 10 \times \frac{10^{-33}}{10} \\ &= 5,4 \times 10^{-34} \text{ J s}\end{aligned}$$

O erro percentual desta determinação de  $h$  vale:

$$\begin{aligned}\text{erro percentual} &= \left| \frac{\text{valor aceite} - \text{valor aproximado}}{\text{valor aceite}} \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{6,6 \times 10^{-34} - 5,4 \times 10^{-34}}{6,6 \times 10^{-34}} \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{1,2 \times 10^{-34}}{6,6 \times 10^{-34}} \right| \times 100 \\ &= \frac{1,2}{6,6} \times 100 \\ &= 19 \%\end{aligned}$$

## Observações experimentais:

**OBSERVAÇÃO 1:** para cada tipo de metal no cátodo C, só se observa corrente quando a frequência da radiação é igual ou superior a um certo valor mínimo, característico do metal, por mais que se aumente a intensidade da radiação.

Afirmações 2 e 3.

**OBSERVAÇÃO 2:** quando há corrente, aumentando a intensidade da radiação aumenta a intensidade da corrente eléctrica.

Afirmação 4.

**OBSERVAÇÃO 3:** quando há corrente, aumentando a intensidade da radiação não aumenta a energia dos electrões emitidos pelo cátodo.

Afirmação 4.

**OBSERVAÇÃO 4:** quando há corrente, aumentando a frequência da radiação aumenta a energia máxima dos electrões emitidos pelo cátodo.

Afirmações 5 e 6.

## Teoria de Einstein:

**AFIRMAÇÃO 1:** a radiação é constituída por fotões, tendo cada fotão um valor de energia proporcional à frequência da radiação,  $E = h f$ .

**AFIRMAÇÃO 2:** um electrão é arrancado por um fotão, quando este colide com o electrão.

**AFIRMAÇÃO 3:** para que um fotão arranque um electrão de um átomo é que necessário que o fotão tenha energia igual ou superior à energia de ligação do electrão no átomo.

**AFIRMAÇÃO 4:** aumentando a intensidade da radiação, aumenta o número de fotões, mas não aumenta a energia de cada fotão.

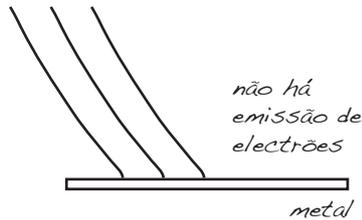
**AFIRMAÇÃO 5:** aumentando a frequência da radiação, aumenta a energia de cada fotão incidente.

**AFIRMAÇÃO 6:** a energia de um electrão emitido é a diferença entre a energia do fotão que nele incidiu e a energia mínima que é necessária para o remover do átomo.

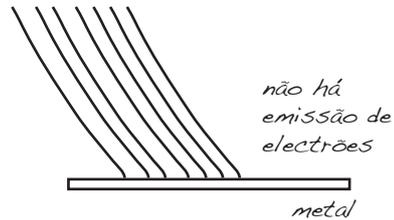
**OBSERVAÇÃO 1:** para cada tipo de metal no cátodo C, só se observa corrente quando a frequência da radiação é igual ou superior a um certo valor mínimo, característico do metal, por mais que se aumente a intensidade da radiação.

OBSERVAÇÃO 1

radiação de frequência inferior à frequência de corte...



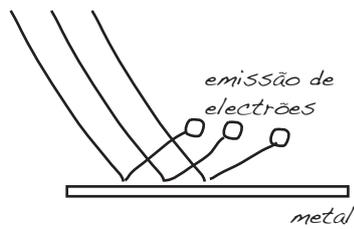
radiação de frequência inferior à frequência de corte... e muito mais intensa!



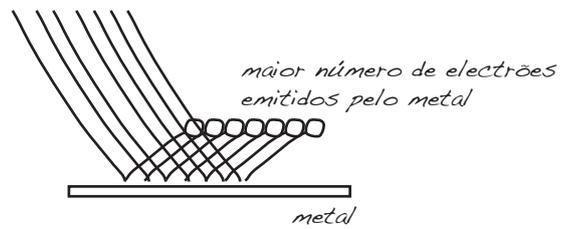
**OBSERVAÇÃO 2:** quando há corrente, aumentando a intensidade da radiação aumenta a intensidade da corrente eléctrica.

OBSERVAÇÃO 2

radiação de frequência superior à frequência de corte...



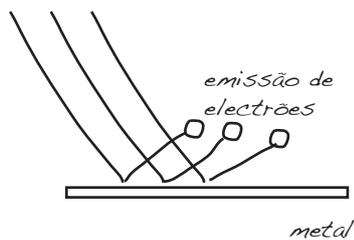
radiação de frequência superior à frequência de corte... e muito mais intensa!



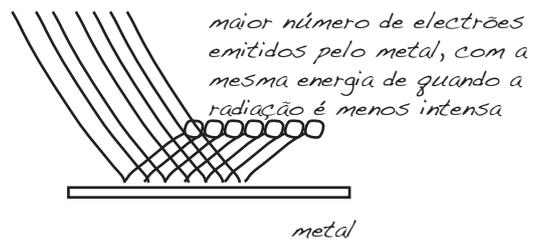
**OBSERVAÇÃO 3:** quando há corrente, aumentando a intensidade da radiação não aumenta a energia dos electrões emitidos pelo cátodo.

OBSERVAÇÃO 3

radiação de frequência superior (ou igual) à frequência de corte...



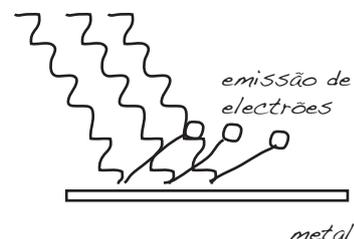
radiação de frequência superior (ou igual) à frequência de corte... e muito mais intensa!



**OBSERVAÇÃO 4:** quando há corrente, aumentando a frequência da radiação aumenta a energia máxima dos electrões emitidos pelo cátodo.

OBSERVAÇÃO 4

radiação de frequência superior (ou igual) à frequência de corte...



radiação de frequência de maior frequência...

