

Capítulo 38 – Fótons e Ondas de Matéria



O Homem de Monóxido de Carbono é um boneco feito de moléculas de monóxido de carbono. A figura, que pode ser considerada uma obra de arte, foi fabricada em laboratório posicionando moléculas, uma por uma, na superfície de uma placa de platina. Naturalmente, o boneco é pequeno demais para ser visto com um microscópio ótico.

Como é possível movimentar e fotografar moléculas isoladas?

38.2 O Fóton, o Quantum de Luz

Na **Física Quântica**, muitas grandezas físicas são encontradas apenas em múltiplos inteiros de uma quantidade elementar; quando uma grandeza apresenta essa propriedade, dizemos que é **quantizada**. A quantidade elementar associada à grandeza é chamada de **quantum** da grandeza (o plural de **quantum** é **quanta**).

Em 1905, Einstein propôs que a radiação eletromagnética (ou, simplesmente, a luz) era quantizada; a quantidade elementar de luz é hoje chamada de **fóton**.

Segundo Einstein, um quantum de luz de frequência f tem uma energia dada por

$$E = hf, \quad (\text{energia do fóton}) \quad (38.2)$$

onde h é a chamada **constante de Planck**, que tem o valor

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s.} \quad (38.3)$$

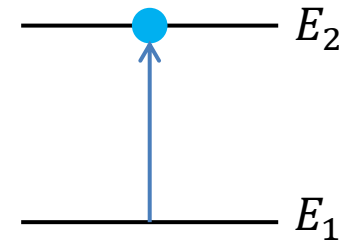
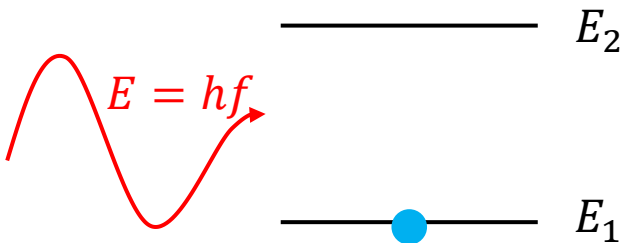
- A menor energia que uma onda luminosa de frequência f pode ter é hf , a energia de um único fóton. Se a onda possui uma energia maior, esta deve ser um múltiplo inteiro de hf . A luz não pode ter uma energia de $0,6hf$ ou $75,5hf$.

❖ Einstein propôs ainda que sempre que a luz é absorvida ou emitida por um corpo essa absorção ou emissão ocorre nos átomos do corpo.

Absorção de Energia por um Átomo

Estado inicial do átomo

Estado final do átomo

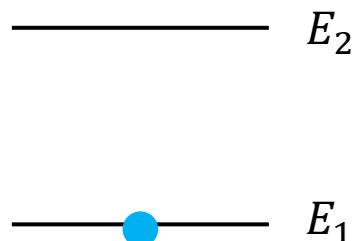
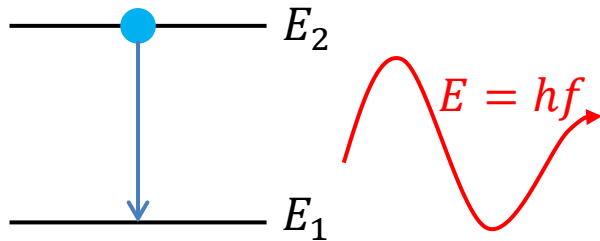


$$E_1 + hf = E_2$$

Emissão de Energia por um Átomo

Estado inicial do átomo

Estado final do átomo

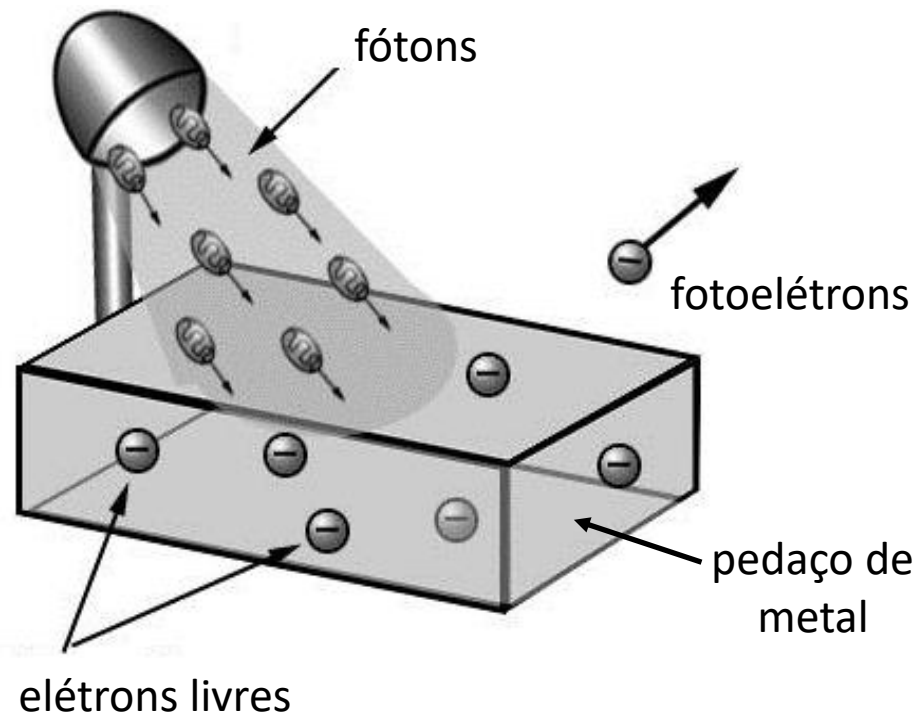


$$E_2 - hf = E_1$$

38.3 O Efeito Fotoelétrico

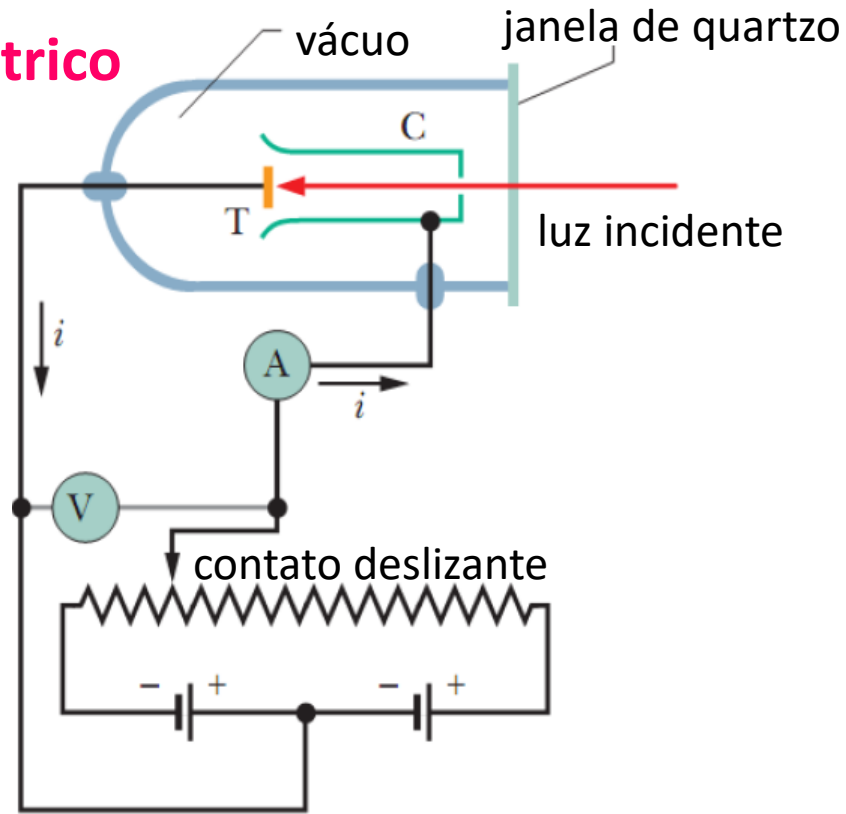
Quando iluminamos uma superfície metálica com um raio luminoso de comprimento de onda suficientemente pequeno, a luz faz com que elétrons sejam emitidos pelo metal. Esse fenômeno, que recebe o nome de **efeito fotoelétrico**, é essencial para o funcionamento de equipamentos como câmaras de TV e portas de elevadores modernos.

Einstein usou a ideia de fóton para explicar o **efeito fotoelétrico**, que simplesmente não pode ser compreendido à luz da física clássica.



Primeiro Experimento do Efeito Fotoelétrico

Montagem usada para estudar o efeito fotoelétrico. A luz de frequência f incide no alvo T, ejetando elétrons (chamados de **fotoelétrons**), que são recolhidos pelo coletor C. Os fotoelétrons ejetados produzem uma **corrente fotoelétrica** no circuito no sentido oposto ao sentido convencional da corrente i , indicado por setas na figura ao lado. As baterias e o resistor variável são usados para produzir e ajustar uma diferença de potencial entre T e C.

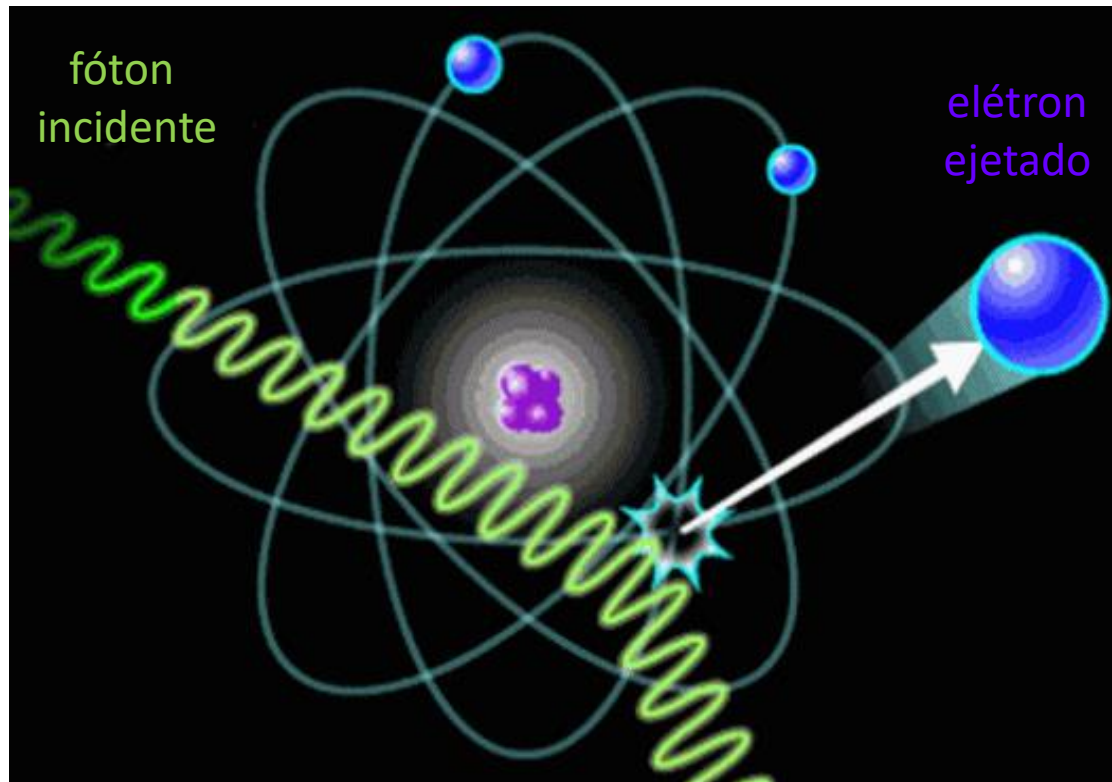


Ajustamos a diferença de potencial V , usando o contato deslizante da figura acima, para que o coletor C fique ligeiramente negativo em relação ao alvo T. A diferença de potencial reduz a velocidade dos elétrons ejetados. Em seguida, aumentamos o valor negativo de V até que o potencial atinja o valor de corte V_{corte} , chamado **potencial de corte**, para o qual a corrente medida pela amperímetro A é nula. Para $V = V_{corte}$ os elétrons de maior energia cinética ejetados pelo alvo são detidos pouco antes de chegar ao coletor. Assim, a energia cinética $K_{máx}$ desses elétrons é dada por

$$K_{máx} = eV_{corte} \quad (38.4)$$

↓
carga elementar

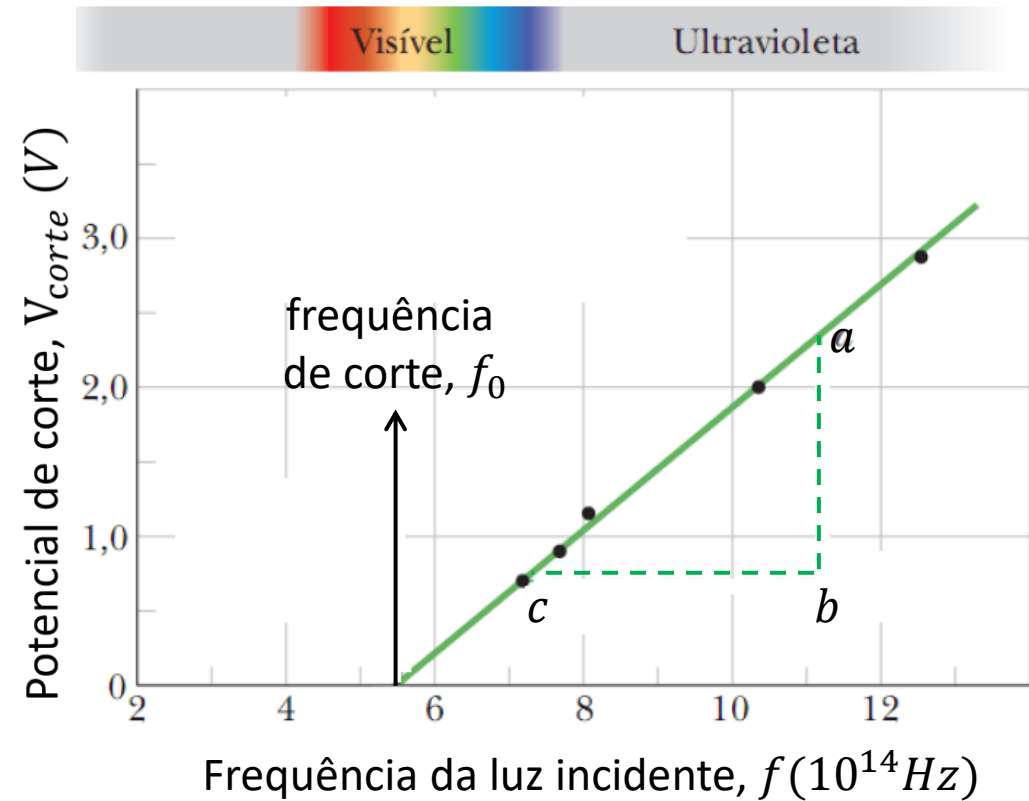
- Os experimentos mostram que para uma luz de uma dada frequência f , o valor de $K_{\text{máx}}$ não depende da intensidade I da luz incidente no alvo T. Esse resultado experimental não pode ser explicado pela física clássica.
- Por outro lado, se pensarmos em termos de fótons, o resultado experimental obtido é facilmente compreendido. Nesse caso, a energia que pode ser transferida da luz incidente para um elétron do alvo é a energia de um único fóton. Aumentando a intensidade I da luz incidente, aumentamos também o número de fótons que incidem no alvo, mas a energia de cada fóton, $E = hf$, permanece a mesma, já que a frequência da luz não variou. Assim, a energia máxima transferida para os elétrons também permanece a mesma.



Segundo Experimento do Efeito Fotoelétrico

O segundo experimento consistem em medir o potencial de corte V_{corte} para várias frequências f da luz incidente.

Observe na figura ao lado que o efeito fotoelétrico não é observado se a frequência da luz for menor que uma certa **frequência de corte** f_0 , ou seja, se o comprimento de onda for maior que um certo **comprimento de onda de corte**, $\lambda_0 = c/f_0$. O resultado não depende da intensidade da luz incidente.



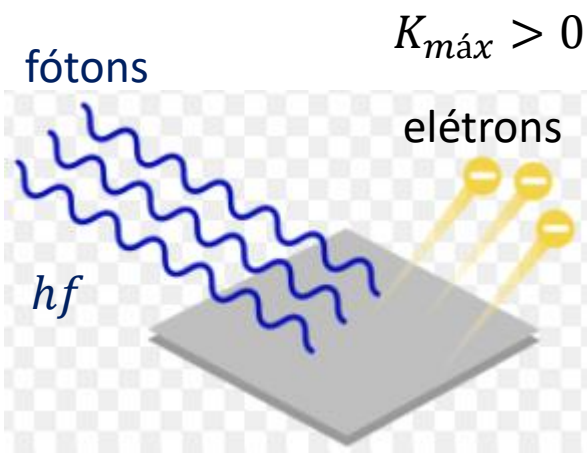
Este resultado constitui outro mistério para a física clássica. Se a luz se comportasse apenas como uma onda eletromagnética, ela teria energia suficiente para ejetar elétrons, qualquer que fosse a frequência, contanto que fosse suficientemente intensa. Entretanto, os experimentos mostram que quando a frequência da luz é menor que f_0 , elétrons não são ejetados, por mais intensa que seja a luz.

A existência de uma frequência de corte, por outro lado, é explicada naturalmente quando pensamos na luz em termos de fótons. Os elétrons são mantidos na superfície do alvo metálico por forças elétricas. Para escapar do alvo, um elétron necessita de uma certa energia mínima Φ (chamada **função trabalho**) que depende do material de que é feito o alvo.

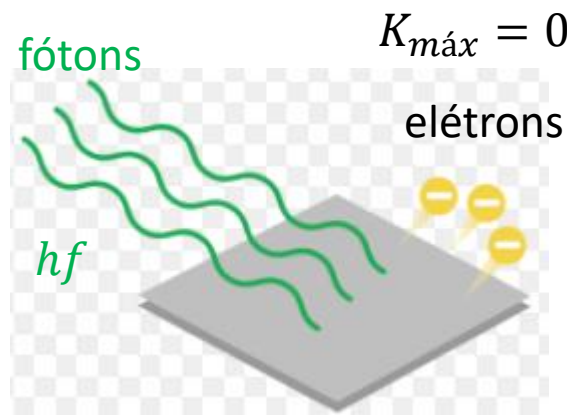
$\Phi \rightarrow$ **função trabalho** (depende do material)

$\left\{ \begin{array}{l} \Phi(\text{potássio}) = 2,2 \text{ eV} \\ \Phi(\text{lítio}) = 2,3 \text{ eV} \\ \Phi(\text{bário}) = 2,5 \text{ eV} \\ \Phi(\text{alumínio}) = 4,2 \text{ eV} \\ \Phi(\text{tungstênio}) = 4,5 \text{ eV} \end{array} \right.$

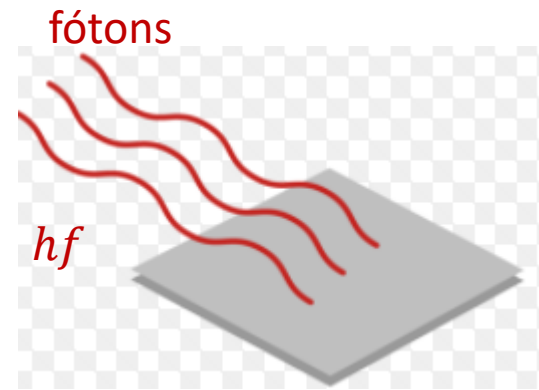
Se $hf > \Phi$



Se $hf = \Phi$



Se $hf < \Phi$



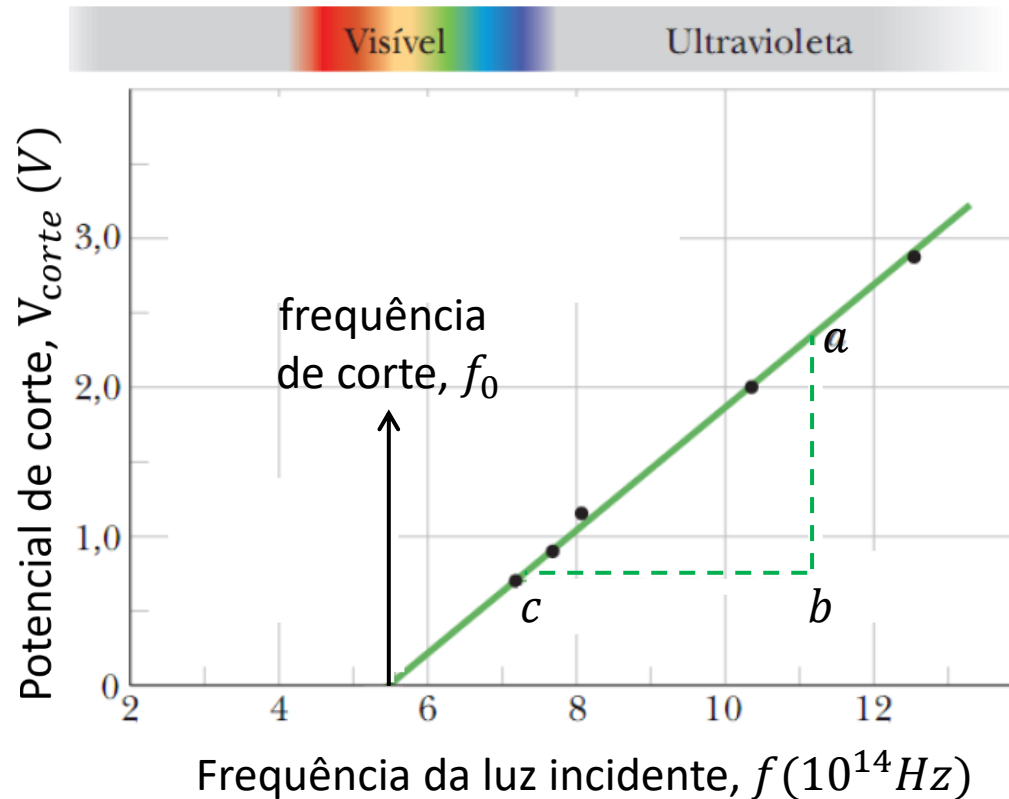
$$K_{\text{máx}} = eV_{\text{corte}} \quad (38.4)$$

A Equação do Efeito Fotoelétrico

Einstein resumiu os resultados dos experimentos do efeito fotoelétrico com a seguinte equação:

$$hf = K_{\text{máx}} + \Phi. \quad (\text{equação do efeito fotoelétrico}) \quad (38.5)$$

$$\Rightarrow hf = eV_{\text{corte}} + \Phi \Rightarrow V_{\text{corte}} = \left(\frac{h}{e}\right)f - \frac{\Phi}{e}. \quad (38.6)$$



Exercícios sugeridos das Seções 38.2 e 38.3: 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23 e 26.

23) (a) Se a função trabalho de um certo metal é $1,8 \text{ eV}$, qual é o potencial de corte dos elétrons ejetados quando um feixe de luz com comprimento de onda de 400 nm incide no metal? **(b)** Qual é a velocidade máxima dos elétrons ejetados?

Dicas: (a) $V_{\text{corte}} = \left(\frac{h}{e}\right)f - \frac{\Phi}{e}$ e $\lambda f = c$. (b) $K_{\text{máx}} = \frac{1}{2}mv_{\text{máx}}^2 = eV_{\text{corte}}$.

Respostas: (a) $V_{\text{corte}} = 1,3 \text{ V}$. (b) $v_{\text{máx}} = 6,8 \times 10^5 \text{ m/s}$.

