

Aula 21

Professor:

Mauricio Kischinhevsky

Estrutura da matéria (Parte 1)

Conteúdo:

A dualidade onda-partícula e a física quântica - Parte 1

Luz: naturezas ondulatória e corpuscular

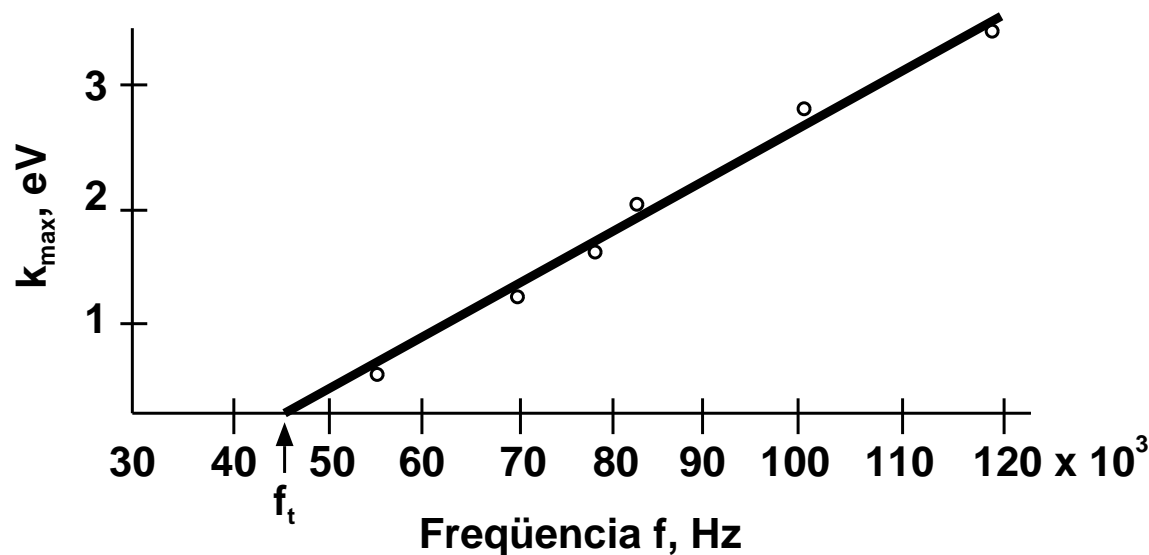
Histórico: Luz e a interpretação da reflexão e refração, teoria corpuscular e evidência experimental da natureza ondulatória.

Hooke e **Huygens** propuseram a teoria ondulatória e explicavam a reflexão e a refração. Refutação de **Newton** feita com base em **teoria corpuscular** só gerava uma inconsistência: a velocidade da luz no caso da refração. Segundo a teoria de Hooke e Huygens, a velocidade se propagaria mais devagar na água que no ar. A teoria corpuscular de Newton exigia o contrário. O atraso da teoria equivocada foi superado com o experimento de **Young (1801)**. **Fresnel** embasou a teoria ondulatória e fez vários experimentos de interferência e difração além de defender que a propagação retilínea decorria dos comprimentos de onda curtos da luz visível. A teoria eletromagnética chegou ao ápice com **Maxwell (1860)**.

Fótons e o efeito fotoelétrico

Em 1900, **Max Planck** observou que os resultados experimentais para estudos de emissão de radiação térmica de objetos sólidos, que ele analisava, eram consistentes com a proposição de que a energia era emitida e absorvida por um corpo negro em quanta de energia e determinou o valor da constante que multiplicaria a frequência ($h=6,6 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 4,1 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$, a constante de Planck) da radiação emitida/absorvida. Mas não estudou detalhadamente as implicações disto, considerando que era apenas um recurso exigido pelos cálculos. Em 1905, **Einstein** deu o salto de propor a quantização de energia da luz para explicar o efeito fotoelétrico.

A energia de cada fóton é $E=h.f=hc/\lambda$ (equação de Einstein). Observe que a derivada de E em relação a f é constante. Experimentalmente, se um metal tivesse luz incidindo sobre ele, elétrons poderiam ser retirados do material, acima de um limiar, característico do material metálico.



Exemplo:

Quais as energias dos fótons de luz de comprimentos de onda entre 400nm (violeta) e 700nm (vermelho)?

Resposta:

Basta obter $E = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm} / 400 \text{ nm} = 3,1 \text{ eV}$ (violeta) e $E = 1,8 \text{ eV}$ (vermelho).
Note que cada fóton de **raio X**, cujo comprimento de onda é cerca de 10^3 vezes menor, tem energia **~keV** e de raio gama, da ordem de **MeV**.

Exemplo:

A intensidade da luz solar na superfície da Terra é de aproximadamente **1400W/m^2** . Supondo que a energia média dos fótons é **2eV** , quantos fótons atingem uma área de **1cm^2** a cada segundo?

Resposta:

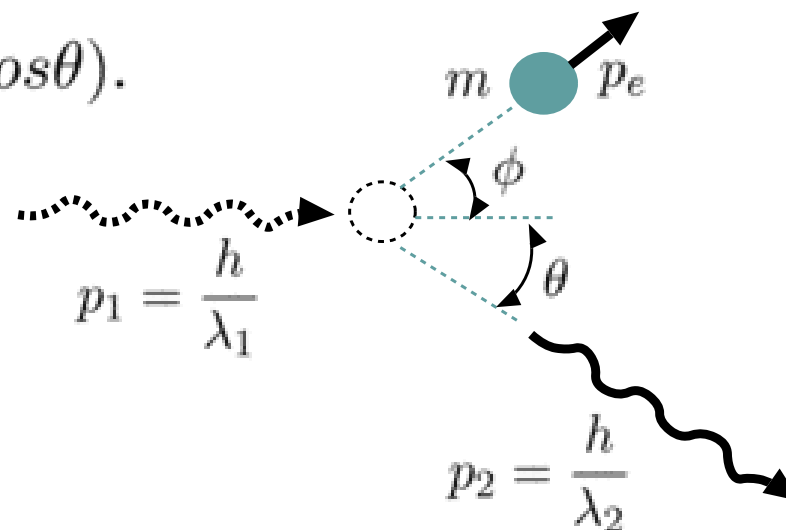
Pode-se obter a potência (energia por tempo) como **$P = I \cdot A = 0,14 \text{ W}$** . A energia corresponde à potência vezes o tempo de referência, ou seja, **$0,14 \text{ W} \cdot \text{s}$** . Assim, o número de fótons será essa energia dividida pela energia de um fóton em questão, ou seja,
 $0,14 \text{ W} \cdot \text{s} / 2,1 \text{ eV} = 0,14 / (2,1 \times 1,6 \times 10^{-19}) = 4,38 \times 10^{17}$ ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$).

Claramente não é simples perceber a quantização da energia.

O espalhamento Compton

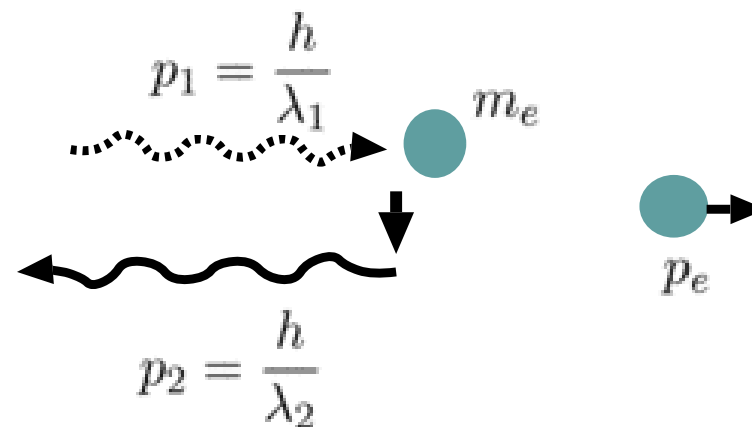
O conceito de fóton foi utilizado por Arthur Compton para explicar os resultados de suas medidas relativas a espalhamento de raios X por elétrons. Ele identificou o espalhamento da radiação eletromagnética por um elétron como uma colisão entre um fóton com momento h/λ_1 e um elétron estacionário. A seguir, o fóton espalhado é observado como portador de menos energia, ou seja, com comprimento de onda (λ_2) maior do que o incidente (figura a seguir). Aplicando as leis de conservação de momento e energia, obteve

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_e \cdot c}(1 - \cos\theta).$$



Exemplo:

Um fóton de raios X, com comprimento de onda 6pm , colide frontalmente com um elétron em repouso de forma que o elétron espalhado segue em sentido oposto ao do fóton resultante. Qual o novo comprimento de onda do fóton? Qual a energia cinética do recuo do elétron?



$$\lambda_2 = \lambda_1 + \frac{h}{m_e \cdot c}(1 - \cos\theta) = 6,0\text{pm} + 2 \times 2,43\text{pm} = 10,86\text{pm},$$

Ademais, pela conservação de energia,

$$K_e = \frac{h \cdot c}{\lambda_1} - \frac{h \cdot c}{\lambda_2} = (1,24\text{keV} \cdot \text{nm}) \times \left[\frac{1}{6,0 \times 10^{-3}\text{nm}} - \frac{1}{10,86 \times 10^{-3}\text{nm}} \right] =$$

$$93,0\text{keV}, \approx 1/5 \text{ da energia de repouso, } 511\text{keV}.$$

Matéria: natureza ondulatória

Histórico

A idéia, confirmada posteriormente, de que apenas fótons com energias específicas retirariam elétrons de suas órbitas eletrônicas levou Bohr a postular (1913) que a energia interna dos átomos é quantizada e os elétrons só podem ocupar certos níveis discretos de energia. Em 1924, de Broglie sugeriu que as partículas teriam características corpusculares e ondulatórias, assim como havia se confirmado para as ondas eletromagnéticas. Para o elétron, de Broglie sugeriu que seu comprimento de onda seria a razão entre h e o seu momento, p .

Exemplo:

Calcule os comprimentos de onda de de Broglie para

(a) uma partícula de poeira de $1\mu\text{g}$ que se move a 10^{-6} m/s ;

(b) uma bola de $0,17\text{kg}$ que se move a 100km/h . Note que o diâmetro de um núcleo atômico é $\sim 10^{-15} \text{ m}$.

Resposta:

$$(a) \quad \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,63 \times 10^{-34} J.s}{(10^{-9} kg)(10^{-6} m/s)} = 6,63 \times 10^{-19} m,$$

$$(b) \quad \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,63 \times 10^{-34} J.s}{(0,17 kg)(\frac{100 \times 1000 m}{3600 s})} = 1,4 \times 10^{-34} m,$$

Interferência e difração de elétrons

A comprovação veio por meio de um experimento conduzido em 1927 por **Davisson** e **Germer** em que a difração de elétrons por uma rede cristalina produzia máximos e mínimos nos ângulos que coincidiam com a previsão para certos comprimentos de onda, que eles constataram ser os mesmos previstos pela hipótese de **de Broglie**.

No mesmo ano, **Thomson** observou o mesmo efeito em outro tipo de arranjo cristalino.