

Aula 1: Mecânica Quântica

O. L. G. Peres¹

¹Instituto de Física Gleb Wataghin
UNICAMP

6 de março de 2017

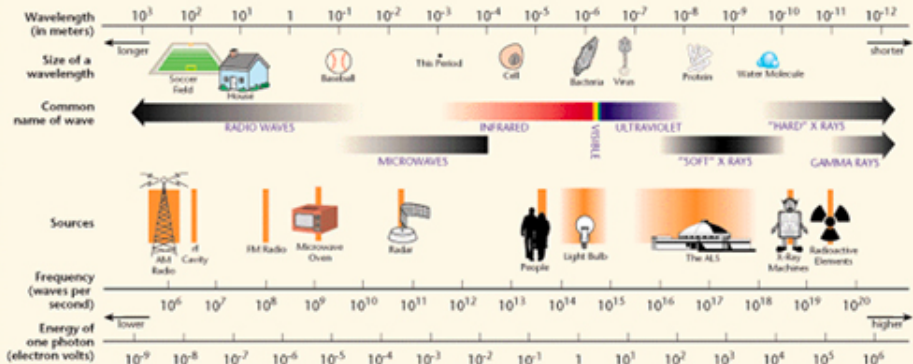


O curso de MQ tem o objetivo de estudar os fundamentos da MQ, com ênfase em sistemas unidimensionais, oscilador harmônico e a quantização do momento angular.

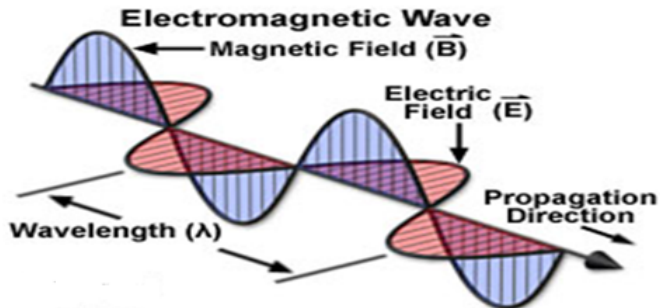
1901	Planck	Radiação Corpo Negro
1905	Einstein	Efeito Fotoelétrico
1911	Rutherford	Modelo Átomo
1913	Bohr	Teoria Quântica do Espectro
1922	Compton	Espalhamento fótons e elétrons
1925	De Broglie	Ondas da Matéria
1926	Schroendinger	Equação da Onda
1927	Heisenberg	Princípio da Incerteza
1927	Davidson e Germer	Propriedades ondulatórias de elétrons
1928	Dirac	Equação da onda relativística

Ondas eletromagnéticas

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



Ondas eletromagnéticas

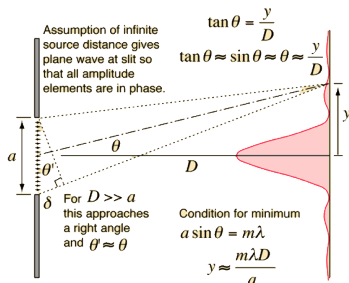
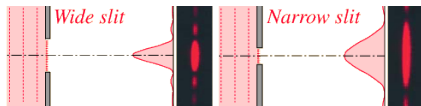
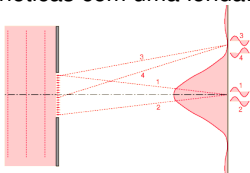


$$I \propto |E|^2 \text{ para uma onda, } I = \propto |E_1 + E_2|^2$$

Ondas eletromagnéticas

Ondas eletromagnéticas com uma fenda:

Uma fenda

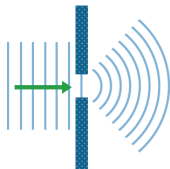


$$a \sin \theta = m\lambda$$

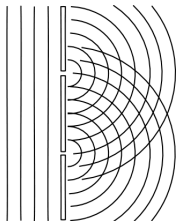
Ondas eletromagnéticas

Ondas eletromagnéticas com uma fenda:

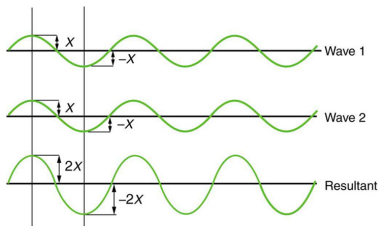
Uma fenda



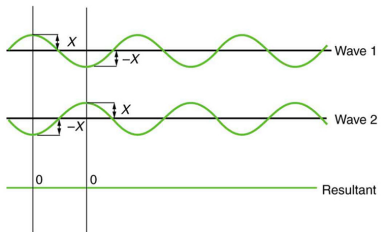
Duas fendas



Ondas eletromagnéticas

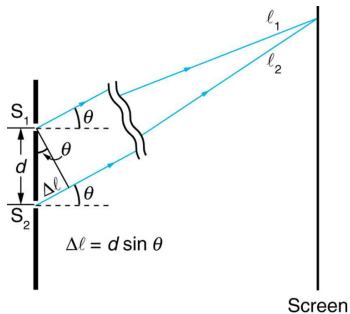
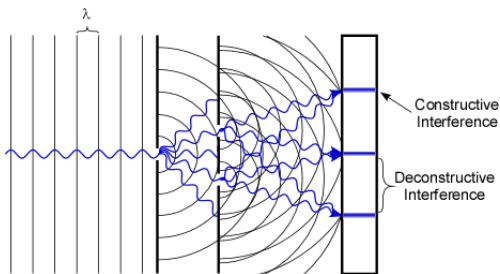


(a)



(b)

Ondas eletromagnéticas



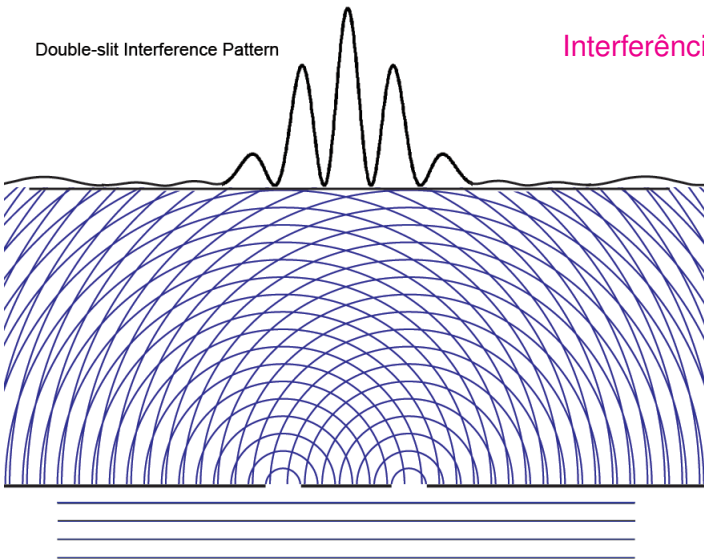
Interferência construtiva $\Delta l = n\lambda$

Interferência destrutiva $\Delta l = n\lambda/2$

Ondas eletromagnéticas

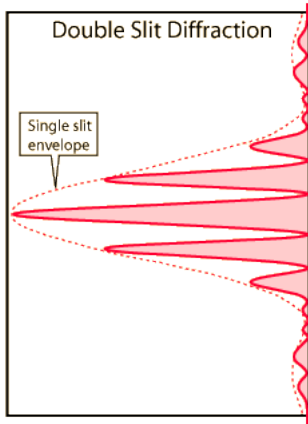
Double-slit Interference Pattern

Interferência!!



Ondas eletromagnéticas

Incident
plane
wave



Ondas eletromagnéticas

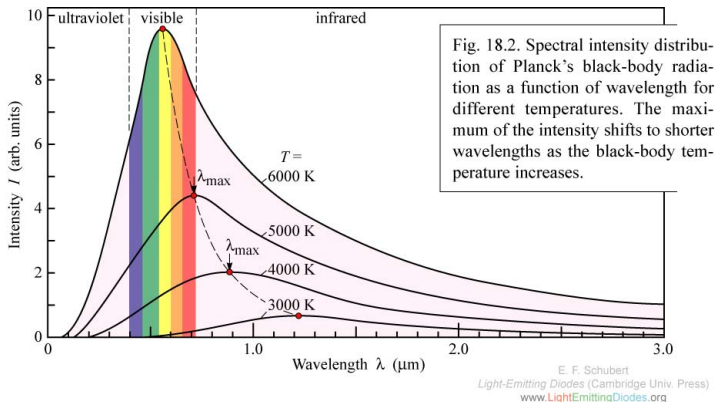
Primeira conclusão:

Ondas eletromagnéticas: difração e interferência

Radiação de corpo negro

Corpos quentes emitem radiação

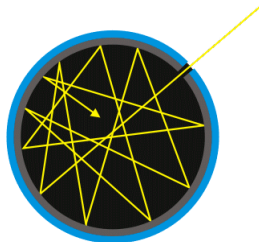
Corpo negro: objeto que absorve toda a radiação



Radiação de corpo negro

$$R(T) = \int_0^{\infty} R(T, \lambda) d\lambda$$

Onda eletromagnética estacionária: cálculo clássico

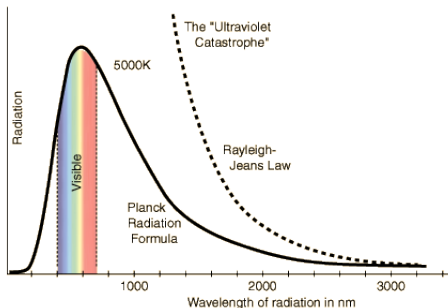


Conceptual Black Body

Radiação de corpo negro

$$R(T) = \int_0^{\infty} R(T, \lambda) d\lambda$$

Cálculo de Rayleigh: radiação infinita.



Radiação de corpo negro

Modelo de Planck: energia eletromagnética é quantizada

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}: h \text{ constante de Planck}$$

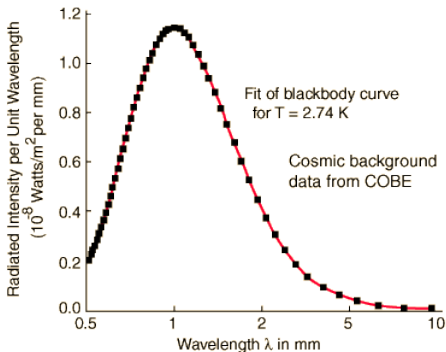
Previsão lei de Wien: $\lambda_{\max} T = \text{constante}$.

Radiação de corpo negro

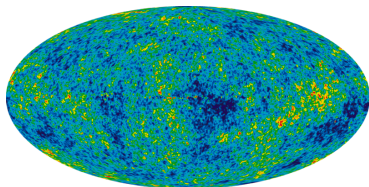
Modelo de Planck: energia eletromagnética é quantizada

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}: h \text{ constante de Planck}$$

Previsão lei de Wien: $\lambda_{\max} T = \text{constante}$.



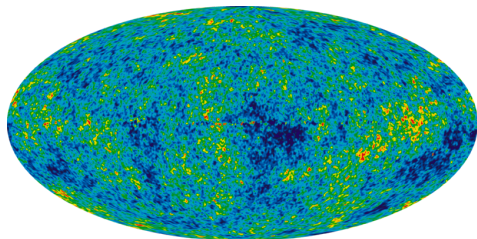
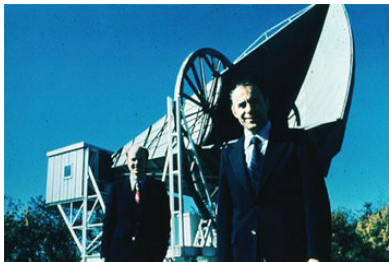
$$T_{\text{CMB}} = 3\text{K}, T_{\text{sol}} = 6000\text{K}$$



Radiação de corpo negro

Penzias e Wilson 1964

$T_{\text{CMB}} = 3\text{K}$: microondas



Radiação cósmica de fundo

Radiação de corpo negro

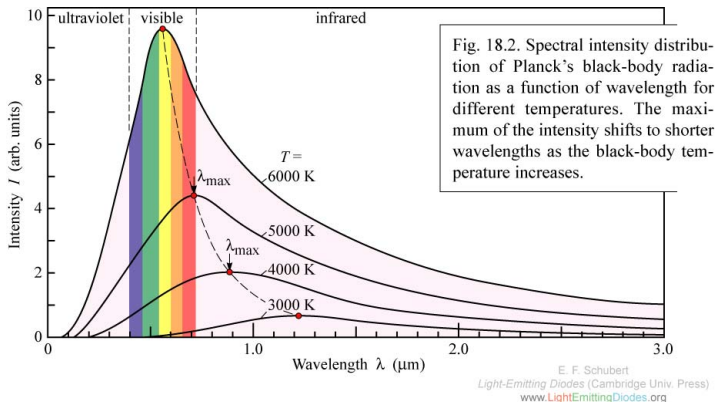
Segunda conclusão:

Ondas eletromagnéticas: energia quantizada

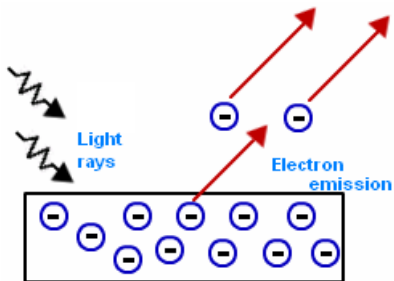
Efeito fotoelétrico e Einstein

Corpos quentes emitem radiação

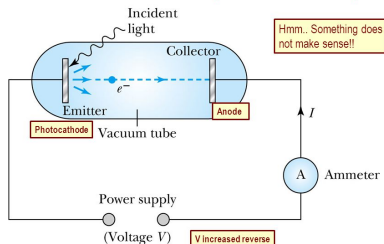
Corpo negro: objeto que absorve toda a radiação



Efeito fotoelétrico e Einstein



Photoelectric Effect Experimental Setup



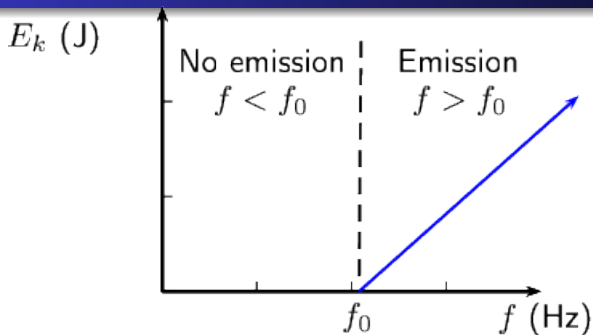
Wednesday, Sept. 19, 2012



PHYS 3313-001, Fall 2012
Dr. Jaehoon Yu

5

Efeito fotoelétrico e Einstein



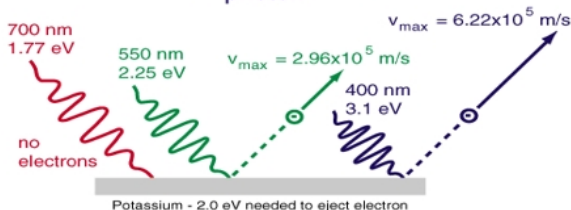
Não importa a intensidade da luz se a frequência é baixa não haverá emissão

Efeito fotoelétrico e Einstein

Einstein propôs que a luz fosse composta de partículas chamadas fótons

$$\text{Energia } E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}; E_e = h\nu - W$$

$$E_{\text{photon}} = h\nu$$



Photoelectric effect

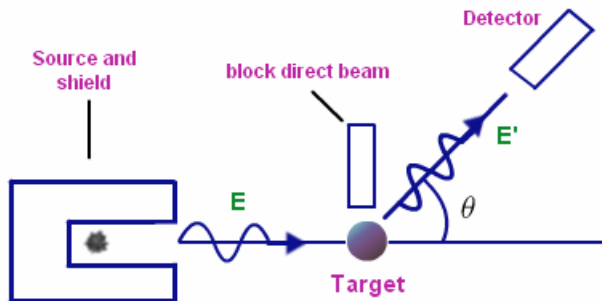
Efeito fotoelétrico e Einstein

Terceira conclusão:

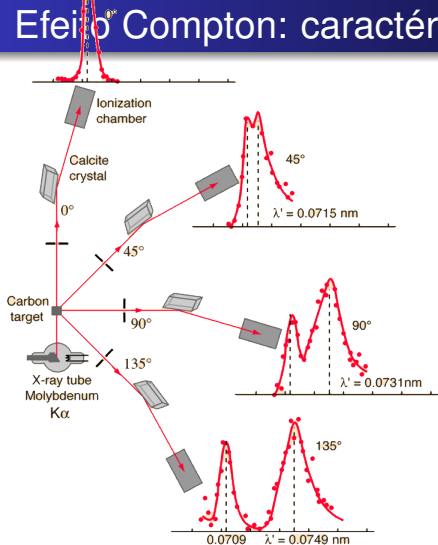
Ondas eletromagnéticas podem ser descritas por partículas chamadas fótons

Efeito Compton: carácter corpuscular

Compton fez um experimento em 1923: caracter corpuscular da luz



Efeito Compton: carácter corpuscular

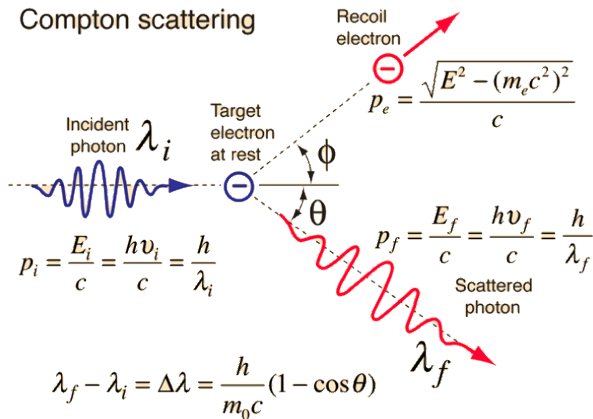


Mudança no comprimento de onda:

$$\lambda_{\text{final}} > \lambda_{\text{inicial}} \rightarrow E_{\text{final}} < E_{\text{inicial}}$$

Efeito Compton: carácter corpuscular

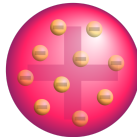
Compton scattering



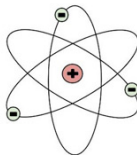
$$\lambda_{\text{Compton}} = \frac{h}{mc}$$

Modelos do átomo

Thomson: Modelo de Pudim

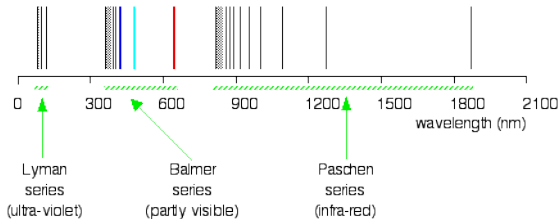


Rutherford: Sistema solar



Rutherford Model of the Atom

Espectro atômico e o modelo de Bohr



$$\text{Rydberg: } \tilde{\nu} \equiv \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

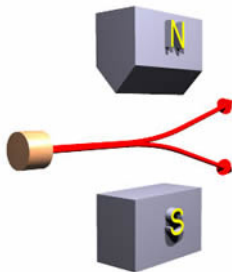
Modelo de Bohr

- Modelo de Rutherford, elétrons : interação eletromagnética
- Órbitas discretas: **energias discretas**
- Radiação emitida/absorvida: $h\nu = E_b - E_a$

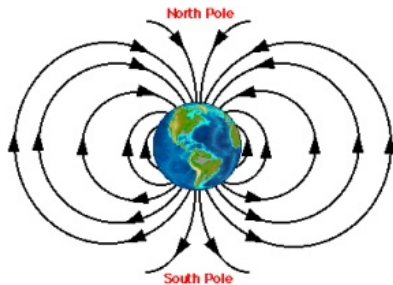
- Momentum angular quantizado $L = n\hbar = \frac{h}{2\pi}$

Experimento de Stern-Gerlach

Átomo de prata por um campo magnético

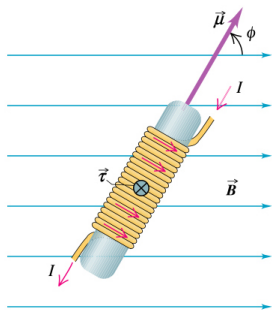
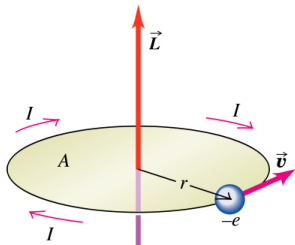


Campo magnético terrestre



Experimento de Stern-Gerlach

Modelo de dipolo magnético: μ



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

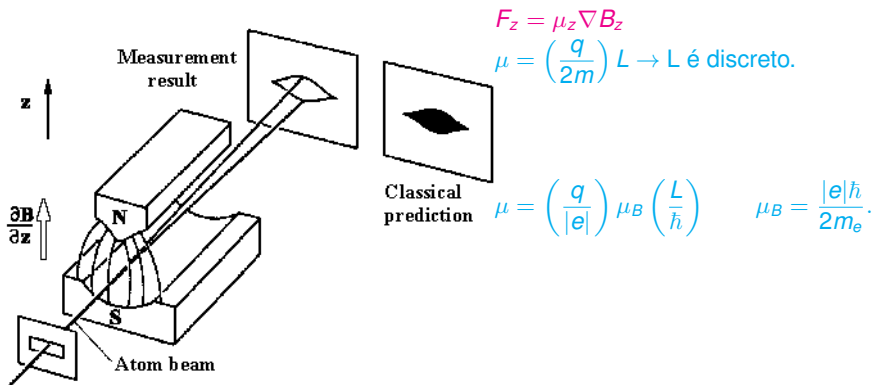
$$B = \frac{\mu}{r^2};$$

$$\mu = IA = I(\pi r^2) = \left(\frac{q}{T}\right) (\pi r^2) : v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$\mu = \frac{qrv}{2} = \left(\frac{q}{2m}\right) L$$

$$\vec{F} = \nabla(\vec{\mu} \cdot \vec{B}) \rightarrow F_z = \mu_z \nabla B_z$$

Experimento de Stern-Gerlach



Spoiler alert: Número de níveis discretos não pode ser explicado por este modelo

Experimento de Stern-Gerlach

Conclusões:

Ondas eletromagnéticas: **difração e interferência**

Ondas eletromagnéticas: **energia quantizada**

Ondas eletromagnéticas podem ser descritas por **partículas chamadas fótons**

Quantização de energia e momento angular de elétrons são necessárias.

Hipótese de De Broglie (1922)

Partículas materiais \rightarrow propriedades ondulatórias

Ondas eletromagnéticas: $E=c p$

$$E = h\nu \quad p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Partículas: $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ (Equação de Einstein)

Hipótese de de Broglie: ν e λ

$$\nu = \frac{E}{h} \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

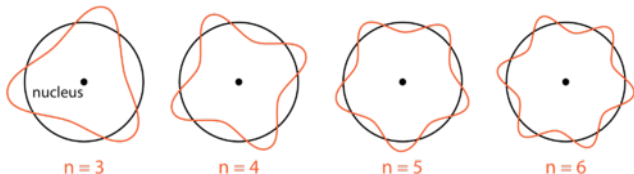
λ comprimento de De Broglie

Hipótese de De Broglie (1922)

Razões para a hipótese de de Broglie:

- Órbitas estacionárias de Bohr: $2\pi r = n\lambda$ e de hipótese de Broglie : $\lambda = \frac{h}{p}$.

$$\frac{r}{\lambda} = \frac{rp}{h} = \frac{L}{h} = \frac{n}{2\pi} \rightarrow L = n\hbar \text{ Condição de Bohr.}$$

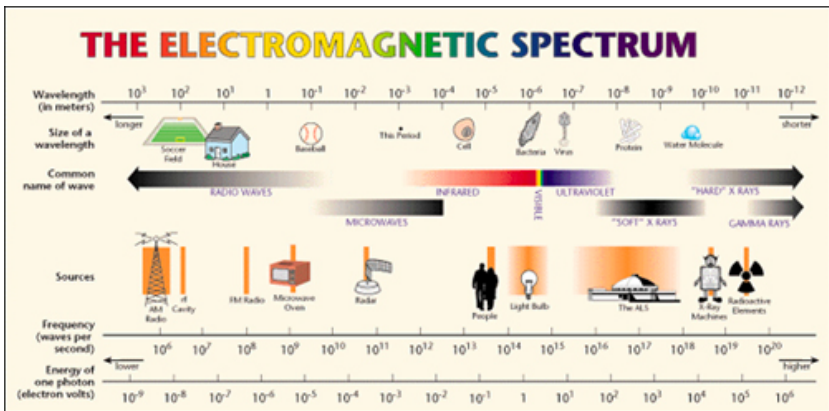


- Relatividade: Fase de uma onda: $kx - \omega t = \frac{2\pi}{\lambda}x - 2\pi\nu t \propto px - Et$

Hipótese de De Broglie (1922)

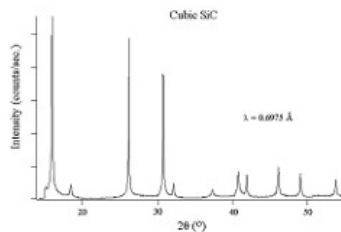
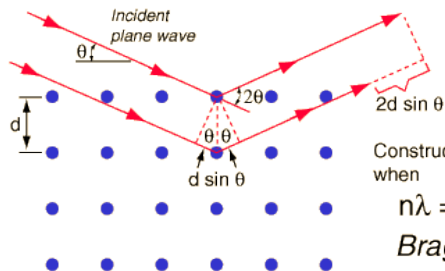
Bola de baseball: $m=0.15 \text{ kg}$ e $v=40 \text{ m/s}$: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = 1.1 \times 10^{-34} \text{ m}$

Elétron acelerado $\frac{mv^2}{2} = eV$, $\lambda = \frac{12.3 \text{ \AA}}{(V/(\text{Volt}))^{1/2}}$



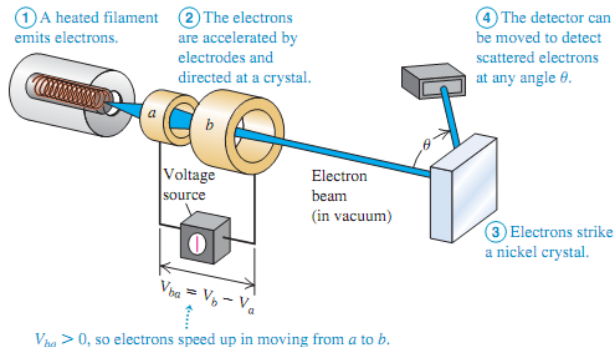
Experimento de Davisson e Germer

Lei de Bragg



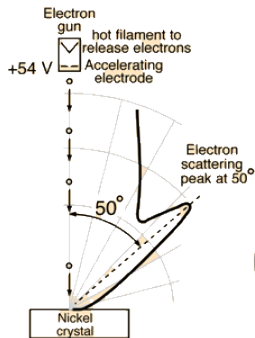
Experimento de Davisson e Germer

Experimento de Davisson e Germer



Experimento de Davisson e Germer

Experimento de Davisson e Germer



Theory

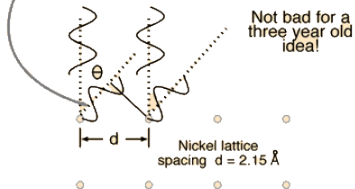
$$\lambda = \frac{h}{mv} = 1.67 \text{ \AA} \text{ for } 54 \text{ V}$$

Experiment

Pathlength difference

$$d \sin \theta = 2.15 \sin 50^\circ = \lambda = 1.65 \text{ \AA}$$

for constructive interference



1924
de Broglie's
hypothesis

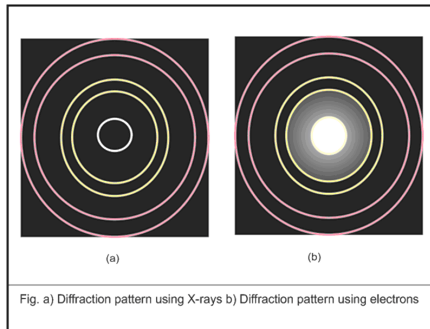
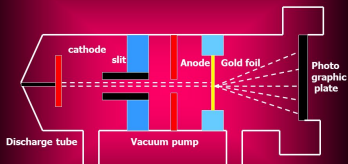
1927
Davisson-
Germer
experiment

1929
Nobel Prize
for
de Broglie

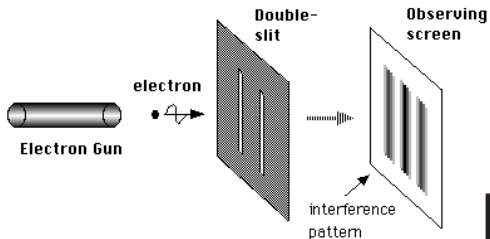
Experimento de Thomson: ondas eletrônicas

Elétrons difratam como raios X

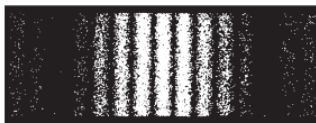
G.P THOMSON EXPERIMENT:



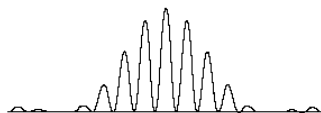
Experimento de Jonsso (1961): duas fendas



Resultado do experimento de Jonsso



$$\lambda = \frac{12.3 \text{ \AA}}{(V/(\text{Volt})^{1/2})}$$

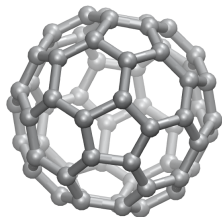


Predicted pattern

Elétrons tem interferência construtiva e destrutiva

Experimento de duas fendas com fullerenos (1999)

Fullereno: C_{60} : $m_{\text{fullereno}} = 10^6 m_e$ $V=220\text{m/s}$ $\lambda = 2.5 \times 10^{-12}\text{m}$



Experiência com fullerenos

O que sabemos até agora?

Conclusões:

Ondas eletromagnéticas: **difração e interferência**

Ondas eletromagnéticas: **energia quantizada**

Ondas eletromagnéticas podem ser descritas por **partículas chamadas fótons**

Quantização de energia e momento angular de elétrons são necessárias.

Elétrons **tem interferência e difração**

Dualidade partícula onda

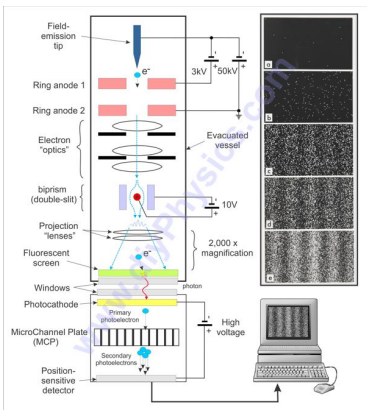
Experimentos que mostraram efeitos de interferência, especialmente com elétrons.

O que está interferindo?

- diferentes elétrons interferem quando passam pelas duas fendas
- elétrons ora passam por uma fenda ou outra fenda e interferem
- elétron interfere consigo mesmo

Dualidade partícula onda

Se fizéssemos o experimento com muitos poucos elétrons o que aconteceria?



Tomomura 1989

/Desktop/doubleslite-n.wmv

Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli and Giulio Pozzi in Bologna in 1974

Dualidade partícula onda

Então não é a interferência de um elétron com outro elétron.

A interferência é uma **propriedade intrínseca do elétron**.

Interpretação da função de onda

Born propôs que o elétron é descrito por uma função de onda $\psi(\vec{r}, t)$

A função de onda tem toda a informação do sistema

$$P(\vec{r}, t)d\vec{r} = |\psi(\vec{r}, t)|^2$$

- Princípio da superposição