

Universidade de São Paulo

Instituto de Física

Física Aplicada
Aula 13

Profa. Márcia de Almeida Rizzutto

Edifício Oscar Sala – sala 220

rizzutto@if.usp.br

<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=24279>

2º Semestre de 2016

Programa

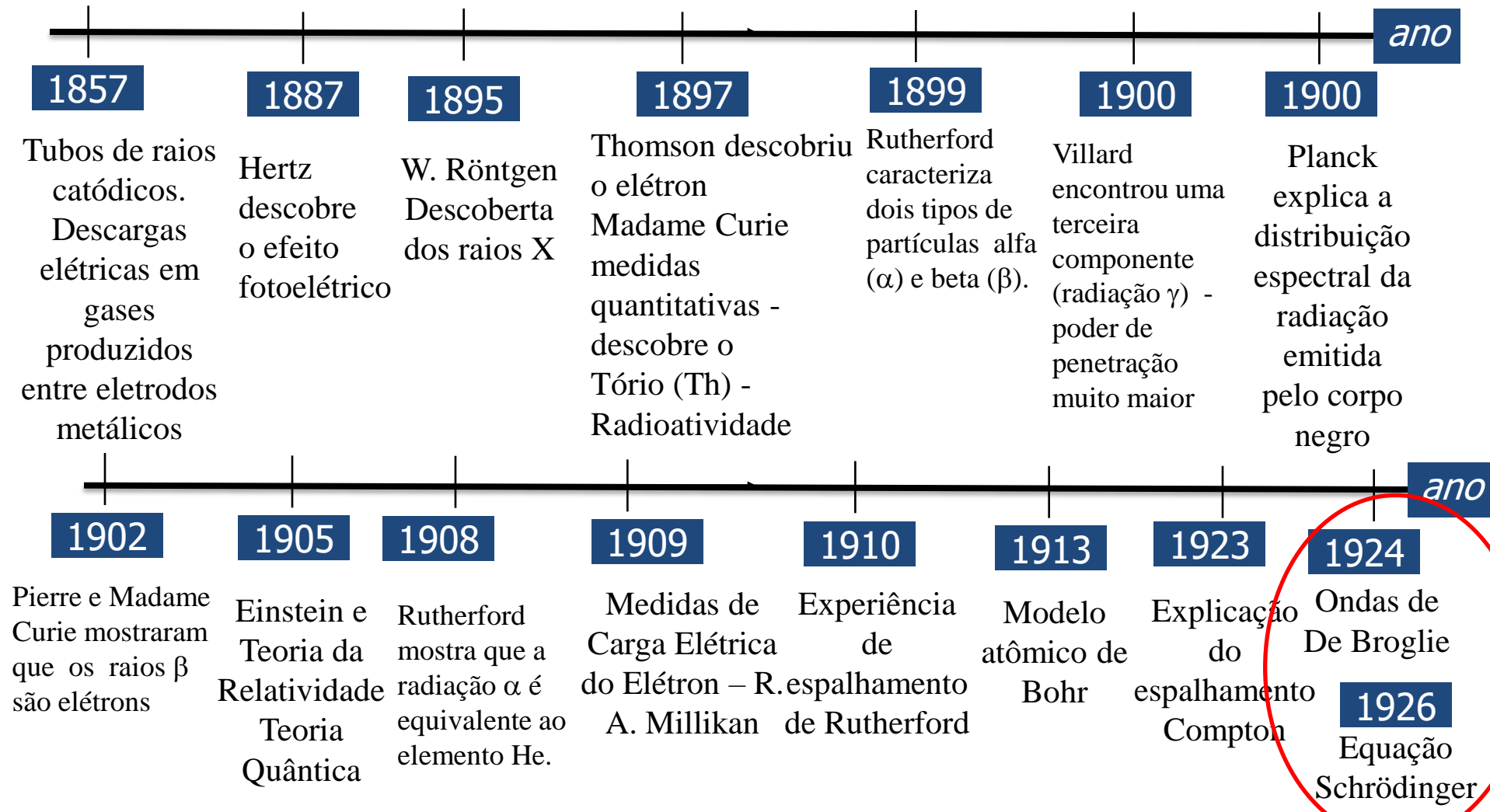
- O Espectro Eletromagnético
 - Dimensões dos objetos
 - Produção de energia
- Revisão sobre ondas Mecânicas;
- Princípios de acústica - Efeito Doppler;
 - Imagens por Ultrassom
 - Levitação mecânica
- Revisão das Equações de Maxwell - Equação da onda eletromagnética
 - Ondas de rádio; TRC, LCD,
 - Estrutura atômica – Revisão de física moderna;
 - Efeito Fotoelétrico, Celulares solares, Modelo atômico
- Descrição dos princípios de geração dos Raios-X: Tubos de raios-X
 - Propriedades dos Raios-X – Difração, Absorção
 - Aplicações de raios X: e interação com a matéria
 - Imagens obtidas com Raios-X – Radiografia,
 - Fluorescência de raios X (XRF)
 - Tomografia.
 - Microscopia
 - Aceleradores de partículas e radiação Síncrotron
 - Uso de aceleradores para análise de materiais
 - Lasers e Aplicações
 - Física Aplicada e Reatores

Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
agosto						
	Aula 1		Aula 2			
	Aula 3		Aula 4			
	Aula 5		Aula 6			
	Aula 7		Aula 8			
setembro						
	SEMANA DA	DA	PÁTRIA			
	AULA 9		não AULA			
	não AULA		não AULA			
	Aula 10		Aula 11/AP1			
outubro						
	Aula 12/AP2		Aula 13/AP3			
SEMANA Física	Aula 14		feriado			
	Aula 15/AP4		Aula 16/AP5			
	Aula 17/AP6		Aula 18 /AP7			
	Aula 19/AP8					
novembro			feriado			
	Aula 20		Aula 21			
	RECESSO	feriado	não AULA			
	Aula 22		Aula 23			
	Aula 24		Aula 25			
dezembro						
	PROVA					

Calendário

Física Clássica x Moderna

Evidências experimentais que sugeriram a divisibilidade do átomo - existência de uma subestrutura (no entanto só compreendido no século XX)



O fóton possui momento













Em 1916, Einstein ampliou o conceito de quantum de luz (fóton) ao propor que um quantum de luz possui um momento linear. Para um fóton de energia hf , o módulo do momento é dado por:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{hc}{\lambda c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{momento do fóton})$$

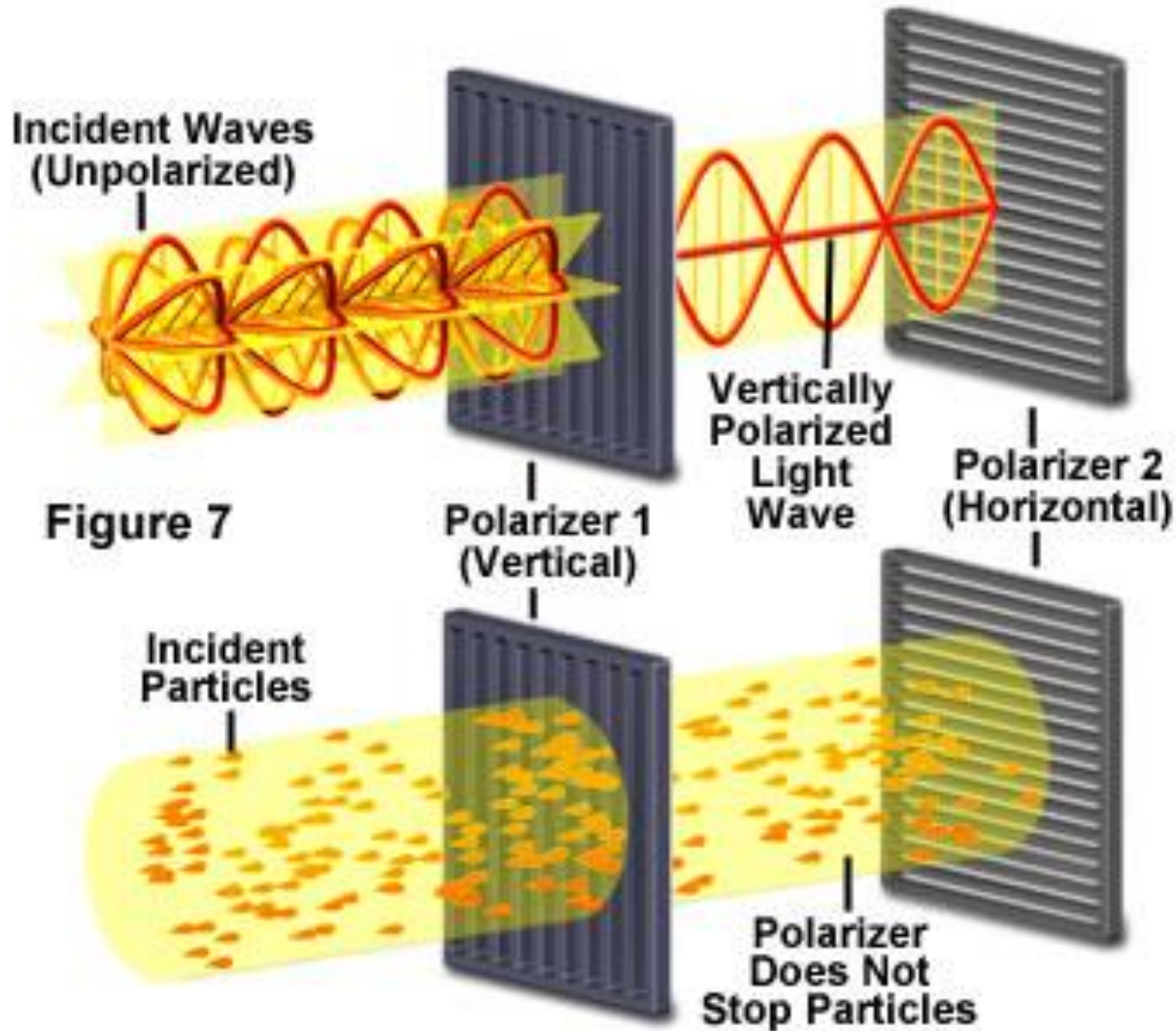
Assim, quando um fóton interage com a matéria, há uma transferência de energia e momento, como se a interação entre o fóton e uma partícula de matéria pudesse ser considerada uma colisão clássica.

Dualidade Onda-Partícula

Phenomenon	Can be explained in terms of waves.	Can be explained in terms of particles.
Reflection		
Refraction		
Interference		
Diffraction		
Polarization		
Photoelectric effect		

Dualidade Onda-Partícula

Particles and Waves Through Crossed Polarizers



Dualidade onda-partícula

O Gato de Schrödinger



©2007 HowStuffWorks

A caixa - hipotética experiência de Schrödinger : contém um recipiente com material radioativo e um contador Geiger (detector de radiação).

Se esse material soltar partículas radioativas, o contador percebe sua presença e aciona um martelo, que, por sua vez, quebra um frasco de veneno, mas se nenhuma partícula chegar, nada ocorrerá e o gato continuará vivo.

2 - De acordo com as leis da física quântica, a radioatividade pode se manifestar em forma de ondas ou de partículas e uma partícula pode estar em dois lugares ao mesmo tempo!

O material radioativo tem 50% de probabilidade de emitir uma partícula alfa a cada hora. Após uma hora só terá ocorrido um dos dois casos possíveis: o material emitiu uma partícula alfa ou não. As probabilidades de ocorrência dessa dupla realidade, quando, na mesma fração de segundo, o frasco de veneno quebra e não quebra.

3a - Aqui o gato aparece vivo, porque, nessa versão da realidade, nada foi detectado pelo contador Geiger

Para a física quântica, o animal pode estar vivo e morto ao mesmo tempo.



O material não declina; o gato vive



O material declinou; o gato foi morto pelo veneno



Segundo a interpretação de Copenhague, o gato está vivo e morto. Ele existe em um estado de "superposição".

Comprimento de onda de De Broglie



Em 1924, De Broglie postulou:

“Assim como os fótons tem características corpusculares e ondulatórias, talvez todas as formas de matéria tenham propriedades ondulatórias assim como corpusculares.”

Para um fóton: $p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$

Para a matéria: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ (Comprimento de onda de De Broglie)

Diferentemente dos fótons, as partículas que possuem massa de repouso diferente de zero, não se deslocam com a velocidade da luz

Comprimento de onda de De Broglie

Exemplos:

✓ Comprimento de onda de uma pedra:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{massa} = 50g = 50 \cdot 10^{-3} \text{kg} \\ \text{velocidade} = 40 \text{ m/s} \end{array} \right.$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6,6 \times 10^{-34}}{(50 \times 10^{-3}) \cdot 40} = 3,34 \times 10^{-34} \text{m}$$

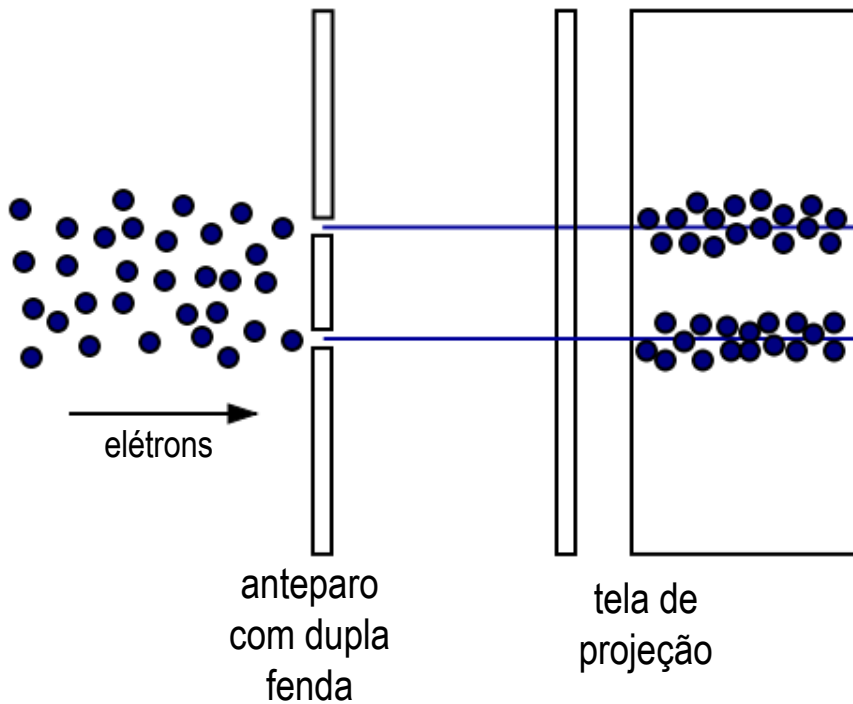
✓ Comprimento de onda de um elétron:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{massa} = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg} \\ \text{velocidade} = 1,0 \times 10^7 \text{ m/s} \end{array} \right.$$

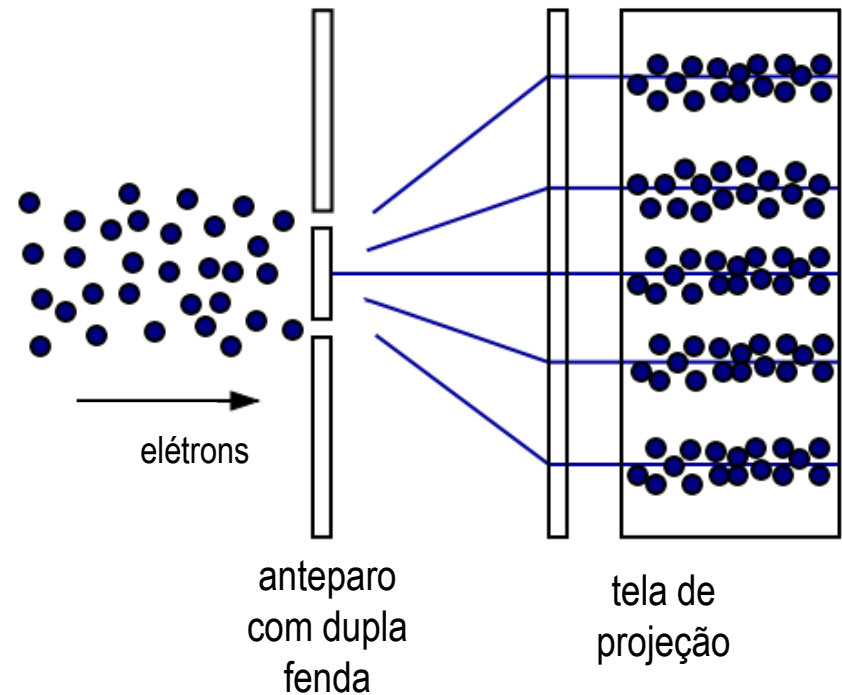
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6,6 \times 10^{-34}}{(9,11 \times 10^{-31}) \cdot 1,0 \times 10^7} = 7,28 \times 10^{-11} \text{m}$$

Padrão de Interferência de elétrons (fenda dupla)

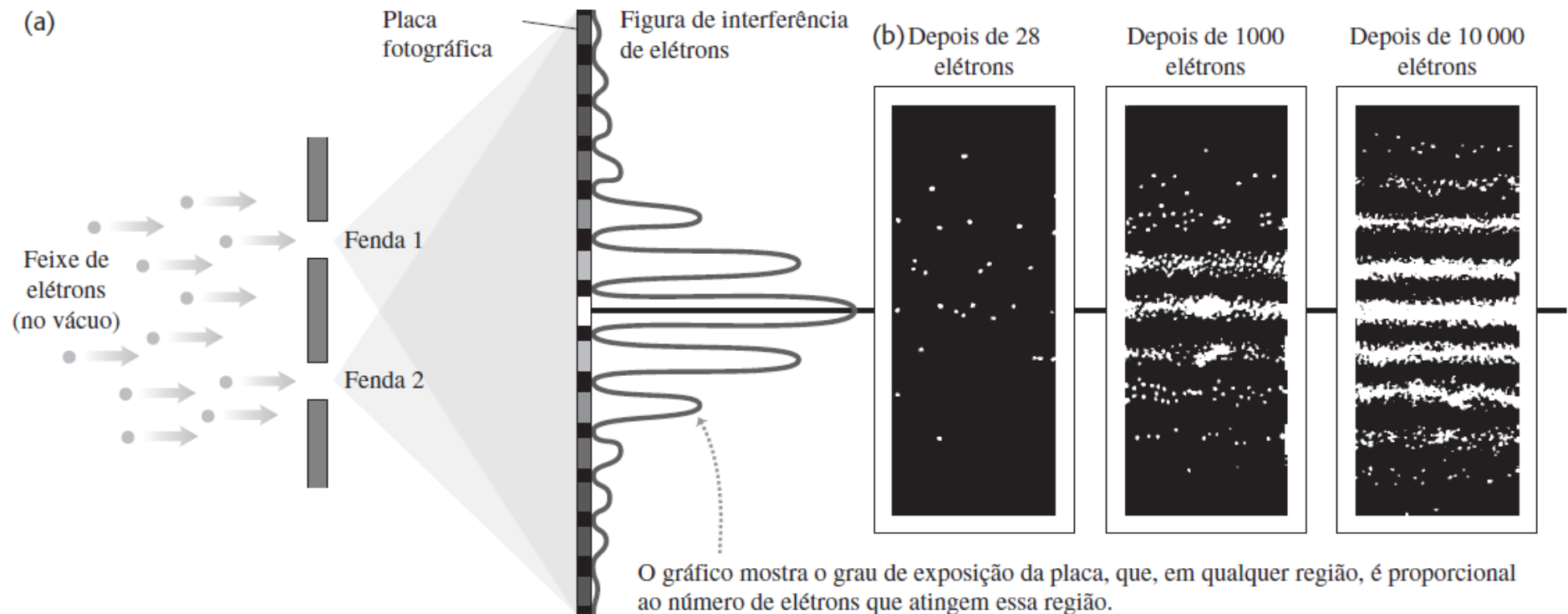
PREVISÃO CLÁSSICA



FÍSICA QUÂNTICA



Padrão de Interferência de elétrons (fenda dupla)

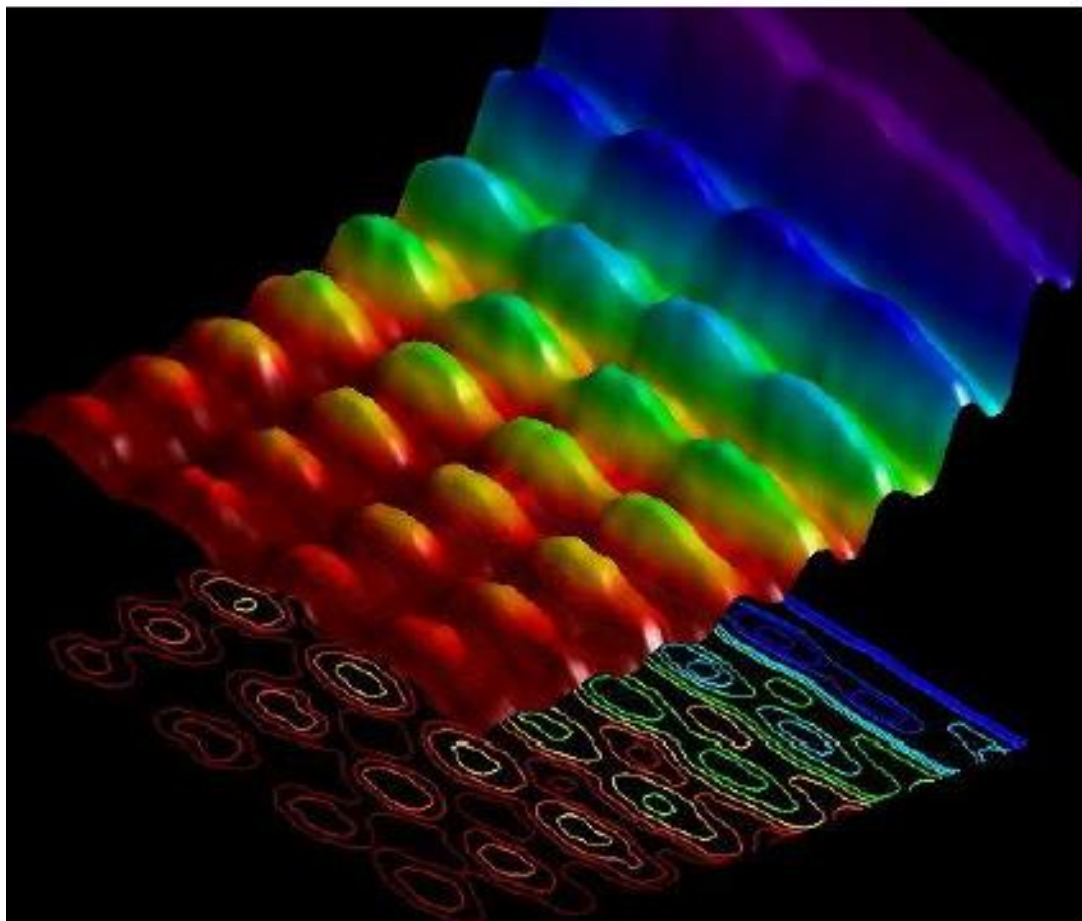


Probabilidade do elétron atingir a tela em uma certa posição da tela

Figura de Interferência & difração = distribuição estatística

<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=luz-fotografada-como-particula-onda#.Vehph0ZSjDI>

A primeira imagem da luz como onda-partícula (2015)



Simultaneous observation of the quantization and the interference pattern of a plasmonic near-field

Luca Piazza, T.T.A. Lummen, E. Quiñonez, Y. Murooka, B.W. Reed, B. Barwick, F. Carbone

Nature Communications

Vol.: 6, Article number: 6407

DOI: 10.1038/ncomms7407

Padrão de Interferência de elétrons (fenda dupla)

A edição de setembro/2002 da revista [Physics World](#) apresenta o resultado de uma pesquisa realizada sobre os mais belos experimentos da física..

- (1) **Experimento da dupla fenda de Young, realizado com elétrons.**
- (2) Experimento da queda de corpos realizada por Galileu.
- (3) Experimento da gota de óleo, realizada por Millikan.
- (4) Decomposição da luz solar com um prisma, realizada por Newton.
- (5) Experimento de interferência da luz, realizada por Young.
- (6) Experimento com a balança de torsão, realizada por Cavendish.
- (7) Medida da circunferência da terra, realizada por Eratóstenes.
- (8) Experimentos sobre o movimento de corpos num plano inclinado, realizados por Galileu.
- (9) Espalhamento de Rutherford.
- (10) Pêndulo de Foucault.

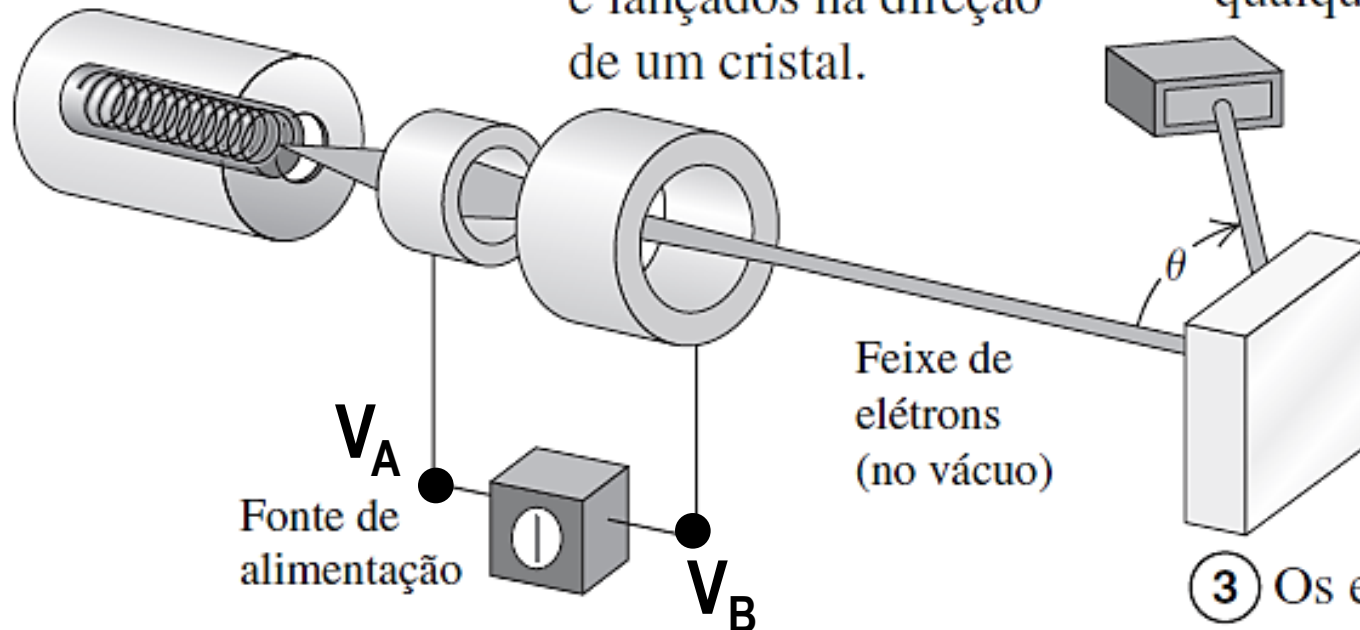
Comprovação experimental da teoria de De Broglie

Experimento de Davisson e Germer

① Um filamento aquecido emite elétrons.

② Os elétrons são acelerados por eletrodos e lançados na direção de um cristal.

④ O detector pode ser deslocado para revelar elétrons espalhados em qualquer ângulo θ .



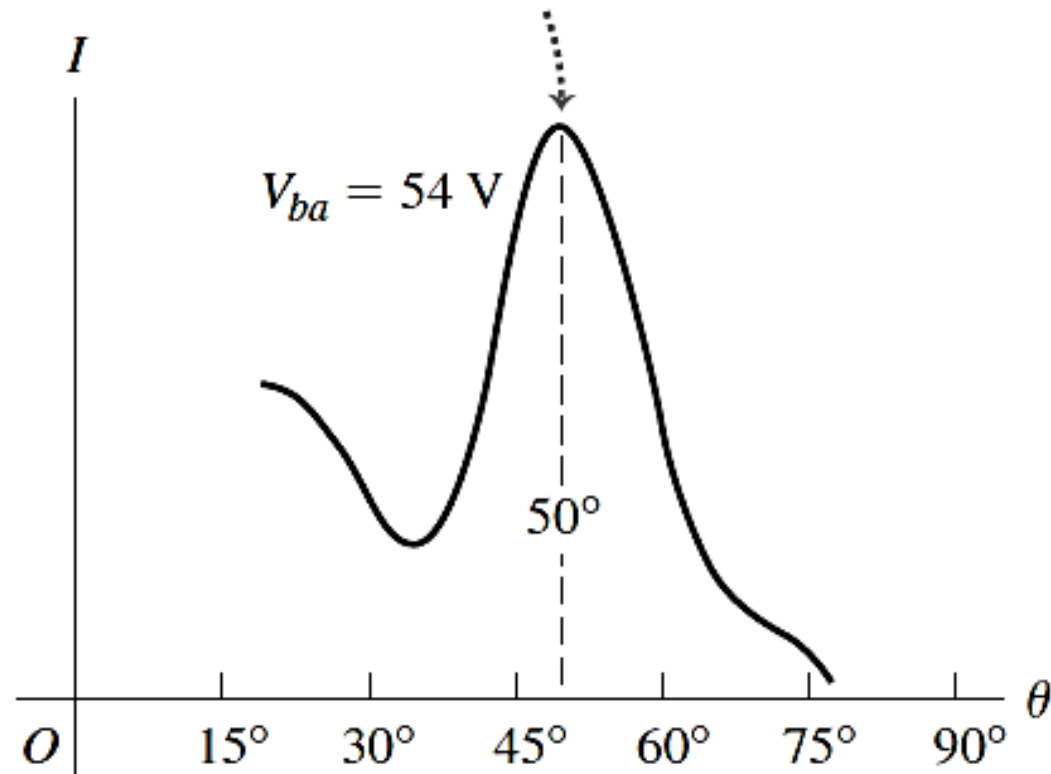
③ Os elétrons incidem no cristal de níquel.

$$\Delta V = V_{BA} = V_B - V_A$$

Comprovação experimental da teoria de De Broglie

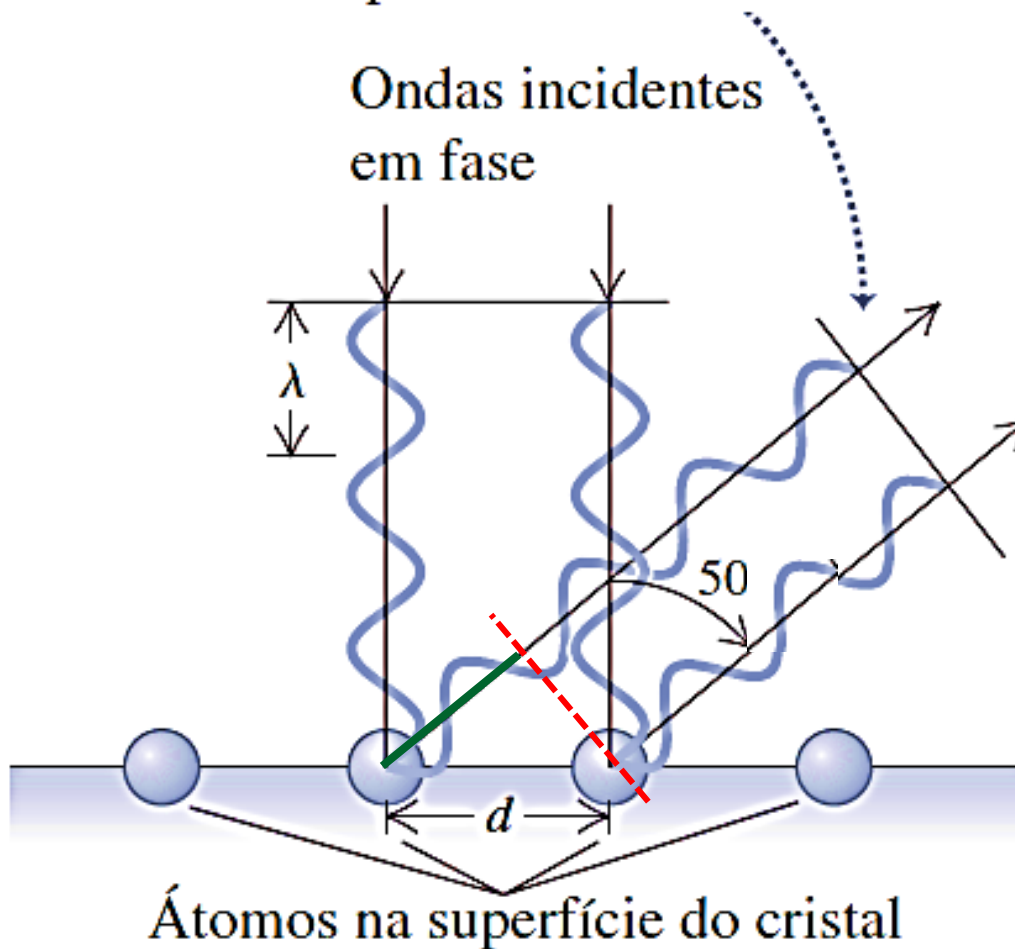
Experimento de Davisson e Germer

- (a) Este pico na intensidade dos elétrons espalhados se deve à interferência construtiva entre as ondas dos elétrons.

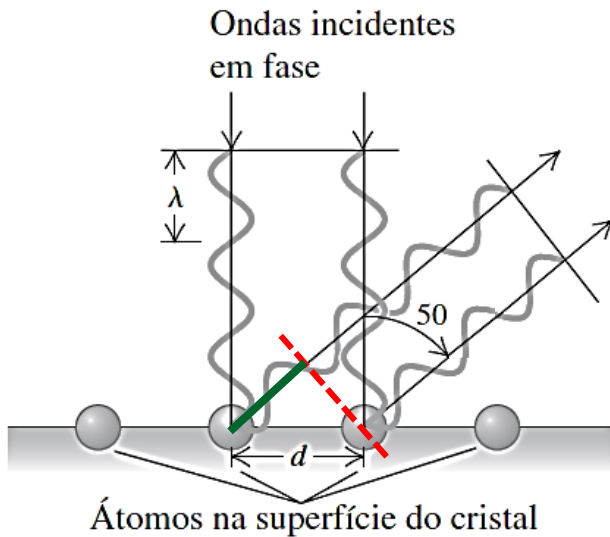


Comprovação experimental da teoria de De Broglie

- (b) Se as ondas espalhadas estão em fase, há um pico na intensidade dos elétrons espalhados.



Comprovação experimental da teoria de De Broglie



Interferência construtiva:

$$d \sin \theta = m \lambda$$

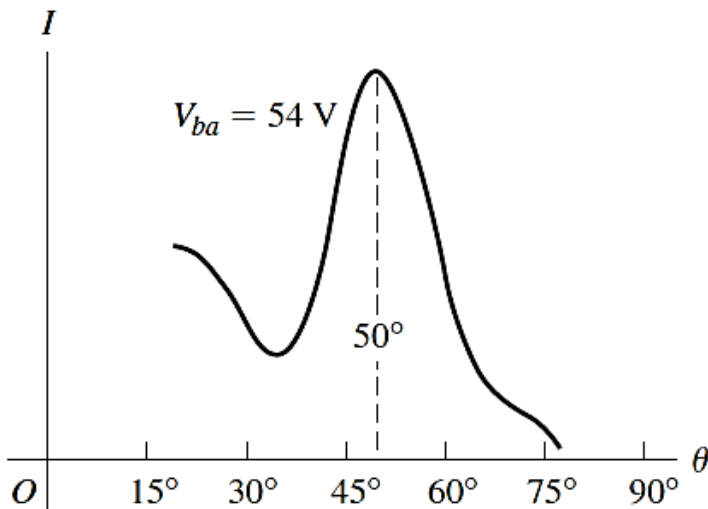
$$\lambda = \frac{2,15 \times 10^{-10} \cdot \sin 50}{1} = 1,65 \times 10^{-10} \text{ m}$$

De Broglie:

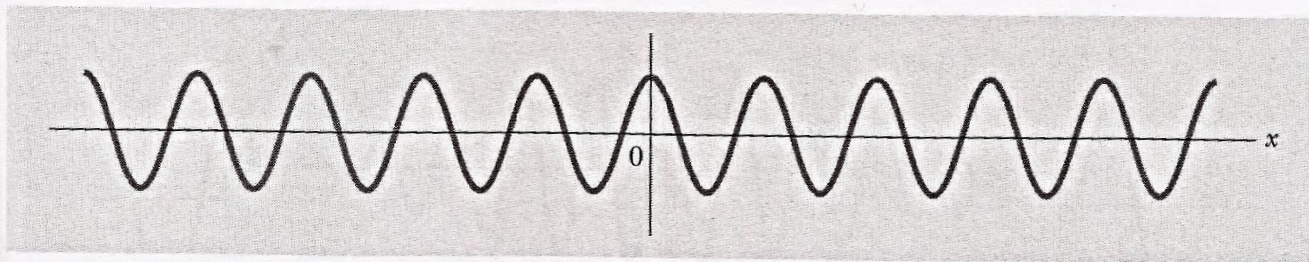
$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m} = e V_{ab} \Rightarrow p = \sqrt{2 m e V_{ab}}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 m e V_{ab}}} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9,11 \times 10^{-31} \times 1,6 \times 10^{-19} \times 54}}$$

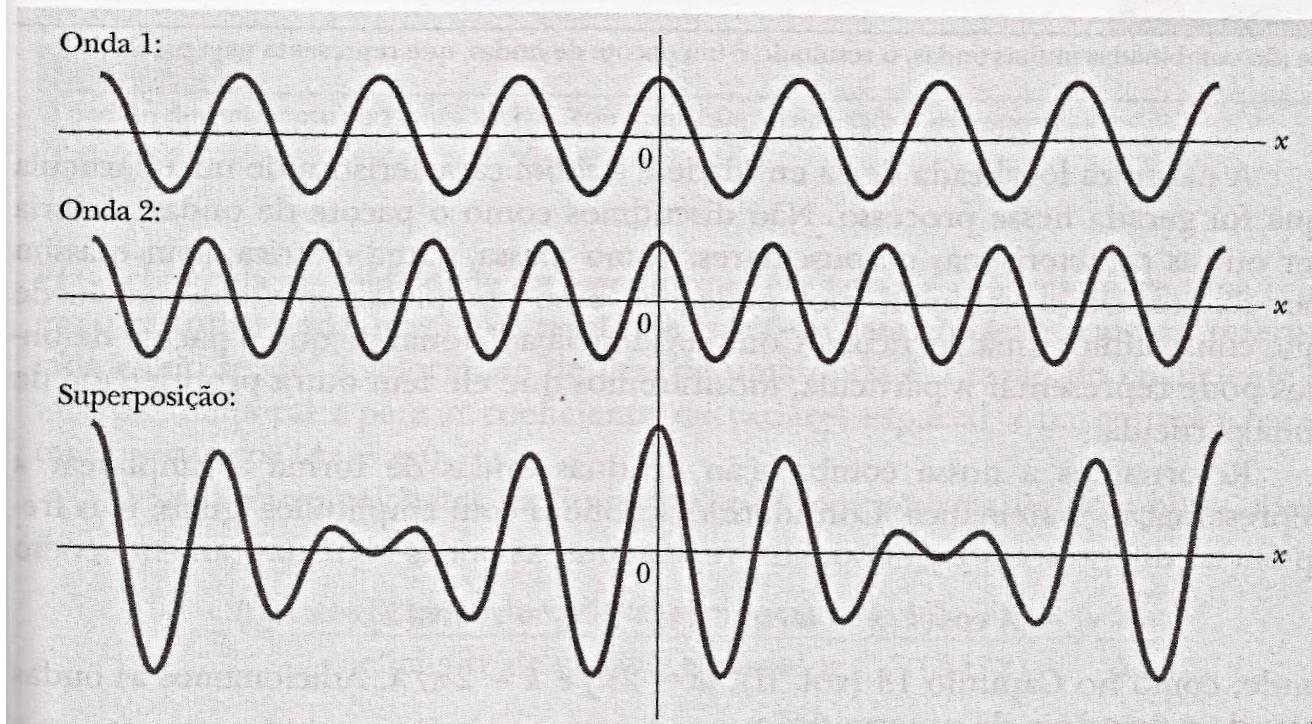
$$\lambda = 1,65 \times 10^{-10} \text{ m}$$



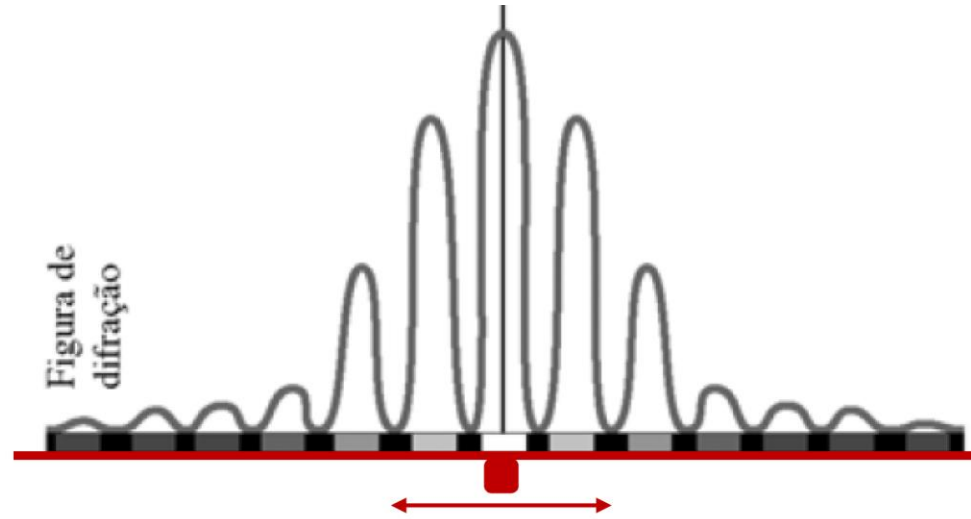
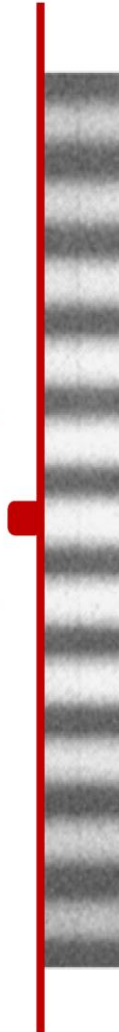
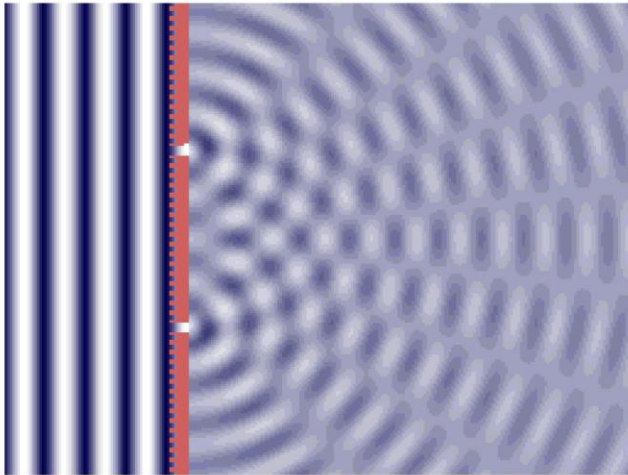
A Partícula Quântica



(a)



Interferência da Luz como Probabilidade



Probabilidade dos fótons atingirem a tela em uma certa posição.

Depende do comprimento de onda dos fótons (energia) ao atravessar a fenda

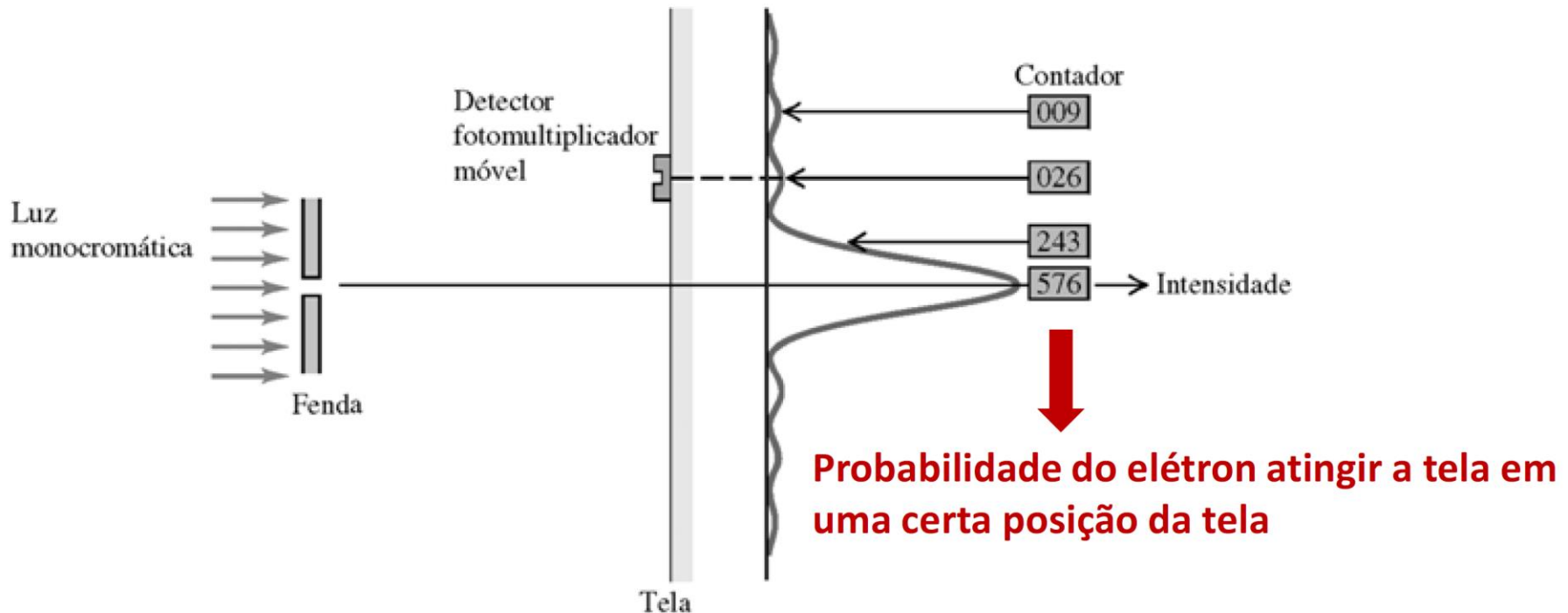
Figura de Interferência & difração =
distribuição estatística

■ *Detector de fótons*

fótons que chegam em cada ponto

$I \propto \# \text{ fótons}$

Função de onda Ψ



Depende do estado do elétron ao atravessar a fenda

Figura de difração = distribuição estatística

Características descritas por uma função de onda

– $\Psi(r, t)$

– estado da partícula (energia, posição, velocidade, ...)

Equação de Schrödinger

- Função de onda [$\Psi(x, y, z, t)$]
função matemática que descreve o estado da partícula
estado = posição, energia ... => grandezas cinemáticas e dinâmicas
- Função Distribuição de Probabilidade $|\Psi(x, y, z, t)|^2$
 - $|\Psi(x, y, z, t)|^2 dV$ = probabilidade de encontrar uma partícula dentro de um volume dV ao redor do ponto (x, y, z) no instante de tempo t .

- Equação de Schrödinger

Solução = Função de onda

$\Psi(x, y, z, t)$ e possíveis valores
da energia E da partícula



Nobel : 1933

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + U\Psi = E\Psi$$

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = E\Psi$$

Princípio da Incerteza de Heisenberg

O que o princípio da incerteza diz essencialmente é que não existe meio de medir com precisão as propriedades mais elementares do comportamento subatômico. Quanto maior a precisão na medida de uma propriedade, por exemplo, o movimento de um elétron, menor a precisão que terá em outra, por exemplo, a sua posição.

PRINCÍPIO DA INCERTEZA: não é possível considerar partículas quânticas como se fossem iguais aos objetos macroscópicos (objetos que podemos apontar e dizer: “Este objeto está aqui, agora, e é para lá que está indo”).

Os aspectos essenciais de uma partícula (posição, velocidade, quantidade de movimento, energia) nunca podem ser imediatamente observados com precisão. Podemos apenas fazer medições prováveis ou estatísticas.

Princípio da Incerteza de Heisenberg

Incerteza: geralmente descrita com base no conceito de desvio padrão.

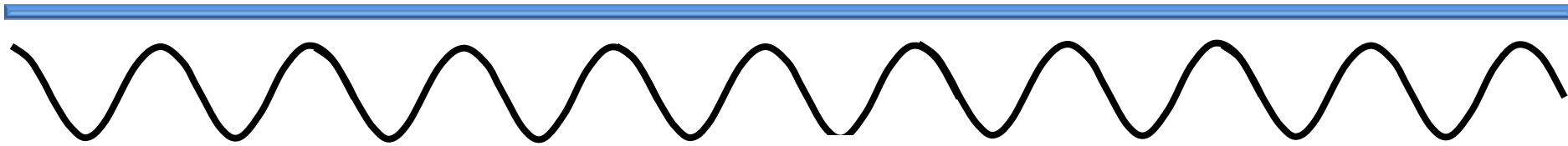
Uma coordenada x possui incerteza Δx e momento linear p_x com incerteza Δp_x . Os desvios-padrões associados com as incerteza são relacionados por:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi} = \hbar$$

Incerteza na Energia: a incerteza na energia depende do intervalo de tempo durante o qual o sistema permanece em um determinado estado.

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi} = \hbar$$

Princípio da Incerteza de Heisenberg



Δx
small Δp – only one wavelength



Δx
medium Δp – wave packet made of several waves



Δx
large Δp – wave packet made of lots of waves