

Física IV

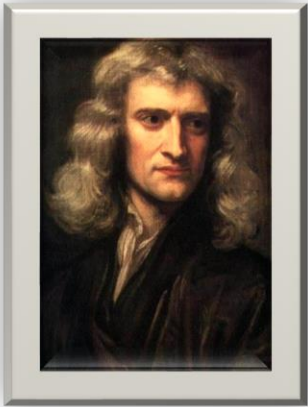
2020

Professor: Valdir Guimarães

E-mail: [valdir.guimaraes@usp.br](mailto:valdir.guimaraes@usp.br)

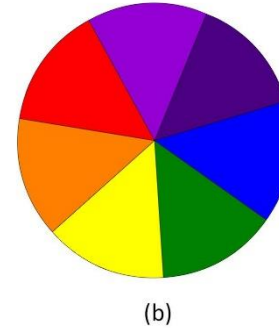
**Aula-14: dualidade onda-partícula - principio da incerteza**

# Newton - luz partícula



- ❑ Newton, foi um dos maiores defensores da natureza corpuscular da luz.
- ❑ Para Newton, a luz seria formada por pequenas partículas de cores diferentes que poderiam combinar para formar a luz branca (disco colorido de Newton). Newton considerava a possibilidade da existência do vácuo.

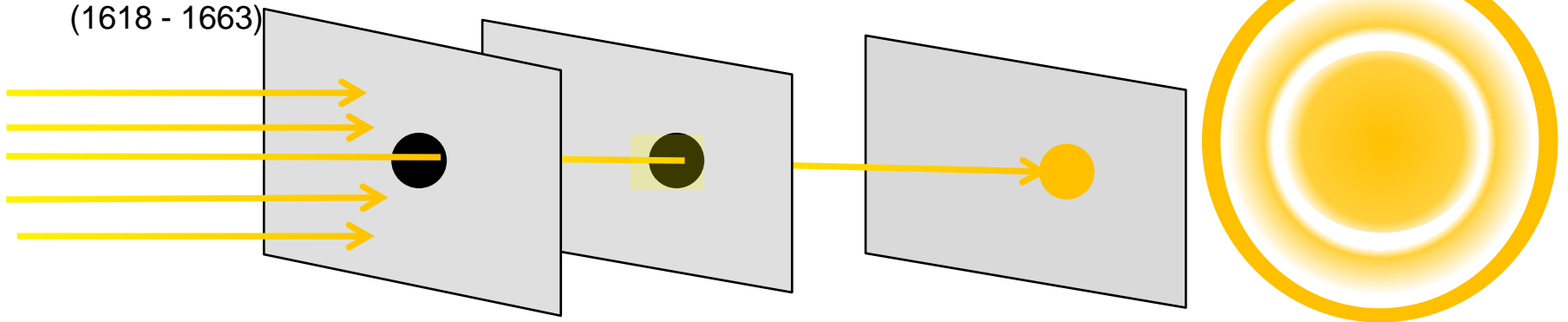
**Isaac Newton**  
(1642 - 1727)



O físico italiano Grimaldi realizou a experiência da difração da luz. Projetou luz sobre orifícios de duas placas para verificar a hipótese de que a luz viaja em linha reta. No entanto, ele observou o fenômeno da difração.



**Francesco Grimaldi**  
(1618 - 1663)



# Natureza ondulatória da luz



**Robert Hooke**  
(1635 – 1703)

Para explicar a experiência de Grimaldi, Hooke propôs que a luz era formada por vibrações que se propagam em altas velocidades (ondas).



**Christiaan Huygens**  
(1629 – 1695)

O físico holandês Huygens aperfeiçoou a ideia de Hooke, afirmando que a luz seria descrita realmente por uma onda longitudinal, que se propaga na mesma direção de seu deslocamento.



Para Huygens a luz seria formada por pulsos não periódicos que se propaga pelo **éter**.

## Luz é uma onda ou partícula ?

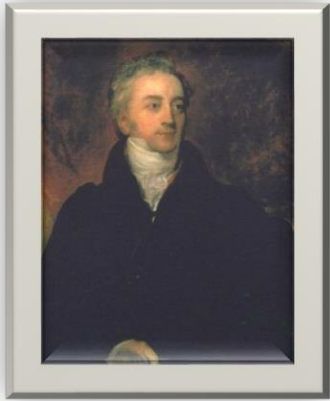
Huygens: Luz é uma onda  
precisa do éter para se  
propagar

Newton: Luz é uma partícula  
pode se propagar no vácuo

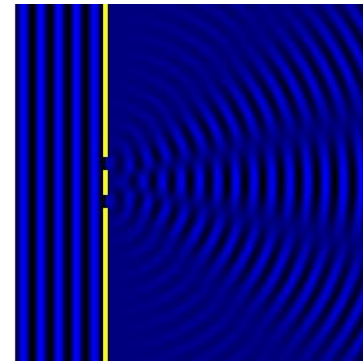
A pergunta que ainda persiste:  
A Luz é uma onda ou uma partícula?  
Nova pergunta:  
A luz precisa de um meio para se  
propagar ?

# Interferência da luz

## Interferência da luz – Experimento da fenda dupla de Young

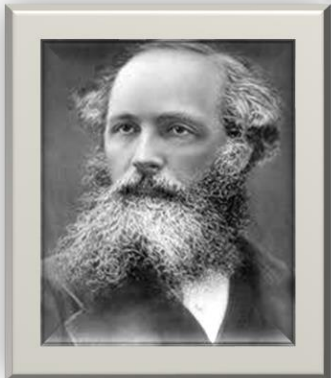
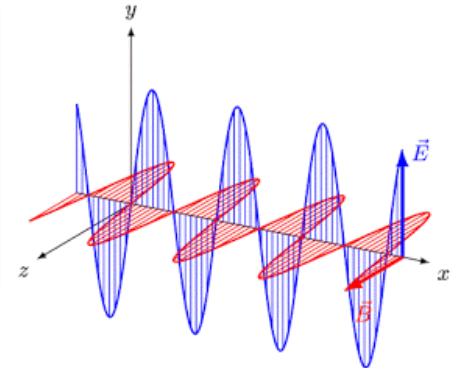


**Thomas Young**  
(1773 – 1829)



- ❑ A seguir Young realizou esses experimentos com fendas duplas para a luz e também observou um padrão de interferência. A partir dessa experiência foi possível medir o comprimento de onda da luz visível, para cada cor.
- ❑ Esse é um fenômeno puramente ondulatório. Comprovando a natureza ondulatória da onda.

- ❑ Maxwell desenvolveu toda uma teoria unificando a eletricidade e magnetismo (eletromagnetismo).
- ❑ Como consequência demonstrou que a luz era uma onda eletromagnética.



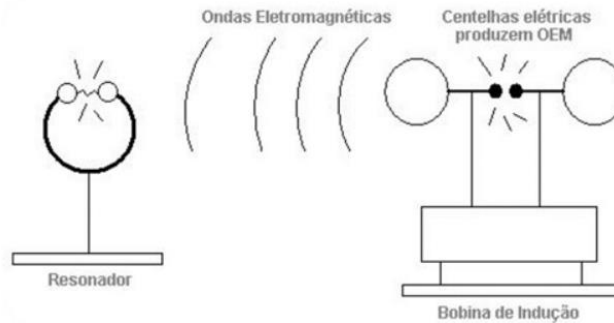
**James Clerk Maxwell**  
(1831 - 1879)

# Experimentos Hertz



**Heinrich Rudolf Hertz**  
(1857 - 1894)

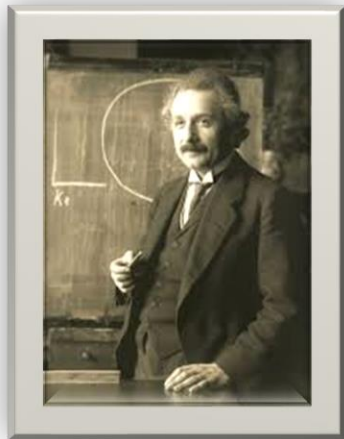
- ❑ Hertz realizou experiências que comprovaram a existência das ondas eletromagnéticas.
- ❑ Luz poderia se propagar no vácuo



**1905:** Einstein propõe a explicação para o efeito fotoelétrico dizendo que a **luz se comporta com partículas (fótons)**.

**1915:** Millikan comprova a teoria de Einstein

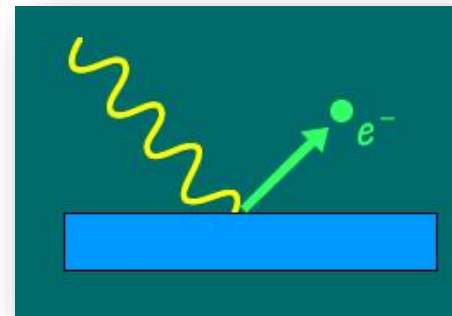
**1921:** Einstein ganha o premio Nobel pela explicação do efeito fotoelétrico.



**Albert Einstein**  
(1879 - 1955)



**Nobel 1921**



# fóton

- ❑ Einstein propõe a ideia do Fóton
- ❑ A lei de Planck relaciona a energia do fóton com seu comprimento de onda ou frequência.

$$E = h\nu$$

$E$  = energia do fóton

$h$  = constante de Planck =  $6.625 \times 10^{-34}$  J.s

$c$  = velocidade da luz

$\lambda$  = comprimento de onda

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2$$



**energia  
de repouso**

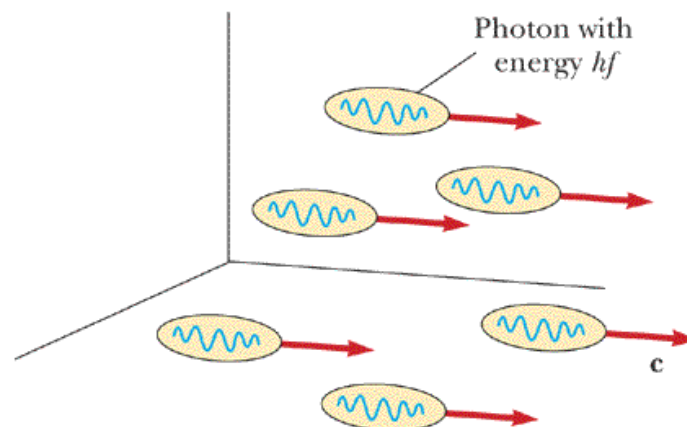
**energia  
cinética**

$$E_0^2 = 0$$



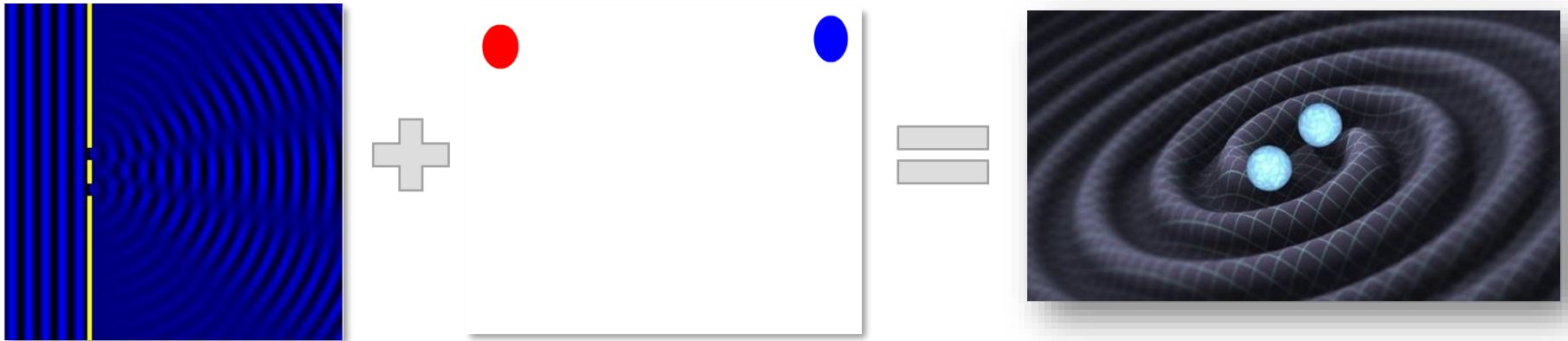
$$E^2 = p^2 c^2$$

$$E = pc$$



- ❑ Veja que fóton não é uma partícula pois não tem massa de repouso.
- ❑ No entanto, fóton se comporta como partícula por ter momento.

**Novamente a questão: A luz é uma onda ou uma partícula?**

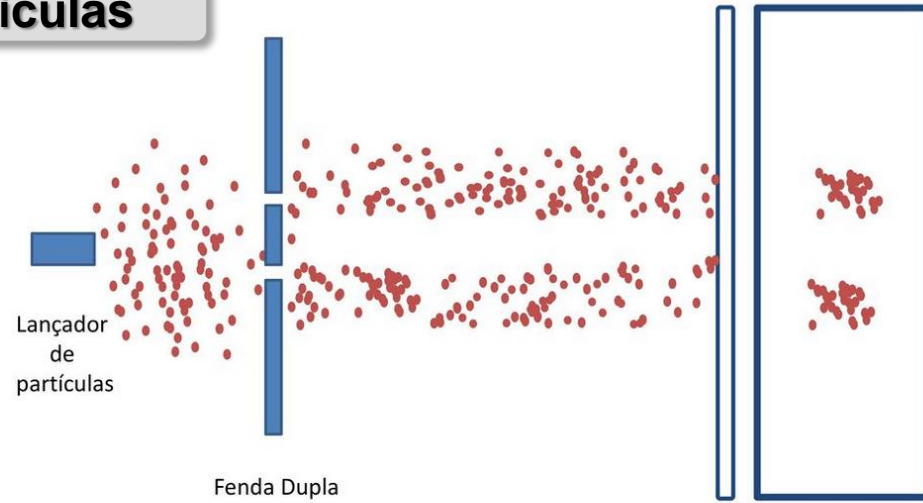


**A luz se propaga como onda mas interage como partícula**

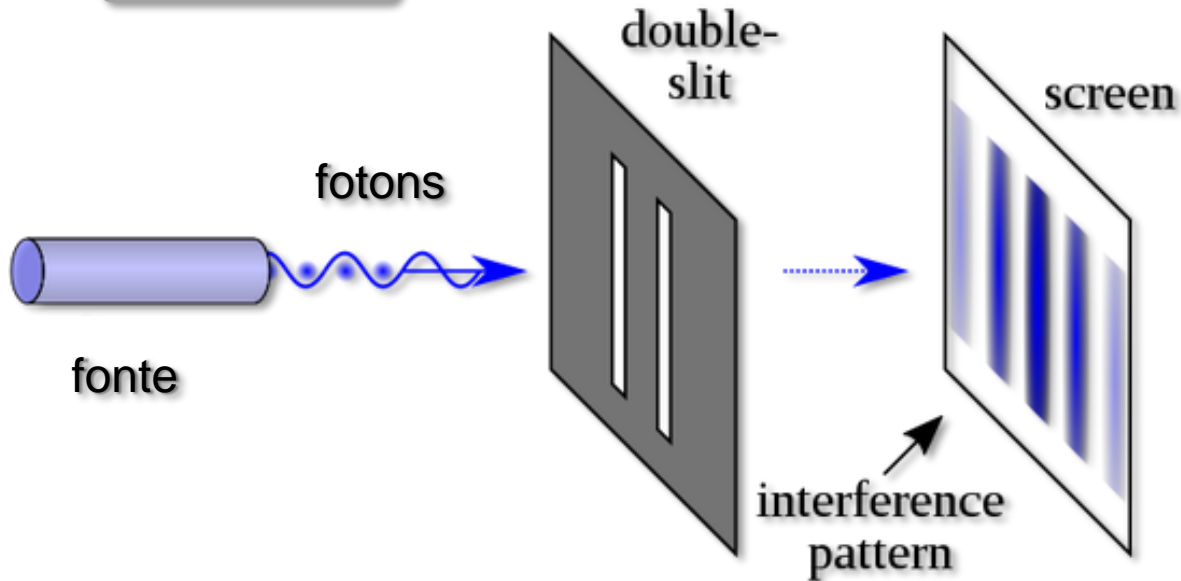


# Dualidade onda-partícula

## Partículas

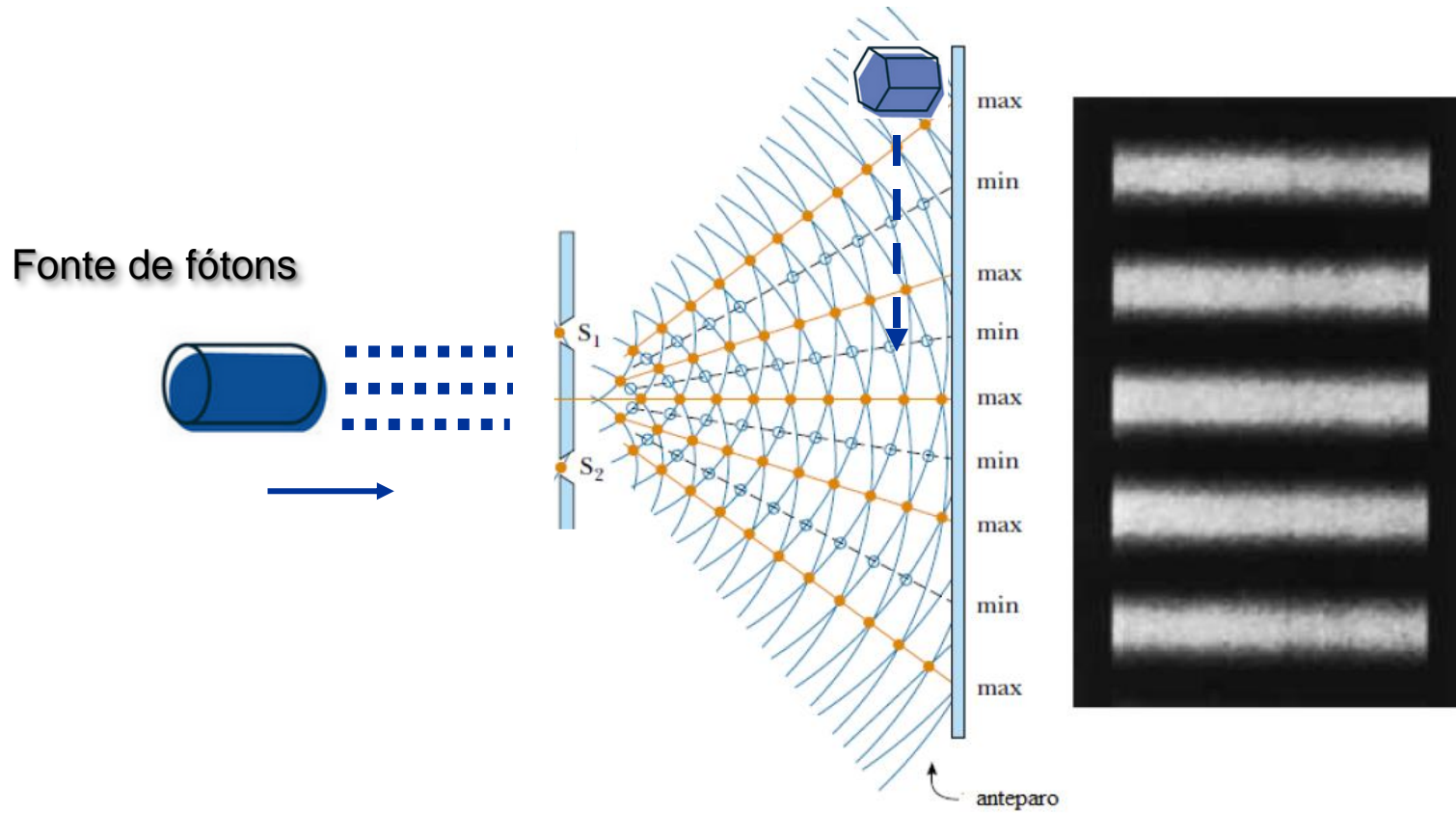


## fótons



# Detector após fenda dupla

## Detector de fótons móvel

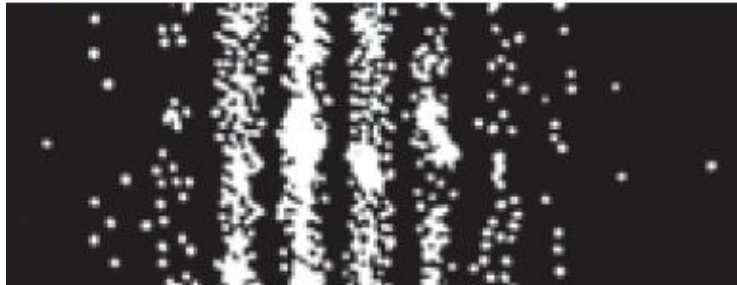


## Dualidade onda-partícula

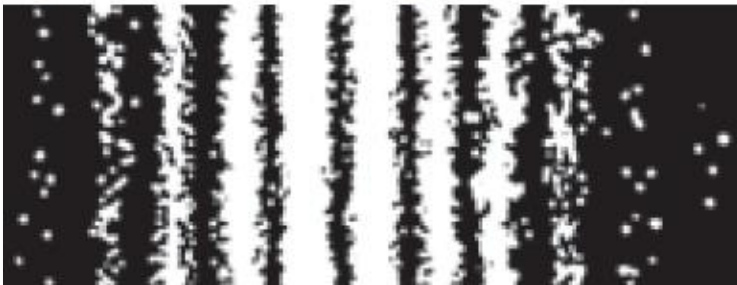
Após 21 fótons atingirem a tela



Após 1.000 fótons atingirem a tela



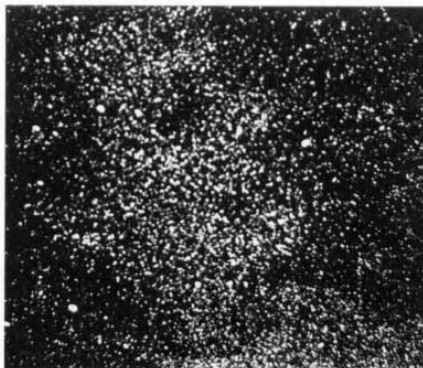
Após 10.000 fótons atingirem a tela



Como podemos ver a interação com o detector o fóton se comporta como partícula mas na propagação se comporta como onda.



a



b



c



d



e



f

Os estágios da exposição do filme revelam, fóton a fóton, a formação de uma fotografia. Os números aproximados de fótons em cada estágio são (a)  $3 \times 10^3$ , (b)  $1,2 \times 10^4$ , (c)  $9,3 \times 10^4$ , (d)  $7,6 \times 10^5$ , (e)  $3,6 \times 10^6$  e (f)  $2,8 \times 10^7$ .

# Princípio da complementaridade Niels Bohr (1928).

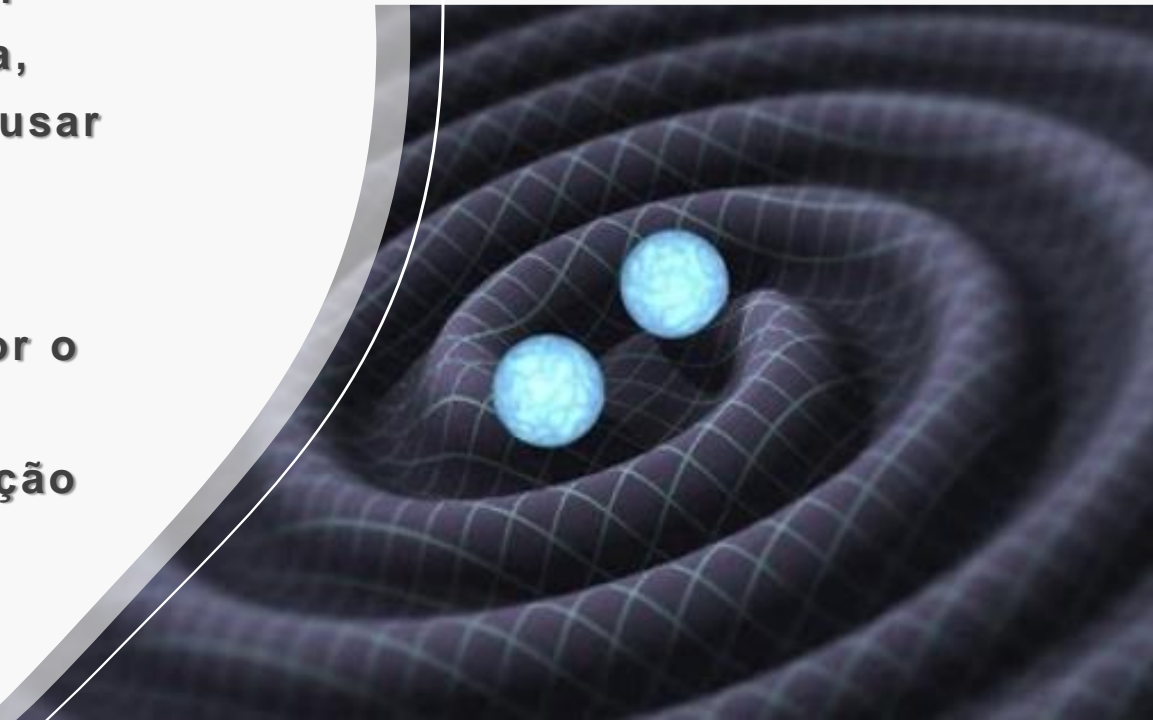
- ❑ A descrição ondulatória é complementar à descrição corpuscular.
- ❑ Precisamos das duas descrições para completar nosso modelo da natureza, mas nunca precisaremos usar ambas as descrições simultaneamente.
- ❑ A interação com o detector o fóton se comporta como partícula mas na propagação se comporta como onda.



**Niels Bohr**  
(1885-1962)



**Nobel 1922**

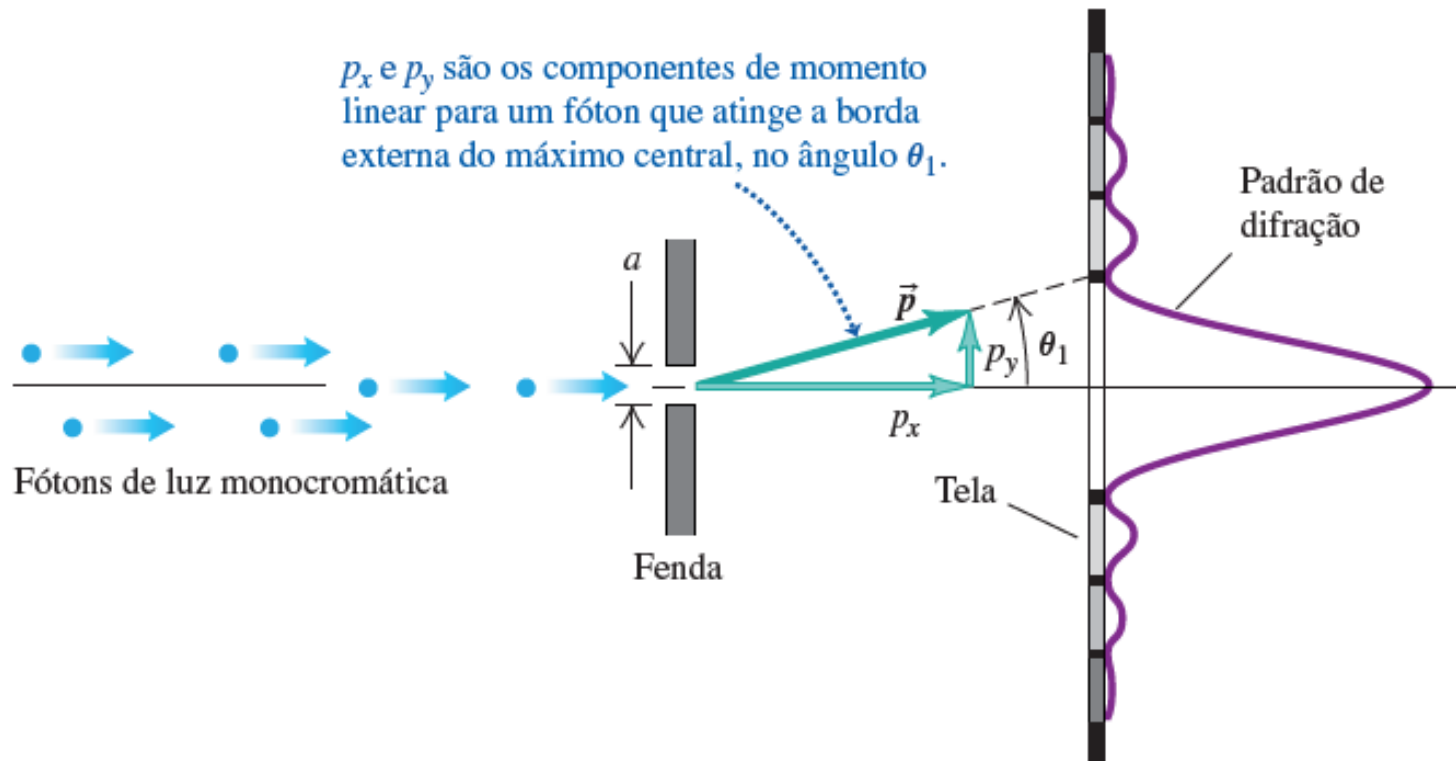


### Consequência da natureza dual (onda e partícula) da luz:

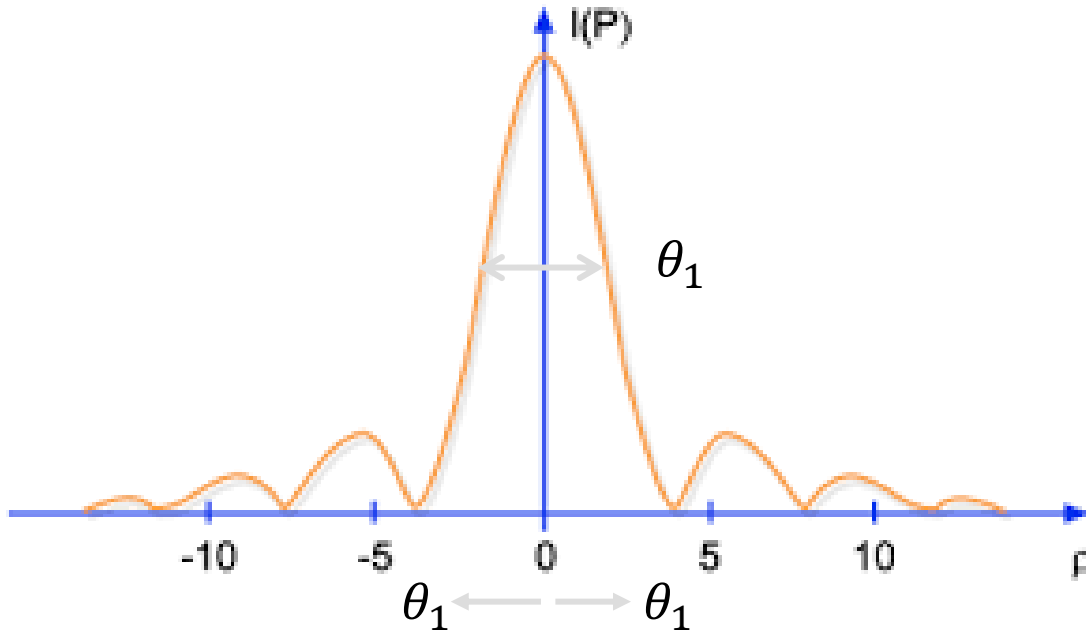
- ❑ Embora os fótons possuam energia e momento linear, são muito diferentes do modelo corpuscular que usamos para partícula na mecânica newtoniana (partícula com massa).
- ❑ Podemos descrever a localização e o estado do movimento de uma partícula em qualquer instante usando três coordenadas espaciais e três componentes do momento linear e, assim, podemos prever o movimento da partícula no futuro.
- ❑ Fótons não tem massa. Então esse modelo não funciona para fótons:
- ❑ simplesmente não podemos tratar um fóton como um objeto pontual.

## Difração fenda simples

- Para estudar o problema de medirmos a posição e o momento linear de um fóton simultaneamente, vamos analisar novamente a difração da luz em uma fenda única.



## Difração fenda simples



$$\text{sen}\theta_m = \theta_m = m \frac{\lambda}{a}$$

$$m = 1$$

$$\theta_1 = \frac{\lambda}{a}$$

O valor de  $\theta_1$  determina a metade da largura do máximo central.



# Difração de Fraunhofer - Largura da distribuição

$$\text{sen } \theta_m = \theta_m = m \frac{\lambda}{a} \quad \theta_1 = \frac{\lambda}{a}$$

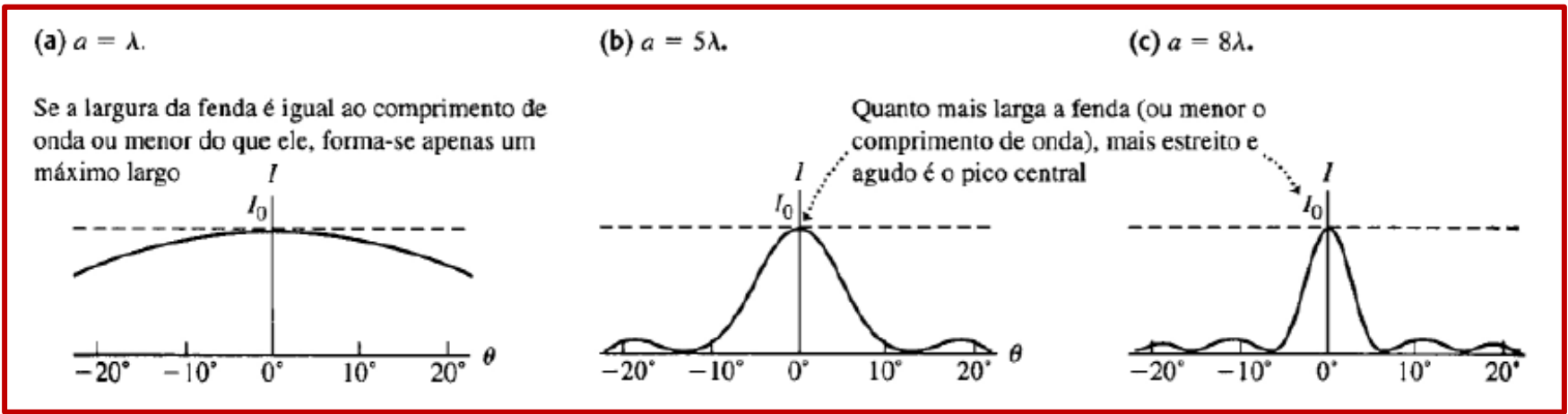
O valor de  $\theta_1$  determina a metade da largura do máximo central.

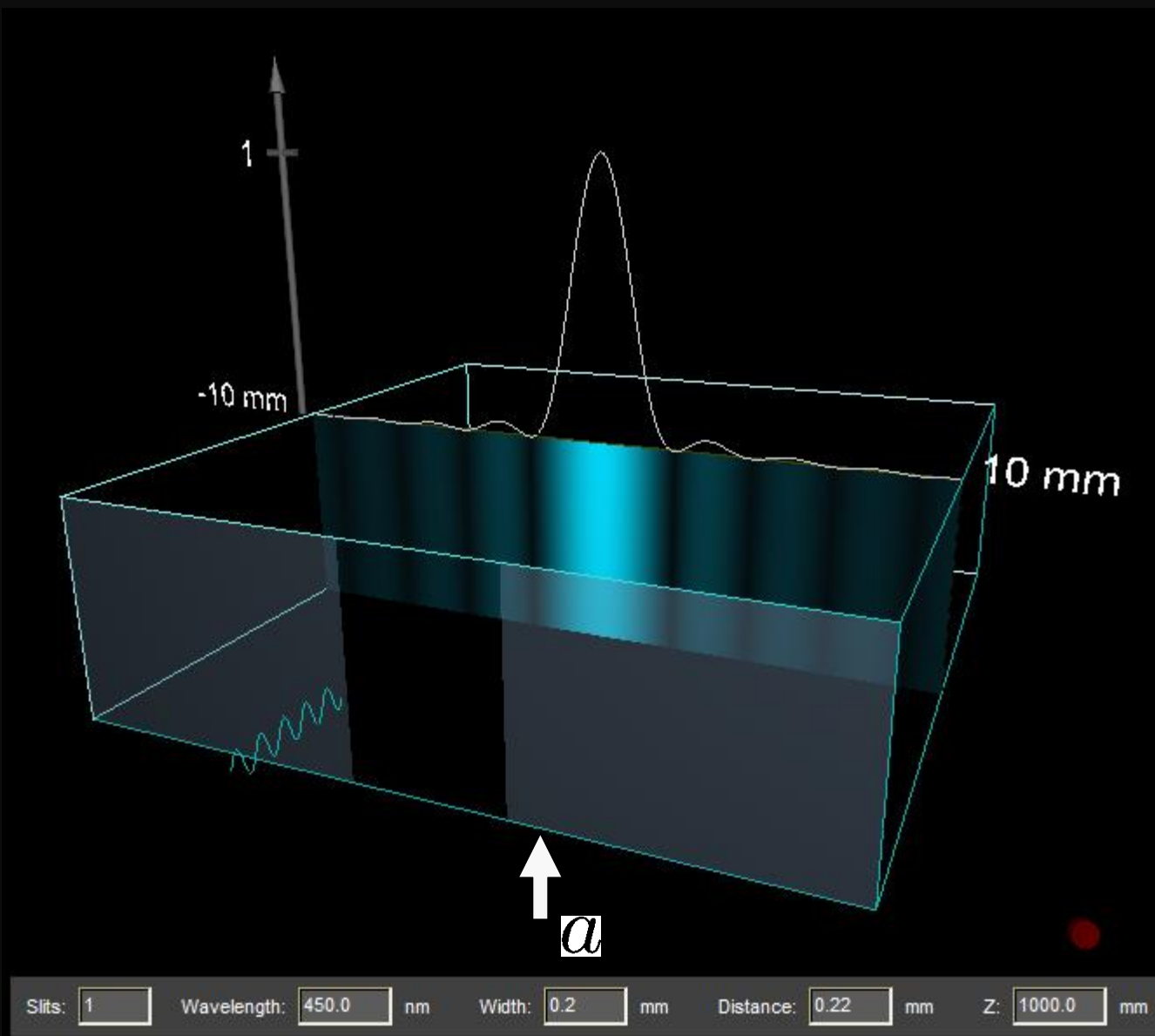
$a \gg \lambda$

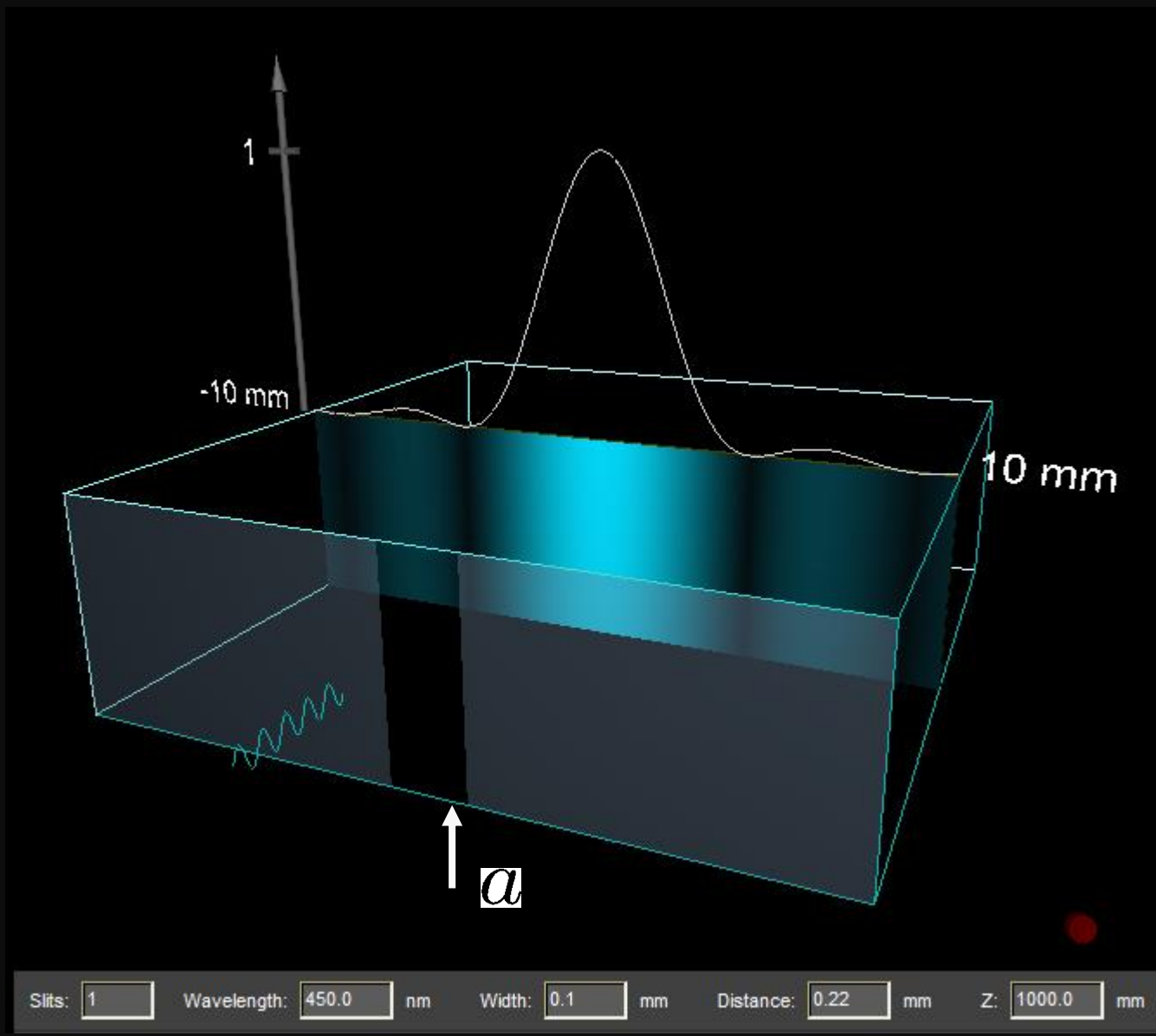
- ❑ Nesse caso o ângulo  $\theta_1$  é muito pequeno (praticamente zero).
- ❑ Raios de luz praticamente não se desviam.
- ❑ Podemos usar ótica geométrica. Ex. (portas e janelas)

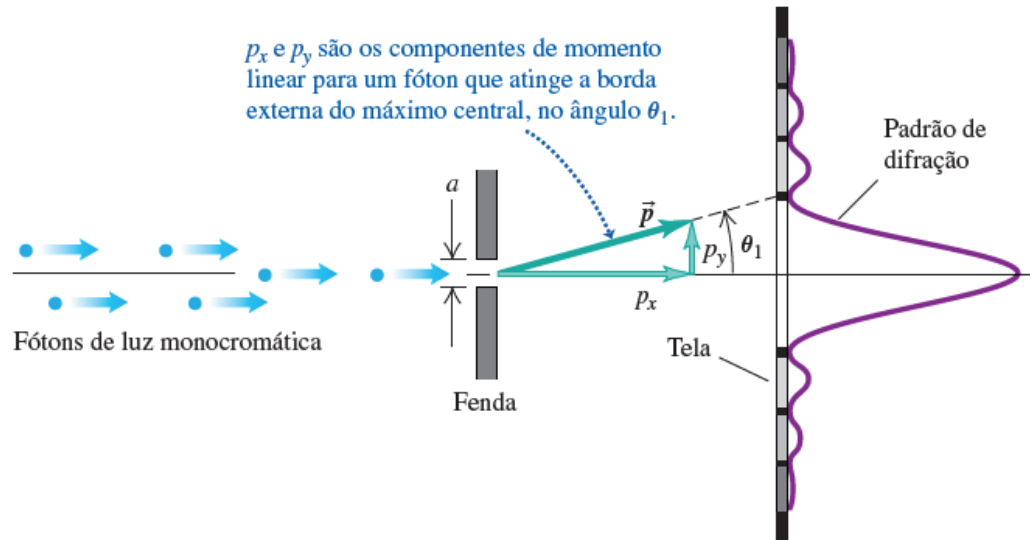
$a \geq \lambda$

- ❑ Efeitos da difração:
- ❑ Diminuição da abertura causa alargamento do máximo central.

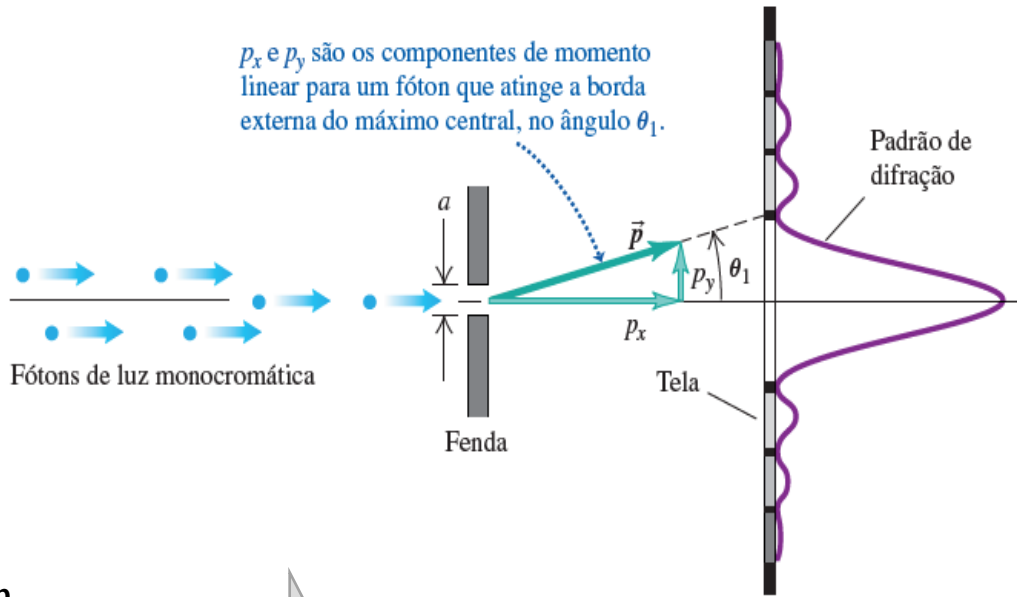








- ❑ Mesmo os fótons tendo o mesmo estado inicial do movimento ao entrar na fenda, nem todos seguem o mesmo caminho.
- ❑ Não podemos prever a trajetória exata de qualquer fóton individual a partir do conhecimento de seu estado inicial;
- ❑ Só podemos descrever a probabilidade de que um fóton individual vai atingir um determinado ponto na tela.
- ❑ Essa indeterminação fundamental não tem correspondência na mecânica newtoniana.
- ❑ Além disso, as incertezas tanto na posição quanto no momento linear de um fóton individual estão inseparavelmente relacionadas.



$p_x$  Momento linear na direção x  
 $p_y$  Momento linear na direção y  
 $\theta_1$  angulo

$$\frac{p_y}{p_x} = \tan \theta_1 \quad \Rightarrow \quad p_y = p_x \theta_1 \quad \text{Considerando que:} \quad \theta_1 = \frac{\lambda}{a} \quad \Rightarrow \quad p_y = p_x \frac{\lambda}{a}$$

Isso indica que 85% dos fótons dentro do máximo central teriam momento  $p_y$  entre.

$$+p_x \frac{\lambda}{a} \quad \text{e} \quad -p_x \frac{\lambda}{a}$$

Valor médio  $\langle p_y \rangle = 0$  e incerteza  $\Delta p_y \geq p_x \frac{\lambda}{a}$

Quanto menor for a largura  $a$  da fenda, mais larga será a figura de difração e maior a incerteza no valor da componente y do momento linear  $p_y$

## Princípio de incerteza

Usando que  $\lambda = \frac{h}{p_x}$  temos:  $\Delta p_y \geq \frac{h}{a}$  e:  $\Delta p_y a \geq h$

- ❑ A largura **a** da fenda representa uma incerteza na posição **y** de um fóton.
- ❑ Não podemos saber exatamente onde cada fóton passa através da fenda.
- ❑ Logo, a **posição y** e a componente **p<sub>y</sub>** do momento linear possuem incertezas.
- ❑ Para diminuir a incerteza de **p<sub>y</sub>** temos que reduzir a largura da figura de difração.
- ❑ Para isso, é necessário aumentar a largura **a** da fenda, o que aumenta a incerteza da posição.
- ❑ Reciprocamente, quando diminuimos a incerteza da posição reduzindo a largura da fenda, a figura de difração se alarga e a incerteza do momento linear aumenta.
- ❑ Isso é mais geral e considerando desvios-padrões da posição e momento temos o princípio de incerteza da mecânica quântica:

princípio de incerteza

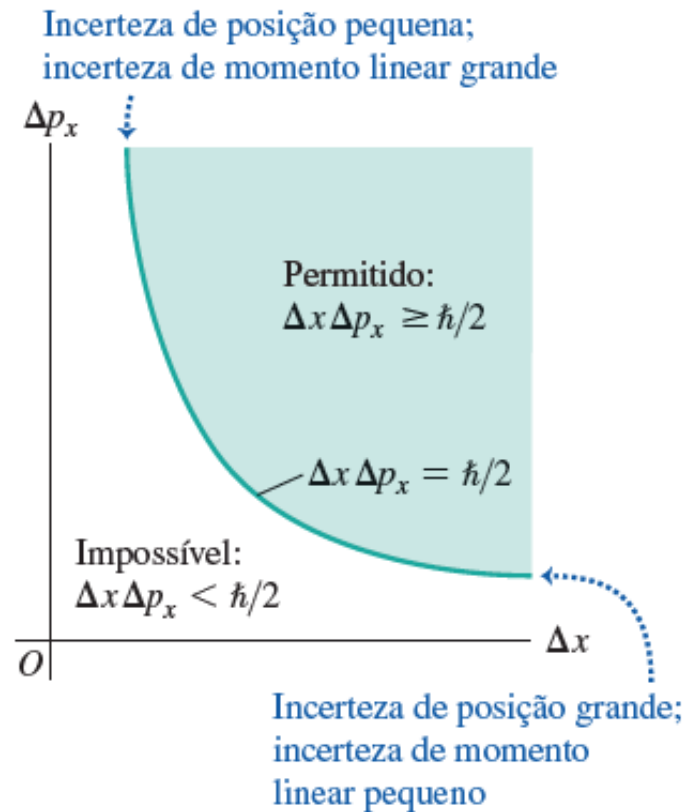
$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2}$$

# Princípio de incerteza

princípio de incerteza

$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2}$$

- ❑ Temos um limite na determinação simultânea da posição e o momento de partículas microscópicas.



# Onda de De Broglie



Louis De Broglie  
(1892-1985)



Nobel 1929

- ❑ Louis De Broglie (Príncipe de Monaco), historiador, postulou em 1924 em sua tese de doutorado que partículas também possuiriam um comprimento de onda, uma onda de matéria.
- ❑ O físico francês relacionou o comprimento de onda ( $\lambda$ ) com a quantidade de movimento ( $p$ ) da partícula, mediante a fórmula

$$\lambda_{broglie} = \frac{h}{p} \quad \text{Comprimento de onda de De Broglie}$$

- ❑ De Broglie propôs que os elétrons sofreriam difração na fenda simples e interferência na fenda dupla como os fótons.
- ❑ Em 1927, o experimento de Davisson-Germer confirmou essa previsão de De Broglie, estabelecendo a dualidade onda-partícula da matéria.
- ❑ Em 1929, recebeu o Prêmio Nobel pela descoberta da natureza ondulatória do elétron



## Onda de De Broglie

Comprimento de onda de De Broglie para uma bola de futebol

$$m = 2,0 \text{ kg}$$
$$v = 10 \text{ m/s}$$

$$\lambda_{\text{broglie}} = \frac{h}{p} = \frac{6,6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{(2,0 \text{ kg})(10 \frac{\text{m}}{\text{s}})} = 3,3 \times 10^{-35} \text{ m}$$

Comprimento de onda muito pequeno !!!

Comprimento de onda de De Broglie para um eletron

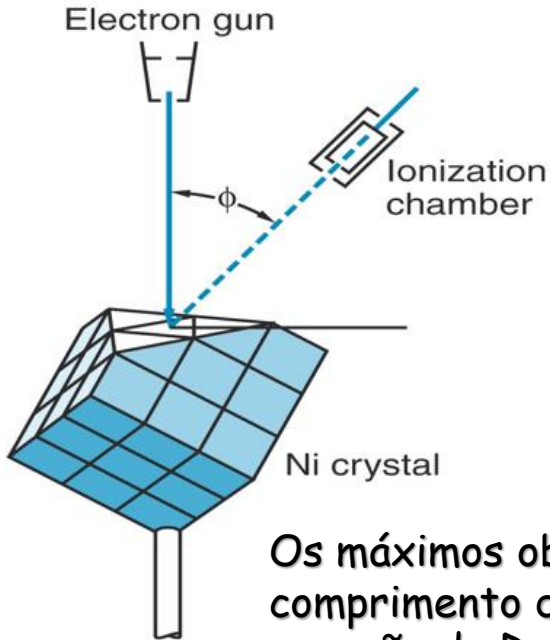
$$m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$
$$K = 100 \text{ eV}$$

$$\lambda_{\text{broglie}} = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mK}} = \frac{6,6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{\sqrt{2 \times (9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})(100 \text{ eV})}} = 1,2 \times 10^{-10} \text{ m}$$

Distâncias interatômicas

# Experiência Davisson-Germer

- ❑ Difração de elétrons por cristal (1927).
- ❑ Elétrons incidindo em um cristal.

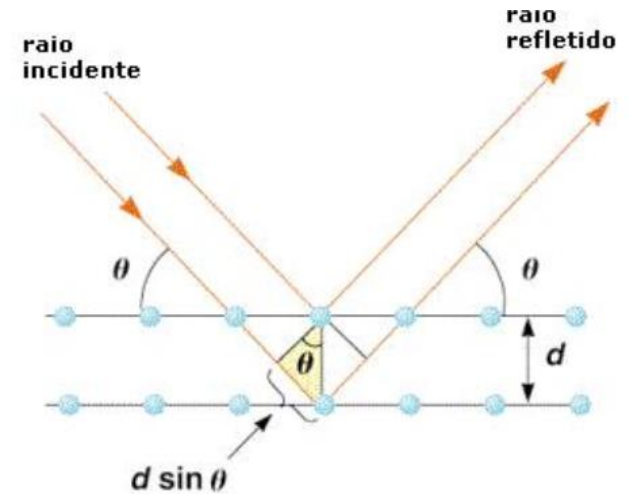


Os máximos observados comprovavam que o comprimento de onda era o mesmo que o obtido pela equação de De Broglie **para os elétrons**.

$$V = 54 \text{ V} \Rightarrow E = 54 \text{ eV} = 8.64 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$E = \frac{p^2}{2m}, \quad p = \sqrt{2mE}, \quad \lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

$$\lambda_B = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 8.6 \times 10^{-18} \text{ J}}} = 1.67 \text{ \AA}$$



Lei de Bragg  $\Rightarrow$  Ocorrerá interferência se a diferença de caminho for múltiplo do comprimento de onda.

$$2d \sin(\theta) = n\lambda$$

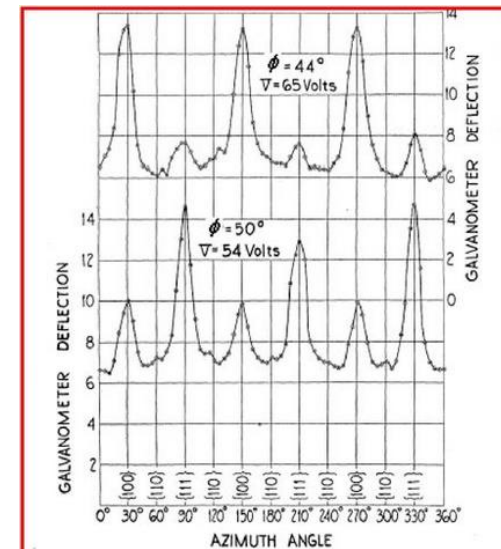


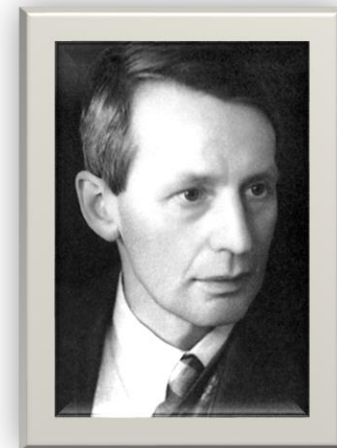
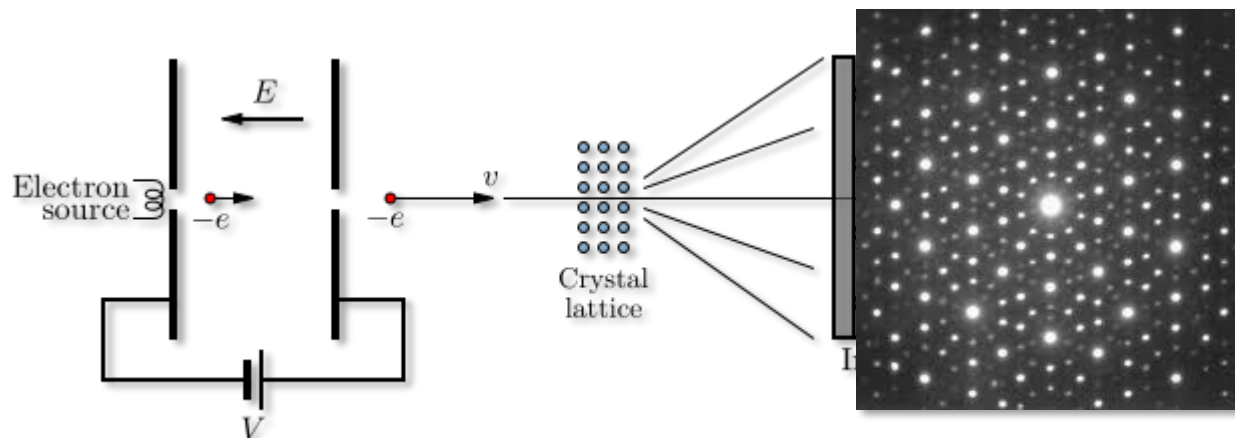
Fig. 11. Azimuth scattering curves through the "54-volt" electron beam and through the "65-volt" electron beam.

# Difração elétrons - experiência G. P. Thompson

**1927:** Experimentos com metais: Difração em folhas finas de metais revelaram definitivamente a natureza ondulatória do elétron.

**1937:** Prêmio Nobel para Thomson e Davisson

Com cristais:



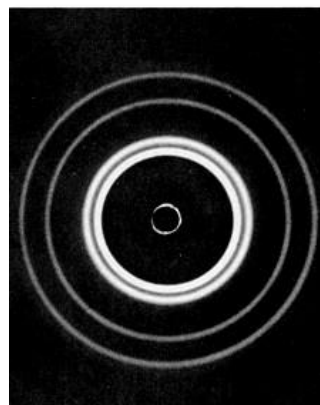
G. P. Thompson  
(1892-1975)



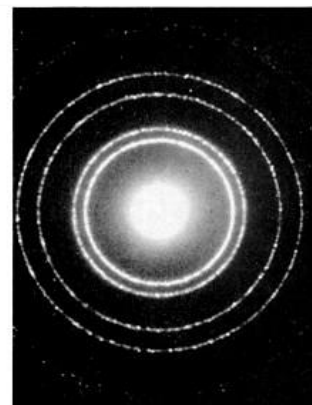
Nobel 1937

Com pó de alumínio:

Raio-x

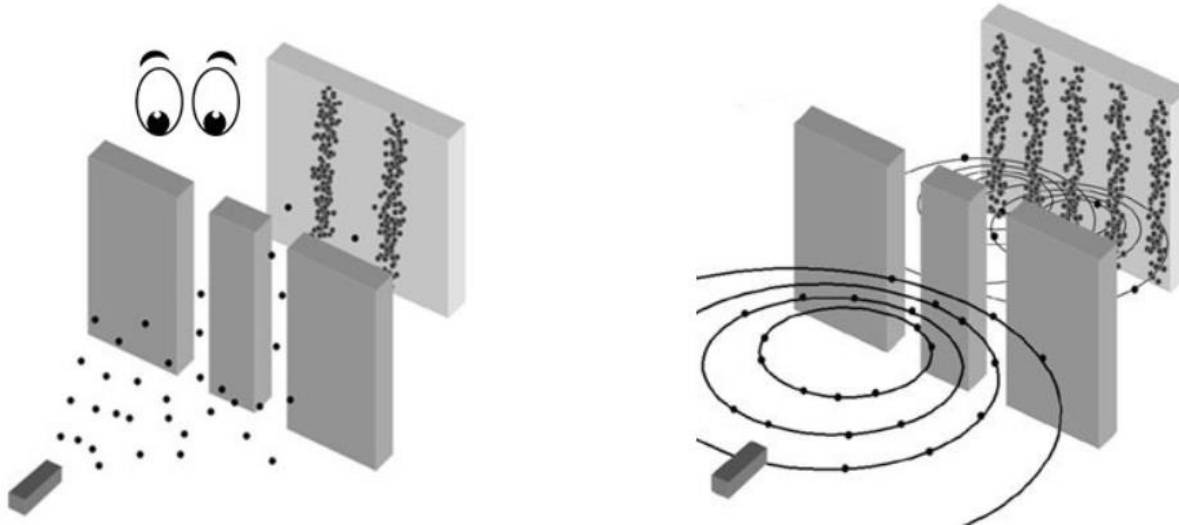


eletrons

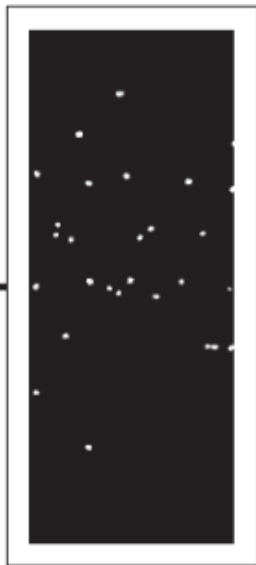


# Experimento fenda dupla com eletrons

Figura: <https://dcvcorp.com.br/?p=3363>



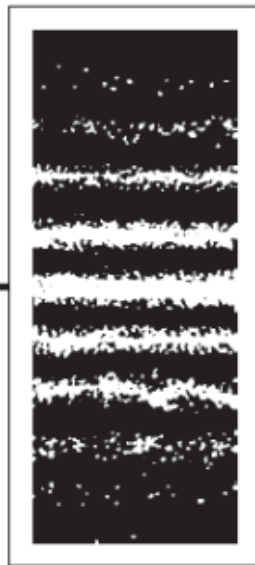
(b) Depois de 28 elétrons



Depois de 1000 elétrons

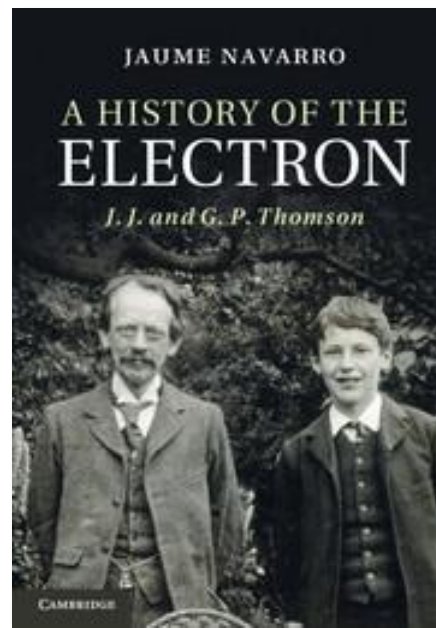


Depois de 10 000 elétrons



## “Demonstração da natureza ondulatória do elétron”

J. J. Thomson ganhou o Nobel por demonstrar que o elétron é uma partícula,  
G. P. Thomson, seu filho, ganhou o Nobel por demonstrar que este é uma onda



- ❑ 1915 - Nobel para W. H. Bragg e W. L. Bragg
- ❑ 1918 - Nobel para Max Planck - Quantização da energia
- ❑ 1921 - Nobel para Albert Einstein - efeito fotoelétrico e idéia do fótons.
- ❑ 1922 - Nobel para Niels Bohr
- ❑ 1924 - Louis De Broglie propõe a ideia de que partículas teriam comportamento dual.
- ❑ 1927 - Thompson e Davisson-Germer realizaram experiência de difração de elétrons comprovando as ideia de De Broglie.
- ❑ 1927 - Nobel para Arthur Compton pelo Espalhamento compton
- ❑ 1929 - Nobel para De Broglie
- ❑ 1932 - Nobel para W. Heisenberg pelo desenvolvimento da mecânica quântica.
- ❑ 1933 - Nobel para Schrodinger e Dirac pela teoria quântica para átomos.
- ❑ 1935 - Nobel para James Chadwick pela descoberta do nêutron.
- ❑ 1936 - Nobel para Andersson e Hess pela descoberta da radiação cósmica e pósitron.
- ❑ 1937 - Nobel para Thompson e Davisson pela descoberta experimental da difração dos elétrons.