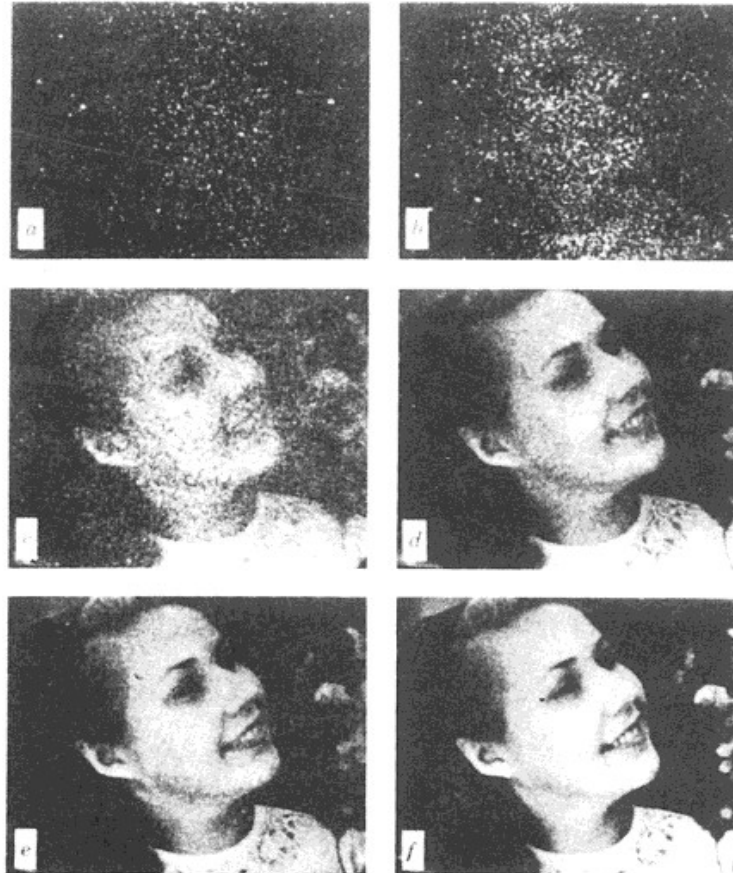


LUZ – ONDA OU PARTÍCULA?

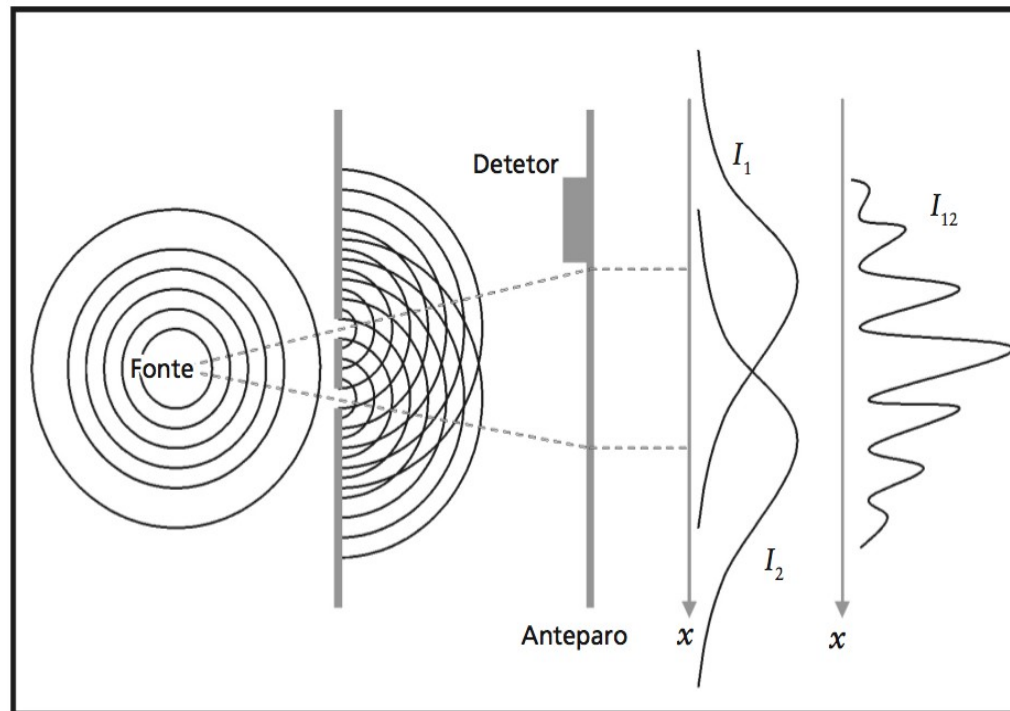
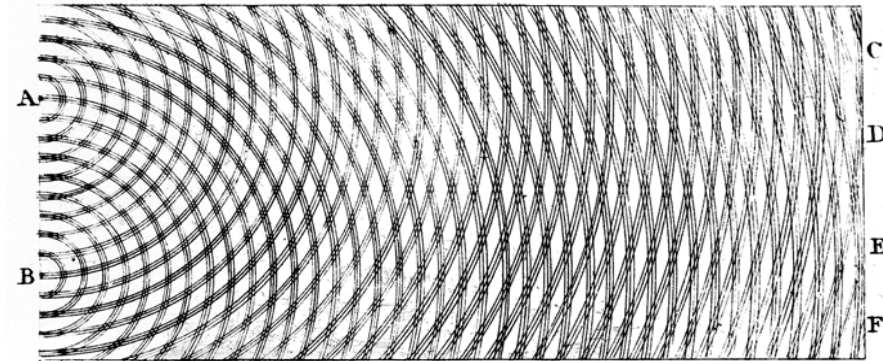
Experiências fotográficas cuidadosas feitas com luz muito atenuada mostram que ela é, de fato, detectada de forma granular – fóton a fóton

Fig. 2-22 Series of photographs showing how the quality of an image improves as the number of photons contributing to it increases. The approximate numbers of photons involved in each exposure were: (a) 3×10^3 (b) 1.2×10^4 (c) 9.3×10^4 (d) 7.6×10^5 (e) 3.6×10^6 (f) 2.8×10^7 [Figure reproduced from A. Rose, J. Opt. Sci. Am. 43, 715 (1953).]



INTERFERÊNCIA COM 2 FENDAS

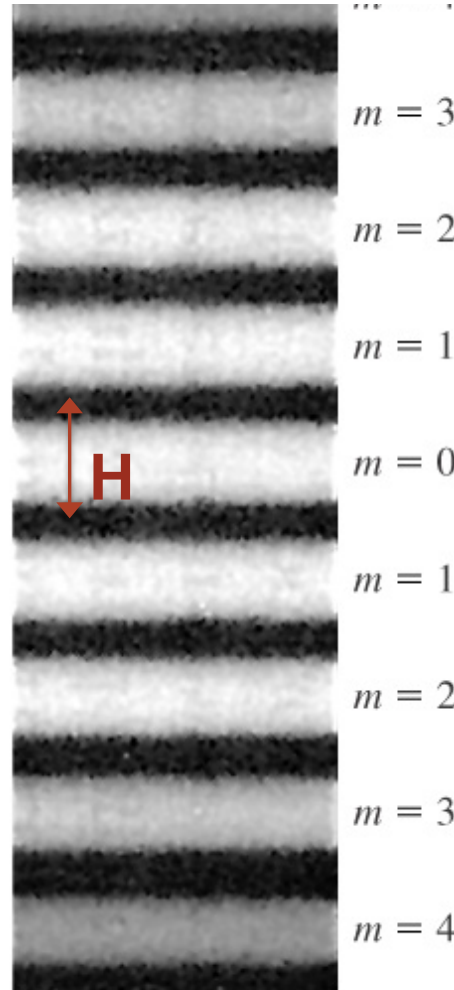
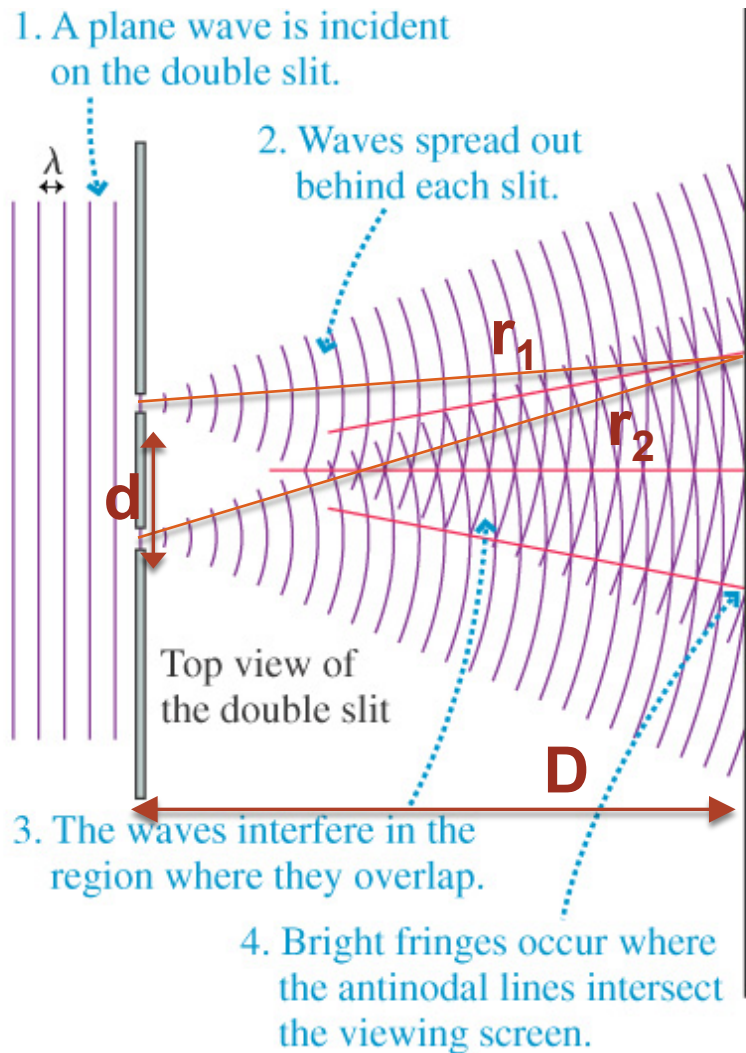
Em 1801, **Thomas Young** descobriu que uma onda (seja de água, de luz, ou qualquer outra) produz um **padrão de interferência** característico ao passar por duas frestas



Fenda dupla com ondas clássicas



INTERFERÊNCIA COM 2 FENDAS



✓ Interferência construtiva

máxima quando

$$|r_1 - r_2| = m\lambda$$

(crista encontra crista)

✓ Interferência destrutiva

máxima quando

$$|r_1 - r_2| = m + \frac{1}{2}\lambda$$

(crista encontra vale)

Distância entre máximos consecutivos

$$H = \lambda D / d$$



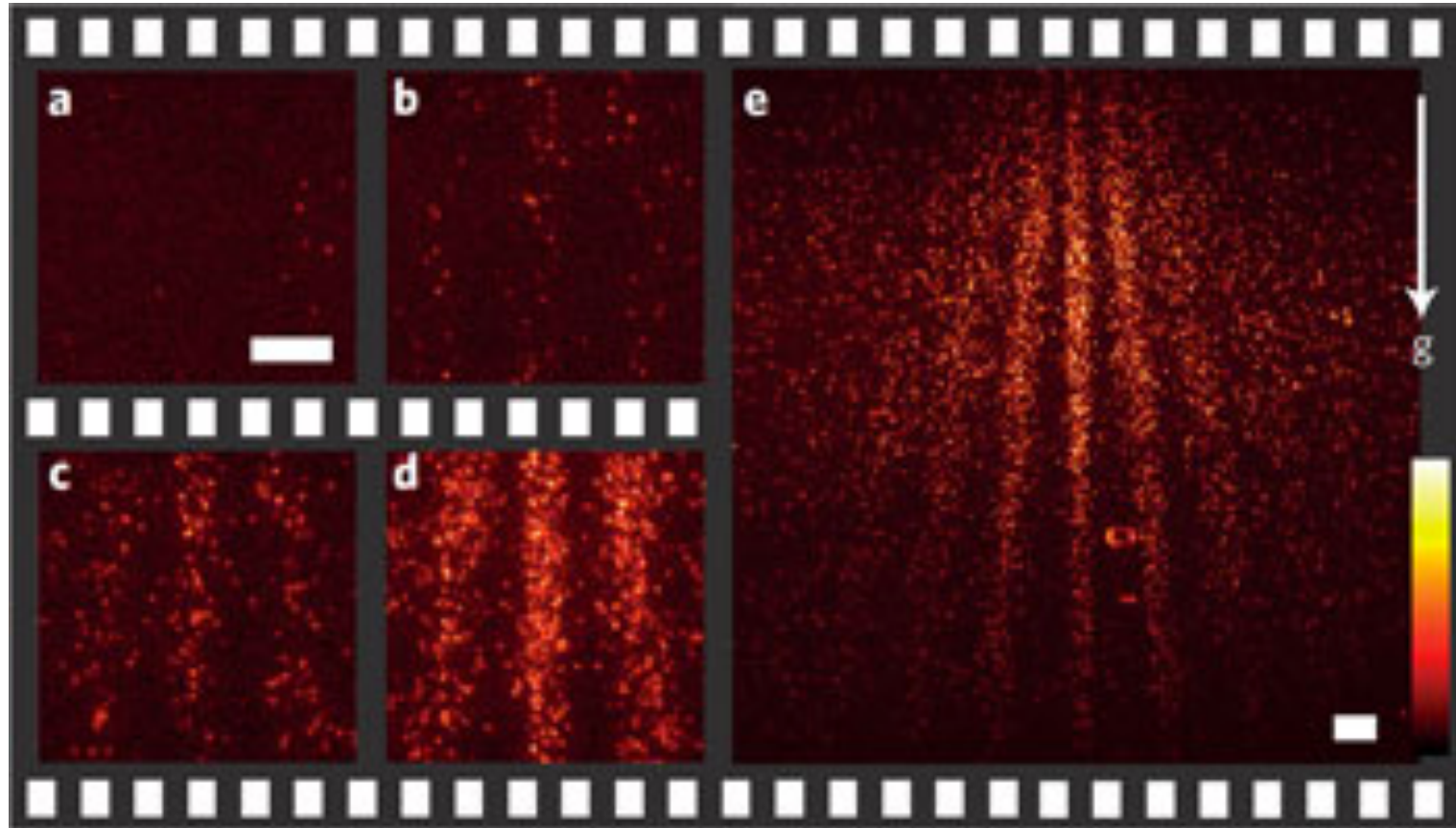
INTERFERÊNCIA DE 2 FENDAS

Pergunta: O que será que acontece quando fazemos essa mesma experiência com luz de muito baixa intensidade?

- A) O padrão de interferência aparece imediatamente em todo o anteparo de uma vez, de uma forma facilmente distinguível (alto contraste entre áreas claras e escuras).
- B) O padrão de interferência vai aparecendo de forma lenta mas contínua, em todo o anteparo de uma vez. Inicialmente é difícil de distinguir (baixo contraste entre áreas claras e escuras), mas vai ficando cada vez mais distinto.
- C) O padrão de interferência vai aparecendo de forma lenta mas granular. Inicialmente é difícil de distinguir, mas vai ficando cada vez mais distinto.
- D) Não aparece um padrão de interferência



INTERFERÊNCIA DE 2 FENDAS

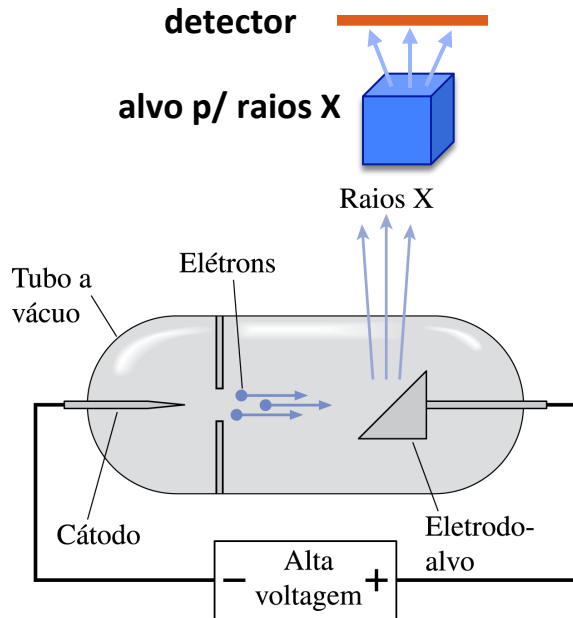


https://www.youtube.com/watch?v=6Q4_nl0ICao

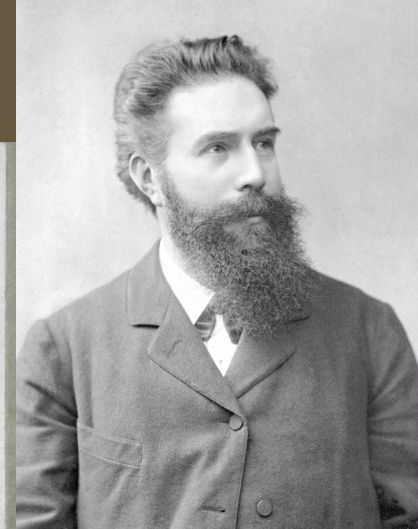
Link p/ vídeo: <http://bit.ly/1mhBtTU>



RAIOS-X Wilhelm Roenrgan 1895

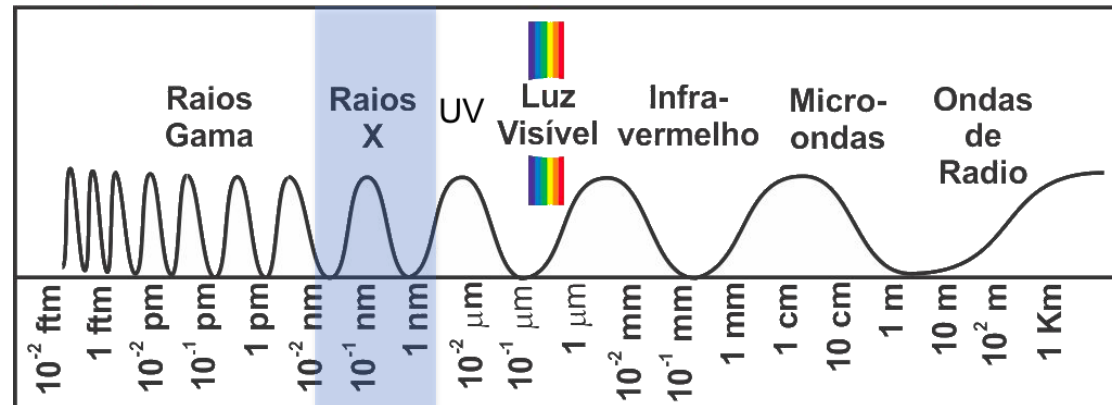


1a imagem do interior de um corpo humano (mão da esposa do Roentgen!)



Roentgen: 1º Nobel de Física (1901)

Fonte de raios-X: tubo de raios catódicos de alta voltagem. Os raios-X são emitidos após a colisão dos elétrons com um alvo. Eles são direcionados para um 2º alvo, atrás do qual há uma placa detectora.



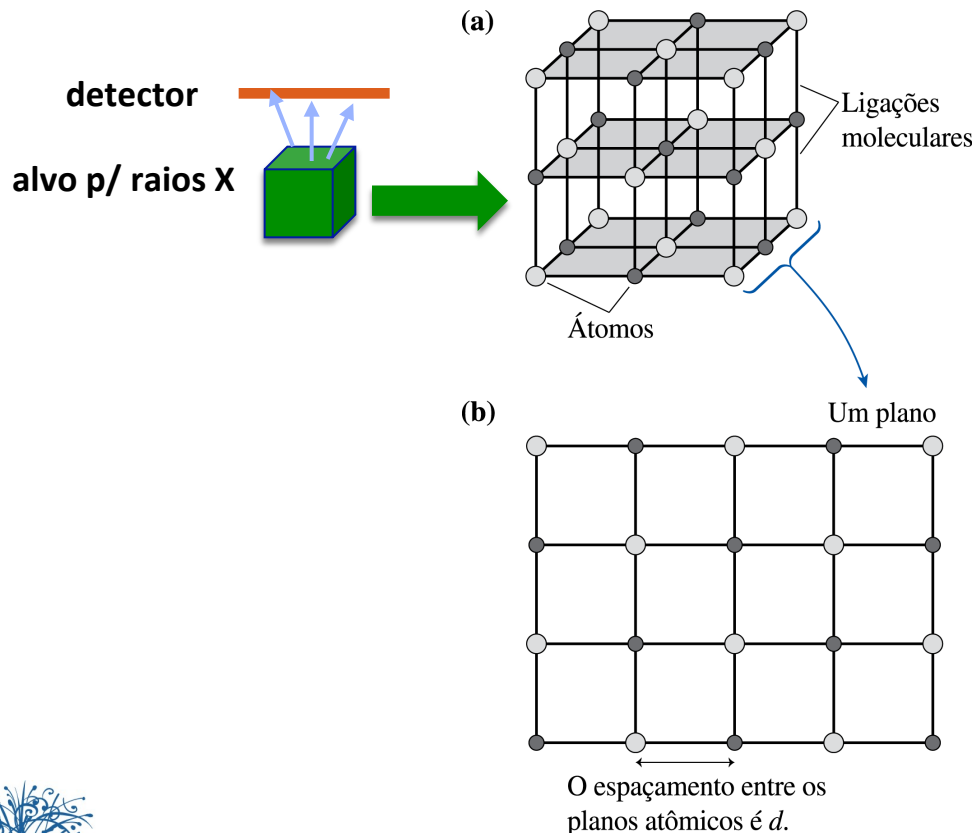
Comp. de onda: $10^{-11}\text{m} - 10^{-8}\text{m}$

Energia $hc / \lambda \sim 100 \text{ keV a } 100 \text{ eV}$

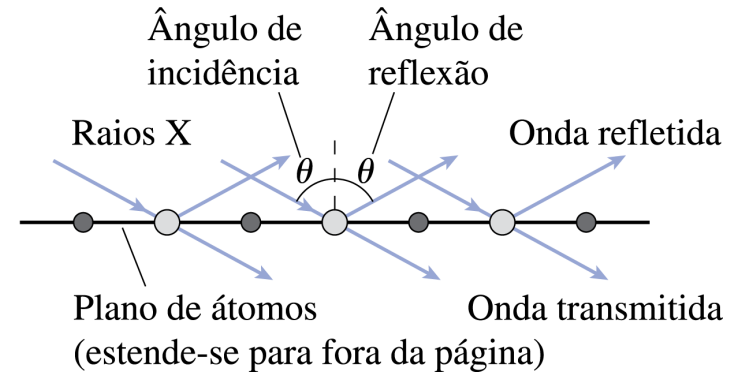


DIFRAÇÃO DE RAIOS-X BRAGG 1912

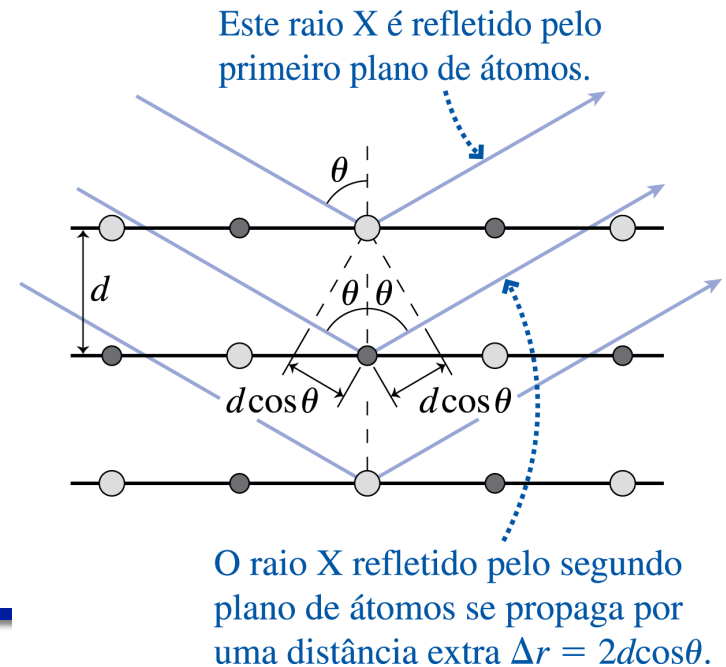
- ✓ W. H. Bragg e W. L. Bragg (pai e filho) observaram o padrão de raios-X difratados para frente, ou refletidos para trás, por 'alvos' de material cristalino.



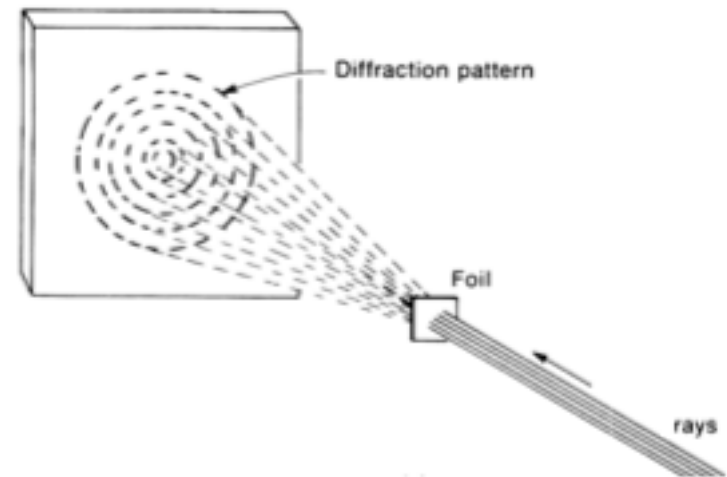
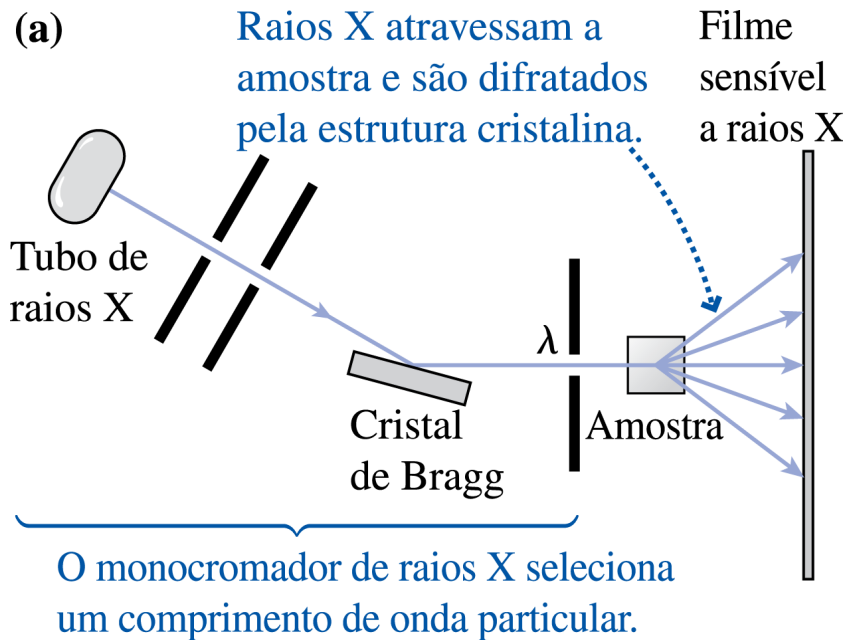
- (a) Os raios X são transmitidos e refletidos em um plano de átomos.



- (b) As reflexões provenientes de planos paralelos interferem.



DIFRAÇÃO DE RAIOS-X BRAGG 1912



DIFRAÇÃO DE RAIOS-X BRAGG 1912

Lei de Bragg: Raios-X com comprimento de onda λ satisfazendo

$$2d \cos \theta = m \lambda$$

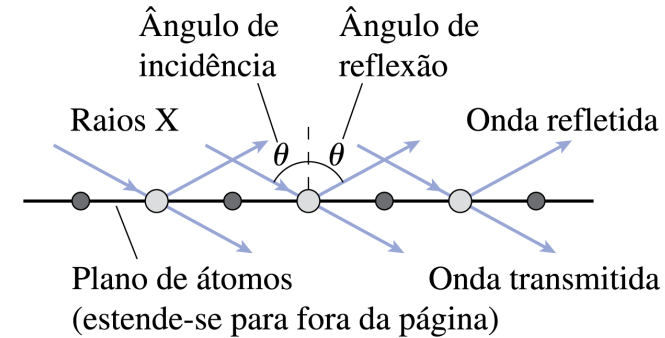
para algum inteiro m sofrem interferência construtiva

✓ Observando os ângulos onde isto ocorre permite inferir informação sobre a estrutura dos materiais, por exemplo que tipicamente

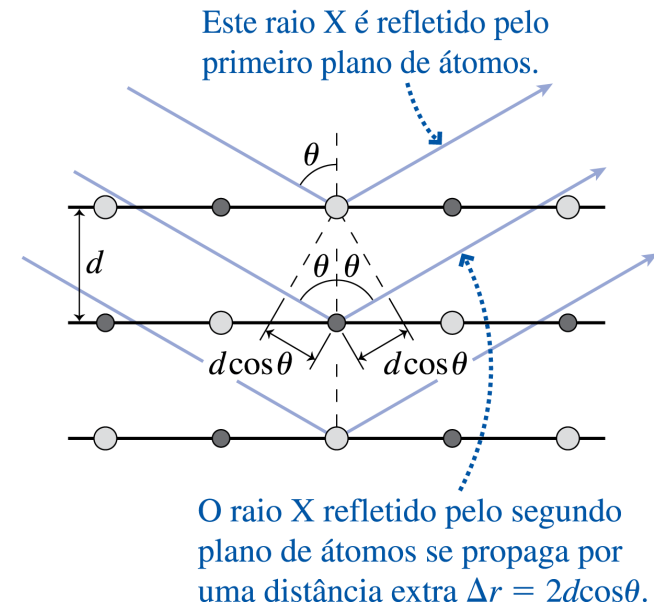
$$d \approx 10^{-10} \text{ a } 10^{-9} \text{ m}$$

distância interatômica $\approx$ tamanho dos átomos

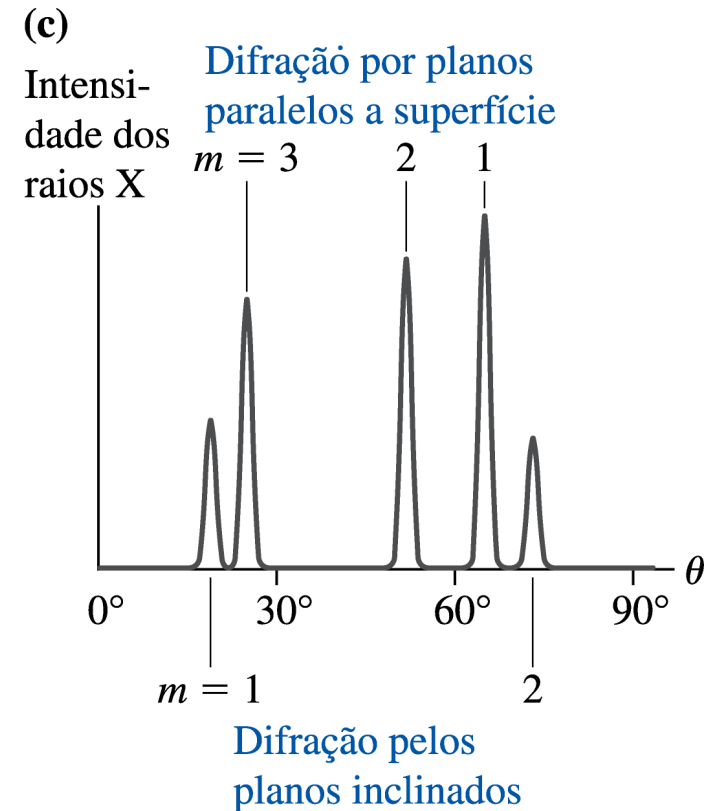
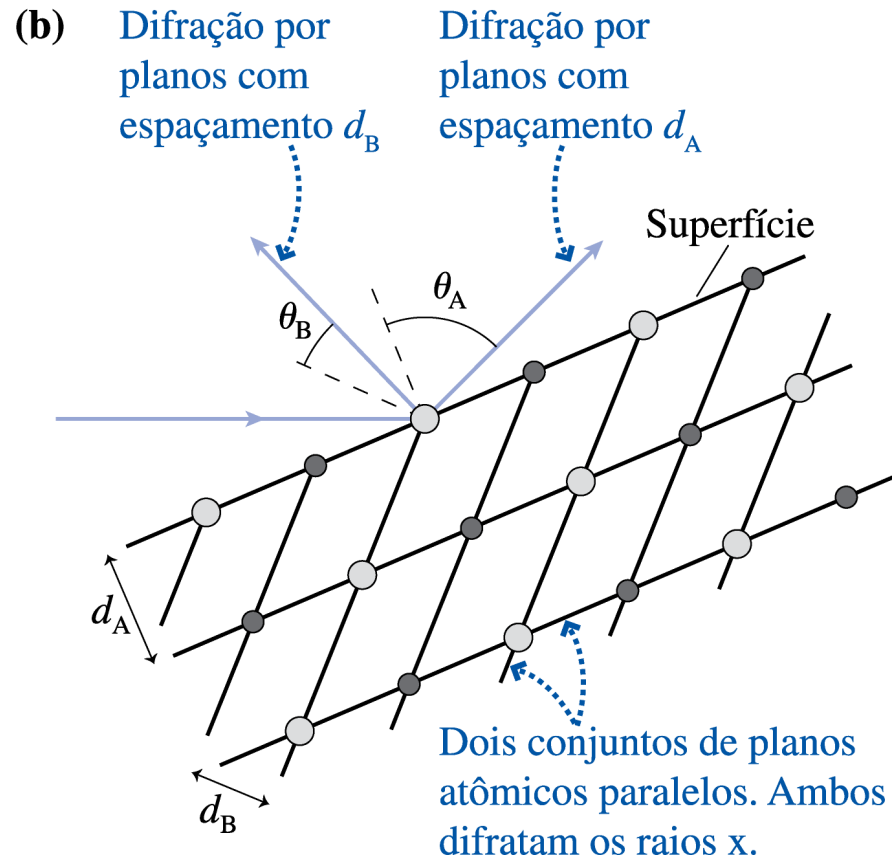
(a) Os raios X são transmitidos e refletidos em um plano de átomos.



(b) As reflexões provenientes de planos paralelos interferem.



DIFRAÇÃO DE RAIOS-X BRAGG 1912



ONDAS DA MATÉRIA - 1924



Louis-Victor de Broglie - francês

IDÉIA: A **luz** apresenta comportamento de partícula
NATUREZA – SIMETRIA

Portanto, '**partículas materiais**' como o **elétron** também deveriam ter comportamento ondulatório!

P/ fótons: $E = h\nu$, mas tb $E = pc \Rightarrow p = h\nu/c = h / \lambda$

- sugere que partículas tb devem ter um comprimento de onda associado

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

se $v \sim c$ deve-se usar o p relativístico (γmv)

Ex.: Qual o λ de de Broglie de uma pessoa caminhando com $v = 5$ m/s e $m = 80$ kg? R: $1,6 \times 10^{-36}$ m - imperceptível!

Ex. 39.5: Qual é o comprimento de onda de de Broglie de um elétron com energia cinética 1,0 eV? (Use: $h = 4,14 \times 10^{-15}$ eV.s)

R: $1,2 \times 10^{-9}$ m = 1,2 nm – igual ou maior que um átomo!



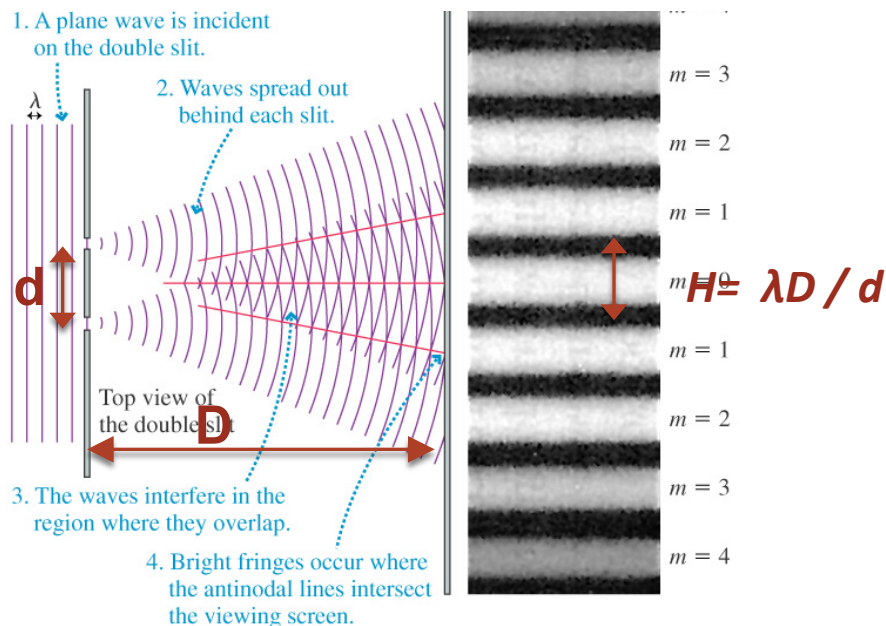
ONDAS DA MATÉRIA – como detectar?

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

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

Passo 1: ir ao lab e criar feixes de elétrons com energia controlada. Na época era possível criar feixes com energias entre $\sim 25 \text{ eV}$ e 10.00 eV

Passo 2: escolher um experimento típico de ondas e tentar replicar com elétrons.



Pergunta: Como é melhor realizar o experimento?

- a. feixe eletrônico de alta energia
- b. feixe eletrônico de baixa energia**
- c. não faz diferença

Energia menor $\rightarrow$ momento menor
 $\rightarrow \lambda$ maior
portanto espaçamento maior, mais fácil de ver.

ONDAS DA MATÉRIA – como detectar?

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

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

Para o feixe eletrônico de menor energia ($E = 25\text{eV}$), qual a ordem de grandeza do comprimento de onda?

$$H = \lambda D / d$$

- ✓ **Problema!** Mesmo a baixas energias, $\lambda \sim 2.4 \times 10^{-10} \text{ m}$ é MUITO PEQUENO

$$\lambda = h/p = h/(2Em_e)^{1/2}$$

$$\lambda = 2.4 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.24 \text{ nm}$$

Compare com luz visível:
 $\lambda \sim 400\text{-}700\text{nm}$

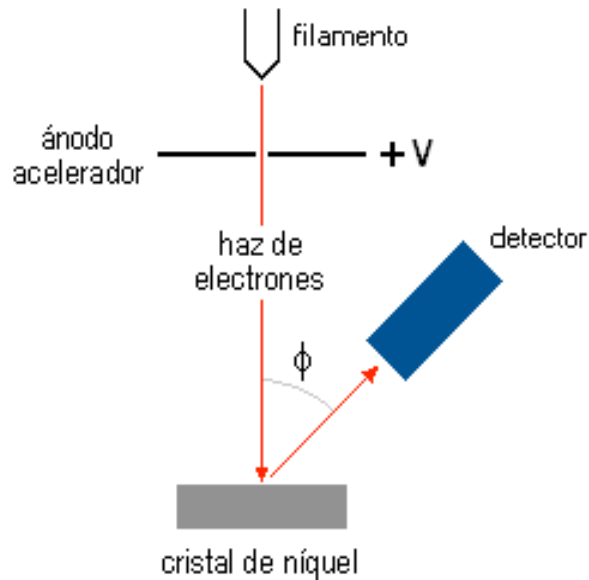
- ✓ Para aumentar H , poderíamos tentar reduzir a distância d ... difícil com a tecnologia de 1925!
- ✓ Outra opção: usar como fontes **átomos na superfície de um cristal** – fazer difração de elétrons!

Com fendas separadas de $d \sim 0,5\text{mm}$ e um equipamento de mesa ($D \sim 1\text{-}2\text{m}$), as franjas de interferência ficam ainda a distâncias microscópicas: $H \sim 1\mu\text{m}$ (facilmente obscurecidas por perturbações).

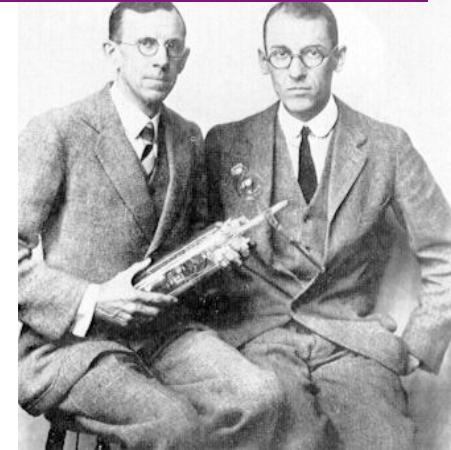


EXPERIMENTO: difração de elétrons – 1927

Davisson & Germer



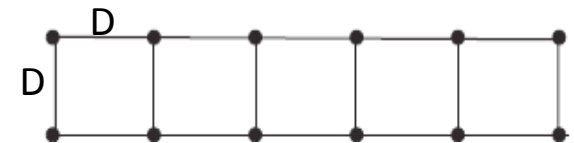
D & G estudaram a reflexão de um feixe de elétrons incidindo perpendiculares à superfície de um cristal puro de **Níquel**.



Observaram que, qdo os elétrons tinham energia **54eV**, o feixe era refletido preferencialmente a um ângulo $\phi = 50^\circ$

P: será que isso pode ser explicado pelas ondas de de Broglie?

Obs: já se sabia por difração de raios-X que o níquel tem espaçamento interatômico **D = 2,15Å**.



intensidad de esparcimiento

0

1

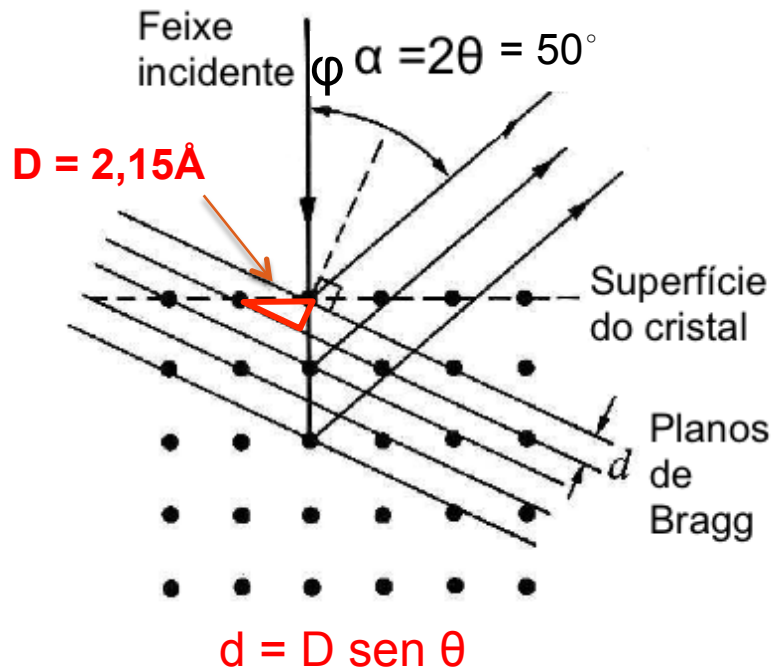
4

EXPERIMENTO: difração de elétrons – 1927

Davisson & Germer

Previsão de deBroglie: um elétron de energia 54eV tem comprimento de onda

$$\lambda_{\text{teo}} = \frac{1,24 \text{ nm}}{(54 \cdot 1,02)^{1/2}} = 1,67 \text{ \AA}$$



Lei de Bragg:

$$\lambda = 2d \cos \theta = 2 D \cos \theta \sin \theta = D \sin \varphi$$

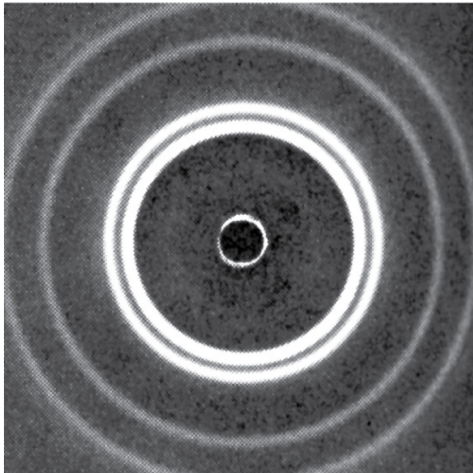
$$\lambda_{\text{exp}} = 1,65 \text{ \AA}$$



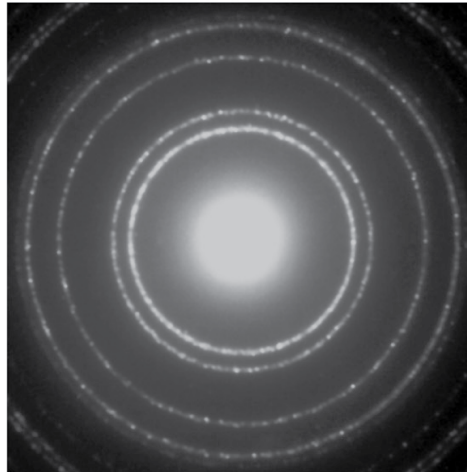
Relação de de Broglie funciona para *todas* as partículas!

Difração em alumínio: raios-x, elétrons, nêutrons

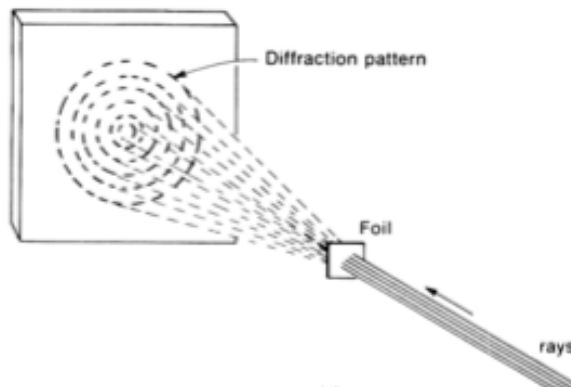
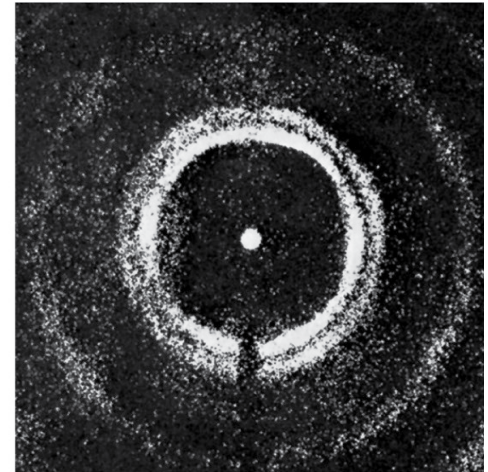
(a) Padrão de difração de raios X



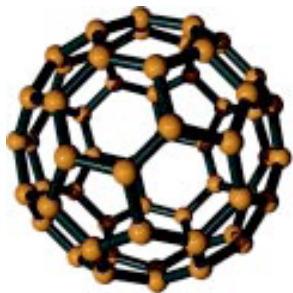
(b) Padrão de difração de elétrons



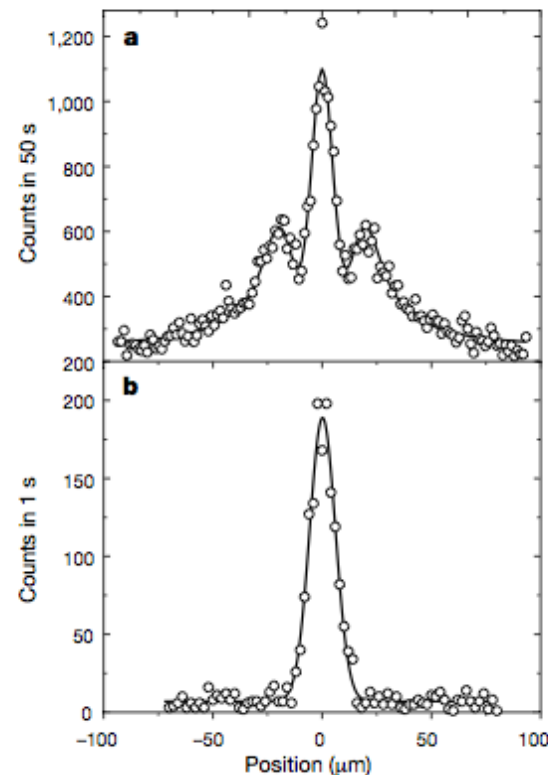
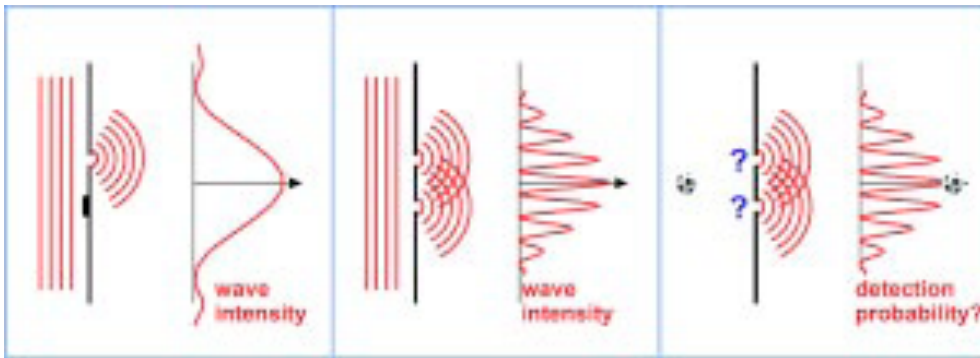
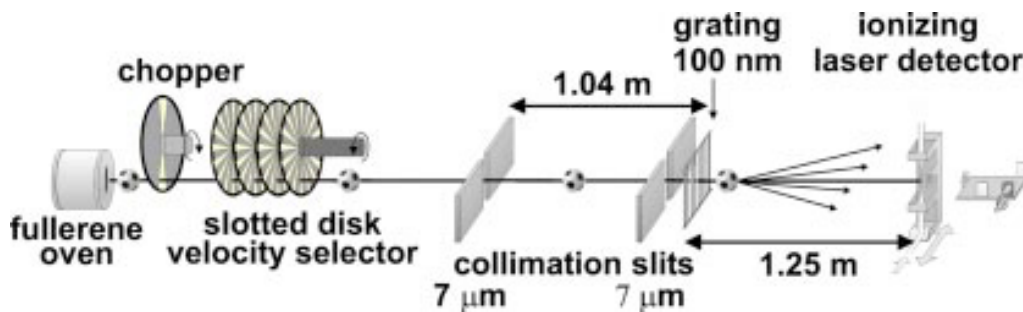
(c) Padrão de difração de nêutrons



DIFRAÇÃO DE MOLÉCULAS



Em 1999, pesquisadores na Áustria conseguiram demonstrar a difração de moléculas de C_{60} ('Buckybolas'), que pesam mais de 10^6 vezes mais do que um elétron!

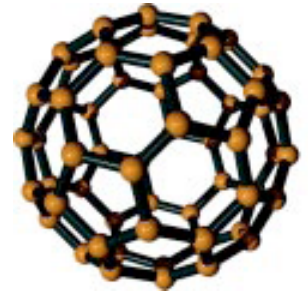


(a) Com fendas (b) Sem fendas

Quantum interference experiments with large molecules

Olaf Nairz, Markus Arndt, and Anton Zeilinger

Institut für Experimentalphysik, Universität Wien, A-1090 Wien, Austria



Wave–particle duality is frequently the first topic students encounter in elementary quantum physics. Although this phenomenon has been demonstrated with photons, electrons, neutrons, and atoms, the dual quantum character of the famous double-slit experiment can be best explained with the largest and most classical objects, which are currently the **fullerene molecules**. The soccer-ball-shaped **carbon cages C60** are large, massive, and appealing objects for which it is clear that they must behave like particles under ordinary circumstances. We present the results of a multislit diffraction experiment with such objects to demonstrate their wave nature. The experiment serves as the basis for a discussion of several quantum concepts such as coherence, randomness, complementarity, and **wave–particle duality**. In particular, the effect of longitudinal ~spectral! coherence can be demonstrated by a direct comparison of interferograms obtained with a thermal beam and a velocity selected beam in close analogy to the usual two-slit experiments using light.

© 2003 American Association of Physics Teachers. @DOI: 10.1119/1.1531580

