



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Disciplina: Física IV – Física Moderna

Instrutor: Prof. Carlos Eduardo Souza - Cadu

Sala: A2-15 (IF, andar 1P)

Email: carlooseduardosouza@id.uff.br

Site do curso: http://cursos.if.uff.br/fisicaIV_XXI_0216/



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Disciplina: Física IV – Física Moderna

Capítulo 39

Quantização



Postulados de Einstein

Em 1905 (mesmo ano da Teoria da Relatividade), Einstein propôs um modelo simples capaz de explicar todas as características do **Efeito Fotoelétrico**. Por esse feito, recebeu o Prêmio Nobel de 1921.

O modelo de Einstein consiste de 3 postulados:

- 1) A luz de frequência f consiste em unidades ou 'quanta' discretas, "Fótons", cada uma das quais carrega energia $E = hf$, e se propaga com velocidade c .
- 2) Os quanta de luz são emitidos ou absorvidos integralmente. Podem ser emitidos 1, 2, 3, ... quanta, mas não $1/2$ quantum.
- 3) Um quantum da luz, quando absorvido pelo metal, transfere a *totalidade* de sua energia a um único elétron.



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

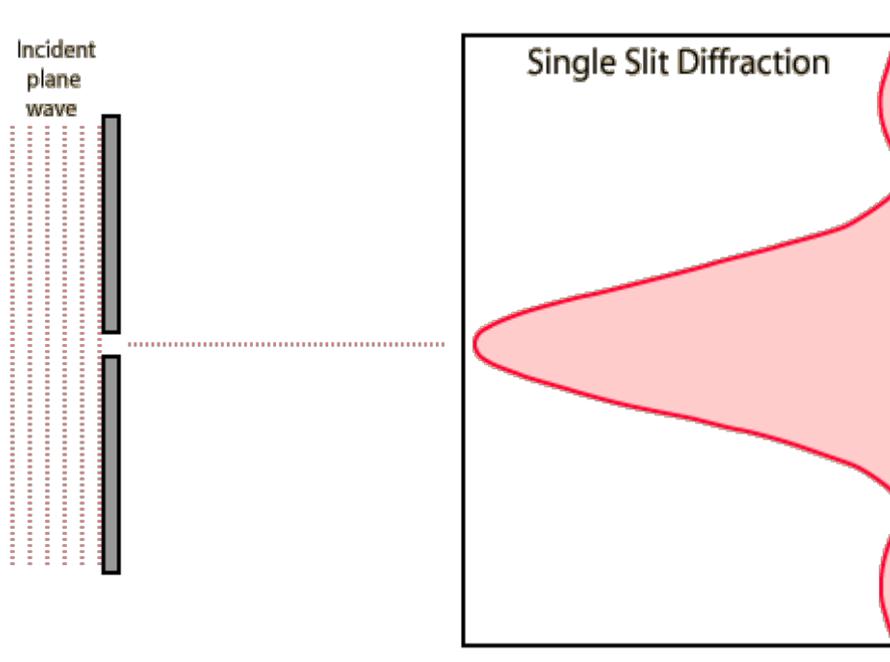
Luz: onda ou partícula?



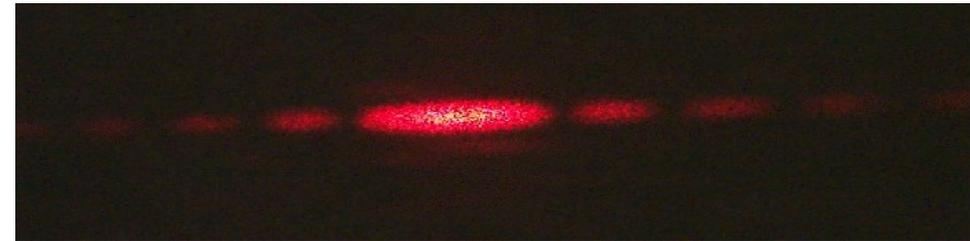
Luz: onda ou partícula?

O efeito fotoelétrico parece indicar que a luz é composta de **partículas**. Porém, quando falamos em frequência, comprimento de onda, estamos falando nas propriedades de uma **onda**. De fato, a luz apresenta propriedades típicas de ondas, como a **difração** e a **interferência**.

Difração por uma Fenda simples:

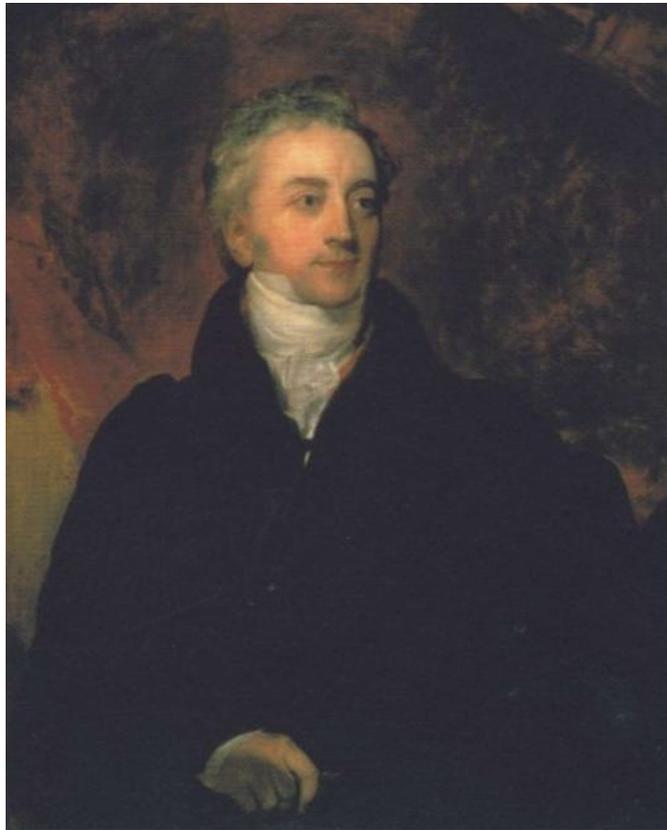


Equivalente: Difração por um fio de cabelo:

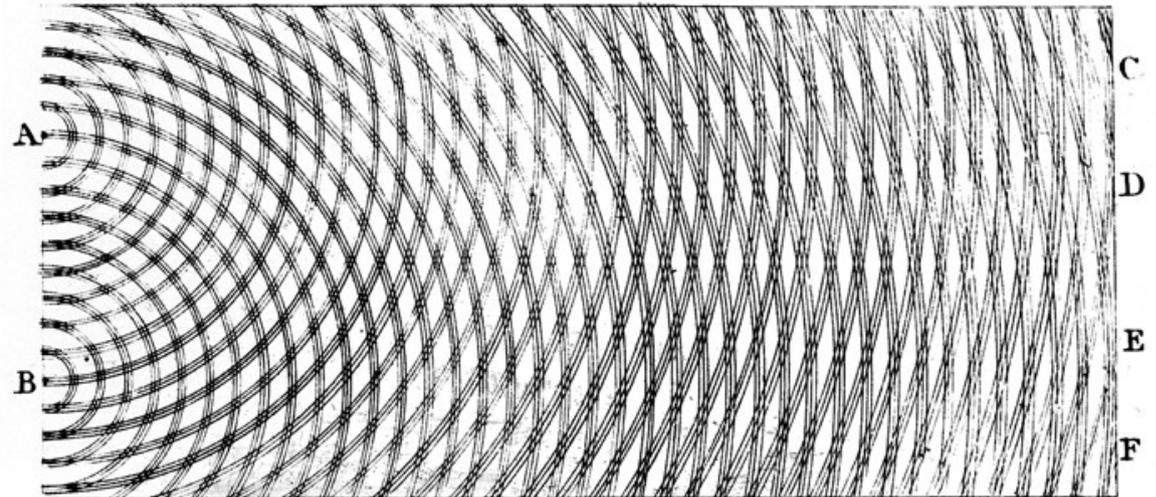




Interferência com duas fendas

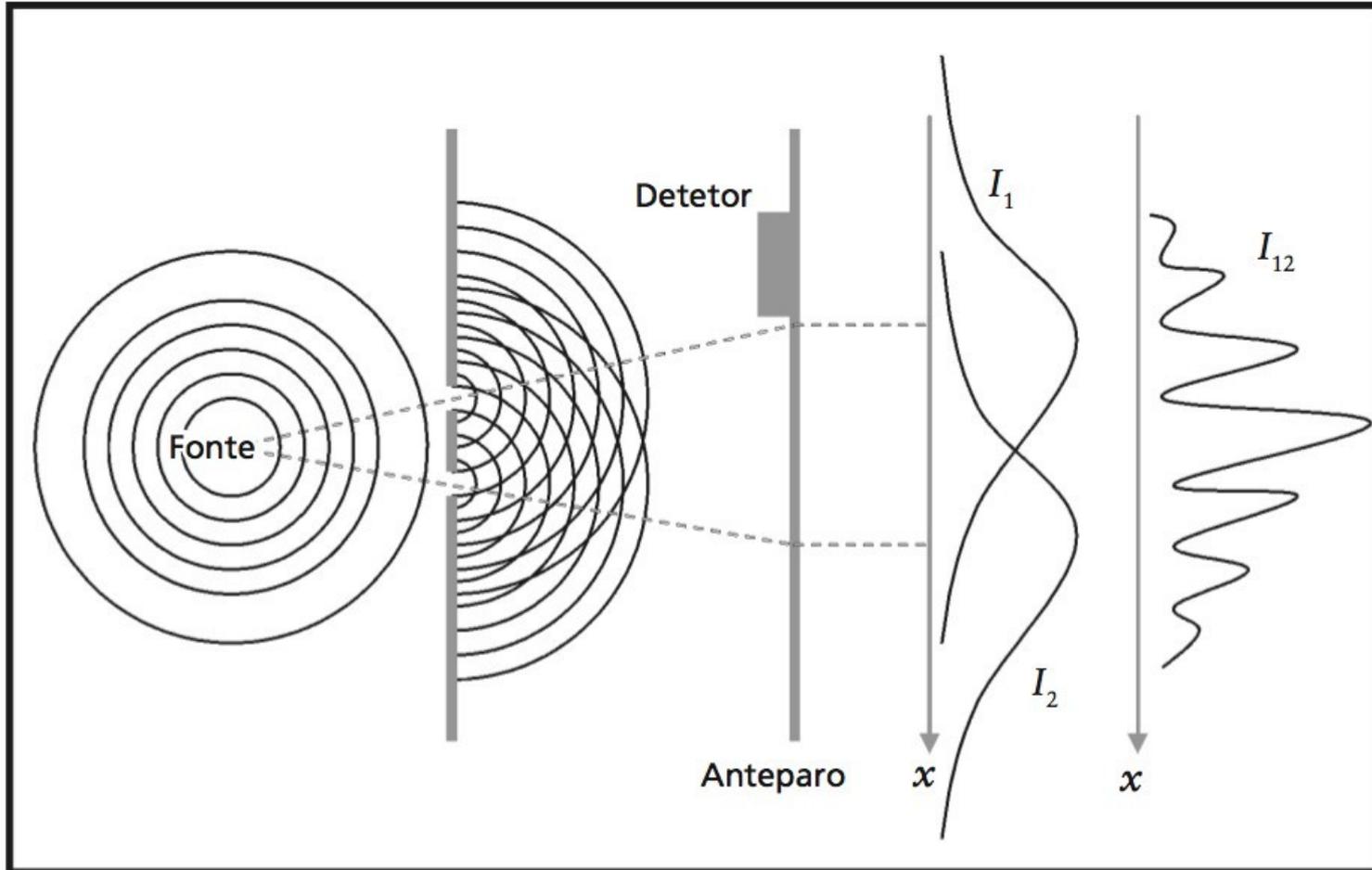


Em 1801, Thomas Young descobriu que uma onda (seja de água, de luz, ou qualquer outra) produz um padrão de interferência característico ao passar por duas frestas (fendas)





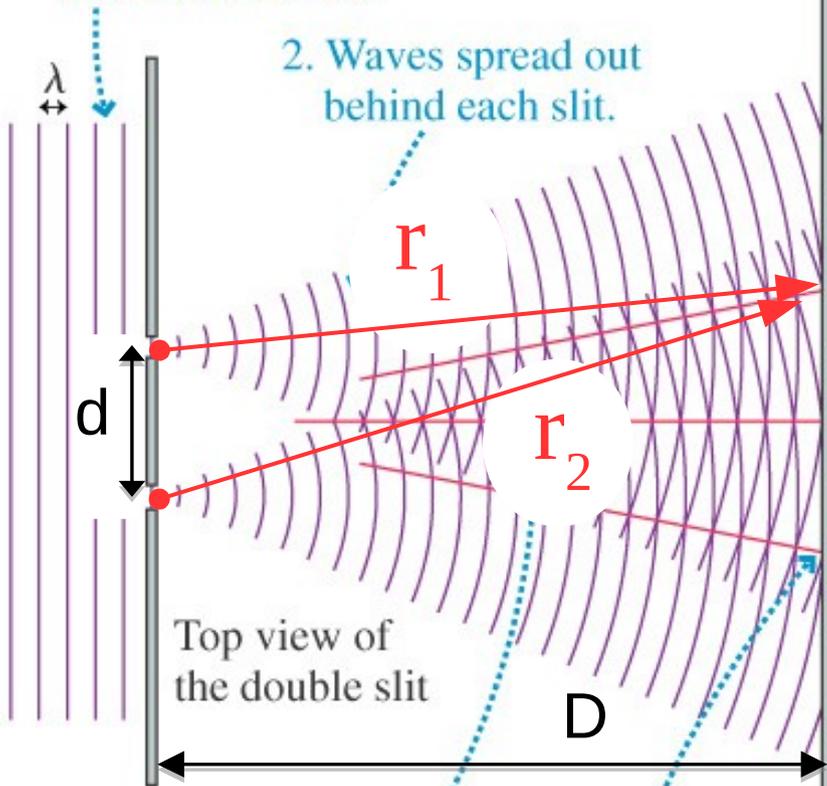
Interferência com duas fendas





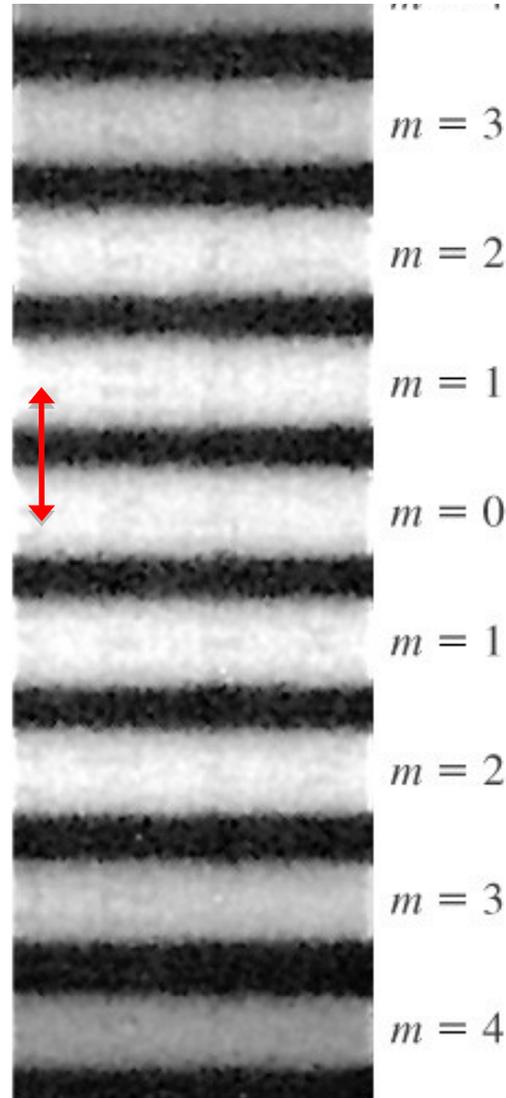
Interferência com duas fendas

1. A plane wave is incident on the double slit.



3. The waves interfere in the region where they overlap.

4. Bright fringes occur where the antinodal lines intersect the viewing screen.



- Interferência construtiva

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

- Interferência destrutiva

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



Interferência com duas fendas

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 uniforme, 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, i.e, alguns pontos aparecem antes de outros. Inicialmente é difícil de distinguir, mas vai ficando cada vez mais distinto.
- D) Não aparece um padrão de interferência



Interferência com duas fendas

Vamos ver um vídeo que mostra o anteparo do experimento...



Interferência com duas fendas

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 uniforme, 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, i.e, alguns pontos aparecem antes de outros. Inicialmente é difícil de distinguir, mas vai ficando cada vez mais distinto.**
- D) Não aparece um padrão de interferência



Interferência com duas fendas

Outra revolução na Física...



Ondas de Matéria (1924)

Louis-Victor de Broglie – estudante francês

IDÉIA: Já que a luz apresenta comportamento de partícula, não poderia haver uma simetria e ‘partículas’ como o elétron também terem comportamento ondulatório?

P/ Fótons:

$$E = hf, \text{ mas tb } E = pc \rightarrow p = hf/c = h/\lambda$$

LdB sugere que partículas tb devem ter um comprimento de onda associado, dado por

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

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





Ondas de Matéria (1924)

Louis-Victor de Broglie – estudante francês

IDÉIA: Já que a luz apresenta comportamento de partícula, não poderia haver uma simetria e ‘partículas’ como o elétron também terem comportamento ondulatório?

Ex.: Qual o λ de deBroglie de uma pessoa caminhando com $v = 5 \text{ m/s}$ e $m = 80 \text{ kg}$?

R: $1,6 \times 10^{-36} \text{ m}$ - imperceptível!

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

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





Ondas de Matéria (1924)

Louis-Victor de Broglie – estudante francês

IDÉIA: Já que a luz apresenta comportamento de partícula, não poderia haver uma simetria e ‘partículas’ como o elétron também terem comportamento ondulatório?

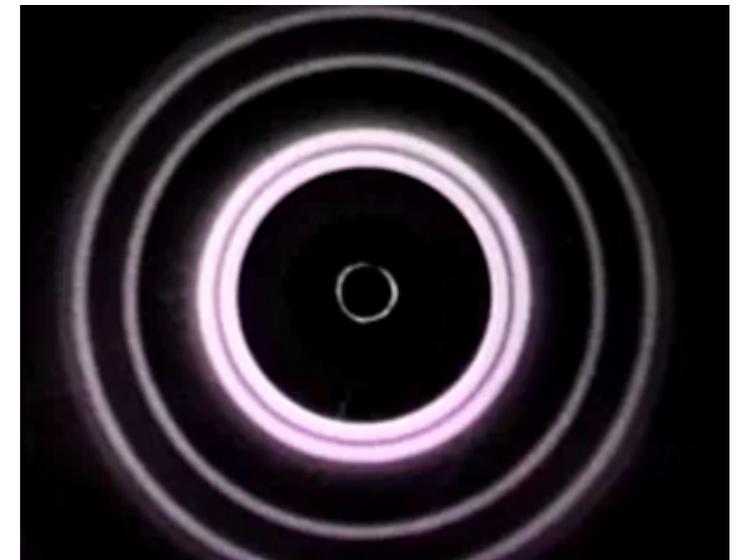
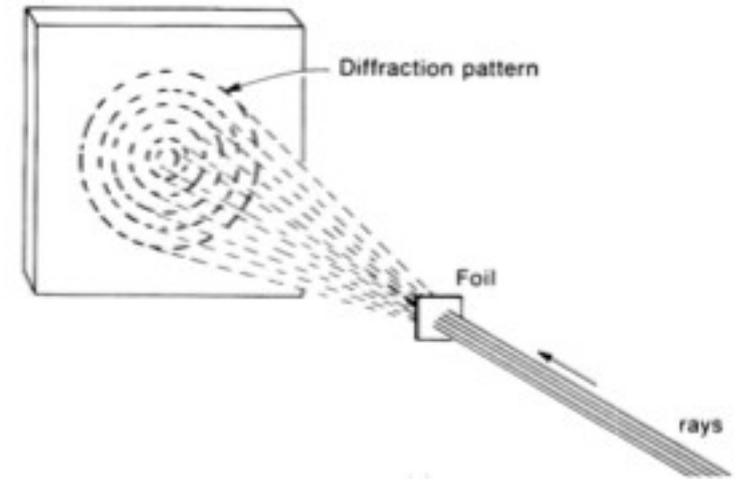
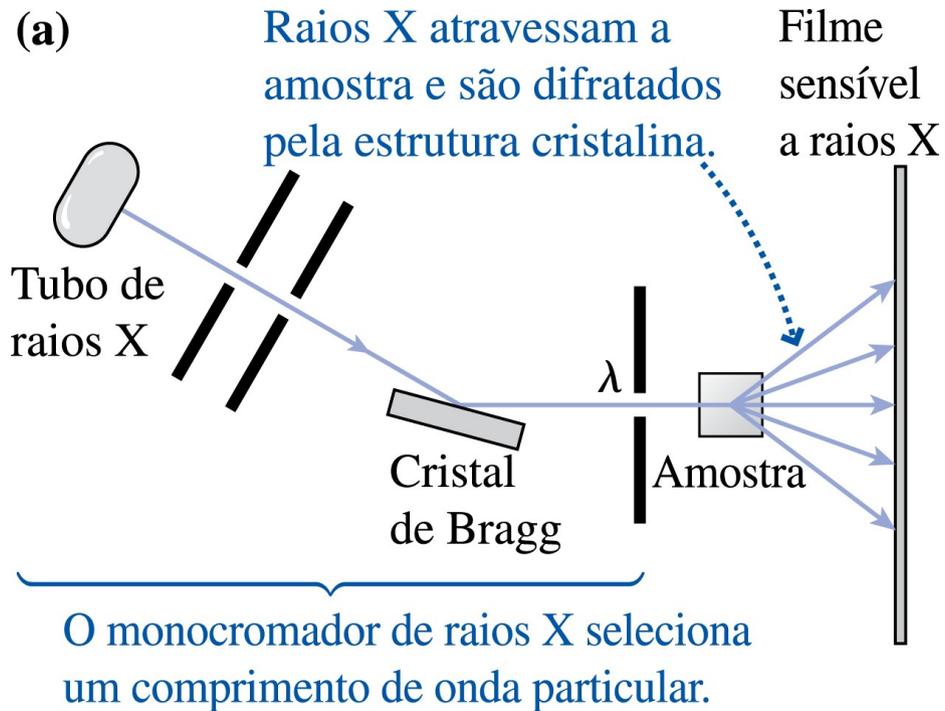
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Frente ao ceticismo de alguns, sugere que se tente realizar experiências típicas de onda, que poderiam revelar a existência de difração, interferência, etc com partículas





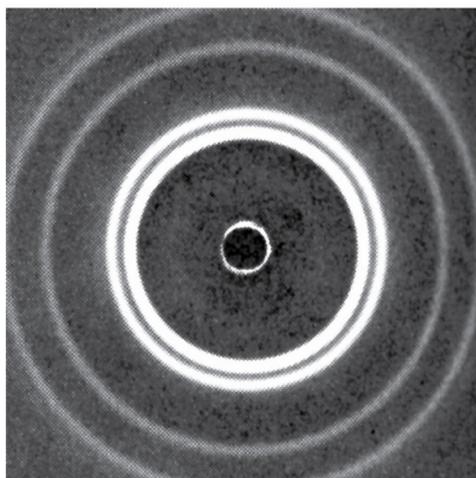
Difração de raios-X



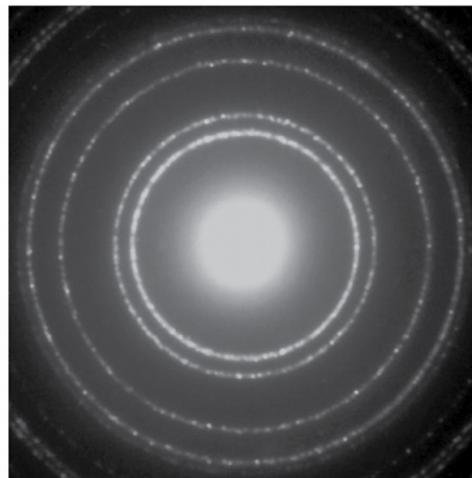


Difração de raios-X

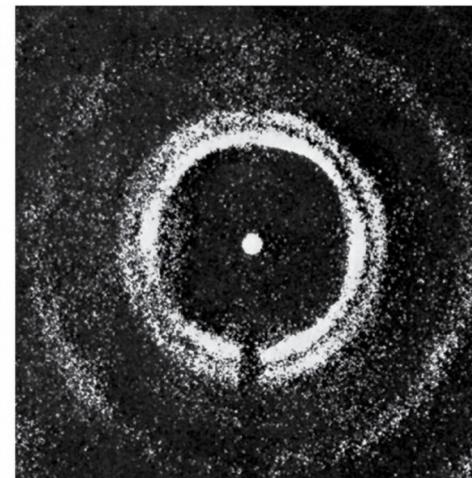
Difração em alumínio: raios-x, elétrons, nêutrons com mesmo λ produzem padrões de difração *idênticos*



Difração de raios-X



Difração de elétrons

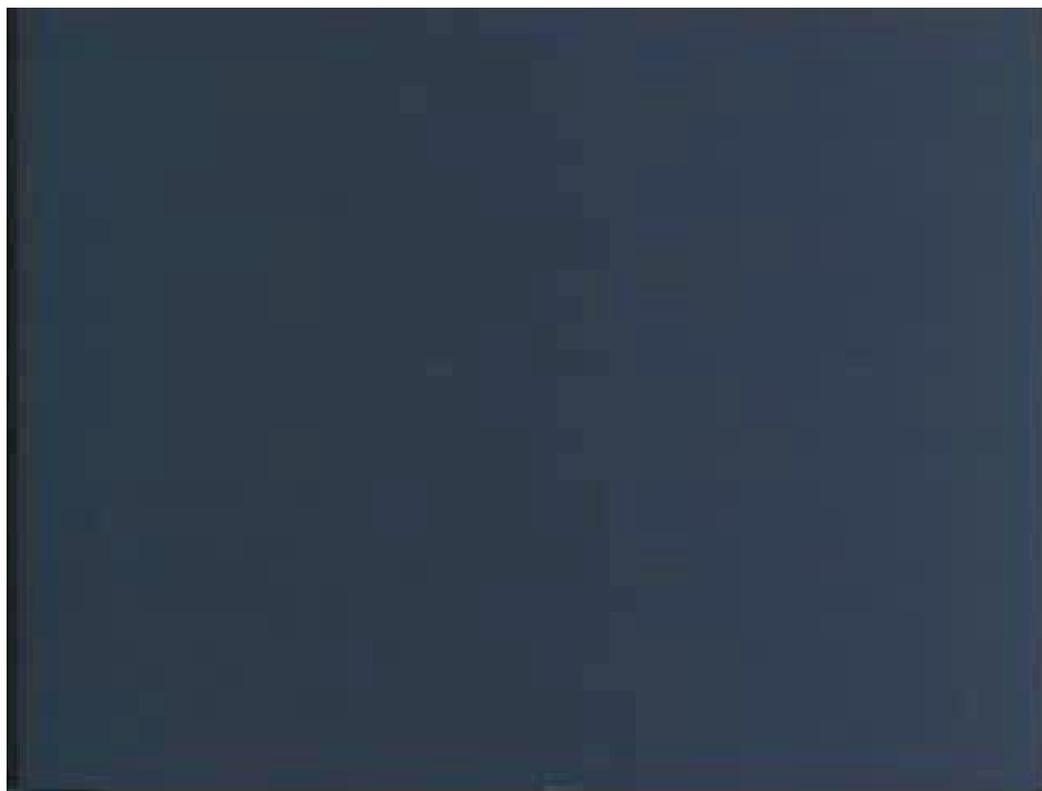
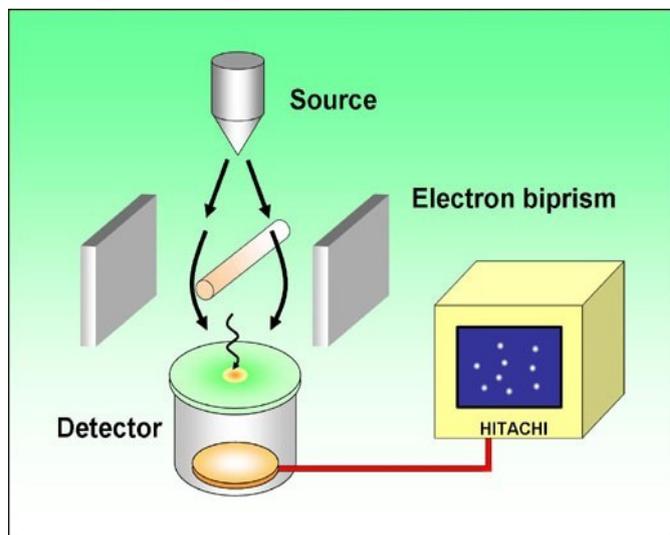


Difração de nêutrons



Dupla fenda com elétrons (1989)

Tomomura et al (Hitachi)

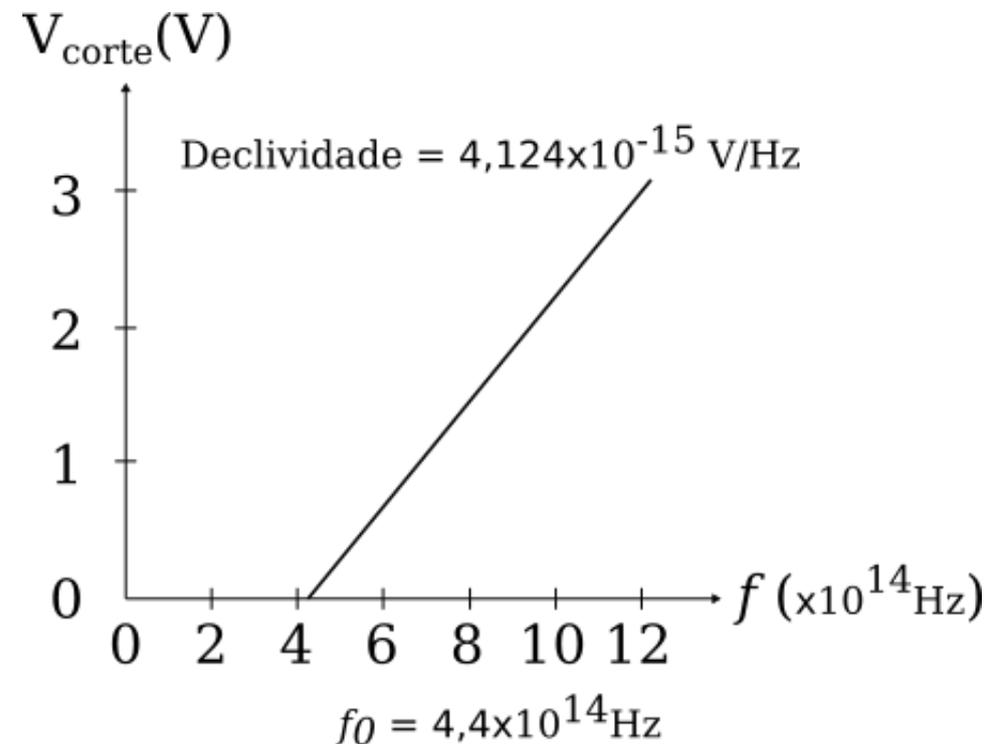




Exercício: Efeito Fotoelétrico

A figura mostra o gráfico do Potencial de Corte *versus* a Frequência da luz para um catodo metálico num experimento de efeito fotoelétrico. Suponha que esse catodo seja iluminado com $15\mu\text{W}$ com luz de 250nm e que a eficiência de conversão de fótons em fotoelétrons seja de 25%.

- O que acontece nesse experimento quando um fóton da luz incidente interage com um elétron do metal?
- Qual a taxa de fótons por segundo que incide no metal?
- Qual a corrente máxima esperada?
- Desenhe um gráfico mostrando a Corrente *versus* ΔV , indicando a escala numérica e os valores de V_{corte} e $I_{\text{máx}}$.





Ondas de Matéria (1924)

Louis-Victor de Broglie – estudante francês

IDÉIA: Já que a luz apresenta comportamento de partícula, não poderia haver uma simetria e ‘partículas’ como o elétron também terem comportamento ondulatório?

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

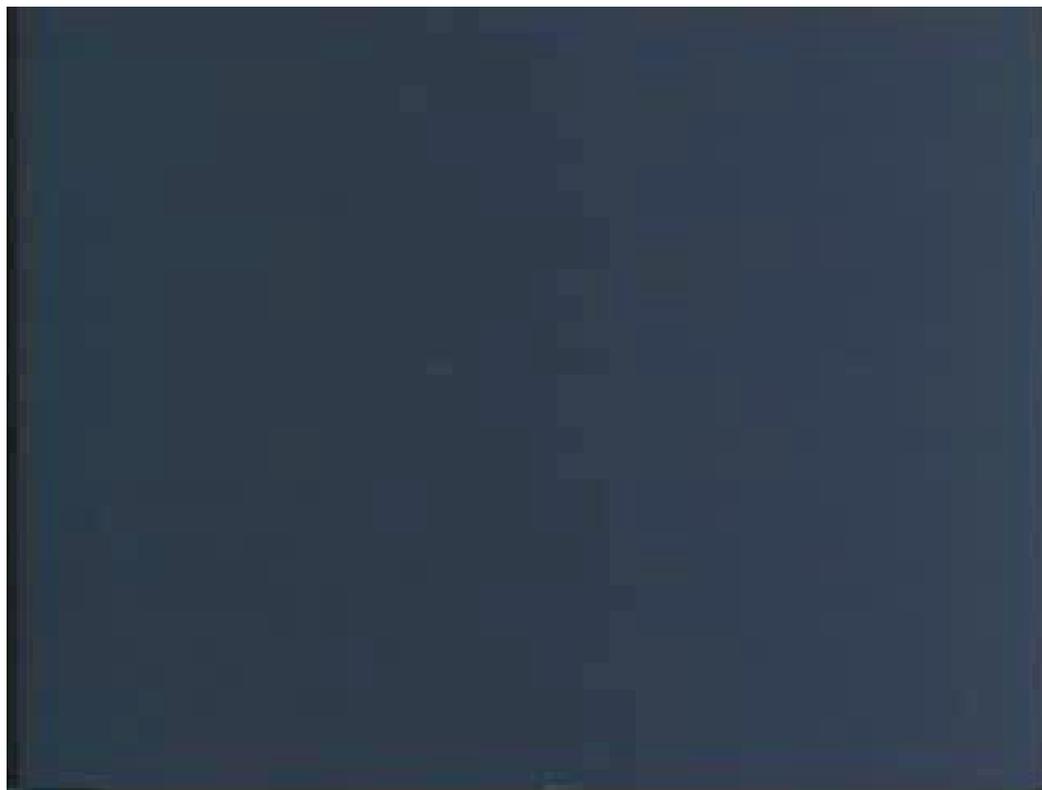
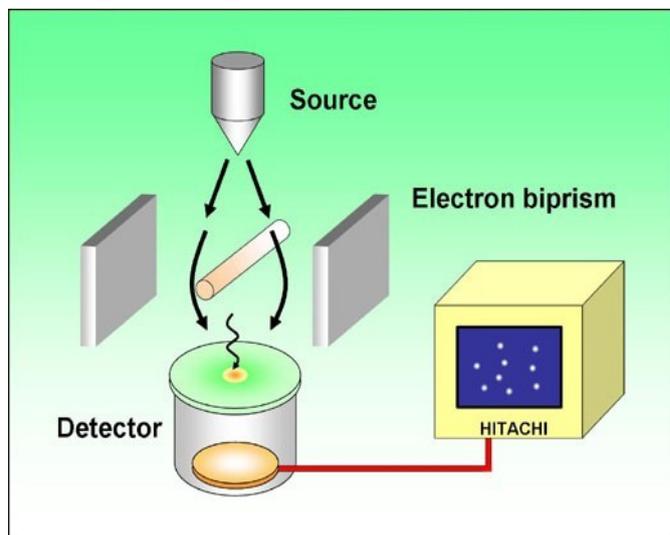
Frente ao ceticismo de alguns, sugere que se tente realizar experiências típicas de onda, que poderiam revelar a existência de difração, interferência, etc com partículas





Dupla fenda com elétrons (1989)

Tomomura et al (Hitachi)



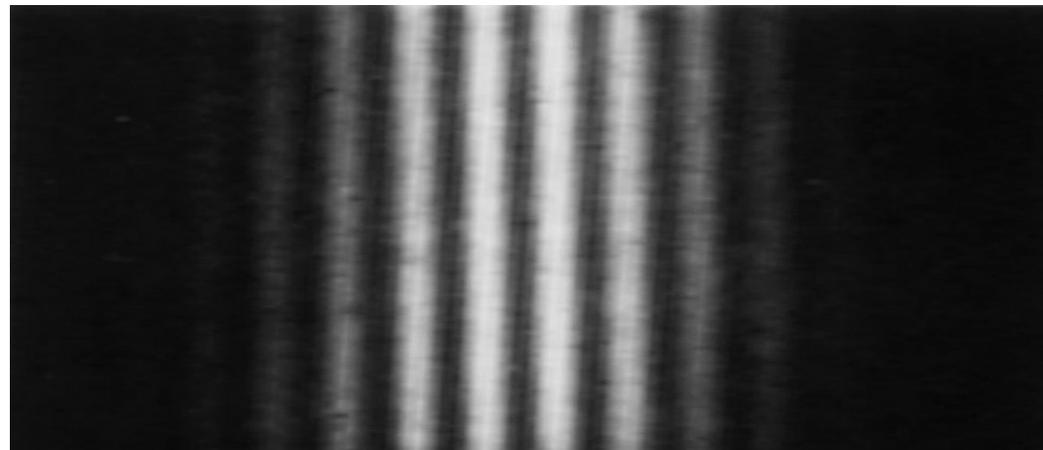


Exercício: Ondas de Matéria

O padrão de interferência da figura abaixo foi obtido quando um feixe de elétrons, cada um com 50KeV de energia cinética foram lançados através de fendas distantes $1,0 \mu\text{m}$ entre si. As fendas foram gravadas por um detector posicionado $1,0 \text{ m}$ atrás das fendas.

(a) qual era a velocidade dos elétrons?

(b) Qual a distância entre as franjas adjacentes?





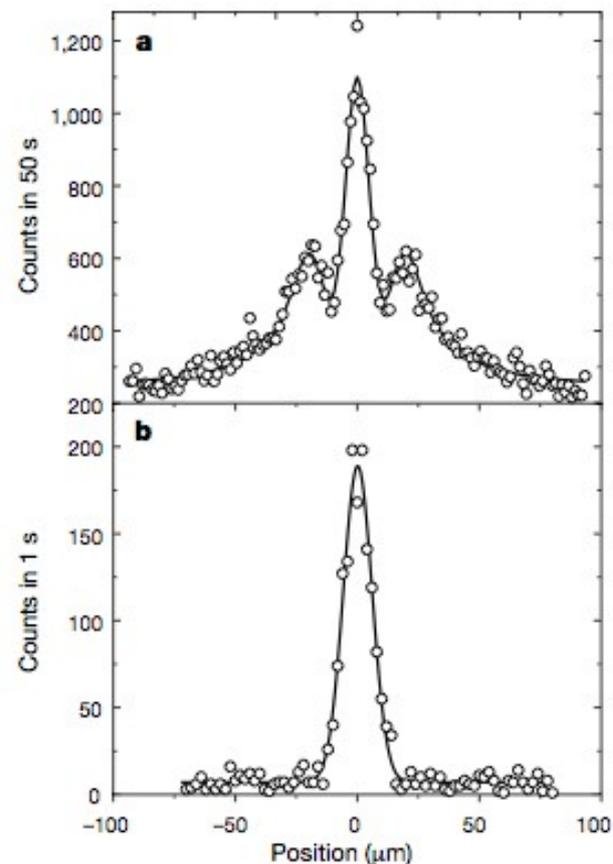
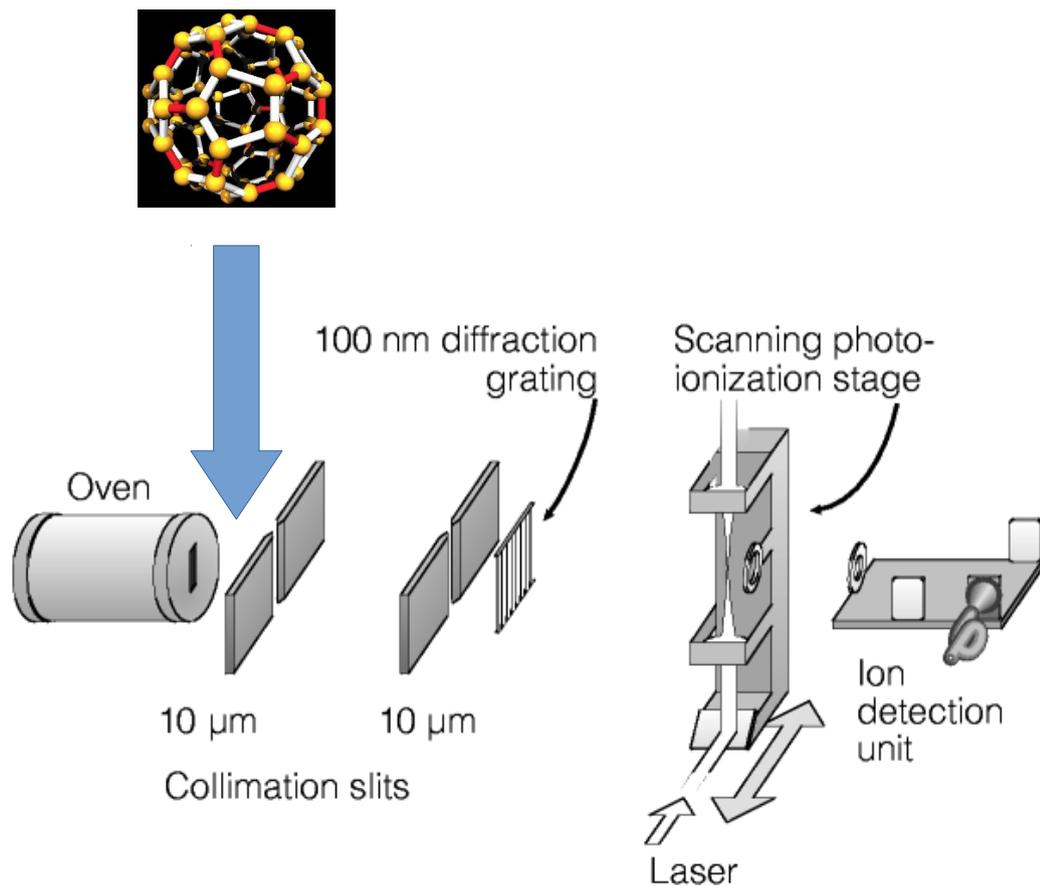
INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Dois Resultados emblemáticos..



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!

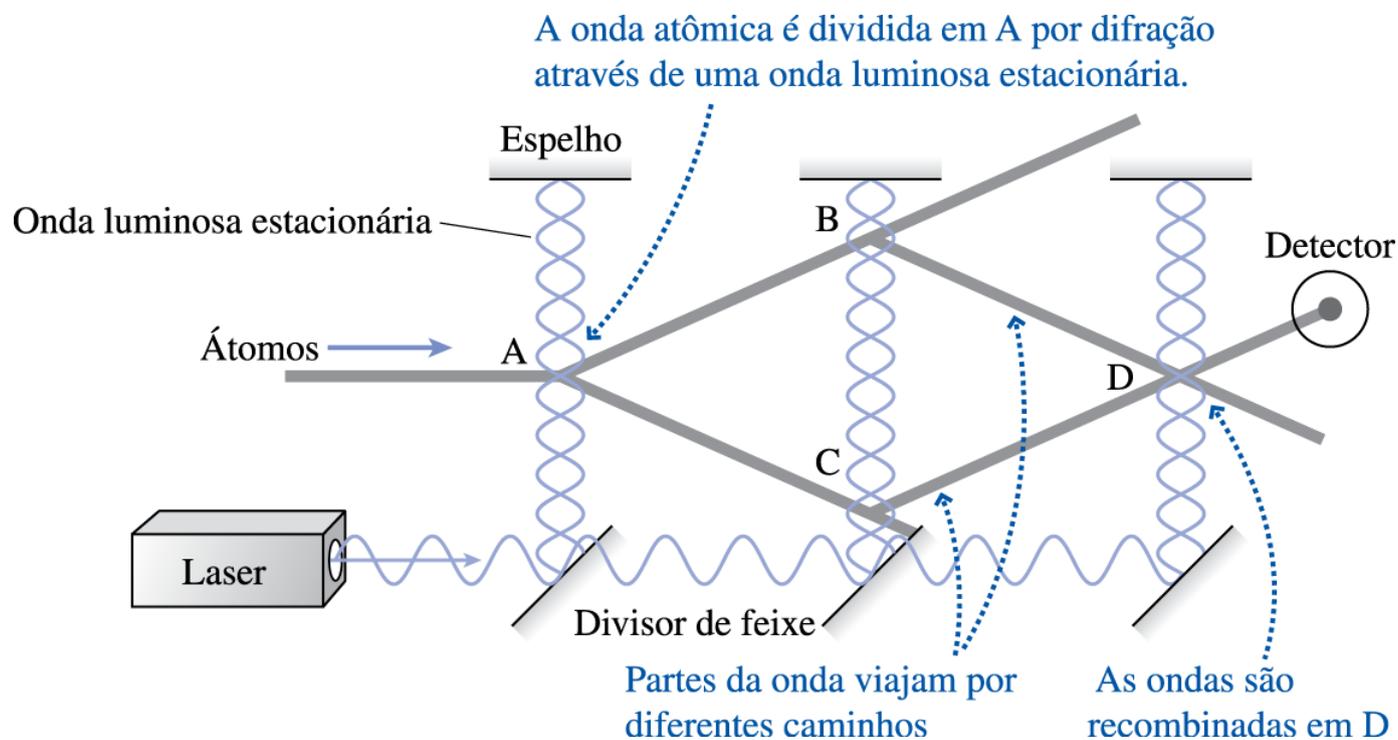


(a) Com fendas (b) Sem fendas



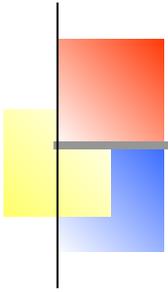
Difração de Átomos!

Em 2001, o mesmo experimento foi feito usando uma onda estacionária luminosa como 'rede de difração'.

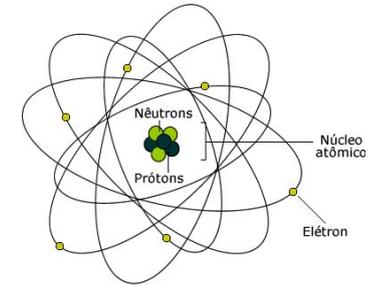




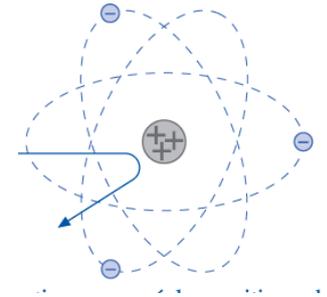
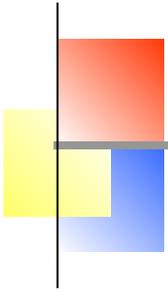
Modelo atômico de Bohr (1913)



- 1) Um átomo consiste de elétrons negativos em órbita em torno de um núcleo positivo e muito pequeno – como Rutherford.

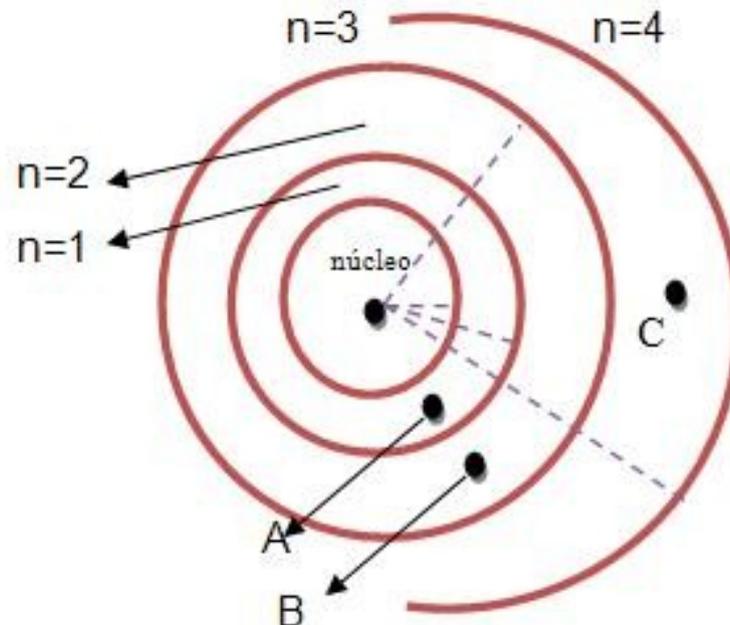


Modelo atômico de Bohr (1913)

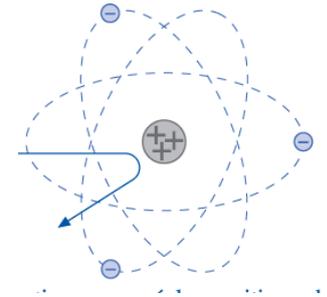
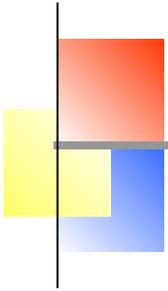


1) Um átomo consiste de elétrons negativos em órbita em torno de um núcleo positivo e muito pequeno – como Rutherford.

2) Os átomos existem apenas em certos estados estacionários. Cada estado estacionário corresponde a um conjunto específico de órbitas eletrônicas, indexadas por um número inteiro $n = 1, 2, 3, 4 \dots$ (número quântico).

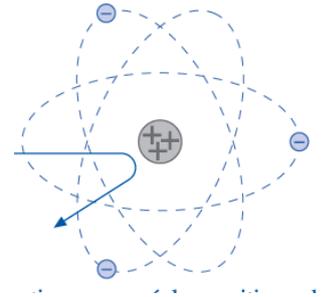
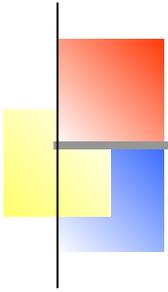


Modelo atômico de Bohr (1913)



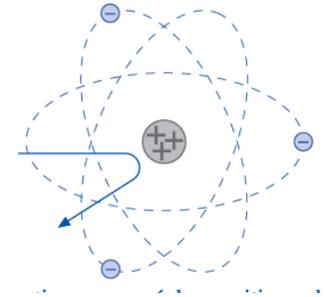
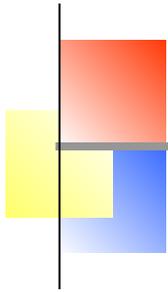
- 1) Um átomo consiste de elétrons negativos em órbita em torno de um núcleo positivo e muito pequeno – como Rutherford.
- 2) Os átomos existem apenas em certos estados estacionários. Cada estado estacionário corresponde a um conjunto específico de órbitas eletrônicas, indexadas por um número inteiro $n = 1, 2, 3, 4 \dots$ (número quântico).
- 3) Cada estado estacionário possui uma energia discreta e bem definida E_m , ou seja, as energias são quantizadas. E_1, E_2, E_3, \dots

Modelo atômico de Bohr (1913)



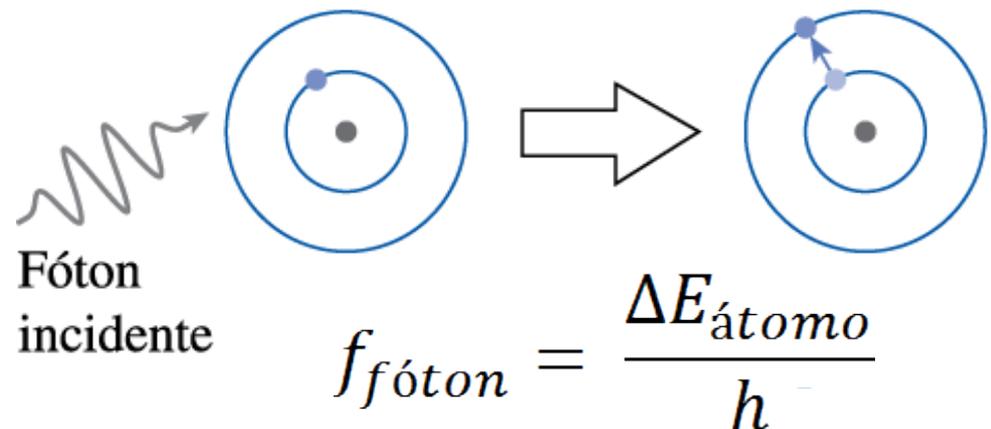
- 1) Um átomo consiste de elétrons negativos em órbita em torno de um núcleo positivo e muito pequeno – como Rutherford.
- 2) Os átomos existem apenas em certos estados estacionários. Cada estado estacionário corresponde a um conjunto específico de órbitas eletrônicas, indexadas por um número inteiro $n = 1, 2, 3, 4 \dots$ (número quântico).
- 3) Cada estado estacionário possui uma energia discreta e bem definida E_m , ou seja, as energias são quantizadas. E_1, E_2, E_3, \dots
- 4) Existe um estado de energia **mínima** E_1 , denominado **ESTADO FUNDAMENTAL**. Os demais estados E_2, E_3, E_4, \dots são os estados **EXCITADOS**.

Modelo atômico de Bohr (1913)



- 1) Um átomo consiste de elétrons negativos em órbita em torno de um núcleo positivo e muito pequeno – como Rutherford.
- 2) Os átomos existem apenas em certos estados estacionários. Cada estado estacionário corresponde a um conjunto específico de órbitas eletrônicas, indexadas por um número inteiro $n = 1, 2, 3, 4 \dots$ (número quântico).
- 3) Cada estado estacionário possui uma energia discreta e bem definida E_m , ou seja, as energias são quantizadas. E_1, E_2, E_3, \dots
- 4) Existe um estado de energia mínima E_1 , denominado ESTADO FUNDAMENTAL. Os demais estados E_2, E_3, E_4, \dots são os estados EXCITADOS.

5) **Transições:** um átomo pode “saltar” de um estado estacionário inicial para outro final absorvendo ou emitindo um fóton com a energia necessária.

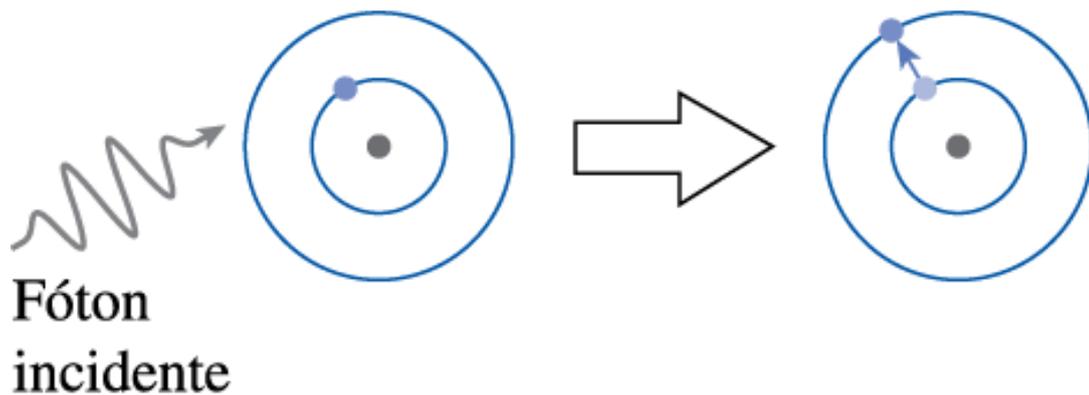


Modelo atômico de Bohr (1913)

5) Transições: um átomo pode “saltar” de um estado estacionário inicial para outro final absorvendo ou emitindo um fóton com a energia necessária.

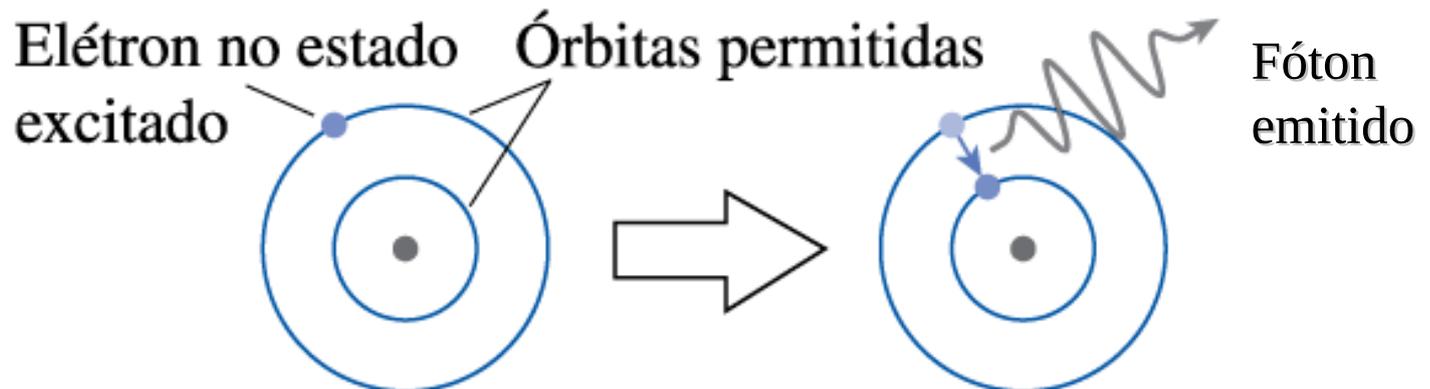
Absorção: sai do estado de menor energia para maior.

Emissão: sai do estado de maior energia para menor.



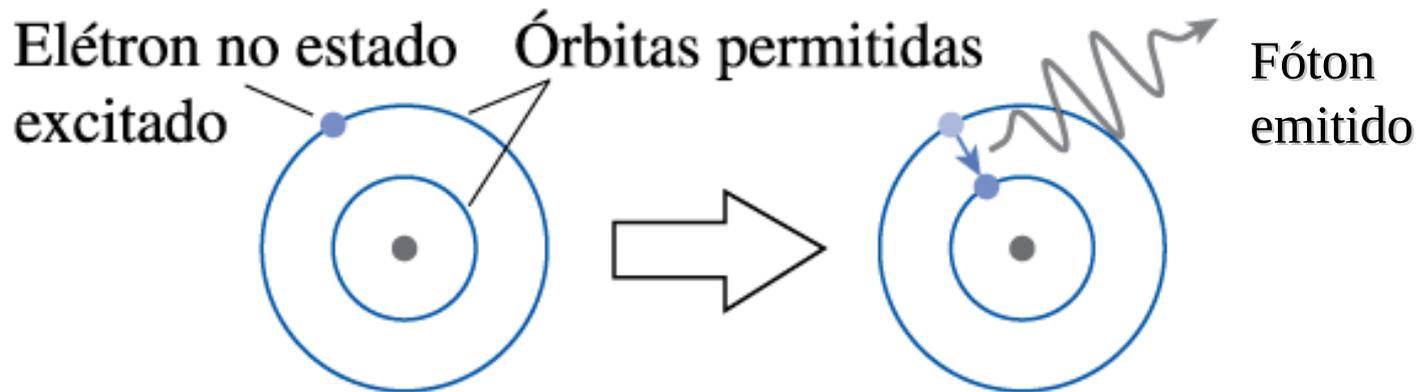
$$f_{\text{fóton}} = \frac{|\Delta E_{\text{átomo}}|}{h}$$

$$\Delta E_{\text{átomo}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}}$$



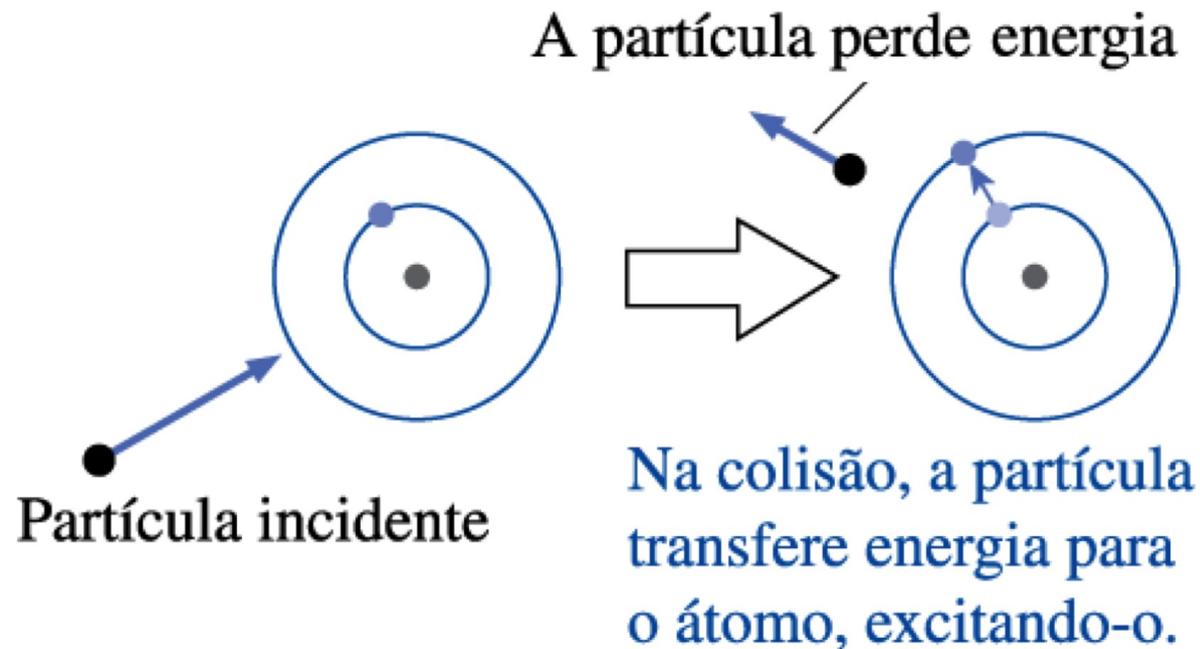
Modelo atômico de Bohr (1913)

- 6) Decaimento espontâneo: um átomo num estado excitado tende *naturalmente* a perder energia, emitindo fótons e decaindo para níveis menos energéticos, até chegar ao estado fundamental.



Modelo atômico de Bohr (1913)

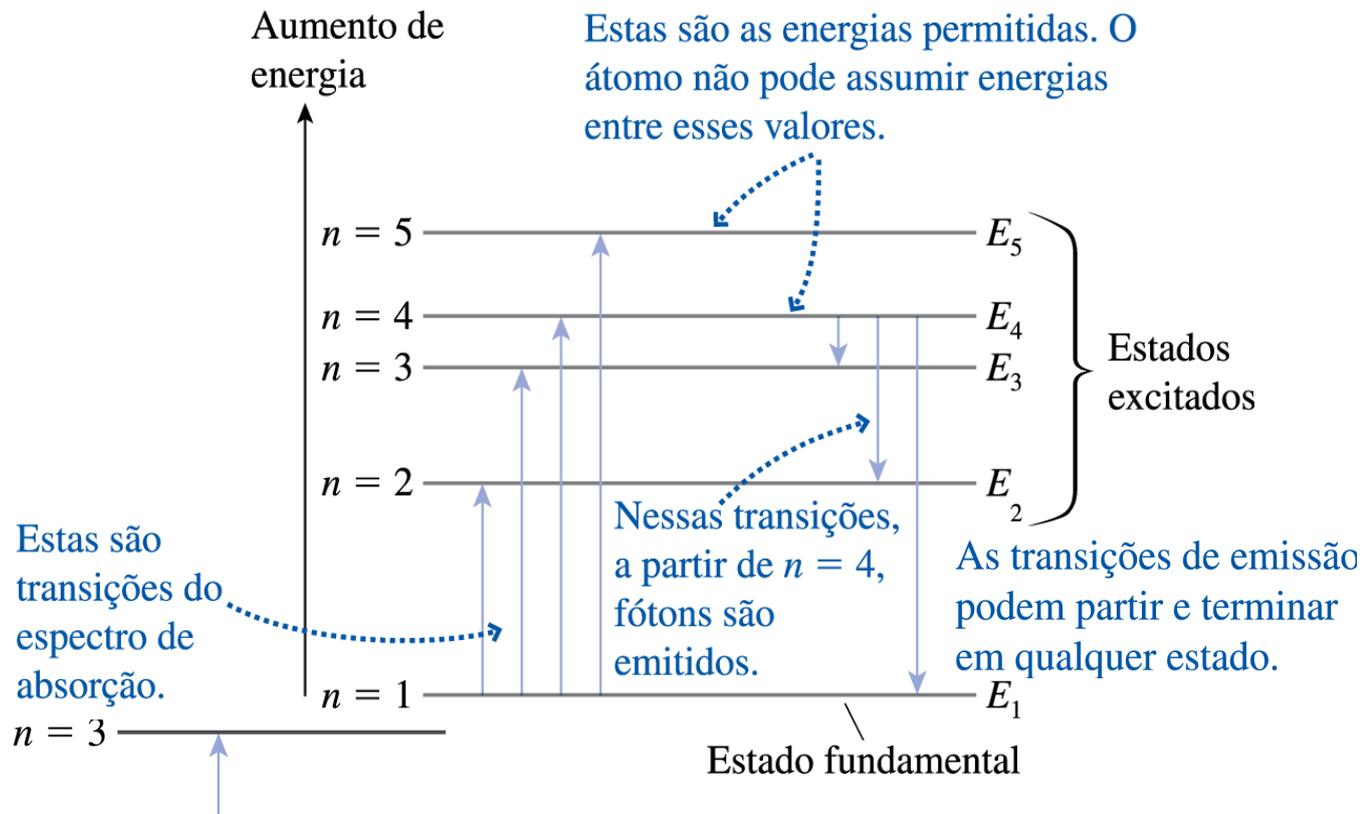
7) também pode ocorrer excitação por colisão: o átomo pode absorver energia ao colidir de forma inelástica com um elétron ou outro átomo, por exemplo.



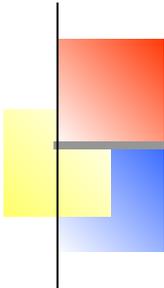
$$\Delta E_{\text{átomo}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}} = -\Delta E_{\text{partícula}}$$

Modelo atômico de Bohr (1913)

Espectro do átomo e diagrama de níveis de energia.



$$f_{\text{fóton}} = \frac{|\Delta E_{\text{átomo}}|}{h} \quad \Delta E_{\text{átomo}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}}$$



Modelo atômico de Bohr (1913)

Observações empíricas e suas explicações segundo o Modelo atômico de Bohr:

- 1) A matéria é estável pois não existe estado de energia mais baixo do que o fundamental
- 2) Os átomos emitem e absorvem um espectro discreto de luz pois só fótons com energias correspondendo às diferenças entre estados estacionários podem ser emitidos e absorvidos
- 3) Os espectros de emissão também podem ser observados quando um feixe de elétrons atravessa gás num tubo de raios catódicos pois os elétrons colidem com os átomos do gás, os quais são excitados para estados de maior energia e em seguida sofrem decaimento espontâneo.
- 4) As frequências tipicamente presentes nos espectros de absorção formam um subconjunto das que aparecem nos espectros de emissão correspondentes. Como os átomos tendem a estar no estado fundamental (devido aos decaimentos espontâneos), apenas linhas de absorção a partir deste estado serão tipicamente observadas na Natureza
- 5) Cada elemento da tabela periódica possui um espectro próprio.
Não explicado !!
O que determina os estados estacionários de cada elemento?