

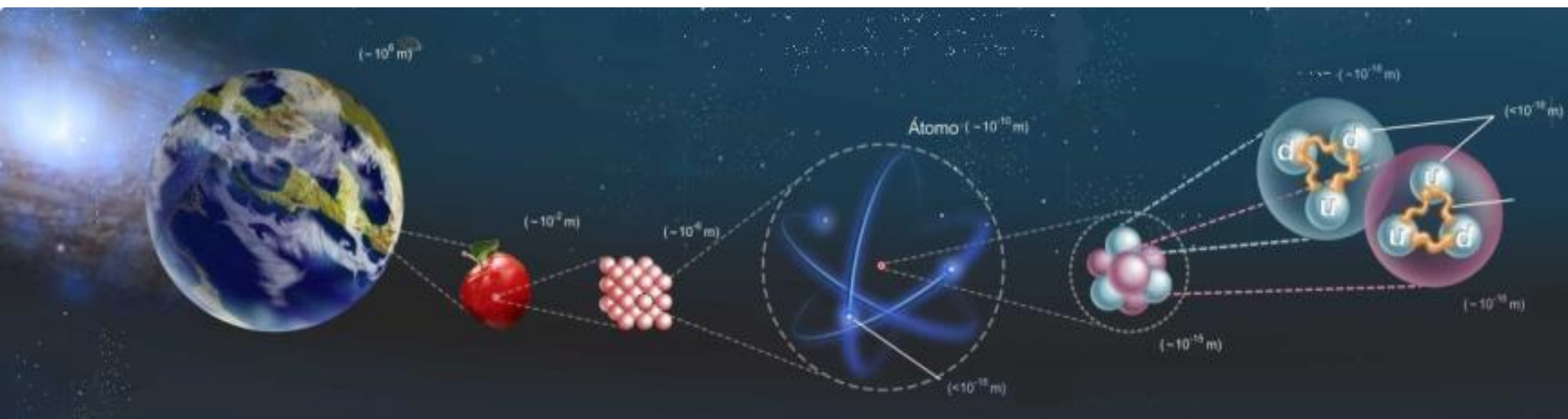


Universidade Federal do ABC

NMA101 - Ciência dos Materiais

<https://meet.google.com/lookup/b75dcqejz2>

Wendel Andrade Alves



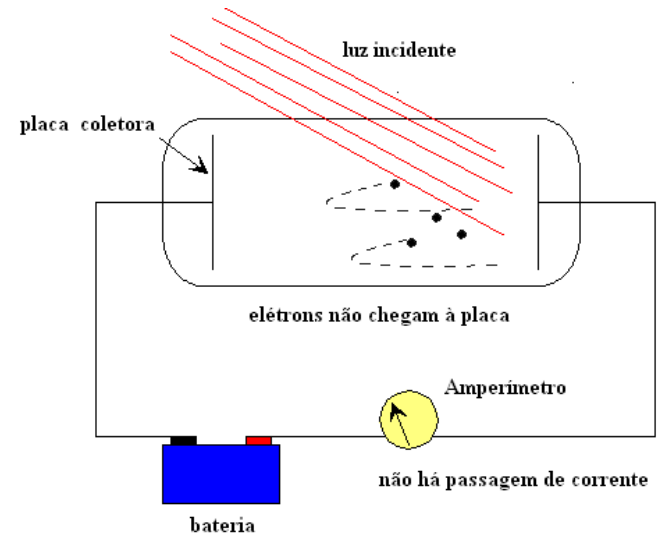
Crédito: Sprace

E-mail: wendel.alves@ufabc.edu.br

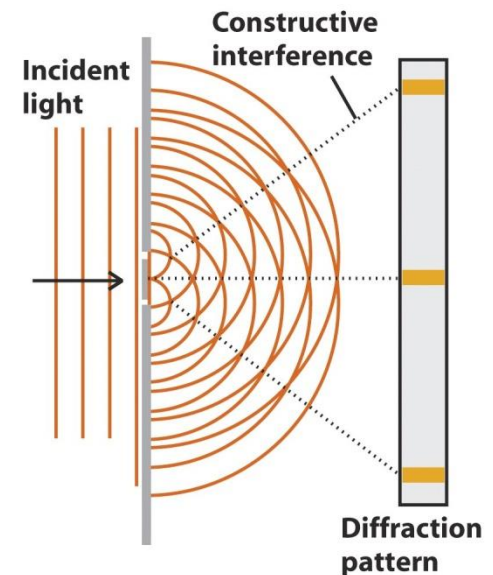
Horários: terças-feiras 16-18h
quintas-feiras 15-17h

Dualidade Onda-Partícula para a Luz

- A radiação eletromagnética consiste de fótons que se comportam como **partículas**.
Ex.: *efeito fotoelétrico*.



- A radiação eletromagnética é composta de **ondas**.
Ex.: *difração da luz*.



Como conciliar as duas visões?

Afinal, a luz é uma partícula ou uma onda?

Dualidade Onda-Partícula

- A propagação da luz entre dois pontos pode ser descrita tratando-a como uma onda.
- A interação da luz com a matéria pode ser descrita tratando-a como partícula.

Dualidade Partícula-Onda para o Elétron



Louis de Broglie

O elétron pode se comportar tanto como partícula quanto como onda.



ONDAS DE MATÉRIA



“Devido ao fato de o comportamento atômico ser tão diferente da experiência comum, é muito difícil se acostumar a ele, e ele parece peculiar e misterioso para todos - tanto para o novato como para o físico experiente.”

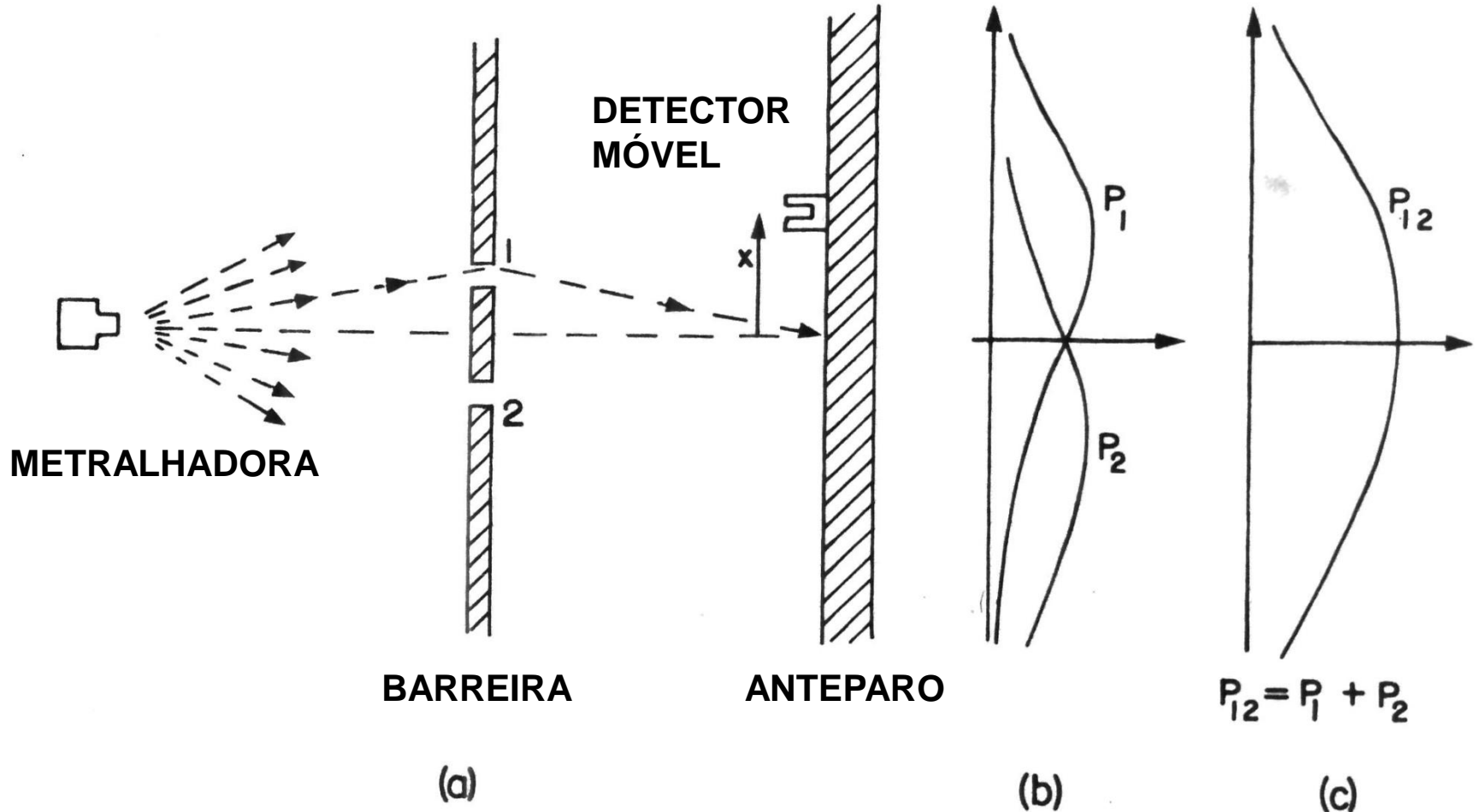
“Até mesmo os especialistas não o compreendem da forma como gostariam, e é perfeitamente razoável que não devam, porque toda a experiência direta e intuição humanas se aplicam a objetos grandes.”

“Sabemos como objetos grandes atuarão, mas as coisas em pequena escala simplesmente não agem desta forma. Então temos que aprender sobre elas de um modo abstrato ou imaginativo, e não pela conexão com a nossa experiência direta.”

Richard Feynman

Experimento da Dupla Fenda com Projéteis

Um experimento imaginário...



Experimento da Dupla Fenda com Projéteis

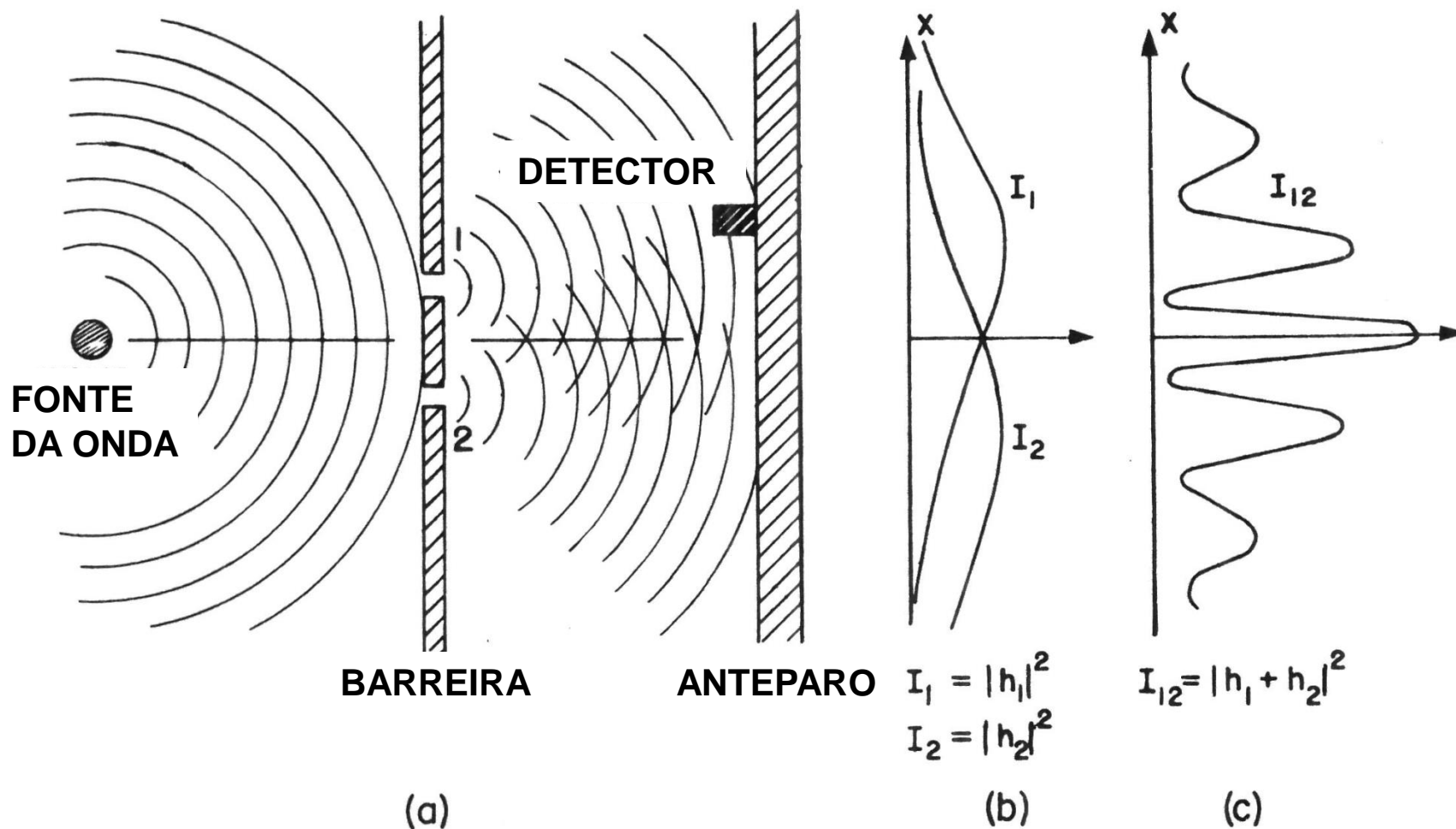
- Os projéteis chegam ao detector em unidades (“pacotes”) iguais.
- As balas que atravessam as fendas 1 e 2 podem atingir o anteparo em diferentes posições x . A probabilidade de que uma bala atravesse as fendas 1 ou 2 e se aloje numa posição x do anteparo é dada por P_1 ou P_2 , respectivamente.
- O resultado do experimento feito com ambas as fendas abertas (P_{12}) é igual à soma dos resultados experimentais obtidos quando cada uma das fendas isoladamente está aberta:

$$P_{12} = P_1 + P_2$$

NÃO É UM FENÔMENO DE INTERFERÊNCIA

Experimento da Dupla Fenda com Ondas

Um experimento imaginário...



Experimento da Dupla Fenda com Ondas

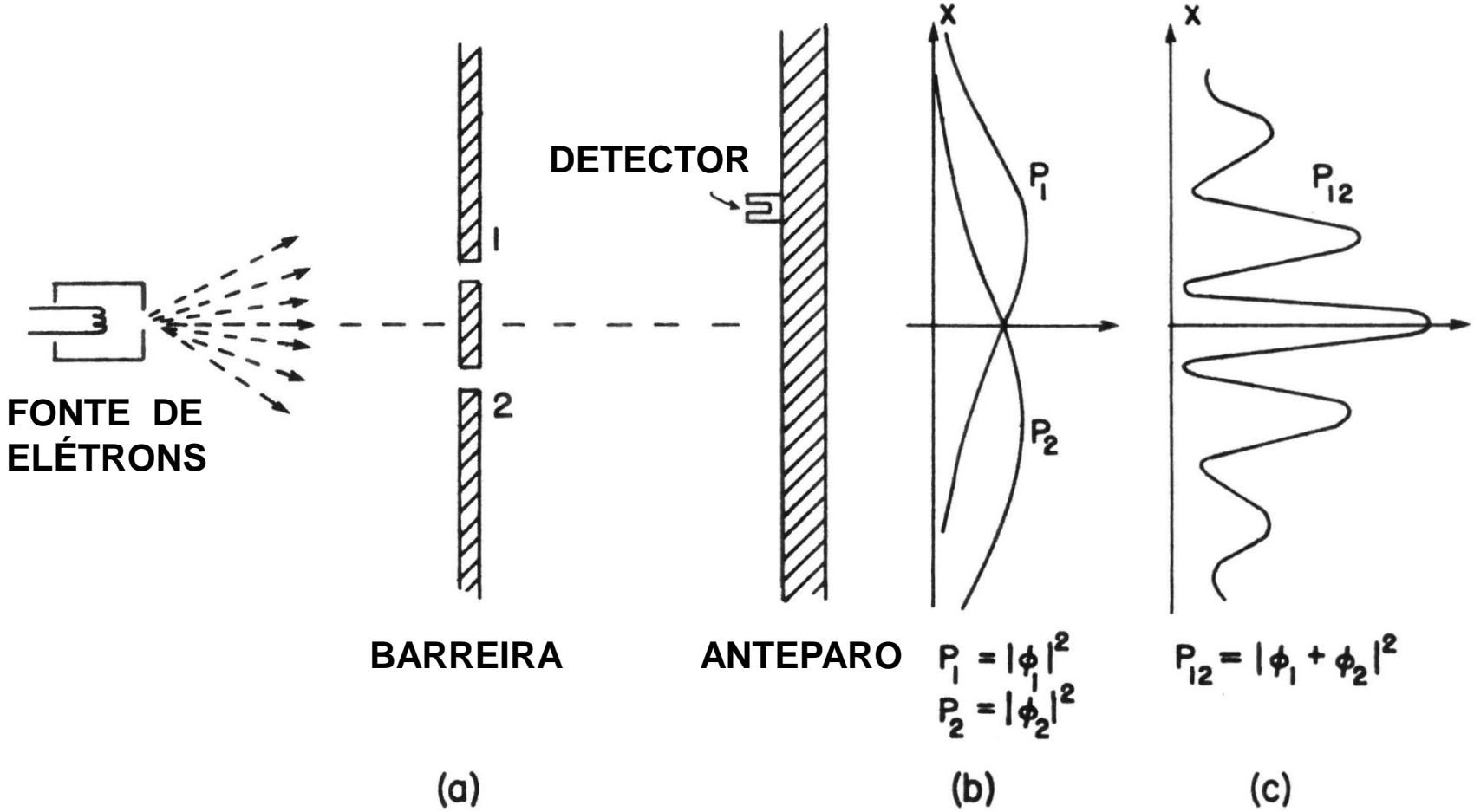
- A intensidade das ondas pode ter qualquer valor, ou seja, elas **não** chegam ao detector como “pacotes”.
- Ondas sofrem difração nas fendas, produzindo no anteparo um padrão de franjas conhecido como **padrão de difração**.
- A distribuição de intensidades com ambas as fendas abertas não coincide com a soma dos resultados obtidos com apenas uma fenda aberta devido à existência de regiões com interferência construtiva e outras com interferência destrutiva:

$$I_{12} \neq I_1 + I_2$$

É UM FENÔMENO DE INTERFERÊNCIA

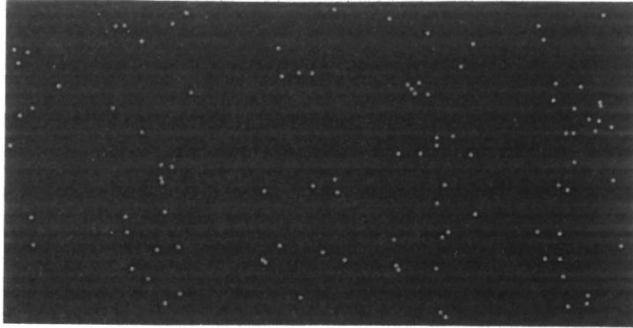
Experimento da Dupla Fenda com Elétrons

Um experimento imaginário...

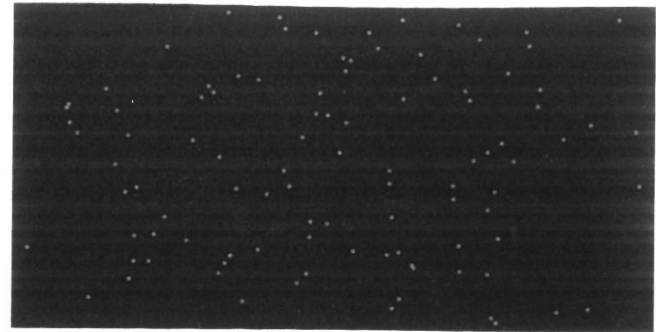


Experimento da Dupla Fenda com Elétrons

duas fendas abertas

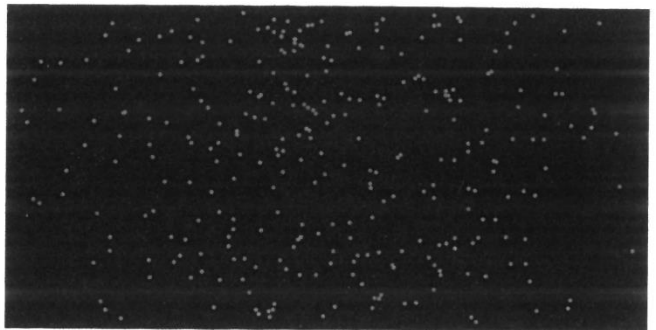
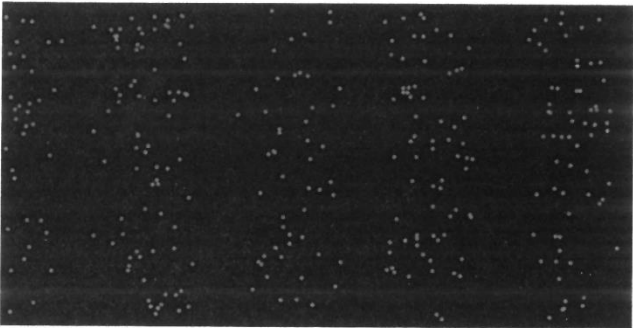


uma fenda aberta

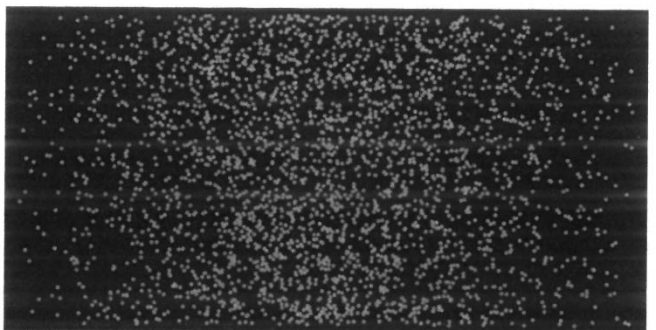
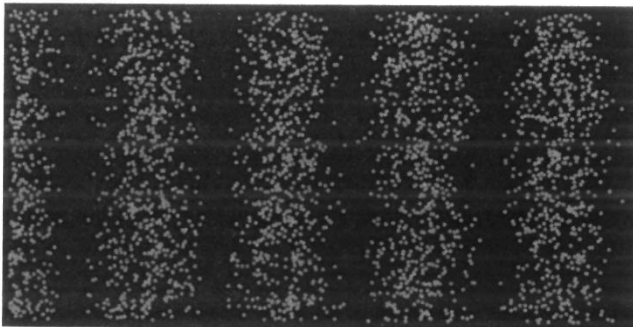


100

tempo



300



3 k

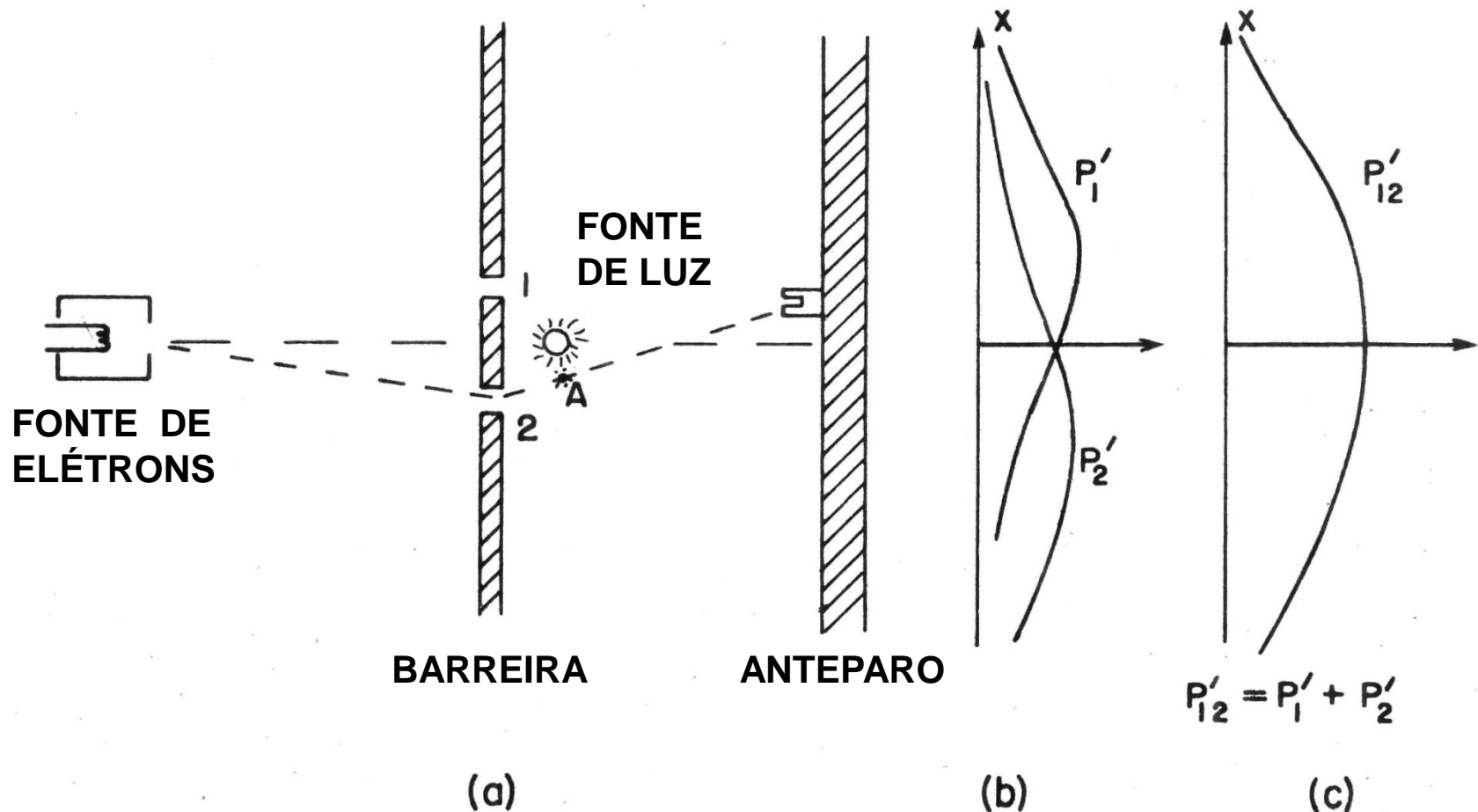
Experimento da Dupla Fenda com Elétrons

Os elétrons chegam ao detector em unidades (“pacotes”), como partículas, mas a probabilidade de chegada destes pacotes está distribuída como a distribuição de intensidades de uma onda. O elétron comporta-se em algumas situações como partícula (p. ex. na interação com o material do detector) e em outras como onda (p. ex. ao atravessar as fendas).

**MAS POR QUAL DAS DUAS FENDAS
CADA ELÉTRON ATRAVESSA???**

Experimento Imaginário: Localizando o Elétron...

Imagine que utilizemos uma fonte de luz de modo que o elétron espalhe a luz nas imediações da fenda por onde atravessou, gerando um *flash*.



Experimento Imaginário: Localizando o Elétron...

- Quando o elétron é detectado (ou seja, quando a fenda por onde atravessou é conhecida), ele passa a se comportar como partícula e o padrão de interferência não é formado no anteparo.
- O elétron é tão “delicado” que a luz utilizada para “observá-lo” altera o seu movimento. A perturbação do elétron pela luz faz com que ele se manifeste como partícula, e não como onda.
- Se a intensidade da luz for diminuída, de modo que alguns elétrons consigam atravessar a fenda sem interagir com a luz, então estes elétrons formarão um padrão de difração no anteparo.

Dualidade Onda-Partícula

- Estudos da radiação do corpo negro levaram à hipótese da Planck da quantização da radiação eletromagnética. O efeito fotoelétrico evidencia a natureza de partícula da radiação eletromagnética. A difração evidencia sua natureza ondulatória.
- Se a radiação eletromagnética, que por longo tempo foi interpretada apenas como ondas, tem caráter dual, será que a matéria, que desde a época de Dalton foi entendida como sendo constituída por partículas, poderia ter propriedades de ondas?

Dualidade Onda-Partícula

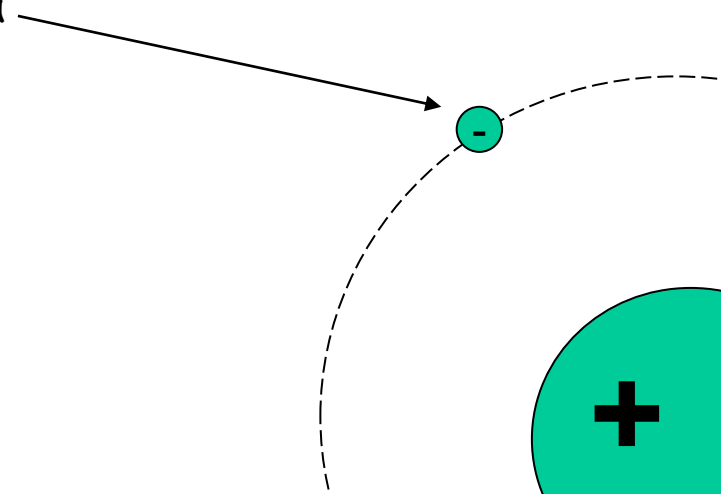
- Após o desenvolvimento de Bohr para o átomo de hidrogênio, a natureza dual da energia radiante tornou-se um conceito familiar

Louis De Broglie (1892-1987)

Se a energia radiante pudesse se comportar, sob condições apropriadas, como um feixe de partículas, a matéria, sob condições apropriadas, poderia possivelmente se comportar como uma onda?

Para De Broglie

Elétron se comportava como uma onda estacionária

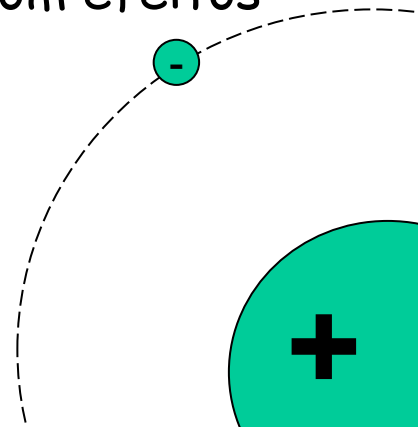


Dualidade Onda-Partícula

- Sabendo-se que a luz tem uma natureza de partícula, parece razoável perguntar se a matéria tem natureza ondulatória
- Utilizando as equações de Einstein e de Planck, De Broglie mostrou:

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

- O momento, mv , é uma propriedade de partícula, enquanto o comprimento de onda, λ , é uma propriedade ondulatória
- de Broglie resumiu os conceitos de ondas e partículas, com efeitos notáveis se os objetos são pequenos



Dualidade Onda-Partícula

Equação de de Broglie:

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

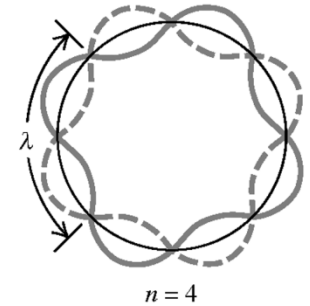
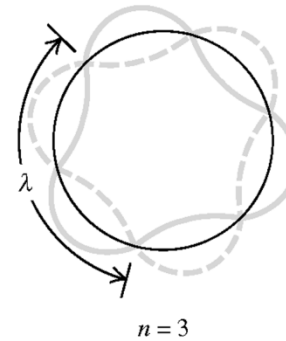
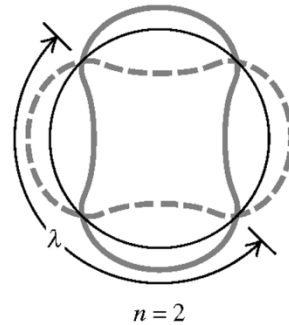
(lembrando que momento (p) é massa \times velocidade)

A Equação de de Broglie e o Modelo Atômico de Bohr

De Broglie postulou que, em virtude dos fótons terem características ondulatórias e corpusculares, talvez todas as formas de matéria tivessem propriedades ondulatórias e também corpusculares



Louis-Victor de Broglie, o sétimo duque De Broglie (1892–1987), rompeu a tradição familiar escolhendo a física em vez da diplomacia. Sua proposta revolucionária de que as partículas possuem comportamento ondulatório — pela qual De Broglie recebeu o prêmio Nobel de física de 1929 —, foi publicada em sua tese de doutorado.



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

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

comprimento da circunferência deve ser um número inteiro n de comprimentos de onda

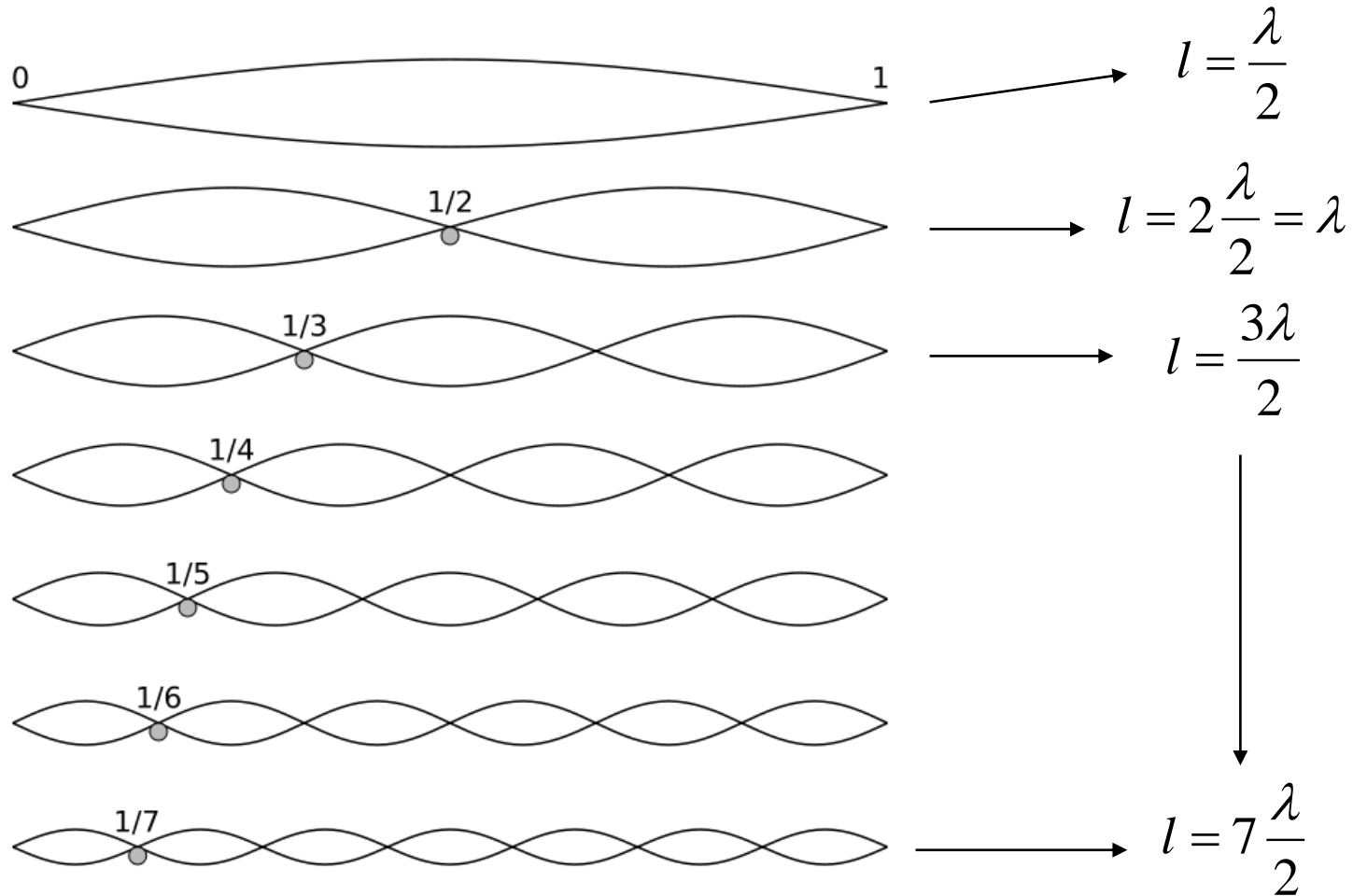
comprimento de onda de de Broglie

natureza partícula dual onda-

$$v = \frac{E}{h}$$

Relembrando... Ondas Estacionárias

Nós não se propagam ao longo da corda

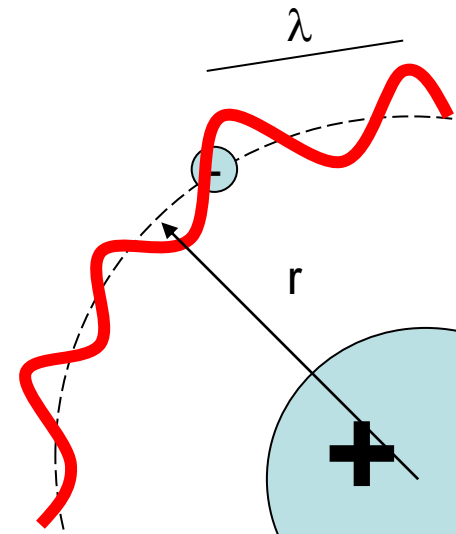
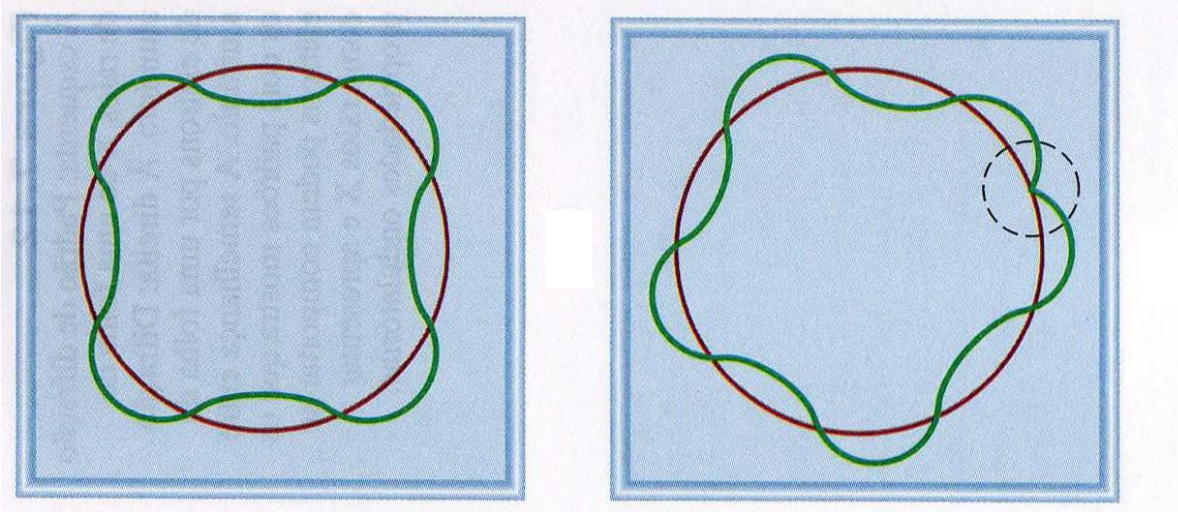


A Equação de de Broglie e o Modelo Atômico de Bohr

Se o elétron realmente se comporta como uma onda estacionária, no átomo de hidrogênio, o comprimento de onda deve se ajustar exatamente à circunferência da órbita. Caso contrário, a própria onda se cancelaria parcialmente em cada órbita sucessiva (no final, a amplitude da onda seria reduzida a zero e a onda deixaria de existir).

$$2.\pi.r = n.\lambda$$

n, número inteiro (1,2,3,...)



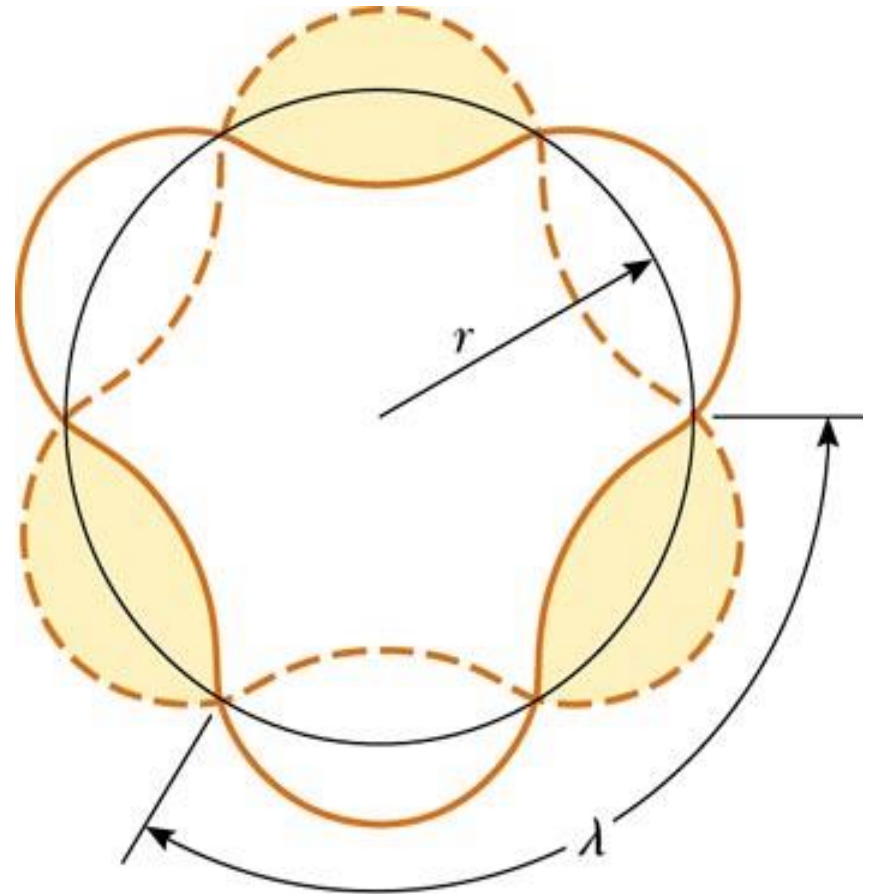
A Equação de de Broglie e o Modelo Atômico de Bohr

- Três comprimentos de onda completos estão contidos na órbita da circunferência
- Como visto anteriormente, a circunferência deve conter um número inteiro de comprimentos de onda

$$2\pi r = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Mas $\lambda = \frac{h}{m_e v}$ Então,

$$m_e v r = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots$$



Este foi o primeiro argumento convincente que a natureza ondulatória da matéria está implícita no comportamento de sistemas atômicos.

Exercício

Calcule o comprimento de onda da “partícula” nos seguintes casos: (a) O serviço mais rápido no jogo de tênis é cerca de 68 m/s. Calcule o comprimento de onda associado a uma bola de tênis que pesa $6,0 \times 10^{-2}$ kg movendo-se a essa velocidade. (b) Calcule o comprimento de onda de um elétron ($9,1094 \times 10^{-31}$ kg) que se move à velocidade de 68 m/s.

$h =$ constante de Planck $= 6,626 \times 10^{-34}$ J s ($=\text{m}^2 \text{ kg} / \text{s}$)

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

Exercício

Calcule o comprimento de onda da “partícula” nos seguintes casos: (a) O serviço mais rápido no jogo de tênis é cerca de 68 m/s. Calcule o comprimento de onda associado a uma bola de tênis que pesa $6,0 \times 10^{-2}$ kg movendo-se a essa velocidade. (b) Calcule o comprimento de onda de um elétron ($9,1094 \times 10^{-31}$ kg) que se move à velocidade de 68 m/s.

$$(a) \quad \lambda = \frac{h}{mv}$$

Tamanho do átomo
(1×10^{-10} m)

$$\begin{aligned} &= \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}}{(6,0 \times 10^{-2} \text{ kg}) \times 68 \text{ ms}^{-1}} \\ &= 1,6 \times 10^{-34} \text{ m} \end{aligned}$$

Exercício

Calcule o comprimento de onda da “partícula” nos seguintes casos: (a) O serviço mais rápido no jogo de tênis é cerca de 68 m/s. Calcule o comprimento de onda associado a uma bola de tênis que pesa $6,0 \times 10^{-2}$ kg movendo-se a essa velocidade. (b) Calcule o comprimento de onda de um elétron ($9,1094 \times 10^{-31}$ kg) que se move à velocidade de 68 m/s.

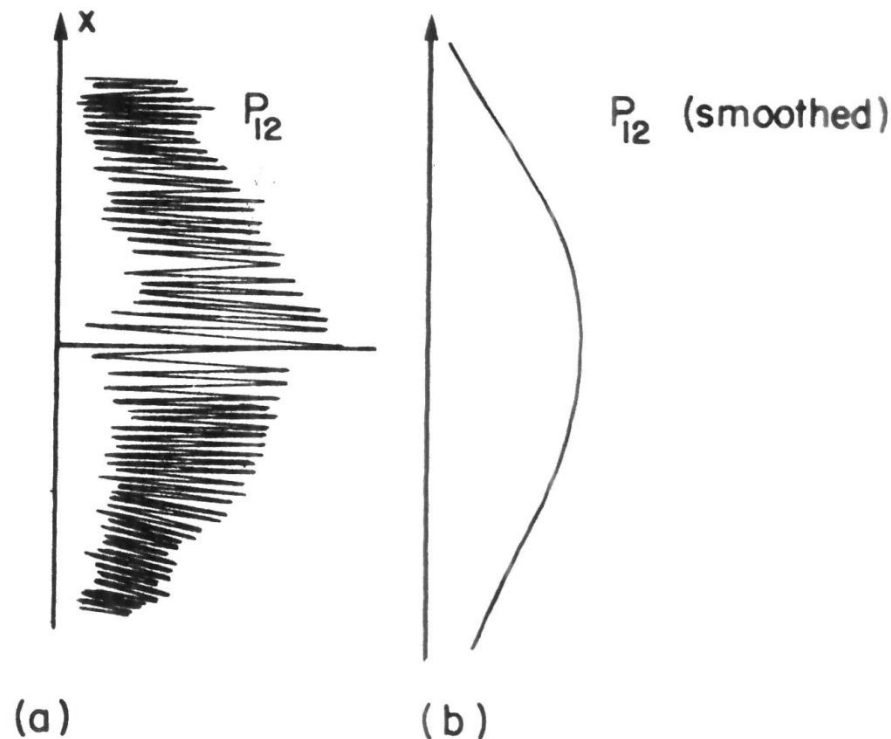
$$(b) \quad \lambda = \frac{h}{mv}$$

Infra-vermelho
(mensurável)

$$\begin{aligned} &= \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}}{(9,1094 \times 10^{-31} \text{ kg}) \times 68 \text{ ms}^{-1}} \\ &= 1,1 \times 10^{-5} \text{ m} \end{aligned}$$

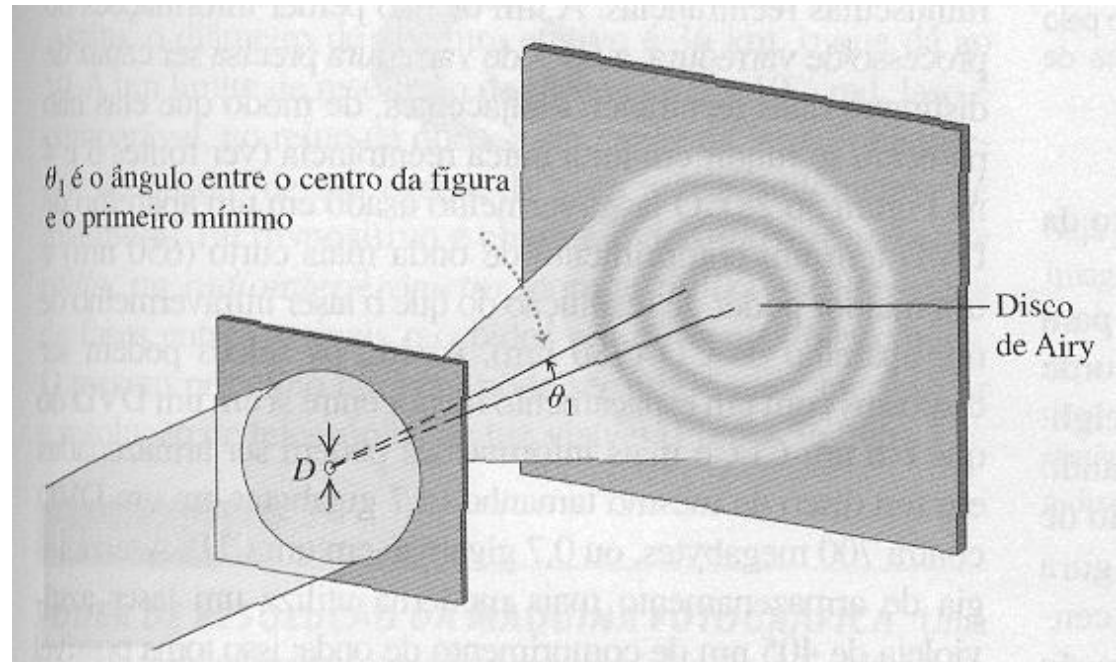
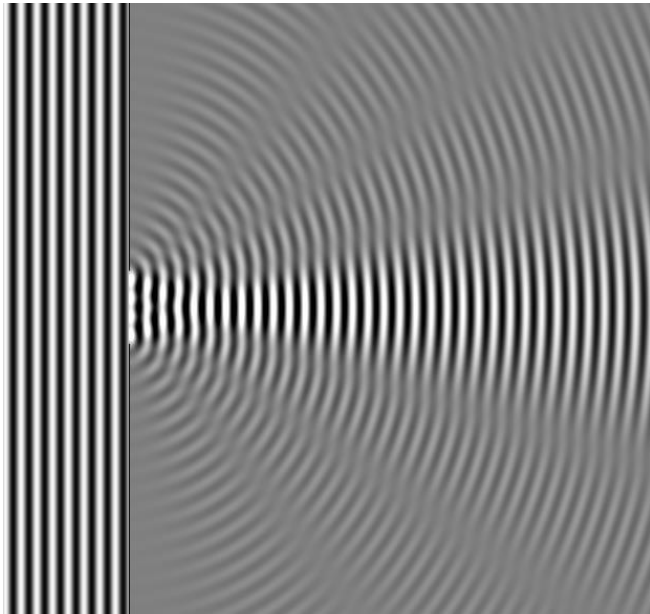
Dualidade Onda-Partícula

O padrão de interferência gerado por um corpo grande como uma bola ou um projétil teria franjas tão finas e próximas umas das outras, que não mais poderiam ser distinguidas pelo detector. O detector registraria uma curva „suave“ resultante da média entre diversas franjas.



Para relembrar... Difração de Ondas Eletromagnéticas

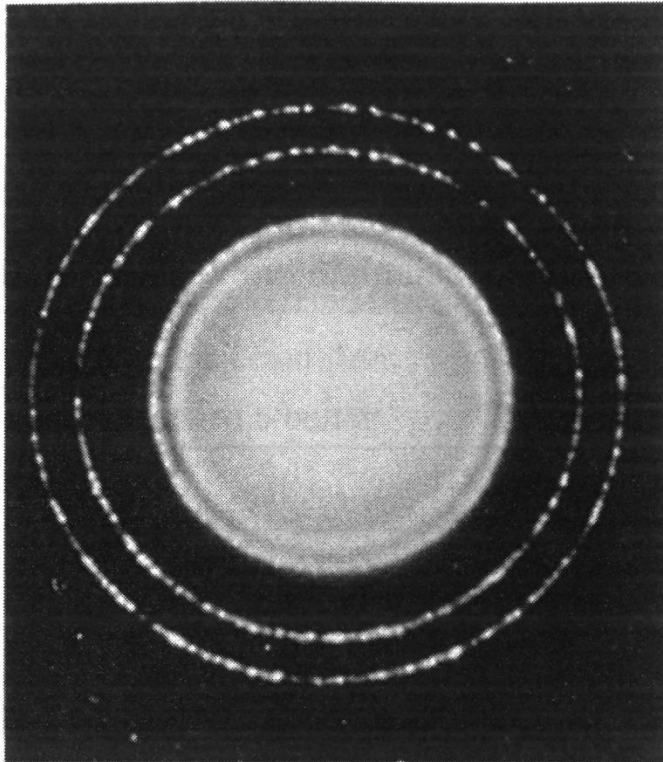
Desvio da radiação eletromagnética à medida que ela passa ao redor dos objetos. **Ocorre quando uma onda encontra um obstáculo ou uma abertura com dimensões comparáveis a seu comprimento de onda.**



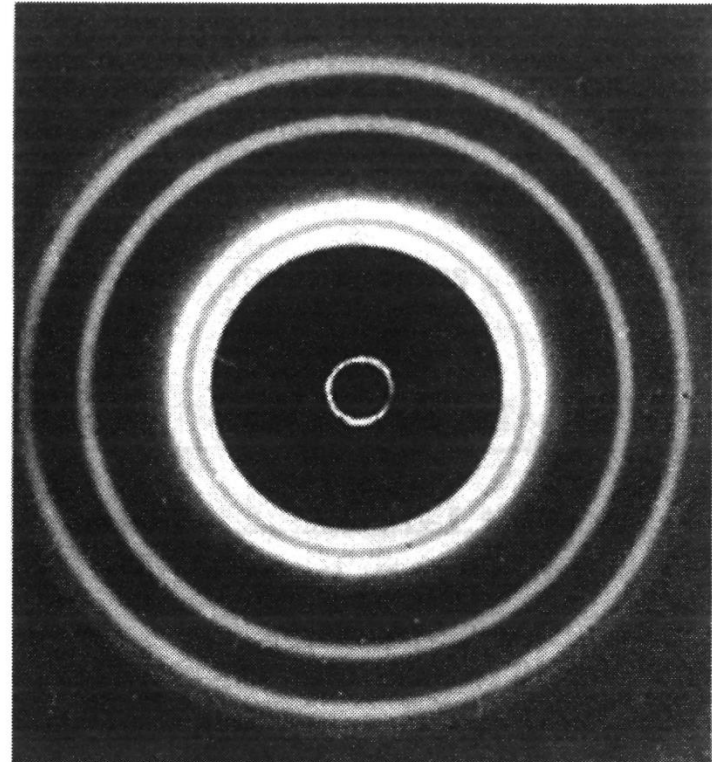
George Biddel Airy (1801 – 1892)

Comportamento Ondulatório da Matéria: Comprovação Experimental

Experimentos de difração usando folhas de alumínio:



raios-X

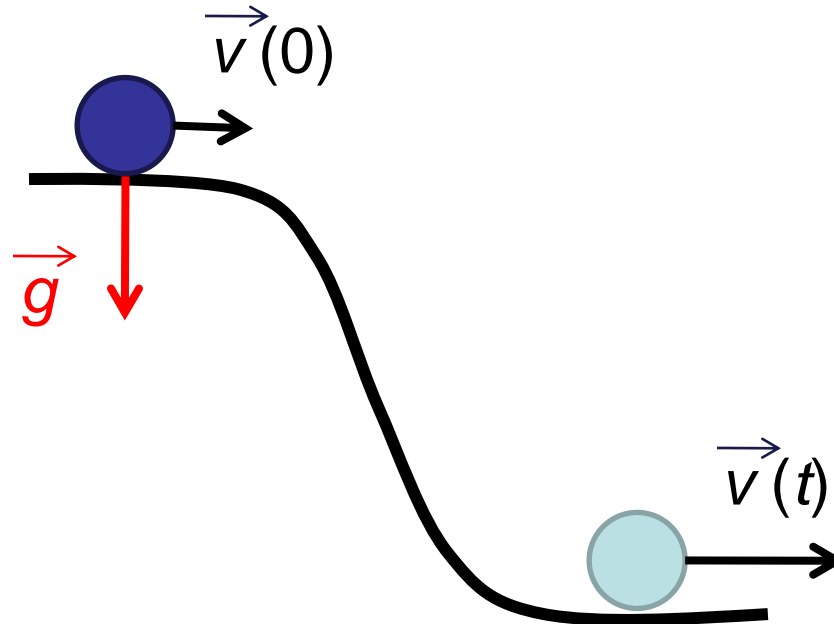


elétrons

A descoberta das propriedades ondulatórias da matéria levantou algumas questões novas e interessantes sobre a física clássica...

Caráter Determinístico da Física Clássica

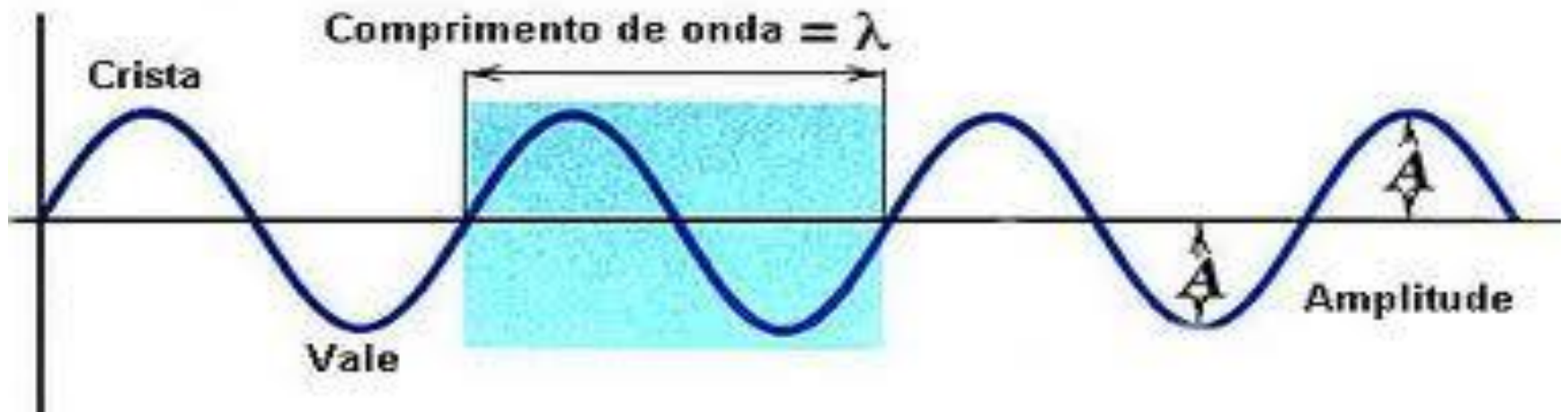
Exemplo: bola descendo uma rampa:



Sabendo a posição e o momento iniciais, bem como as forças que atuam no sistema, podemos calcular (prever) com grande exatidão por meio das leis de Newton a posição e o momento em qualquer instante t .

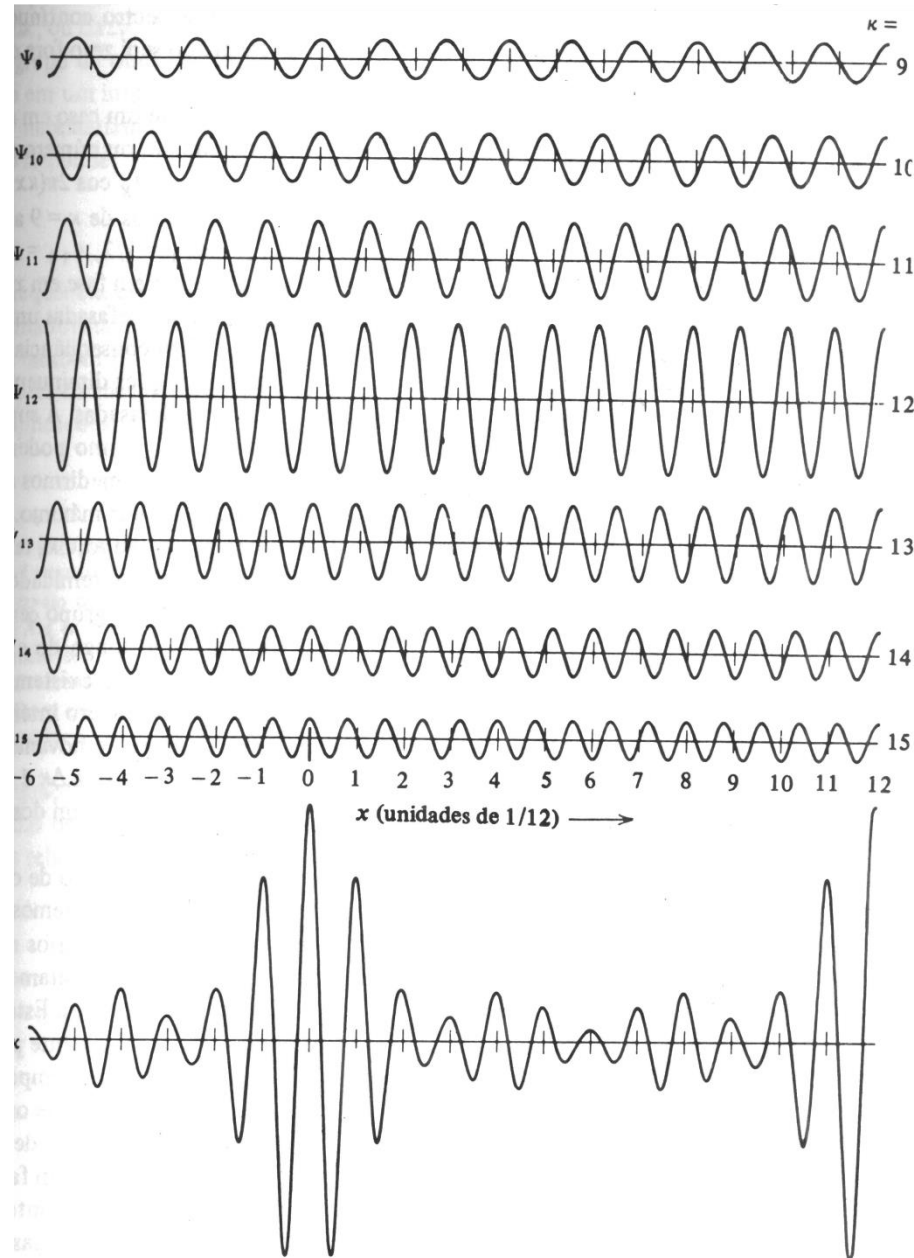
Caráter Probabilístico da Física Quântica

Não se pode definir a localização precisa de uma onda porque ela se estende no espaço.



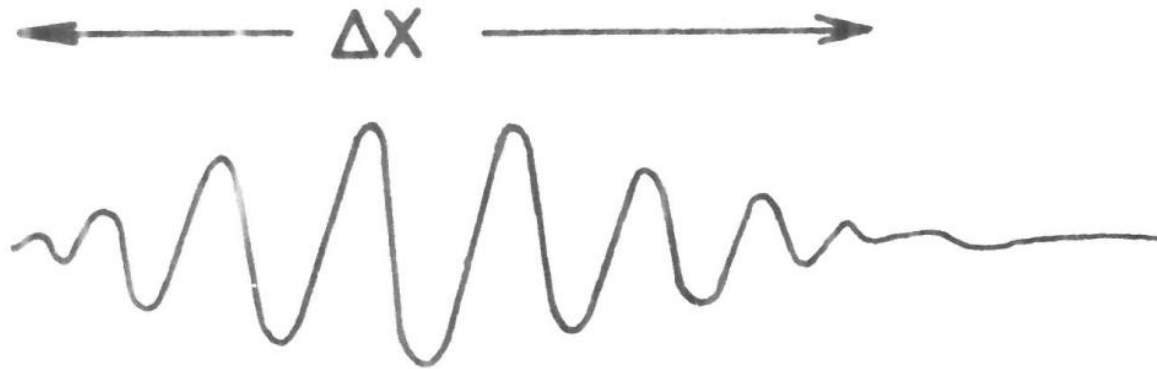
Uma forma de “restringir” a onda a uma região do espaço e assim conhecer a sua posição com mais precisão é somar ondas de comprimentos de onda (λ) diferentes. Se o número de ondas somadas for suficientemente grande, teremos um **pacote de ondas**.

Superposição de Ondas



comprimentos de
onda ligeiramente
diferentes

Caráter Probabilístico da Física Quântica



Porém, como λ está relacionado ao momento e como somamos diversos valores de λ diferentes, o valor do momento torna-se menos preciso.

O Princípio da Incerteza de Heisenberg

Estabelece um limite na precisão com que a posição e o momento de uma partícula podem ser determinados simultaneamente.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

O princípio da Incerteza de Heisenberg

Cálculo da posição de um elétron do átomo de hidrogênio ($m = 9,11 \times 10^{-31}$ kg) movendo-se a 5×10^6 m/s supondo , incerteza de 1% ($\Delta v = 5 \times 10^4$ m/s)

$$\Delta x \cdot \Delta mv \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta x \geq \frac{h}{4\pi m \Delta v} = \frac{(6,63 \times 10^{-34} \text{ Js})}{4\pi (9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})(5 \times 10^4 \text{ m/s})} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$$

Diâmetro médio de um átomo de hidrogênio (2×10^{-10} m)

Conclusão, não é apropriado imaginar o elétron movendo-se ao redor do núcleo em órbita bem definida.

O princípio da Incerteza de Heisenberg

Uma bola de 50,0 g move-se a 30,0 m/s. Se sua velocidade é medida com uma acurácia de 0,10%, qual é a incerteza mínima em sua posição?

Dados:

$$v = 30 \text{ m/s}$$

$$\delta v = 0,10\%$$

$$m = 50,0 \text{ g}$$

Note que a bola é não-relativística. Então, $p = mv$, e a incerteza na medida do momento é

$$\begin{aligned}\Delta p &= m(\Delta v) = m(\delta v \cdot v) \\ &= (50,0 \times 10^{-2} \text{ kg})(1,0 \times 10^{-3} \cdot 30 \text{ m/s}) = 1,5 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m/s}\end{aligned}$$

Então, a relação de incerteza implica que

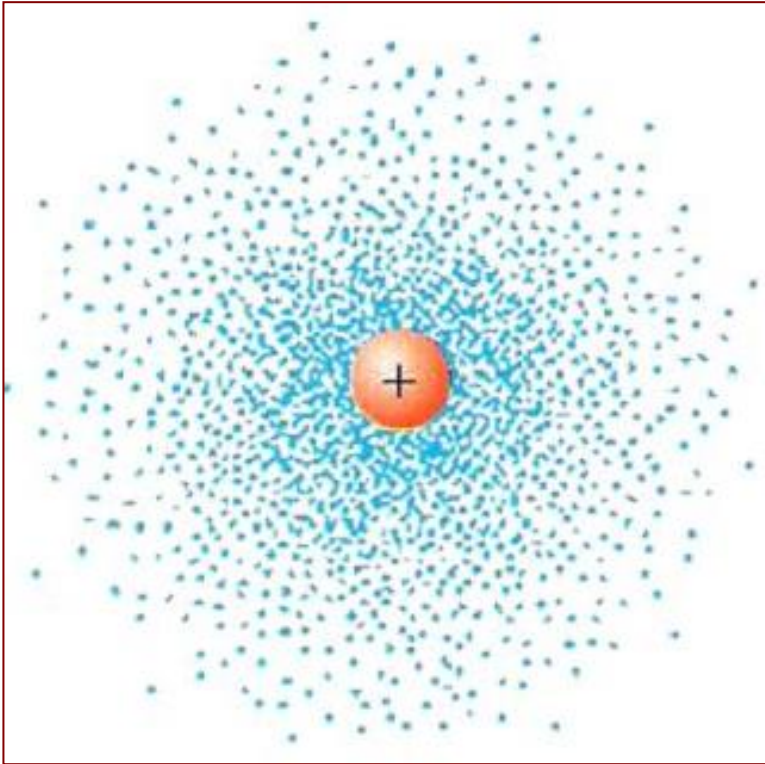
Encontre:

$$\delta x = ?$$

$$\Delta x \geq \frac{h}{4\pi(\Delta p)} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{4\pi(1,5 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m/s})} = 3,5 \times 10^{-33} \text{ m}$$

Modelo Atômico de Acordo com a Mecânica Quântica

Irwin Schrödinger:



Orbital - zona em torno do núcleo onde é elevada a probabilidade de se encontrar um elétron de uma dada energia.

Princípio da Incerteza de Heisenberg: estabelece ser impossível conhecer simultaneamente e com precisão a posição e o momento de uma partícula pequena como o elétron.

Bibliografia

- White, D.P., *Química a Ciência Central*, Pearson Education, 9ª Edição, 2005.
- Chang, R., *Química Geral – Conceitos Essenciais*, 4ª Edição, McGrawHill, 2006.
- Atkins P., Jones L., *Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente*, 3a. Ed., 2006, Bookman.
- Feynman, R. P. *The Feynman Lectures on Physics: Quantum Mechanics*, Addison-Wesley, cap. 1
- Eisberg & Resnick, *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*, Elsevier.
- McQuarrie, *Quantum Chemistry*, 2nd Ed., University Science Books