

Propriedades ondulatórias da matéria

Aula 5

Prof. Márcio Sampaio Gomes Filho



Observação

- ❖ Esses slides são um complemento à aula ministrada em sala;
- ❖ Explicações/desenvolvimentos serão feitas no quadro.



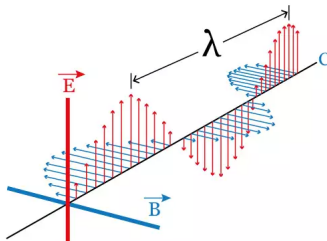
Informação

- ❖ Página do curso: <https://marciosampaio.github.io/fisica-quantica-2025.1.html>

Ondas e fenômenos ondulatórios (revisão)

- ❖ Ondas são perturbações que se propagam através de um meio (ou no vácuo, como no caso das ondas eletromagnéticas), sem transporte de matéria, apenas energia. Elas podem ser classificadas em **ondas mecânicas** (que necessitam de um meio material para se propagar, como ondas sonoras) e **ondas eletromagnéticas** (que não precisam de meio material e se propagam no vácuo, como a luz).
- ❖ As ondas podem ser **transversais**, quando a oscilação é perpendicular à direção de propagação, ou **longitudinais**, quando a oscilação ocorre na mesma direção da propagação.

Exemplos



Campos eletromagnéticos. (Imagem: Educa Mais Brasil)

❖ <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/ondas-estacionarias.htm>

Ondas estacionárias

- ❖ Ondas estacionárias são ondas que resultam da **interferência de duas ondas de mesma frequência**, amplitude e direção, mas que se propagam em sentidos opostos. Elas não se deslocam, mas apresentam pontos fixos chamados **nós** (onde a amplitude é zero) e pontos de máxima amplitude chamados **ventres**.
- ❖ Veja o exemplo:
<https://www.youtube.com/watch?v=-gr7KmT0rx0>



A hipótese de de Broglie

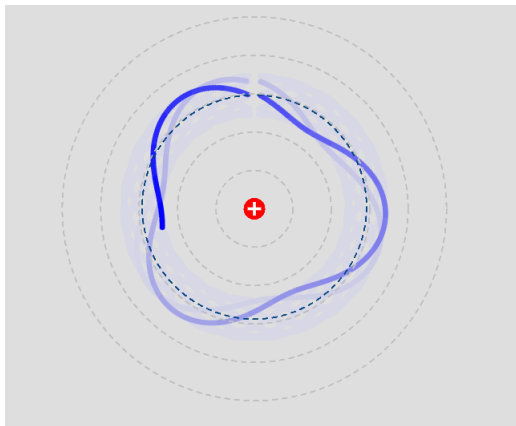
Em 1924, um estudante de pós-graduação francês, Louis de Broglie, propôs na sua dissertação de doutorado a seguinte linha de raciocínio:

- ❖ Um feixe luminoso é uma onda, mas transfere energia e momento a partículas de matéria por meio de “pacotes” chamados fótons.
- ❖ Por que um feixe de partículas (por exemplo, elétrons) não pode ter as mesmas propriedades?
- ❖ Podemos pensar que um elétron, ou qualquer outra partícula, se comporta como uma onda de matéria que transfere energia e momento a outras partículas através de “pacotes” (quanta)?

A hipótese de de Broglie

Esta hipótese era altamente especulativa, já que ainda não havia nenhuma evidência experimental do comportamento ondulatório de elétrons ou de outras partículas.

A hipótese de de Broglie



❖ https://javalab.org/en/matter_wave_en/



- ❖ De Broglie apontou que suas equações levavam a uma interpretação física da quantização de Bohr do momento angular do elétron em átomos hidrogenóides.
- ❖ De acordo com de Broglie o elétron no átomo de Bohr devia se comportar como uma onda de matéria com comprimento de onda (comprimento de onda de de Broglie):

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (1)$$

Exercício: Comprimento de Onda de uma Bola de Pingue-Pongue: Qual é o comprimento de onda de uma bola de pingue-pongue de 2,0 g ao ser rebatida com uma velocidade de 5 m/s?

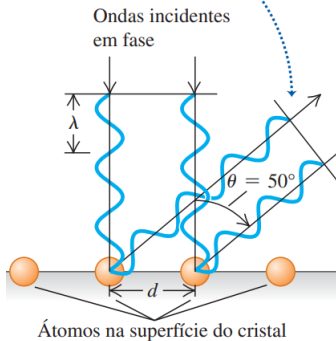
Exercício: Comprimento de Onda de um Elétron Lento: Calcule o comprimento de onda de um elétron com uma energia cinética de 10 eV.

Evidências experimentais da hipótese de de Broglie

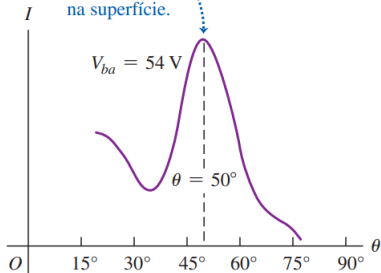
- ❖ Experimento de Davisson e Germer: Elétrons de baixa energia são difratados por um cristal de níquel.
- ❖ Veja o vídeo:
<https://www.youtube.com/watch?v=Bm3v4lzfhw&t=48s>

Evidências experimentais da hipótese de de Broglie

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

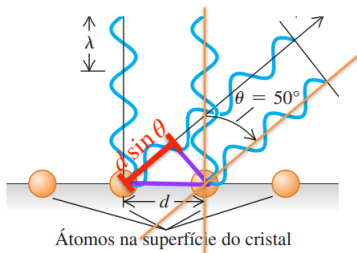


- (a) Este pico na intensidade dos elétrons espalhados se deve à interferência construtiva entre as ondas dos elétrons espalhadas por diferentes átomos na superfície.



Experimento de Davisson e Germer

$$n\lambda = d \sin \theta \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$



- ❖ Experimento: $n = 1$,
 $d = 0,215 \text{ nm}$ (níquel),
 $\theta = 50^\circ$ e $E_k = 54 \text{ eV}$.
- ❖ $\lambda = d \sin \theta = 0,165 \text{ nm}$.
- ❖ De Broglie:
 $\lambda = \frac{h}{p} = 0,167 \text{ nm}$.

O valor experimental está em excelente acordo com o comprimento de onda de de Broglie!

- ❖ Posteriormente, Davisson e Germer realizaram um estudo sistemático para testar a relação de Broglie usando elétrons de até 400 eV e vários arranjos experimentais. Eles confirmaram a validade da relação de de Broglie.
- ❖ Uma confirmação independente da relação de de Broglie foi feita por G. P. Thomson em 1927.
- ❖ G. P. Thomson dividiu com Davisson o Prêmio Nobel de Física de 1937.
- ❖ Desde então, a difração de outros átomos, de prótons e de nêutrons foi observada. Em todos os casos, os comprimentos de onda medidos concordam com a previsão de de Broglie.
- ❖ Assim, não há dúvida de que toda a matéria tem comportamento ondulatório assim como comportamento corpuscular (**dualidade onda-partícula**)