

## A Essência da Mecânica Quântica

23/08/2021

Muitos autores consideram diferentes fenômenos ou princípios como a essência da mecânica quântica, entre eles:

- > Existência de **quantidades discretas**
  - ↳ Fótons, energias/órbitas nos átomos, ...
- > Caráter **probabilístico** e um mundo "indeterminista"
  - ↳ Incertezas intrínsecas (não é desconhecimento)
- > Princípio da **Incerteza** de Heizenberg
  - ↳ Não existem mais trajetórias bem definidas
- > O **observador** não pode ser dissociado com o objeto observado (**filosófico**)
  - ↳ Colapso da função de onda
- > Princípio de **superposição** quântica
  - ↳ Um ente quântico pode estar em mais de um estado ao mesmo tempo
- > Existência de grandezas que não comutam (**matemático**)
  - ↳ Formalismo de operadores e observáveis
- > **Não-localidade** proposta pelo **teorema de Bell**
  - ↳ Paradoxo EPR (Einstein-Podolski-Rosen) e partículas emaranhadas
- > Constante de Planck ( $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ )
  - ↳ Separação entre o mundo **macroscópico** e o **microscópico**

> Dualidade onda-partícula (vamos trabalhar com essa)

↳ Caráter dual de ondas e partículas

### 1. O experimento de dupla-fenda

No século 17 foi bastante discutido a natureza da luz. Newton acreditava que a luz é composta por partículas indivisíveis dando à elas o nome de **corpúsculos**. Outros cientistas da época como Huygens afirmaram que a luz é uma onda. Em 1801, Thomas Young propôs um experimento que mostra fortemente o caráter ondulatório da luz, o chamado **experimento da dupla fenda**.

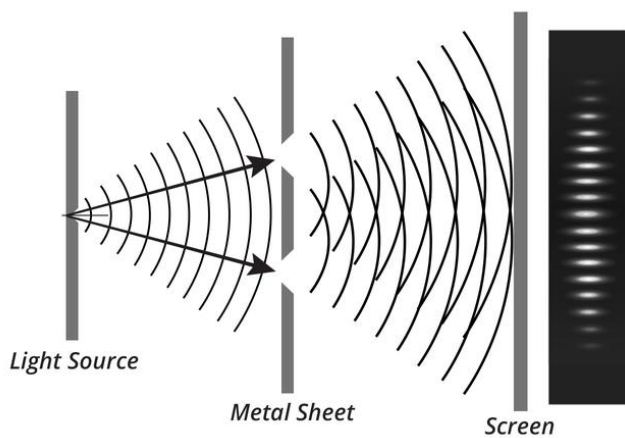


Fig. 1: Experimento da Dupla-Fenda

Era sabido na época que somente ondas apresentavam os fenômenos de **interferência** e **difração**. Com essa ideia, Young propôs um experimento onde uma fonte de luz **coerente** (fase relativa entre dois pontos constante) é posicionada próxima à duas fendas pequenas. Um

anteparo é colocado à uma certa distância do plano das fendas onde é possível ver uma projeção da luz (Fig. 1).

Sob a hipótese de que a luz é uma onda, quando ela passa por um obstáculo da ordem de seu comprimento de onda (luz visível: 380 nm - 750 nm) acontece o fenômeno da **difração** em que o obstáculo se torna uma nova fonte de luz. Quando a luz passa pela dupla fenda temos a seguinte situação ilustrada na Fig. 2.

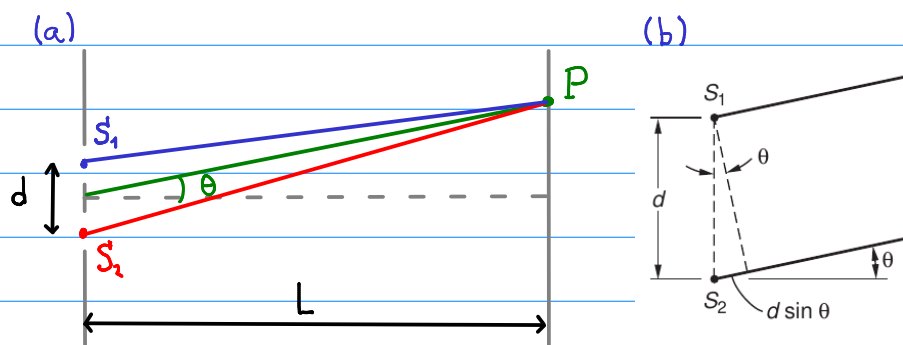


Fig. 2: Luz passando por uma dupla fenda

Se  $d \ll L$ , podemos considerar que o ponto  $P$  é constituído pela superposição de dois feixes aproximadamente paralelos os quais fazem um ângulo  $\theta$  com a direção perpendicular ao plano das fendas. A intensidade da luz no ponto  $P$  é dada pelo fenômeno da interferência em que define a amplitude da onda através da soma vetorial entre elas. Como as fontes são coerentes, vai haver interferências construtivas e destrutivas perfeitas quando a diferença de caminho óptico (caminho óptico é definido pela distância percorrida pela luz em um meio multiplicado pelo índice de refração desse meio), que nesse problema é dado por  $d \sin \theta$  (ver Fig. 2-b), é dado por :

→ Inteiro:  $\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$

$d \sin \theta = n \lambda$  → Interferência completamente construtiva

$d \sin \theta = (n + 1/2) \lambda$  → Interferência completamente destrutiva

Semi-inteiro:  $\dots, -3/2, -1/2, 0, 1/2, 3/2, \dots$

## 2. O comportamento dual da luz

Por muitos anos após o experimento de Young não havia dúvidas que a luz é uma onda, principalmente após 1865, quando James Clark Maxwell publicou seu trabalho mostrando que a natureza da luz é associada com ondas eletromagnéticas. A discussão onda-partícula da luz volta em torno de 1890 com o aparecimento de alguns fenômenos que o comportamento ondulatório

não podia explicar como o efeito fotoelétrico, observado pela primeira vez por Henrich Hertz em 1887. Em 1905, Albert Einstein publicou um trabalho explicando o efeito fotoelétrico através do postulado que a luz é composta por pacotes de energia os quais foram chamados posteriormente de fótons.

Geoffrey Taylor, orientado por J. J. Thomson (descobridor do elétron), utilizou luz de baixa intensidade em um experimento de dupla fenda com o objetivo de ver um certo comportamento discreto da luz. Ele publicou seus resultados em 1909 e basicamente encontrou um padrão de interferência contínuo. Thomson e Taylor argumentaram que não possuíam fontes de luz fracas o suficiente para ver um comportamento discreto. Muitos anos depois, após o estabelecimento da teoria quântica, foi possível refazer o mesmo experimento de Taylor. A empresa Hamamatsu, em 1984, produziu um sistema capaz de contar fótons únicos com luz de baixíssima intensidade:

<https://youtu.be/I9Ab8BLW3KA> → Experimento de Dupla-Fenda feita com fótons únicos

O experimento da dupla fenda com fótons únicos sugerem que a intensidade da luz está associada com a probabilidade de encontrar um fóton em uma certa posição no espaço.

### 3. O comportamento dual de partículas

Em 1924, Louis de Broglie apresentou sua tese de doutorado inspirada na dualidade onda-partícula da luz. de Broglie propôs um comportamento dual para a matéria associando-a um comprimento de onda  $\lambda = h/p$ , sendo  $p$  seu momento. Inicialmente a onda de matéria de de Broglie não foi bem aceita pela falta de comprovação experimental. Entre 1923-27, os físicos Clinton Davisson e Lester Germer incidiram um feixe de elétrons

em um cristal de níquel cuja configuração cristalina era bem conhecida via difração de raios-X. O  $\lambda$  de de Broglie para o elétron acelerado por uma tensão na ordem de dezenas de volts é comparável à separação dos planos cristalinos do níquel, portanto, esperamos algum tipo de interferência-difração para os elétrons semelhante a difração de Bragg com os raios-X. O experimento de Davisson-German confirmou o esperado e, por isso, Davisson e de Broglie ganharam o prêmio Nobel de Física. Em 1927, o físico inglês G. P. Thomson mostrou a difração de feixes de elétrons passando por um filme fino comprovando, novamente, as ondas de matéria de de Broglie. As difrações com moléculas de hidrogênio, átomos de hélio, neutrons, ... foram feitas posteriormente mostrando, então, a universalidade da hipótese de de Broglie. Em 1961, Claus Jönsson incidiu um feixe de elétrons em uma dupla fenda obtendo o resultado ilustrado na Fig.3.

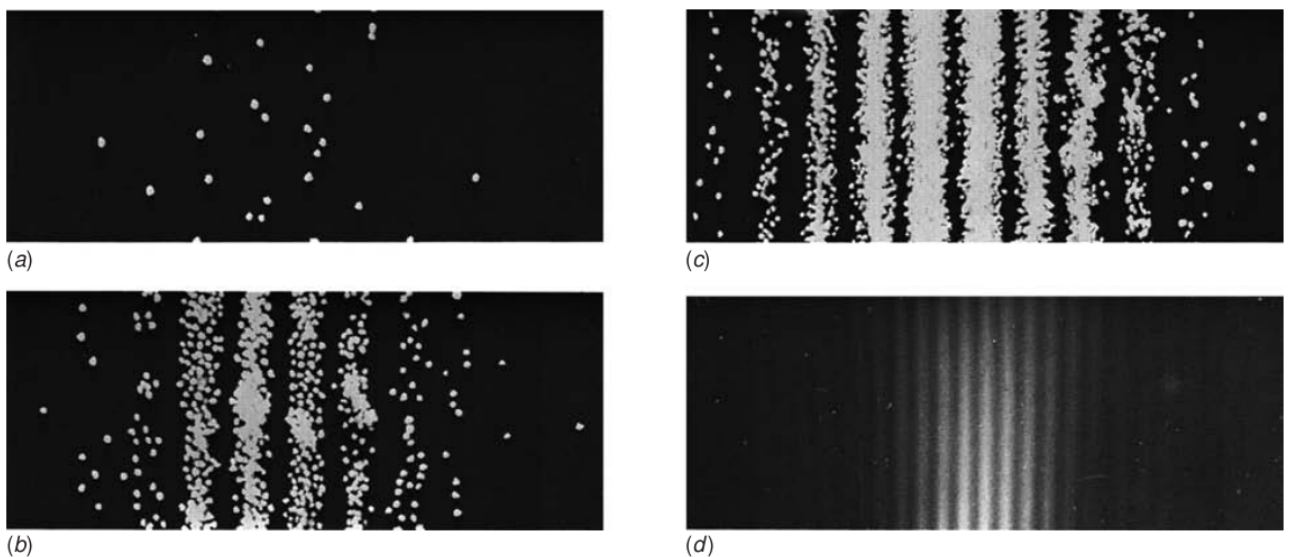


Fig.3: Experimento de Claus Jönsson

Esse resultado indica que podemos construir uma função de onda  $\Psi$  para o elétron de forma que  $|\Psi|^2$  está associado a probabilidade de encontrá-lo em determinada posição no espaço, assim como o fóton e sua relação com a intensidade da luz.

#### 4. Interpretações da Teoria Quântica

As interpretações da teoria quântica são um conjunto de **teses** que se agrega ao formalismo mínimo da teoria científica, e que nada afeta as **previsões observacionais** da teoria. Tais teses fazem afirmações sobre a **realidade** dos fenômenos observados. Existem dezenas de interpretações diferentes que podem ser agrupadas, em grande parte, em quatro grupos descritos no livro **Conceitos de Física Quântica**, do **Oswaldo Pessoa Jr.**

##### > **Interpretação Ondulatória:** (Erwin Schrodinger e John von Neuman)

Um objeto quântico é descrito completamente por um caráter ondulatório de forma que a função de onda (estados quânticos de forma mais genérica) possui realismo. Durante a detecção (medida) desse objeto, a onda se torna mais ou menos localizada o que é associado à um comportamento corpuscular;

##### > **Interpretação corpuscular:** (Alfred Landé e Leslie Ballentine)

Não existem ondas, somente partículas. O caráter ondulatório expresso pela função de onda ou, de forma mais geral, estados quânticos é simplesmente uma descrição estatística (ensembles). Portanto, essa interpretação considera a Mecânica Quântica incompleta de forma que devem existir **variáveis ocultas** que descrevem em totalidade o comportamento das partículas;

##### > **Interpretação Dualista Realista:** (Louis de Broglie e David Bohm)

Um objeto quântico se divide em duas partes: uma partícula com trajetória bem definida (mas desconhecida), e uma "onda piloto" real que guia a partícula. Essa interpretação também assume que a Mecânica Quântica é incompleta e, portanto, devem existir **variáveis ocultas**;

### > Interpretação da Complementaridade: (Niels Bohr)

Não existe realismo na função de onda ou em estados quânticos (caráter ondulatório), sendo somente uma ferramenta matemática para realizar cálculos e previsões (abordagem epistêmica). Além disso, os fenômenos ondulatórios não devem coexistir com os fenômenos corpusculares o que é controlado por processos de perda de coerência ou o colapso da função de onda. Os estados quânticos são capazes de descrever completamente os fenômenos quânticos, o que torna a Mecânica Quântica completa;  
(Interpretação de Copenhague)