

Interpretação de Bohm

Felipe M. Silva ¹

¹Universidade Estadual de Campinas

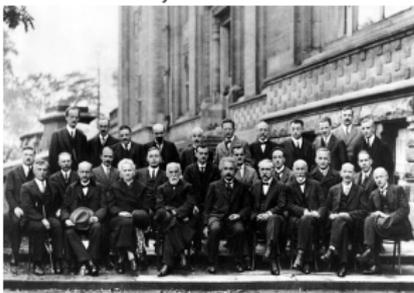
4 de maio de 2020

Conteúdo

- 1 História e Ideias Centrais
- 2 O Problema da Medida
- 3 Resultados da Teoria
- 4 Referências

História

- Essa interpretação possuem diversos nomes:
 - Interpretação de Bohm;
 - Teoria de de Broglie-Bohm;
 - Teoria da Onda Piloto;
 - Mecânica Bohmiana;
- Louis de Broglie formulou as ideias centrais dessa interpretação;
- Na Conferência de Solvay de 1927 de Broglie apresentou essas ideias;
- Havia questões abertas na interpretação que de Broglie não sabia resolver, com isso ela foi deixada de lado naquele momento;
- Anos depois, em 1952, as ideias de de Broglie foram resgatadas por David Bohm;



Ideias Centrais da Teoria

- Segundo teoria a posição e trajetória dos objetos quânticos têm realidade independente da observação.
 - Completamente contrário à interpretação de Copenhagen.
- de Broglie acreditava que o movimento de uma partícula, livre ou não, é determinada por uma onda $\Psi(\vec{x}, t)$, chamada de **onda piloto**;
- A onda piloto seria descrita pela equação de Schrödinger;
- A mecânica clássica deveria ser alterada. As novas equações de movimento para N partículas seriam:

$$\frac{d\vec{x}_\alpha}{dt} = \frac{\vec{j}_\alpha(\vec{x}, t)}{|\Psi(\vec{x}, t)|^2}, \quad \text{para } \alpha = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

- sendo \vec{j}_α análoga à corrente da interpretação de Copenhagen, elas devem satisfazer a eq. de continuidade:

$$\frac{\partial |\Psi(\vec{x}, t)|^2}{\partial t} + \sum_{\alpha=1}^N \nabla_\alpha \cdot \vec{j}_\alpha = 0 \quad (2)$$

Ideias Centrais da Teoria

- Levando $\Psi(\vec{x}, t) = R(\vec{x}, t)e^{iS(\vec{x}, t)/\hbar}$ na eq. de Schrödinger temos¹

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \sum_{\alpha=1}^N \frac{(\nabla_{\alpha} S)^2}{2m_{\alpha}} + V - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^N \frac{\hbar^2}{2m_{\alpha}} \frac{\nabla_{\alpha}^2 R}{R}}_{\text{Potencial quântico } Q} = 0, \quad \text{parte real} \quad (3)$$

$$\frac{\partial R^2}{\partial t} + \sum_{\alpha=1}^N \nabla_{\alpha} \cdot \underbrace{\left(\frac{R^2}{m_{\alpha}} \nabla_{\alpha} S \right)}_{\text{corrente } \vec{j}_{\alpha}} = 0, \quad \text{parte imaginária} \quad (4)$$

- A primeira é uma equação de Hamilton-Jacobi com o potencial quântico Q ;
- A segunda é uma equação de continuidade, da qual obtemos as correntes.

$$\frac{d\vec{x}_{\alpha}}{dt} = \frac{R^2 \nabla_{\alpha} S}{m_{\alpha} R^2} = \frac{\nabla_{\alpha} S}{m_{\alpha}}, \quad \text{para } \alpha = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

¹Ver Aula 10 - Slide 8: Olhamos para as potências de \hbar 

Ideias Centrais da Teoria

- Exatamente como ocorre na teoria de Hamilton-Jacobi. A equação 3 descreve a equação principal de Hamilton e 5 são as equações de movimento.
- Assim o limite clássico da teoria de onda piloto é direto, se o potencial quântico Q for negligenciável retornamos a mecânica clássica.
- Uma das questões que de Broglie não sabia explicar em 1927 era o significado físico da onda piloto.
- Similarmente a interpretação de Copenhagen, em qualquer instante de tempo t , o módulo quadrado da função de onda $|\Psi|^2$ é a distribuição estatística das posições.

O problema da medida

- Outra questão que de Broglie não sabia explicar era o processo de medida. Bohm resolveu este problema.
- O princípio da incerteza aqui é interpretado como uma incapacidade experimental de não influenciar o sistema medido.
- O que determina o futuro de uma partícula segundo a teoria é:
 - a evolução temporal da onda piloto;
 - a posição inicial da partícula.
- Com essas duas informações o futuro da partícula seria conhecido. Devido ao princípio da incerteza isso não ocorre.
- Consequentemente, o colapso devido a medida é apenas aparente. A partícula já possuía a propriedade que medimos antes da medida.

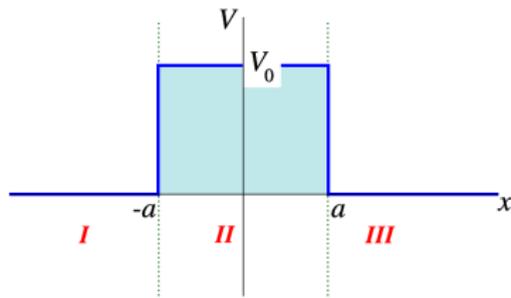
Átomo de Hidrogênio

- A estabilidade da matéria é um problema importante para a Mecânica Quântica. O grande problema do modelo atômico de Bohr era que o elétron orbitava o núcleo, mas como ele é partícula carregada ele deveria emitir radiação e colapsar sobre o núcleo. Qual será a trajetória do elétron no átomo de hidrogênio segundo a Teoria de Onda Piloto?
- Para os estados estacionários do átomo de H:
 $\Psi_{nlm_l} \rightarrow S(r, \theta, \phi) = \hbar m_l \phi$. Daí,

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \frac{\hbar m_l}{m_e \sin \theta} \hat{\phi} \quad (6)$$

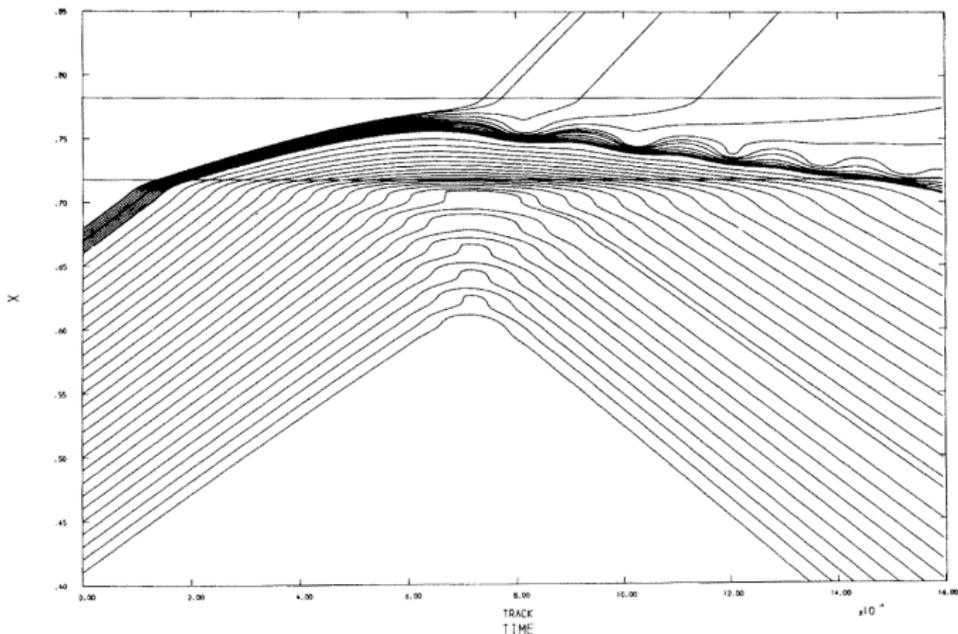
- Para $m_l = 0$, tem-se repouso. O átomo de H no estado fundamental é estável!

Tunelamento I



- Partícula incide da região I na barreira (região II);
- Se a energia partícula é menor que a barreira (V_0), então a partícula não deveria ser observada na região III;
- Segundo a interpretação de Onda Piloto, existe um novo potencial: $Q = - \sum_{\alpha=1}^N \frac{\hbar^2}{2m_{\alpha}} \frac{\nabla_{\alpha}^2 R}{R}$;
- Este potencial dá a energia necessária para a partícula superar a barreira.

Tunelamento II



- Energia é metade da barreira.
- C. Dewdney e B. J. Hiley, Foundations of Physics **12**, 27 (1982) Doi: <<https://doi.org/10.1007/BF00726873>>

Não Localidade

- Em sistema com varias partículas, estados nos quais não há correlação entre as medidas, ou seja, a função de onda é da forma:

$$\Psi(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N) = \psi_1(\vec{x}_1)\psi_2(\vec{x}_2)\dots\psi_N(\vec{x}_N) \quad (7)$$

$$\Rightarrow S(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N) = \sum_{\alpha=1}^N s_{\alpha}(\vec{x}_{\alpha}) \quad (8)$$

- Neste caso a dinâmica da partícula é governada apenas por variáveis locais: $m_{\alpha}\vec{v}_{\alpha} = \nabla_{\alpha}s_{\alpha}(\vec{x}_{\alpha})$
- Agora, se a função de onda não tiver a forma da eq. 7, então a dinâmica da partícula depende de variáveis não locais:
 $m_{\alpha}\vec{v}_{\alpha} = \nabla_{\alpha}S(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N)$
- A teoria de Onda Piloto de variáveis ocultas não local, e portanto não satisfaz a desigualdade de Bell.

Considerações Finais

- A teoria de Onda Piloto é realista de variáveis ocultas não locais.
- Apesar de não ser possível observar as trajetórias, elas são mantidas nessa teoria.
- Aparentemente as trajetórias previstas são consistentes com os fenômenos quânticos conhecidos;
- Em 2005 foi descoberto um análogo hidrodinâmico dessa teoria.

Referências Bibliográficas

- A apresentação foi baseada no capítulo 5 do livro:
 - NETO, Nelson Pinto. A Teoria de de Broglie-Bohm. *In*: NETO, Nelson Pinto. **Teorias e Interpretações da Mecânica Quântica**. 1^a. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2010. cap. 5, p. 53-72.
- Artigo interessante sobre a interpretação de onda piloto:
 - BETZ, Michel E.M.. Elementos de mecânica quântica da partícula na interpretação da onda piloto. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 01-14, Dec. 2014.
Doi: <<https://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172014000400011>>
- Os gráficos de Interferência e Tunelamento foram tirados dos artigos:
 - C. Philippidis, C. Dewdney e B. J . Hiley, Nuovo Cimento **52B**, 15 (1979) Doi: <<https://doi.org/10.1007/BF02743566>>
 - C. Dewdney e B. J . Hiley, Foundations of Physics **12**, 27 (1982) Doi: <<https://doi.org/10.1007/BF00726873>>
- Artigo da Quanta Magazine sobre onda piloto em gotas de óleo: Link
- Vídeo sobre a experiência com gotas de óleo: Link