

Introdução à Filosofia da Mecânica Quântica

AULA 01

APRESENTAÇÃO

Décio Krause

<https://sites.google.com/view/krausedecio>

deciokrause@gmail.com

09 de Setembro de 2025



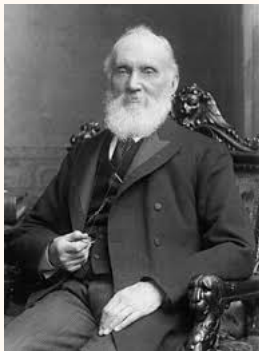
Penso que posso dizer com segurança que ninguém entende a mecânica quântica.

Richard Feynman

- **Aula 01** – Apresentação: ideias básicas.
- **Aula 02** – Uma formulação da MQ usando espaços de Hilbert.
- **Aula 03** – Alguns experimentos cruciais.
- **Aula 04** – Algumas interpretações.
- **Aula 05** – Lógica, filosofia e pseudo-ciência.

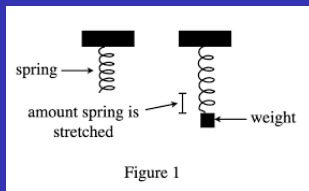
- Detalhes um pouco mais técnicos aqui:
[Krause, D. \(2021\) - Notas de Aula](#)
- Sedimentada por Isaac Newton (mecânica clássica) e por James Clerk Maxwell (eletromagnetismo clássico).
- Se pudéssemos conhecer a posição e o momento de cada partícula, poderíamos **determinar** o estado do universo a qualquer tempo. *Posição + Momento = estado*
- Ilustrado pelo **demônio de Laplace** (1814): um ser que tivesse o conhecimento total das condições iniciais do universo poderia determinar as condições de qualquer evento subsequente (determinismo).
- Física **determinista**.
- No final do século XIX, pensava-se que as explicações sobre o nosso universo estavam encerradas, bastando apenas uma maior precisão.

- Lord Kelvin: apenas duas pequenas nuvens pairam no horizonte.
- Transformaram-se em duas tempestades: a mecânica quântica e as teorias da relatividade.



Sir William Thomson, 1st Baron Kelvin (1824-1907)

Richard Feynman



“ “Quantum mechanics” is the description of the behavior of matter and light in all its details and, in particular, of the happenings on an atomic scale. *Things on a very small scale behave like nothing that you have any direct experience about.* They do not behave like waves, they do not behave like particles, they do not behave like clouds, or billiard balls, or weights on springs, or like anything that you have ever seen.” (Feynman’s Lectures on Physics, Vol. III, 1-1 - Quantum Mechanics)

Referência básica

Muito do que eu vou falar está no seguinte livro, disponível no site da Amazon:

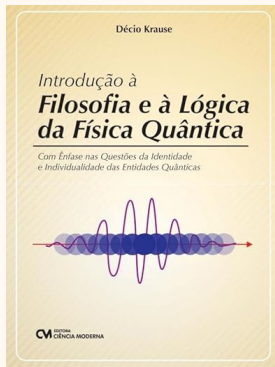


Figure: Ed. Ciência Moderna 2024

Outras referências

Outras referências gerais que são excelentes para estudos introdutórios:

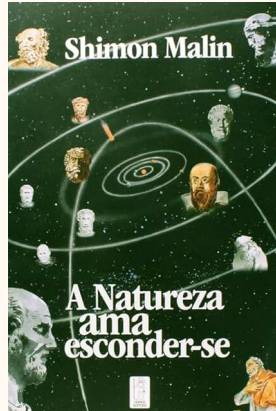
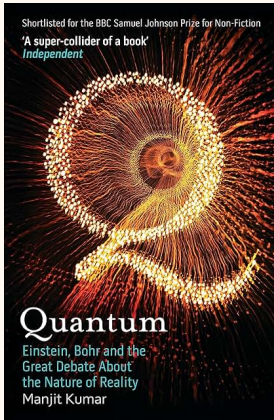


Figure: Manjit Kumar 2008, Shimon Malin 2003

Introdutórios, mas exigindo um pouco mais

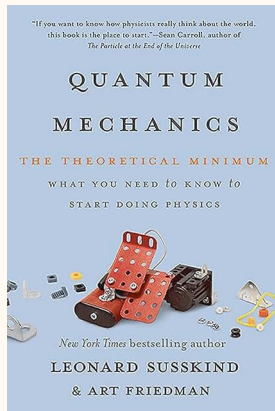
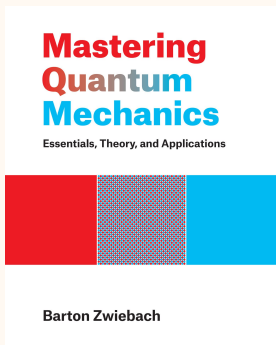


Figure: Zwiebach 2022, Susskind & Friedman 2014

Discussão filosófica mais detalhada

Pressupõe o conhecimento da MQ básica que veremos neste curso:

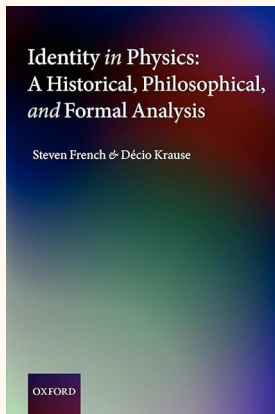


Figure: French & Krause 2006

Livro excelente

Silvio Seno Chibeni: *Aspectos da Descrição Física da Realidade*,
Unicamp: Coleção CLE n.21, 1997.

<https://unicamp.br/~chibeni/public/aspectos.pdf>



A natureza da luz

- > Século XVII: polêmica
- > Newton: formada por pequenas partículas, ou corpúsculos.
- > Huygens e Hooke: a luz consiste de ondas

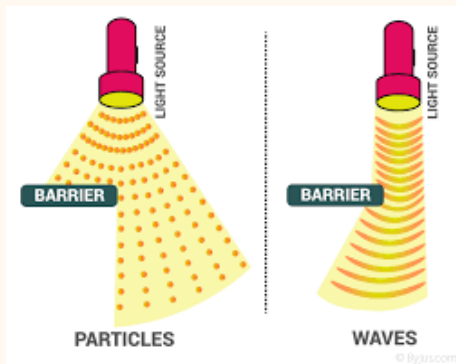
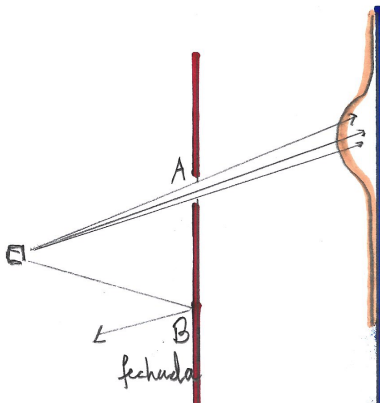


Figure: A influência de Newton fez a versão corpuscular prevalecer.

O experimento das duas fendas



Thomas Young 1803:



O experimento das duas fendas

Thomas Young 1803:

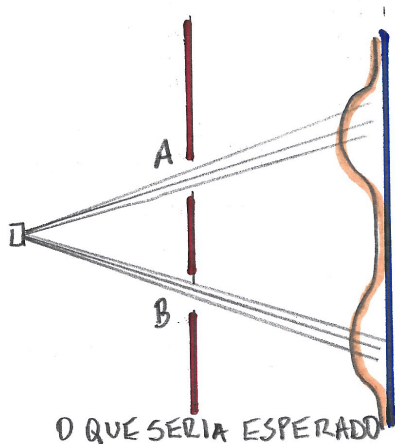


Figure: As duas fendas abertas. O que se espera de partículas e o que realmente

O experimento das duas fendas

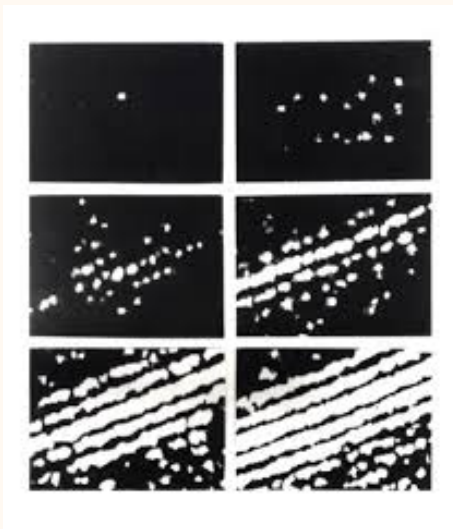
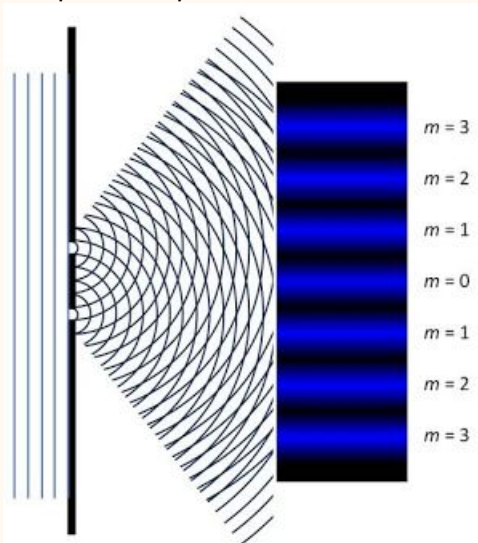


Figure: Fotografia real do padrão ondulatório.

Explicação

A luz tem um **comportamento dual**: ora comporta-se como se fosse composta de *partículas*, ora como se fosse formada por *ondas*.



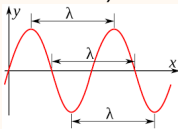
- Em 1924, Louis de Broglie propôs que a *matéria* deveria ter um comportamento parecido: **ondas de matéria**.
- Se a luz, que se supunha (desde Newton e com Einstein em 1905) era formada de partículas (fótons) e mesmo assim apresentava um comportamento ondulatório, o mesmo deveria ocorrer com a matéria (elétrons, prótons, etc.).
- Ou seja, eles deveriam *também* ter uma onda associada.
- Isso foi verificado experimentalmente: mesmo que enviemos (p.ex.) elétrons *um a um*, ao final teremos um padrão de interferência.
- Assistir: [Dr Quantum e o experimento das duas fendas](#)

Principais problemas

- 1 Quais eram alguns dos principais problemas levantados pela física e que não encontravam resposta na física clássica?
- 2 Mencionaremos três:
 - 1 A radiação do corpo negro
 - 2 O efeito fotoelétrico
 - 3 A teoria do átomo de Bohr
- 3 As respostas conduziram à física quântica.

A radiação do corpo negro

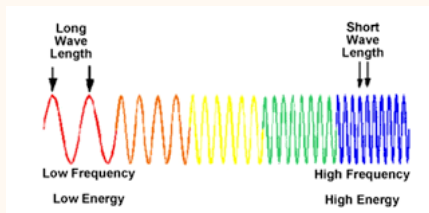
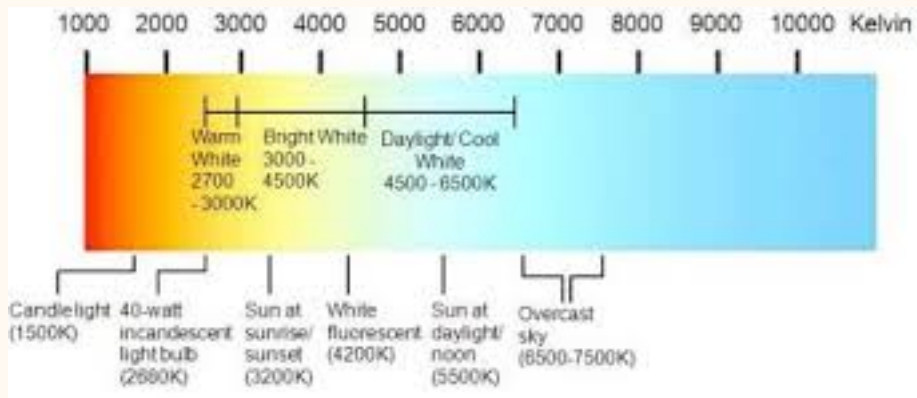
- Todo corpo acima de 0°K emite alguma radiação.
- Se $T \uparrow$, a energia $E \uparrow$ e ele emite luz, indo de λ grande (vermelho) a curto (azul e branco)



- λ : comprimento de onda



A radiação do corpo negro



A radiação do corpo negro

- A previsão da física clássica não explicava o que se via nos experimentos.
- Max Planck deu uma solução totalmente fora do padrão: a radiação não se propaga de forma contínua, mas em "pedaços".
- **Curiosidade:** Um de seus professores na Un. Munique sugeriu que ele desistisse da física porque não havia mais nada a ser descoberto. Cf. Jim Baggot, *The Quantum Story*, Cap. 1

Max Planck 1900

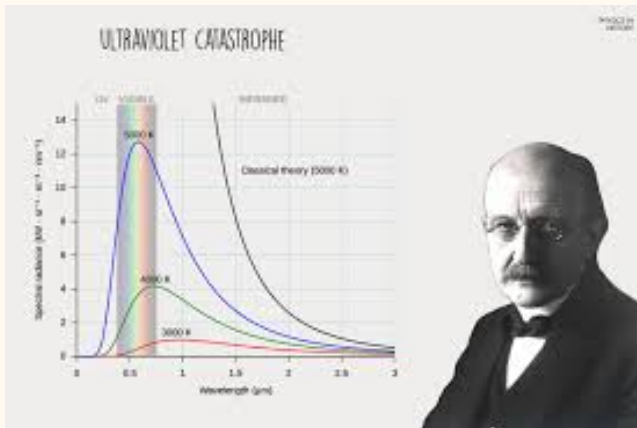
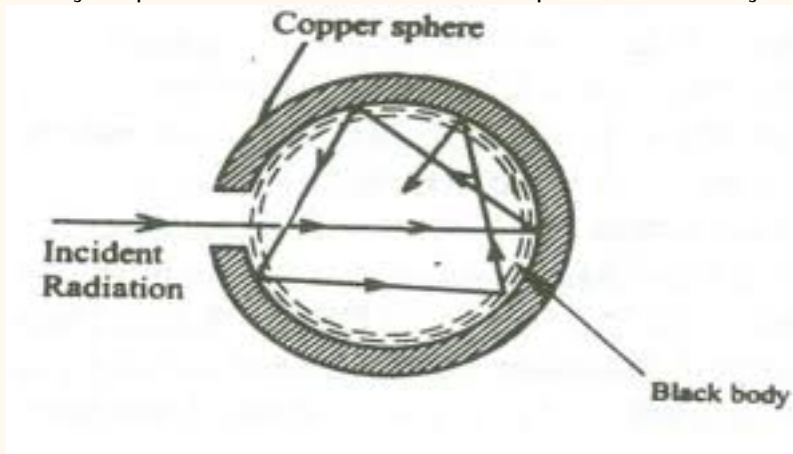


Figure: Max Planck (1859-1947). Em 1900, criou o conceito de **quantum de ação**, representado pela **constante de Planck h** .

O problema

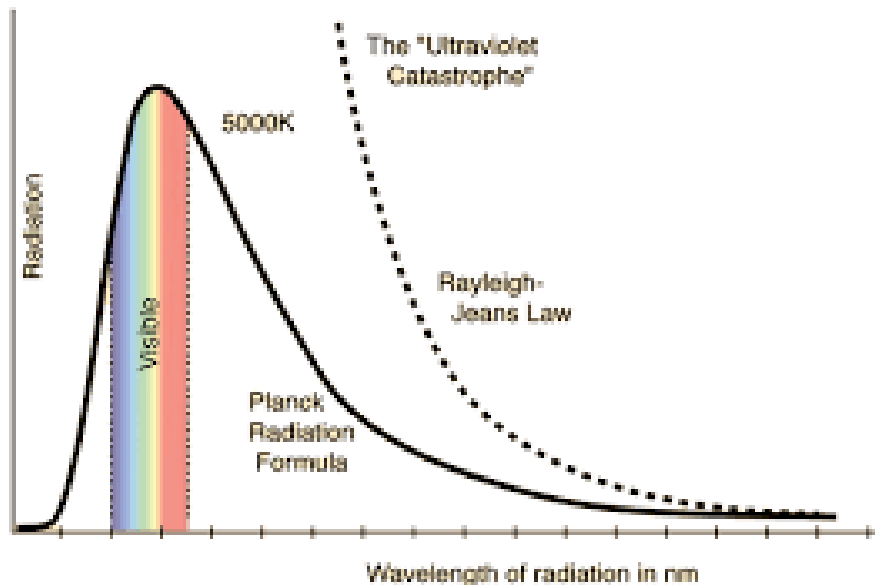
- 1 Um **corpo negro** é um objeto hipotético que absorve toda a radiação que nele incide e é um emissor perfeito de radiação.



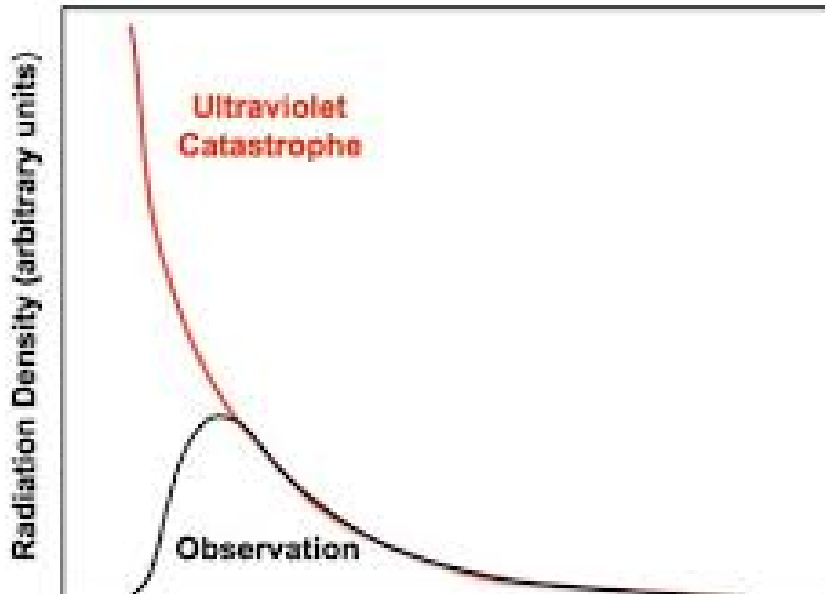
O problema

- 1 A física clássica não conseguia descrever os espectros observados nos experimentos, levando ao que ficou conhecido como **catástrofe do ultravioleta**.
- 2 A **lei de Planck** introduziu o conceito de **energia quantizada** solucionou o problema e deu início à física quântica.

A catástrofe do ultravioleta



A catástrofe do ultravioleta



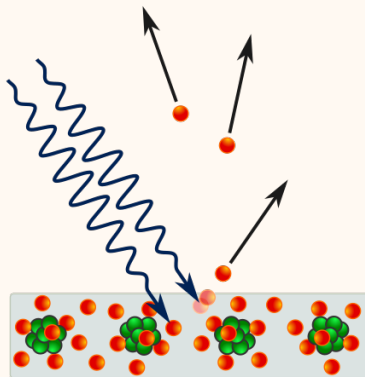
- "Em um ato de desespero."
- Supôs que a energia da radiação não era emitida de modo contínuo, mas em múltiplo de uma unidade fundamental: $\varepsilon = nh\nu$,
- expressa pelo **quantum de ação**, a **constante de Plank** h .
- Hoje é aceita valer $h = 6.62607004 \times 10^{-34}$ J.s.
- Planck achava que mais tarde seria encontrada a equação correta sem a hipótese da quantização.

A fórmula de Planck

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

O efeito fotoelétrico

- A radiação eletromagnética (luz) ocasiona a emissão de elétrons em alguns metais.



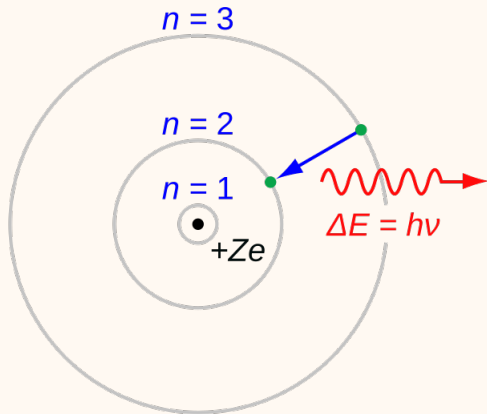
O efeito fotoelétrico, 1905

- A física clássica (eletromagnetismo) indicava que a radiação transmite energia de forma contínua.
- A alteração da **intensidade** (mais luz) deveria alterar a energia cinética dos elétrons e aumentar a quantidade de emitidos.
- Não era isso que se observava.
- Einstein (1905): a radiação se propaga como uma onda mas a energia é transmitida em pacotes discretos de luz (mais tarde: **fótons**), múltiplos do h de Planck: $\varepsilon = h\nu$.
- Constatou-se que a emissão de elétrons dependia da **frequência** da radiação.
- Ressurge a visão "corpuscular" da luz: há certas **unidades** mínimas.
- Esse trabalho lhe deu o Prêmio Nobel de 1921.

O átomo de hidrogênio, 1912

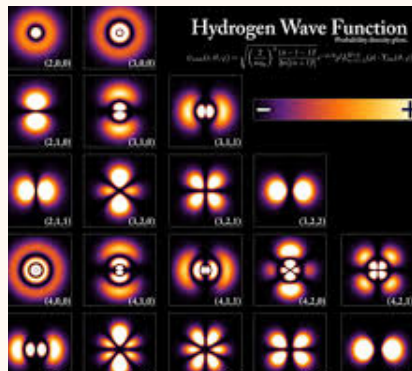
O modelo de Niels Bohr (1912): órbitas estacionárias.

- Para alguns, a teoria é inconsistente.



- **Comportamento dual:** onda e partícula.
- Não é uma e nem é outra.
- Não é ambas as coisas. **Cuidado com o que você lê por aí.**
- O seu **comportamento** é associado com uma ou outra coisa, que são o que conhecemos.
- Não sabemos ao certo: propaga-se como se fosse onda, mas bate em um anteparo como se fosse uma partícula.
- Isso vai se estender à matéria: elétrons, etc. (1924 - Louis de Broglie).

- Não são **órbitas**.



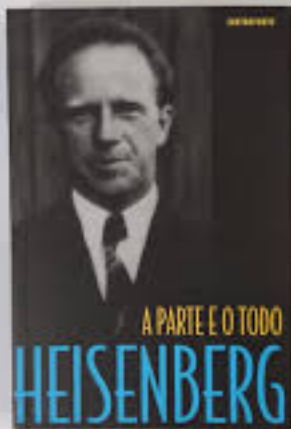
- Dizer comum: o lugar onde é mais provável encontrar o elétron. Dá a impressão de que o e^- é "algo" escondido nessa nuvem. Não, ele **é** a nuvem. Quanto mais e^- há (unidades de energia), mais clara a mancha.

A MQ não relativista (ortodoxa)

- Era preciso uma **teoria**:
- Por que a energia se transmite em quantidades discretas?
- É possível **derivar** a equação de Planck?
- 1925: o surgimento da **Mecânica Quântica**



- Werner Heisenberg (1901-1976) e a **mecânica de matrizes**, depois desenvolvida por ele, Max Born e Pascual Jordan.
- As propriedades das partículas são descritas por matrizes que evoluíam no tempo.



A MQ não relativista (ortodoxa)

- Erwin Schrödinger (1887-1962) e a **mecânica de ondas** (1926).
- Equação de Schrödinger, a função de onda: Ψ .



A MQ relativista

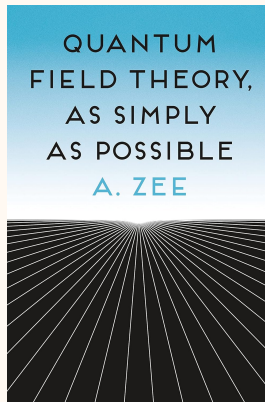
- P. A. M. Dirac (1902-1984): a equação relativística do elétron. O surgimento do *pósitron*.



$$(i\hbar\partial - m)\psi = 0$$

- As QFT – Teorias Quânticas de Campos
- As entidades básicas não são mais "partículas" e "ondas", mas **campos quânticos**.
- As partículas surgem como excitações nesses campos. São entidades **emergentes**, *ontologicamente secundárias*.

Anthony Zee, 2023.



As duas teorias

- As teorias de Heisenberg e de Schrödinger foram provadas serem equivalentes.
- Em 1932, John von Neumann (1903-1957) deu a elas um tratamento matemático rigoroso por meio dos **Espaços de Hilbert**.



O que essas teorias devem descrever?

A física clássica

Ver em [aspectos da física clássica](#)

- Os **estados** de um sistema físico são descritos por **pontos** em um **espaço de fases**, o R^6 .
- $A = \underbrace{\langle q_1, q_2, q_3 \rangle}_{\text{position}} \underbrace{\langle p_1, p_2, p_3 \rangle}_{\text{momentum}}$
- Todas em função de uma componente temporal, t .
- Com t variando (digamos em um intervalo (a, b)), o ponto descreve uma **trajetória**.
- As trajetórias podem se cruzar mas há **impenetrabilidade**.
- As trajetórias distinguem uma partícula de outra.

A estatística Maxwell-Boltzmann

A física clássica

	A	B	Prob
(1)	a, b		$1/4$
(2)		a, b	$1/4$
(3)	a	b	$1/4$
(4)	b	a	$1/4$

Table: Os estados (3) e (4) são contados como distintos.

Mesmo sendo de mesmo tipo, logo "indiscerníveis", os estados (3) e (4) diferem, logo **há algo** que as distingue. Heinz Post (1963):

Transcendental Individuality.

Dizemos que as partículas "clássicas" são **indivíduos** com identidades (em princípio) bem definidas.

MQ – deve dar conta de quê?

- Há duas espécies de partículas conhecidas: **bósons** e **férmions**.
- Bósons podem partilhar o mesmo **estado quântico**, ou seja, podem ter as **mesmas propriedades**, inclusive localização (mas ver à frente pois não há "posição" bem definida).
- Férmions não podem partilhar o mesmo estado quântico; obedecem ao **Princípio de Exclusão de Pauli**.
- No entanto, usualmente aceita-se que elas não têm individualidade (identidades bem definidas).

As estatísticas quânticas

Bose-Einstein

	A	B	Prob
(1)	• •		1/3
(2)		• •	1/3
(3)	•	•	1/3

Table: Não há como discernir entre as partículas. Uma **permutação** não altera o estado: invariança. Não há **Transcendental Individuality**.

Fermi-Dirac

	A	B	Prob
(1)	•	•	1

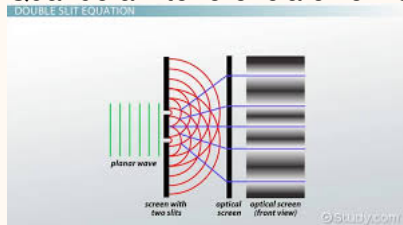
Table: Férmions não podem partilhar o mesmo estado. Logo veremos em que resulta uma permutação.

Postulado de Simetria

- A função de onda total de um sistema de muitas partículas deve ser **simétrica** ou **anti-simétrica** relativamente à permutação de partículas de mesmo tipo.
- **Simétrica** para **bósons**, **anti-simétrica** para **férmions**.

As duas fendas

Quando a interferência é verificada.



- Não se pode dizer que a partícula passou pela fenda (1) senão não haveria interferência.
- Idem quanto à fenda (2).
- Não pode ter passado por ambas: não há **meia partícula**.
- Mas ela passou!
- $A \vee B$ é verdadeiro sem que A ou B (ou ambas) sejam verdadeiras. Que **lógica** é essa?

O Princípio de Incerteza

Heisenberg, 1927:

- Na física clássica, todas os observáveis têm valores bem determinados em qualquer t . Isso não vale na MQ.
- Há **observáveis** incompatíveis: não podem ser medidos ao mesmo tempo com precisão arbitrária.
- Posição e momento: fixa-se um, perde-se o outro.
-

$$\Delta q \Delta p \geq \hbar/2$$

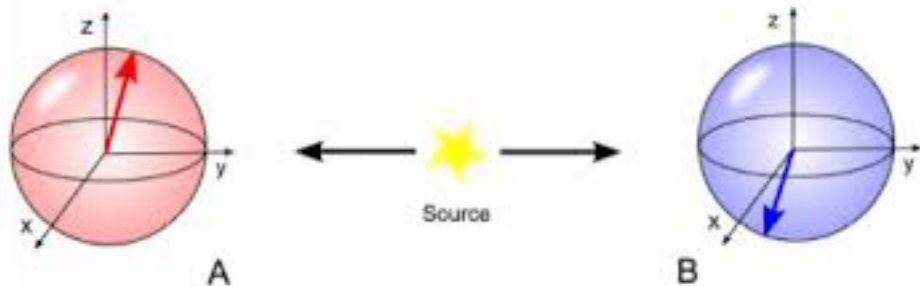
- $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ é a **constante reduzida** de Planck: $\hbar$ = agá cortado.
- O **spin** de uma partícula não pode ser medido em duas direções distintas ao mesmo tempo.

Realismo local (Einstein)

- Sistemas separados espacialmente são sistemas **distintos**.
- Para um alcançar o outro deve "chegar" a ele respeitando a Relatividade Restrita (velocidades $v \leq c$).
- Não há **comunicação instantânea**: mesmo a luz tem velocidade finita.
- Bohr – sistemas separados podem formar **um único sistema** (emaranhamento).

Localidade

A MQ viola a **localidade**.



1935 – Einstein, Podolski e Rosen (EPR): as partículas **já saíram** da fonte com as propriedades definidas.

Isso vai contra a MQ de Bohr, Heisenberg, Pauli, Born, Jordan, Dirac (**interpretação de Copenhague**).

- Einstein, Podolski e Rosen (EPR): as partículas têm propriedades definidas, como na física clássica (realismo).
- A MQ seria **incompleta** porque não explica tudo o que ocorre; teria que haver **variáveis ocultas** (VO) para explicar o que ocorre.
- 1964 John S. Bell – Um experimento no qual a existência de variáveis ocultas faz com que certas **desigualdades** tenham que ser obedecidas.
- A física experimental mostrou que isso não acontece: as desigualdades **são violadas**.
- A MQ é compatível com as VO (Bohm), logo há que se rejeitar o realismo local.

O que é necessário

- A MQ não é uma teoria intuitiva.
- Pelo contrário: ela contesta a nossa intuição.
- É muito dependente da matemática.
- Neste curso, daremos apenas uma motivação inicial com um mínimo de matemática, enfatizando mais as ideias envolvidas, na medida em que isso for possível.
- Ao final, falaremos algo sobre a **charlatanice quântica**.

- Localidade e não-localidade
- Separabilidade
- Contextualidade
- Superposição e emaranhamento
- Indistinguibilidade
- Indeterminismo
- Complementaridade
- Princípio de Incerteza

Fixando alguma terminologia

- **Localidade:** um evento pode influenciar outro somente enviando alguma coisa, como um fóton. Tem que obedecer a relatividade restrita: $v < c$.
- **Não-localidade:** Tendo dois sistemas separados mas que interagiram antes, medindo uma propriedade em um deles **ficamos sabendo** a propriedades correspondente do outro **imediatamente**.
- Porém não há qualquer *envio de algo*; isso se deve às **correlações** existentes entre eles.
- **Contextualidade:** Na física clássica, todas as propriedades dos sistemas físicos têm valores pré-determinados (massa, posição, carga elétrica, etc.) que podemos conhecer por medições.
- Na MQ, isso não é assim: *somente certos grupos de propriedades podem ter valores*, mas não todas elas: **contextos**.

Fixando a terminologia

- **Identidade:** Quando dizemos que A é igual ou idêntico a B ($A = B$): não há duas coisas, mas somente uma. Os físicos usam essa noção em sentido diferente: *partículas de mesmo tipo*.
- **Indistinguibilidade:** Partilhamento de propriedades. Dois carros de mesma cor, mesmo modelo, mesma marca, mesmo ano de fabricação podem parecer *indistinguíveis*, mas são **diferentes**.
- Na lógica usual: duas coisas sempre diferem por algo – *Princípio da Identidade dos Indiscerníveis* (Leibniz).
- Na MQ, certas coisas podem ser **completamente indistinguíveis** sem que sejam **a mesma** coisa.
- **Superposição e emaranhamento**
- **Veremos isso na próxima aula.**