

Introdução à Filosofia da Mecânica Quântica

AULA 03

ALGUNS EXPERIMENTOS CRUCIAIS

Décio Krause

<https://sites.google.com/view/krausedecio>
deciokrause@gmail.com

07 de Outubro de 2025



Esquema do minicurso

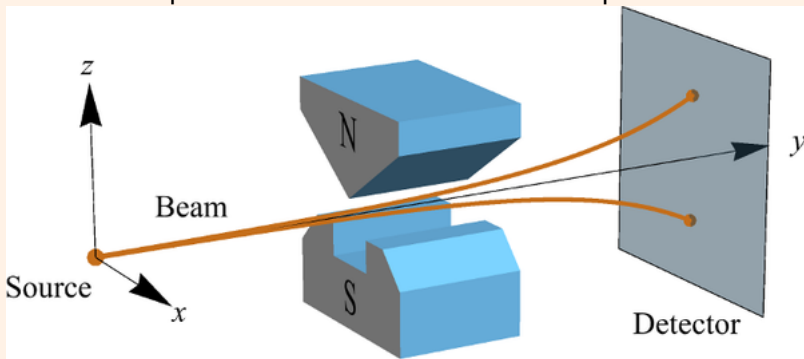
- ~~**Aula 01 – 09 Set**~~ Apresentação: ideias básicas. (Slides no site da ABF)
- ~~**Aula 02 – 23 Set**~~ Uma formulação da MQ usando espaços de Hilbert. (Slides no site da ABF)
- **Aula 03 – (07 Out)** Alguns experimentos cruciais: Stern-Gerlach, Mach-Zehnder, o gato de Schrödinger, dupla fenda, HOM, etc.
- **Aula 04 – (21 Out)** Algumas interpretações: Copenhagen, Bohm, Muitos Mundos, etc.
- **Aula 05 – (04 Nov)** Lógica, filosofia e pseudo-ciência (charlatanismo quântico).

Experimentação

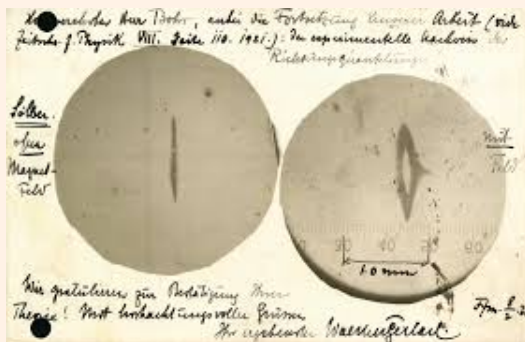
- A ciência empírica requer **experimentação**.
- Um matemático pode medir a soma dos ângulos internos de vários triângulos e sempre achar 180° , mas vai aceitar isso como um **fato** somente se houver sido **demonstrado**.
- Um cientista vai aceitar algo dito por uma teoria como um fato somente depois de haver sido **confrontado com a experiência**.
- Teoria das Cordas (TC): matemática impecável, mas sem qualquer **comprovação empírica**. Roger Penrose (Nobel 2020): a TC **não é física!** [Veja o vídeo](#).

Stern-Gerlach

- Estudo dos efeitos de um campo magnético sobre um feixe de átomos de prata.
- Verificaram que o feixe se dividia em dois componentes.

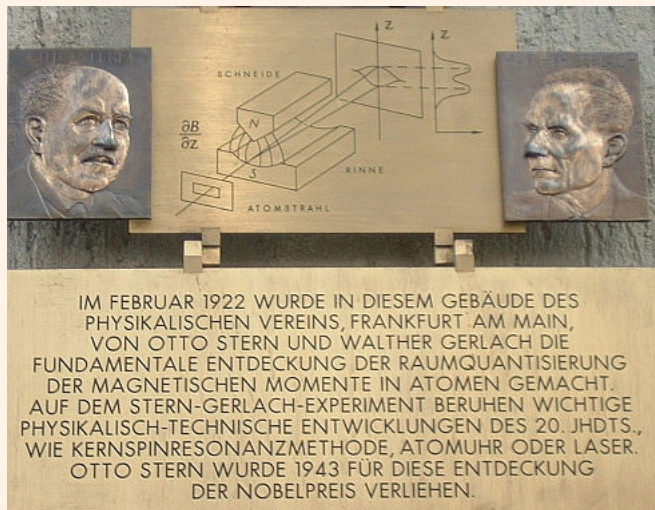


D. Castelvechi (2022) - Stern-Gerlach after 100 years



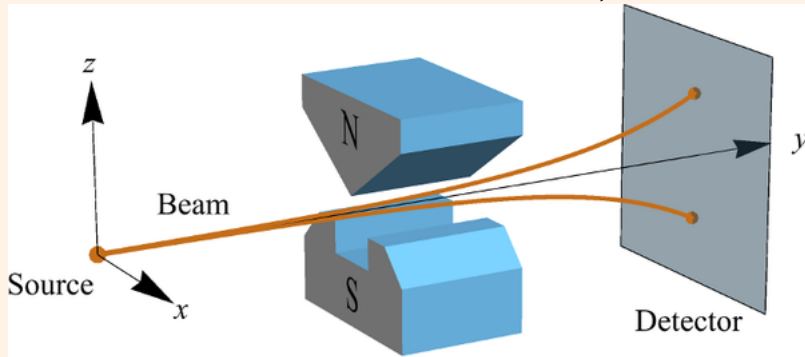
Na primeira figura, **o que era esperado** (obtido sem o campo magnético) e na segunda, **o que foi observado**: o campo magnético induzia uma distinção, depois chamada de "UP e DOWN".

Placa comemorativa, Frankfurt Institute



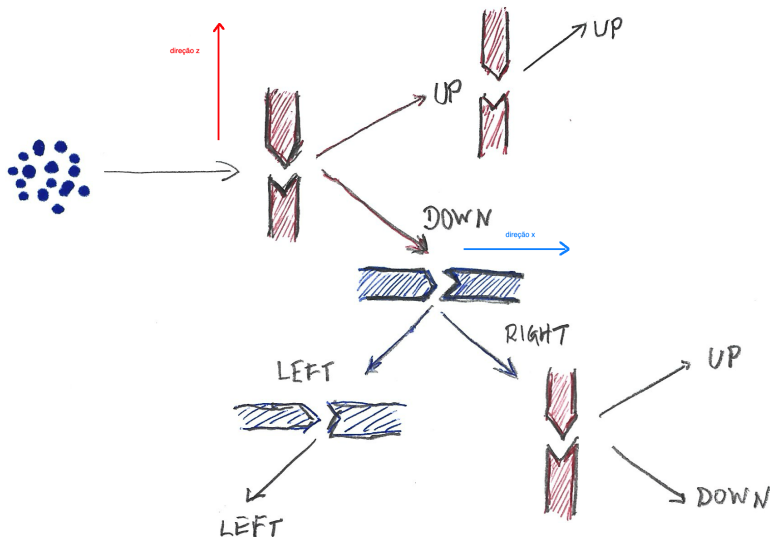
Stern-Gerlach

Otto Stern e Walter Gerlach, 1922.



Para cada direção, o spin dará sempre UP ou DOWN. Não se pode medir simultaneamente o spin em duas direções distintas: o sistema não pode assumir ambos SPIN_z (na direção z) e (simultaneamente) SPIN_x (na direção x).

Estranho, muito estranho!



- A partícula não tinha a propriedade **direção do spin na direção X** previamente definida como assume a física clássica (se nela houvesse spin).
- Isso vai contra o **realismo** de Einstein: como **na física clássica, as partículas têm propriedades (desde sempre) bem definidas** e seus valores são apenas *descobertos* quando medições são feitas.
- O que os experimentos dão razão à **visão de Copenhague**.

- Em 1925, [Uhlenbeck e Goudsmit](#) mostraram que o elétron tem um momento angular intrínseco (independente do estado).
- **Férmions**: spin semi-inteiro: $1/2, 3/2, 5/2, \dots$
- **Bósons**: spin inteiro: $0, 1, 2, 3, \dots$
- **Teorema Spin-Estatística** Férmions obedecem a estatística FD (Fermi-Dirac); bósons obedecem BE (Bose-Einstein).
- O spin é sempre medido em uma dada direção e pode assumir um só dentre dois valores: UP ou DOWN, 0 ou 1, LEFT ou RIGHT.
- Não é possível medir o spin em duas direções diferentes a uma só vez. Os **observáveis** não comutam.
- Detalhes muito bem explicados no blog [Mecânica Cuántica](#).



George Eugene Uhlenbeck e Samuel Goudsmit

Estatística "clássica"

Maxwell-Boltzman (física clássica): as entidades têm **identidade**, individualidade, **podem ser nomeadas**. Podem ser discernidas por suas posições e trajetórias: **impenetrabilidade**.

	A	B	Prob
(1)	<i>a, b</i>		1 / 4
(2)		<i>a, b</i>	1 / 4
(3)	<i>a</i>	<i>b</i>	1 / 4
(4)	<i>b</i>	<i>a</i>	1 / 4

Os eventos (3) e (4) são contados como **distintos** mesmo que *a* e *b* sejam indistinguíveis (como elétrons): **transcendental individuality**.

Estatísticas quânticas

Bose-Einstein (bósons) - as entidades **não têm** identidade, individualidade. Não podem ser discernidas por suas posições ou trajetórias: **impenetrabilidade** – **pode haver superposição**.

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

No evento (3) e (4), uma permutação não altera o estado: **Postulado de Simetrização** – os estados devem ser descritos por vetores (funções de onda) *simétricos* relativamente a permutações:

$$|\psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} |\psi\rangle_1 |\psi\rangle_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} |\psi\rangle_2 |\psi\rangle_1$$

Estatísticas quânticas

Fermi-Dirac (fermions) - as entidades **não têm** identidade, individualidade. Não podem ser discernidas por suas posições ou trajetórias, mas não podem partilhar o mesmo estado (**Princípio de Exclusão de Pauli**).

	A	B	Prob
(único)	•	•	1

Uma permutação não altera o estado: **Postulado de Simetrização** – os estados devem ser descritos por vetores (funções de onda) *anti-simétricos* relativamente a permutações:

$$|\psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} |\psi\rangle_1 |\psi\rangle_2 - \frac{1}{\sqrt{2}} |\psi\rangle_2 |\psi\rangle_1$$

$$|\psi\rangle_{12} = -|\psi\rangle_{21}$$

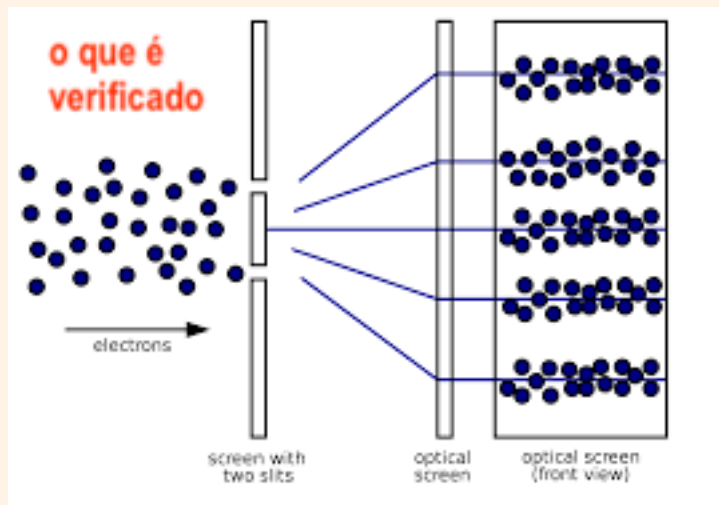
$$|\psi_{12}|^2 = |-\psi_{21}|^2$$

Duas fendas

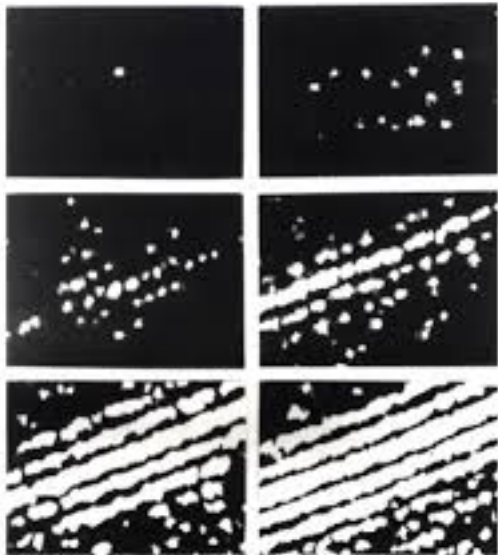
Vamos retomar o experimento das duas fendas, que Feynman dizia conter “todo o mistério” (quântico).



As duas fendas

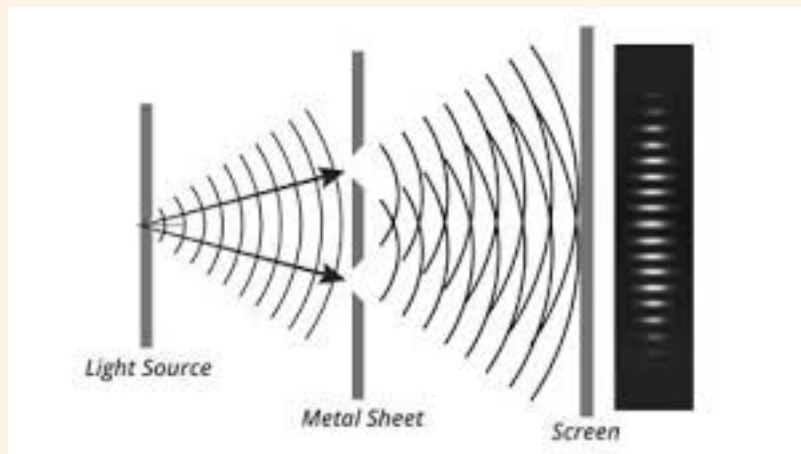


Duas fendas – real



- Explicamos com aquilo que conhecemos: partículas ou ondas.
- As franjas de interferência surgem como se as partículas se comportassem como ondas.
- Mas se as partículas são ondas, como podem ser detectadas como partículas?
- **Dualidade**: os sistemas quânticos se comportam como partículas ou como ondas dependendo das circunstâncias experimentais.
- Uma fenda aberta: partícula; duas fendas abertas: onda (desde que não haja “observação”)
- Sean Carroll: mecânica quântica em cinco palavras:
"Observando: partículas; não observando: ondas."
- Se você não viu ainda, assista: Dr. Quantum (4:51 min)
<https://www.youtube.com/watch?v=UtPf0XYQzFI>

Comportamento ondulatório



- Você pode dizer: é uma onda ou é uma partícula, e o que fazemos é **constatar** qual é o caso.
- Isso pressupõe que a entidade **já saiu** da fonte com suas características pré-determinadas.
- Essa era a posição de Einstein.
- **Mas não é o que ocorre na escala microscópica, como veremos.**

O experimento da escolha retardada

- John Archibald Wheeler (1911-2008)
- Lembre sempre do *Smoky Dragon*



O experimento da escolha retardada

- Conhecemos o *rabo*, a fonte, o que ‘preparamos’.
- Quando medirmos, vamos conhecer a *cabeça*, o que vai ser medido.
- A MQ não diz nada sobre a região intermediária: o sistema pode estar em uma *superposição* de estados.
- $|\psi\rangle = a |\psi_1\rangle + b |\psi_2\rangle$, com $|a|^2 + |b|^2 = 1$.
- Quando é feita uma medição, o vetor **colapsa** ou em $|\psi_1\rangle$ (com probabilidade $|a|^2$ ou em $|\psi_2\rangle$, com probabilidade $|b|^2$.
- Entre os dois extremos, só podemos especular.
- **Copenhague**: a teoria não diz nada.
- **Mecânica de Bohm**: as partículas têm trajetórias. (Veremos isso na próxima aula)

As duas fendas

- O sistema é preparado com as duas fendas abertas.
- Logo esperamos encontrar um **padrão de interferência**.
- O sistema estará em um estado que é uma superposição de **passar pela fenda A** e **passar pela fenda B**.
- Mas não podemos dizer que passou por A porque nesse caso não haveria padrão de interferência. Idem com B.
- E também não faz sentido dizer que passou por ambas: não há **meia partícula**.
- Fato "lógico" interessante: $A \vee B$ é verdadeiro, mas nem A (sozinho) é verdadeiro e nem B (sozinho) é verdadeiro.

Tabela-verdade da conjunção

Na lógica proposicional clássica.

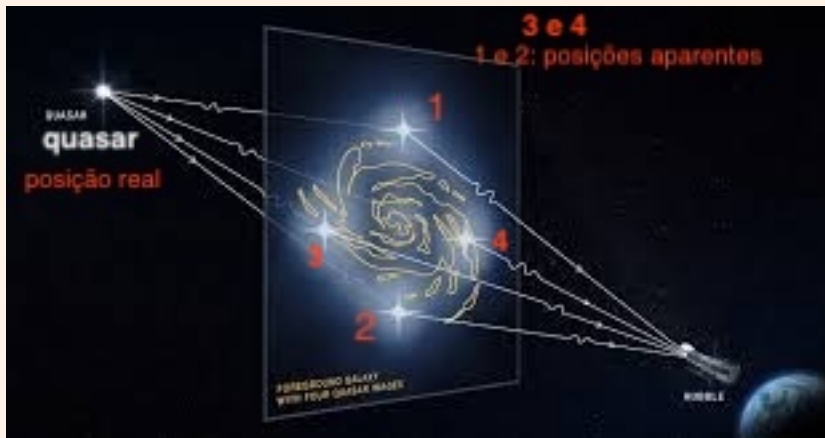
A	B	$A \vee B$
V	V	V
V	F	V
F	V	V
F	F	F

Na MQ, se um padrão de interferência é observado:

- Dizer que passou por A = **FALSO**
- Dizer que passou por B = **FALSO**
- Dizer que passou por ambos = **FALSO**
- **Mas passou!**

- Enquanto não há uma medição, o estado do sistema é $|\psi\rangle = a|\psi_1\rangle + b|\psi_2\rangle$.
- O sistema **não está** em ambos os estados ao mesmo tempo.
- Para estar em ambos, tanto $|\psi_1\rangle$ quanto $|\psi_2\rangle$ teriam que ser **estados atuais** do sistema e teríamos que ter a **conjunção** $|\psi_1\rangle \wedge |\psi_2\rangle$, que não é o caso.
- O fato é que podemos **modificar** o comportamento de um sistema mesmo depois de ele ter saído da fonte (experimento da **escolha retardada**).
- Isso mostra (**experimentalmente!**) que não podemos assumir que o sistema tem suas propriedades determinadas no seu ato de batismo.
- Isso vai contra o **realismo** de Einstein.

Quasares gêmeos: simulação



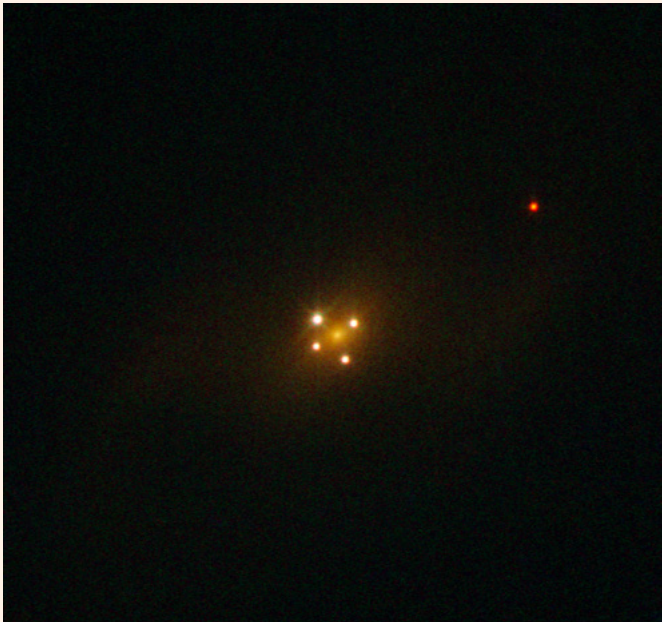
O que está acontecendo

- Lentes gravitacionais
- Quasares **QSO 0957+561 A/B**
- Galáxia **YGKOW G1**

Quasares gêmeos: realidade



A Cruz de Einstein



- A luz (aparentemente) **já saiu** do quasar como onda, pois "contorna" a galáxia.
- Mas, **antes** de ela chegar, os cientistas mudam o experimento: nas duas fendas, corresponderia a fechar uma das fendas **depois** do início da viagem.
- As partículas **mudam** o seu comportamento.
- Parece que a informação de que o aparelho foi alterado viajou para trás no tempo fazendo com que as partículas mudassem de opinião já no início, **sabendo** o que iria acontecer.

- Isso mostra que dizer que as entidades quânticas têm suas propriedades pré-determinadas (**realismo**) é ir contra a MQ.
- Mas essa era a opinião de Einstein e de Schrödinger, dentre outros.
- Comprovada (a MQ) pelos experimentos de Clauser, Aspect, Zeilinger, que receberam o Nobel em 2022.
- O realismo têm que ser afastado. Heisenberg, Jordan: as propriedades não existem previamente às medições (interações).
- Einstein: então a Lua não está lá se não estivermos olhando?
- A questão ainda intriga os filósofos da física.

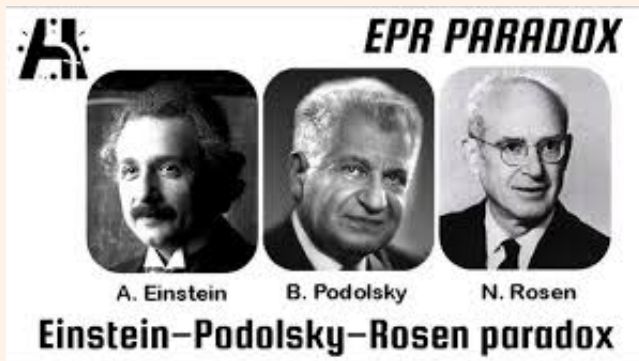
The New York Time, 28 April 1935.

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

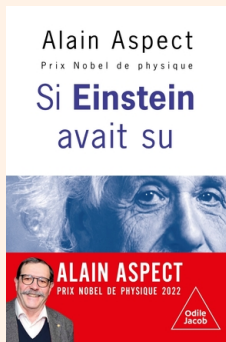
SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.



- Objetivo: mostrar que a MQ é **incompleta**.
- Ou seja, há **elementos de realidade** que ela não descreve.
- O argumento é baseado em duas hipóteses:
 - **(Real) (Critério de Realidade)**
 - **(Loc) (Critério de Localidade)**

- **(Real)(Critério de Realidade)** Se, sem qualquer perturbação no sistema, pudermos predizer com certeza (probabilidade = 1) o valor de uma quantidade física, então existe um **elemento da realidade física** que corresponde a essa quantidade física.
- **(Loc) (Critério de Localidade)** Se dois sistemas não interagem, uma medição feita em um deles não altera **instantaneamente** o estado do outro sistema. **A relatividade restrita deve ser observada.**
- **Será que eles tinham razão?**



Quase meio século após seus primeiros experimentos, Alain Aspect recebeu o Prêmio Nobel de Física por mostrar que devemos abandonar a visão de Einstein do mundo quântico.

O caso do SPIN: duas direções



O experimento: na versão de D. Bohm

Spin total (na direção escolhida) z: **zero**

Vetor de estado (estado **emaranhado**):

$$|\psi_z\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow, A\rangle |\downarrow, B\rangle + |\downarrow, A\rangle |\uparrow, B\rangle)$$



- Podemos mudar de eixo, escolhendo x .
- Teremos **LEFT** ou **RIGHT**, que representam UP e DOWN nessa direção.
-

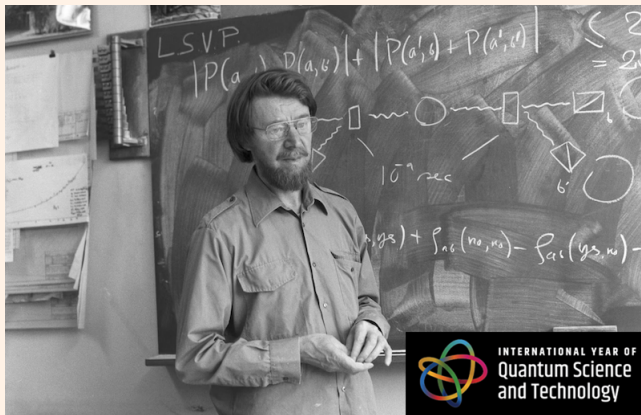
$$|\psi_x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\leftarrow, A\rangle |\rightarrow, B\rangle + |\rightarrow, A\rangle |\leftarrow, B\rangle)$$



- Se medimos na direção z o sistema **A** e achamos UP, **inferimos** que o sistema **B** tem valor DOWN, e isso é confirmado experimentalmente. *Ou seja, pelo critério **Real**, há um elemento de realidade correspondente a **B** ter o valor DOWN.*
- Mas podemos medir **B** não na direção z , mas na direção x . Suponha que encontramos o valor RIGHT. *Pelo critério **Real**, há um elemento de realidade correspondente a **B** ter o valor RIGHT.*
- Mas então **B** vai ter *como elementos de realidade* dois valores, DOWN e RIGHT, o que é impedido pela MQ.

- (1) Há **transmissão** de informação de **A** para **B**, avisando o que foi medido. Isso fere a relatividade restrita e está fora de questão.
- (2) A partícula **B** já saiu com seus valores pré-determinados, determinados por **variáveis ocultas** que foram apenas 'descobertos' com as medições (**realismo**).
- Mas isso fere o princípio de que **B** não pode dispor dos spins nas direções z e x simultaneamente, que é um dos principais **fatos** da MQ, consequência das **Relações de Incerteza**.
- **Variáveis ocultas**: haveria propriedades dos sistemas quânticos que não são descritas pela teoria e seriam elas que explicariam os resultados obtidos (**incompletude**).

John Stewart Bell (1928-1990)



- Essa questão não podia ficar no nível teórico; precisávamos do laboratório.
- Em 1964, John Bell mostrou que as hipóteses (**Real**) e (**Loc**) na MQ permitem derivar certas **desigualdades** que são violadas pela MQ.
- Uma das derivações mais simples: D. D'Espagnat (1979), *The quantum theory and reality. Sci. Am.* 241 (5): 158-181. Fácil de achar.
- **TEOREMA DE BELL**: nenhuma teoria **com variáveis ocultas** que seja **local** pode reproduzir as previsões da MQ.
- A teoria de DAVID BOHM admite variáveis ocultas, portanto, para reproduzir a MQ, é não-local.
- Isso parece sugerir que há *ação fantasmagórica à distância* (frase de Einstein). Cuidado com o charlatanismo! (Última aula) – dizeres de que "está tudo conectado", que há telepatia, etc.

Desigualdades de Bell

- Obtidas sob a hipótese do **realismo** e da existência de **variáveis ocultas**.
- Envolvem probabilidades (valores esperados):

$$|\langle A_0 B_0 \rangle + \langle A_0 B_1 \rangle + \langle A_1 B_0 \rangle - \langle A_1 B_1 \rangle| \leq 2$$

- Desigualdade CHSH - Clauser-Horne-Shimony-Holt.
- A MQ diz que elas devem ser **violadas**.
- Elas podem ser **testadas no laboratório**!
- Os experimentos, hoje incontestáveis, dão razão à MQ.
- Em 2022, John Clauser, Alain Aspect e Anton Zeilinger (CAZ) receberam o Prêmio Nobel em Física por experimentos que confirmam isso.
- Portanto, devemos refutar (**Real**) ou (**Loc**) ou ambas.
- Mas a MQ é compatível com (**Real**, variáveis ocultas) – a mecânica de Bohm mostra isso –, portanto tudo sobra para (**Loc**): a MQ (formulação usual) **é não local e não é determinista**.

Não localidade

- Primeiro erro: pensar que há alguma troca de informação instantânea entre sistemas distantes um do outro.
- Nada é **enviado** de um para o outro. O que há é uma **correlação** entre eles que existe desde o preparo do sistema emaranhado.
- Como ocorre esse conhecimento da **propriedade do outro**? Não há explicação intuitiva.
- Quando fazemos uma medição, o sistema **se prepara** para ela e se mudamos de experimento, ele novamente **se adequa instantaneamente** ao que pretendemos fazer: muito estranho!
- A não-localidade é muito estranha, mas hoje em dia não há mais dúvidas: como diz Nicolas Gisin (Suíça), **a realidade é não-local**.
- **Artigo:** *Sci.Am.Brasil* [Einstein estava errado?](#)

O gato de Schrödinger

- Muitos erros nos textos de divulgação (livros, sites, etc.).
- Dizem que, antes da medição, o gato está vivo e morto ao mesmo tempo.
- Também dizem que uma partícula pode estar em mais de um lugar ao mesmo tempo.
- Isso é equivocado. As Relações de Incerteza e o significado do emaranhamento impedem essas conclusões.
- Vamos contextualizar com o gato.

O gato de Schrödinger



1=gato, 2=material
m=morto, v=vivo, n=não decaiu, d=decaiu

$$|\Psi_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\psi_1^v\rangle |\phi_2^n\rangle + |\psi_1^m\rangle |\phi_2^d\rangle \right) \quad (1)$$

O gato de Schrödinger

- Quando uma medição é feita, o vetor $|\Psi_{12}\rangle$ **colapsa** em $|\psi_1^v\rangle |\phi_2^n\rangle$ ou em $|\psi_1^m\rangle |\phi_2^d\rangle$.
- Não podemos determinar a priori qual vai ser o caso: não há determinismo; só temos as probabilidades (no caso, 1/2 para cada uma).
- E **antes** da medição?
- A MQ não diz nada exceto que o estado do sistema é $|\Psi_{12}\rangle$: é a região de **fumaça** do dragão de Wheeler.
- Estaria o gato vivo e morto, como se diz?
- **Resposta: Não**, isso não faz sentido. Para isso, $|\psi_1^v\rangle$ e $|\psi_1^m\rangle$ teriam que ser **ambos** estados atuais do gato, mas não são: insistindo, o estado é (abreviadamente) $|\psi_1^v\rangle + |\psi_1^m\rangle$ (soma de vetores, **que em geral é um outro vetor**) e não $|\psi_1^v\rangle \wedge |\psi_1^m\rangle$ (uma conjunção lógica).

Explicação matemática

- Os vetores $|\psi_1^y\rangle$ e $|\psi_1^m\rangle$ são **ortogonais**.
- Um está no sub-espaço W e o outro em $W^\perp$, o **complemento ortogonal** de W :

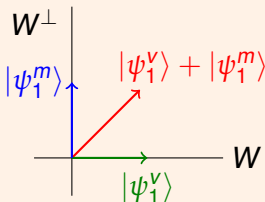
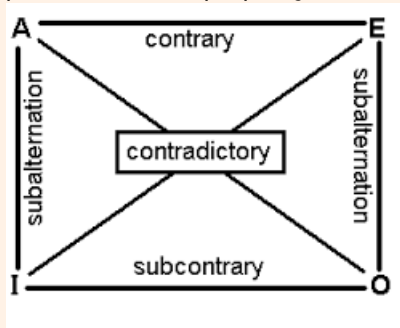


Figure: O vetor $|\psi_1^y\rangle + |\psi_1^m\rangle$ não está em nenhum dos espaços W ou $W^\perp$. Assim, dizer que "o gato está vivo" ($|\psi_1^y\rangle$) ou que "o gato está morto" ($|\psi_1^m\rangle$) são ambas falsas.

- A **negação** em MQ não é a *contraditoriedade*, mas a *contrariedade*.

O quadrado das oposições

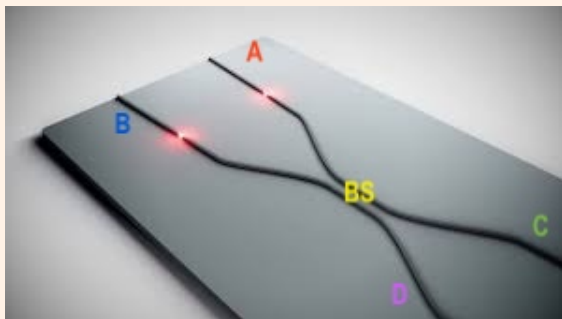
Contrárias: podem ser ambas falsas: "gato vivo" e "gato morto". O estado pode ser uma superposição, nem um e nem outro.



Subcontrárias: podem ser ambas verdadeiras. É a negação **paraconsistente**.

Contraditórias: A negação clássica – uma **exclui** a outra. Ver o meu artigo com Jonas Arenhart: "Contradiction, quantum mechanics and the square of opposition". *Logique et Analyse* 235 (2016): 3011-315. (solicite-me uma cópia).

HOM - Hong-Ou-Mandel 1987



- Vídeo: [The HOM effect](#) (1:51 min)
- Os resultados só são explicáveis se a **completa indiscernibilidade** dos fótons for assumida.
- Na matemática clássica não podem haver coisas **completamente** indiscerníveis.
- A MQ **exige** isso, mas veremos que há *interpretações* que procuram contornar essa hipótese.

Mach-Zehnder

Com os dois caminhos disponíveis.

- 1 Ludwig Mach e Ludwig Zehnder, 1892.

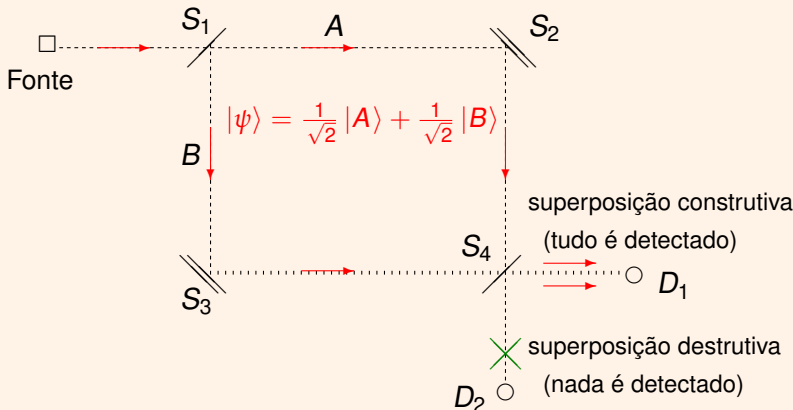


Figure: Interferômetro Mach-Zehnder. Quando refletida, a onda sofre defasagem de $1/4$.

Mach-Zehnder

Com um só caminho disponível, digamos A.

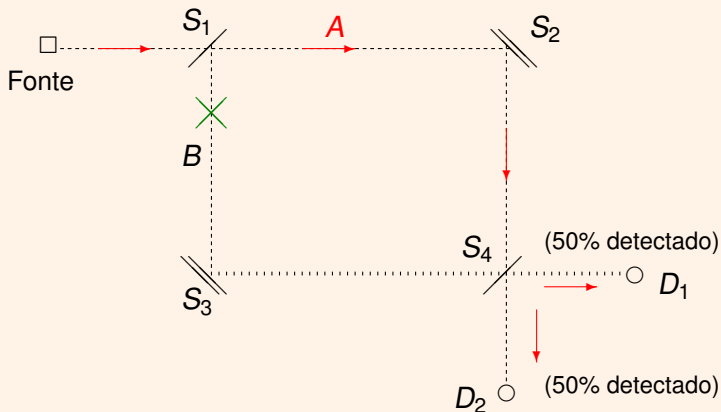
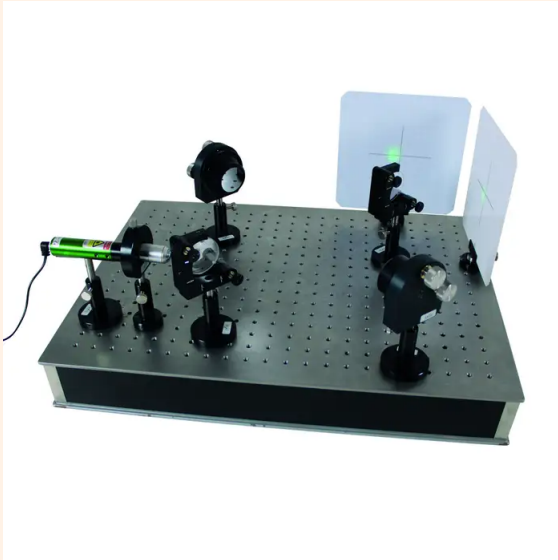


Figure: Com só um caminho aberto, 50% e 50%.

Experimento real



- Em escala macro, as superposições são dissipadas pela interação com o ambiente (**decoerência**) e não são percebidas.
- Podemos raciocinar **como se** os objetos fossem individuais, com identidades bem definidas, **indivíduos** dotados de *identidade*.
- Em certas situações quânticas, isso também é possível **para os propósitos práticos**. É como o engenheiro, que usa "elementos infinitesimais" no Cálculo usual.
- As interações passam a ser importantes quando os comprimentos de onda ficam abaixo do chamado **comprimento de onda de de Broglie**, $\lambda = h/p$.
- Tubo de TV: $\lambda = 10^{-9}$ cm = um centésimo de bilionésimo de centímetro.

O que origina os abusos

- 1 O estado de um sistema composto é descrito pela **função de onda**, que se estende por todo o espaço.
- 2 Se os sistemas estiverem emaranhados, medindo algo de um deles automaticamente determina-se o valor correspondente do outro **mesmo sem tê-lo medido**.
- 3 Isso origina a crença em **telepatia, ação instantânea à distância**, etc.
- 4 Nada disso é suportado pela MQ. A explicação é técnica, usa matemática, não havendo análogo na física clássica, que é mais condizente com a nossa intuição.
- 5 Essas suposições não condizem com a teoria atual. A MQ não é intuitiva. Lembre de J. Bricmont: **devemos separar os domínios** (mais na última aula).