Introdução à Filosofia da Mecânica Quântica

AULA 04

INTERPRETAÇÕES

Décio Krause
https://sites.google.com/view/krausedecio
deciokrause@gmail.com

21 de Outubro de 2025

ACADEMIA BRASILEIRA DE FILOSOFIA
Ad Veritatem

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: Copenhague, Bohm, Muitos Mundos, Não-Invidualidade, etc. Distintas metafísicas.
- **Aula 05 – (04 Nov)** Discussão geral: lógica, filosofia, pseudo-ciência (charlatanismo quântico).

Introdução

- O formalismo (a matemática) da MQ (qualquer um deles) é bem conhecido e fornece previsões extremamente confiáveis. Há várias formas de se desenvolver a MQ: via espaços de Hilbert, por integrais de caminho, via espaços de fase, via matrizes de densidade, etc. A MQ não vive de espaços de Hilbert.
- O nível de precisão é excelente.
- Mas, o que a teoria **significa**? Qual a visão de mundo que ela fornece?
- A função de onda Ψ descreve algo *real* ou é somente um dispositivo matemático?
- Pode-se associar alguma **ontologia** à teoria? Como seria ela?

Física clássica

- As coleções de **objetos clássicos** formam **conjuntos** (coleções de elementos discerníveis uns dos outros).
- **Princípio de Impenetrabilidade** Objetos físicos não podem ocupar o mesmo espaço no mesmo instante de tempo.
- Espaço e tempo são **absolutos** (Newtonianos).
- As equações do movimento (a "dinâmica") é **determinista**.
- A MC é **local**: um evento influencia o outro obedecendo a relatividade restrita.
- As entidades **têm propriedades** e todas elas têm **valores bem determinados** a qualquer tempo.
- A MC reflete uma metafísica elaborada a partir de nossas interações com as coisas (em nossa escala) do ambiente que nos cerca: objetos **individuais** com *identidadde*.
- Os objetos se movem em **trajetórias** que parecem ser contínuas.

Mecânica quântica, MQ

- Tem diferentes **interpretações**. Dá para dizer que se tratam de teorias distintas mas que fornecem os mesmos resultados empíricos.
- Algumas das principais: Copenhague, de Broglie-Bohm, Muitos Mundos, Epistêmico-Pragmáticas, Relacional, GRW, Histórias Consistentes, Modal, Transacional, Interpretações Ontológicas (não indivíduos, objetos intensionais, coleções de propriedades, etc.)
- David Mermin: "New interpretations appear every year. None ever disappear."
- Não creio que se possa dizer que uma delas é a **correta**.

Univ. de Copenhague: Instituto Niels Bohr

Webpage

Copenhague: Instituto Niels Bohr

Copenhague: Instituto Niels Bohr

"Interpretação de Copenhague"

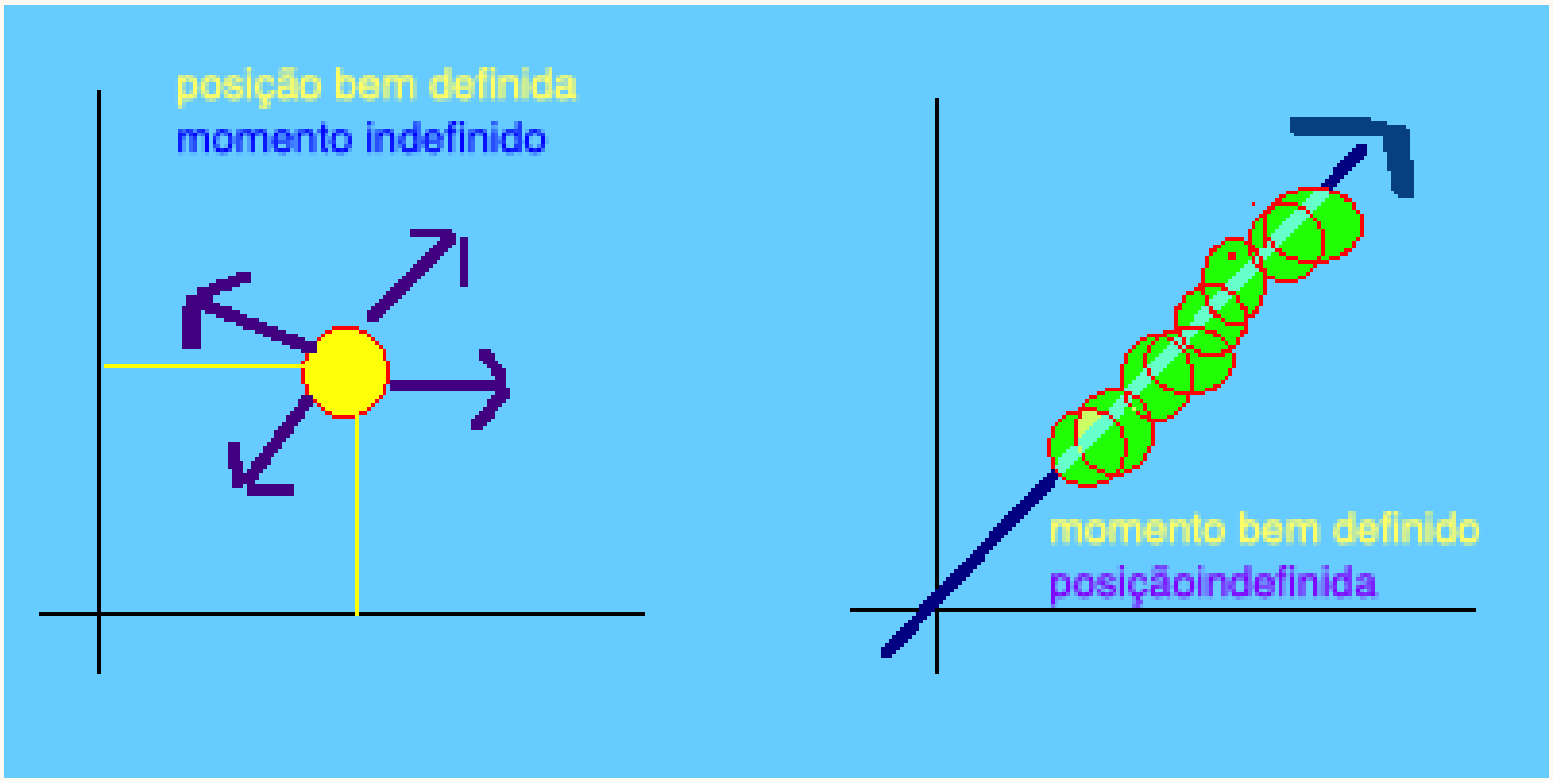
- Termo cunhado por Werner Heisenberg nos anos 1950.
- Não há uma versão unificada, mas podemos destacar alguns pressupostos centrais.
- O vetor de estado Ψ (ou $|\psi\rangle$) ou função de onda fornece tudo o que podemos saber sobre o estado do sistema: a teoria é **completa**.
- **Superposições:** antes de uma medição, o sistema pode estar em uma superposição de estados (mas não está em todos ao mesmo tempo).
- O estado do sistema não é nenhum dos estados componentes, mas a superposição deles: $|\psi\rangle = a_1 |\psi_1\rangle + a_2 |\psi_2\rangle + \ldots$
- **Regra de Born:** Se $\hat{A} |\psi_i\rangle = \lambda_i |\psi_i\rangle$, a **probabilidade** de que o valor medido do observável A seja λ_i é $|a_i|^2$ (todos os autovalores sendo distintos).
- Assume-se que $|a_1|^2 + |a_2|^2 + \cdots = 1$

"Interpretação de Copenhague"

- A função de onda não tem *existência real*; não descreve nada no mundo, sendo apelas um dispositivo matemático para calcular probabilidades de resultados de medições.
- **Colapso da função de onda:** Imediatamente após uma medição, a função de onda $|\psi\rangle = a_1 |\psi_1\rangle + a_2 |\psi_2\rangle + \ldots$ **colapsa** em um dos *autoestados* $|\psi_i\rangle$.
- Tudo o que podemos saber é a probabilidade disso acontecer (= $|a_i|^2$).
- Os demais estados possíveis "desaparecem".
- É a interpretação dominante, aceita pela maior parte dos físicos.
- A teoria é **não-local** (admite *ação fantasmagórica à distância*, como dizia Einstein: *"Spooky action at a distance"*).
- Para ele, um sistema confinado em um volume finito no espaço-tempo é caracterizado de modo *completo* pelos parâmetros que valem nesse volume.

Copenhague: relações de incerteza

- Há observáveis que **não comutam** (não podem ser medidos ao mesmo tempo), como o spin em direções distintas.
- **Posição** e **momento** (velocidade): $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$.



Copenhague

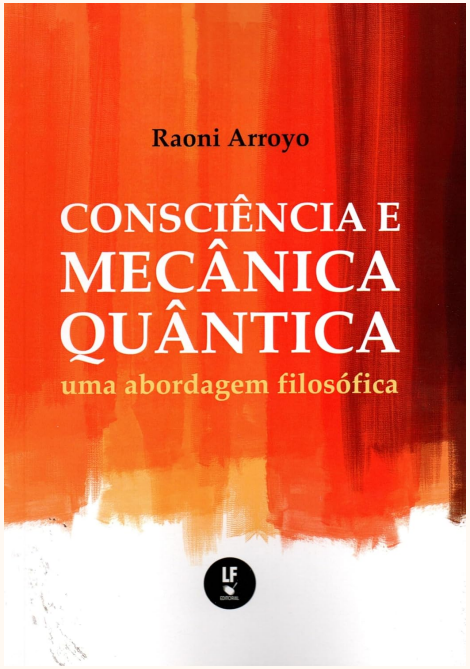
- Devido às *relações de incerteza*, uma partícula não tem trajetória bem definida; só pode ser *localizada* dentro dos limites estabelecidos por essas relações.
- Se o *colapso* é admitido, a teoria **não é determinista**.
- A teoria é **contextual**: só podemos saber valores de grupos (contextos) de propriedades.
- Os objetos (se admitirmos que eles existem) podem ser **completamente indiscerníveis**.
- Logo, coleções deles não podem constituir **conjuntos** no sentido usual do termo.
- Não há **variáveis ocultas** (HV = hidden variables): parâmetros extra que explicariam as previsões probabilísticas da teoria.
- von Neumann (1932): **impossibilidade da existência de HV**

A questão do colapso

- Lembremos do **colapso da função de onda** ou **redução do vetor de estado**.
- $|\psi\rangle = a_1 |\psi\rangle_1 + a_2 |\psi\rangle_2 + \ldots$ e um observável representado por um **operador auto-adjunto** $\hat{A}$.
- $|\psi\rangle \Longrightarrow |\psi\rangle_i$ com probabilidade $|a_i|^2$, $(i = 1, 2, 3, \ldots)$.
- Isso funciona maravilhosamente bem: o que é descrito é a transição de uma superposição de possibilidades para um único resultado como ocorrendo quando uma medição é feita, colocando o "colapso" no ponto de interação entre um sistema quântico e um aparato de medição clássico.

O colapso

- **A questão é:** O que causa o colapso?
- Eugene Wigner (Nobel, 1963): a **consciência de um observador** é a linha de demarcação que precipita o colapso da função de onda, independente de qualquer interpretação realista.
- Assunto muito discutido (a causa do colapso), mas o papel da consciência tem sido recusado em geral.



David Bohm (1917-1992)

(1952) MQ **com** HV empiricamente equivalente à MQ.

- Perseguido pelo macarthismo nos EUA, refugiou-se no Brasil, tendo sido professor da USP (1951-1955). Leia aqui.

Mecânica Bohmiana

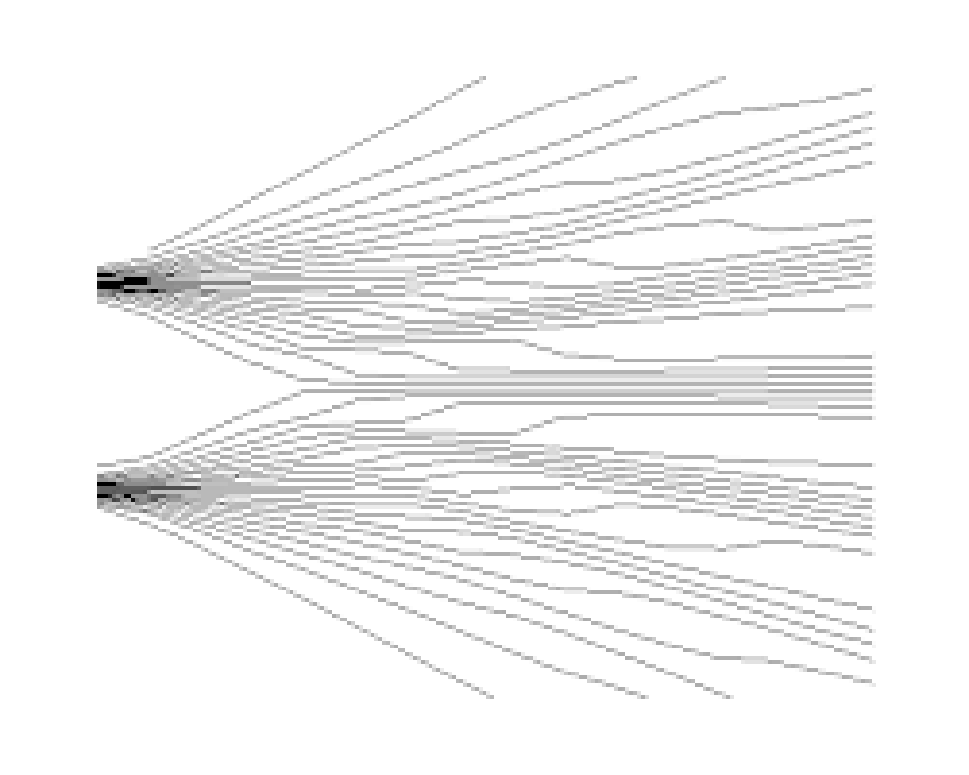
- Ou teoria **de Broglie-Bohm**. Vem de ideias postas por de Broglie em 1927, mas desacreditadas pelos físicos, especialmente por Pauli.
- Desenvolvida de forma independente por David Bohm em 1952. Afirma-se que fornece as mesmas previsões que Copenhague e outras.
- Há **partículas** e há **ondas**; as partículas são acompanhadas por uma **onda piloto**, e essas ondas são responsáveis pela interferência.
- A teoria é **determinista** e *não-local*. Não há colapso da função e onda.
- As partículas têm posições bem definidas a cada instante; há **trajetórias**.
- As partículas **têm identidade**. Elas passam por uma das fendas e a onda passa por ambas, dando conta do padrão de interferência.

Mecânica Bohmiana

- À função de onda Ψ que resulta da solução da equação de Schrödinger, associa-se uma família de trajetórias mediante uma certa função cujos parâmetros são as coordenadas das partículas e que obedece a uma **equação do movimento** (onda piloto).
- Se conhecemos Ψ, mediante a equação da onda piloto, podemos computar a trajetórias.
- A teoria diz que cada sistema (partícula) sempre segue uma trajetória específica.
- No entanto, a **posição inicial** é dada por uma variável oculta, e não pode ser conhecida.
- Com Ψ, podemos conhecer as posições precisas dentro de uma distribuição probabilística dada por $|\Psi|^2$, **mas não temos como saber as posições nessa distribuições**.
- Para mim, são como as bruxas de Florianópolis (Ilha da Magia), que segundo a crença popular, *existem*, porém sem que alguém tenha visto uma.

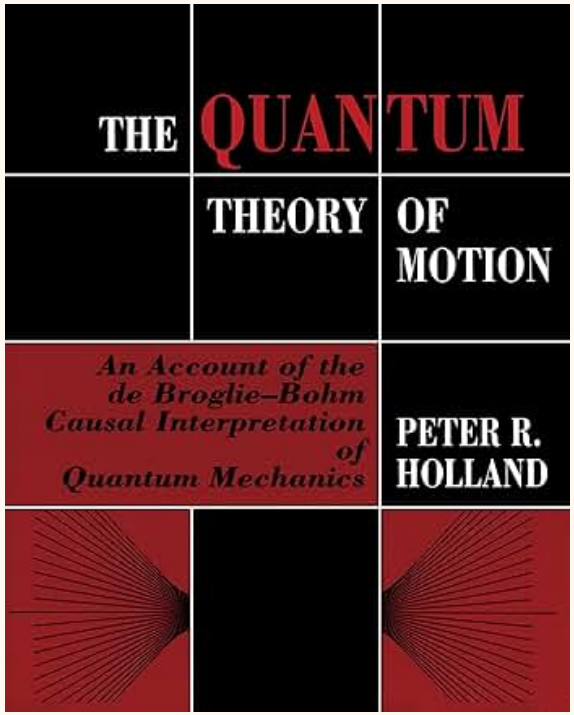
Trajetórias bohmianas

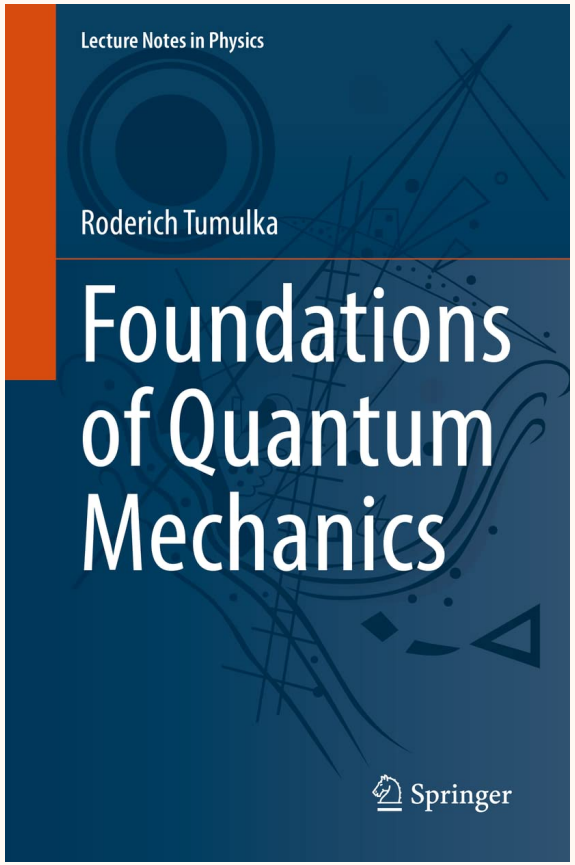
(Simulação)



Apenas **uma** dessas trajetórias é **real**, as demais sendo histórias que **poderiam ocorrer**.O que se pode calcular é uma **distribuição estatística** das posições (Aspect 2025, p. 123), mas não as posições elas mesmas.

Livros básicos



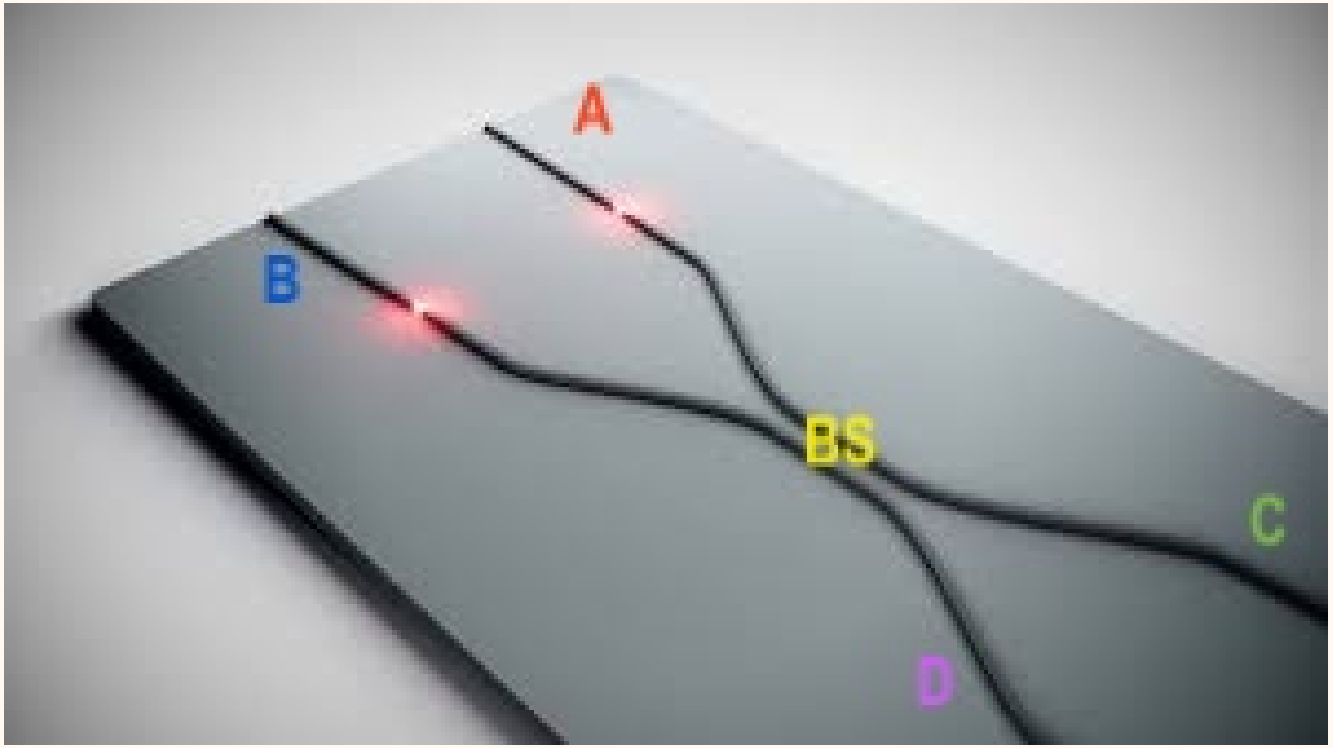


Veja a palestra de Roderick Tumulka, um conhecido ‘Bohmiano’, Aqui

Dificuldades

- Dificuldade em estender a teoria para o domínio relativista, ainda que hajam avanços (palestra do Tumulka).
- Dificuldade para uma teoria do spin.
- Difícil explicação da Regra de Born.
- Difícil extensão às QFT.
- Ontologia de indivíduos, identificáveis, com identidade.
- Como contornar os casos em que a **completa indiscernibilidade** é requisitada (efeito HOM, BECs)?

HOM, Hong-Ou-Mandel 1987



“In the microworld, we need uniformity of the strongest kind: complete indistinguishability” (Frank Wilczek (Nobel, 2004) and Betsy Devine)

Muitos mundos

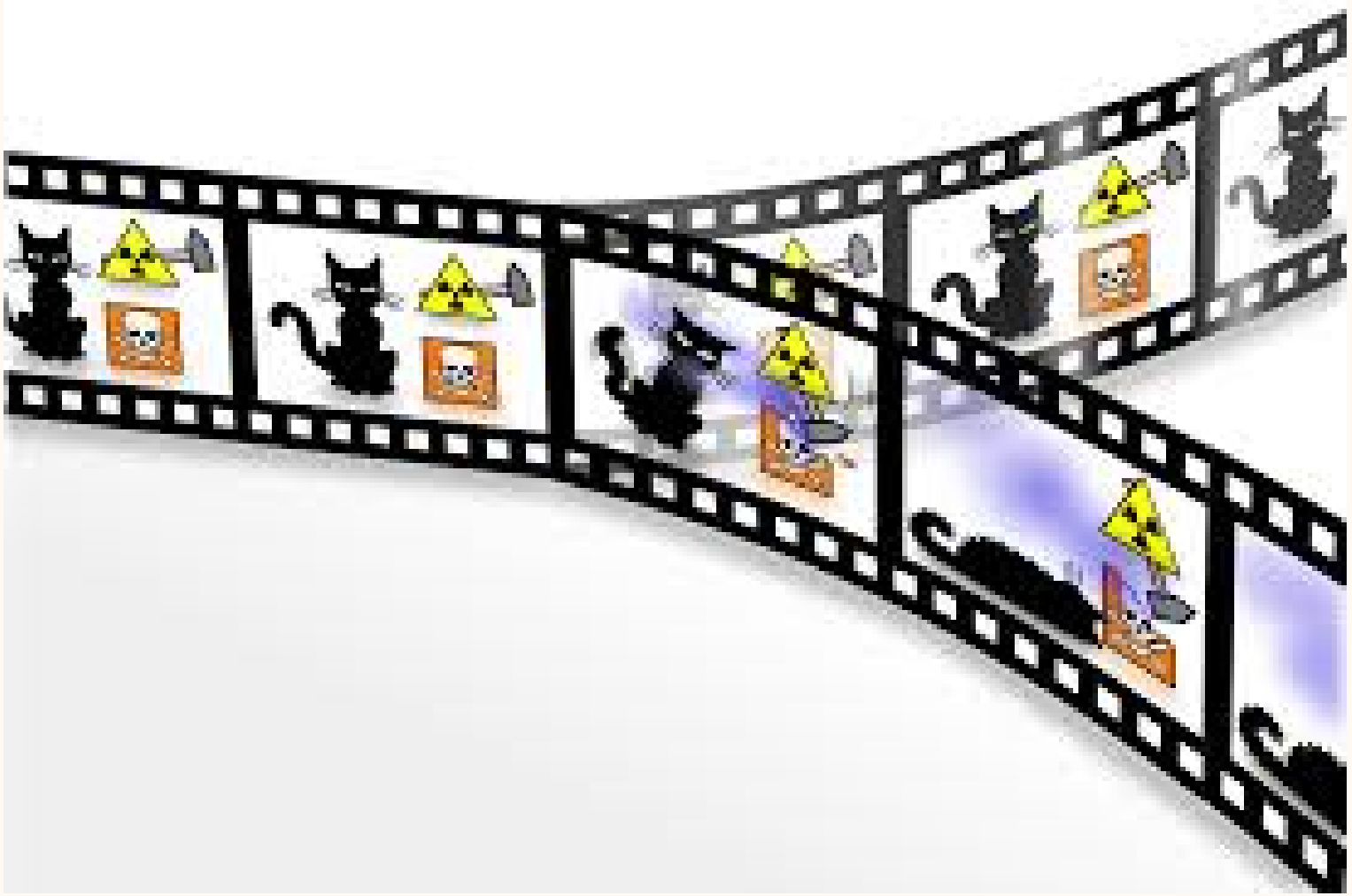
Originada com Hugh Everett III em 1957 e popularizada por Bryce DeWitt nos anos 1970.

- Suponha um sistema em estado de superposição, digamos

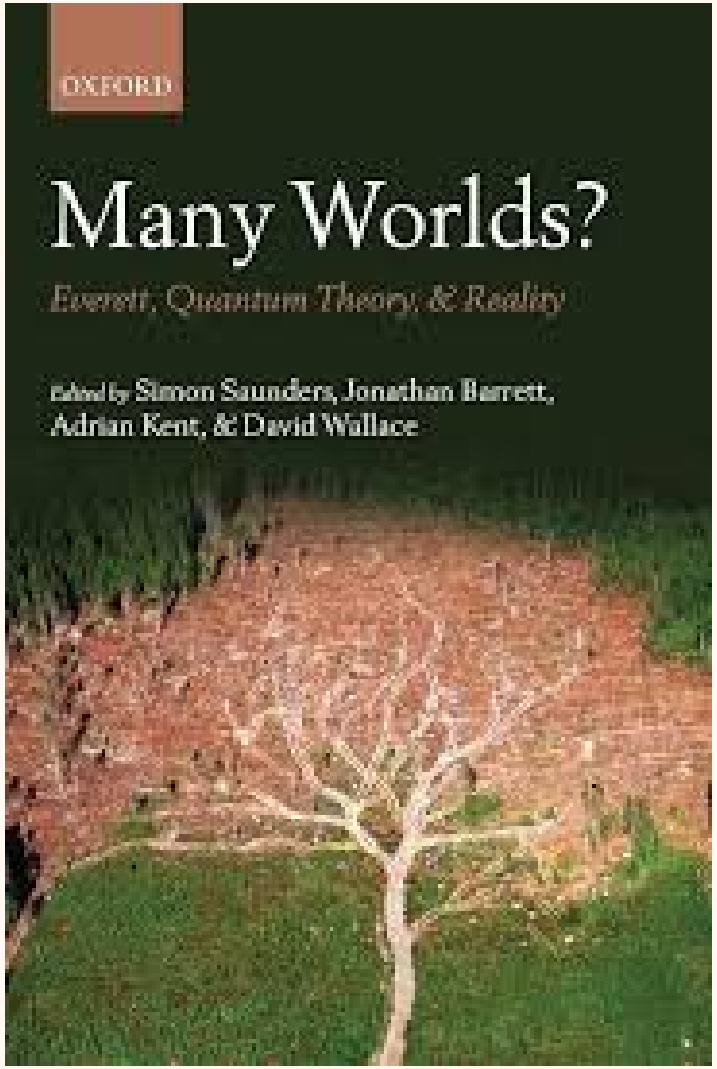
$$|\psi\rangle_{vm} = \frac{1}{\sqrt{2}}|\psi\rangle_v + \frac{1}{\sqrt{2}}|\psi\rangle_m$$

- Quando algum observável é medido, o mundo se bifurca, dando origem a dois mundos, ambos **reais**, um onde o sistema está em $|\psi\rangle_v$ e outro em que o sistema está em $|\psi\rangle_m$.
- O gato está vivo em um mundo e morto no outro.
- Os mundos não se comunicam: se você e o gato estão no mundo "gato vivo", há também um **você** junto com o gato morto em outro mundo, mas *sem comunicação*.
- Há muitos adeptos mas, para mim, requer uma metafísica muito estranha.

Muitos mundos



Um livro recente



Minha opinião

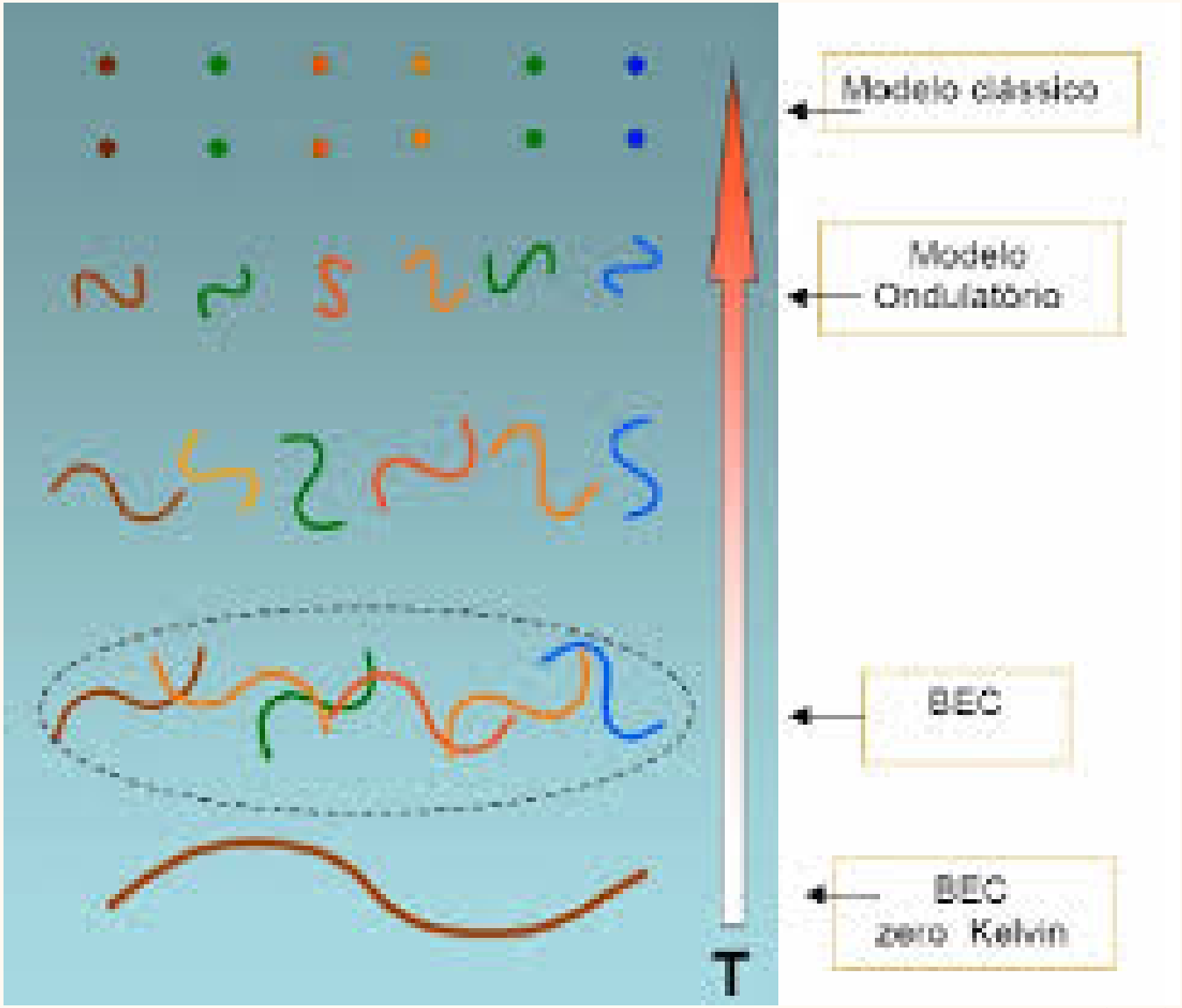
- Tanto Bohm quanto MW pressupõem hipóteses metafísicas fortes: identidade das partículas e a existência de muitos mundos aos quais não temos acesso.
- Pode-se dizer que a hipótese dos **não-indivíduos** (objetos que não obedecem a teoria usual da identidade) é também uma hipótese forte.
- Mas, para mim, ela é a que mais condiz com o que se observa na MQ. O efeito HOM é paradigmático. Há muitos outros.

Outras interpretações

- Não-indivíduos Os "objetos quânticos" não obedecem à teoria usual da identidade.
- O que diz essa teoria? Que **duas** coisas são sempre **distintas**, e isso implica que existe uma propriedade que uma tem e a outra não.
- Como explicar isso no caso de bósons em um condensado bosônico? (BEC - Bose-Einstein Condensate)
- Não há qualquer diferença entre os bósons que formam um BEC.
- Efeito HOM: se houver alguma diferença, os fótons podem não se dirigir a mesmo detector. Eles têm que ser **completamente indistinguíveis**.

BEC

Alguns **picoKelvins**: $1pK = 10^{-12}K$, ou $1pK = 0,000000000001K$.



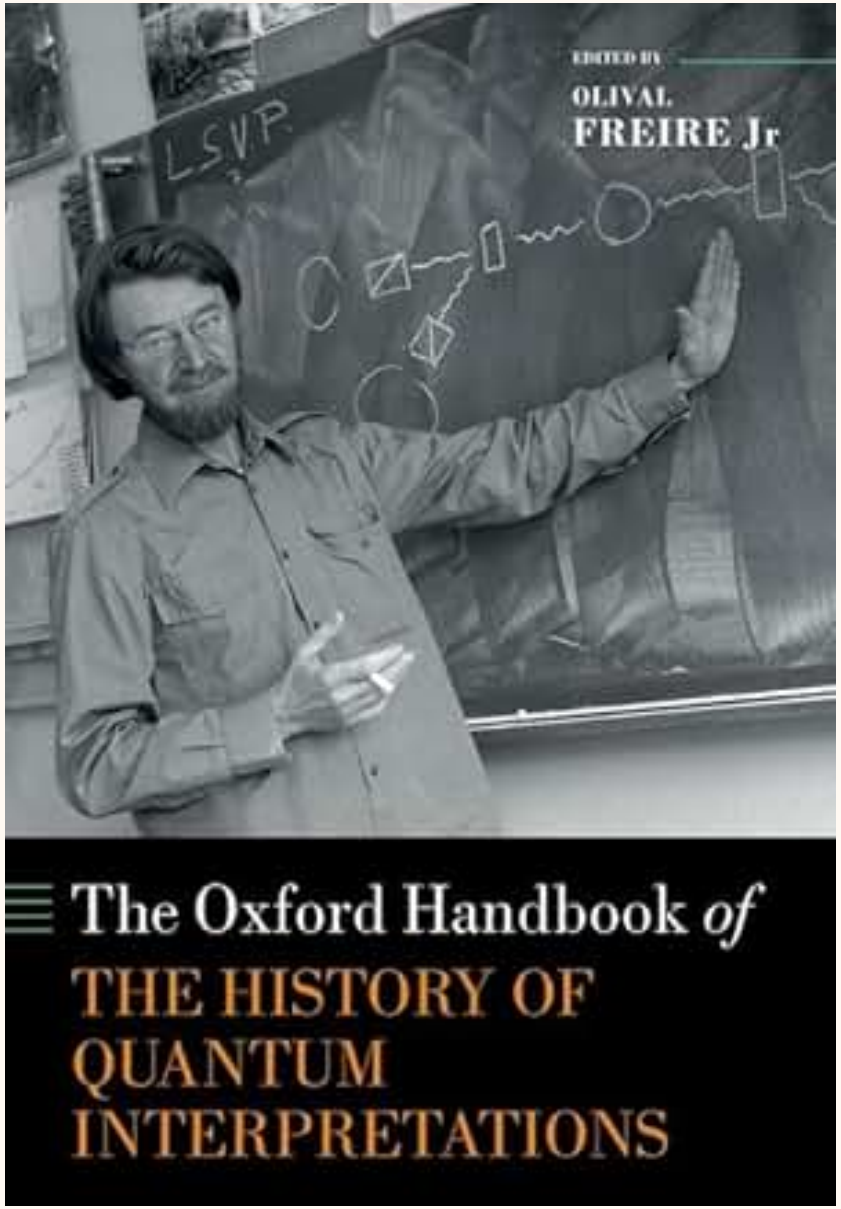
BEC

Como explicar essa indistinguibilidade com uma matemática "clássica"?

Outras interpretações

- Qbism Interpretação **epistêmica**, usa a **probabilidade Bayesiana**. Nessas, o estado quântico é uma representação do conhecimento incompleto ou das crenças de um observador sobre um sistema, em vez de uma descrição de sua realidade física.
- Relacional. Propõe que o estado é a relação entre o observador e o sistema. Proposta por Carlo Rovelli.
- Modais. Iniciadas por van Fraassen. Aperfeiçoadas por Olimpia Lombardi, Dennis Dieks e outros.
- Veja aqui

Oxford Handbook



Pesquisa recente

Revista *Nature* com 400 pessoas (12 Agosto 2025)

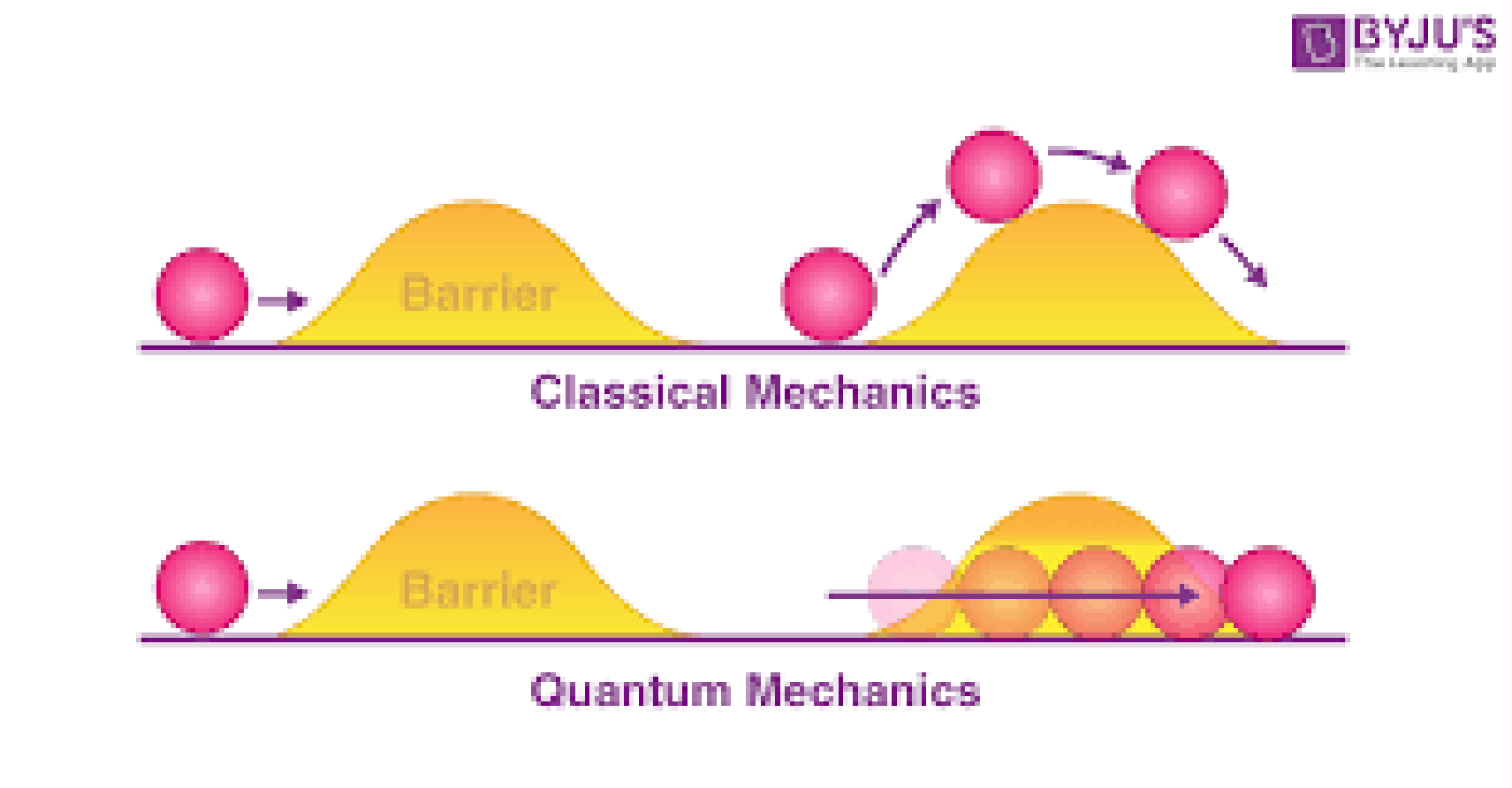
- Copenhague: 36%
- Epistemic: 17%
- Bohm: 7%
- Many-worlds: 15%
- Relational: 4%
- Veja a reportagem aqui: *"Physicists Can't Agree on What Quantum Mechanics Says about Reality"*

Nobel de Física 2025

- John Clarke Michel H. Devoret, John M. Martinis
- (Revista *Nature*) The laureates performed experiments on electrical circuits in which they observed quantum mechanical phenomena such as **tunnelling** and quantised energy levels. Their work showed that quantum tunnelling is not confined to the quantum world, but it can also be reproduced in macroscopic electrical circuits.
- Tecnologias Quânticas – em chips, os circuitos físicos constituem *barreiras potenciais* para os elétrons. O tunelamento é importante.

Tunelamento

- É um fenômeno mecânico (quântico ?) em que uma partícula (que se comporta como uma onda) atravessa uma barreira mesmo que não tenha energia suficiente para superá-la, como classicamente.



O "passa muralhas"

- Em Montmartre, Paris.

Más interpretações

- Acontecem quando se pretende *misturar* domínios, usando a MQ como justificativa para fatos ou suposições aos quais ela não diz respeito, ou não foi *desenhada* para.
- **A ciência é uma construção social** Sim, é. A ciência e as disciplinas científicas são criações nossas, mas não são arbitrárias. Lembremos de dois casos:
- A **"genética"** de Trofim Lisenko, agrônomo e cientista russo (época de Stalin, e apoiado por esse). Era contra o Darwinismo, a favor do Lamarkismo. Suas teorias levaram milhões de pessoas a perecerem de fome. Seus métodos foram adotados na China de Mao, causando o mesmo efeito.
- A matemática e a física alemãs sofreram muito com o nazismo, que não aceitava as "teorias **judaicas**" (como as teorias da relatividade). Muitos cientistas foram mortos e outros imigraram para outros países.

Opinião

A CIÊNCIA, BEM COMO AS UNIVERSIDADES, DEVEM SER PALCO DE DISCUSSÕES SOBRE TODOS OS ASSUNTOS, MAS NÃO PODEM SER DEFENSORAS OU CONDUZIDAS POR QUAISQUER IDEOLOGIAS.

Maus usos

- "Está tudo conectado". No Big-Bang, todas as coisas estavam conectadas, **logo, de acordo com a MQ**, elas continuam emaranhadas. FALSO! Se houve ou não o Big-Bang é algo que ainda não se sabe. E é fácil construir sistemas que não estejam emaranhados.
- A **coerência quântica** é perdida para sistemas "grandes" ou em contato com o ambiente: decoerência (perda da superposição).
- O gato (de Schrödinger) está vivo e morto ao mesmo tempo, e partículas podem estar em mais de um lugar ao mesmo tempo. FALSO! Partículas não têm **posição** bem definida, e o gato está (antes da abertura da caixa) em um estado de **superposição**, que não é um e nem outro.

O Tao da Física

- Obra de **Frijthof Capra**, considerada pelo filósofo francês Giles-Gaston Granger como sendo um exemplo do **abandono da racionalidade** (em *O Irracional*, 2002).
- **Tao:** princípio universal que tudo governa.
- "Eu vi cascatas de energia descendo do espaço no centro das quais eram criadas e destruídas segundo pulsações rítmicas, e nesse momento eu soube que era a dança de Shiva, o senhor da dança adorado pelos hindus." —citado por Granger, p.271
- "A teoria dos quanta e a teoria da relatividade nos levam a uma percepção do mundo muito semelhante à de um budista ou de um taoísta." — idem, ibid.
- "Cada objeto do mundo não é apenas ele mesmo, mas compreende cada um dos outros e é de fato todos os outros." — idem, ibid.
- "Todas as coisas são unificadas." — idem, p. 272

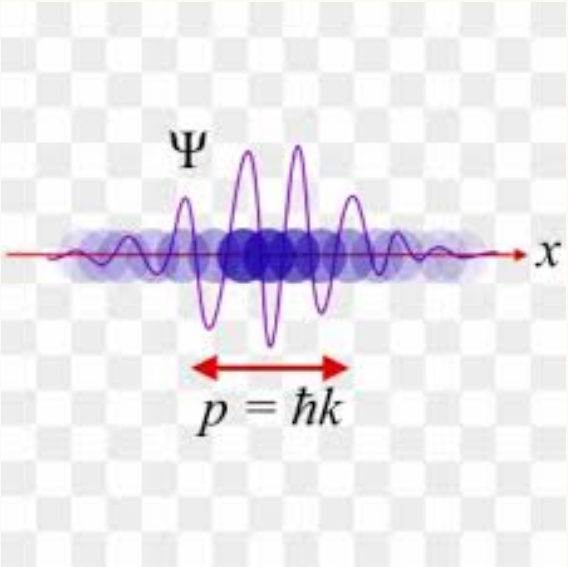
Explicação física

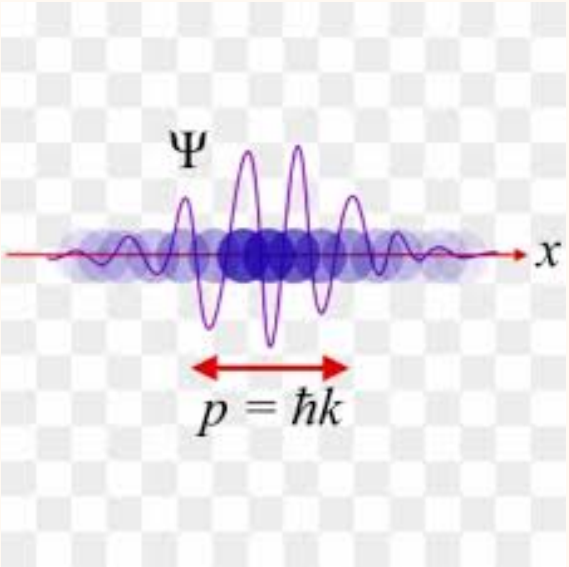
- $|\psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}|\psi\rangle_1|\psi\rangle_2 + \frac{1}{\sqrt{2}}|\psi\rangle_2|\psi\rangle_1$
- O que interessam são as probabilidades, dadas pela Regra de Born.
- $$||\psi\rangle_{12}|^2 = \frac{1}{2}\Big(||\psi\rangle_1|\psi\rangle_2|^2 + ||\psi\rangle_2|\psi\rangle_1|^2 + 2Re\langle|\psi\rangle_1|\psi\rangle_2||\psi\rangle_2|\psi\rangle_1\rangle\Big)$$
- O último termo é o **termo de interferência**, responsável pela (explicação do) fenômeno da interferência.
- *Nota bene*, não é o termo que **causa** a interferência: a física acontece no laboratório, e não nos espaços de Hilbert! Essa é a **explicação matemática** para o que estamos observando, a interferência.

"Realidade física" no sentido de Einstein

Einstein: sistemas físicos espaço-temporalmente separados **constituem realidades físicas distintas**. Para ele, um sistema infuenciar o outro instantaneamente "é telepatia, não é física" (livro do Aspect, p.303).

Os experimentos (Aspect, Zeilinger, Clauser, etc.) mostram que a MQ fornece uma visão realista (os sistemas têm propriedades) e não-local: as propriedades de um não podem ser conhecidas sem se levar em conta as propriedades do outro.





Diversas metafísicas

- O que se vê é que o *mesmo* formalismo matemático da MQ pode dar origem a distintas metafísicas (visões de mundo, *Weltanschauung*).
- As entidades quânticas (elétrons, prótons, átomos de H, etc.) podem ser vistas como:
  - **Indivíduos**, distintos uns dos outros: Bohm, French & Krause – restrição de estados.
  - **Não-indivíduos**, não possuem *identidade* no sentido usual (lógica clássica), podendo ser **totalmente indiscerníveis**. Suportada por experimentos.
  - **Conjuntos de propriedades**, e não como objetos individuais com uma substância subjacente. Um sistema quântico é definido pelas propriedades que possui, que podem ser contextualmente dependentes do observador, e não por uma suposta "identidade".

Interpretação de não-indivíduos

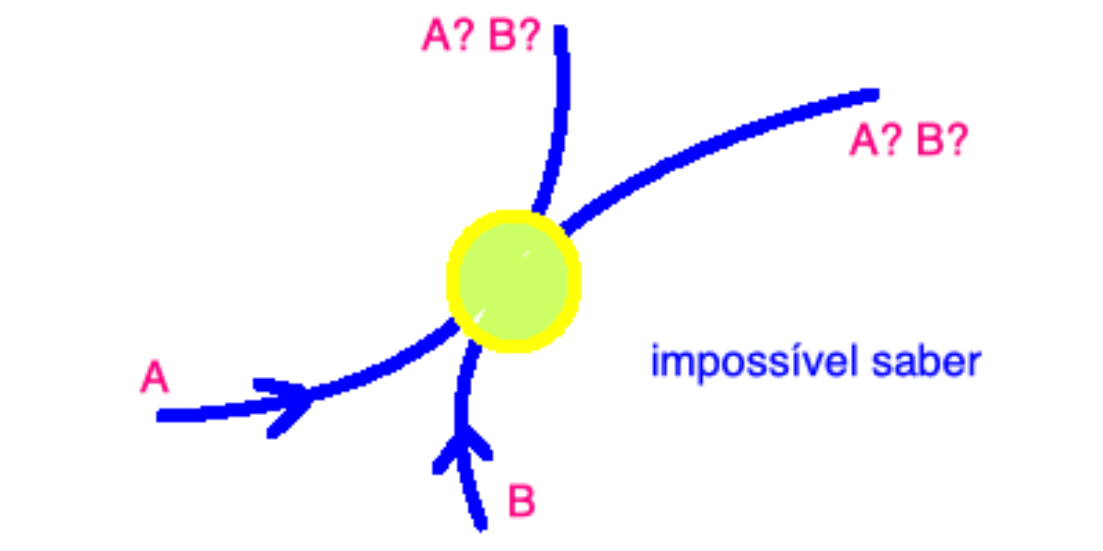
- **Dupla fenda** – demonstra a não individualidade quântica ao mostrar que partículas quânticas, como os fótons, não podem ser tratadas como *indivíduos* independentes com uma identidade única.
- Quando enviadas com as duas fendas abertas, as partículas produzem um padrão de interferência, como se passassem por ambas as fendas simultaneamente e interferisse consigo mesmas – um comportamento que viola a ideia clássica de individualidade.
- Isso sugere que a "identidade" de uma partícula quântica não é uma propriedade bem definida, mas dependente de suas relações e interações com outras partes do sistema.
- Não é possível dizer que um sistema tem uma **identidade momentânea**; identidade é um conceito lógico, que na LC (lógica clássica), vale ou não vale.

Não-indivíduos

1. Podem formar **coleções**, como nos BECs com milhares deles, **sem qualquer diferença** entre um e outro.
2. Não podem ser ordenados, contados de maneira usual.
3. "Contar" é estabelecer **bijeções** com um *segmento inicial* dos números naturais: $0, 1, 2, 2, \ldots, n, \ldots$.
4. Precisa da **identificação** das entidades.
5. Molecula de água pura: H_2O : não há qualquer distinção entre os dois átomos de **H**.
6. John Dalton, 1803: "every particle of water is like every other particle of water, every particle of hydrogen is like every other particle of hydrogen, &c."

Nossa abordagem

- Motivada por Schrödinger: a **identidade** carece se sentido para as partículas quânticas.
- Qual identidade? Assumimos que é a da **lógica clássica**.
- **Identidade intuitiva:** aquilo que faz de uma coisa a coisa que ela é; algo que uma coisa tem e que a distingue de qualquer outra, etc. Tudo isso é muito vago.
- Schrödinger falava da **re-identificabilidade**.



O que é um *indivíduo*?

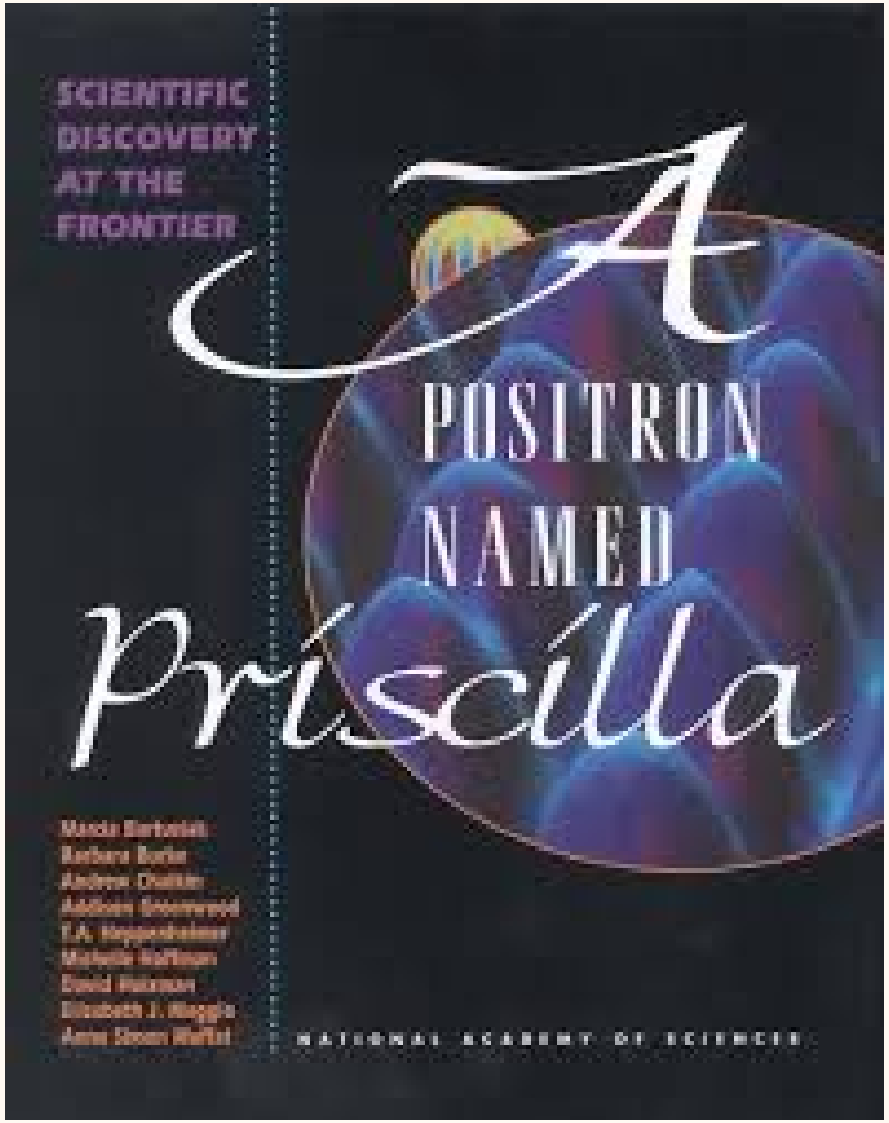
- (1) é uma **unidade**. Mas cuidado: David Hume disse que "um objeto único (*single object*) confere a ideia de unidade, não de identidade".
- (2) É **re-identificável** em diferentes contextos como sendo **o mesmo** de antes.
- Um *quanta* pode ser **preso em uma armadilha**, mas isso lhe confere **isolamento**, não **identidade**, porque falha na re-identificabilidade.

"Trapped quanta"

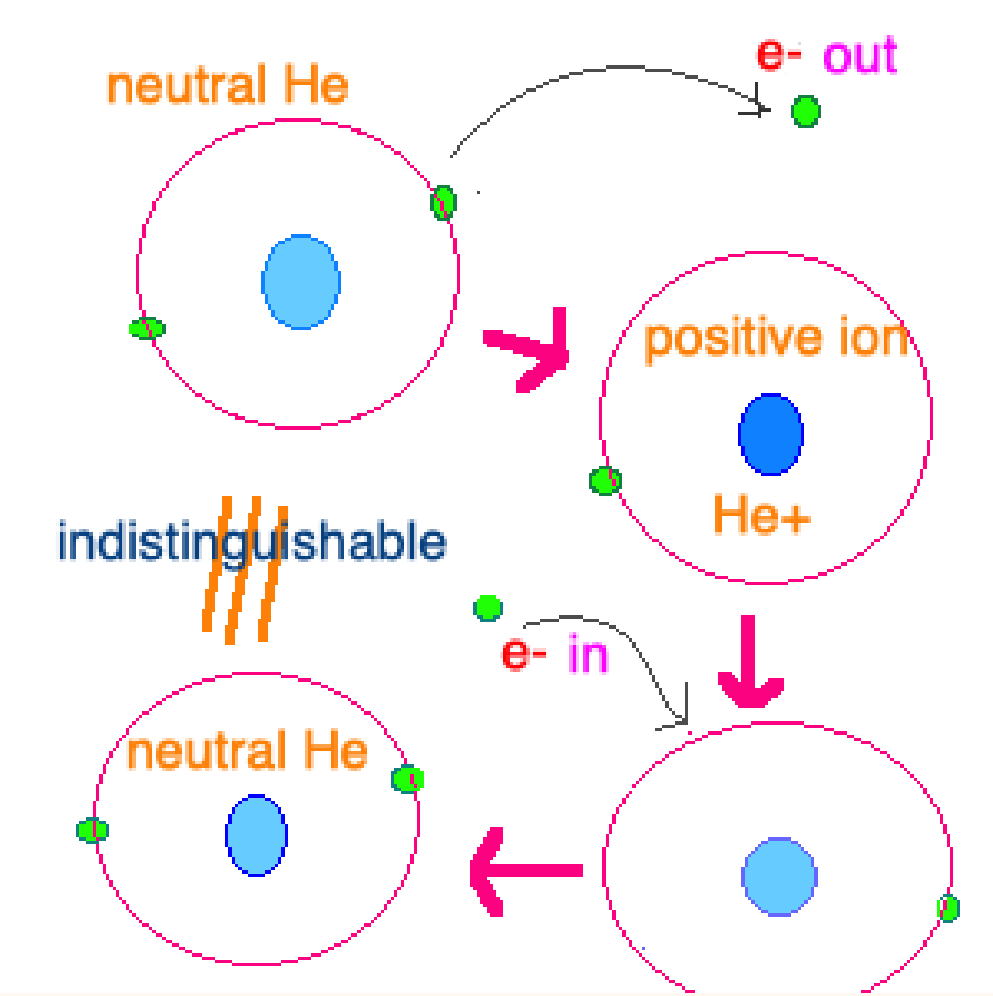
Hans Dehmelt (1922-2017), Nobel 1989.

"Trapped quanta"

Um pósitron chamado "Priscilla".



Falha na re-identificação – ionização



Os elétrons (o eliminado e o absorvido) são **idênticos**? Os dois átomos neutros são **idênticos**? Essas perguntas não fazem sentido. Não há *identidade* nessas entidades.

Uma matemática

- Como coleções dessas entidades podem formar **conjuntos** no sentido usual?
- Georg Cantor: "um conjunto é uma coleção de objetos **distintos** de nossa intuição ou pensamento."
- Yuri Manin, 1974: "We should consider the possibilities of developing a totally new language to speak about infinity (. . .) 'sets' of photons in a looking-glass box, or of electrons in a nickel piece are much less Cantorian than the 'set' of grains of sand."

"Mastering the relevant mathematical language helps us to avoid unnecessary quantum controversies." (Heinosaari & Ziman 2011

Teoria de *Quase-Conjuntos*

- Quase-conjuntos: **Kinds and quantities**: $^3He = \langle p, e, n; 2, 2, 1 \rangle$ (isótopo He-3 do Helio), AE, $EM = \langle C, H, O; 2, 6, 1 \rangle$ (álcool etílico ou éter metílico, dependendo da *forma*.)
- $$q = \langle k_1, k_2, \ldots, k_n; \lambda_1, \ldots, \lambda_n; f \rangle \tag{1}$$
- Seus elementos podem ser **completamente indiscerníveis**, não podendo ser **ordenados**.
- Em vez da **identidade** (clássica), **indistinguibilidade**.
- A teoria clássica da identidade não vale em geral (em consonância com Schrödinger).
- É possível desenvolver uma MQ nessa matemática sem que haja **identificação** das entidades.
- Fornece uma metafísica distinta da clássica (de indivíduos).
- Veremos sobre lógica na próxima aula.