

Teorias e interpretações da mecânica quântica

Fazenda do Centro
Castelo, agosto de 2019

Nelson Pinto Neto

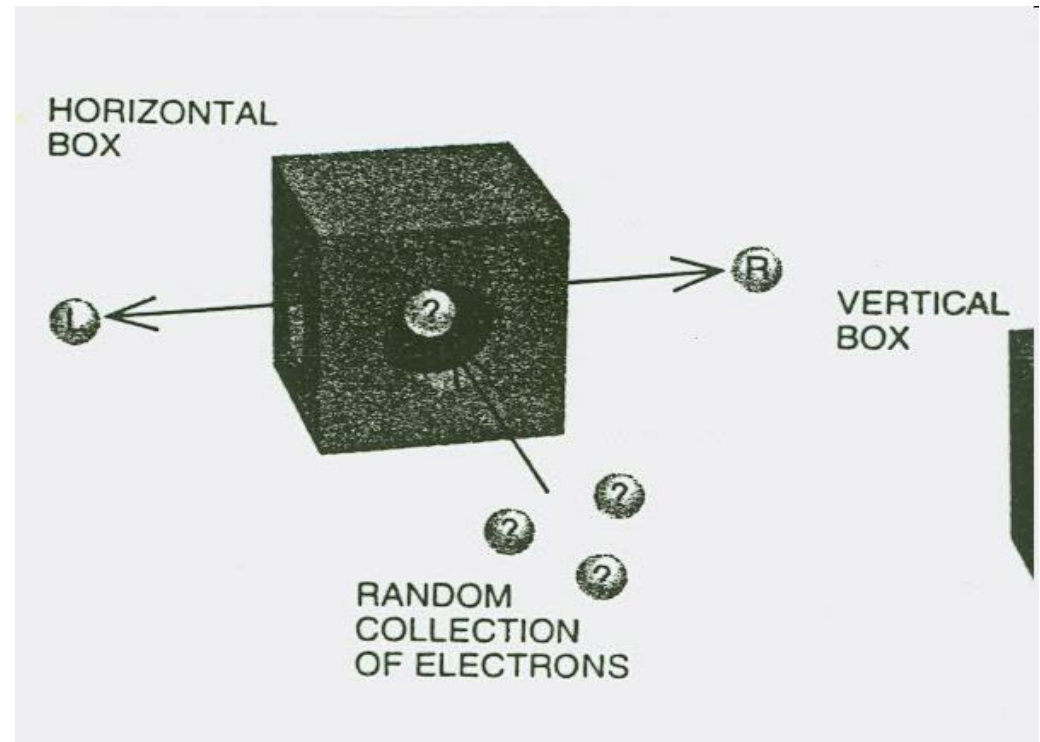
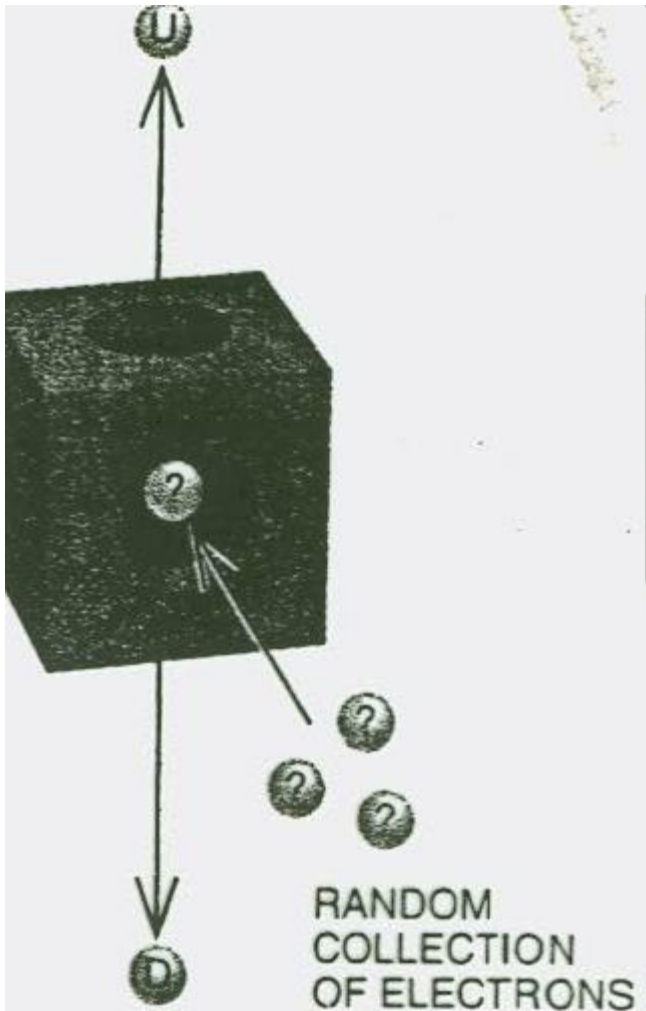
CBPF

Coordenação de Cosmologia, Astrofísica
e Interações Fundamentais

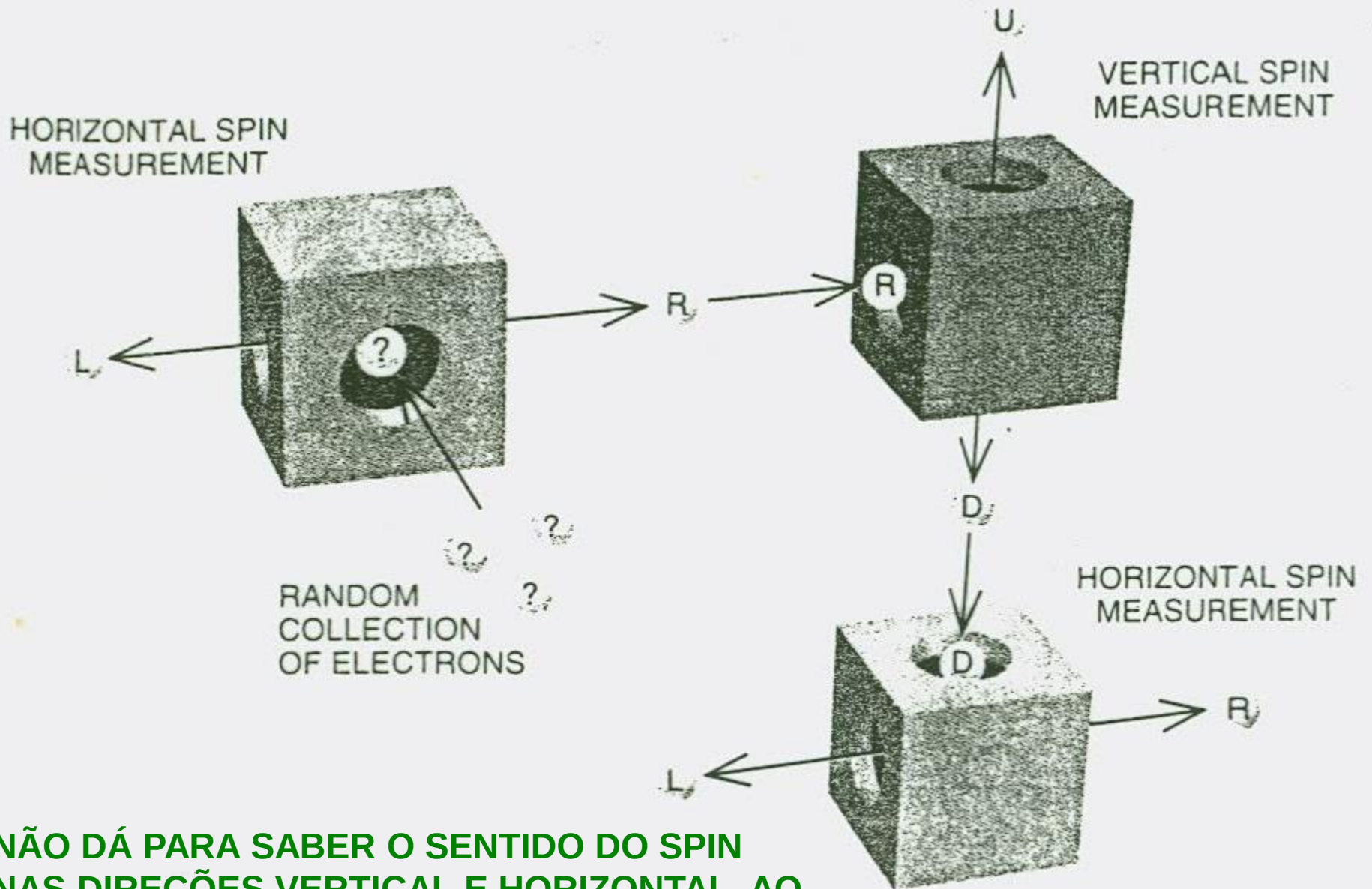
COSMO

I) OS FENÔMENOS QUÂNTICOS

SPIN

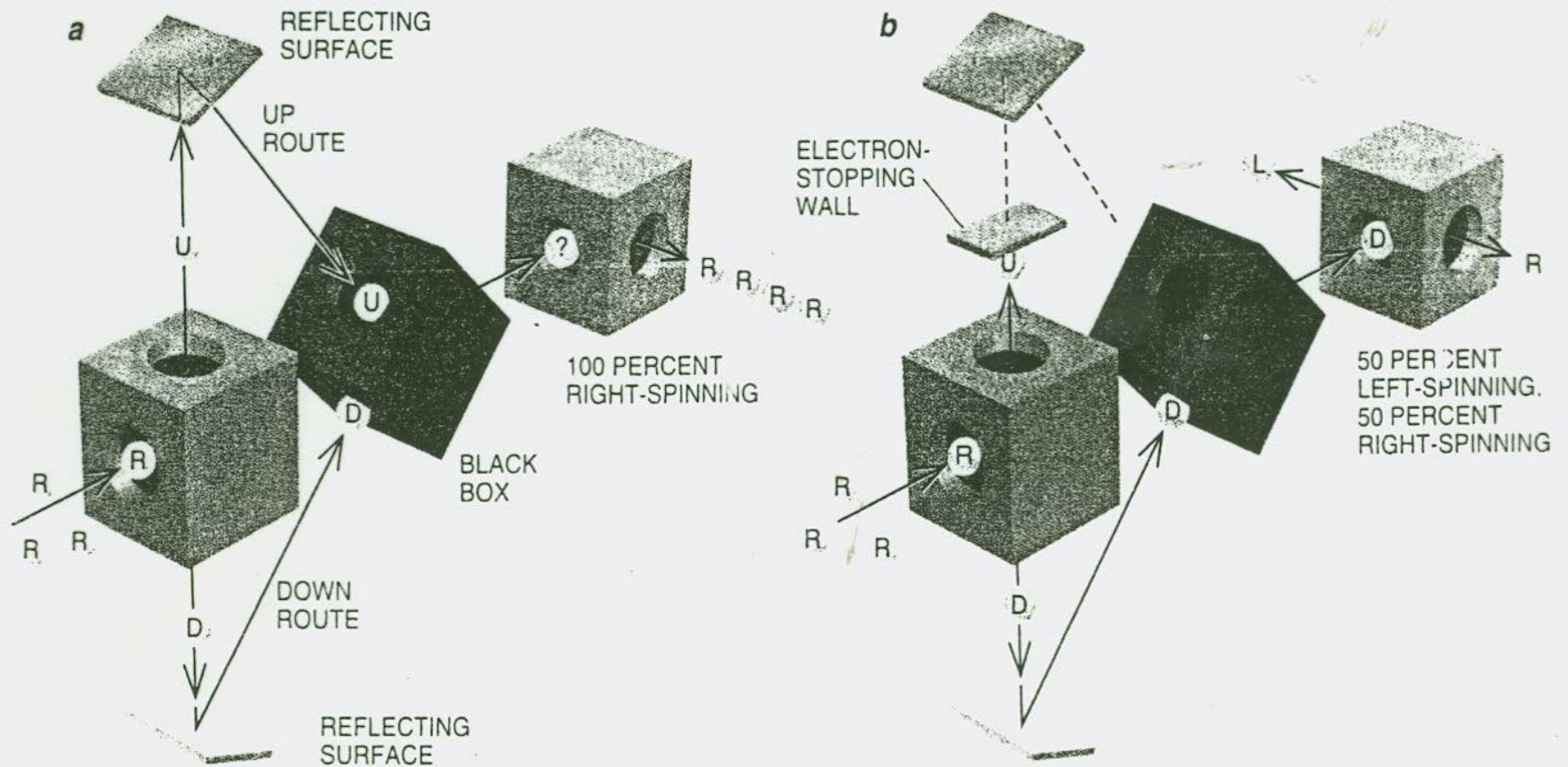


FENÔMENOS ALEATÓRIOS

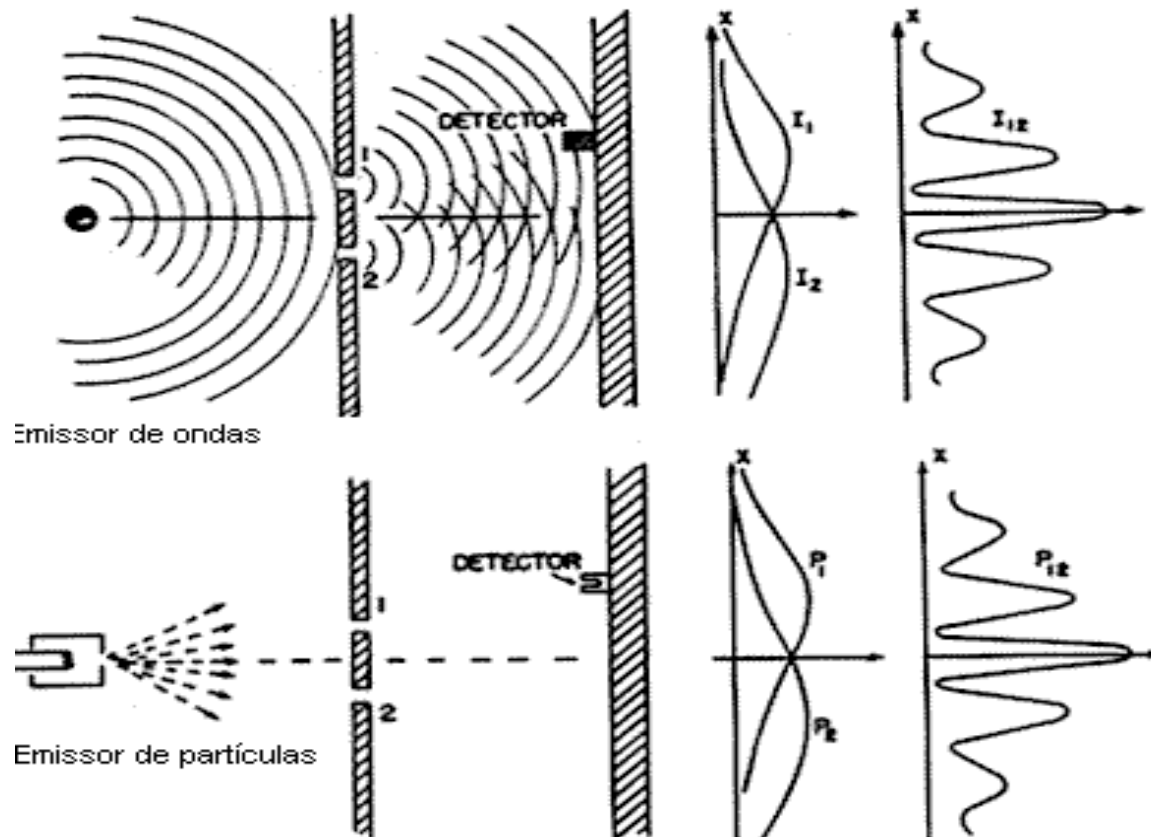


**NÃO DÁ PARA SABER O SENTIDO DO SPIN
NAS DIREÇÕES VERTICAL E HORIZONTAL AO
MESMO TEMPO → PRINCÍPIO DA INCERTEZA**

INTERFERÊNCIA



Outro exemplo de interferência quântica:



Por onde passou o elétron?

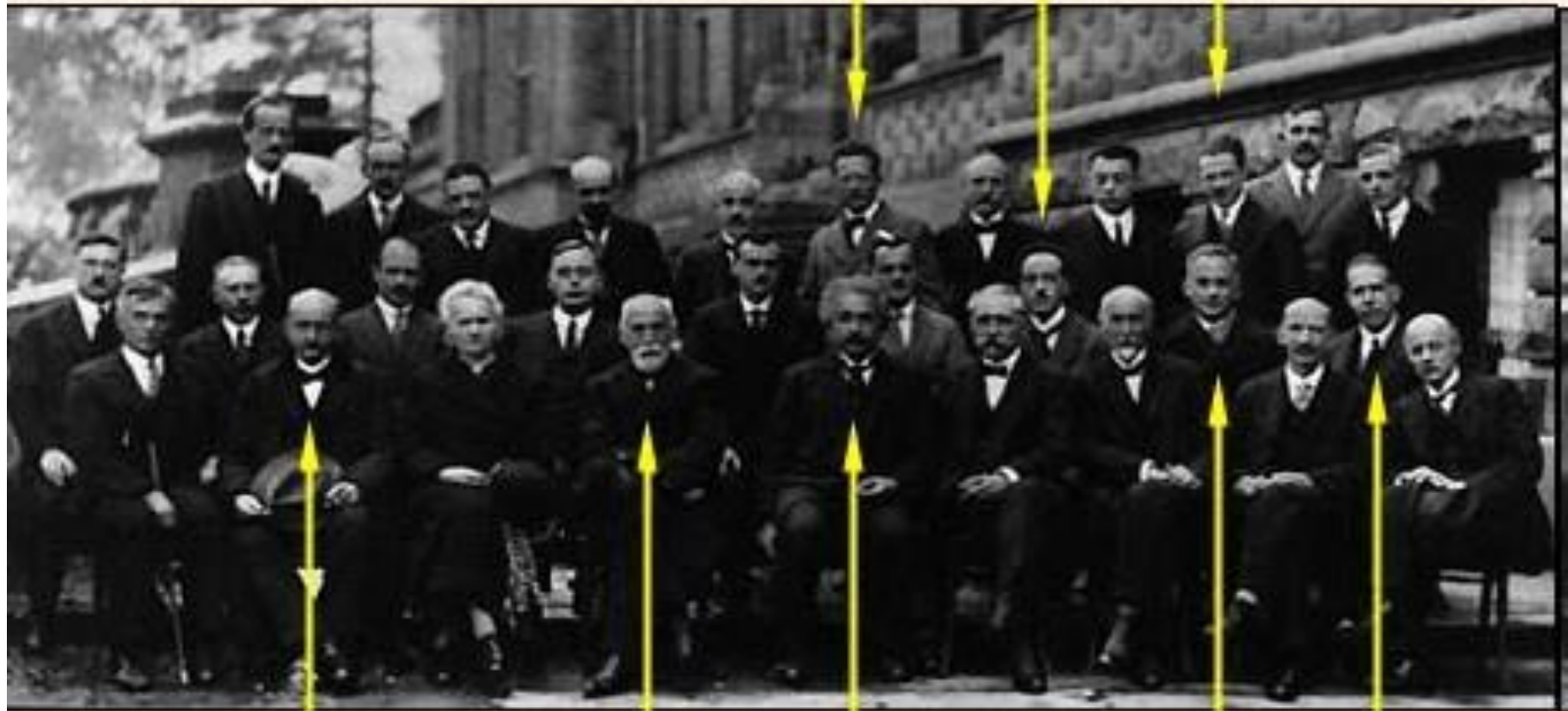
- a) Se passou por um dos dois caminhos não teríamos interferência!**
- b) Passou pelos dois? Mas se colocarmos dois detetores um em cada caminho, só um deles registra a passagem do elétron!**
- c) Não passou por nenhum? Mas se bloquearmos os dois caminhos, nada é registrado!**

The Solvay Congress of 1927

Werner Heisenberg

Louis de Broglie

Erwin Schrödinger



H. A. Lorentz

Max Born

Max Planck

Einstein

Niels Bohr

Três propostas principais:

- 1) Schrödinger: função de onda física → localização espontânea
- 2) De Broglie: onda piloto → teoria de de Broglie-Bohm
- 3) Born e Heisenberg → interpretação de Copenhague

Born, Heisenberg e Bohr venceram (Jammer) ;

De Broglie foi quase ignorado e destruído por uma pergunta de Pauli;
Congresso dominado pelas discussões de Einstein com Bohr;

ERRADO

Anais mostram: Tempo dividido igualmente entre as três propostas;
Muitas perguntas a de Broglie, que respondeu corretamente a Pauli;

Muita confusão (Ehrenfest): "E disseram uns aos outros: Vai, construíamos uma torre para nós, cujo cume possa alcançar o céu; e façamo-nos um nome. E o Senhor disse: Vai, desçamos, e confundamos ali sua língua, que eles não possam compreender o discurso do outro." ;

Conversa Bohr-Einstein não é citada.

Postura pragmática – trabalho conjunto → Copenhaguen

Solução de Copenhaguen: NÃO FAZ SENTIDO FALAR DE TRAJETÓRIAS OU POR ONDE O ELÉTRON PASSOU SEM QUE HAJA UM APARELHO DE MEDIDA QUE EFETIVAMENTE DECIDA SOBRE ESTAS QUESTÕES.

Não existe realidade objetiva, isto é, independente das observações!

Propriedades quânticas são potencialidades que só se realizam numa medida!

SOLUÇÃO EPISTEMOLÓGICA SEM PARALELO NA FÍSICA!

Potencialidades descritas por uma
função de onda: $\psi(x,t)$

$|\psi(x,t)|^2$ fornece a probabilidade de encontrar a partícula
na posição x e tempo t após uma medida.

Na interferência quântica temos as potencialidades:

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

Assim, $|\psi|^2 = |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + \psi_1^* \psi_2 + \psi_1 \psi_2^*$

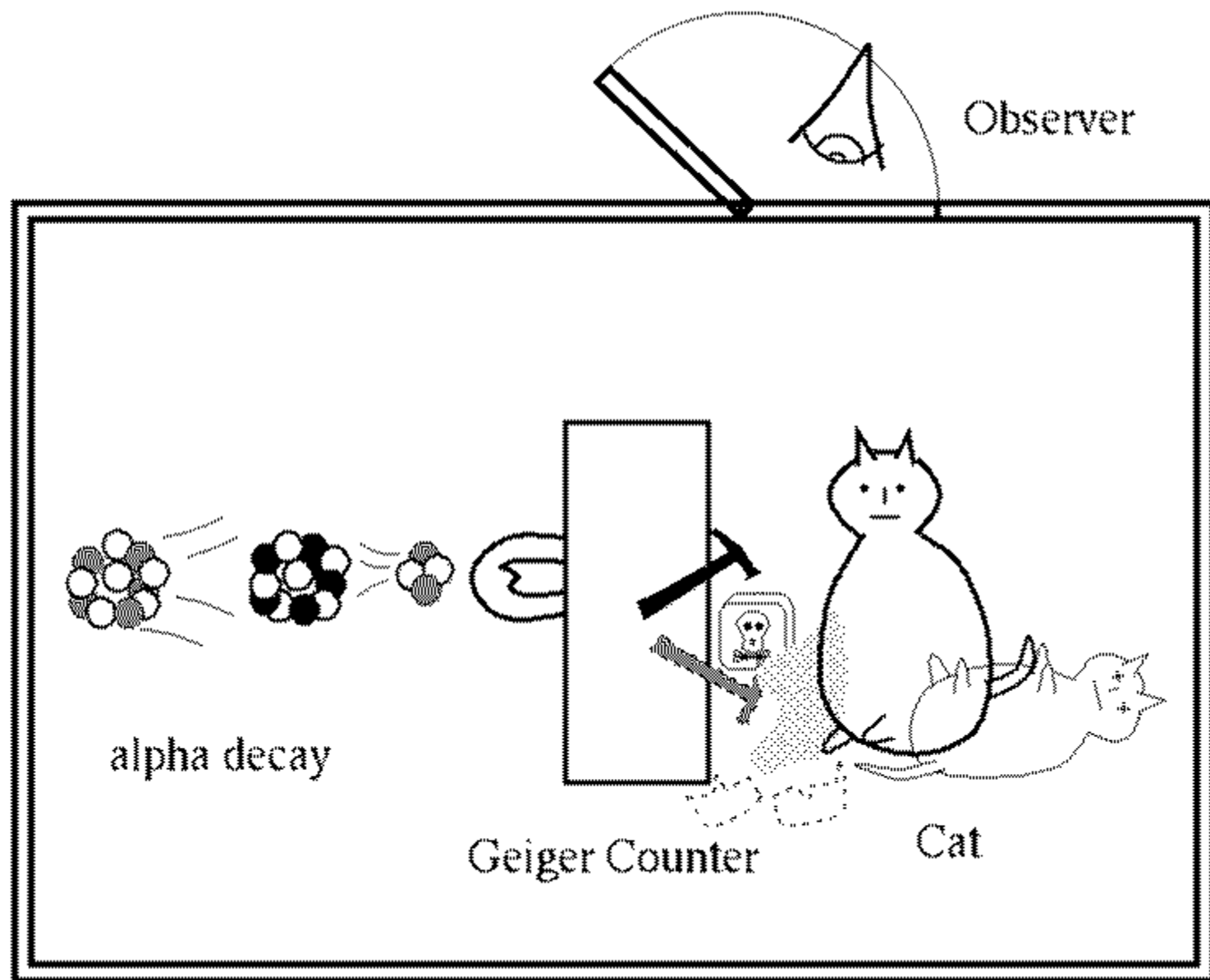
A função de onda satisfaz a equação de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(x) \right] \Psi(x, t)$$

PROBLEMAS

Linearidade: se existe superposição $\psi = \psi_1(x_1 \dots x_n) + \psi_2(x_1 \dots x_n)$
porque não existe superposição de objetos macroscópicos?

GATO DE SCHROEDINGER



Bohr: COMPLEMENTARIDADE



Bohr: mundo macroscópico é clássico. Outras leis. Lugar do senso comum, da linguagem, dos fatos concretos e objetivos.

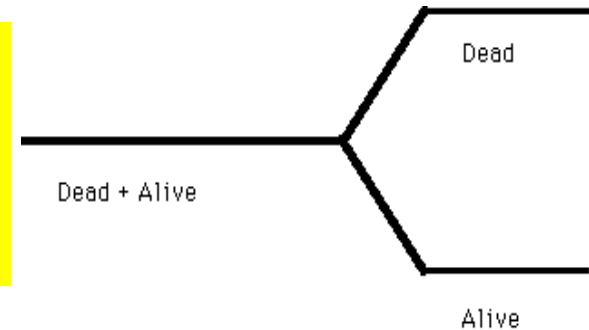
No centro da investigação científica estão os conceitos clássicos que nos orientam. Em direção ao domínio quântico, apenas alguns deles podem ser aplicados, por vez, de acordo com o que se está perguntando sobre o sistema.

O problema da medida quântica

O que acontece num aparelho de medida que torna potencialidades em fatos?

Porque não vemos superposições do ponteiro de um voltímetro?

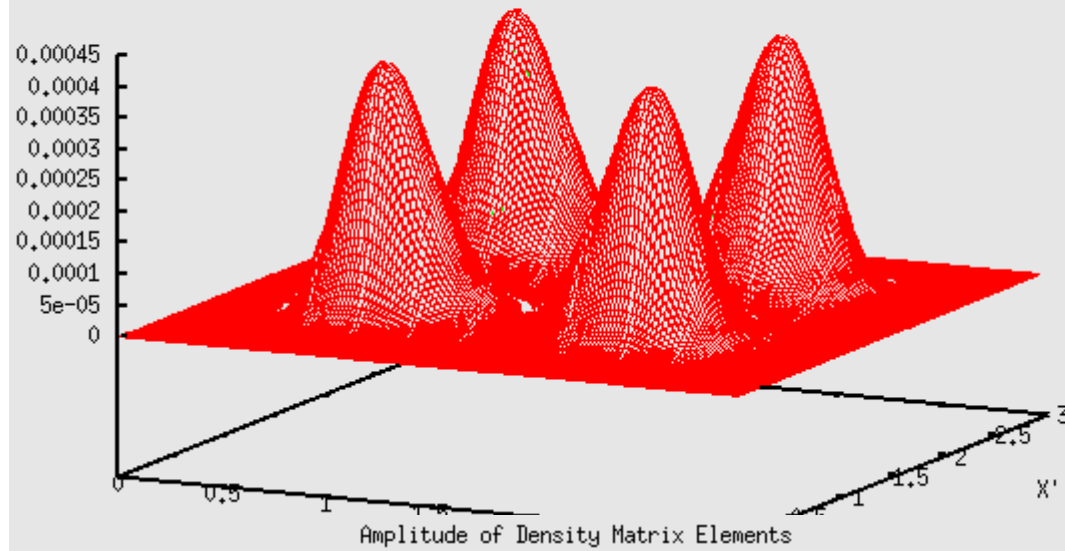
Medida quântica: função de onda do aparelho + sistema se bifurca na medida: os ramos interferem?



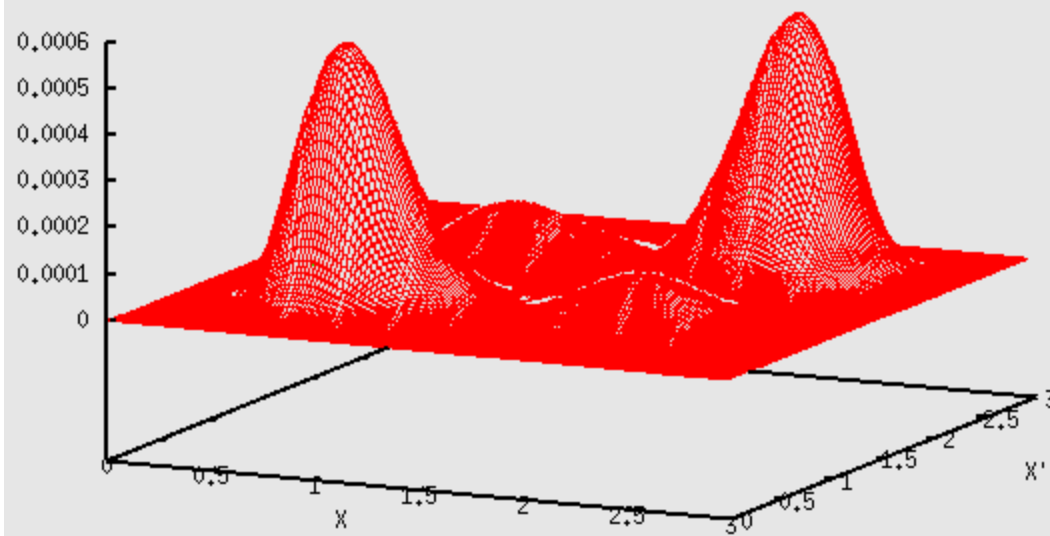
Descoerência → num aparelho de medida só olhamos para poucas propriedades, por exemplo, a posição do ponteiro. Existem outros inúmeros átomos cujas propriedades não interessam e que estão interagindo sem parar com o ambiente a sua volta. Ao ignorar estes graus de liberdade não observados (traço sobre eles na matriz densidade → matriz densidade reduzida) interferência é quase completamente destruída para graus de liberdade observados!

Amplitude of Density Matrix Elements

t=2.5

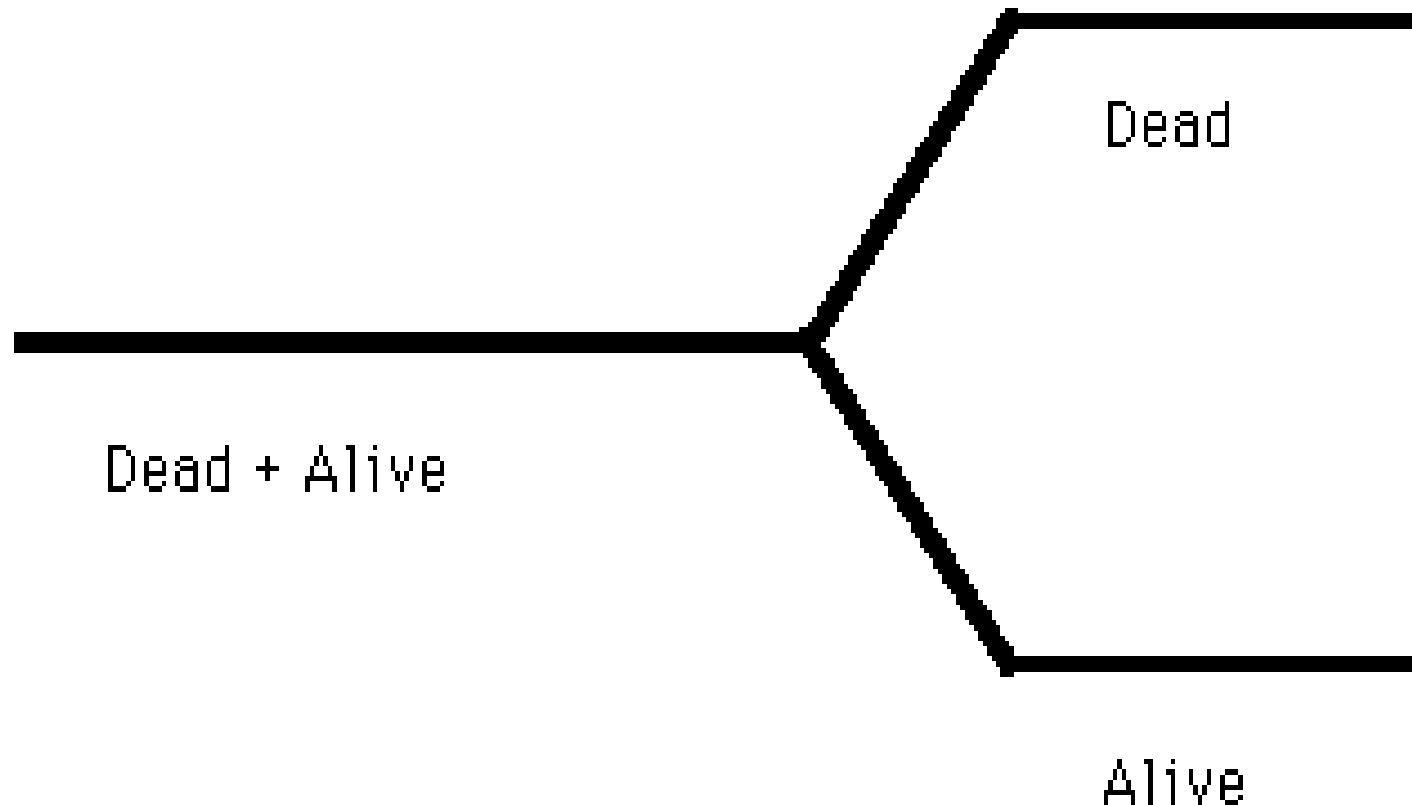


t=2.5

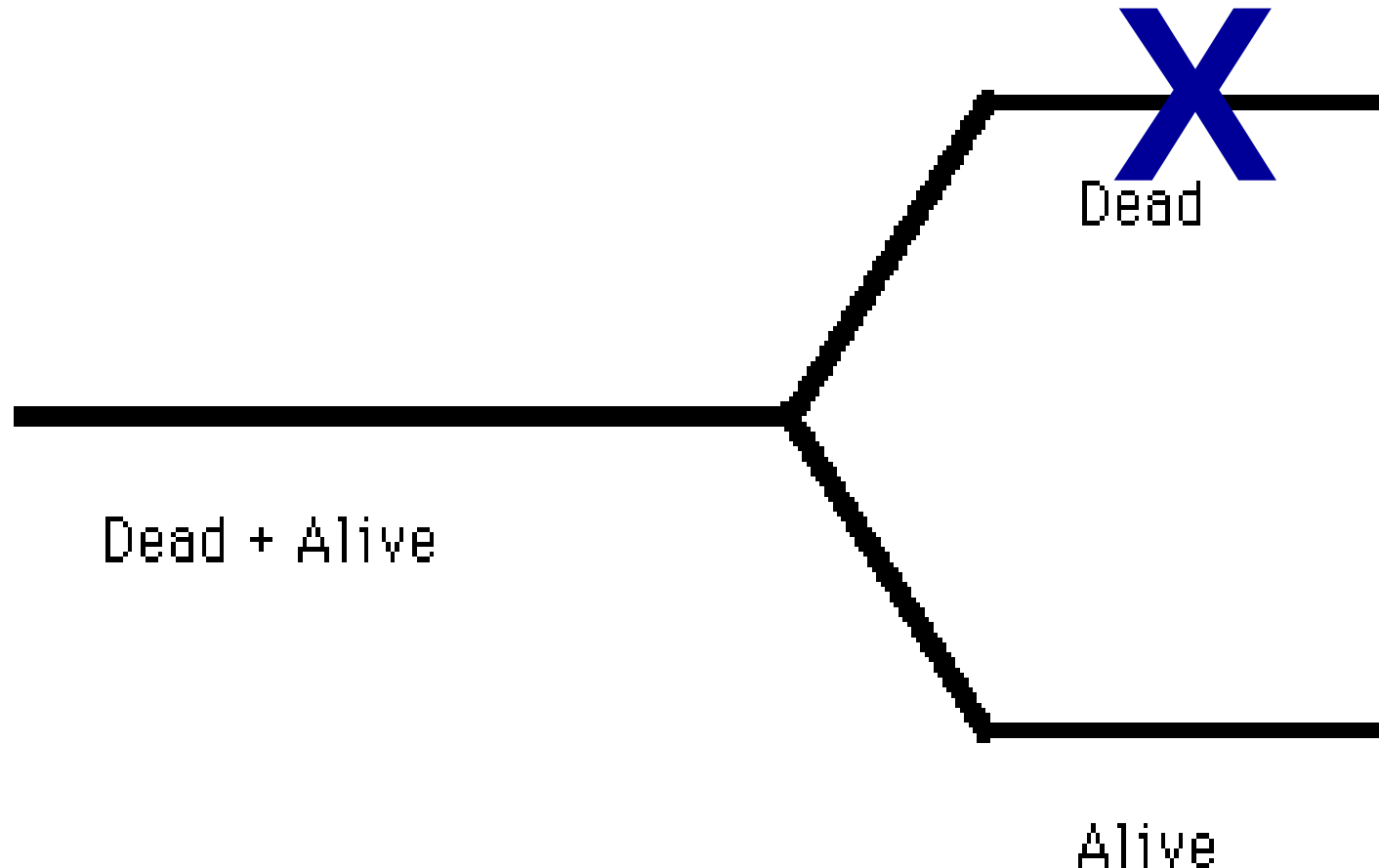


Descoerência: explica não vemos interferência de estados macroscópicos e/ou do ponteiro de medida, mas só um ramo é observado!

NÃO EXPLICA O FATO ÚNICO!



FATO ÚNICO:
POSTULA-SE UM COLAPSO!



Equação de Schrödinger não pode ser válida em todos os processos, segundo a interpretação de Copenhaguen:

TEORIA QUÂNTICA NÃO É UNIVERSAL

Copenhaguen: colapso da função de onda devido à ação do aparelho clássico: mundo quântico e mundo clássico.

**ONDE ESTÁ A FRONTEIRA ENTRE O QUÂNTICO E O CLÁSSICO?
ONDE SE DÁ O COLAPSO?**

**Não se pode ir além da complementaridade;
Não se pode perguntar detalhes sobre os fenômenos quânticos;
Não se pode indagar sobre uma dinâmica sub-quântica.**

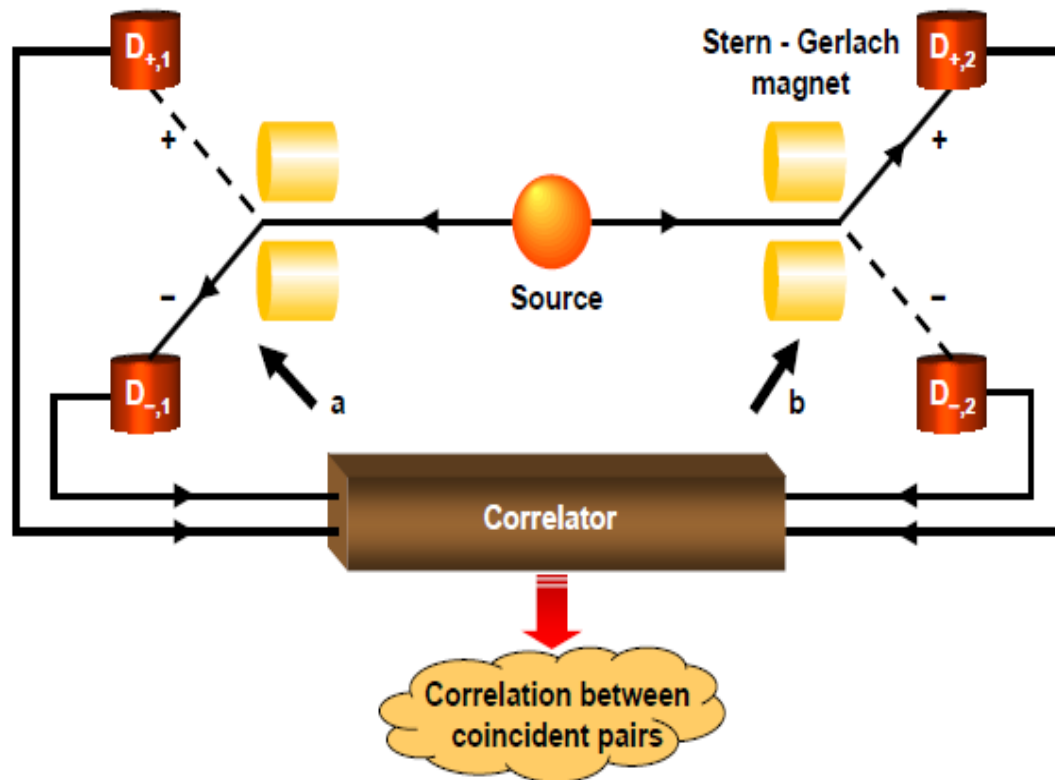
"Contemporary quantum theory...constitutes an optimum formulation of [certain] connections ... [but] offers no useful point of departure for future developments".

Albert Einstein



Artigo EPR: tenta mostra que MQ está incompleta.

- 1) Uma teoria é completa se todo elemento de realidade física tiver uma contra-partida na teoria física.
- 2) Se, sem perturbar um sistema de forma alguma, pudermos prever com certeza (isto é, com probabilidade igual à unidade) o valor de uma quantidade física, então existe um elemento de realidade física correspondendo à esta quantidade física.



Resposta de Bohr: retirou da noção de realidade física a referência às partes da natureza que existem e podemos ou não conhecer e limitou-a apenas às partes que podemos conhecer (o que para alguns é uma mutilação do significado básico do termo) estando portanto sujeita à escolha dos experimentos que serão realizados.

Questionou na hipótese 2 conclusões sobre realidade física através de raciocínios contra-factuais mas não a localidade física.

Bell

retirou a discussão do terreno metafísico e trouxe-o para a física
→ Desigualdades de Bell.

Analogia: **telepatia quântica.**

Ana
cartas 1, 2, 3
sim, não

João
cartas 1, 2, 3
sim, não

Quando recebem iguais, um põe sim outro põe não sempre

Combinaram:

I) 1 2 3
A sim não não
J não sim sim

II) 1 2 3
sim não sim
não sim não

III) 1 2 3
sim sim sim
não não não

Estatística I:	1, 1	1, 2	1, 3	2, 1	2, 2	2, 3	3, 1	3, 2	3, 3
5 em 9 s-n	s n	s s	s s	n n	n s	n s	n n	n s	n s

Estatística II, 5 em 9 Estatística III, 9 em 9 ...

Probabilidade de contrários: $p \geq 5/9$

Hipótese: sem telepatia (localidade)

Se Ana e João usarem partículas quânticas vindas de decaimento;
carta 1, spin z ; carta 2, spin n ; carta 3, spin m
→ ângulo entre z, n, m é de 60 graus + sim; - não

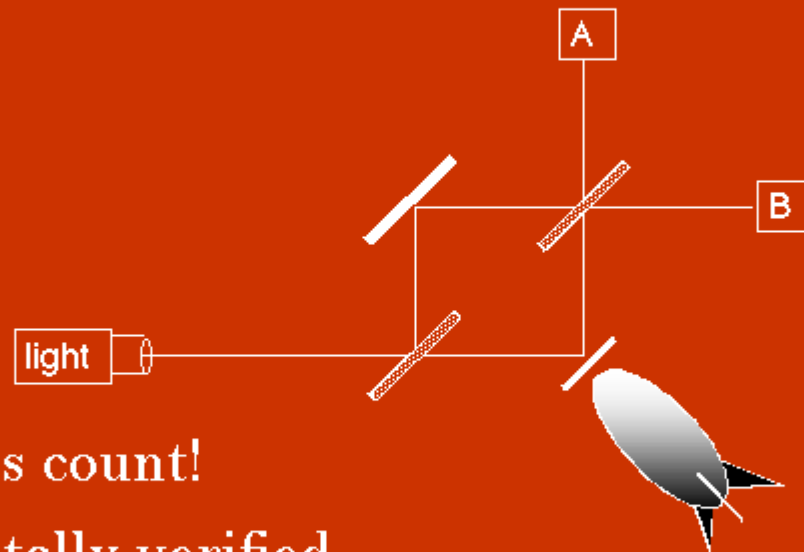
$$p = 1/2 < 5/9 !!$$

Aspect mostrou em experimento violação da desigualdade:
localidade refutada

MAS

não será mecânica quântica não local (sem envio de sinal)?

Elitzur-Vaidman bomb testing



- Possibilities count!
- Experimentally verified
- Can be enhanced to reduce or eliminate bomb loss
[Kwiat, Weinfurter and Kasevich]

A teoria de de Broglie-Bohm

“The kinematics of the world, in this ortodox picture, is given by a wave function for the quantum part, and classical variables -variables which *have* values - for the classical part: $(\Psi(t, q \dots), X(t) \dots)$. The X s are somehow macroscopic. This is not spelled out very explicitly. The dynamics is not very precisely formulated either. It includes a Schrödinger equation for the quantum part, and some sort of classical mechanics for the classical part, and ‘collapse’ recipes for their interaction.

It seems to me that the only hope of precision with the dual (Ψ, x) kinematics is to omit completely the shifty split, and let both Ψ and x refer to the world as a whole. Then the x s must not be confined to some vague macroscopic scale, but must extend to all scales.”

John Stewart Bell.

As equações propostas por de Broglie

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(x) \right] \Psi(x, t)$$

$$p = m\dot{x} = \nabla S(x, t)$$

$$\Psi = A \exp(iS/\hbar)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 A}{A} = 0.$$

The guidance relation allows the determination of the trajectories (different from the classical)

$$m\mathbf{a} = -\nabla V - \nabla Q$$

$$\frac{\partial A^2}{\partial t} + \nabla \cdot \left(A^2 \frac{\nabla S}{m} \right) = 0,$$

If $P(\mathbf{x}, t=0) = A^2(\mathbf{x}, t=0)$, all the statistical predictions of quantum mechanics are recovered.

However, $P(\mathbf{x}, t=0) \neq A^2(\mathbf{x}, t=0)$, relaxes rapidly to $P(\mathbf{x}, t) = A^2(\mathbf{x}, t)$ (quantum H theorem -- Valentini)

Born rule deduced, not postulated

PROPRIEDADES

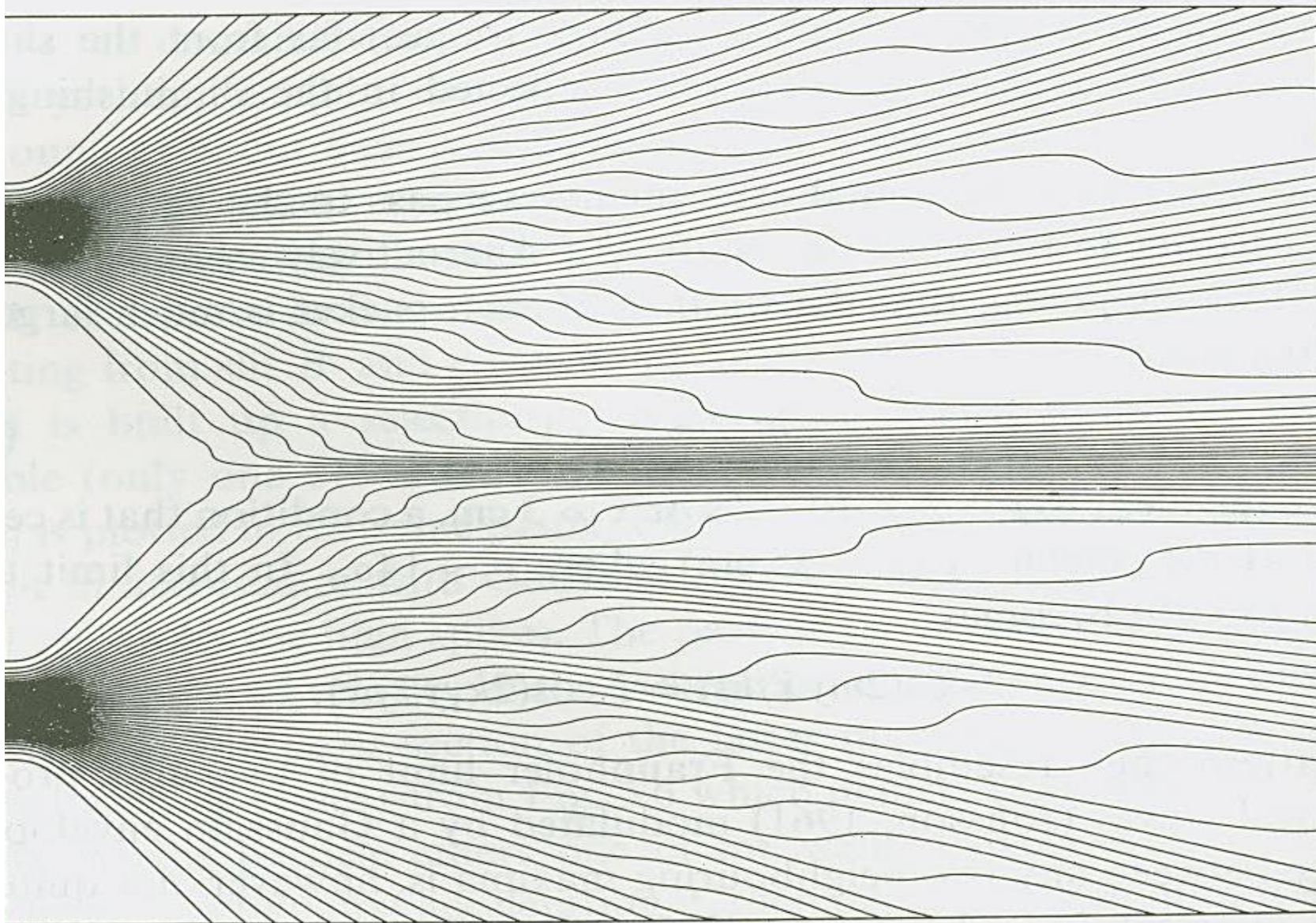
a) ∂Q é não local e altamente dependente de contexto!

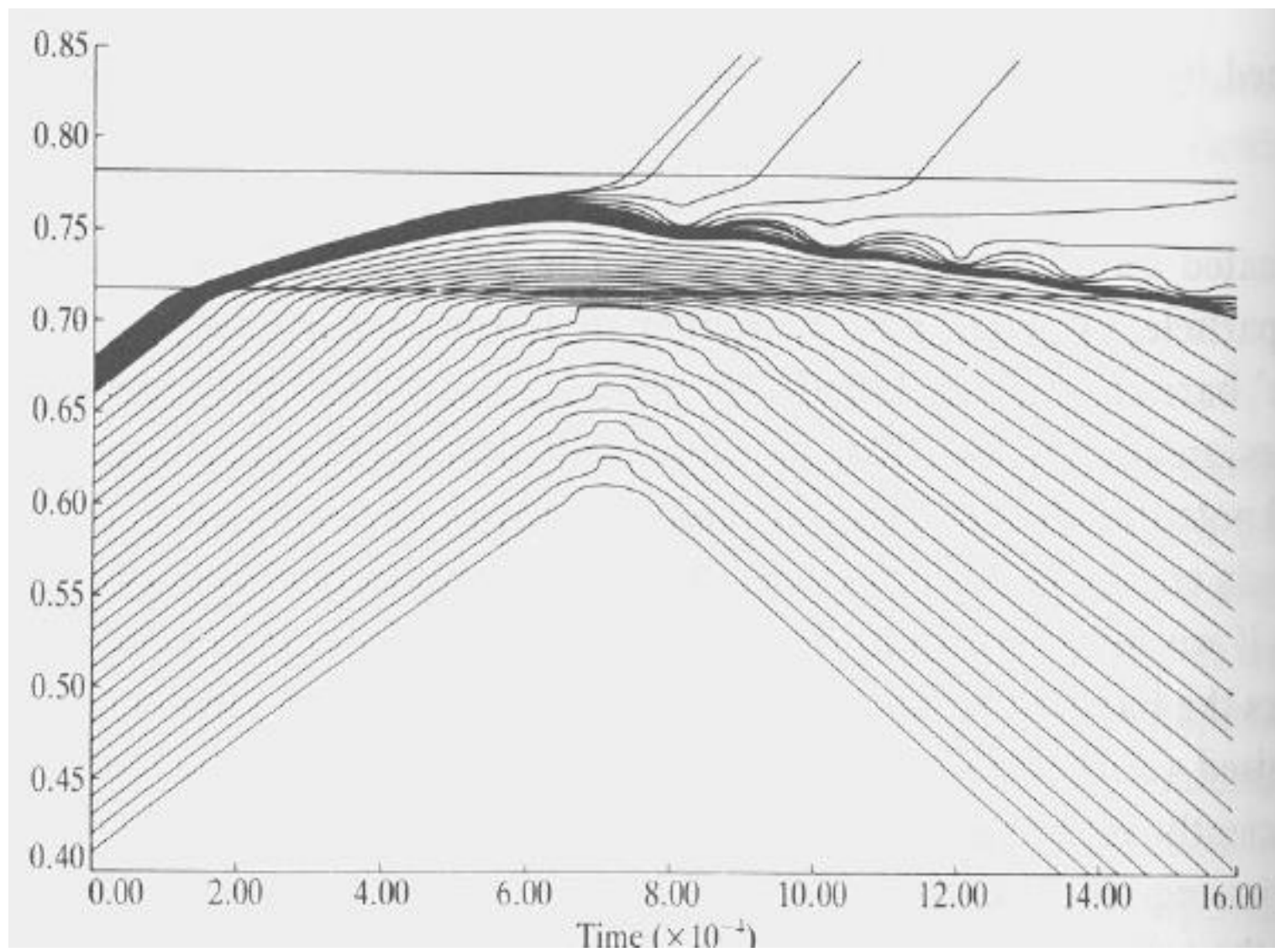
Generalização para campos relativísticos: mantem invariância relativística a nível estatístico apenas._

b) Probabilidades não são essenciais.

c) Com realidade objetiva mas apresenta as mesmas previsões estatísticas que a interpretação de Copenhaguen, incluindo spin.

5 *Interference and tunnelling*





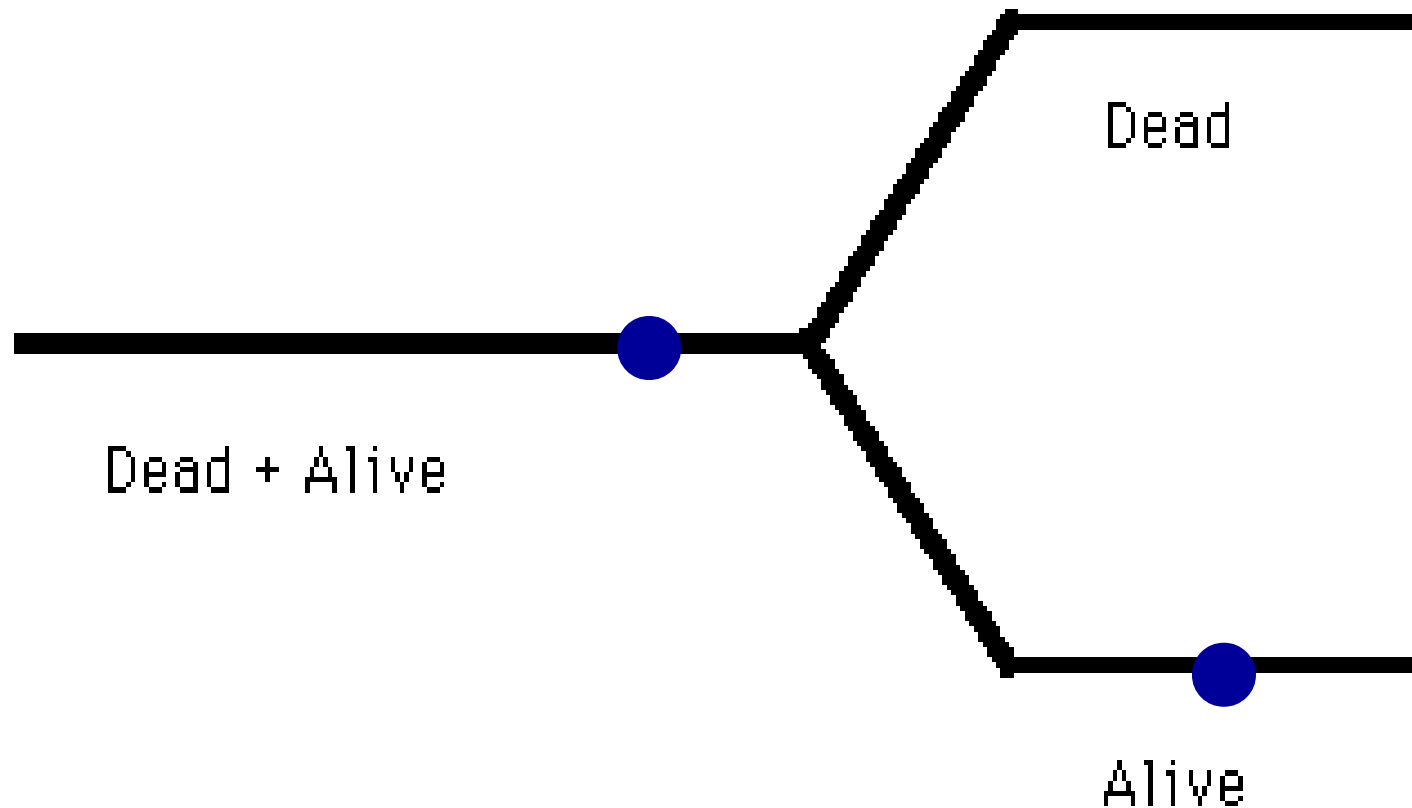
Bell in *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*

“In 1952 I saw the impossible done. It was in papers by David Bohm. ... the subjectivity of the orthodox version, the necessary reference to the ‘observer,’ could be eliminated. . . . But why then had Born not told me of this ‘pilot wave’? If only to point out what was wrong with it? Why did von Neumann not consider it? . . . Why is the pilot wave picture ignored in text books? Should it not be taught, not as the only way, but as an antidote to the prevailing complacency? To show us that vagueness, subjectivity, and indeterminism, are not forced on us by experimental facts, but by deliberate theoretical choice?” (Bell, page 160)

“I have always felt since that people who have not grasped the ideas of those papers. . . and unfortunately they remain the majority . . . are handicapped in any discussion of the meaning of quantum mechanics”. (Bell, page 173)

Problema da medida quântica:

posição do sistema no espaço de configurações
determina ramo escolhido (dependendo de X_0)

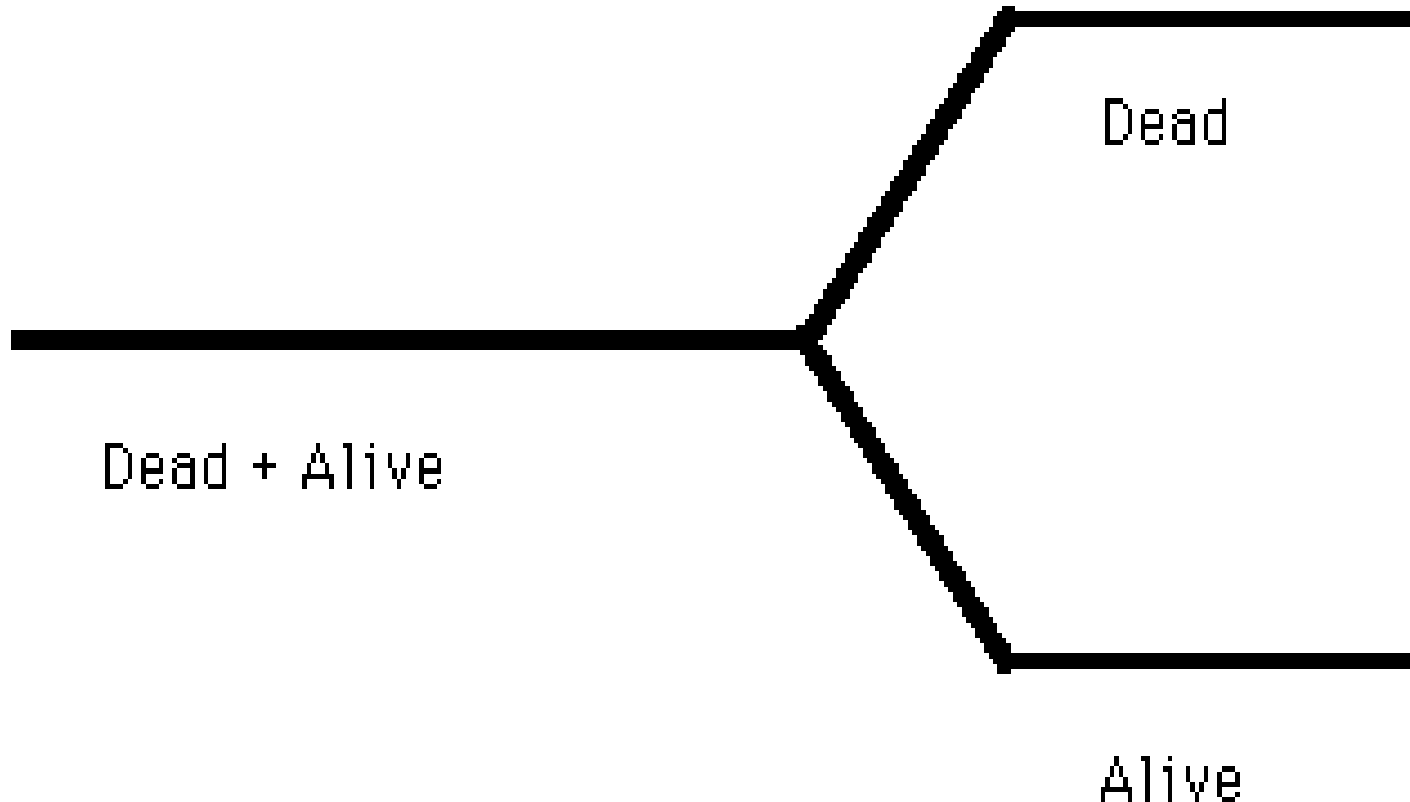


TEORIA DOS VÁRIOS MUNDOS

(Everett, DeWitt, Deutsch)

Todos os ramos se realizam mas não se percebem.

NÃO HÁ FATO ÚNICO, É APARENTE!

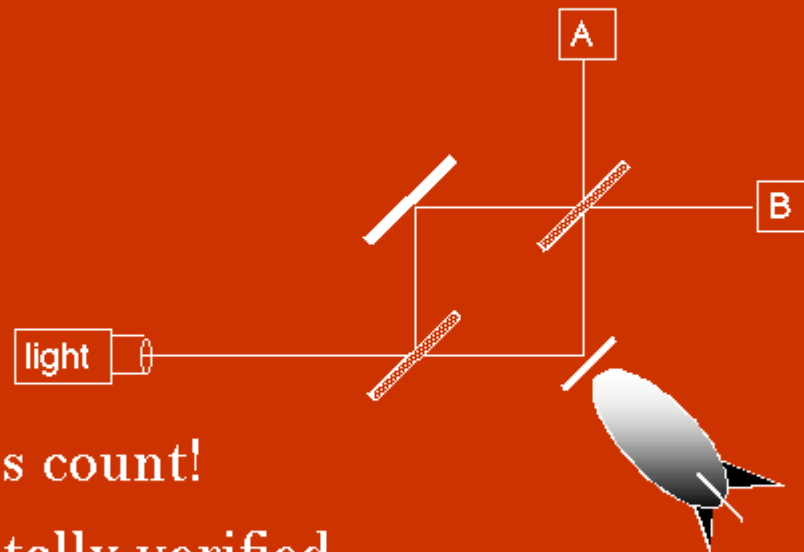


Everett: Do ponto de vista da teoria, todos os elementos de uma superposição (todos os "ramos") são "reais", nenhum mais "real" que o outro. É completamente desnecessário supor que, após uma observação, de algum modo um elemento da superposição final será selecionado para ser agraciado com uma misteriosa qualidade chamada "realidade" e condenar os outros ao esquecimento. Podemos ser mais caridosos e permitir aos outros coexistir - de toda maneira, eles não vão causar nenhum problema já que todos os elementos da superposição ("ramos") individualmente obedecem a equação de onda com total indiferença à presença ou ausência ("realidade" ou não) dos outros elementos.

MAS

não será mecânica quântica não local (sem envio de sinal)?

Elitzur-Vaidman bomb testing



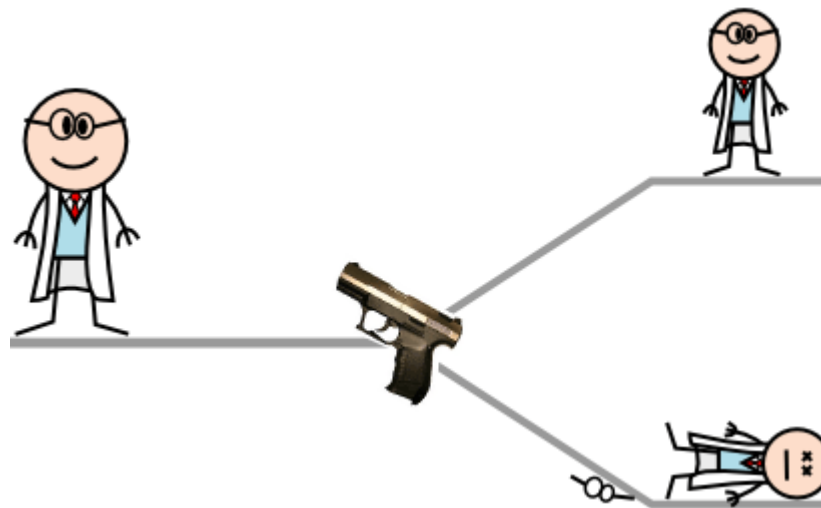
- Possibilities count!
- Experimentally verified
- Can be enhanced to reduce or eliminate bomb loss
[Kwiat, Weinfurter and Kasevich]

Nada além da evolução unitária de Schrödinger!

É a única que pode manter localidade e grupo de Lorentz no nível fundamental (num universo).

Obtenção da regra de Born controversa.

Testável: suicídio quântico!

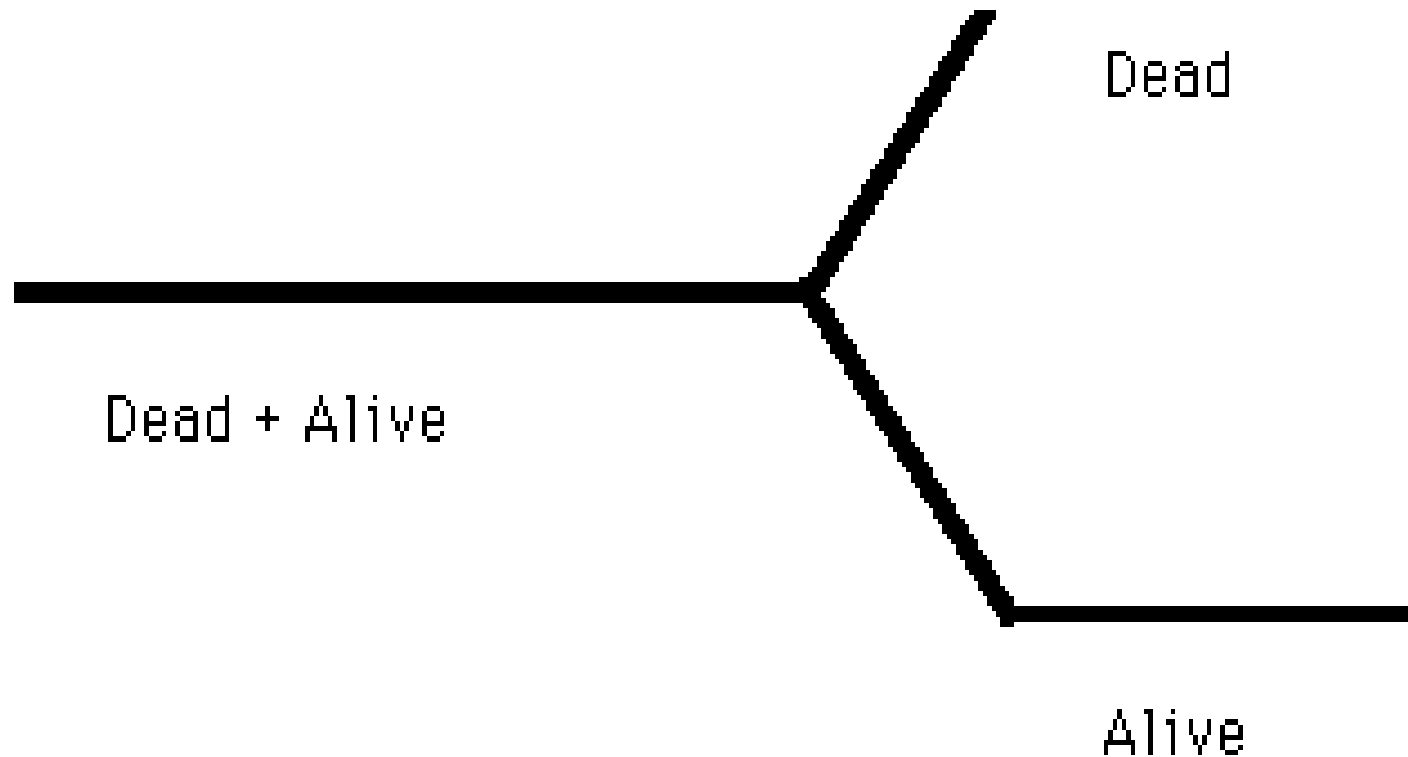


Rosenfeld: “Falando sobre Everett, nem eu nem mesmo Niels Bohr poderíamos ter a mínima paciência com ele quando nos visitou há mais de 12 anos atrás para vender as ideias desesperançosamente erradas que ele havia sido encorajado, muito imprudentemente, por Wheeler para desenvolver. Ele era indescritivelmente estúpido e não conseguia entender as coisas mais simples em mecânica quântica.”

COLAPSO ESPONTÂNEO

(Pearle, Ghirardi, Rimini, Weber, Penrose)

Evolução não linear suplementar à de Schrödinger.



$$\Psi(x) \rightarrow \Psi_L(x) = L_y(x)\Psi(x). \quad L_y(x) = N \exp[-(x-y)^2/(2\alpha^2)]$$

Consideremos uma partícula quântica num estado de superposição $\Psi(x) = \Psi_A(x) + \Psi_B(x)$, onde $\Psi_A(x)$ e $\Psi_B(x)$ são pacotes localizados em torno das posições x_A e x_B , respectivamente, com $|x_B - x_A| \gg \alpha$. Como a densidade de probabilidade de localização é dada pela equação (7.9), ela deve acontecer nas regiões onde $\Psi(x)$ tem maior amplitude, ou seja, nas regiões em torno de x_A ou x_B . Neste caso, a transição (7.7) eliminará um dos pacotes, com maior probabilidade de uma localização em torno do pacote com maior amplitude.

escolha de GRW compatível com os experimentos até hoje realizados são

$$\alpha = 10^{-5} \text{cm e } \nu = 10^{-16} \text{Hz.} \quad \mathbf{7.12}$$

Assim, um único elétron sofre um processo de localização espontânea, em média, a cada 100 milhões de anos. No caso de um sistema macroscópico, com aproximadamente 10^{24} partículas (número de Avogadro), em cada segundo este processo deve acontecer com $10^{24}\nu = 10^8$ partículas, causando a localização do objeto em um intervalo de tempo médio da ordem de 10^{-8} s. Assim, objetos macroscópicos, como o gato de Schrödinger ou o ponteiro de algum instrumento, colapsam muito rapidamente enquanto uma partícula quântica pode permanecer num estado de superposição quântica, e manifestar fenômenos de interferência por um período de tempo bastante longo.

Outras possibilidades: interpretações

**a) Histórias consistentes
(Griffths, Omnès, Gell-Mann, Hartle).**

**b) Formulação de dois estados (Aharanov);
valores fracos.**

c) Envariância, Darwinismo quântico (Zurek).



COSMOLOGIA QUÂNTICA

O PROBLEMA DA INTERPRETAÇÃO

Interpretação de Copenhague:

Os fatos concretos acontecem com a intervenção do mundo clássico.

Se o universo é quantizado, onde está o aparelho clássico que realiza o colapso da função de onda?

INCOMPATÍVEL COM A COSMOLOGIA QUÂNTICA

THE WAVE FUNCTION OF THE UNIVERSE

Hamiltoniana: $H(h, \pi_h, \varphi, \pi_\varphi)$

$$\begin{aligned}\dot{h} &= \delta H / \delta \pi_h & \dot{\varphi} &= \delta H / \delta \pi_\varphi \\ \dot{\pi}_h &= - \delta H / \delta h & \dot{\pi}_\varphi &= - \delta H / \delta \varphi\end{aligned}$$

Dirac quantization

$$\hat{H} \Psi = 0$$

Wheeler-DeWitt equation

De Broglie – Bohm theory

$$\pi_h \sim \dot{h} = \delta S / \delta h$$

$$\pi_\varphi \sim \dot{\varphi} = \delta S / \delta \varphi$$

THE WAVE FUNCTION OF THE UNIVERSE IS NOMOLOGICAL (LAW-LIKE)! Goldstein, Zanghi

- **It is not about probabilities!**

- Quite sensible, as you are talking about a single system.
- No need to seek for a probability measure.
- It is natural that the equation for the wave function of the Universe does not involve time.
- Need of boundary conditions.

Probabilities: arise in subsystems contained in the universe.

Conditional wave functions: let us take $\psi(\varphi_1, \varphi_2)$

Suppose one gets the Bohmian trajectory for $\varphi_1 \rightarrow \varphi_1(t)$.

Then we can define $\psi_c(t, \varphi_2) \equiv \psi(\varphi_1(t), \varphi_2)$

Under certain conditions the original equation for ψ becomes a
Schroedinger equation for ψ_c

In this situation, quantum equilibrium arises and one
can understand $|\psi_c|^2$ as a probability measure.

Cosmologia Quântica com de Broglie-Bohm

Universo primordial: dominado por radiação e partículas ultra-relativísticas; $p = p/3$ Solução clássica: fator de escala se comporta como uma partícula livre no tempo conforme: $a = \eta \leftrightarrow a = t^{1/2}$ (solução clássica) $\eta = \int dt/a$

AÇÃO QUE GERA SOLUÇÃO COSMOLÓGICA COM RADIAÇÃO

$$S = \int d\eta (pa' - p^2/4). \quad I(t) = \Delta r a(t)$$

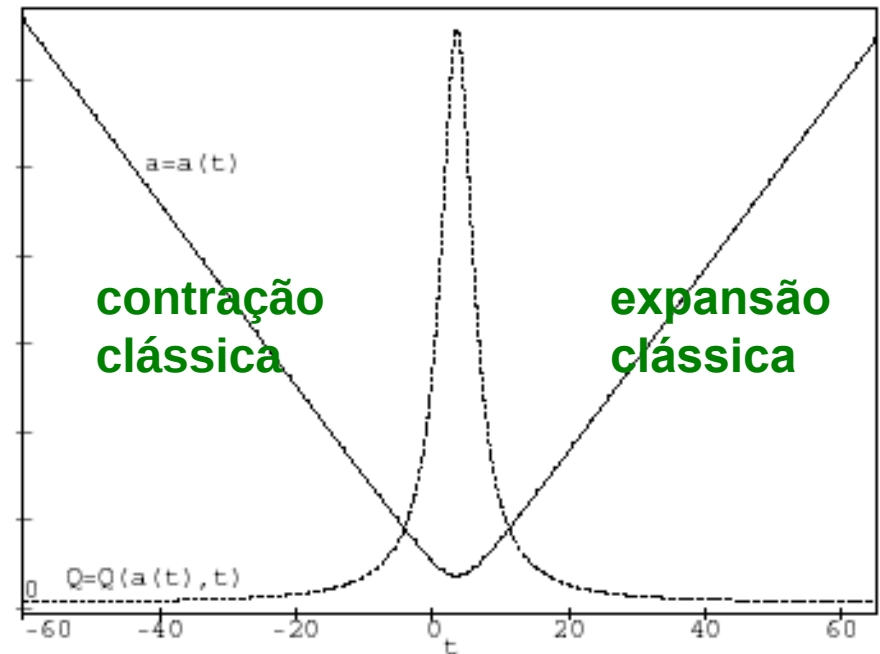
Equação de Schrödinger:

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} = - \frac{\partial^2 \Psi}{4 \partial a^2}.$$

$$\Psi_{(0)}(a, \eta) = \left[\frac{8\eta_0}{\pi(\eta^2 + \eta_0^2)} \right]^{1/4} \exp \left[\frac{-\eta_0 a^2}{(\eta^2 + \eta_0^2)} \right] \exp \left\{ -i \left[\frac{\eta a^2}{(\eta^2 + \eta_0^2)} + \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\eta_0}{\eta} \right) - \frac{\pi}{4} \right] \right\} \quad (5)$$

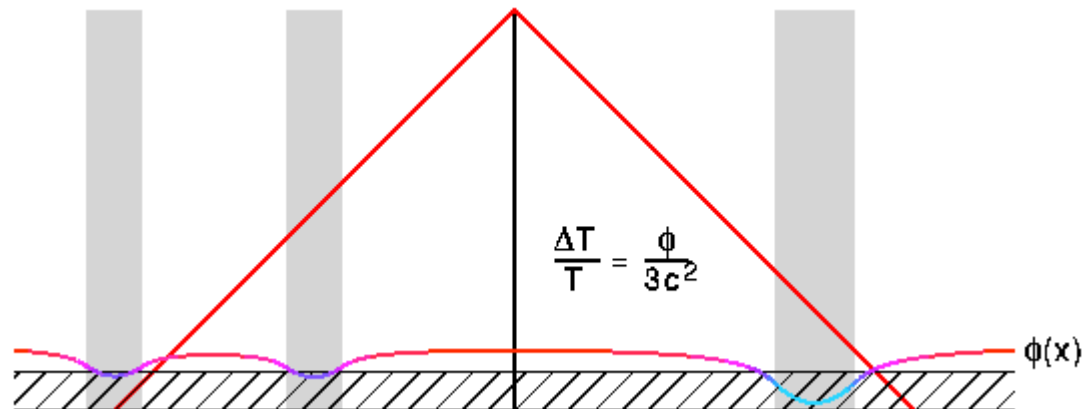
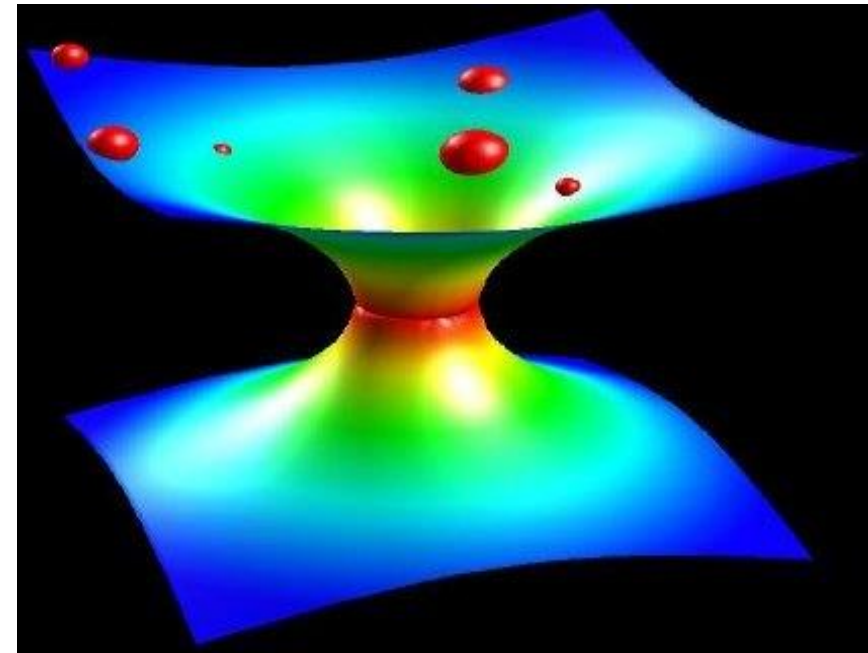
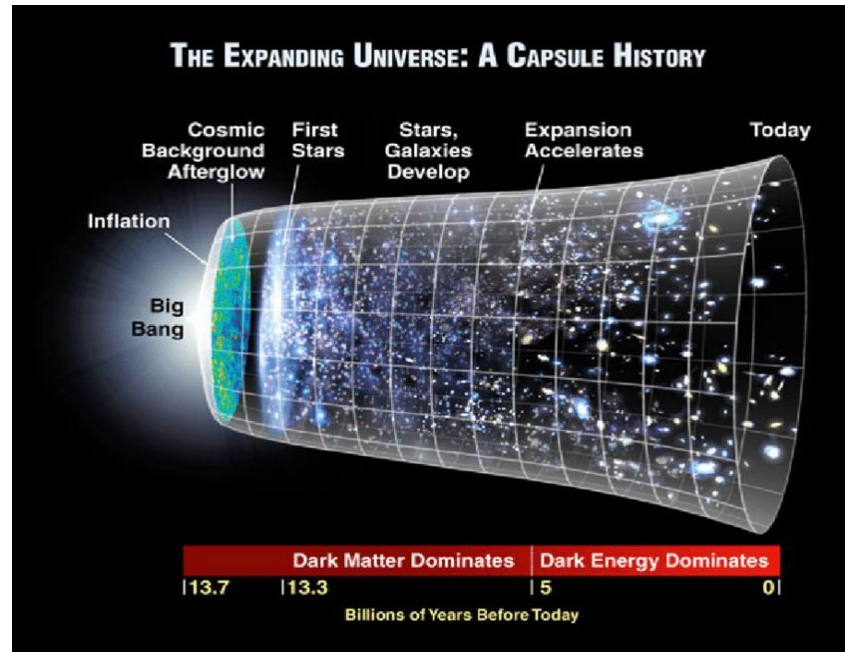
$$p_a = 2 \, da/d\eta = \partial S / \partial a$$

$$a(\eta) = a_b [(\eta/\eta_0)^2 + 1]^{1/2}$$

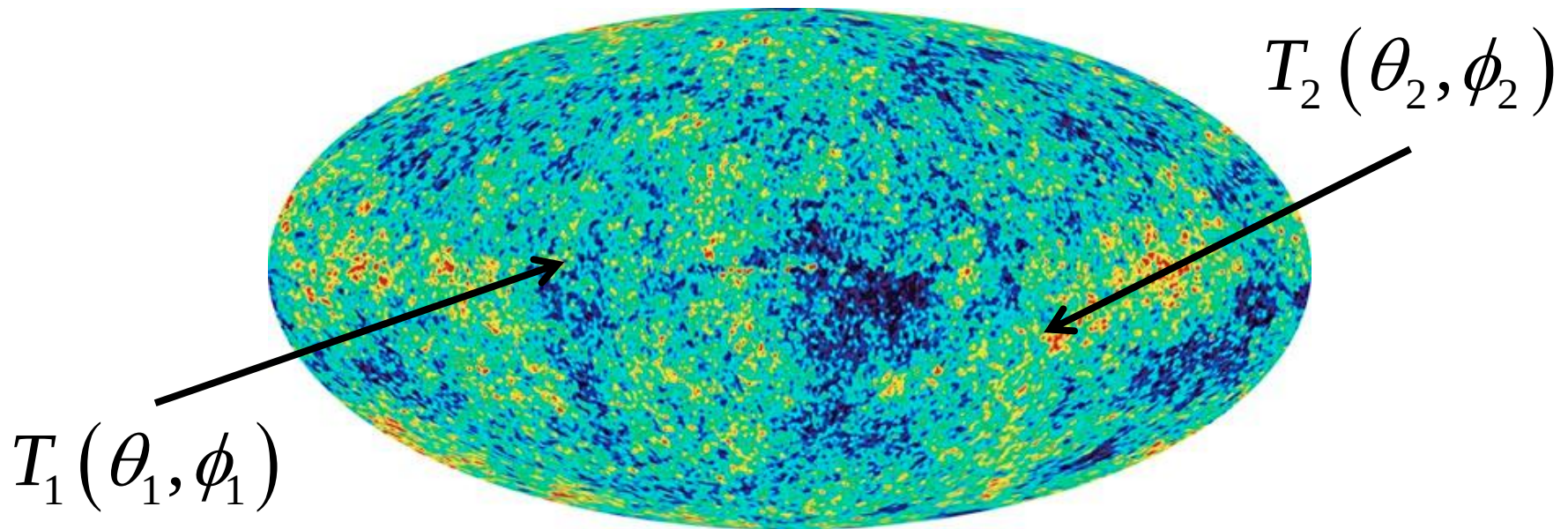


**RICOCHETE
QUÂNTICO**

Não vivemos num universo perfeitamente homogêneo e isotrópico → existem estruturas. **Suas sementes deixaram marcas na temperatura da radiação de fundo.**



Flutuações de Temperatura da Radiação Cósmica de Fundo

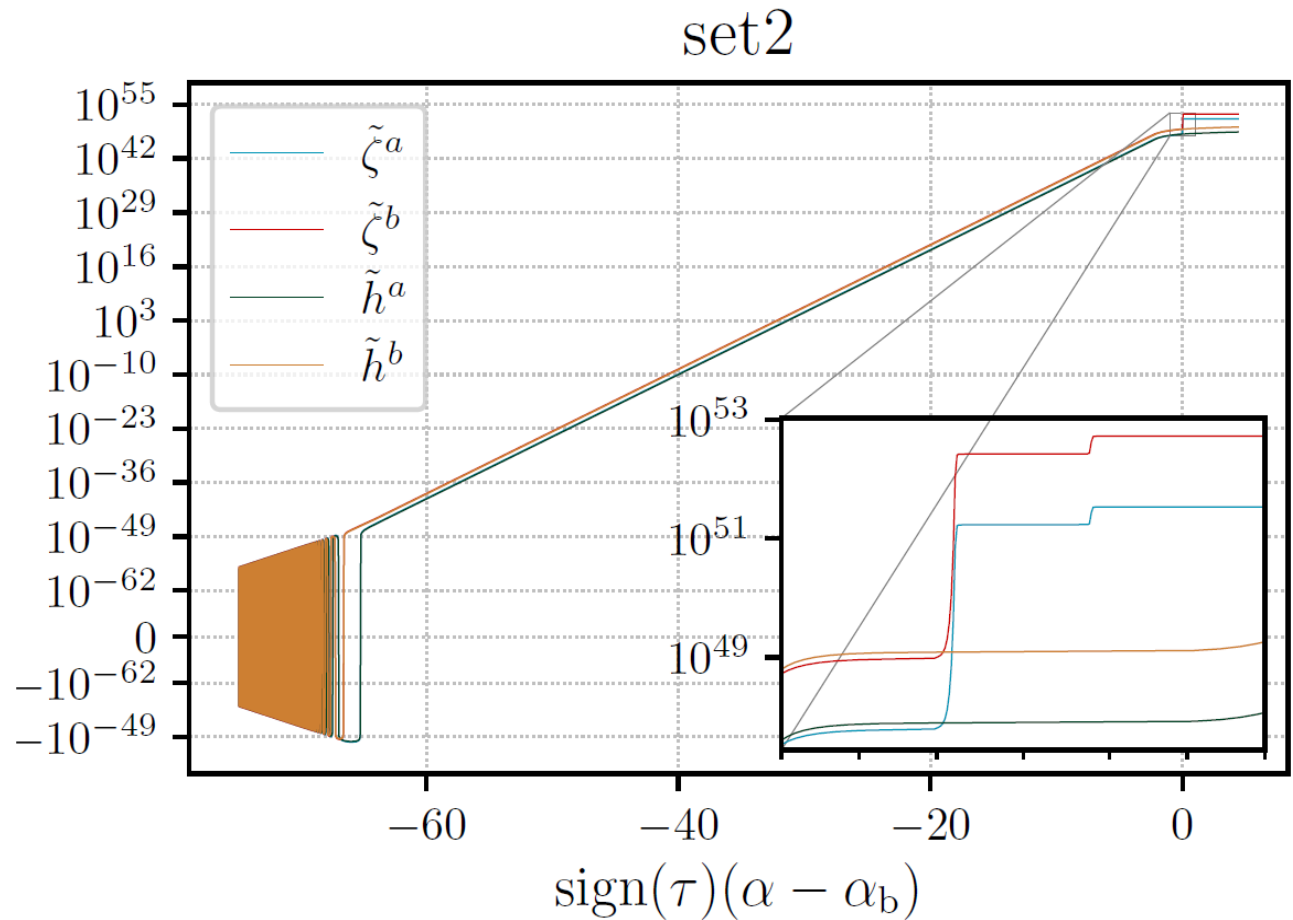


$$\delta T(\theta, \phi) = T(\theta, \phi) - T_0$$

$$\frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-5}$$

**ζ : pequenas
perturbações na
densidade de
energia.
Proporcional a
 $\delta T/T$**

**h : ondas
gravitacionais
primordiais**



- Perturbações na densidade de energia amplificadas em relação às ondas gravitacionais primordiais devido aos efeitos quânticos.
- Amplitudes devem ser multiplicadas pela razão entre o comprimento de Planck e o raio do Universo observado hoje: $10^{-60} \rightarrow \zeta \sim 10^{-5}$
- Anna Paula Bacalhau, Sandro Vitenti, NPN: Phys.Rev.D98, 083517 (2018)

Quantum theory helping cosmology ...

cosmology helping quantum theory:

Consequences for quantum theory:

One instance where one quantum theory (BDB) yields observational results which are not known how to be obtained in others.

-- Relatividade geral básica e mecânica quântica segundo dBB fornecem um modelo cosmológico coerente que pode explicar a origem das estruturas e novos efeitos na radiação de fundo.

Teoria quântica $\Leftrightarrow$ Cosmologia

CONCLUSÃO

-- A teoria quântica ainda está em construção → várias alternativas, entre teorias (dBB, VM, CE...) e interpretações (C, HC, FDE, EQD,...)

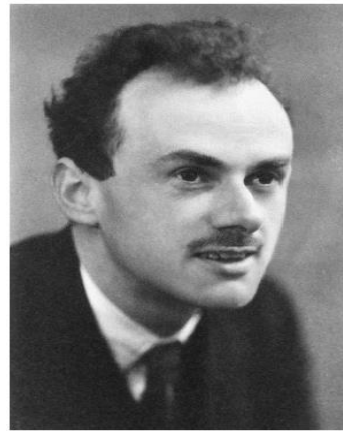
-- Apesar da enorme resistência, viu-se que a interpretação de Copenhaguen contém imprecisões e limitações que sugerem aperfeiçoamentos e/ou mudanças.

-- Novos experimentos:
valores fracos, descoerência e emaranhamento, não localidade...

-- Novos resultados: VM em computação quântica, FDE em super-oscilações, dBB em cosmologia quântica.

-- Um doutor em física tem que estar a par destas discussões sobre algo tão fundamental quanto a mecânica quântica.

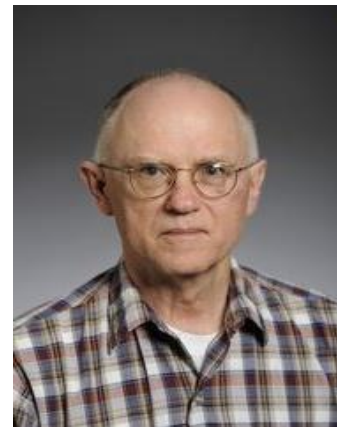
-- Esta é a mecânica quântica do séc. XXI, maioria dos livros-textos falam da mecânica quântica da metade do séc. XX: bons para a graduação mas insuficientes para um curso de pós-graduação.



Bohr
Heisenberg
De Broglie
Einstein
Schrödinger



Bohm
Dirac
Everett
Bell



Zeh
Pearle
Griffiths

"To try to stop all attempts to pass beyond the present viewpoint of quantum physics could be very dangerous for the progress of science and would furthermore be contrary to the lessons we may learn from the history of science. This teaches us, in effect, that the actual state of our knowledge is always provisional and that there must be, beyond what is actually known, immense new regions to discover."

Louis de Broglie