

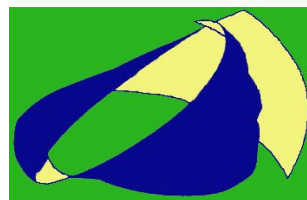
COLÓQUIO INTERINSTITUCIONAL
CBPF, novembro de 2012

Teorias e Interpretações da
Mecânica Quântica

Nelson Pinto Neto

CBPF

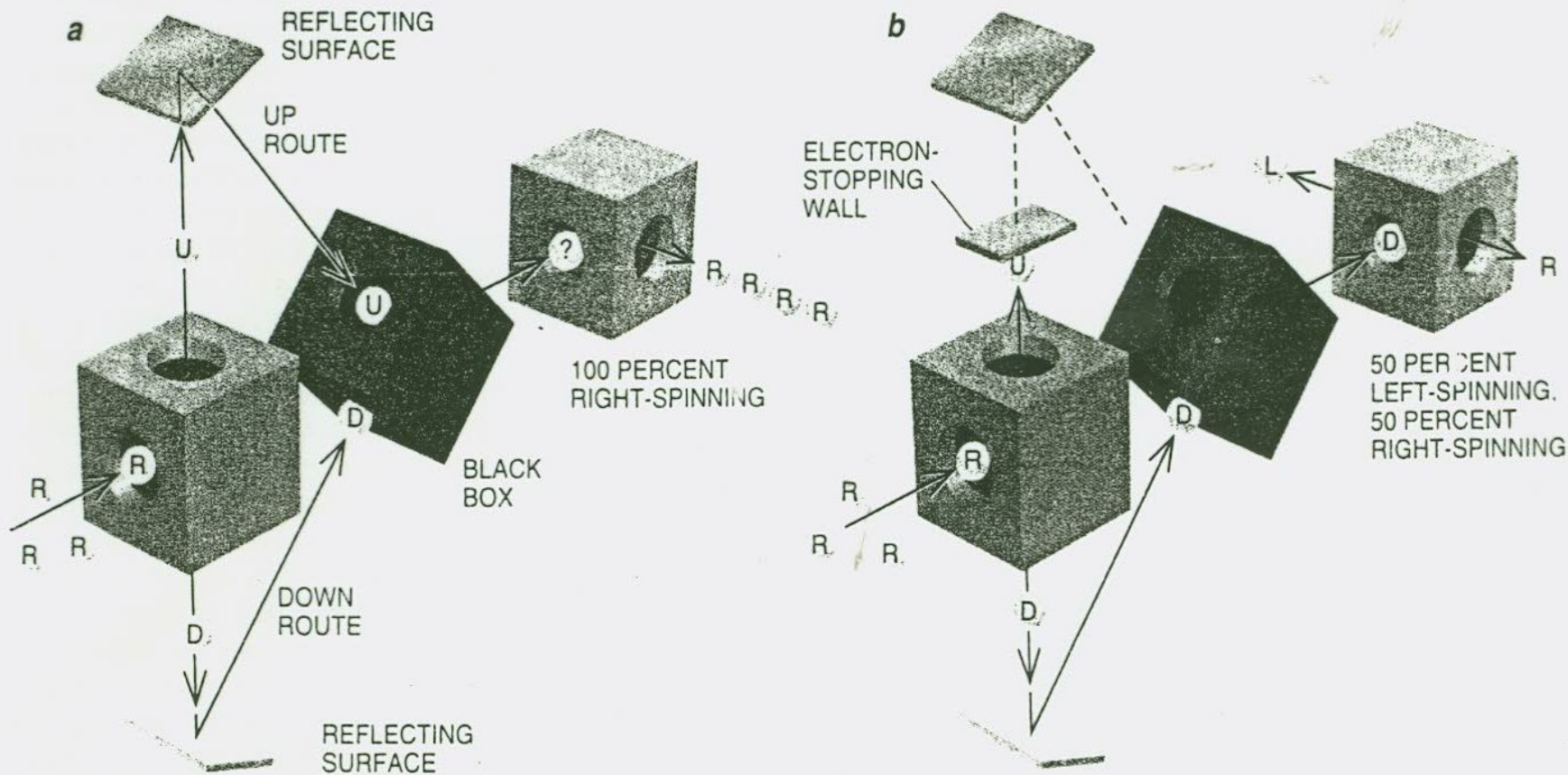
ICRA



TÓPICOS

- 1) Os fenômenos quânticos.
- 2) A interpretação de Copenhaguen.
- 3) O problema da medida quântica e descoerência.
- 4) O argumento EPR.
- 5) Estados emaranhados, não localidade e desigualdades de Bell
- 6) A teoria de de Broglie-Bohm.
- 7) A teoria de vários mundos.
- 8) Localização espontânea.
- 9) Outras interpretações.
- 10) Cosmologia e teoria quântica.
- 11) Conclusões.

INTERFERÊNCIA



Por onde passou o elétron?

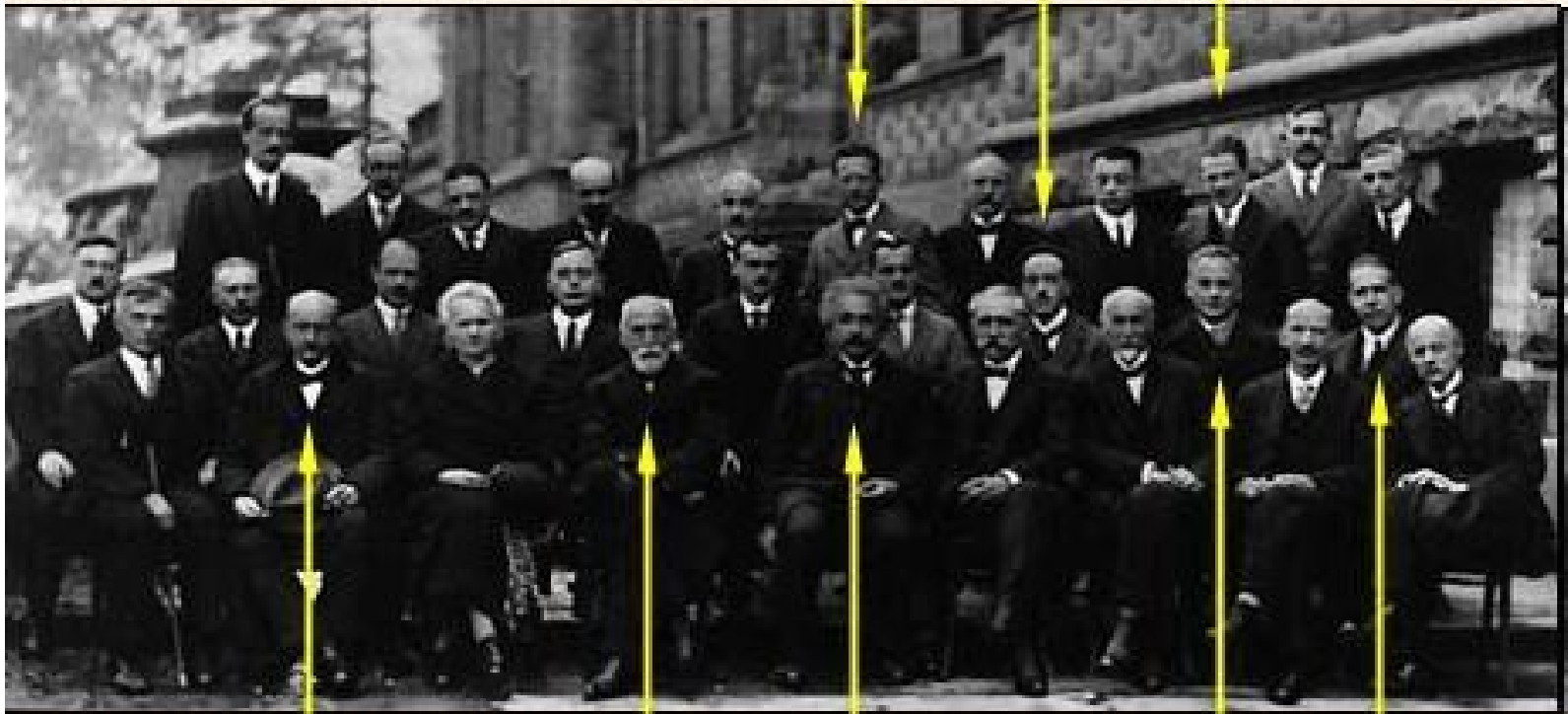
- a) Se passou por um dos dois caminhos não teríamos interferência!
- b) Passou pelos dois? Mas se colocarmos dois detetores um em cada caminho, só um deles registra a passagem do elétron!
- c) Não passou por nenhum? Mas se bloquearmos os dois caminhos, nada é registrado!

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 Copenhaguen

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

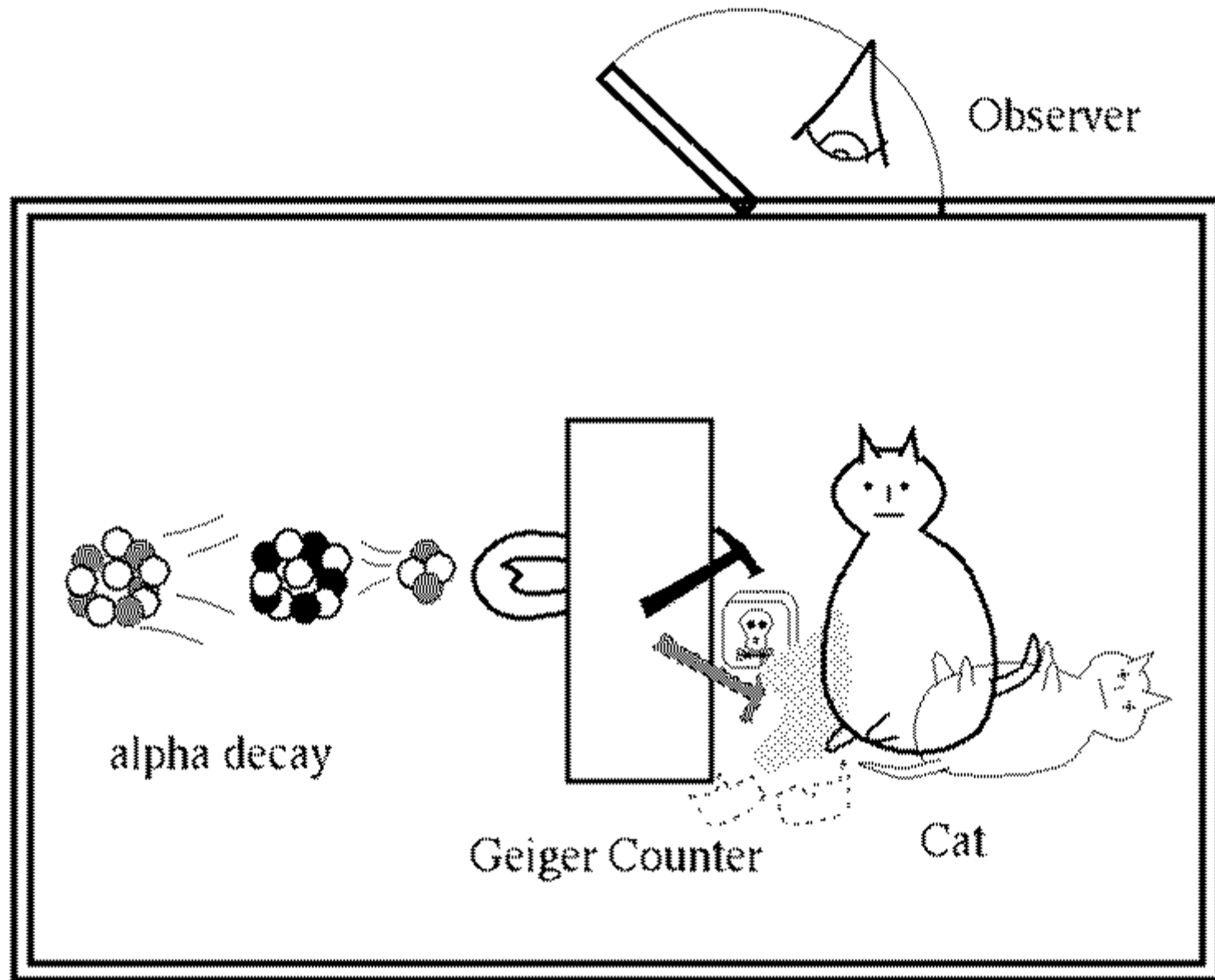
A função de onda satisfaz a equação de Schrödinger:

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

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?

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



Bohr: COMPLEMENTARIDADE



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

$$H_I = -\lambda(t) \mathbf{S} \otimes \mathbf{P} : |s\rangle \otimes |x, e\rangle \rightarrow |s\rangle \otimes |x + \lambda s, e_s\rangle$$

$$\rightarrow \left(\sum_s c_s |s\rangle \right) \otimes |x, e\rangle \rightarrow \sum_s c_s |s\rangle \otimes |x + \lambda s, e_s\rangle$$

Descoerência \rightarrow matriz densidade reduzida:

Traço sobre graus de liberdade do ambiente \rightarrow

Termos de interferência são quase completamente destruídos

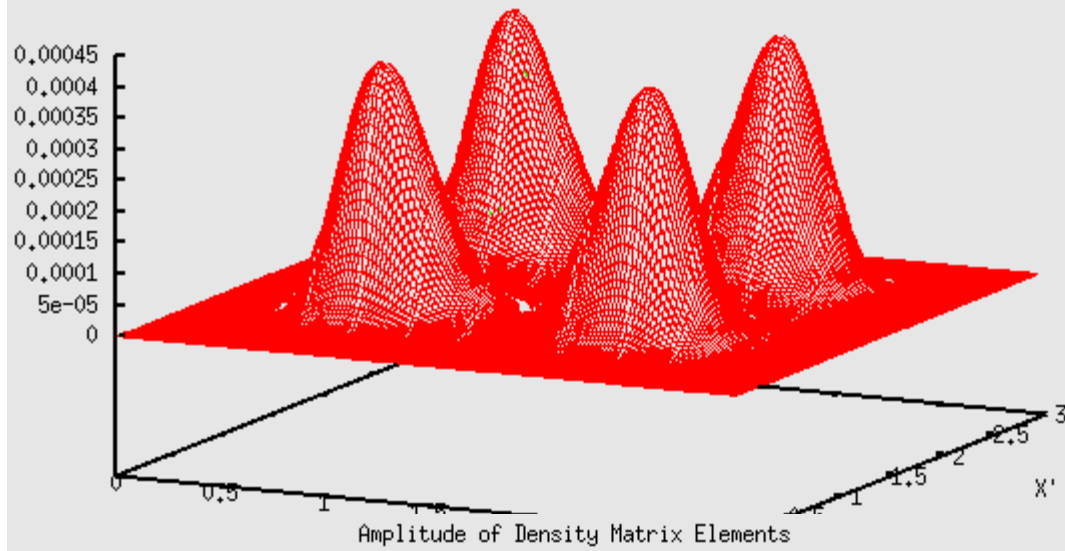
Medida quântica: função de onda do aparelho

+ sistema medida se bifurca:

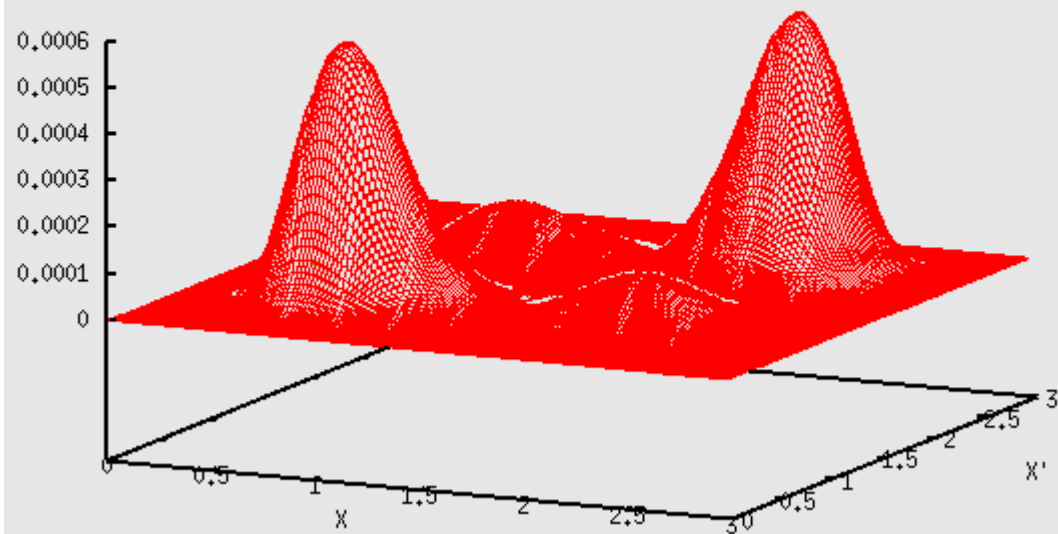
1 ramo apenas é observado.

Amplitude of Density Matrix Elements

t=2.5

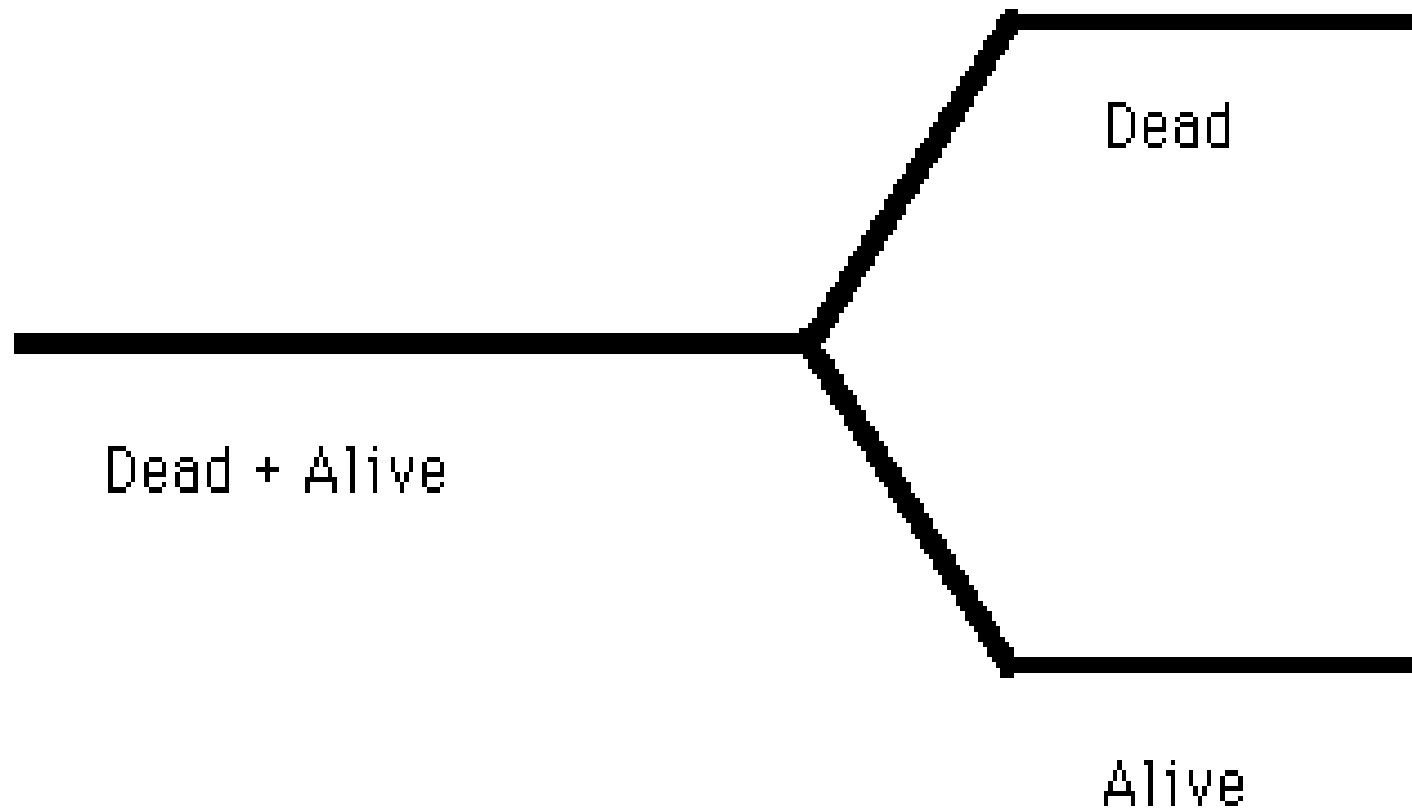


t=2.5

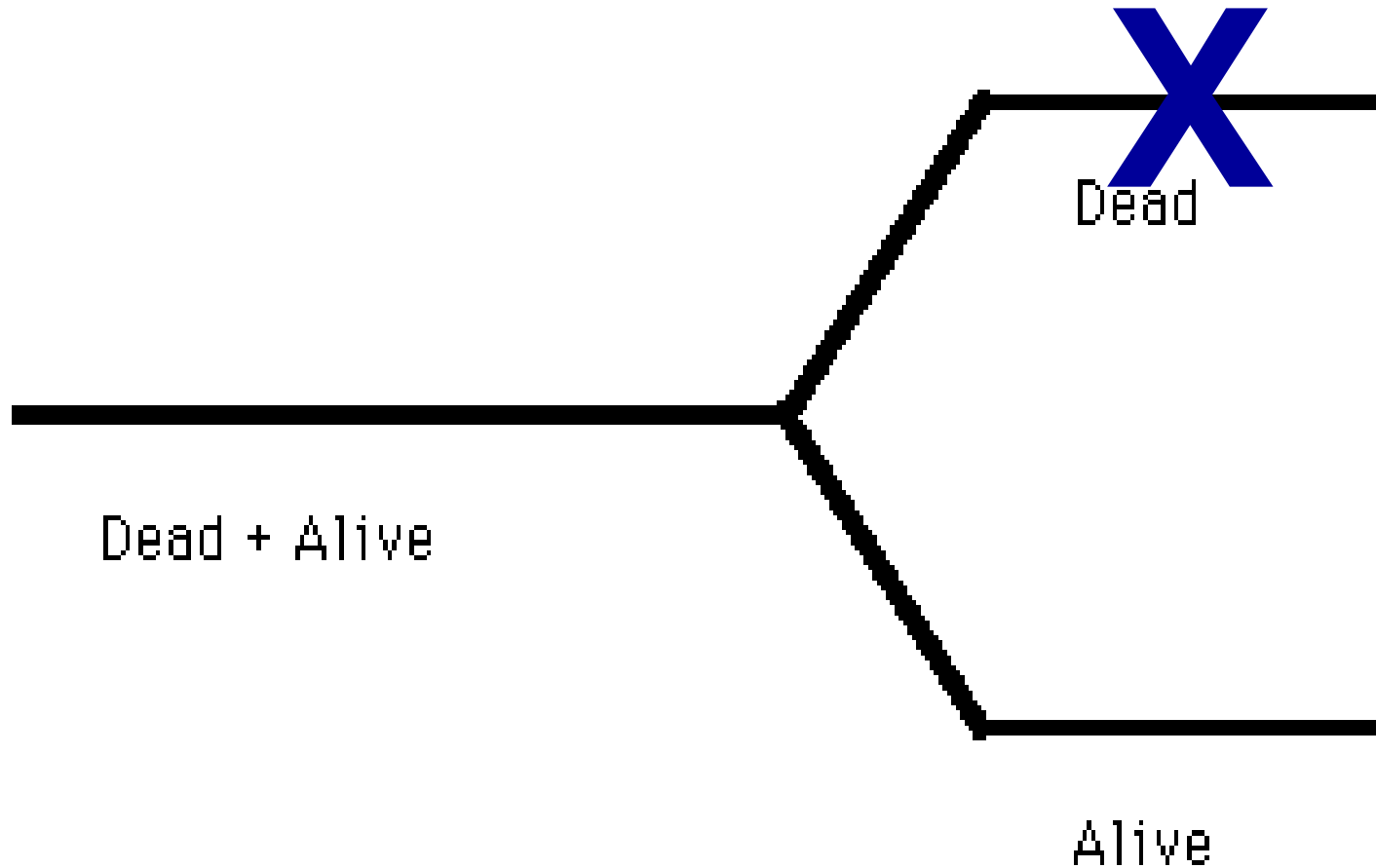


Descoerência: explica não vermos superposição de estados macroscópicos e/ou do ponteiro de medida.

MAS NÃO EXPLICA 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".

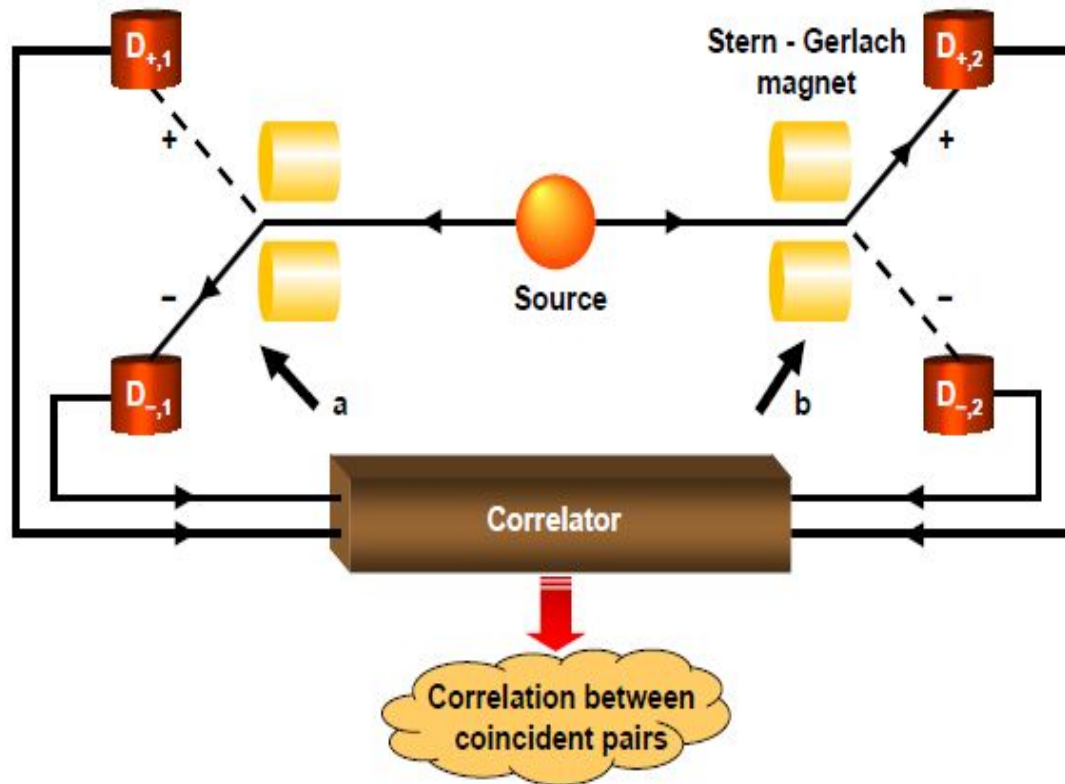
Albert Einstein



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:

1 2 3
sim não não
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: $p \leq 5/9$

**Hipóteses: sem telepatia (localidade)
combinação escondida (realidade)**

**Se Ana e João usarem partículas quânticas vindas de decaimento;
carta 1, z ; carta 2, $\theta = 60$; carta 3, $\theta = 120$ + sim; - não**

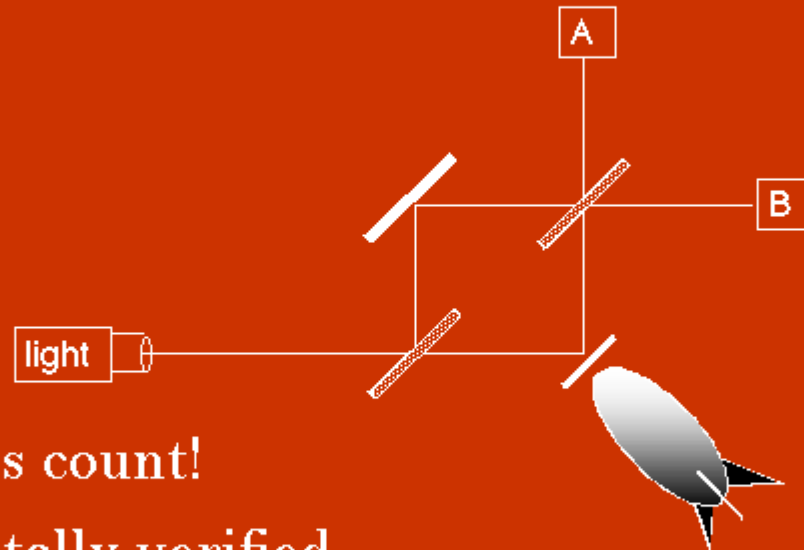
$$p = 1/2 < 5/9 !!$$

**Aspect mostrou em experimento violação da desigualdade:
ou realidade contra-factual ou localidade caem**

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 Xs 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.

À maneira de de Broglie

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

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

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

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

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

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

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

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

Born rule deduced, not postulated

PROPRIEDADES

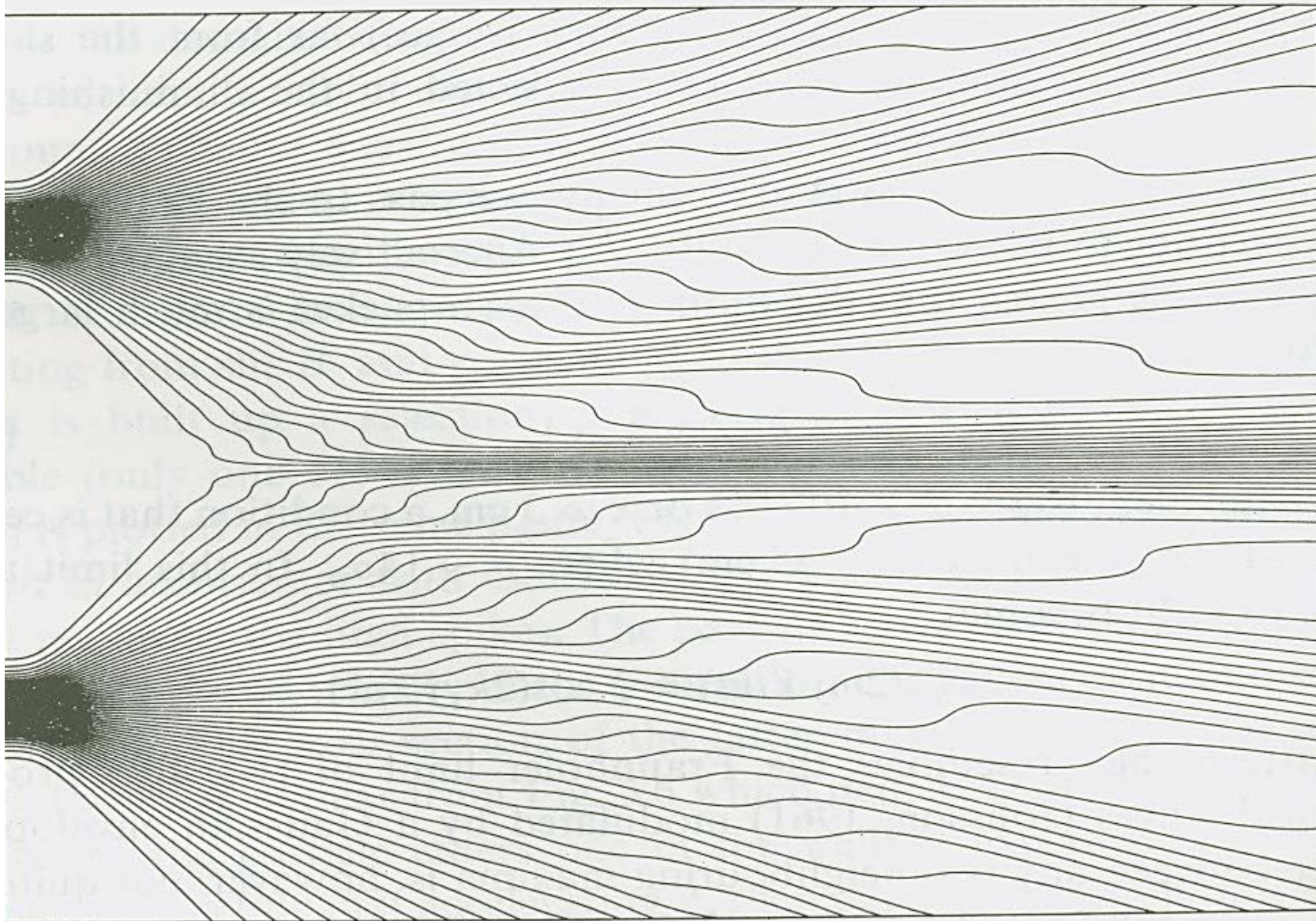
a) Q é não local e altamente dependente de contexto!

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*



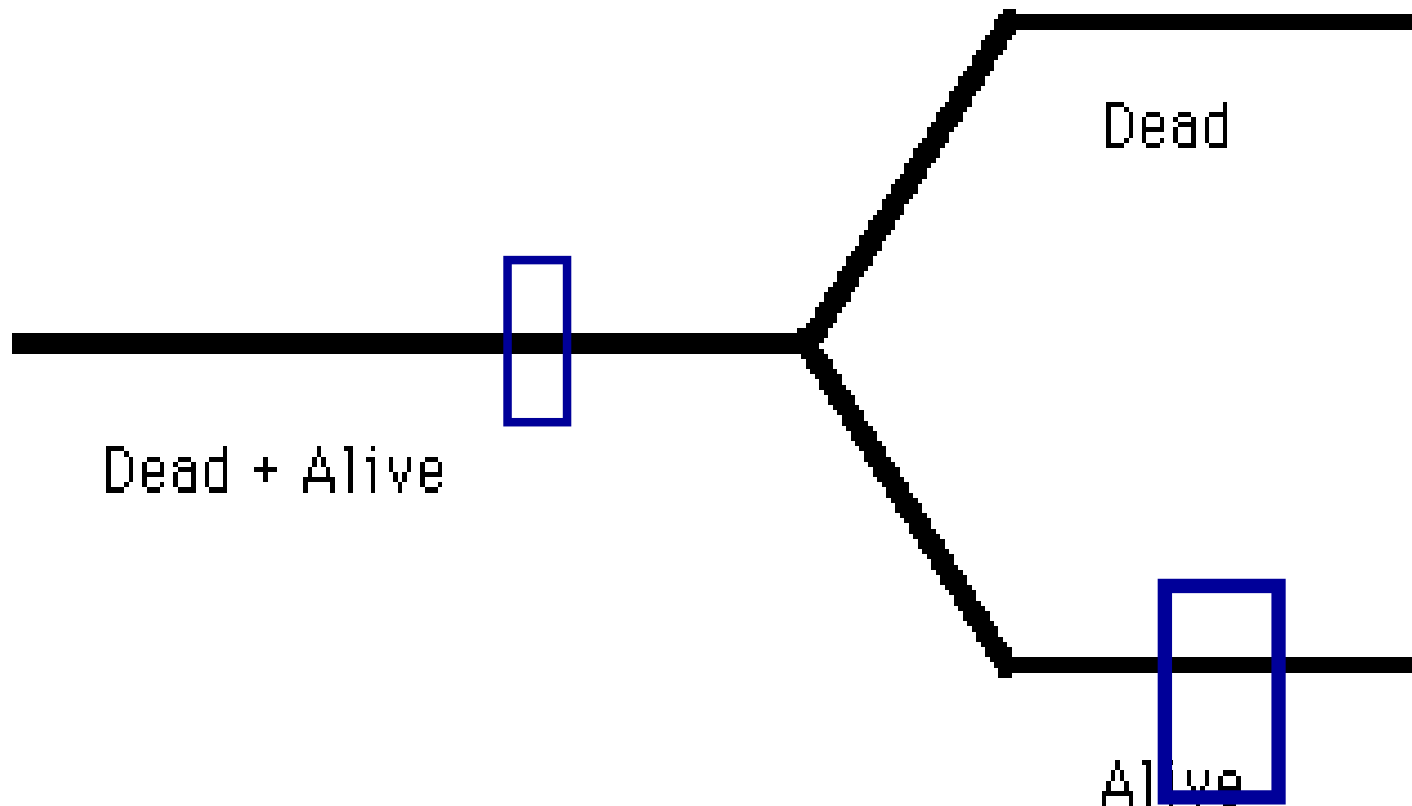
Bell in *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*

“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)

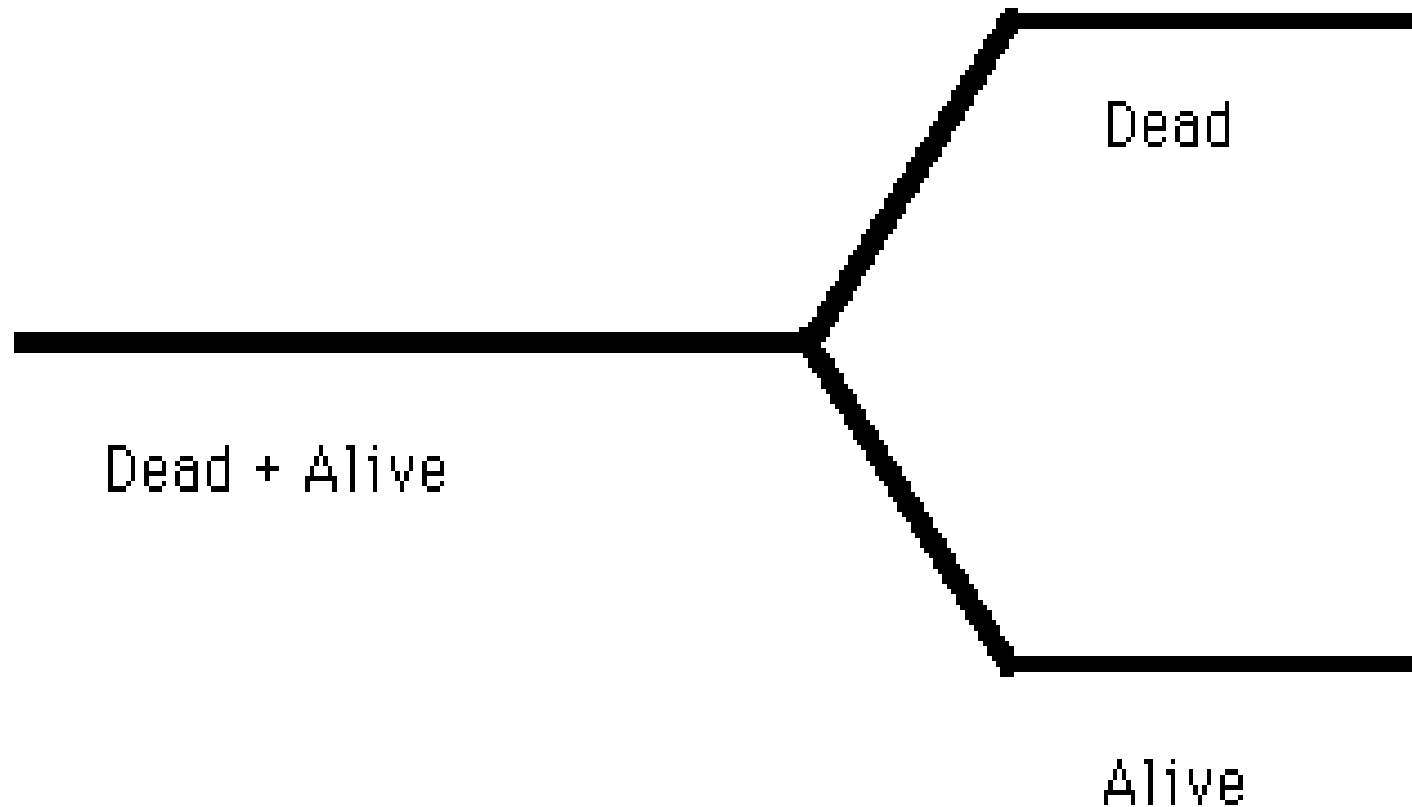


TEORIA DOS VÁRIOS MUNDOS

(Everett, DeWitt, Deutsch)

Todos os ramos se realizam mas não se percebem.

NÃO HÁ FATO ÚNICO, É APARENTE!

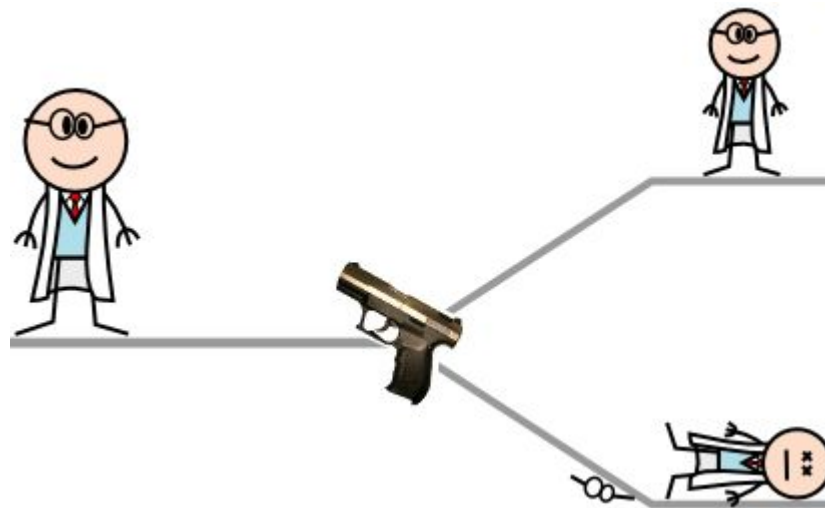


Nada além da evolução unitária de Schrödinger!

É a única que pode manter localidade e grupo de Lorentz no nível fundamental.

Obtenção da regra de Born controversa.

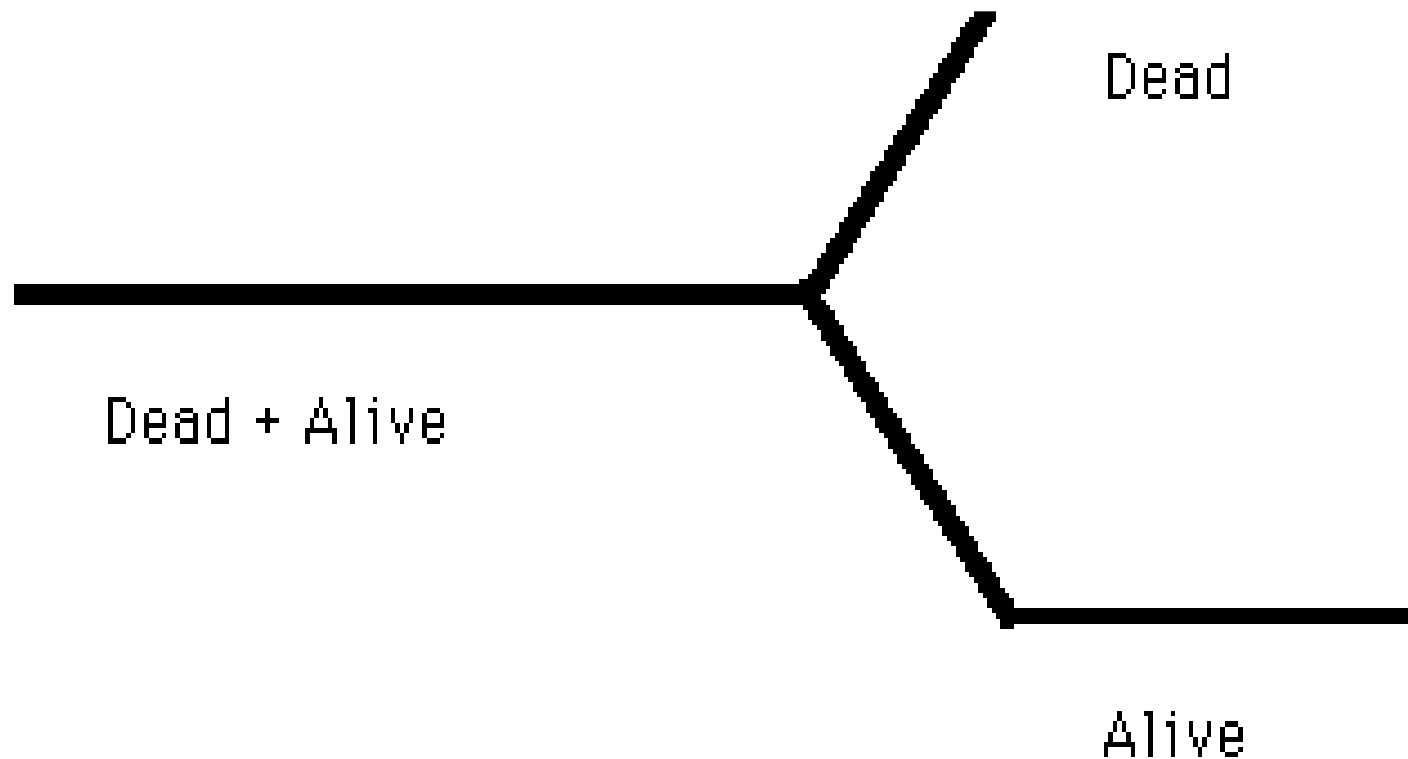
Testável: suicídio quântico!



COLAPSO ESPONTÂNEO

(Pearle, Ghirardi, Rimini, Weber, Penrose)

Evolução não linear suplementar à de Schrödinger.



Outras possibilidades: interpretações

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

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

c) Envariância, Darwinismo quântico (Zurek).



COSMOLOGY

Homogeneous and isotropic spacelike hypersurfaces evolving in time

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) (dx^2 + dy^2 + dz^2) ; \quad dl = a(t) dx$$

Friedmann equations from Einstein equations $G = T$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \sum \rho_i - \frac{K}{a^2} \qquad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3P)$$

Classical solution for radiation and relativistic matter:

$$P = \rho/3 \quad a = \eta \quad dt = a d\eta$$

like a free particle when written in conformal time

The problem: the initial singularity

- All Friedmann models contain one.
- A point where no physics is possible.
- General Relativity indicates its own limits:
what really happens when we approach the singularity?
- New physics!

□ **The Universe is a physical system:**

a theory (GR), predictions (expansion, cosmic background radiation with anisotropies, abundance of light elements, etc), observations.

□ **The characteristic size of the Universe in the past was smaller than an atomic nucleus!**

EXISTENCE OF AN INITIAL SINGULARITY!

□ **Need of a theory of initial conditions:**

We do not control the Universe: dynamics is not sufficient for cosmology.

Our universe is very special!

COSMOLOGIA QUÂNTICA

O PROBLEMA DA INTERPRETAÇÃO

Interpretação de Copenhaguen:

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

Pode-se usar alternativas □ usaremos de Broglie-Bohm

AÇÃO QUE GERA SOLUÇÃO COSMOLÓGICA COM RADIAÇÃO

$$S = \int d\eta (pa' - p^2/4).$$

Como uma partícula livre no tempo conforme:

$$a = \eta \quad \square \quad a = t^{1/2} \text{ (solução clássica)}$$

Equação de Schrödinger:

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

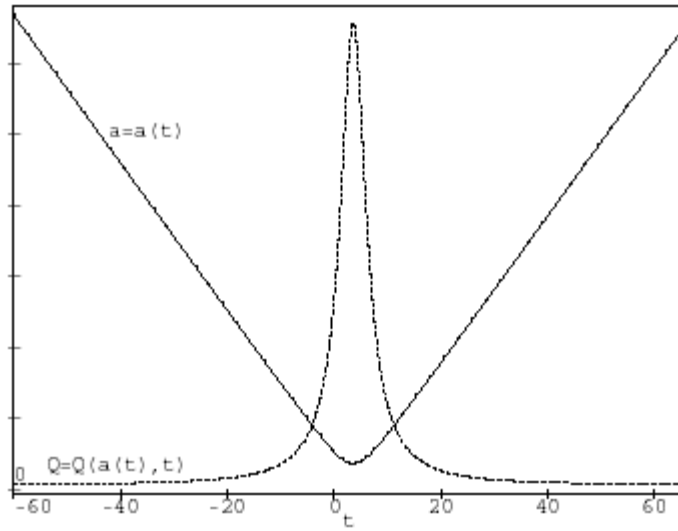
Initial condition: gaussian

$$\Psi_{(0)}^{(\text{init})}(a) = \left(\frac{8}{\eta_0 \pi} \right)^{1/4} \exp\left(-\frac{a^2}{\eta_0} \right),$$

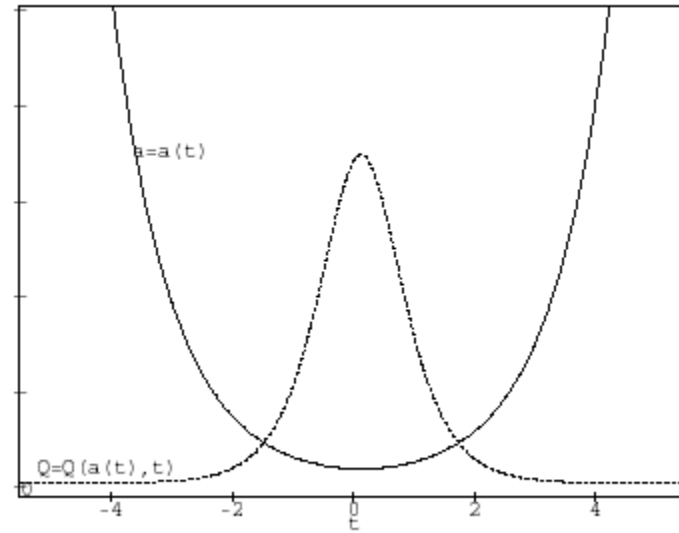
$$\Psi_{(0)}(a, \eta) = \left[\frac{8\eta_0}{\pi(\eta^2 + \eta_0^2)} \right]^{1/4} \exp\left[\frac{-\eta_0 a^2}{(\eta^2 + \eta_0^2)} \right] \exp\left\{ -i \left[\frac{\eta a^2}{(\eta^2 + \eta_0^2)} + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\eta_0}{\eta} \right) - \frac{\pi}{4} \right] \right\}$$

Bohmian quantum trajectory: $\mathbf{p}_a = 2 \, da/d\eta = \partial S/\partial a$

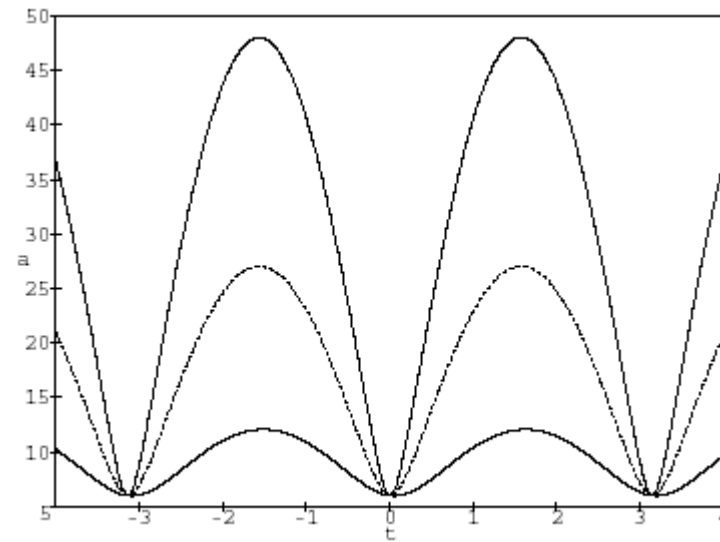
$$a(\eta) = a_0 \left[\left(\frac{\eta}{\eta_0} \right)^2 + 1 \right]^{1/2}$$



$k = 0$

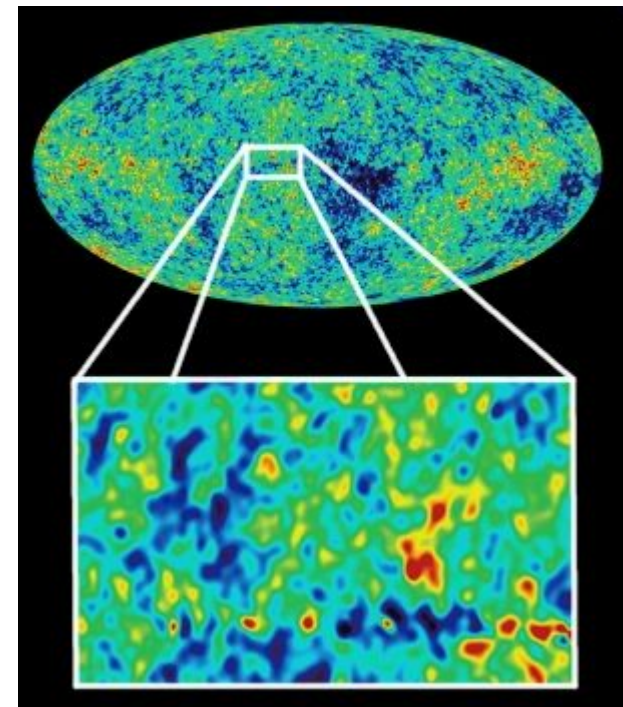
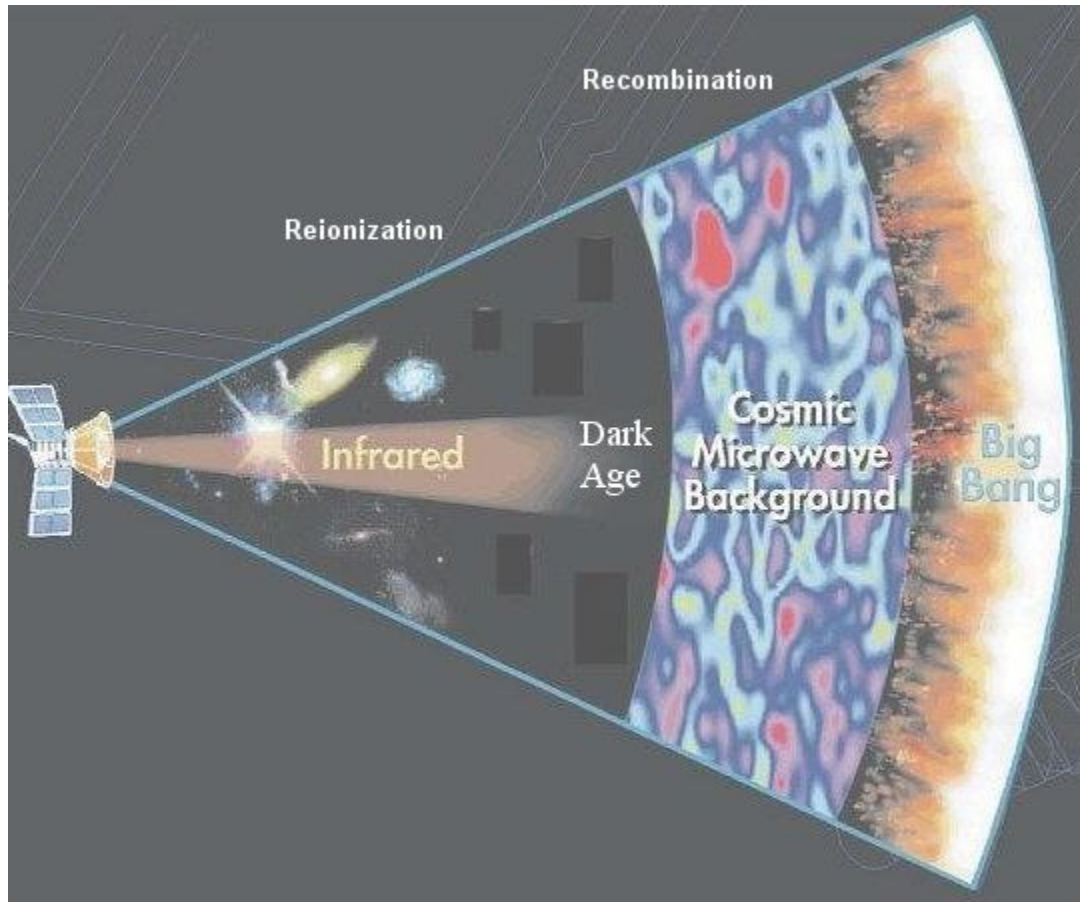


$k = -1$



$k = 1$

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



Perturbations

Unitary transformation: $U [a(\square), v(\mathbf{x}), \pi(\mathbf{x})]$

$$i \frac{\partial \Psi_{(2)}[v, \eta]}{\partial \eta} = \int d^3x \left(-\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{\delta v^2} + \frac{\lambda}{2} v_{,i} v^{,i} - \frac{a''}{2a} v^2 \right) \Psi_{(2)}[v, \eta].$$

$$v \rightarrow \Phi \rightarrow \square \rho / \rho \rightarrow \square \Gamma / T$$

In the Heisenberg representation

$$v''_k + \left(\lambda k^2 - \frac{a''}{a} \right) v_k = 0.$$

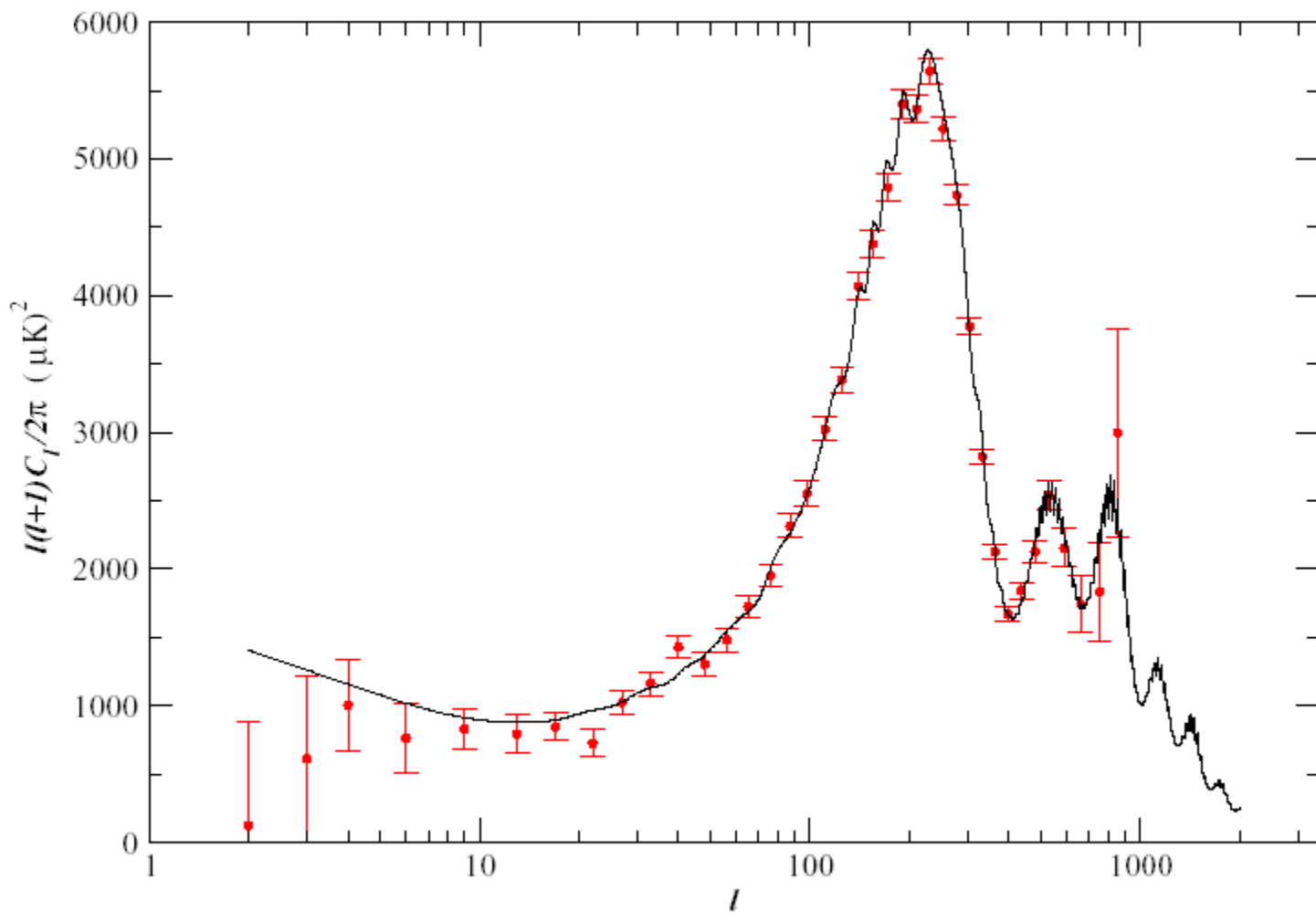
Scale invariant spectrum of scalar perturbations at large scales, as observed.

Three free parameters: T_0 (curvature scale at the bounce).
 a_0 (scale factor at the bounce).
 λ_{nr} (state equation parameter).

$$T_0 \sim 10^3 (\lambda_{nr})^{-1/4} l_{pl}$$

Large range of values for a_0 : avoid transplanckian problems.

- power suppression of gravitational waves.
- superimposed oscillations if a cosmological constant is present.
- **non gaussianities.**
- **best fit parameters.**



Quantum theory helping cosmology ...

cosmology helping quantum theory:

Consequences for quantum theory:

- 1) One instance where one quantum theory (BDB) yields observational results which are not known how to be obtained in others.
- 2) If observations confirm some quantum cosmological model, Copenhagen interpretation must be ruled out.
- 3) Early freeze out of some particle may suppress quantum relaxation: dark matter, gravitons, long wavelength perturbations originated from vacuum state → **Valentini: suppression of power at low l .**

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 Copenhague 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.

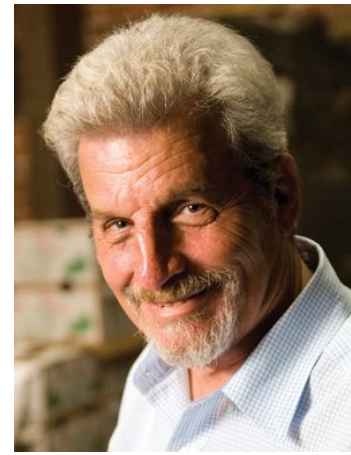
-- Relatividade geral básica e mecânica quântica segundo dBB fornecem um modelo cosmológico coerente que pode explicar a origem das estruturas e novos efeitos na radiação de fundo.

Teoria quântica □ Cosmologia

-- 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.

"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



Bohr
Heisenberg
De Broglie
Einstein
Schrödinger



Bohm
Bell
Everett
Zeh



Aharonov
Pearle
Griffiths