

BEM VINDOS À ERA DA  
MECÂNICA QUÂNTICA



GABRIEL T. LANDI



# O QUE É MECÂNICA QUÂNTICA?

- ❖ Teoria desenvolvida na década de 1920 por Schrödinger, Heisenberg, Dirac e outros.
- ❖ Capaz de explicar o comportamento de objetos microscópicos, como átomos, moléculas, partículas elementares, etc.
- ❖ Drasticamente diferente de todas as outras teorias físicas. Altamente abstrata.



# APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS

- ❖ Lâmpadas fluorescentes, LED, Neon, etc.
- ❖ Painéis solares.
- ❖ Lasers e comunicações por fibra ótica.
- ❖ Ressonância magnética.
- ❖ Relógios atômicos e GPS.
- ❖ *Transistores* e portanto todos os computadores, celulares, e até a internet..... A INTERNET!

# MQ NOS DIAS DE HOJE

- ❖ A mecânica quântica é o ponto de partida para quase todas as teorias modernas na física:
- ❖ Partículas elementares: *teoria quântica de campos*.
- ❖ *Computação quântica e informação quântica*.
- ❖ Propriedades fundamentais da matéria e *sistemas fortemente correlacionados*:
  - ❖ Supercondutividade.
  - ❖ Condensados de Bose-Einstein.
  - ❖ Isolantes topológicos, etc.

# PRÊMIOS NOBEL DOS ÚLTIMOS 10 ANOS

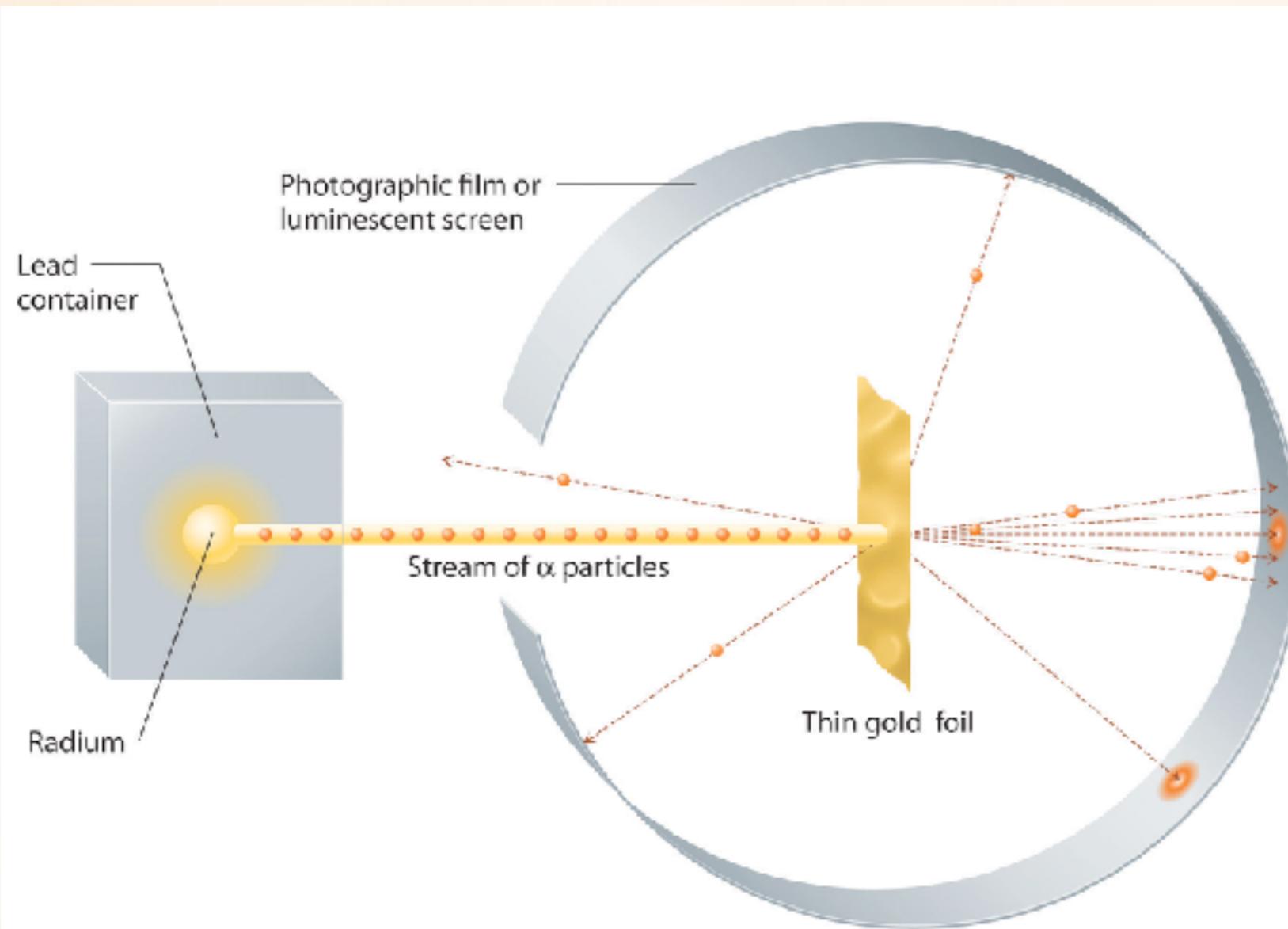
- ❖ 2007: Fert & Grünberg; magnetoresistência gigante.
- ❖ 2008: Kobayashi & Maskawa: origem dos quarks.
- ❖ 2009: Kao, Boyle & Smith: CCD e fibras óticas.
- ❖ 2010: Geim & Novoselov: descoberta do grafeno.
- ❖ 2011: Perlmutter, Schmidt & Riess: aceleração do universo.
- ❖ 2012: Haroche & Wineland: manipulação de sistemas quânticos.
- ❖ 2013: Englert & Higgs: origem da massa; LHC.
- ❖ 2014: Akasaki, Amano & Nakamura: Diodo azul.
- ❖ 2015: Kajita & McDonald: oscilações de neutrinos.
- ❖ 2016: Thouless, Haldane & Kosterlitz: fases topológicas da matéria.
- ❖ 2017: Weiss, Thorne & Barish: LIGO; ondas gravitacionais.

# PARTE I: A ERA PRÉ-MQ

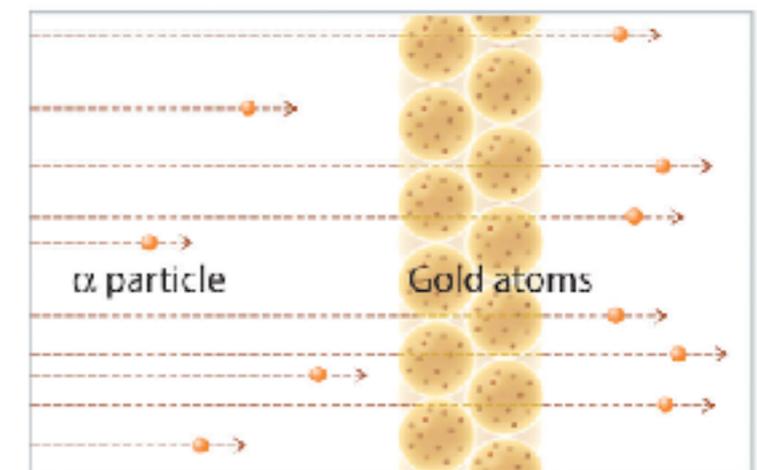
# O PUDIM DE PASSAS DE J. J. THOMSON

- ❖ No início do século XX já se sabia que:
  - ❖ A matéria era feita de átomos que são neutros.
  - ❖ Átomos eram compostos de componentes carregados negativamente (elétrons) e positivamente (prótons).
  - ❖ Os elétrons podiam ser facilmente “arrancados” dos átomos (ionização).
- ❖ O que não se sabia era: como as cargas positivas e negativas estavam dispostas dentro do átomo.
- ❖ Em 1904 J. J. Thomson (Cambridge) propôs um modelo para o átomo:
  - ❖ A parte positiva era uma meleca (pudim) e a parte negativa eram como uvas passas incrustadas no pudim.

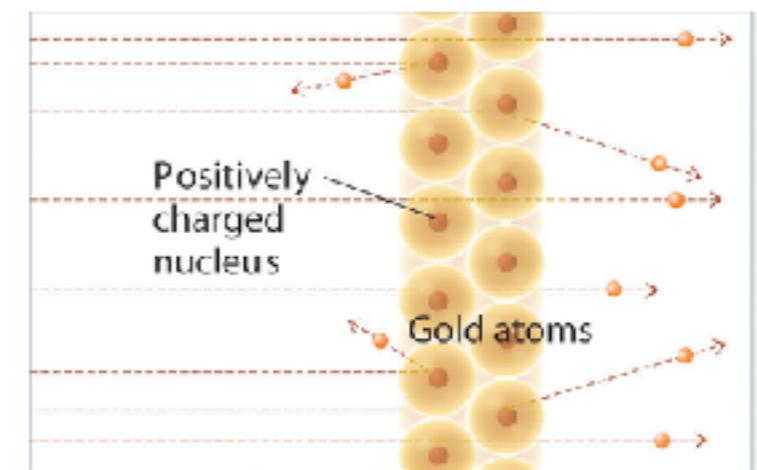
# O MODELO DE RUTHERFORD



(a) Rutherford's experiment

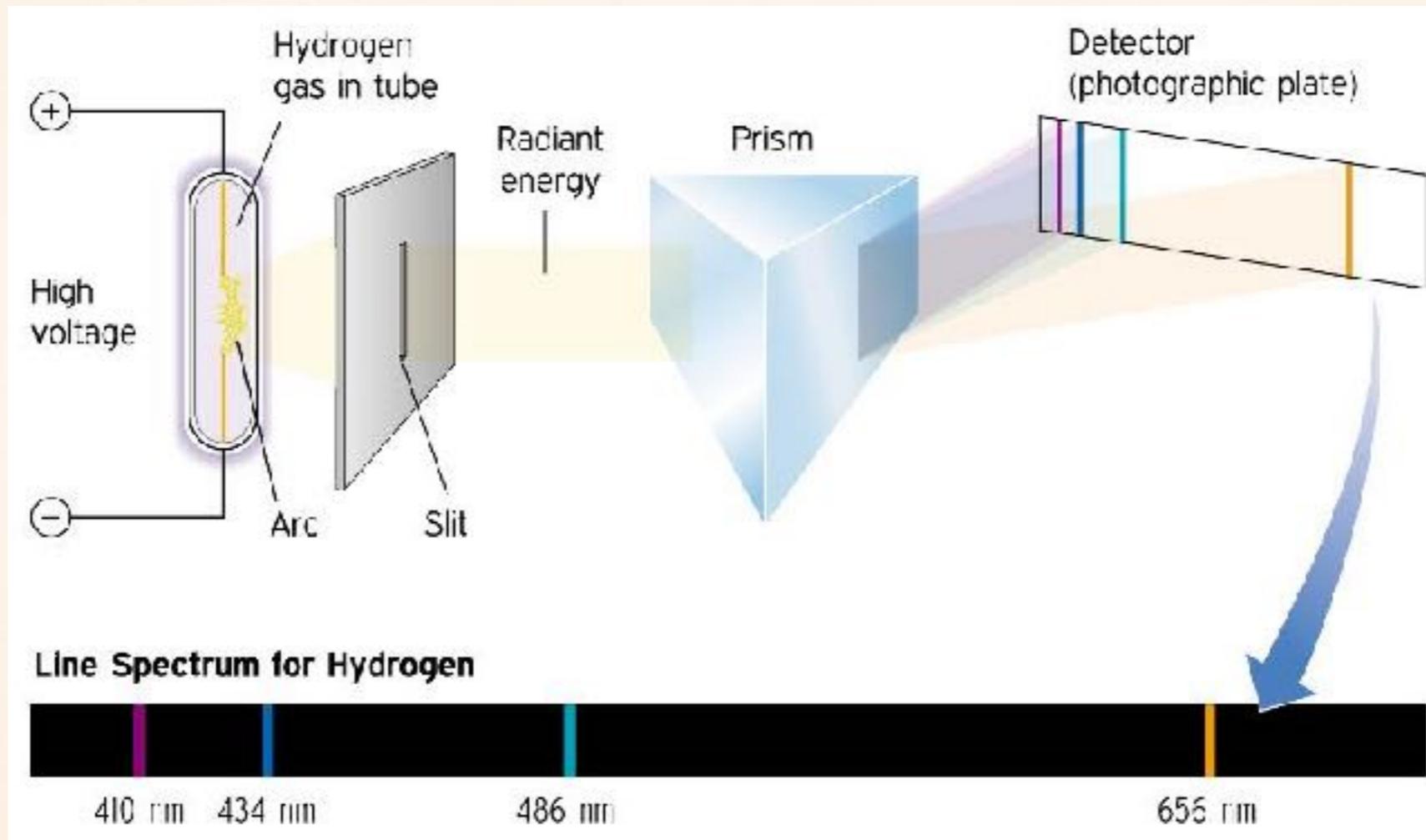


(b) What Rutherford expected if Thomson's model were correct



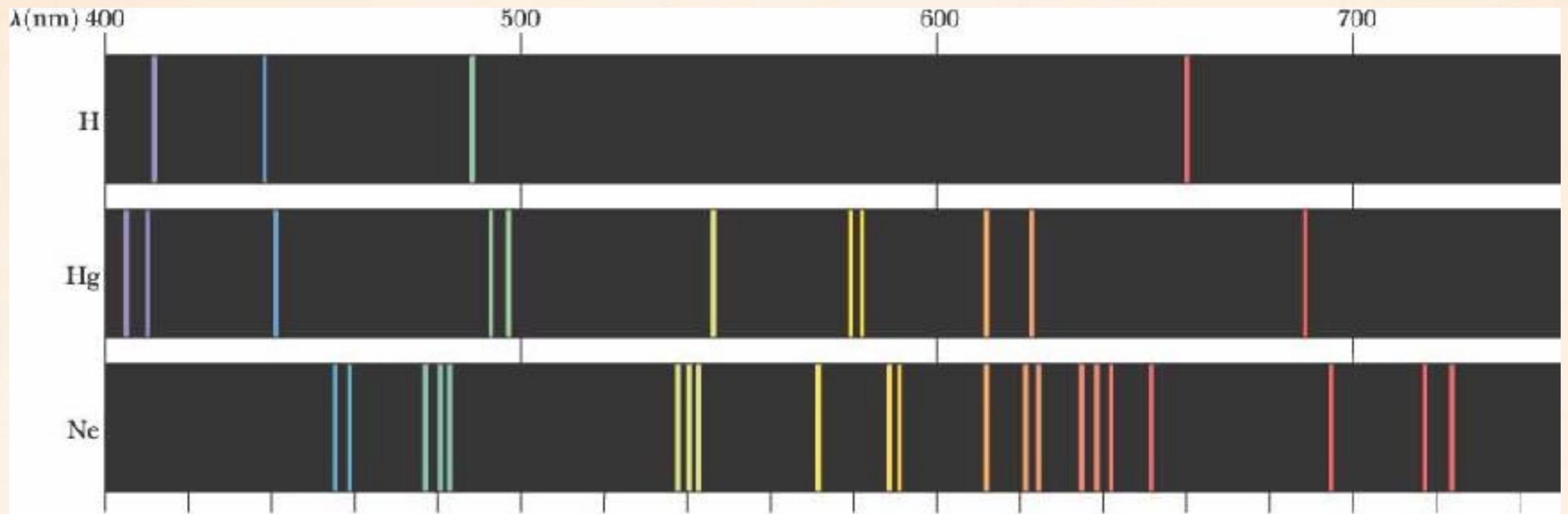
(c) What Rutherford actually observed

# LINHAS ESPECTRAIS

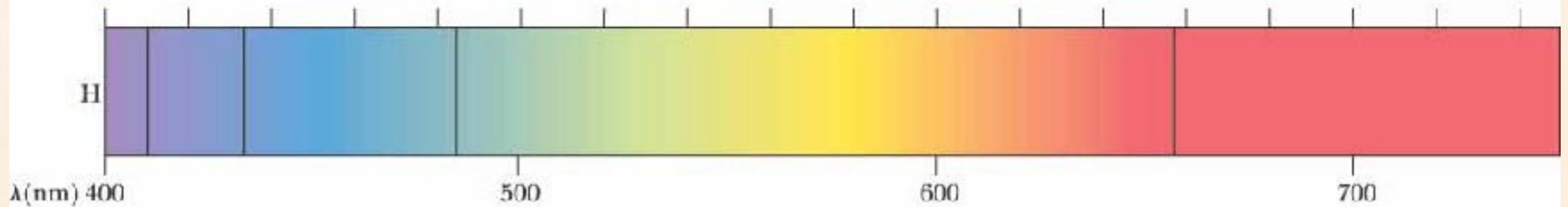


Cor	Vermelho	Ciano	Azul	Violeta
$\lambda$ (nm)	656.3	486.1	434.1	410.2

Assinatura do elemento: é assim que sabemos que o sol é composto de hidrogênio.



(a)



(b)

©2004 Thomson - Brooks/Cole

- ◆ Aplicações: lâmpadas de rua (Na), avisos de “Neon” (Ne, Ar, Hg, Kr, He, Xe)

# SÉRIE DE BALMER

- ❖ Emitir somente em frequências discretas é muito estranho!
- ❖ *Na física tudo é contínuo!*
- ❖ 1885: Johann Balmer, um professor do ensino médio na Suíça, que adorava achar padrões nas coisas, encontrou uma fórmula para explicar as linhas do Hidrogênio.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

$$R_H = 0.010974 \text{nm}^{-1}$$

# MODELO DE BOHR

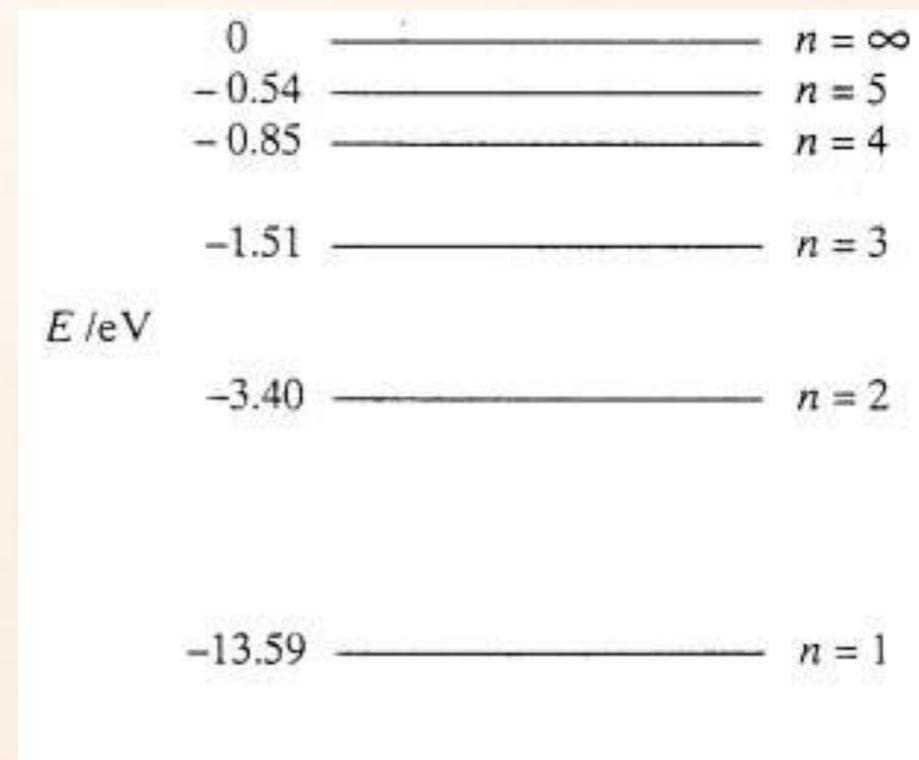
- ❖ Neils Bohr propôs um modelo que corroborava a idéia de Rutherford e explicava as linhas espectrais.
- ❖ Idéia: órbitas do elétron em torno do próton são *discretas*:

$$r_n = a_0 n^2, \quad n = 1, 2, \dots$$

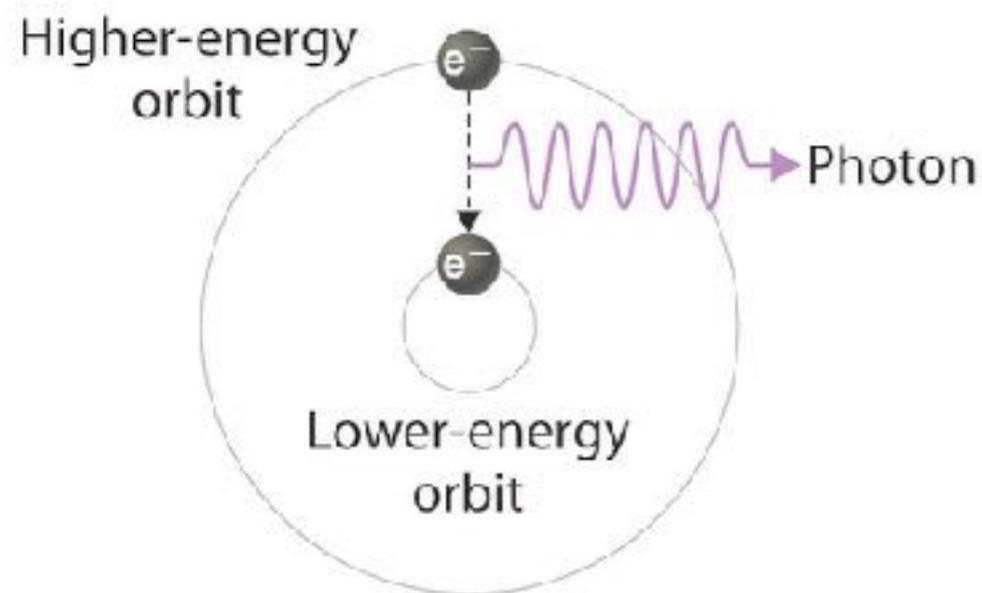
- ❖ Isso faz com que a *energia* do elétron seja discreta:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

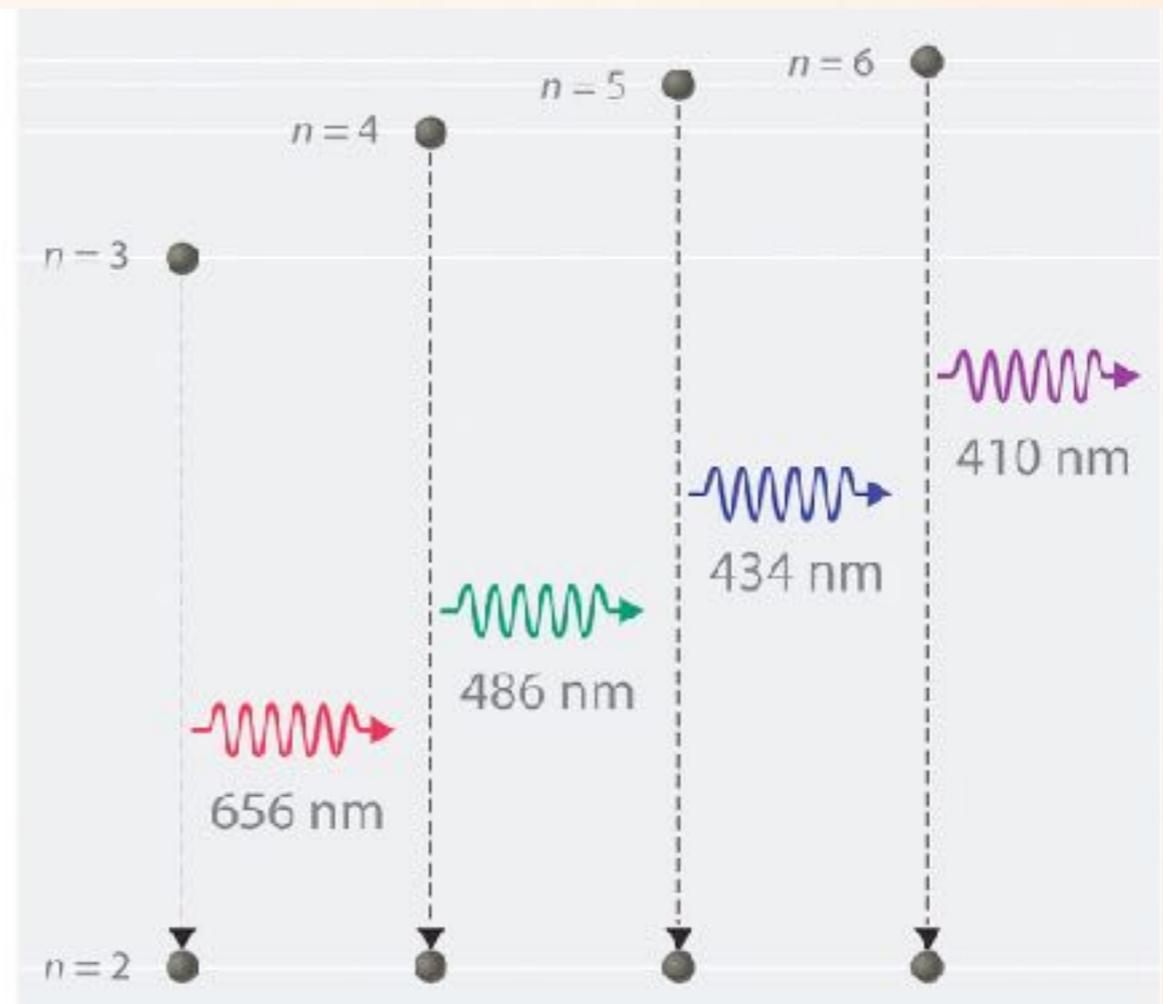
- ❖ *Uma energia discreta é algo bizarro!*



# MODELO DE BOHR



**(a) Electronic emission transition**



**(b) Balmer series transitions**

I. *On the Constitution of Atoms and Molecules.*

*By N. BOHR, Dr. phil. Copenhagen\*.*

*Introduction.*

**I**N order to explain the results of experiments on scattering of  $\alpha$  rays by matter Prof. Rutherford† has given a theory of the structure of atoms. According to this theory, the atoms consist of a positively charged nucleus surrounded by a system of electrons kept together by attractive forces from the nucleus; the total negative charge of the electrons is equal to the positive charge of the nucleus. Further, the nucleus is assumed to be the seat of the essential part of the mass of the atom, and to have linear dimensions exceedingly small compared with the linear dimensions of the whole atom. The number of electrons in an atom is deduced to be approximately equal to half the atomic weight. Great interest is to be attributed to this atom-model; for, as Rutherford has shown, the assumption of the existence of nuclei, as those in question, seems to be necessary in order to account for the results of the experiments on large angle scattering of the  $\alpha$  rays‡.

In an attempt to explain some of the properties of matter on the basis of this atom-model we meet, however, with difficulties of a serious nature arising from the apparent

instability of the system of electrons : difficulties purposely avoided in atom-models previously considered, for instance, in the one proposed by Sir J. J. Thomson\*. According to the theory of the latter the atom consists of a sphere of uniform positive electrification, inside which the electrons move in circular orbits.

# NOTAÇÃO DE DIRAC

- ❖ Dirac inventou uma notação ótima para descrever sistemas quânticos.
- ❖ Ele definiu a idéia de um “estado” do sistema, que apelidamos de “ket”:

$$|n\rangle = \text{elétron está no nível } n$$

- ❖ O ket é um objeto abstrato. Ele não é como a posição  $x(t)$  na mecânica clássica, que vive no mundo real. O ket vive num espaço abstrato.
- ❖ Por exemplo, usamos essa notação para descrever a emissão e absorção de fótons.

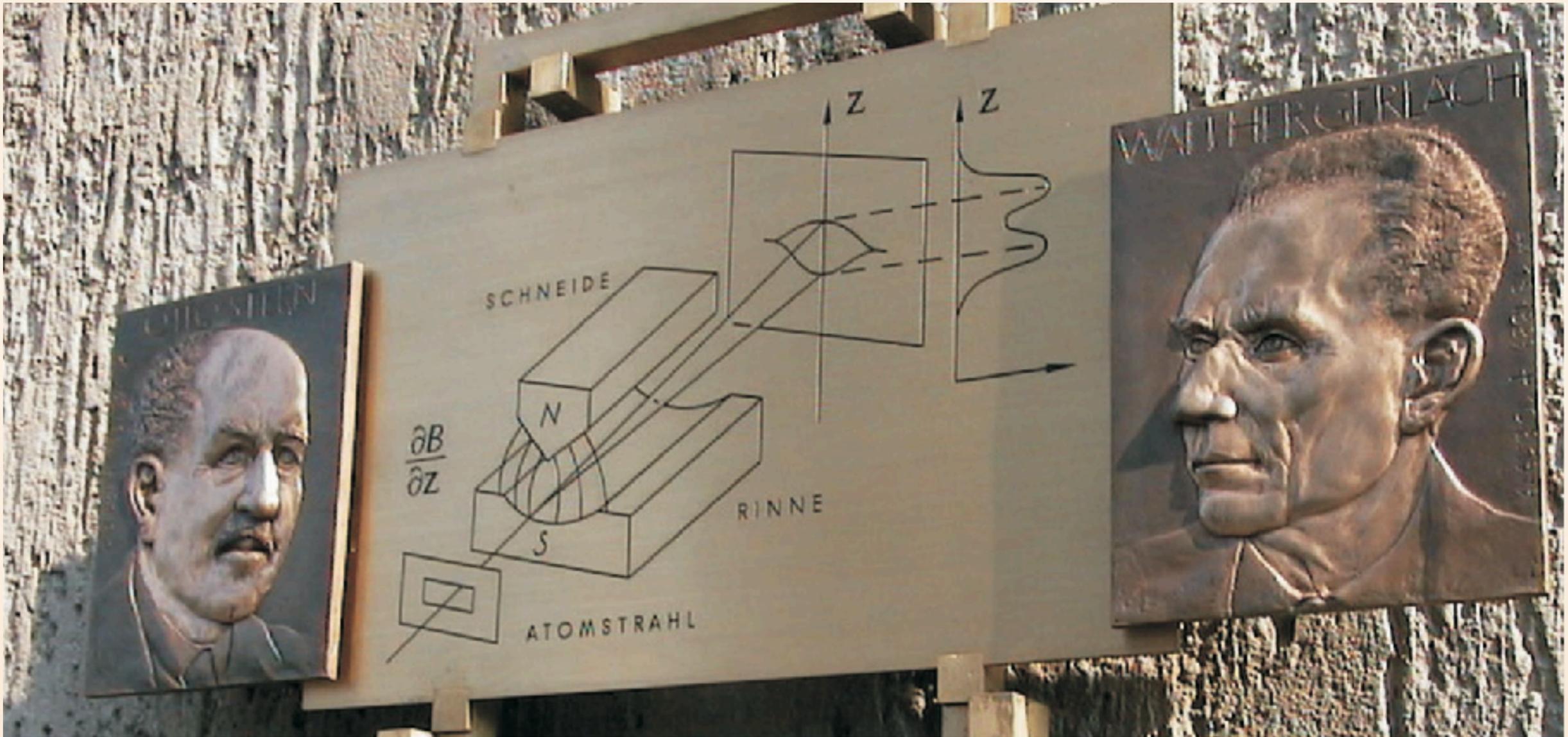
$$\text{emissão : } |n\rangle \rightarrow |n - 1\rangle$$

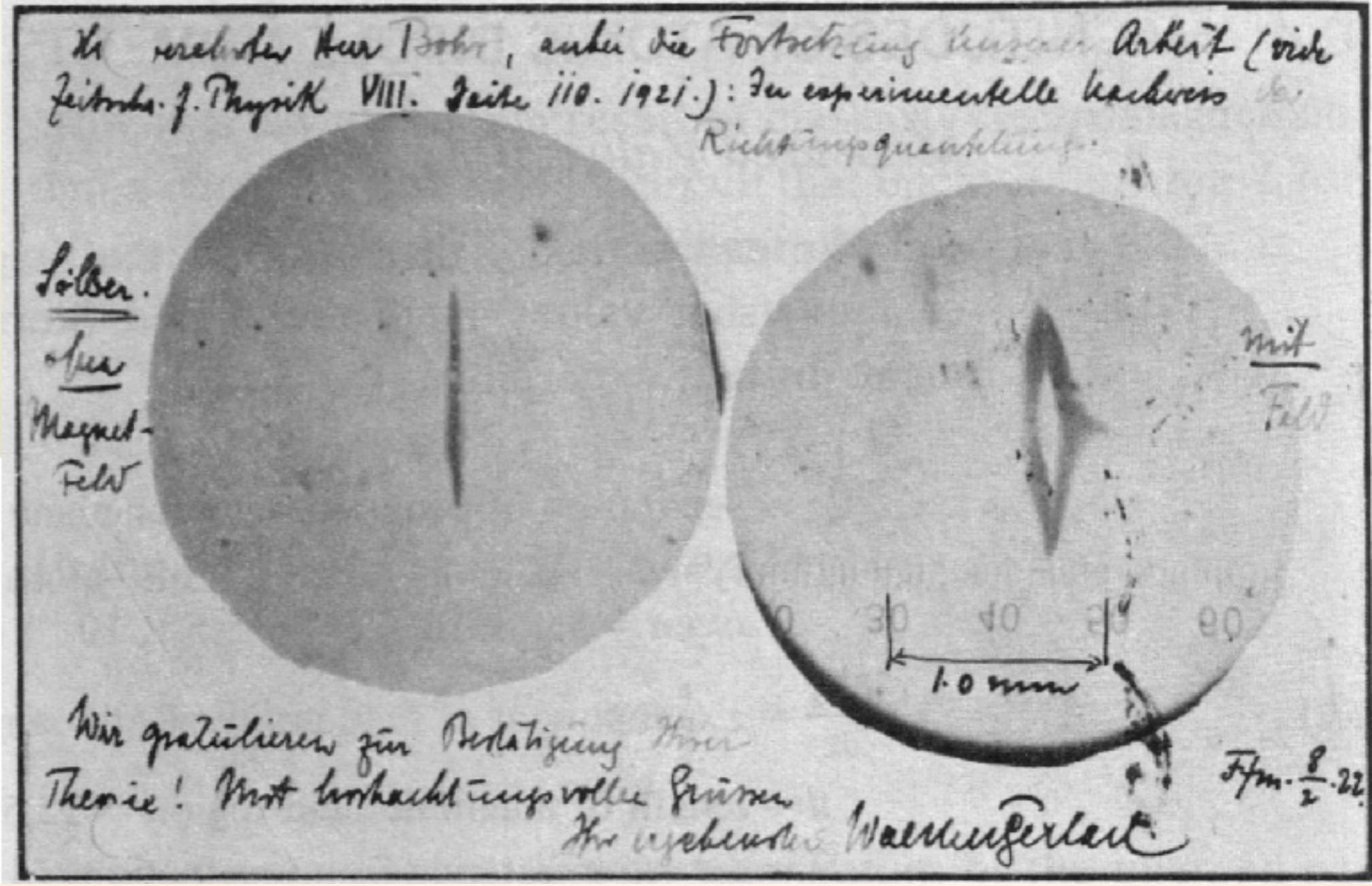
$$\text{absorção : } |n\rangle \rightarrow |n + 1\rangle$$

- ❖ Nunca se esqueça disso: o que aparece dentro do  $|\ \rangle$  é apenas um *rótulo* para especificar um estado.

# O EXPERIMENTO DE STERN-GERLACH

- ❖ Otto Stern foi o primeiro aluno de doutorado de Einstein.
- ❖ Quando o modelo de Bohr foi publicado em 1913, ele disse:
  - ❖ “If this nonsense of Bohr should in the end prove to be right, I will quit physics!”
- ❖ Em 1922, junto com Walter Gerlach, eles realizaram um experimento que, eles achavam, *concordava* com a “quantização espacial” do modelo de Bohr.





"This should convert even the nonbeliever Stern."  
 W. Pauli

# SPIN

- ❖ Na verdade, Stern e Gerlach não confirmaram a “quantização espacial” de Bohr.
- ❖ Eles descobriram outra propriedade da matéria: *o spin*.
- ❖ O spin é uma propriedade extra das partículas fundamentais que *não possui um análogo clássico* (ou seja, não tente imaginar o que ele é).
- ❖ O spin do elétron pode ter apenas duas configurações, que chamamos de *up* e *down*.

estado do elétron:  $|n, \uparrow\rangle$  ou  $|n, \downarrow\rangle$

- ❖ E, na presença de campos magnéticos, cada uma das configurações são atraídas em direções diferentes.

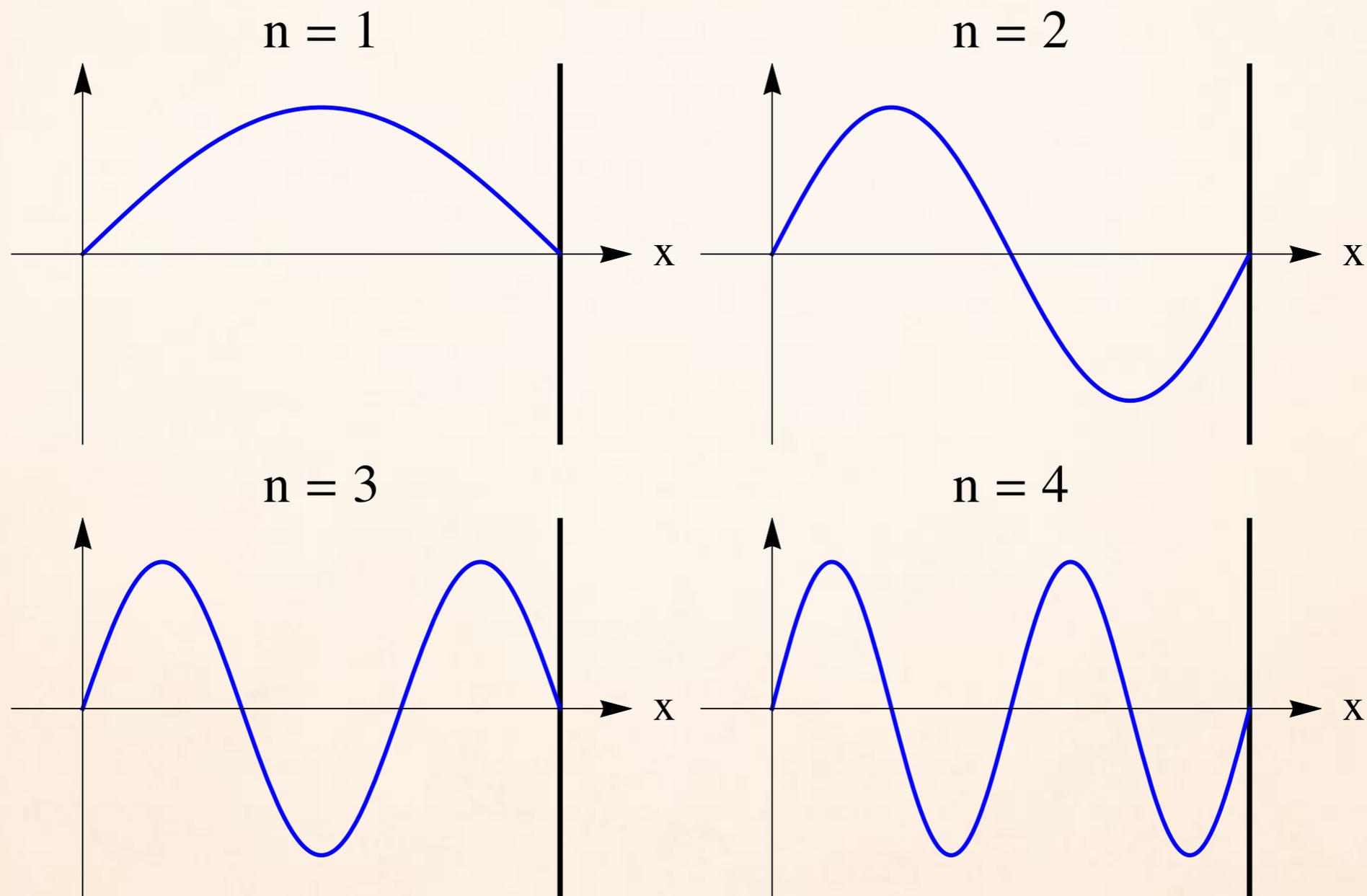
PARTE II:  
NASCIMENTO DA MQ

# CONTÍNUO VS. DISCRETO

- ❖ Em geral tudo no mundo clássico em que vivemos é *contínuo*.
- ❖ O raio da órbita de um satélite na terra pode variar *continuamente*.
- ❖ A energia de uma criança no balanço pode ser alterada *continuamente*.
- ❖ A existência de efeitos discretos ou *quantizados* no mundo microscópico, é muito estranha.

❖ Uma das poucas situações onde algo discreto aparece é na descrição de *ondas*:

❖ Os harmônicos de uma corda vibrando são discretos:  $n = 1, 2, \dots$



# ERWIN SCHRÖDINGER - 1926

## Quantisation as a Problem of Proper Values (Part I)

*(Annalen der Physik (4), vol. 79, 1926)*

§ 1. In this paper I wish to consider, first, the simple case of the hydrogen atom (non-relativistic and unperturbed), and show that the customary quantum conditions can be replaced by another postulate, in which the notion of "whole numbers", merely as such, is not introduced. Rather when integralness does appear, it arises in the same natural way as it does in the case of the *node-numbers* of a vibrating string. The new conception is capable of generalisation, and strikes, I believe, very deeply at the true nature of the quantum rules.

# EQUAÇÃO DE SCHRÖDINGER

Derivada

Matriz

$$i \frac{d|\psi\rangle}{dt} = H|\psi\rangle$$

Números complexos

Estado (ket)

# REPERCUSSÃO

- ❖ Schrödinger propôs algo maluco.
- ❖ Mas esse algo maluco explicava o experimento. E é só isso que importa!
- ❖ Sua teoria foi imediatamente aceita e iniciou uma revolução. Apenas em 1927 temos:
  - ❖ Dirac estende a Eq.S. para sistemas relativísticos: sua teoria prevê a existência do pósitron (anti-partículas).
  - ❖ Heitler, London e Pauling mostram como a mecânica quântica é capaz de explicar a estrutura dos elementos e as propriedades das moléculas.
  - ❖ Thomas e Fermi usam a mecânica quântica para explicar as propriedades de metais.

- ❖ 1929: Houtermans e Atkinson propõem que estrelas emitem energia através da fusão nuclear.
- ❖ 1930: Pauli sugere a existência de neutrinos.
- ❖ 1932: Chadwick descobre o nêutron.
- ❖ 1932: Heisenberg usa a mecânica quântica para explicar a origem do ferromagnetismo.
- ❖ 1933: Szilárd propõe a idéia de reações nucleares em cadeia.
- ❖ 1934: Fermi estuda o efeito de bombardear urânio com nêutrons.
- ❖ 1938: Hahn, Strassmann, Meitner e Frisch confirmam a fissão nuclear.
- ❖ 1939: Szilárd e Fermi descobrem o processo de multiplicação de nêutrons no urânio.
- ❖ 16/07/1945 as 5:29:45: *primeiro teste nuclear da história.*

PARTE III: MECÂNICA  
QUÂNTICA 2.0

# SPOOKY

- ❖ Ninguém nunca questionou a validade da mecânica quântica.
- ❖ Ela reproduz de maneira formidável o experimento!
- ❖ No entanto, a MQ prevê certas coisas meio bizarras.
- ❖ Isso levou algumas pessoas a achar que a mecânica quântica não era a “resposta final”. Que algo ainda estava faltando.
- ❖ Hoje sabemos que nada está faltando. É possível provar experimentalmente que a natureza realmente é meio bizarra.

# PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO

- ❖ O princípio mais fundamental da MQ é o chamado *princípio da superposição*.
- ❖ Se  $|a\rangle$  e  $|b\rangle$  representam estados quânticos válidos de um elétron então  $|a\rangle + |b\rangle$  também representa um estado válido.
- ❖ Dizemos que o elétron está em uma *superposição* de  $|a\rangle$  e  $|b\rangle$ .
- ❖ Além disso, se medimos a posição do elétron encontramos ele ou em  $|a\rangle$  ou em  $|b\rangle$ , com diferentes probabilidades.

- ❖ Mas  $|a\rangle$  pode significar “elétron no Brasil” e  $|b\rangle$  pode significar “elétron na China”. Então o que significa “superposição”?
- ❖ “elétron no Brasil **ou** elétron na China”?
- ❖ “elétron no Brasil **e** elétron na China”?
- ❖ *Resposta: nenhum dos dois.*
- ❖ “Brasil **e** China” significaria estar em dois lugares ao mesmo tempo. Incompatível com encontrá-lo só em um ou só em outro.
- ❖ “Brasil **ou** China” significa algo probabilístico, referente à nossa *ignorância* sobre o estado do elétron.

- ❖ Apesar dos bons resultados da MQ, muitas pessoas achavam que a resposta *tinha que ser* “Brasil **ou** China”.
- ❖ Ou seja, que havia algo a mais que ainda não tínhamos entendido e que limitava nosso conhecimento sobre o estado do elétron.
- ❖ Mas hoje sabemos que isso não é verdade. Não é uma questão de ignorância:
  - ❖ ***A mecânica quântica é não-local!***
  - ❖ Ex: fótons viajando pelo espaço são defletidos por buracos negros.
  - ❖ Um fóton vindo em direção terra pode ter sido defletido para um lado ou para outro. O fóton estaria então numa superposição de dois caminhos completamente diferentes.

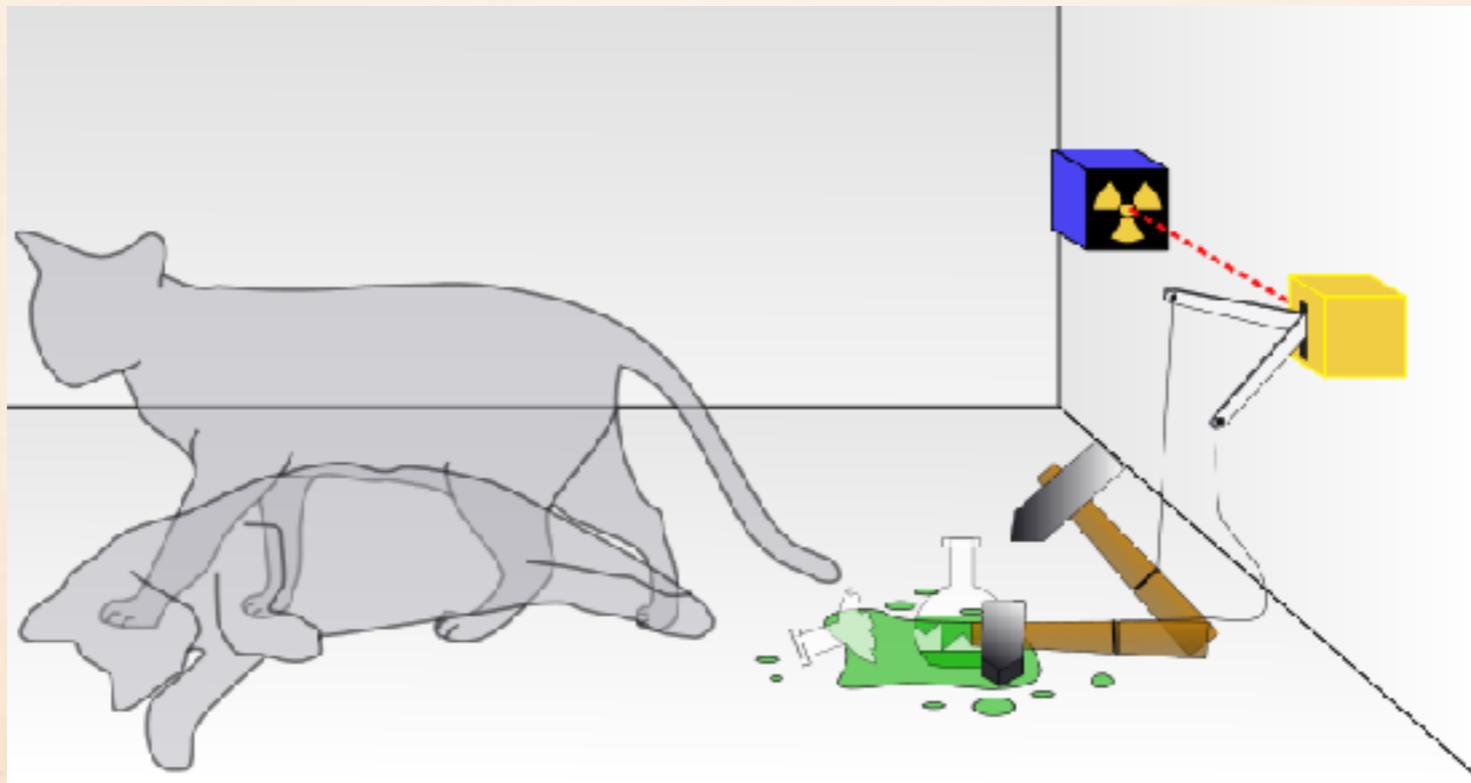
# DESENHOS MENTAIS

- ❖ “Localismo” é algo que está incrustado no nosso cérebro.
- ❖ Nosso cérebro opera realizando desenhos mentais das coisas.
  - ❖ Quando alguém diz “cadeira”, você imediatamente acessa no cérebro um desenho mental do que é uma cadeira.
- ❖ Não é possível construir desenhos mentais de propriedades quânticas
- ❖ Não tente imaginar o que é um *spin*: o elétron não está rodopiando em torno do próprio eixo. Não existe um desenho mental para o *spin*.
- ❖ **Dica de sucesso: não tente imaginar, confie na matemática.**

# O GATO DE SCHRÖDINGER

- ❖ No entanto, se simplesmente desistimos de fazer desenhos mentais das coisas, como reconciliamos o mundo quântico do mundo clássico (que nós vivemos)?

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{gato vivo}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{gato morto}\rangle$$



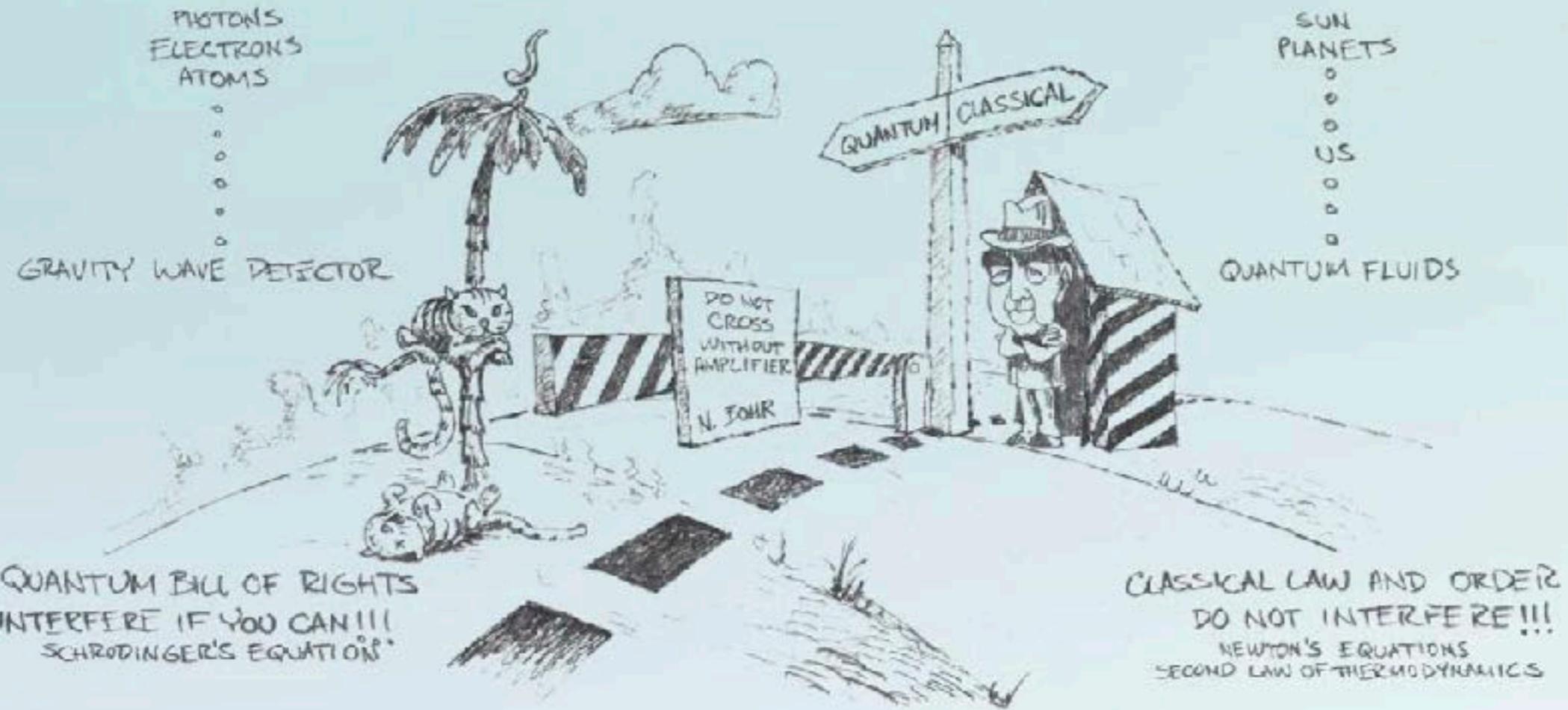
# QUANTUM-TO-CLASSICAL TRANSITION



## THE BORDER TERRITORY

QUANTUM DOMAIN

CLASSICAL DOMAIN



# EMARANHAMENTO

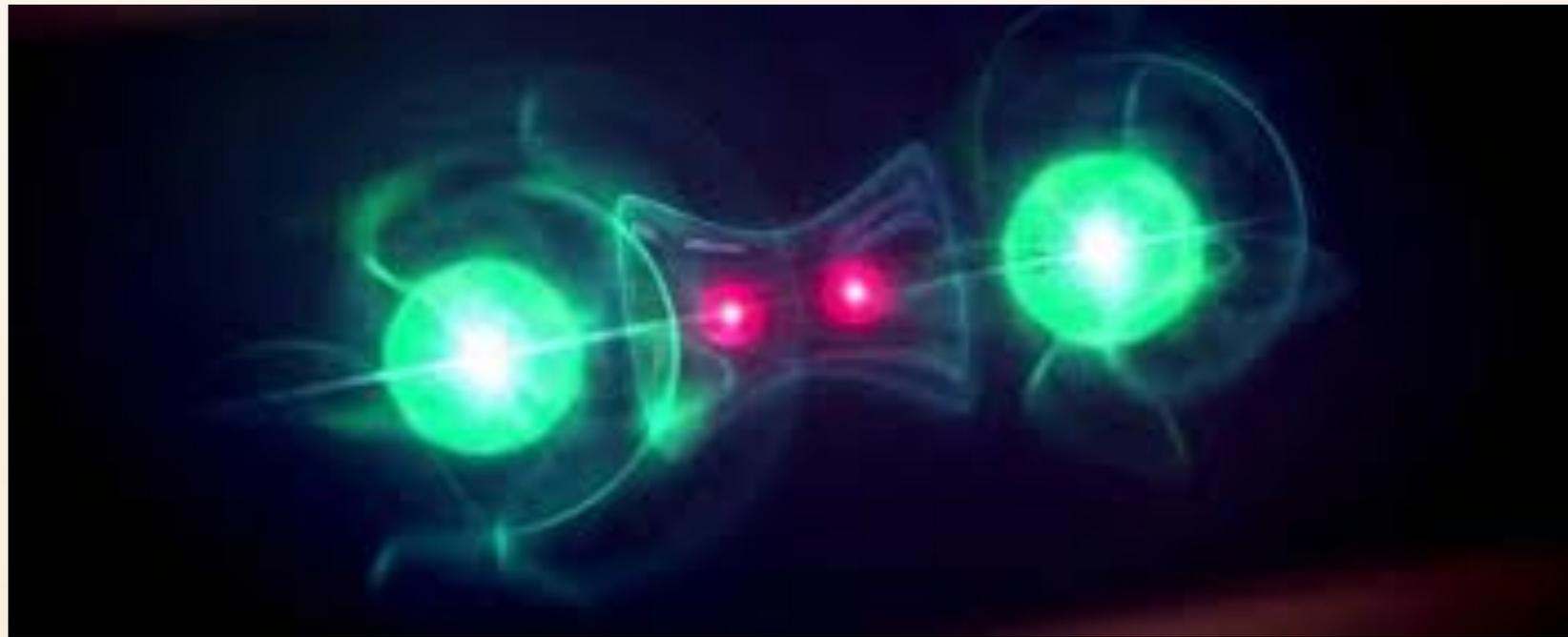
- ❖ Considere um sistema que pode ocupar dois estados:  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$ .
- ❖ Um exemplo clássico é a banana:
  - ❖  $|0\rangle$  = a banana está verde e incomível.
  - ❖  $|1\rangle$  = a banana está completamente podre e incomível.
  - ❖ Não existe nenhum meio termo.
- ❖ Suponha agora que temos dois tais sistemas, A e B: existem portanto 4 estados possíveis:  $|0,0\rangle$ ,  $|0,1\rangle$ ,  $|1,0\rangle$ ,  $|1,1\rangle$ .
- ❖ De acordo com o princípio da superposição, qualquer combinação destes estados também é um estado válido.

- ❖ Suponha portanto que o estado do sistema é

$$|\Psi\rangle = |0,0\rangle + |1,1\rangle$$

- ❖ Agora suponha que medimos o estado de  $A$ . De acordo com as regras da mecânica quântica, podemos encontrar o resultado  $A = 0$  ou  $A = 1$  com diferentes probabilidades.
- ❖ Mas, se encontramos  $A = 0$  então, conseqüentemente, temos certeza absoluta que  $B = 0$ . E vice-versa para  $A = 1$ .
- ❖ Portanto, ao medirmos  $A$  influenciaremos imediatamente o estado de  $B$ .
- ❖ Só que  $A$  e  $B$  podem estar em diferentes planetas!
- ❖ Isso dá a idéia de que estamos propagando informação mais rápido que a velocidade da luz.

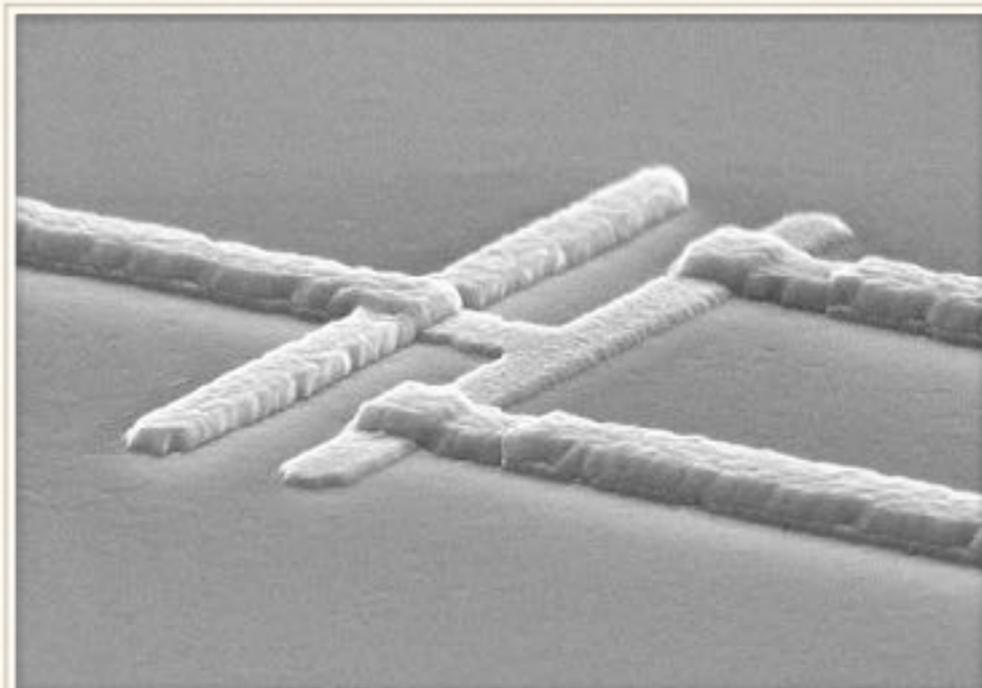
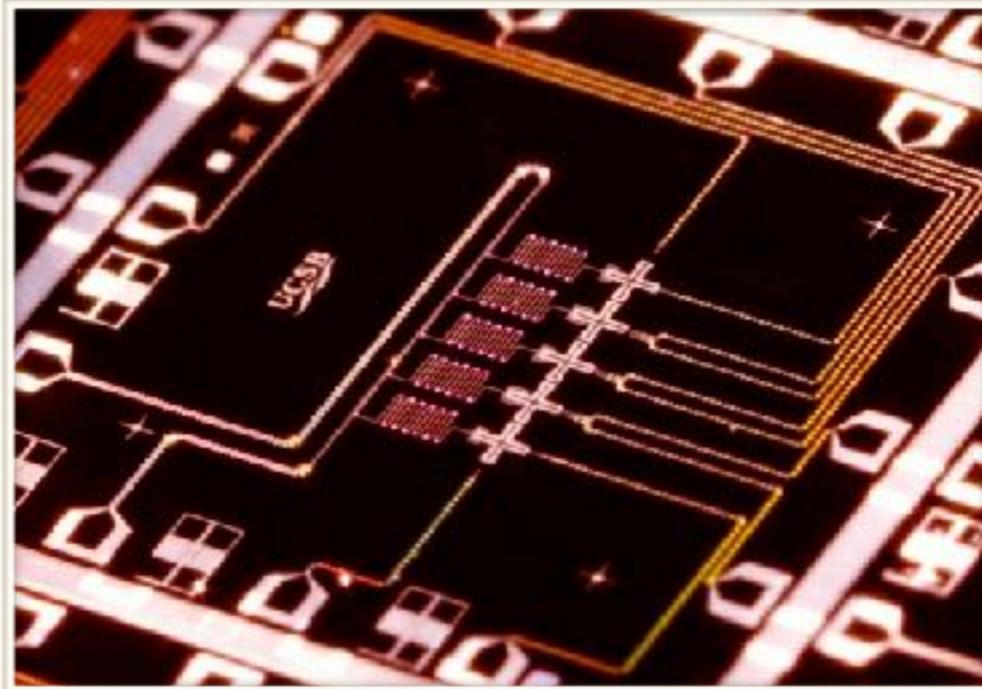
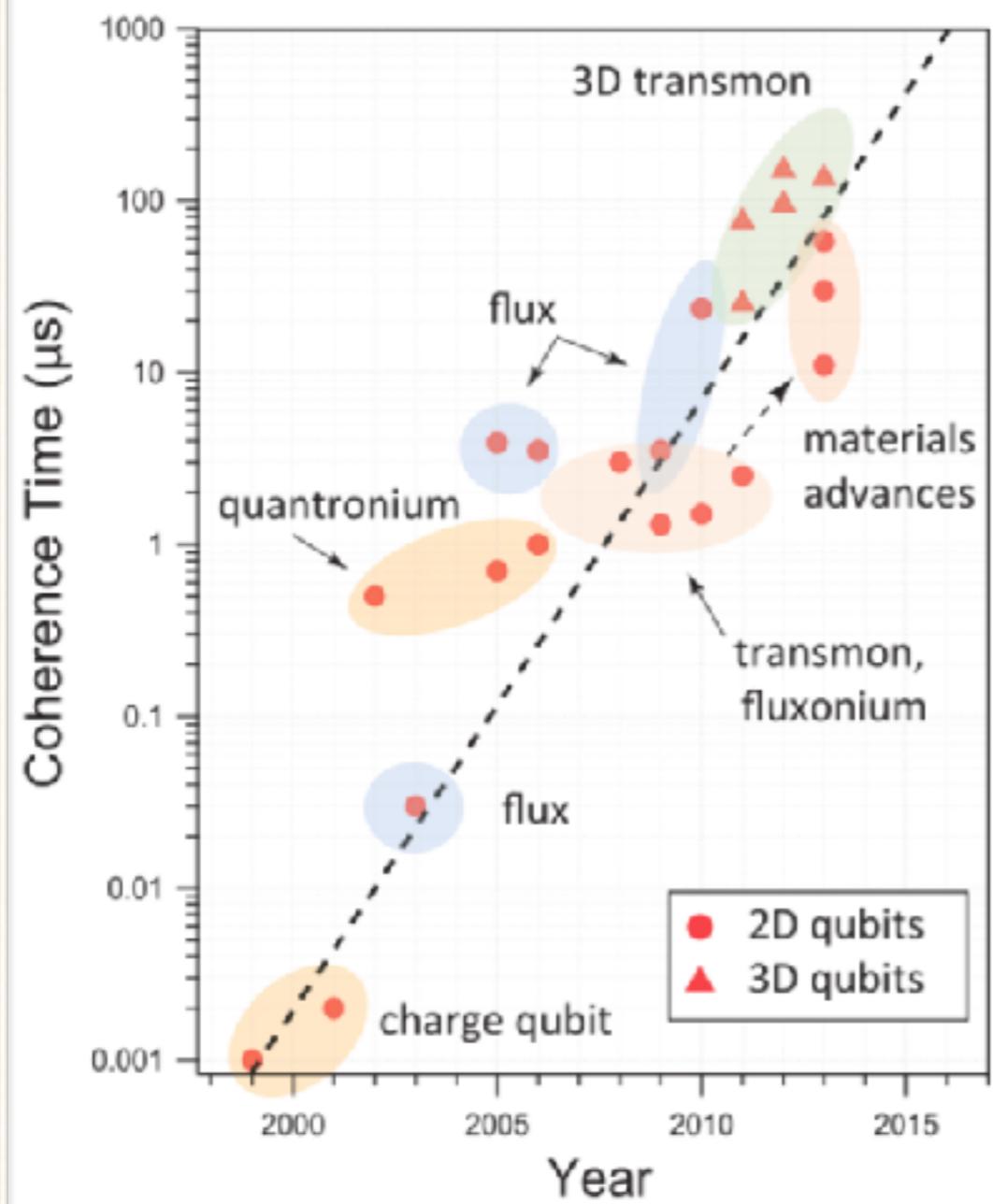
- ❖ Einstein chamou isso de “*Spooky action at a distance*”.
- ❖ Nós chamamos isso de *emaranhamento* ou *correlações quânticas*.
- ❖ Hoje sabemos que o emaranhamento não pode ser usado para propagar informação mais rápido que a velocidade da luz.
- ❖ Mas essa correlação é real e decorre do fato da MQ ser não-local.



Um desenho mental do emaranhamento ....

# A SEGUNDA REVOLUÇÃO QUÂNTICA

- ❖ Propriedades quânticas como coerência e emaranhamento sempre estiveram presentes nas teorias físicas.
- ❖ Mas até algumas décadas atrás não éramos capazes de manipulá-las de maneira coerente.
- ❖ A grande revolução das últimas 2 décadas, e que continua em andamento, diz respeito ao progresso na manipulação experimental destas propriedades.



# COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

- ❖ A próxima pergunta é se alguma dessas spookidades servem para alguma coisa.
- ❖ Considere uma função  $f(x)$  que aceita dois valores, 0 ou 1.
- ❖ Existem duas possibilidades para  $f(x)$ :
  - ❖  $f(x) = \text{constante}$
  - ❖  $f(x) = x$
- ❖ Queremos descobrir qual das duas possibilidades. Mas imagine que cada avaliação de  $f(x)$  custa 1 milhão de dólares.
- ❖ Para descobrirmos quem é  $f(x)$  usando um computador clássico precisamos de duas avaliações:  $f(0)$  e  $f(1)$ .
- ❖ Usando um computador quântico, podemos preparar o sistema em uma *superposição* de  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$ .
  - ❖ Consequentemente, podemos descobrir  $f(x)$  usando uma *única* avaliação.

# CONCLUSÕES

- ❖ Mecânica quântica é a disciplina mais importante da física.
- ❖ Ela é o ponto de partida para quase todas as teorias modernas.
- ❖ E será o motor do progresso tecnológico do próximo século.
- ❖ Além disso, *a mecânica quântica define o físico*:
  - ❖ Só os físicos realmente entendem mecânica quântica!
  - ❖ Ela é *nossa* responsabilidade!

Obrigado!