

Medidas em mecânica quântica

Prof. Gabriel T. Landi
Departamento de Física dos Materiais
17 de setembro de 2019

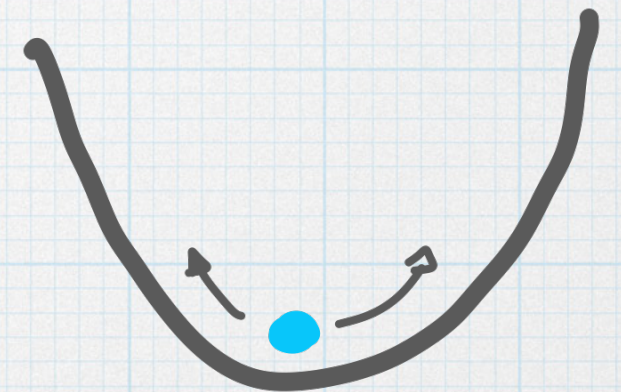
O que significa medir?

O que significa medir?

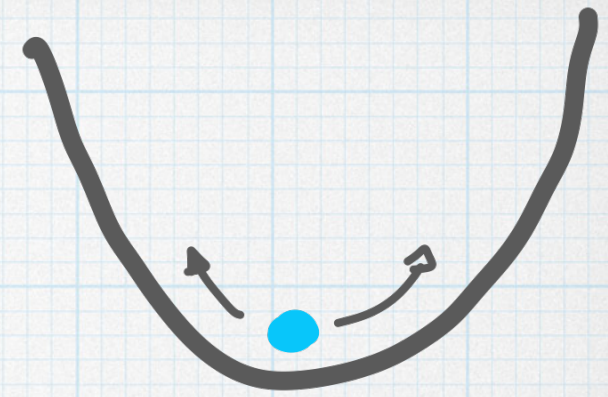
- * Medir = acessar certas propriedades de um sistema físico:
 - * Posição e velocidade de uma partícula.
 - * Temperatura de um corpo.
 - * Frequência de oscilação de um oscilador harmônico.
 - * Radiação emitida por uma estrela.
 - * Magnetização de um pedaço de ferro.
 - * Seção de choque de partículas elementares.

Para medir, precisamos interagir

- * **Estímulo e resposta:** “Cutuca-se” o sistema e mede como ele responde.
 - * **Frequência de oscilação:** damos um pequeno peteleco na partícula e vemos como ela oscila.
 - * Para medir a frequência, tivemos que esticar a mola.
 - * Pode causar deformação plástica.
- * **Calor Específico:** mudamos a temperatura e vemos o quanto o sistema esquenta.
 - * Para isso foi necessário esquentar o sistema.
 - * Pode causar danos permanentes.



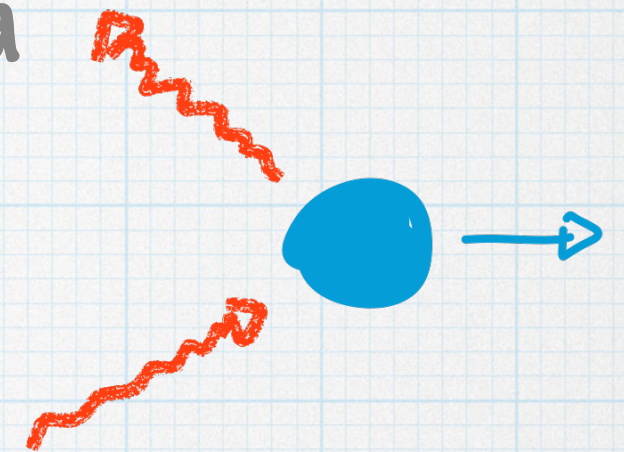
Medidas invasivas



- * Nos exemplos anteriores, o estímulo era invasivo.
- * Mas as vezes a **medida** também pode ser.
- * Como fazemos para medir a posição da partícula?
 - * Utilizamos uma câmera CCD?
- * Então temos que medir os fótons que estão constantemente colidindo com a partícula.

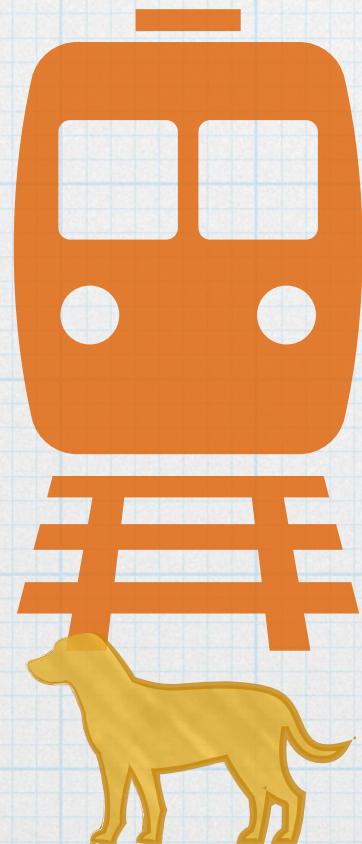
* Mas cada vez que um fóton colide com a partícula, ele a afeta.

* Pressão de radiação.



* O próprio ato da medida pode afetar a medida!

* Gostarmos de pensar que isso sempre pode ser evitado...

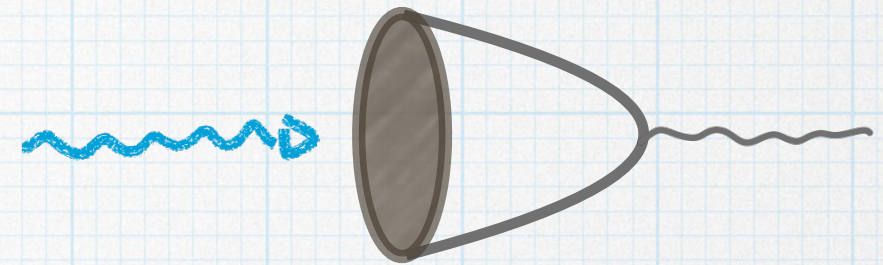


* Mas isso é porque achamos que a "sonda" sempre pode ser muito menor que o sistema.

* Há um limite, no entanto.

Esse limite é a mecânica quântica.

Fotodeteção



- * Para medir radiação eletromagnética, usamos fotodetectores.
 - * Num fotodetector os fótons incidentes interagem com o material e criam uma corrente elétrica.
 - * Mas esse processo destrói o fóton.
 - * Medida maximamente invasiva.
- * Os fótons são partículas fundamentais. Não tem nada menor que possamos usar como sonda para medi-los.

O que é física quântica?

O que é física 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

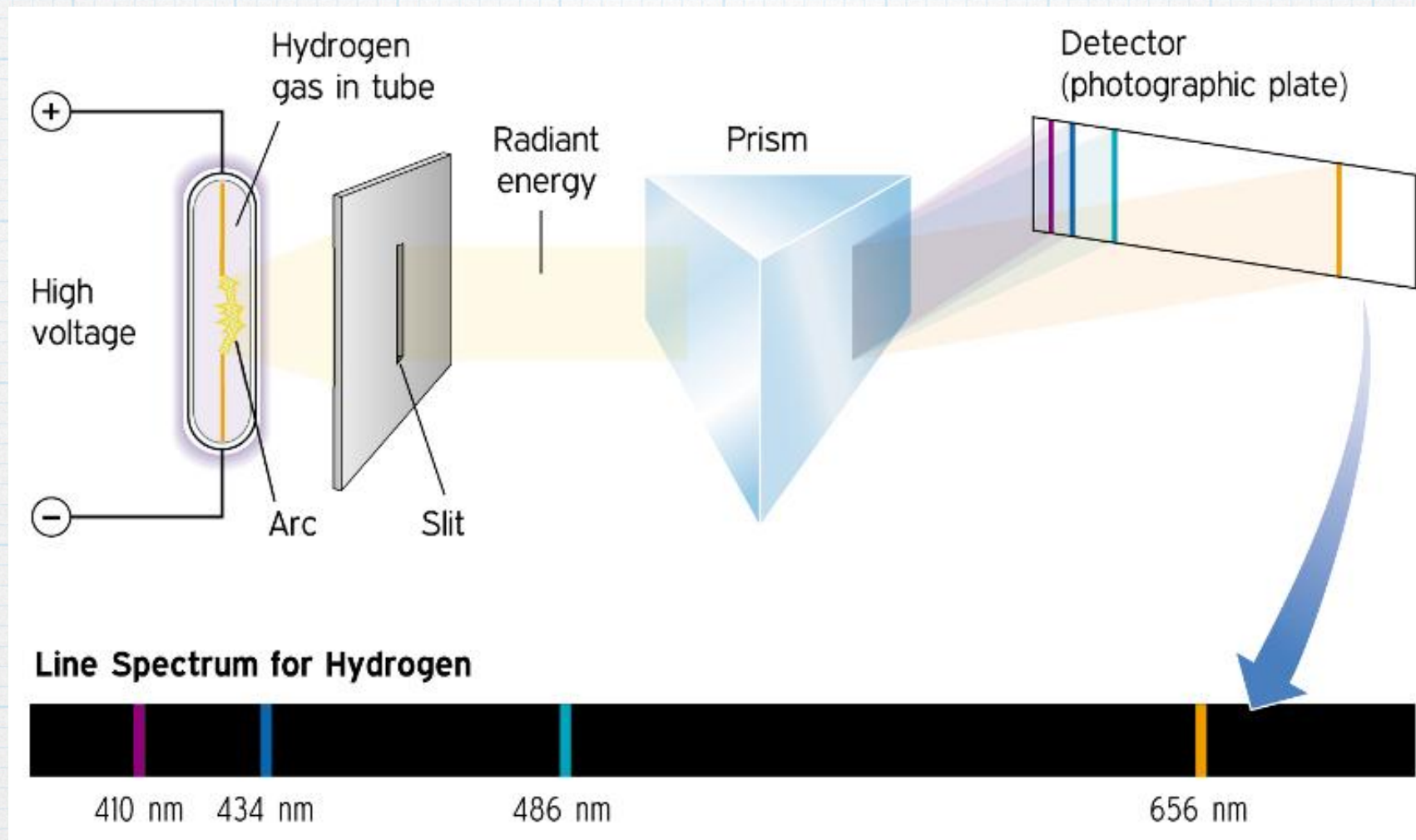
- * A mecânica quântica é o ponto de partida para quase todas as teorias modernas na física:
 - * Partículas elementares: teoria quântica de campos.
 - * Computação quântica e informação quântica.
 - * Materia condensada: Supercondutividade., Condensados de Bose-Einstein, Isolantes topológicos, etc.

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.

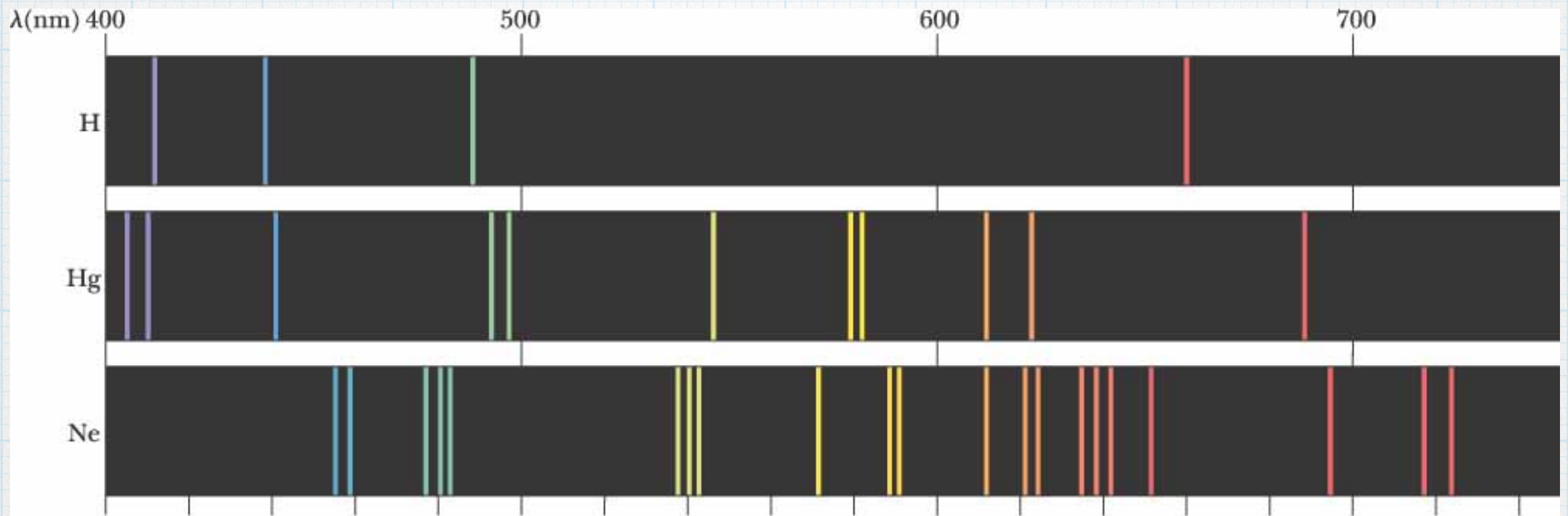
Nascimento da mecânica quântica

Linhas espectrais

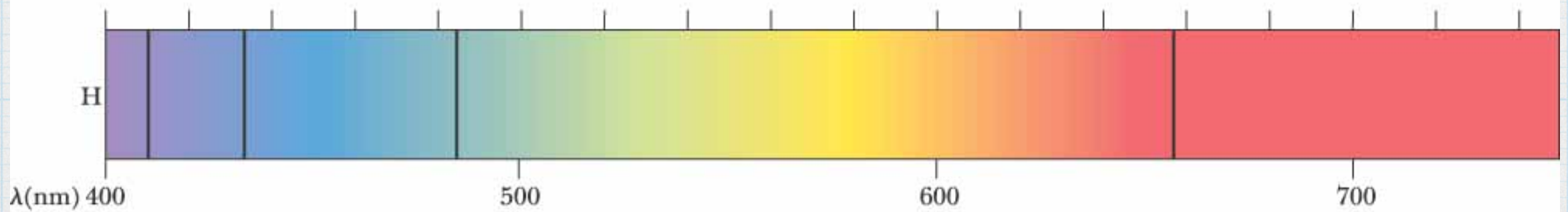


Cor	Vermelho	Ciano	Azul	Violeta
λ (nm)	656.3	486.1	434.1	410.2

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.

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

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

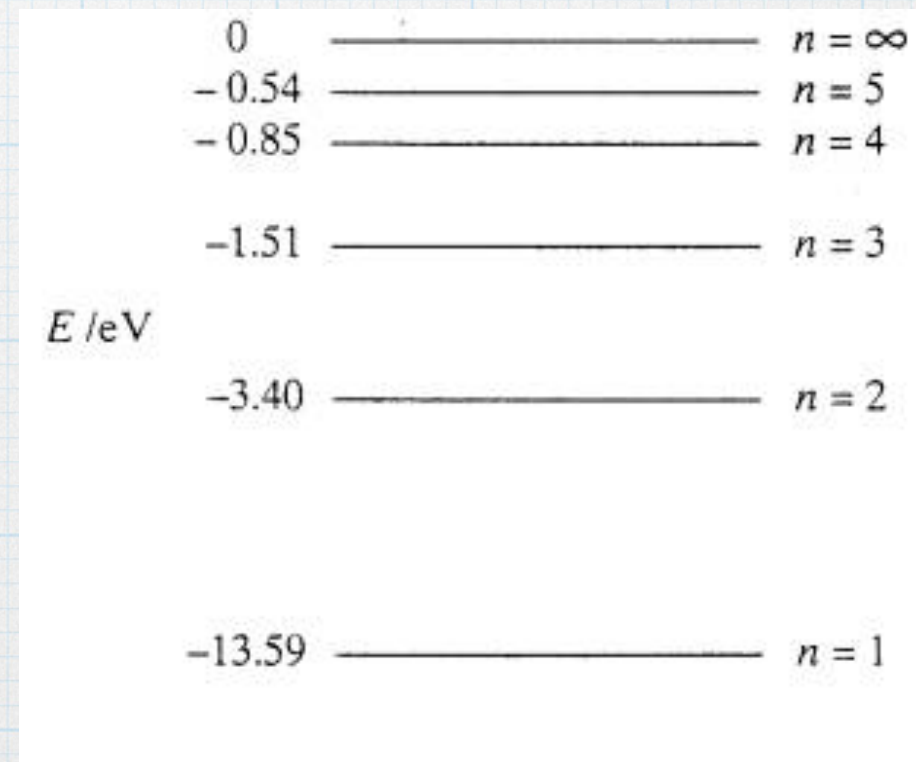
Modelo de Bohr

- * 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:

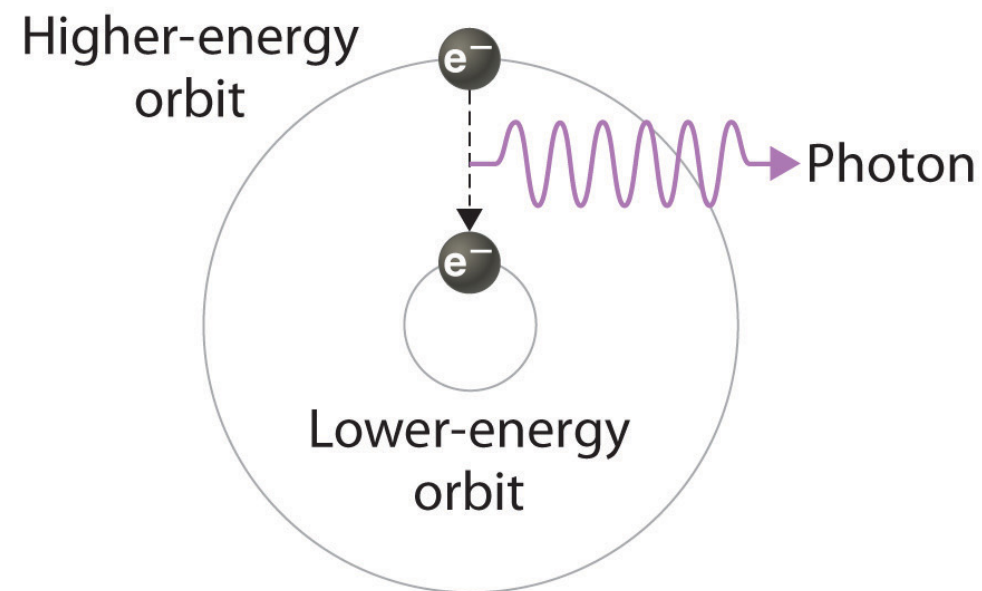
$$r_n = a_0 n^2, \quad n = 1, 2, \dots$$

- * Isso faz com que a energia do elétron seja discreta (bizarro!):

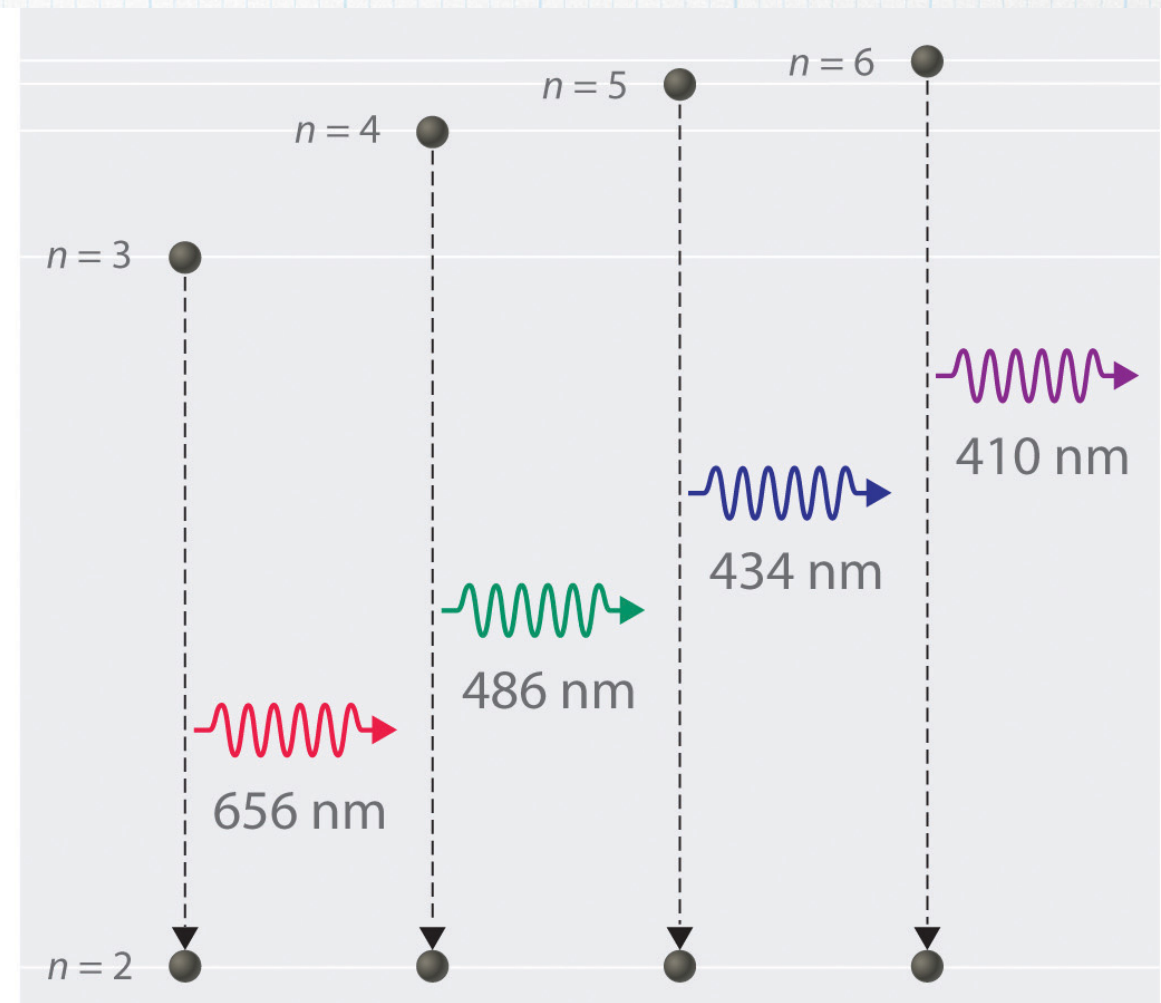
$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$



Emissão e absorção de fótons



(a) Electronic emission transition



(b) Balmer series transitions

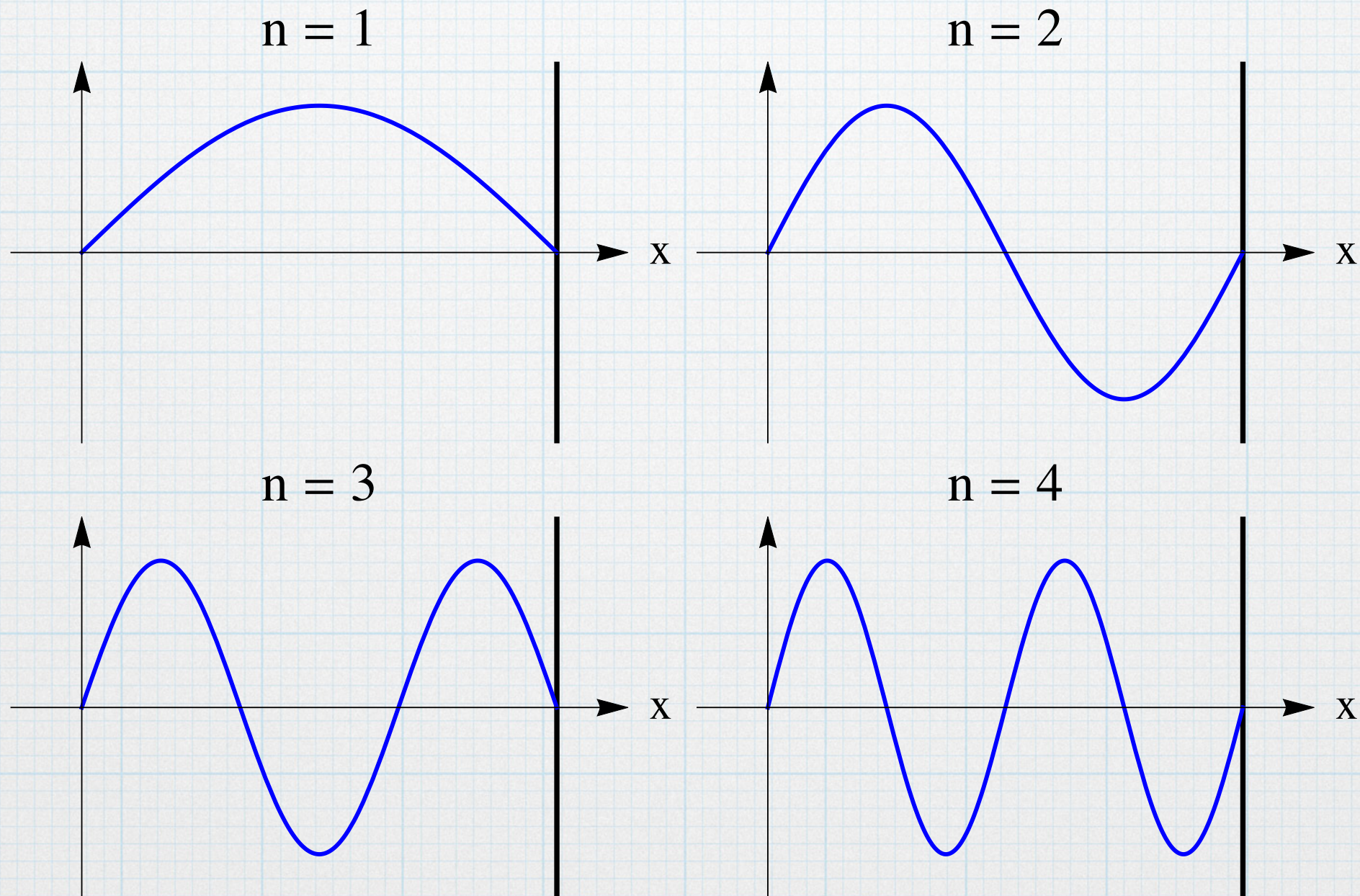
Contínuo vs. Discreto

- * 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

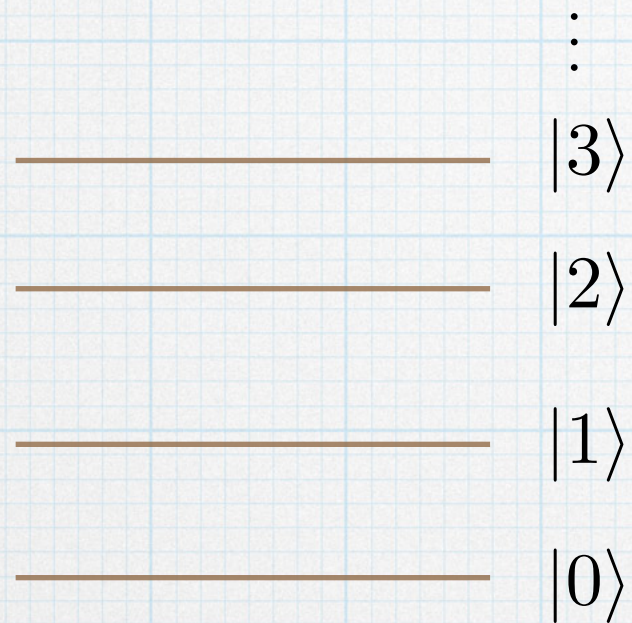
Quantisation as a Problem of Proper Values (Part I)

(*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.

Estrutura da mecânica quântica

* Um estado na mecânica quântica é definido por um conjunto de estados abstratos.



* O que aparece dentro de $|\rangle$ é apenas um rótulo para enumerar os estados.

* Princípio da superposição: qualquer combinação linear de estados também é um estado válido.

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |n\rangle$$

* Interpretação:

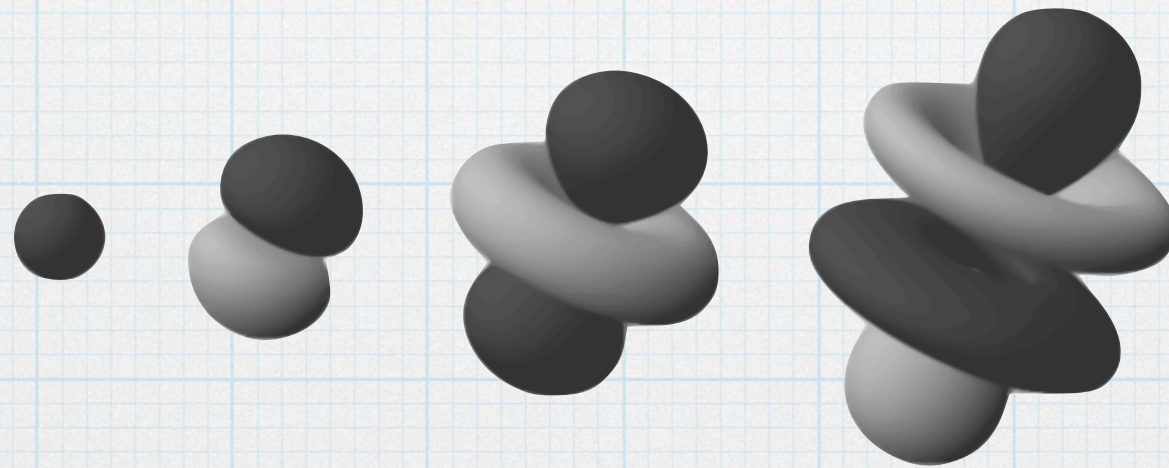
$$|c_n|^2 = \text{Prob. de encontrar o sistema no nível } n$$

* O significado destes estados na física quântica é diverso.

* Um estado pode, inclusive, ser a própria posição $|x\rangle$.

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |n\rangle \implies |\psi\rangle = \int dx \psi(x) |x\rangle$$

* Isso significa que é possível que o sistema esteja numa superposição de duas posições diferentes! 😱 😱



Princípio da incerteza de Heisenberg

* Para estar numa superposição de mais de um local do espaço, paga-se um preço:

* Não é possível saber com precisão o momento da partícula:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad \hbar = 1.054571817 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

* A constant de planck \hbar é super pequena!

* Se x e p são grandes, essa restrição é irrelevante.

* Mas quando x e p são pequenos, ela passa a importar.

Limite inferior
fundamental.

* Para os curiosos:

* Como fazemos para embutir o princípio da incerteza na teoria quântica?

* É necessário que:

$$xp = px + i\hbar$$

* Na física quântica “a ordem dos fatores altera o produto.”

* Multiplicar xp ou px não é a mesma coisa.

* A diferença é pequena (\hbar) e imaginária!

Realismo

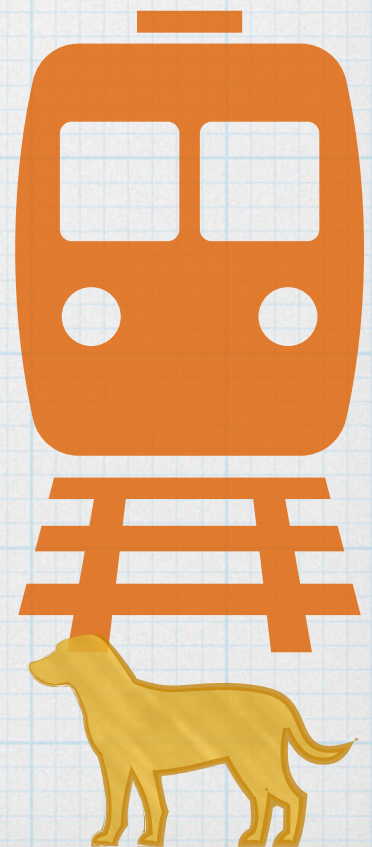
Realismo

- * Realismo é a idéia de que o sistema possui propriedades que independem da observação.
 - * “A lua está lá mesmo quando não olhamos para ela.”
- * O que significa então quando dizemos que o sistema está numa superposição de duas posições diferentes?

$$|\psi\rangle = \int dx \psi(x)|x\rangle \quad |\psi(x)|^2 = \text{prob. de encontrar o sistema em } x$$

- * Significa que nós não sabemos onde o sistema está?

- * Não! Nem o sistema sabe onde ele está.
 - * Sua posição não está definida antes da medida.
 - * A posição não é “real” (não tire essa frase de contexto!)
- * Mesmo assim, após a medida, a posição passa a ser bem definida.
- * Se medimos e encontramos a partícula em x_0 , então a partir daí a partícula estará em x_0 .
 - * “Colapso da função de onda.”
 - * A medida é sempre invasiva.
 - * Esse é o limite quântico.



Spooky!

- * Vamos mudar de sistema um pouco.
- * Considere um sistema com apenas dois níveis (qubit):

$$|0\rangle \quad e \quad |1\rangle$$

- * Qualquer superposição destes estados também é um estado válido. e.g.,

$$|\psi\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \quad \text{então} \quad \text{Prob}(0) = \text{Prob}(1) = \frac{1}{2}$$

- * Se depois da medida o sistema foi encontrado em 0, então o novo estado do sistema será o 0.

* Suponha agora que temos 2 qubits.

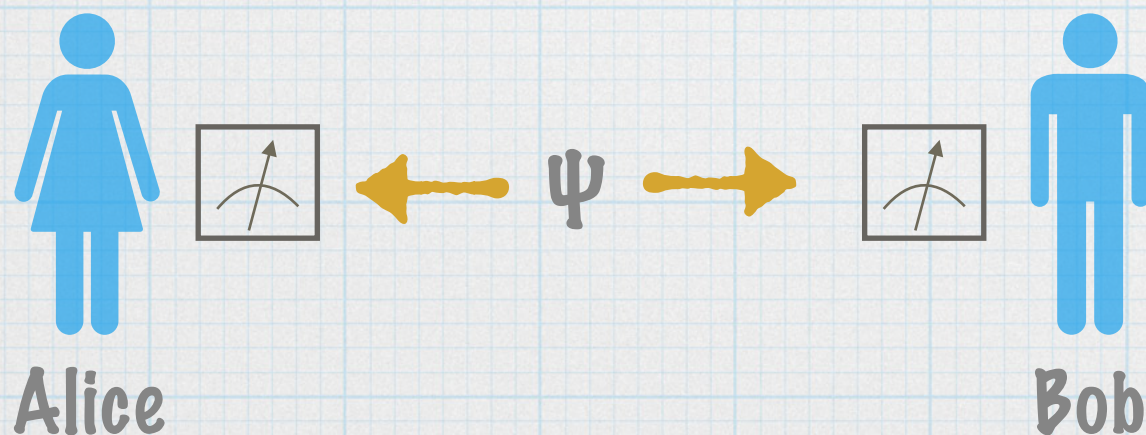
* Um possível estado é

$$|\psi\rangle = \frac{|0, 0\rangle + |1, 1\rangle}{\sqrt{2}}$$

* Agora mandamos um qubit para Alice e outro para Bob.

* Se Alice mede e encontra 0 então o estado do sistema tem de colapsar para

$$|\psi\rangle \rightarrow |0, 0\rangle$$



* O estado do qubit do Bob mudou sem ele fazer nada!

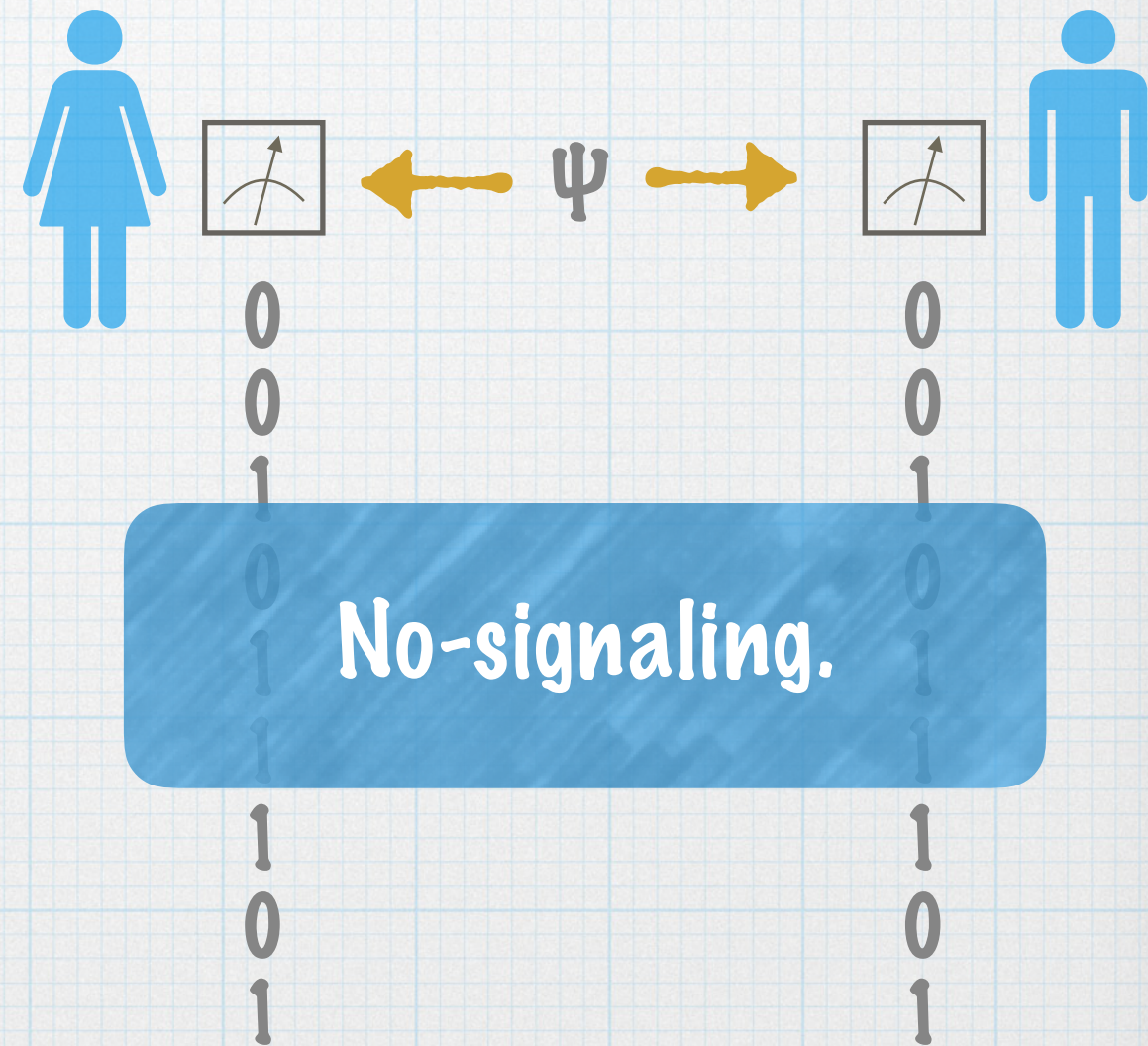
* Mesmo se o Bob estiver em Marte!

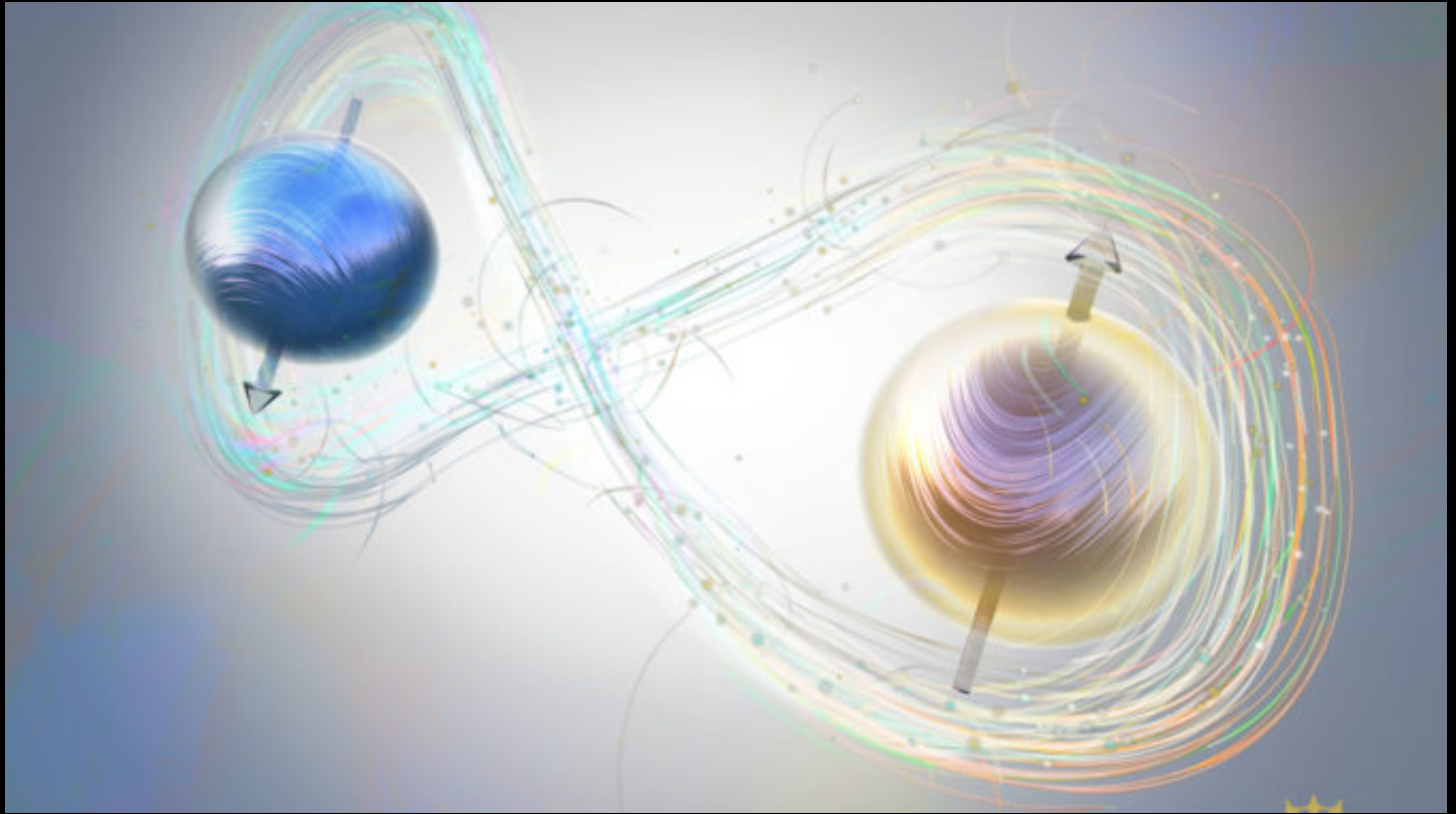
Emaranhamento

- * Essa é a idéia de emaranhamento.
- * Einstein achava que esse efeito era informacional:
 - * Nós simplesmente não sabíamos qual era o estado antes.
 - * Quando Alice mediu, não foi o estado que mudou, mas simplesmente o nosso conhecimento sobre ele.
- * Mas hoje sabemos que isso não é verdade:
 - * O estado do sistema de fato muda. Podemos mostrar isso experimentalmente.

- * Einstein não concordava com isso pois achava que esse conceito violava causalidade: comunicação super-luminal.
- * Mas infelizmente esse não é o caso:
 - * Não podemos usar emaranhamento para fazer comunicação super-luminal.

- * Imagine que Alice mede, depois Bob.
- * Do ponto de vista de Bob, ele simplesmente obtém 0s e 1s aleatoriamente.
- * Só consegue saber que esses resultados estão correlacionados com os da Alice se eles compararem os dados.





- * Apesar do no-signaling, emaranhamento é um conceito enigmático.
- * O que leva as partículas da natureza a se correlacionarem dessa forma tão fundamental?
- * Essa é uma das perguntas em aberto.
- * Cabe a vocês responderem!

Obrigado!