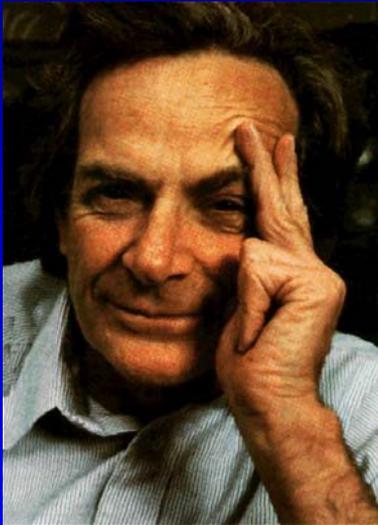




# O Mundo dos Quanta

---

*Luiz Davidovich - UFRJ*



“Não leve essa aula muito a sério... apenas relaxe e desfrute dela. Vou contar para vocês como a natureza se comporta. Se você admitir simplesmente que ela tem esse comportamento, você a considerará encantadora e cativante. Não fique dizendo para você mesmo “Mas como ela pode ser assim?” porque nesse caso você entrará em um beco sem saída do qual ninguém escapou ainda. Ninguém sabe como a natureza pode ser assim”.

*Richard Feynman (1918-1988)*  
*Prêmio Nobel de Física 1965*



# Laplace (1749-1827)



“Uma inteligência que, em qualquer instante dado, conhecesse todas as forças pelas quais o futuro, assim como o passado, mundo se move e a posição e velocidade de cada uma de suas partes componentes, ..., poderia enquadrar na mesma fórmula os movimentos dos maiores objetos do Universo e aqueles dos menores átomos”.



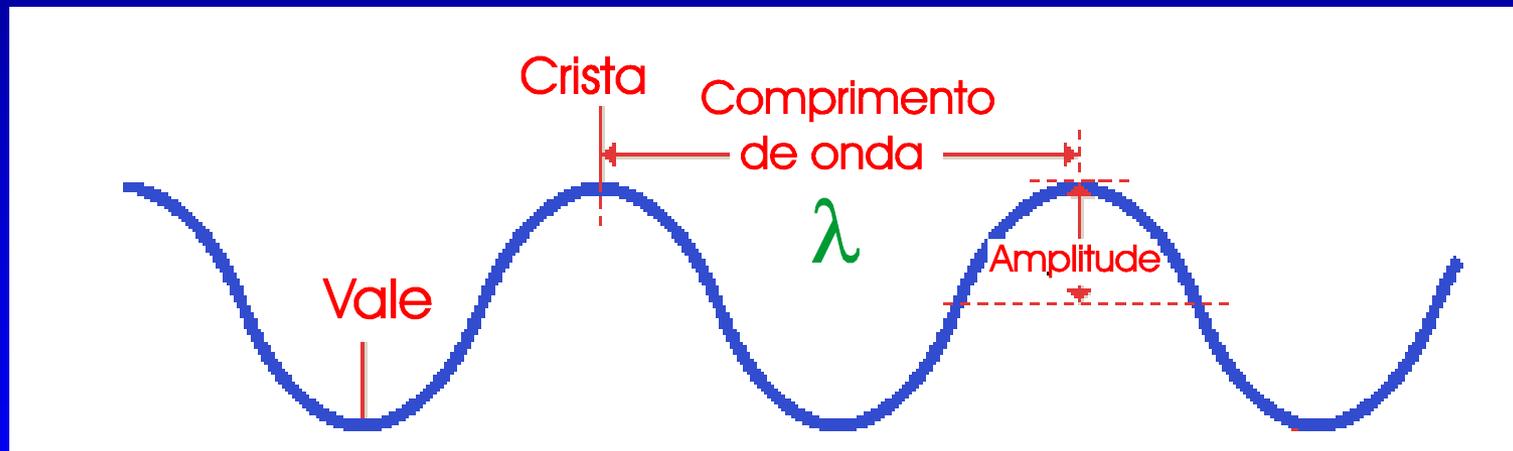
# Determinismo clássico

A descrição exata do movimento de uma partícula (em termos de posição e velocidade) é possível desde que conheçamos as condições iniciais do movimento (posição e velocidade iniciais), as forças em todos os instantes e a massa do corpo em estudo.

*Posição e momentum: estado do corpo*

**MOMENTUM:  $P = M \times V$**

# Física clássica: luz é uma onda

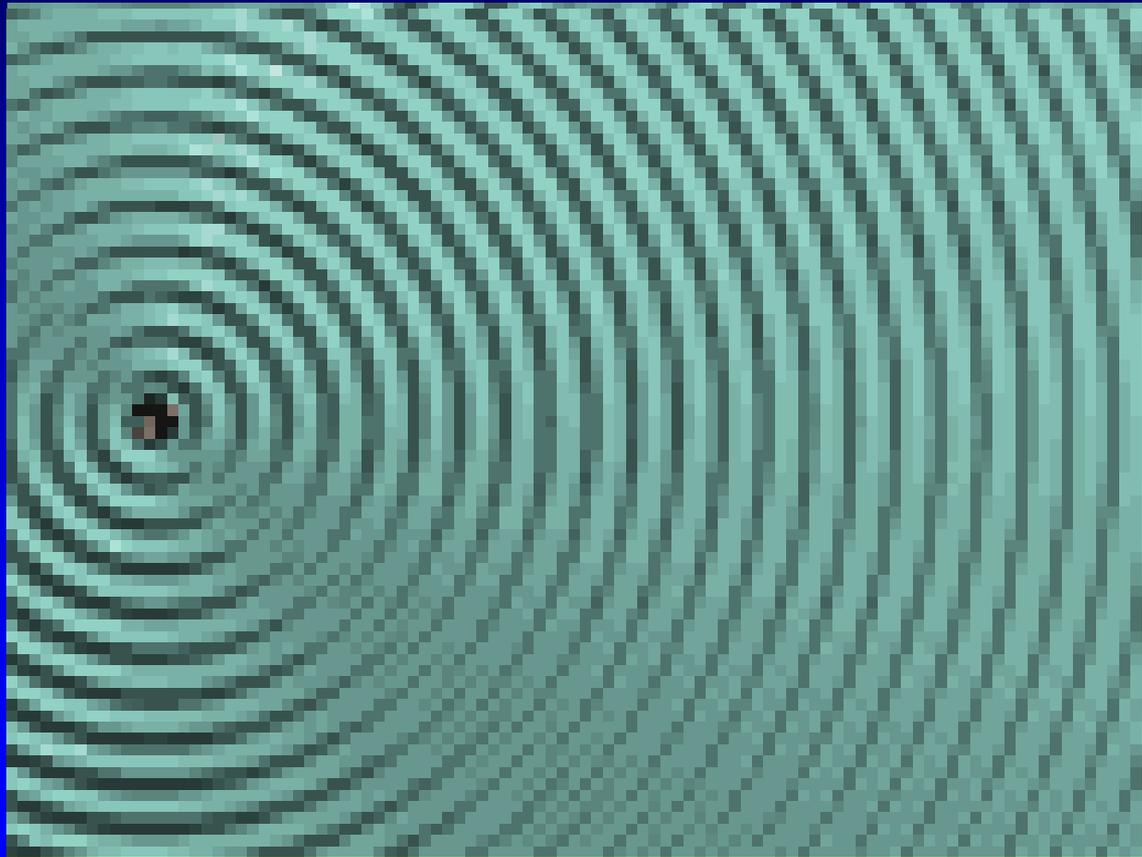


Frequência de oscilação (cor):

$$f = c / \lambda$$



# Ondas interferem!



Ondas em um  
tanque com água



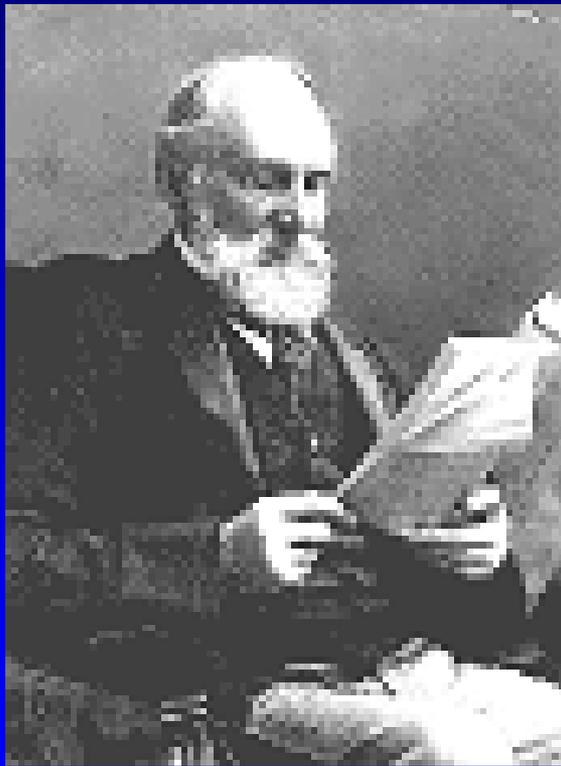
# Luz: comportamento ondulatório

-luz=sombra!

a por uma  
ndas, e  
escuras.



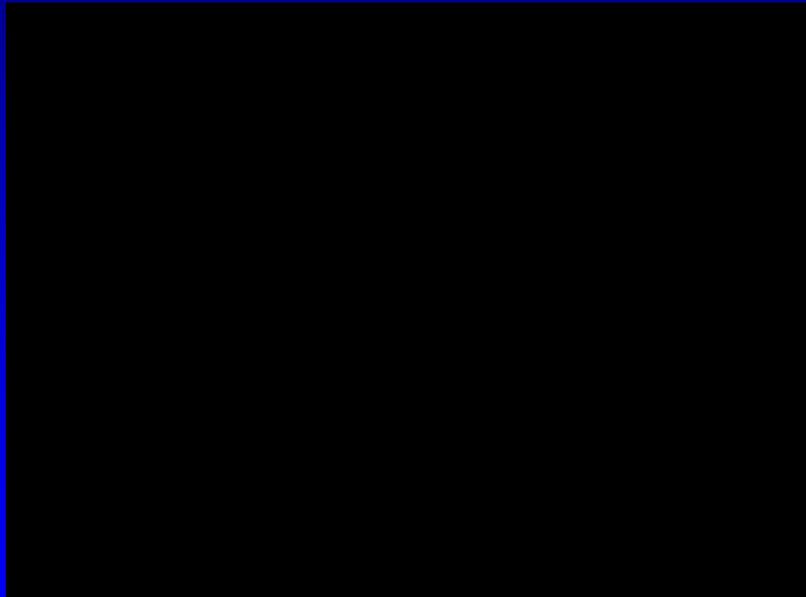
# Final do século XIX



**Lord Kelvin (1824-1907):** “Física é um céu azul, com pequenas nuvens no horizonte”.



# Crise na Física Clássica

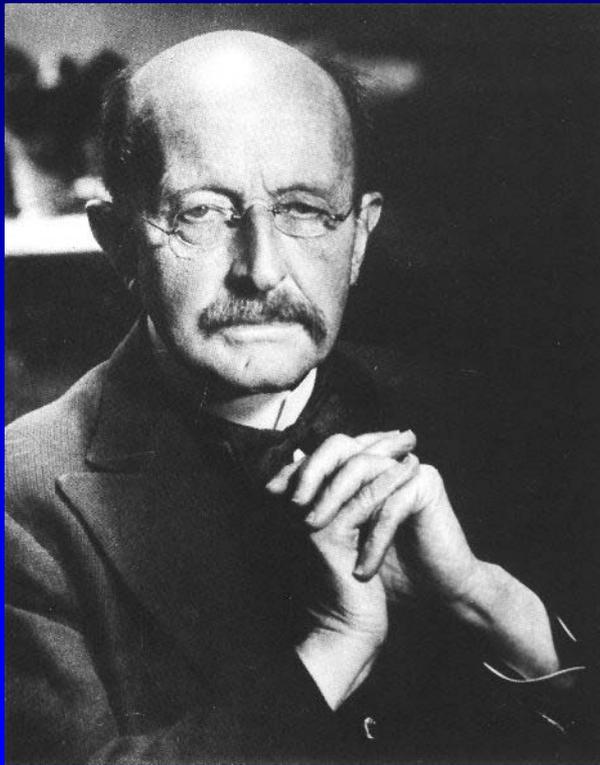


Física clássica não conseguia explicar porque cor da radiação emitida por um corpo aquecido muda de vermelho para laranja e depois para branco, à medida em que aumenta a temperatura

Por que azul não é emitido para temperaturas baixas?



# A revolução dos quanta



*Planck, 12 de dezembro de 1900: Emissão de radiação é feita por pacotes (*quanta*), com energia proporcional à frequência (cor).*

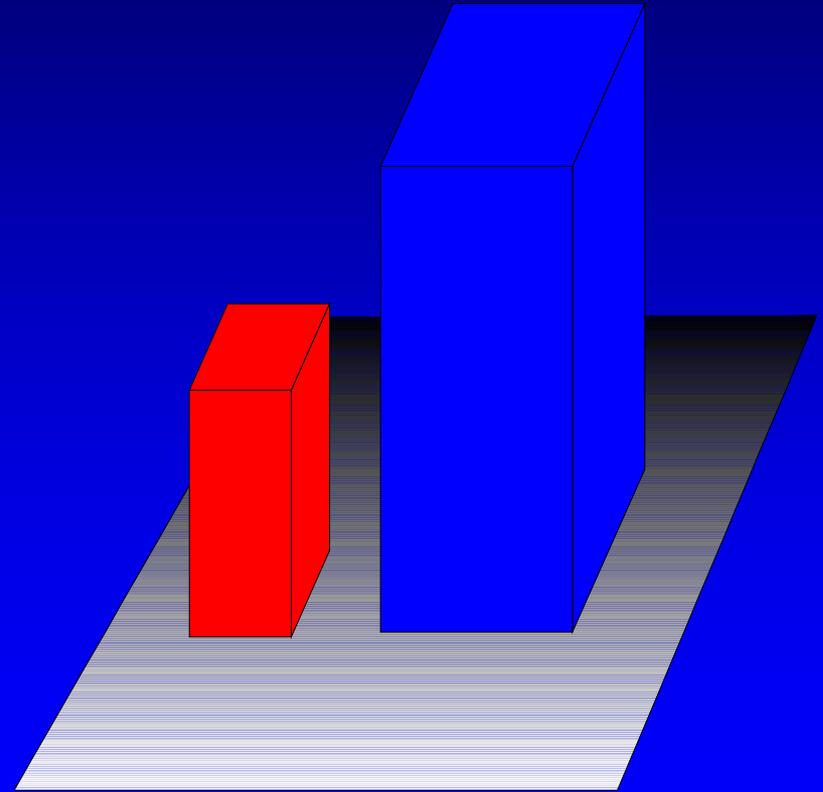
$$E = h \times f$$

Constante de Planck



# Solução do Planck

Para emitir luz azul, é necessário liberar um pacote com mais energia que para luz vermelha, o que exige uma temperatura maior (frequência da luz azul é maior que a da vermelha).



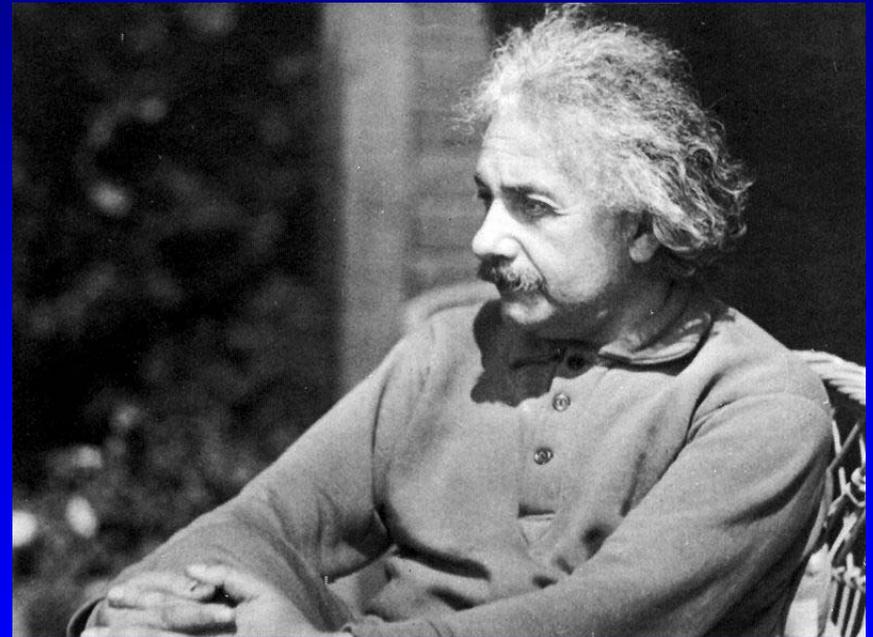


# Einstein, 1905

Luz comporta-se como se fosse constituída de corpúsculos: *fótons*

$$E = h \times f$$

$$p = h / \lambda$$



Dualidade onda-partícula



# De Broglie: Ondas piloto

De Broglie, 1923:  
Estendeu a dualidade  
onda-partícula para  
partículas subatômicas,  
como os elétrons. Ondas  
“guiavam” as partículas.

$$p = h / \lambda \Rightarrow$$

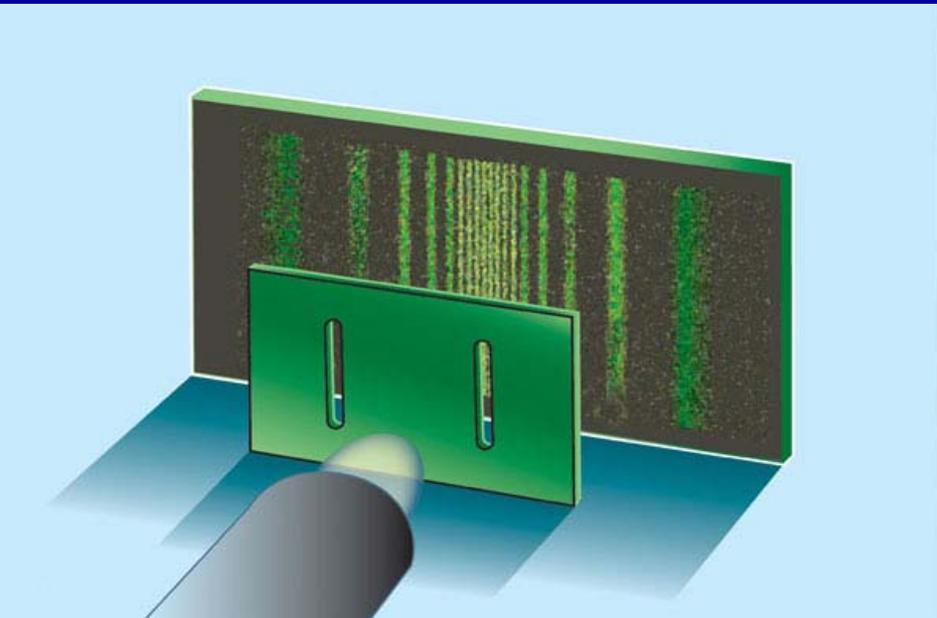
$$\lambda = h / mv$$





# Interferência de átomos

Shimizu, Universidade de Tóquio





# A Nova Mecânica Quântica



Bohr (Nobel 1922)

Born (Nobel 1954)

Dirac (Nobel 1933)

Heisenberg (Nobel 1932)

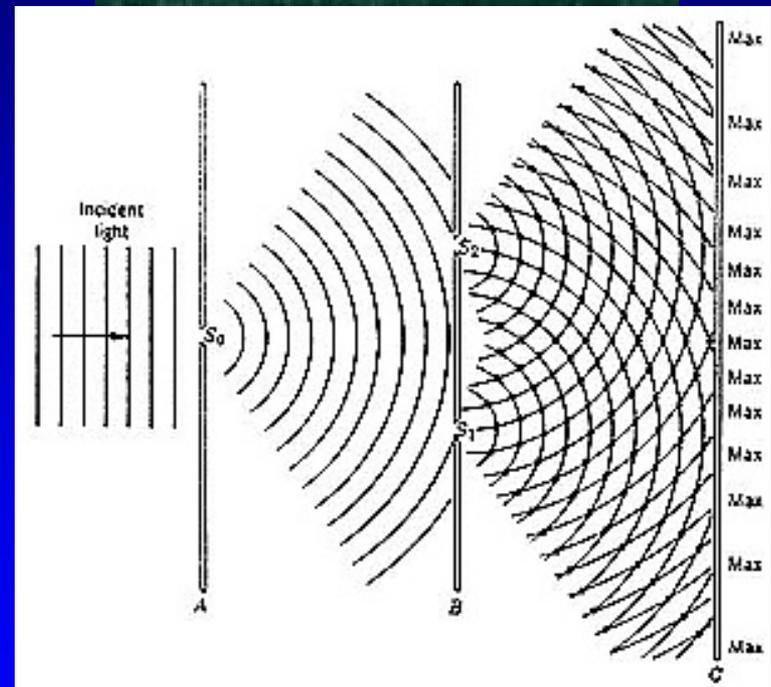
Pauli (Nobel 1945)

Schrödinger (Nobel 1933)

# Ondas de probabilidade (Born)

Onda associada à partícula descreve a *probabilidade* de que a partícula seja encontrada em determinada região.

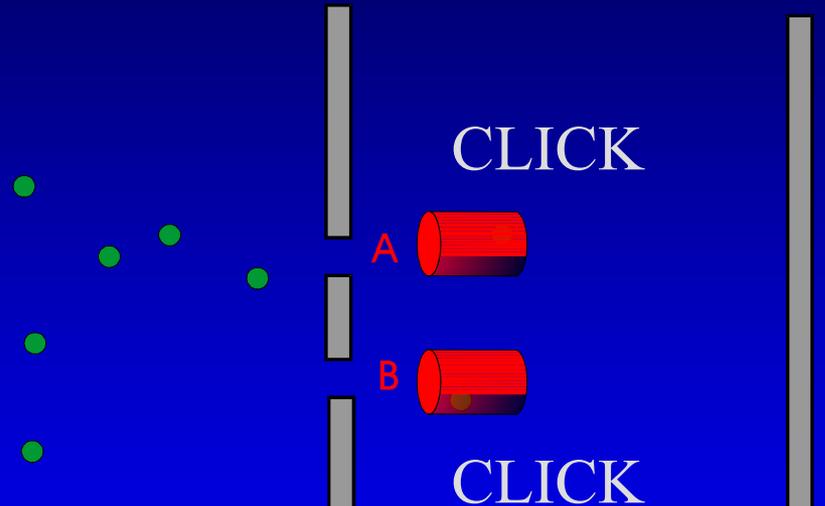
Dois caminhos possíveis  $\Rightarrow$  interferência!



# Fenda dupla

No experimento com fenda dupla, cada fóton (ou elétron) tem 50% de chance de passar por A ou por B

Mas será que realmente a partícula passa por uma fenda ou outra? Quem sabe ela se divide?



Ao demonstrarmos que cada partícula passa por A ou por B, a interferência some!

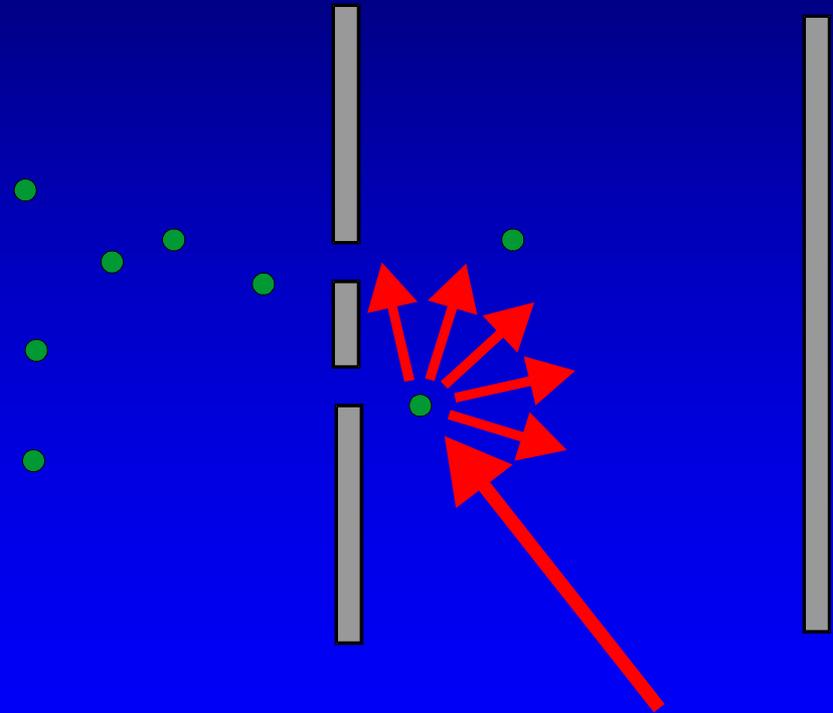


# Complementaridade (Bohr)

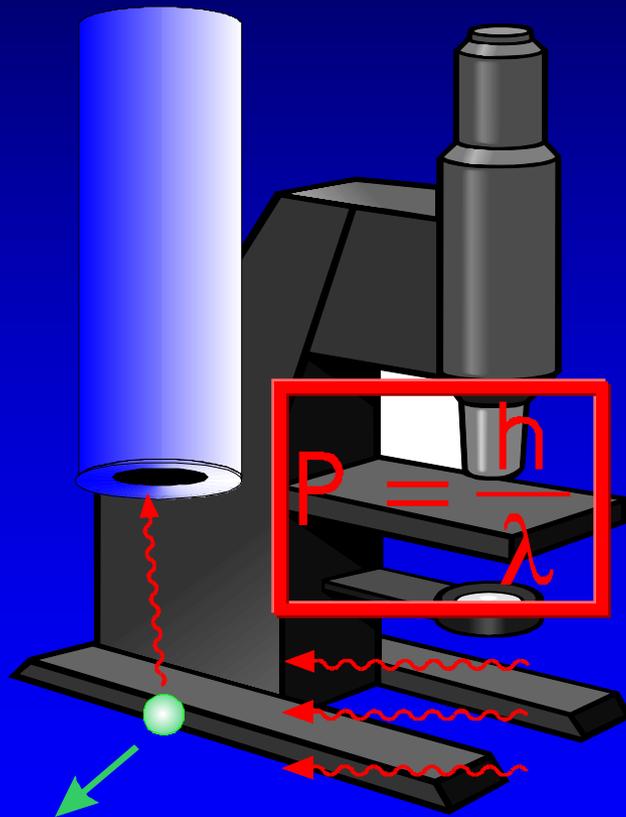
Medir por onde passa o elétron (ou fóton) destrói interferência!

Medida perturba *necessariamente* o objeto medido

Se há interferência *não podemos dizer* que fóton passou por A ou B: estado não-localizado!



# Princípio da Incerteza

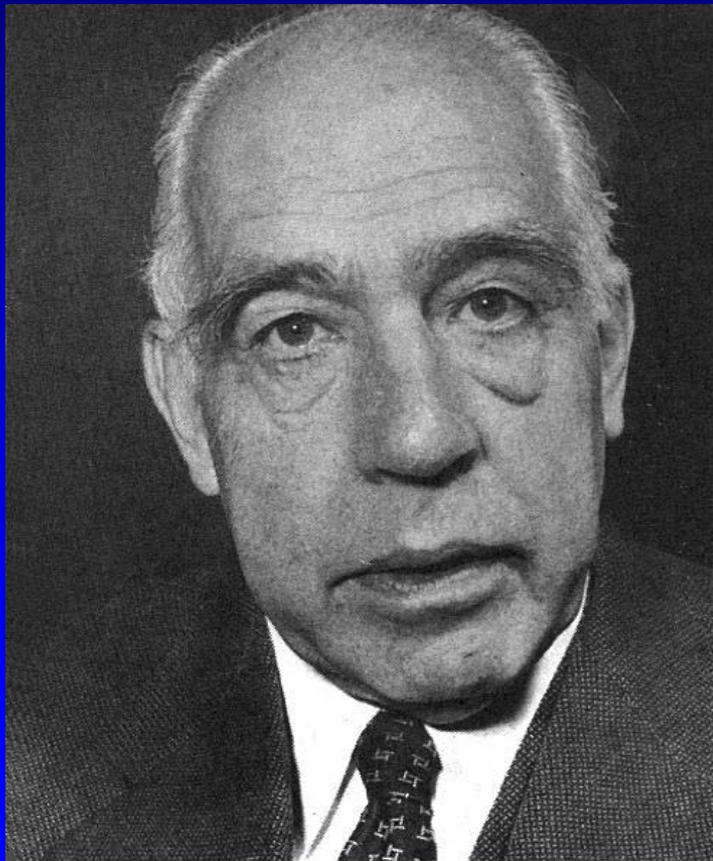


Ao tentarmos medir a posição de uma partícula, perturbamos sua velocidade: produto dos erros deve ser maior que a constante de Planck!

*Microscópio de Heisenberg*



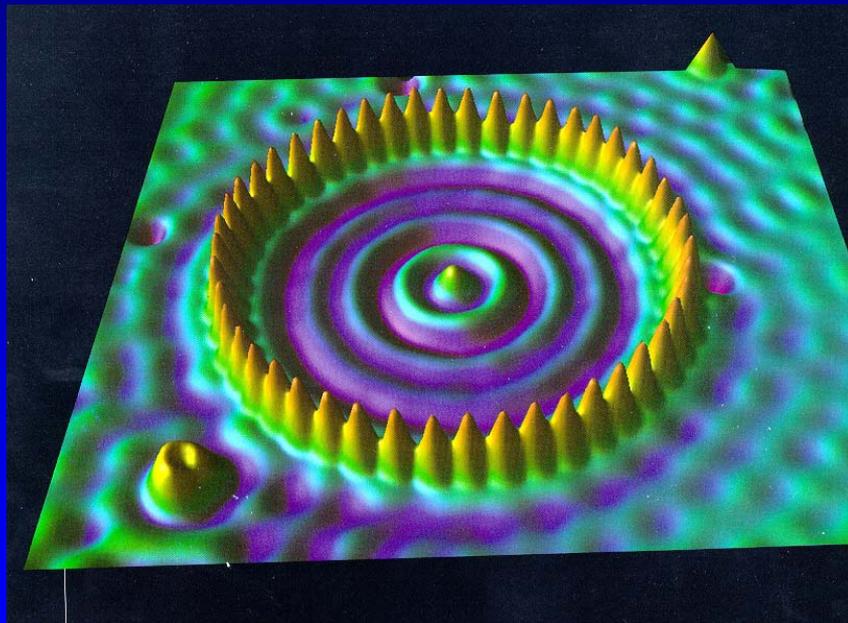
# Niels Bohr, 1935 - Escola de Copenhagen



“As condições de medida constituem um elemento inerente a qualquer fenômeno ao qual o termo ‘realidade física’ possa ser atribuído.

Isso requer uma revisão radical de nossa atitude com relação ao problema da realidade física”.

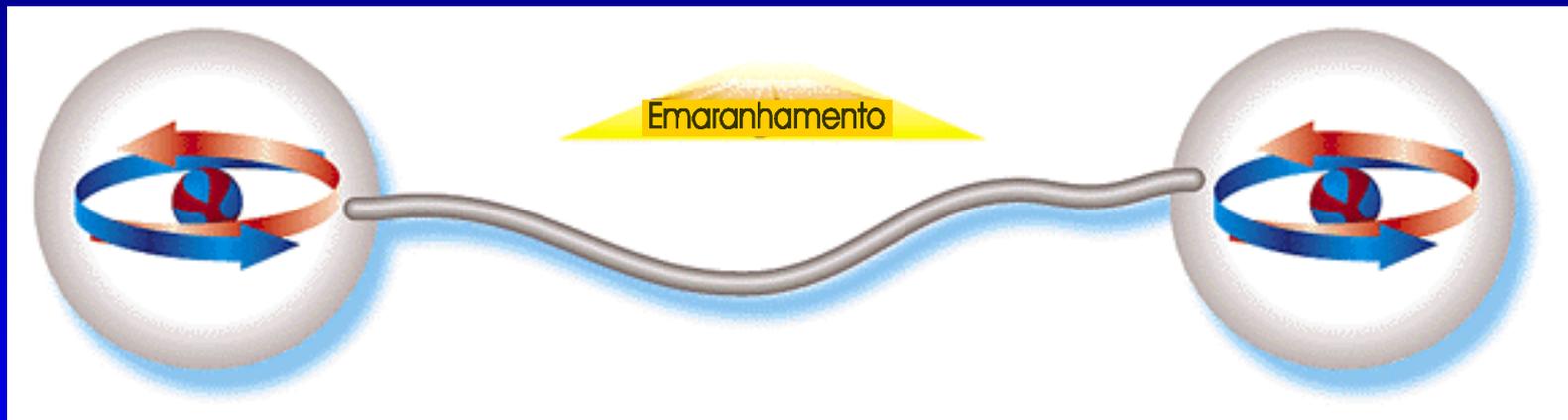
# Curral de elétrons



Átomos de Ferro sobre uma superfície de cobre prendem elétrons dentro de um “curral”

Fotografia feita com microscópio de tunelamento (IBM)

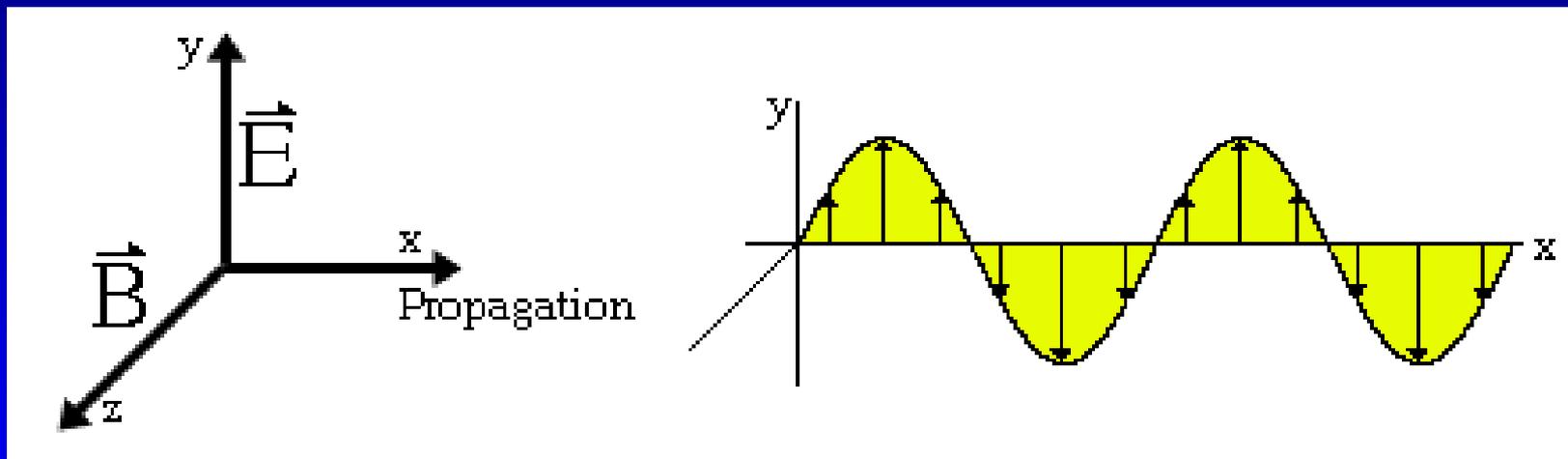
# Estados emaranhados



Einstein: “*Fantasmagórica ação à distância*”

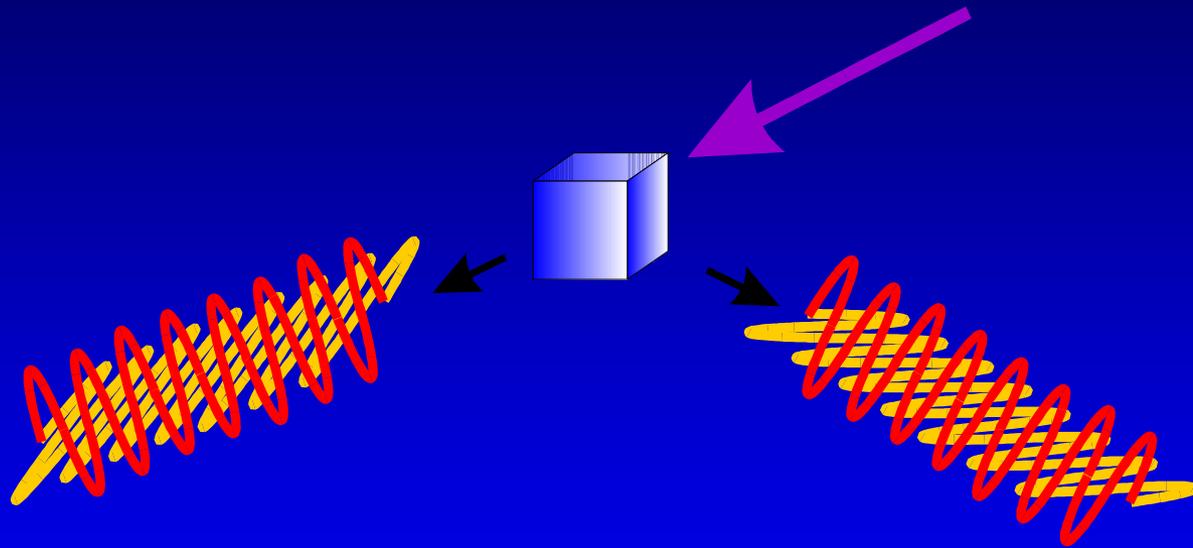


# Polarização da luz





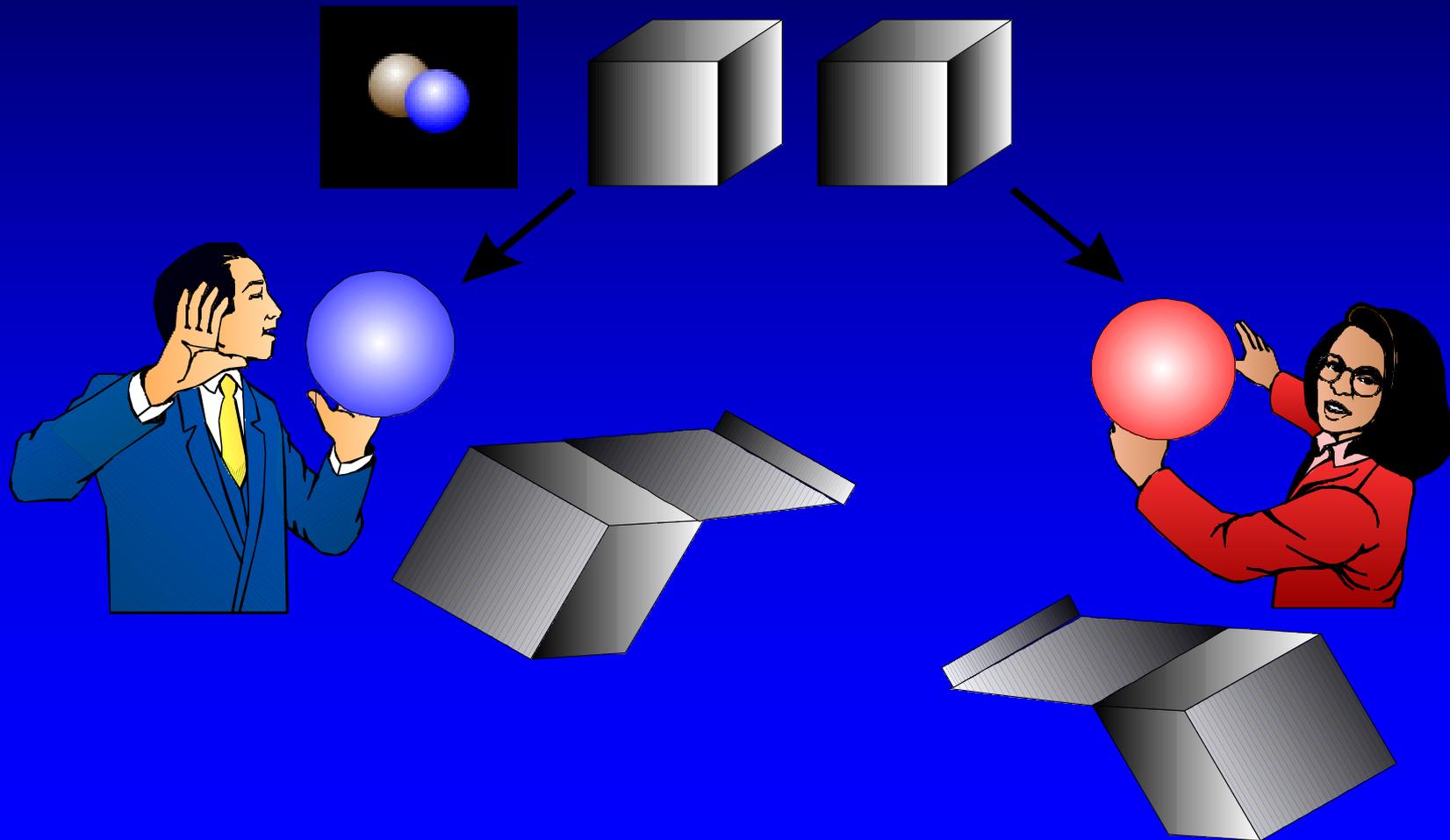
# Estados emaranhados: fótons gêmeos



Cristal iluminado por um laser: saem dois fótons, um polarizado verticalmente e outro horizontalmente, mas não sabemos qual tem polarização vertical

Medida da polarização do fóton 1 determina a do fóton 2!

# Alternativa clàssica





# John S. Bell (1964)



É possível distinguir experimentalmente entre situação quântica e alternativa clássica

Polarização do fóton não é definida antes da medida!

Alain Aspect (Paris): resultado experimental (1982)



# Aplicações possíveis

Criptografia quântica: demonstrações recentes em Genebra e Viena

Teletransporte de estados quânticos

Computação quântica?

Nanotecnologia: número de átomos por bit tende a um em 2015-2020.

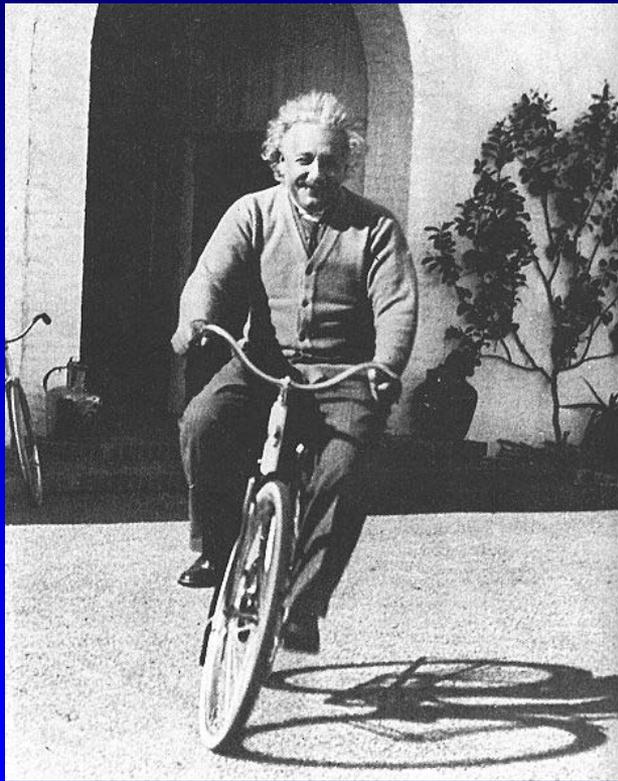
# Nanotecnologia

Todo o conhecimento humano caberia em um disco de 25 cm de diâmetro!

Letras escritas com átomos de Xenônio implantados em uma superfície de níquel



# O que é um fóton?



“Todos esses cinquenta anos de reflexão não me trouxeram mais perto da resposta à questão ‘O que é um fóton?’ Hoje em dia todo Tom, Dick e Harry pensa que sabe a resposta, mas ele está enganado”.



# Física quântica e revolução tecnológica no século XX

Transistor  $\Rightarrow$  Revolução da informática

Laser (em 1960, “uma solução em busca de um problema”)  $\Rightarrow$  Medicina, telecomunicações, navegação, CD's

Ressonância magnética nuclear  $\Rightarrow$  Medicina

Novos materiais  $\Rightarrow$  Aplicações industriais e medicinais



# Conclusão possível

“Parece estranho e parece estranho e parece muito estranho; mas de repente não parece mais estranho, e não conseguimos entender o que fez parecer tão estranho para começar”

(Gertrude Stein, sobre a arte moderna)



# Referências

---

L. Davidovich, “O Gato de Schrödinger: Do mundo quântico ao mundo clássico”, *Ciência Hoje*, vol. 24, no. 143, págs. 26-35 (Outubro de 1998)

Olival Freire Jr. e Rodolfo A. de Carvalho Neto, *O Universo dos Quanta*, Editora FTD, São Paulo, 1997.

[Http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/lobby.html](http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/lobby.html)