

# A mecânica quântica através de exemplos simples

Amir O. Caldeira

IFGW-UNICAMP



**inct**  
institutos nacionais  
de ciência e tecnologia



# Viajando nas escalas de comprimento

$10^0$

1 metro

Estamos  
olhando para  
um ramo de  
folhas com o  
braço  
esticado...

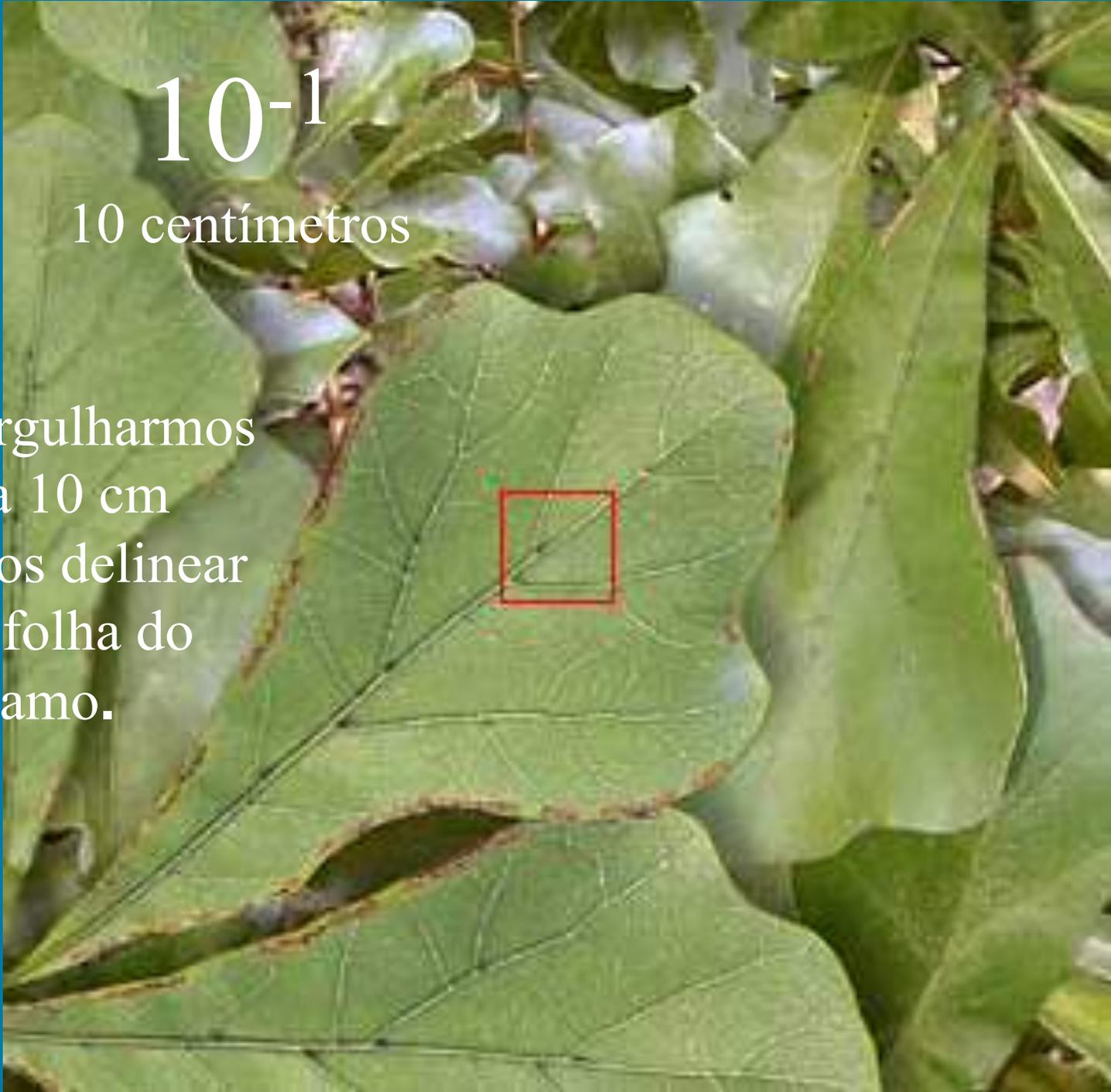


micro-macro-potencia-de-104782.ppt

10<sup>-1</sup>

10 centímetros

Ao mergulharmos  
para 10 cm  
podemos delinear  
uma folha do  
ramo.



$10^{-2}$

1 centímetro

Nesta distância  
é possível  
enxergar as  
primeiras  
estruturas da  
folha.



$10^{-3}$

1 milímetro

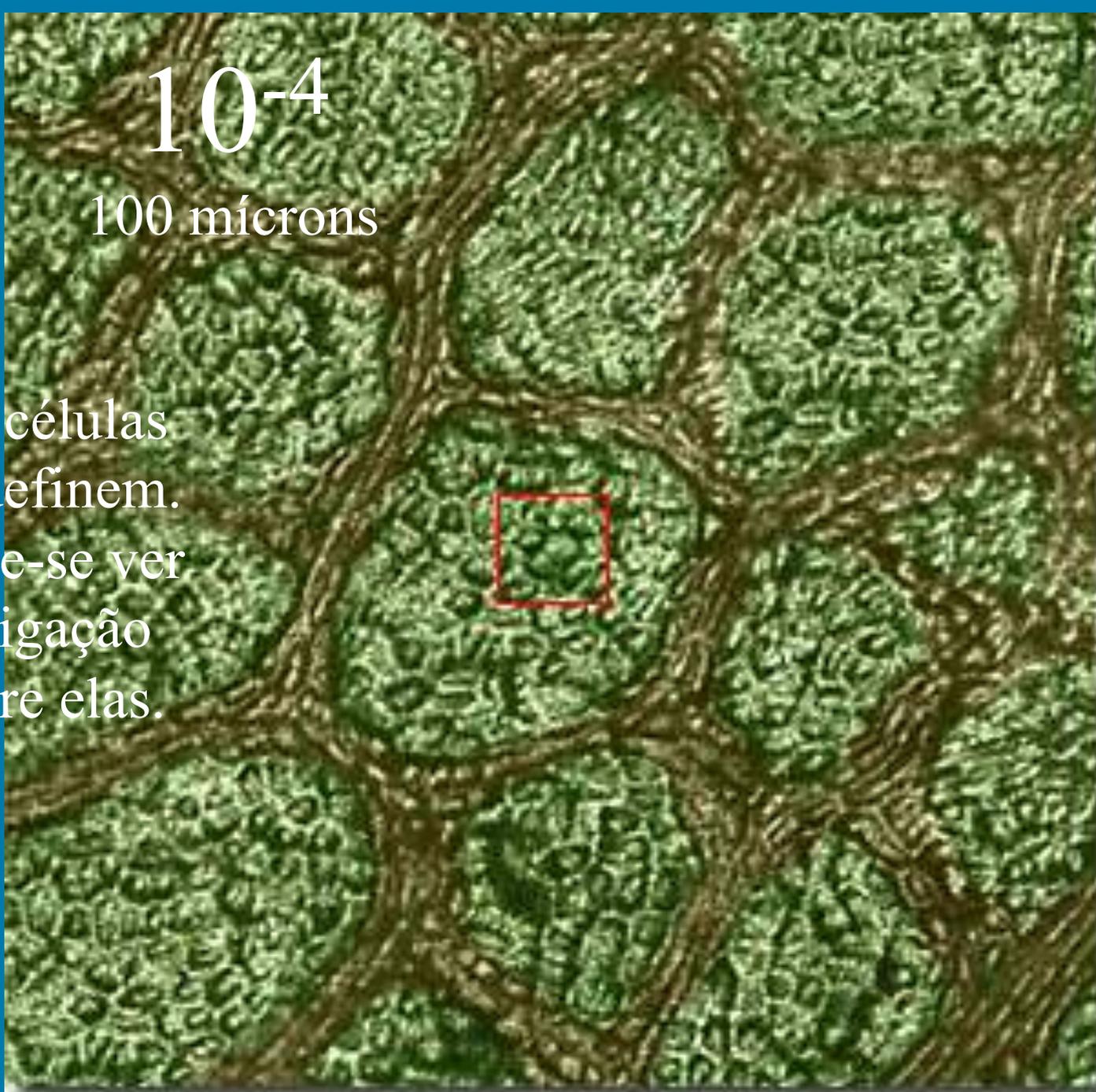
As estruturas  
celulares  
começam a  
aparecer ...



$10^{-4}$

100 microns

As células  
se definem.  
Pode-se ver  
a ligação  
entre elas.



$10^{-5}$

10 microns

Começa  
nossa viagem  
ao interior da  
célula



$10^{-6}$

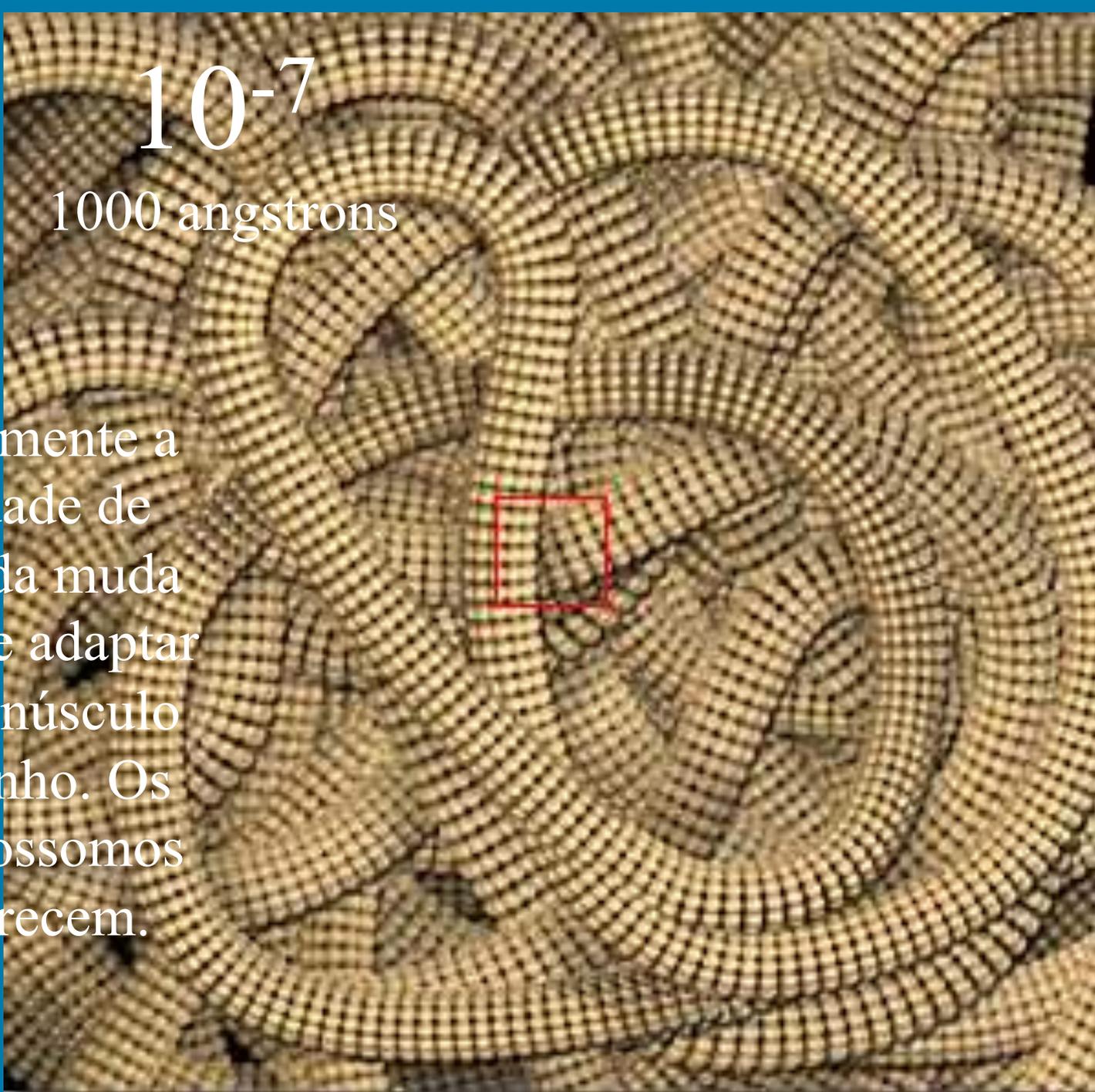
1 mícron

O núcleo da  
célula já fica  
visível.



$10^{-7}$

1000 angstroms

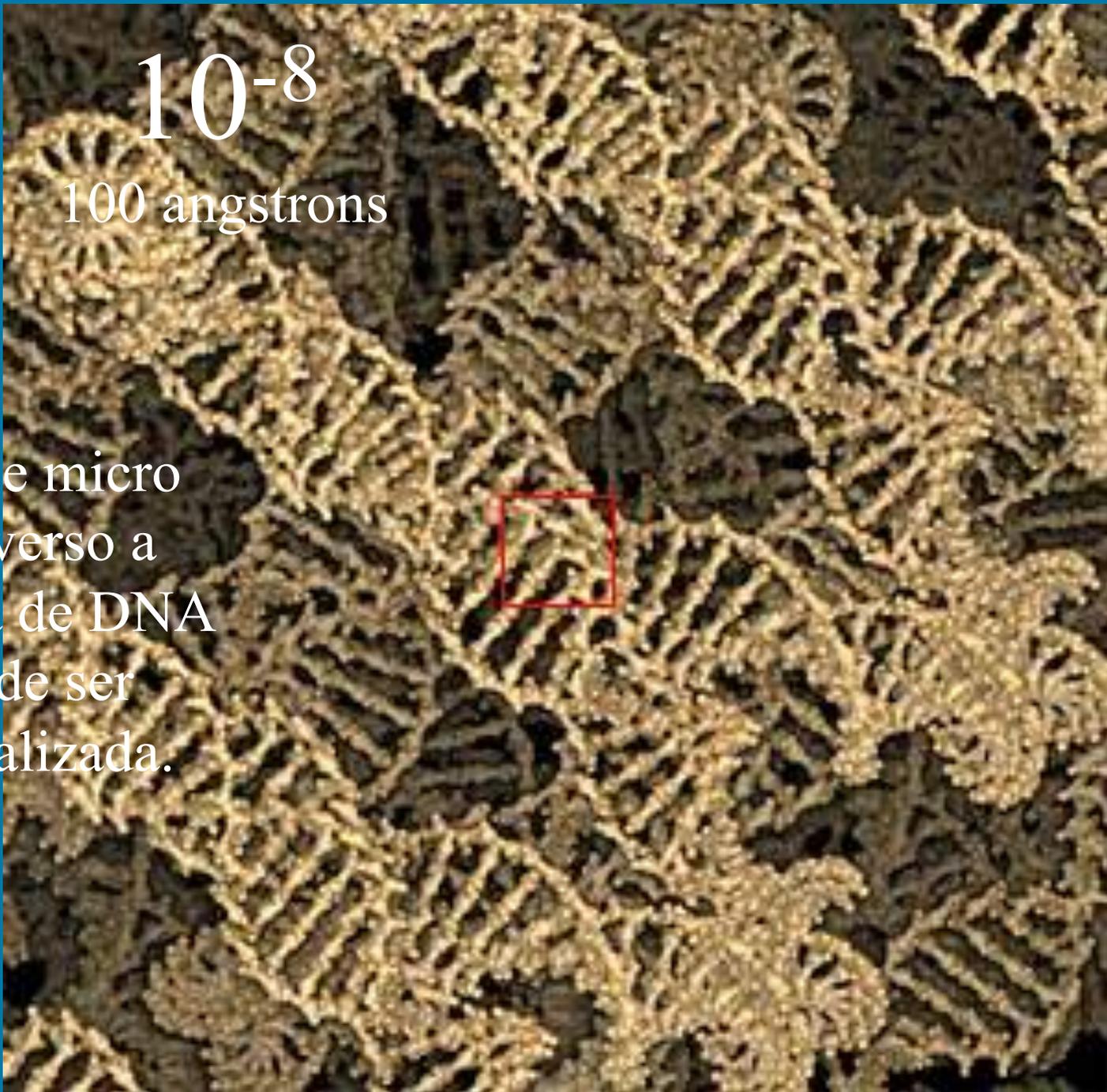


Novamente a unidade de medida muda para se adaptar ao minúsculo tamanho. Os cromossomos aparecem.

$10^{-8}$

100 angstroms

Nesse micro  
universo a  
cadeia de DNA  
pode ser  
visualizada.



$10^{-9}$

10 angstroms

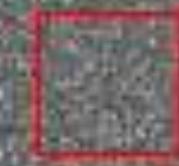
Os blocos cromossômicos podem ser estudados.



$10^{-10}$

1 angstrom

Aparecem as  
nuvens de elétrons  
do átomo de  
carbono. Tudo em  
nosso mundo é  
feito disso



$10^{-11}$

10 picometros

Neste mundo  
em miniatura  
podemos  
observar os  
elétrons no  
campo do  
átomo.



$10^{-12}$

1 picometro

Um imenso espaço  
vazio entre o  
núcleo e as órbitas  
de elétrons.



# $10^{-13}$

100 femtometros

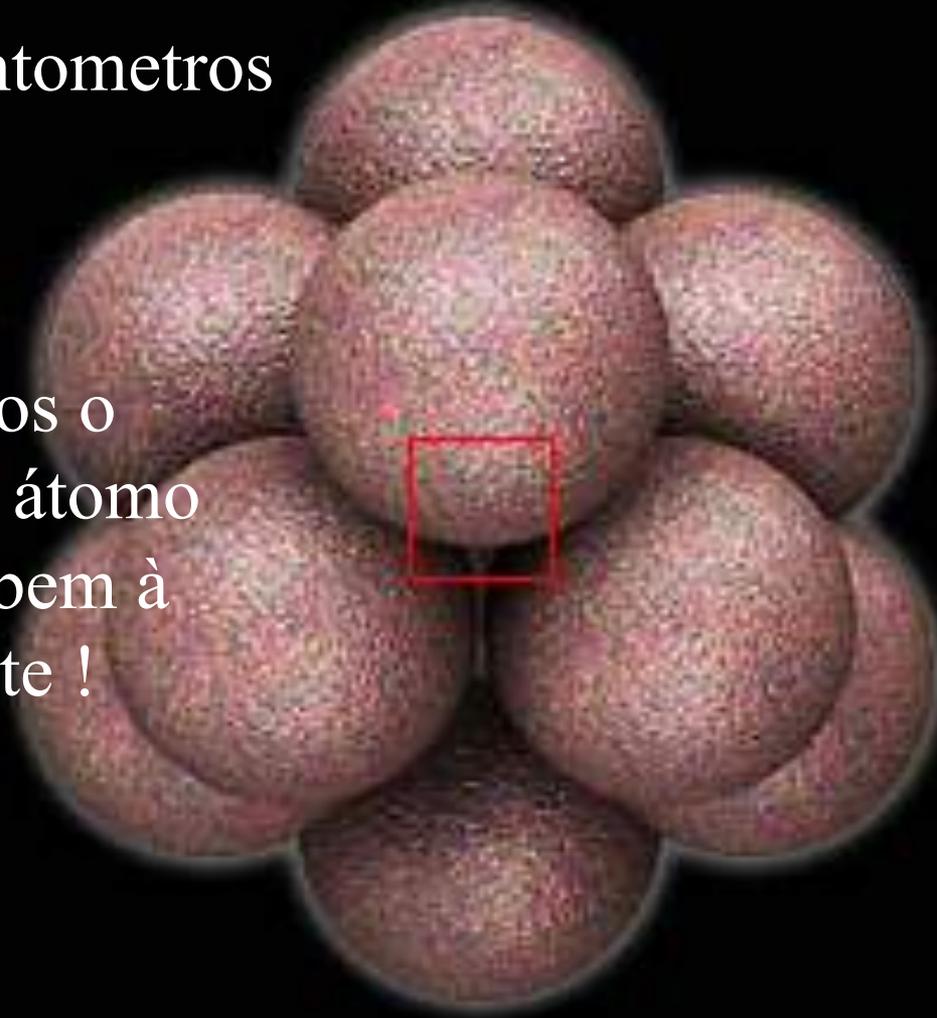
Neste incrível e minúsculo tamanho começamos a “enxergar” o núcleo do átomo, ainda pequeno.



$10^{-14}$

10 femtometros

Agora temos o  
núcleo de um átomo  
de Carbono bem à  
nossa frente !



$10^{-15}$

1 femtometro

Aqui já  
estamos no  
campo da  
imaginação  
científica ....  
face a face  
com um  
próton.

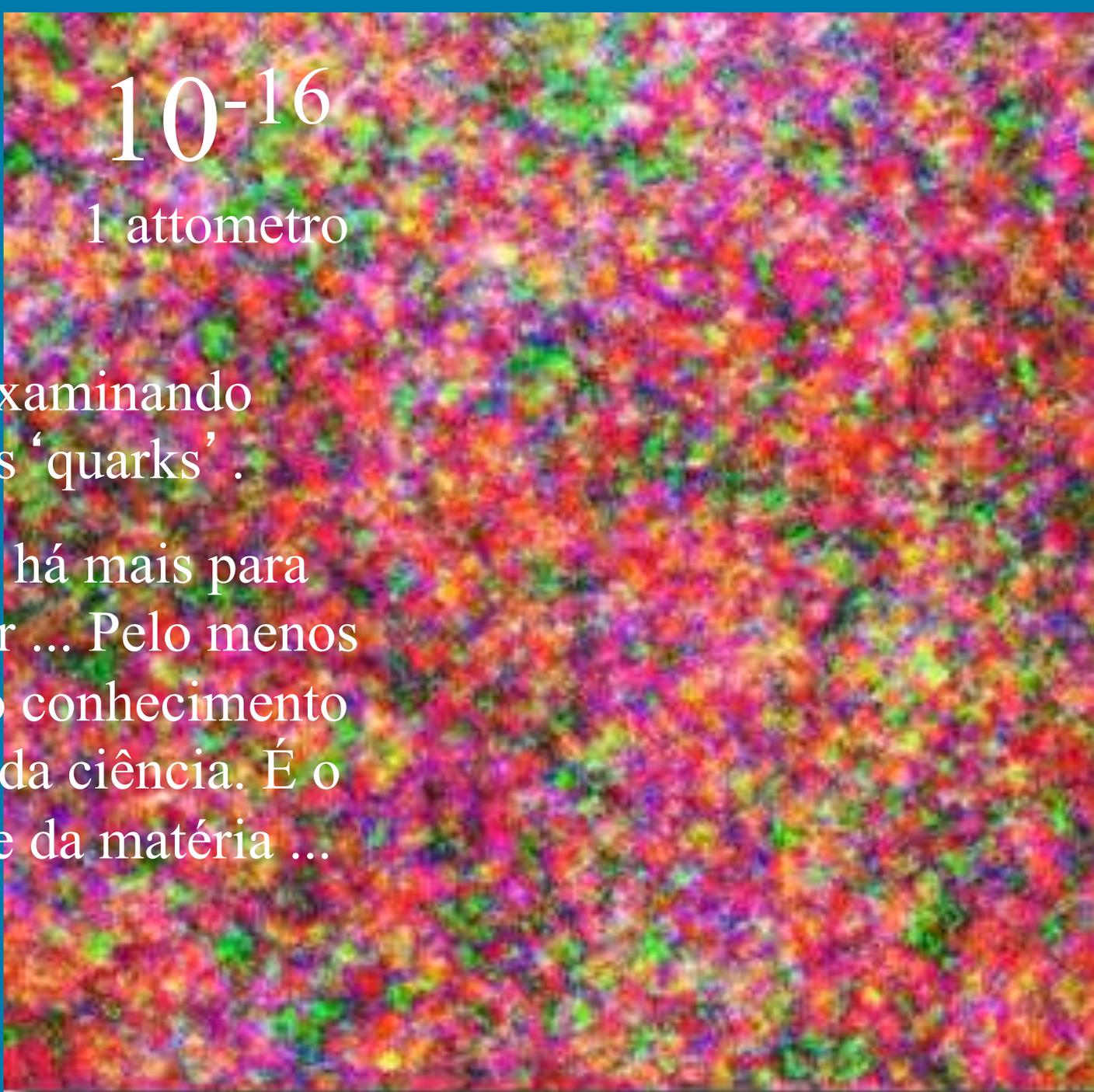


$10^{-16}$

1 attometro

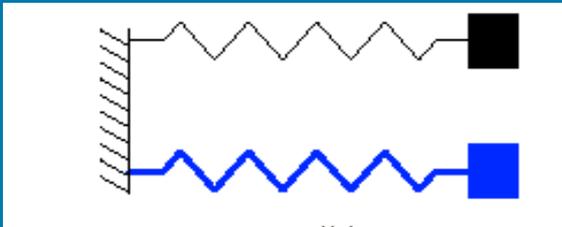
Examinando  
os 'quarks'.

Não há mais para  
onde ir ... Pelo menos  
com o conhecimento  
atual da ciência. É o  
limite da matéria ...



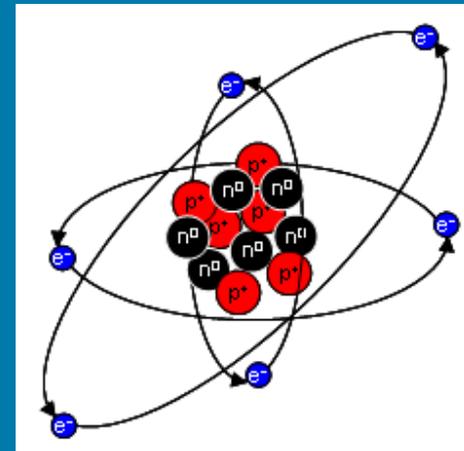
Pergunta: os fenômenos físicos podem ser descritos da mesma forma em todas essas escalas?

Terminologia: o que são sistemas clássicos e quânticos?



Clássico  
(macroscópico)

$$d \geq 10^{-6} m$$

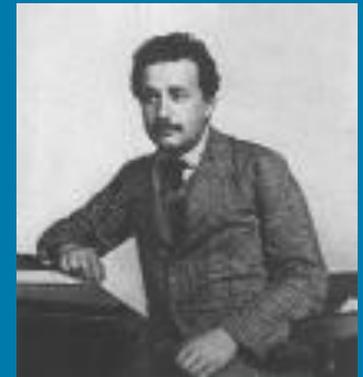


Quântico  
(microscópico)

$$d \leq 10^{-9} m$$

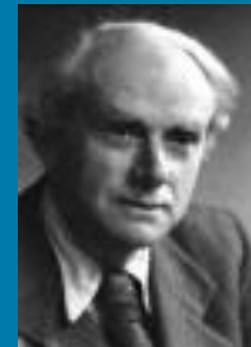
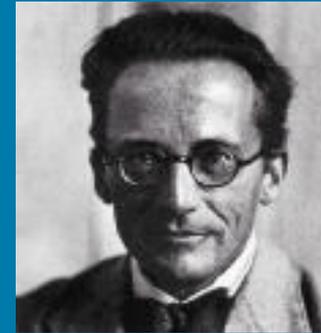
# A Mecânica Quântica

- Na virada do século XX a Física Clássica não consegue explicar diversos fenômenos observados experimentalmente.
- Hipóteses de Planck, Einstein, Bohr e de Broglie culminam com a criação de uma nova teoria na década de 1920;



A Mecânica Quântica

- Um novo paradigma para as teorias físicas.
- Formulações complementares; Schrödinger & Heisenberg.
- A visão unificada de Dirac.
- O que é o sistema físico? A ênfase na observação; a teoria da medida. von Neumann.



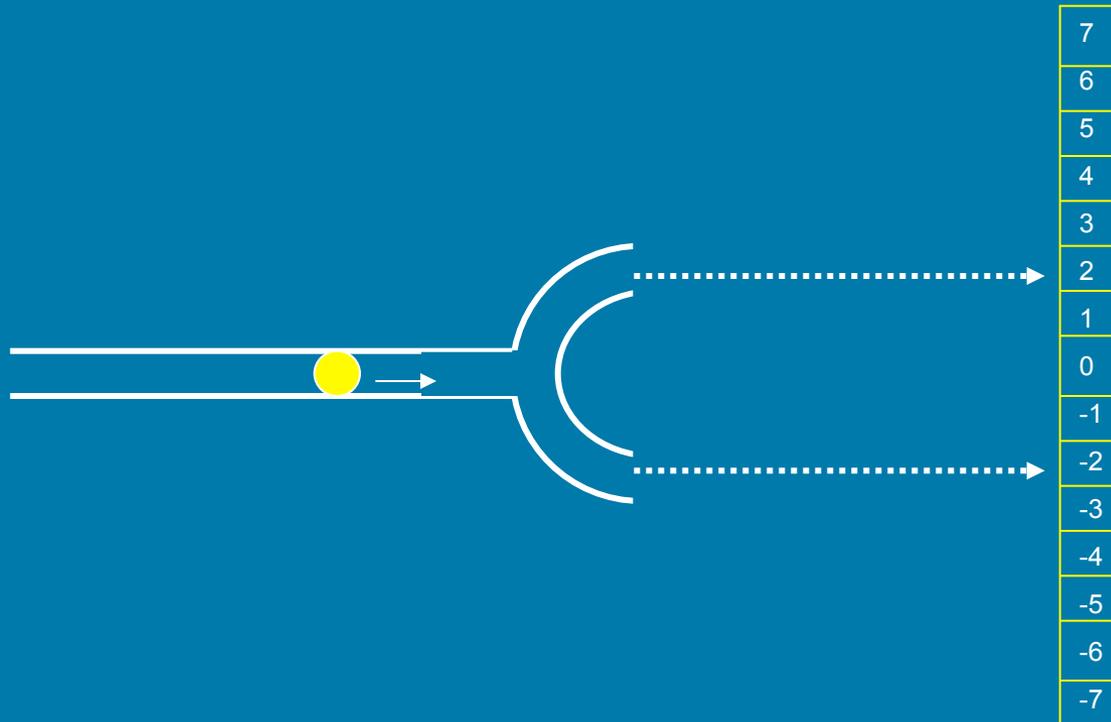
# A Mecânica Quântica

- Um conjunto de regras que descreve a **evolução temporal** e os resultados de **observações de grandezas** de um sistema físico.
- Seus efeitos são fortemente evidenciados nas escalas **molecular, atômica e sub-atômica**.
- Na escala macroscópica, aquela do nosso cotidiano, a física quântica reproduz (**sob certas condições**) os resultados e previsões da física clássica.

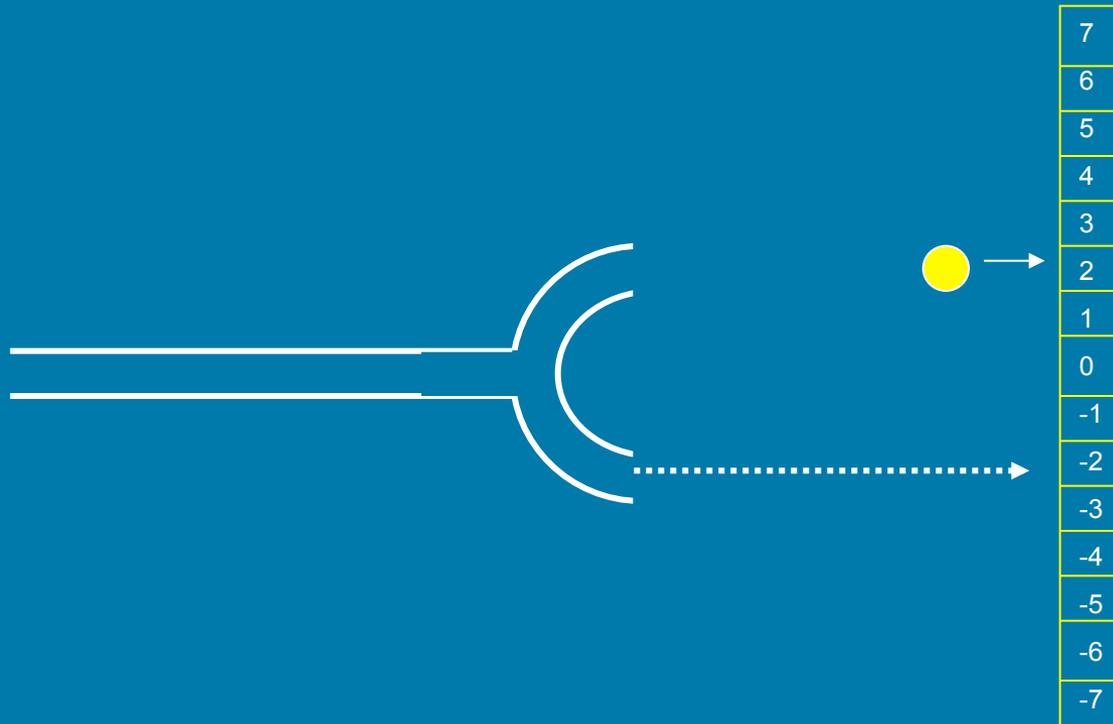
# Física Quântica x Física Clássica através de alguns exemplos

## 1º exemplo:

Um objeto é enviado através de um conduto que se separa em dois. Saindo por uma ou outra opção segue até atingir uma caixa numerada.



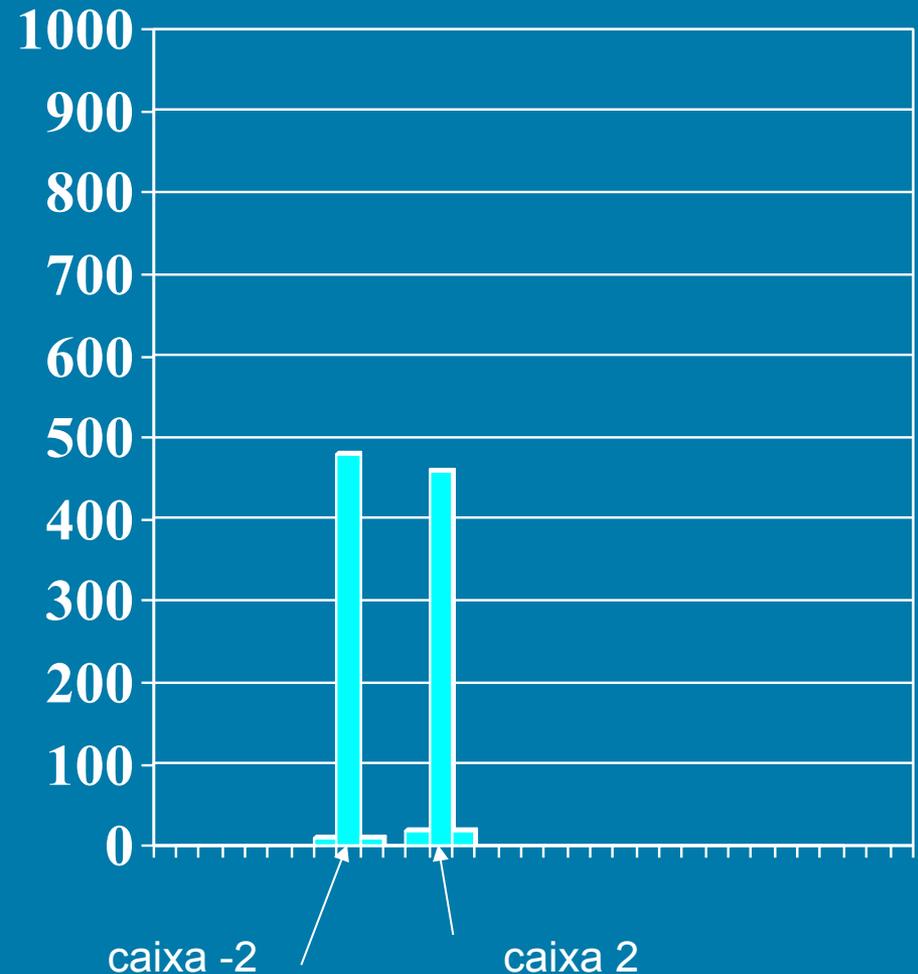
- a mesma experiência é realizada em 1000 cidades diferentes
- coleta-se os números das caixas que foram atingidas pelo objeto em cada cidade e conta-se quantas vezes cada caixa foi atingida.



# Resultados

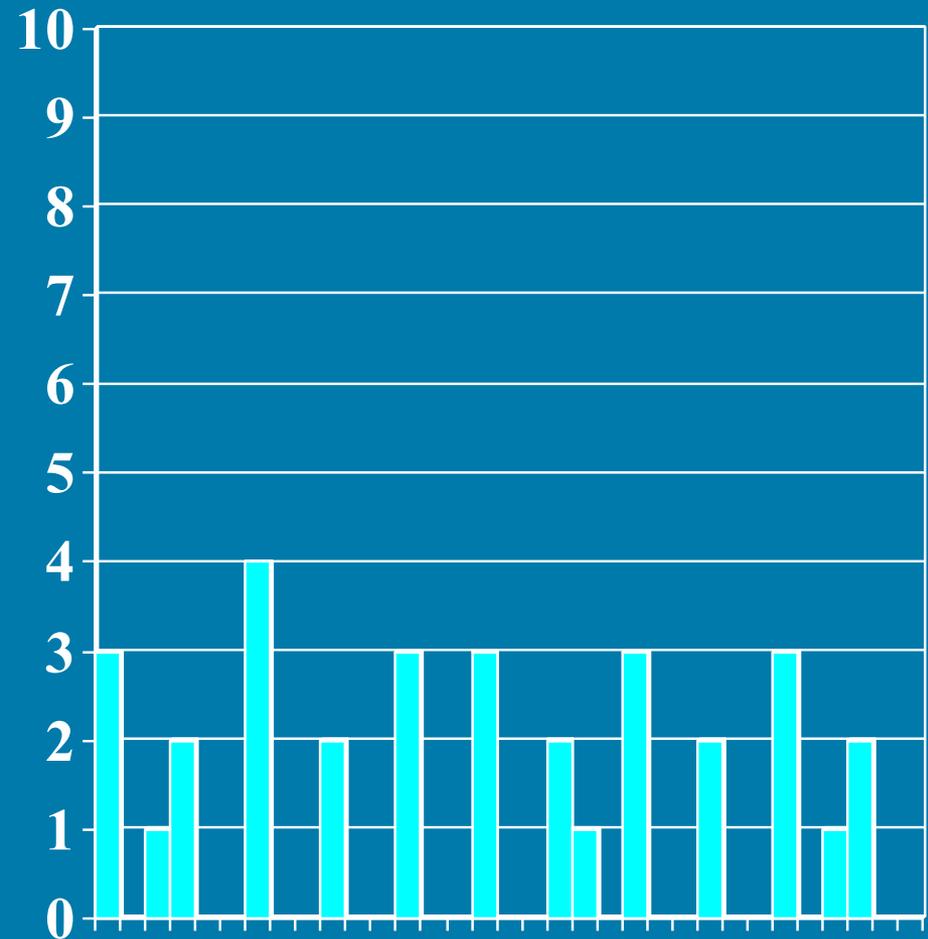
Se o objeto é clássico, uma bola de bilhar, por exemplo, observa-se

- Campinas – caixa 2
- São Paulo – caixa -2
- Rio de Janeiro – caixa -2
- 
- 
- 
- 
- Paris – caixa -2
- New York – caixa 2

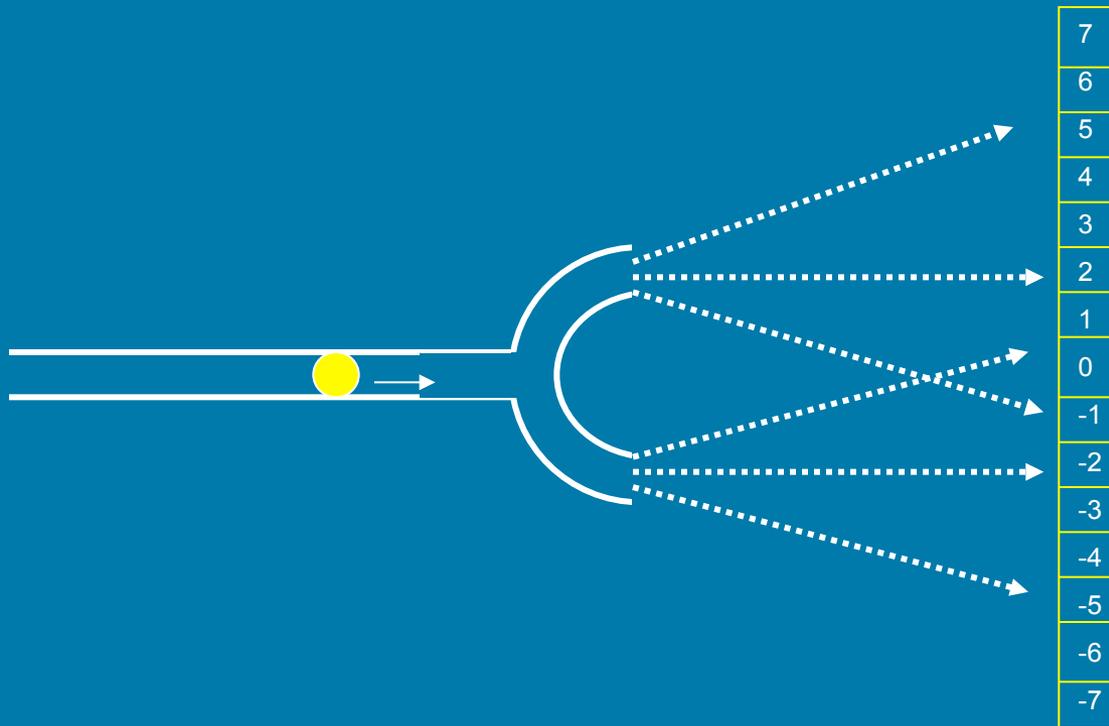


Se o objeto é quântico, um átomo, por exemplo, observa-se

- Campinas – caixa 50
- São Paulo – caixa -20
- Rio de Janeiro – caixa -2
- 
- 
- 
- 
- Paris – caixa -70
- New York – caixa 200

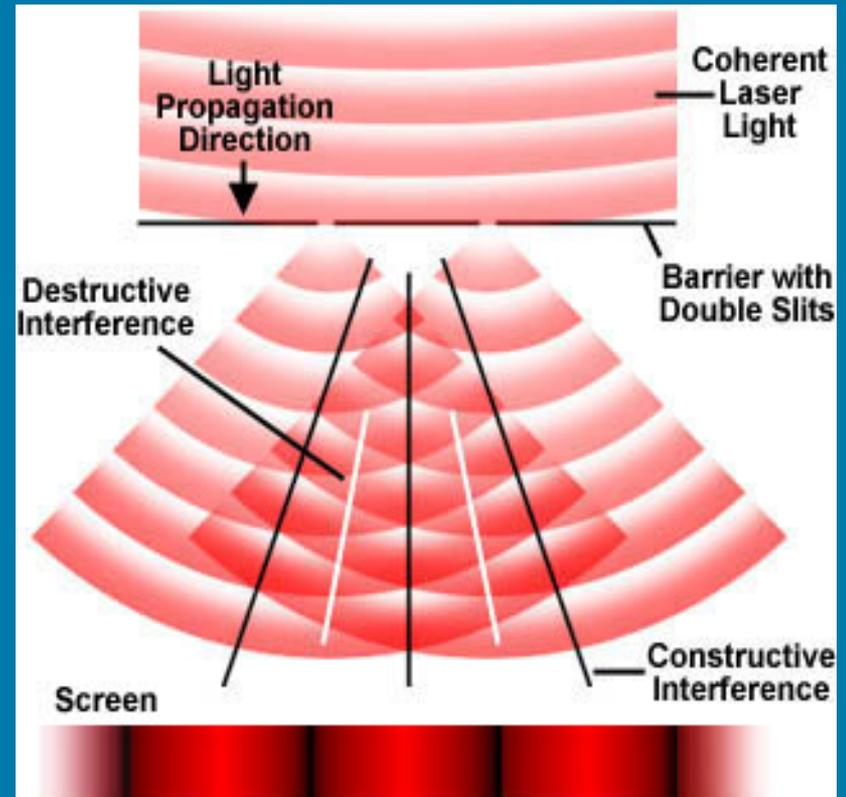


O resultado anterior nos leva à seguinte possibilidade



Mas, a alternância da presença e ausência de átomos nas “caixas” é compatível com o conceito de....

# Interferência



mas...



??????

## Questões:

- Como estamos tratando de corpúsculos, a que é devida esta interferência?
- O objeto em questão passa pelas duas saídas ao mesmo tempo? Se não, por onde ele passa?

## Respostas:

- A interferência se dá entre diferentes **alternativas**.  
As chances de ocorrência de uma ou outra alternativa **não são aditivas**.  
As possíveis alternativas de movimento do objeto são a **informação máxima** que se pode ter sobre ele.

- O objeto não passa pelas duas fendas. Ele é criado como corpúsculo e detetado como corpúsculo. Entretanto, entre estes dois eventos só se pode descrever este objeto através do movimento ondulatório de **alternativas interferentes**.



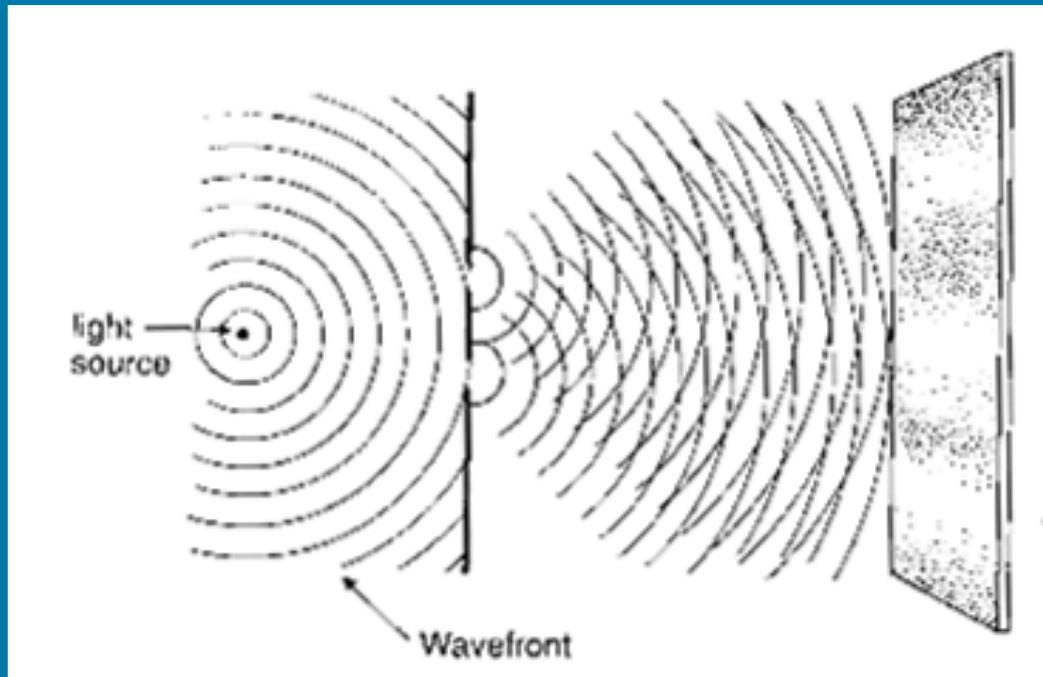
Dualidade partícula-onda

- Qualquer método para se decidir por onde passou o objeto, por mais sofisticado que seja, **destrói a interferência de alternativas**.



Princípio da complementaridade

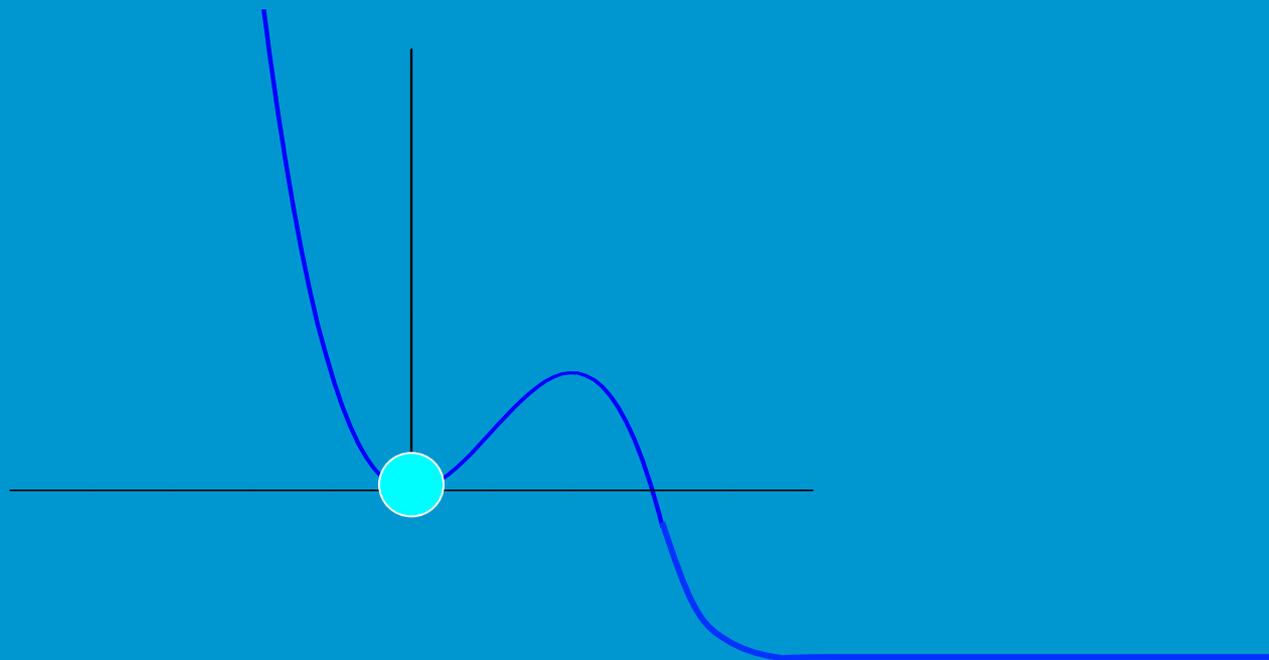
Se lançássemos os objetos quânticos, um após o outro, através de duas fendas teríamos o seguinte resultado



Sobreposição de alternativas  $\longrightarrow$  interferência

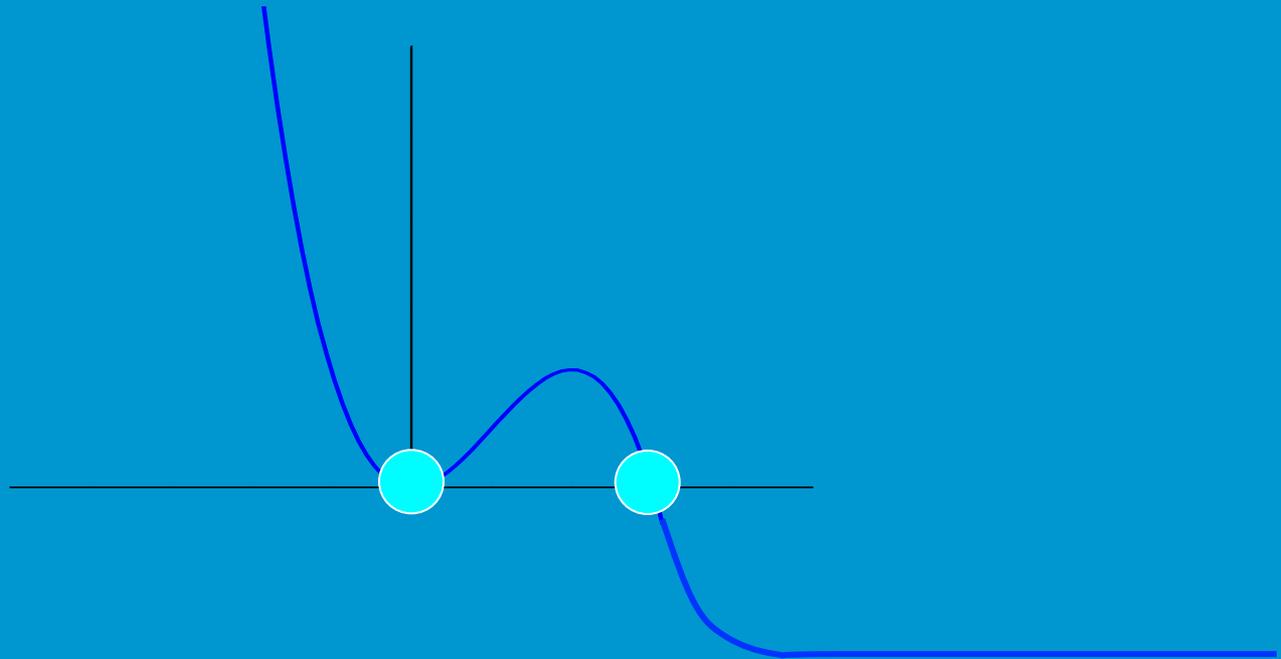
# mais alguns exemplos

Uma conta perfurada por um arame



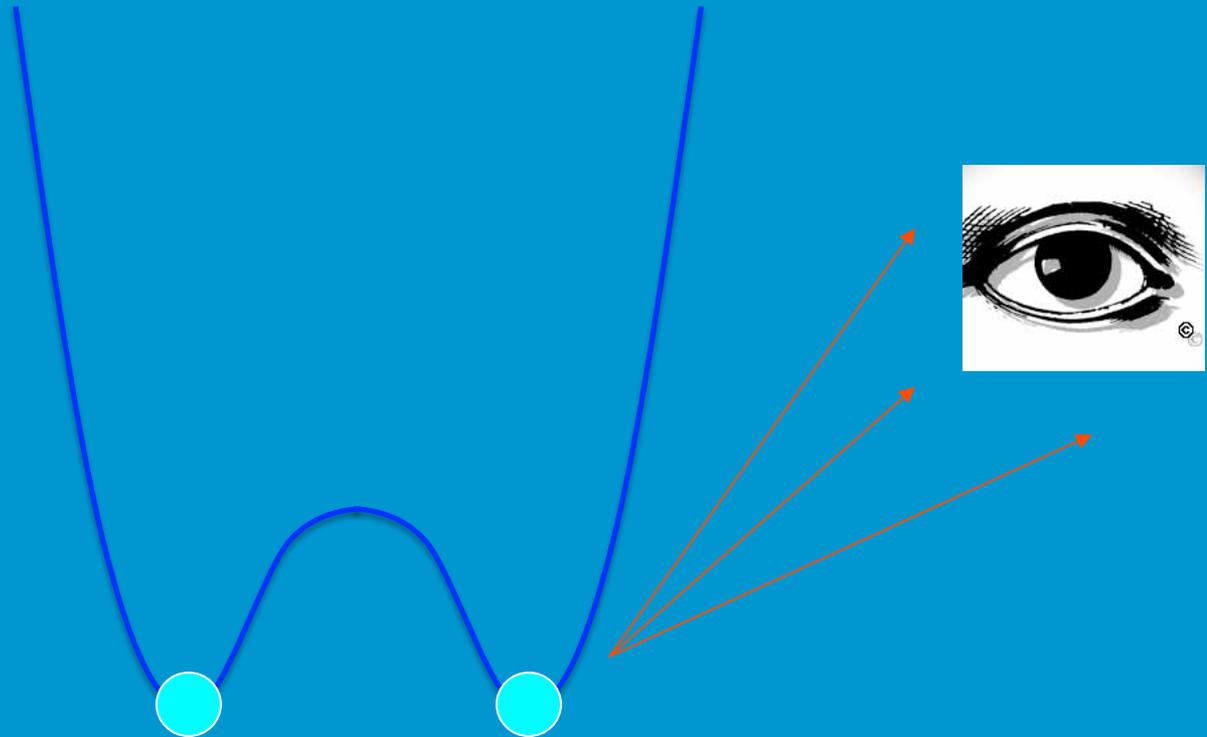
# mais alguns exemplos

O tunelamento de uma “conta quântica”



# mais alguns exemplos

O tunelamento coerente de uma “conta quântica”



## 2º exemplo:

Deseja-se investigar o resultado da **determinação de valores** das grandezas que caracterizam um dado objeto.

Trataremos de duas grandezas cujos valores serão determinados, **apenas a título de exemplo**, pelos nossos sensores naturais; **“olhos e ouvidos”**.

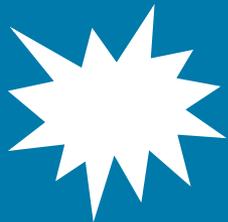
Inicialmente venda-se um indivíduo que, então, só é capaz de ouvir o **“som”** emitido pelo objeto.

Posteriormente retira-se a venda do indivíduo e tapa-se os seus ouvidos de forma que ele só possa ver a **“cor”** do objeto.

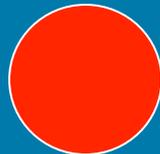
Hipótese: só há possibilidade de se ter **duas cores** e do objeto **emitir ou não som**. Note bem que **som** e **cor** são apenas **apelidos** que estamos dando às grandezas de interesse real.



Objeto não emite som



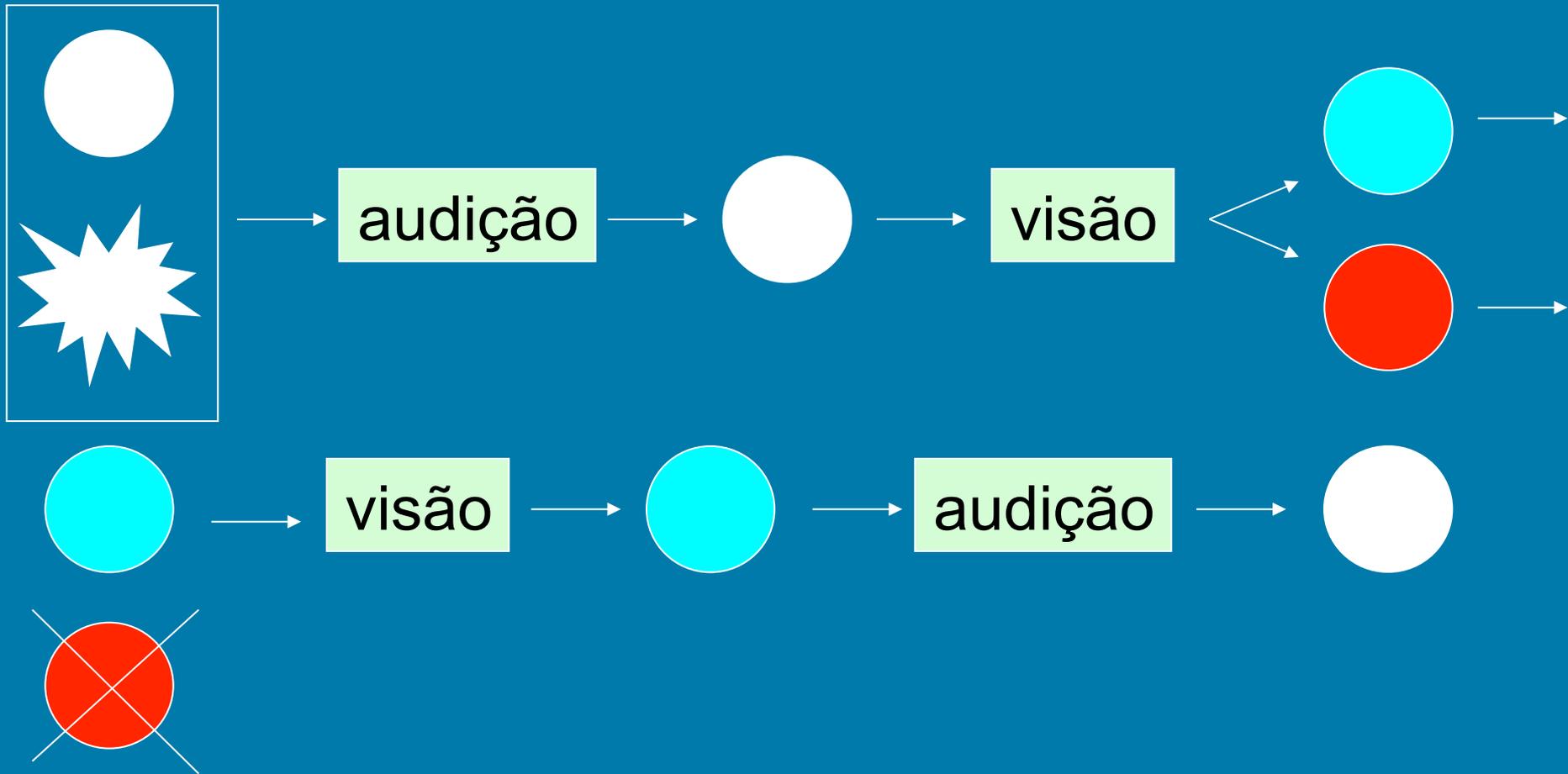
Objeto sonoro



As duas opções de cor

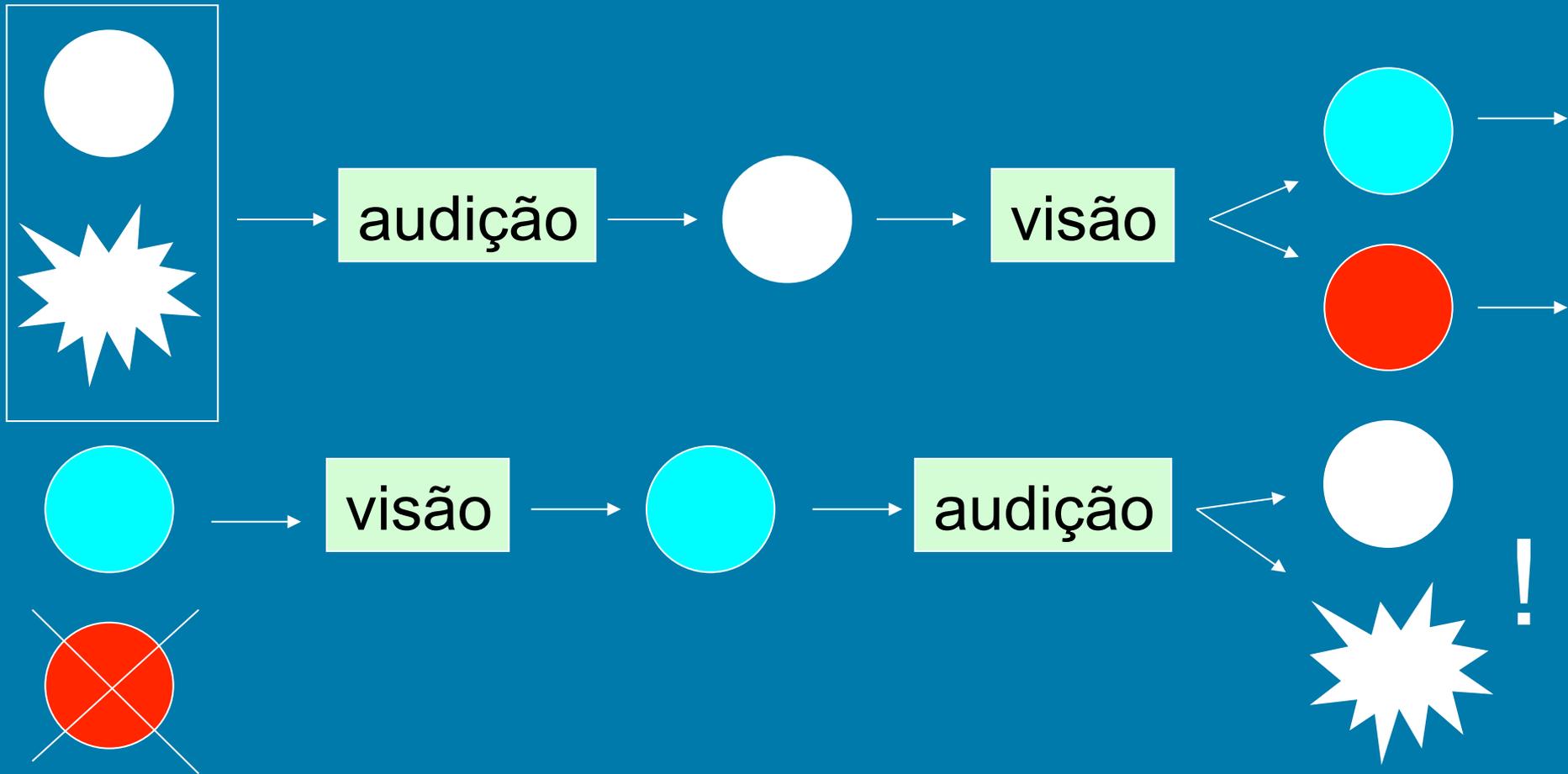
- Lembre-se que todos os exemplos que daremos são eventos, absolutamente idênticos, realizados em 1000 cidades sem que os seus realizadores tenham qualquer influência uns sobre os outros.
- os resultados de cada etapa dos eventos são posteriormente sobrepostos e comparados, assim como no exemplo anterior.
- Objetos clássicos são sempre corpos macroscópicos enquanto que os quânticos são átomos, moléculas ou núcleos atômicos.

## Se o objeto é clássico



A determinação de uma dada característica do objeto é absolutamente independente da outra.

# Se o objeto é quântico



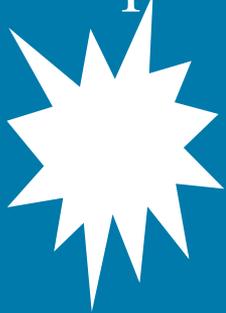
A informação **precisa** sobre uma dada característica **pode ser** perdida quando se determina a outra!

- Características que se comportam como as de um objeto clássico são chamadas **compatíveis** enquanto que as do tipo anterior são chamadas **incompatíveis**.
- Podemos determinar **simultaneamente** todas as características de um objeto clássico
- Só podemos determinar **simultaneamente** as características **compatíveis** de um objeto quântico.



Princípio da Incerteza

# Representação dos objetos



ou



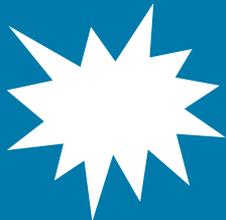
e



União das possíveis alternativas



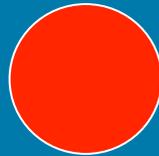
ou



=



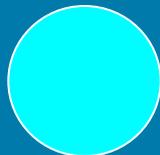
+



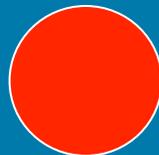
Sobreposição das possíveis alternativas.  
Determinação de uma característica



=

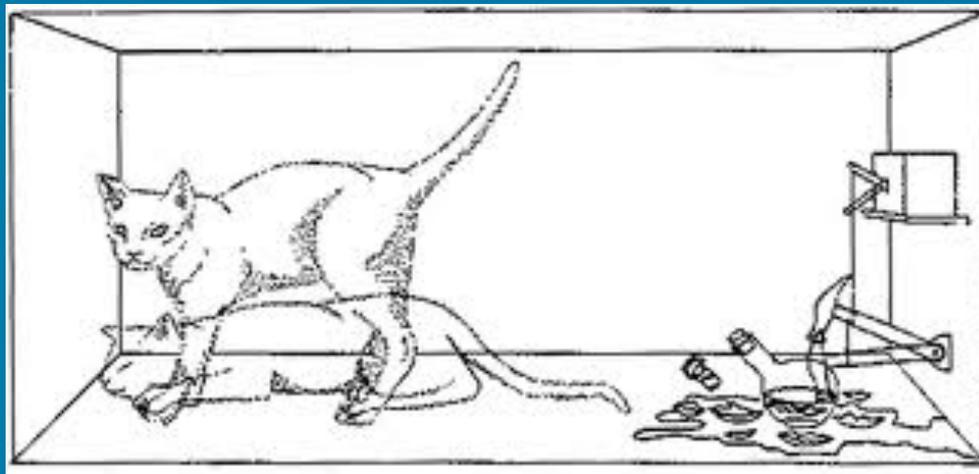


-

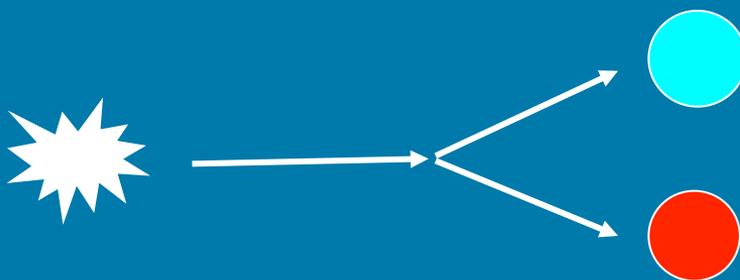


→ filtragem

# O Gato de Schrödinger



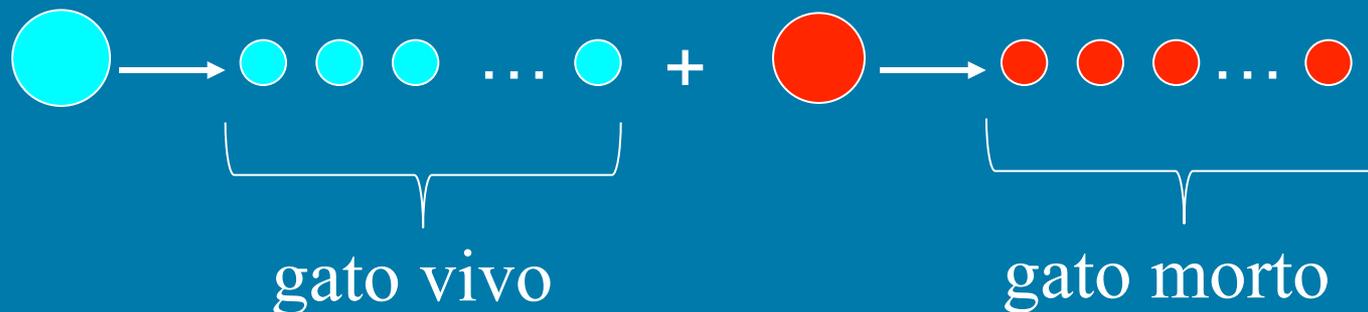
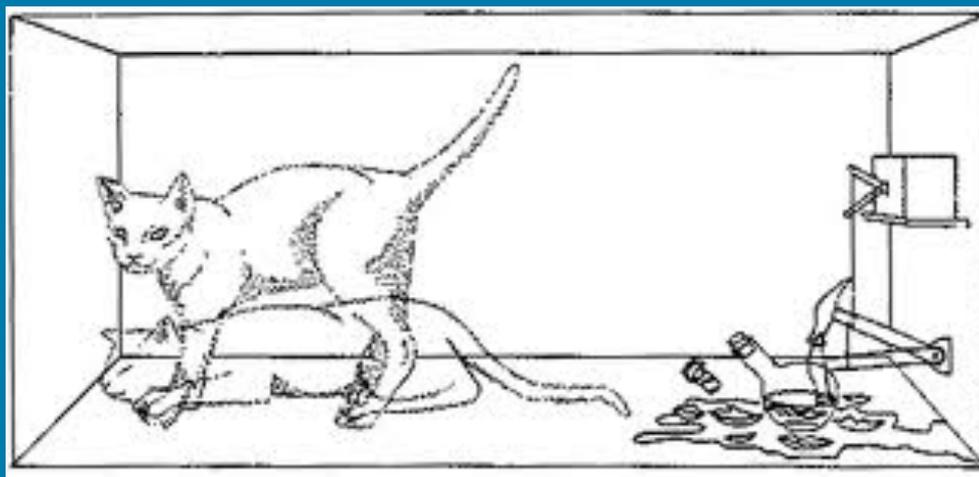
nada ocorre



Corrente ativa sistema  
letal

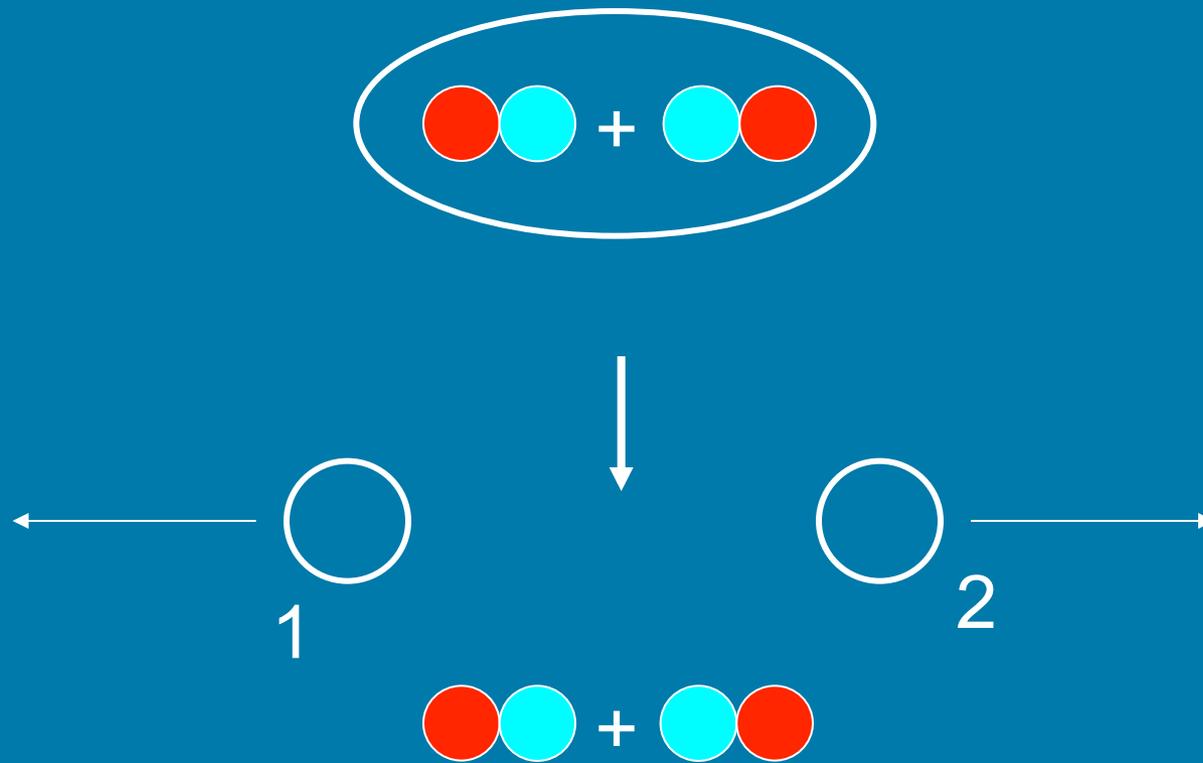
# O Gato de Schrödinger

O paradoxo



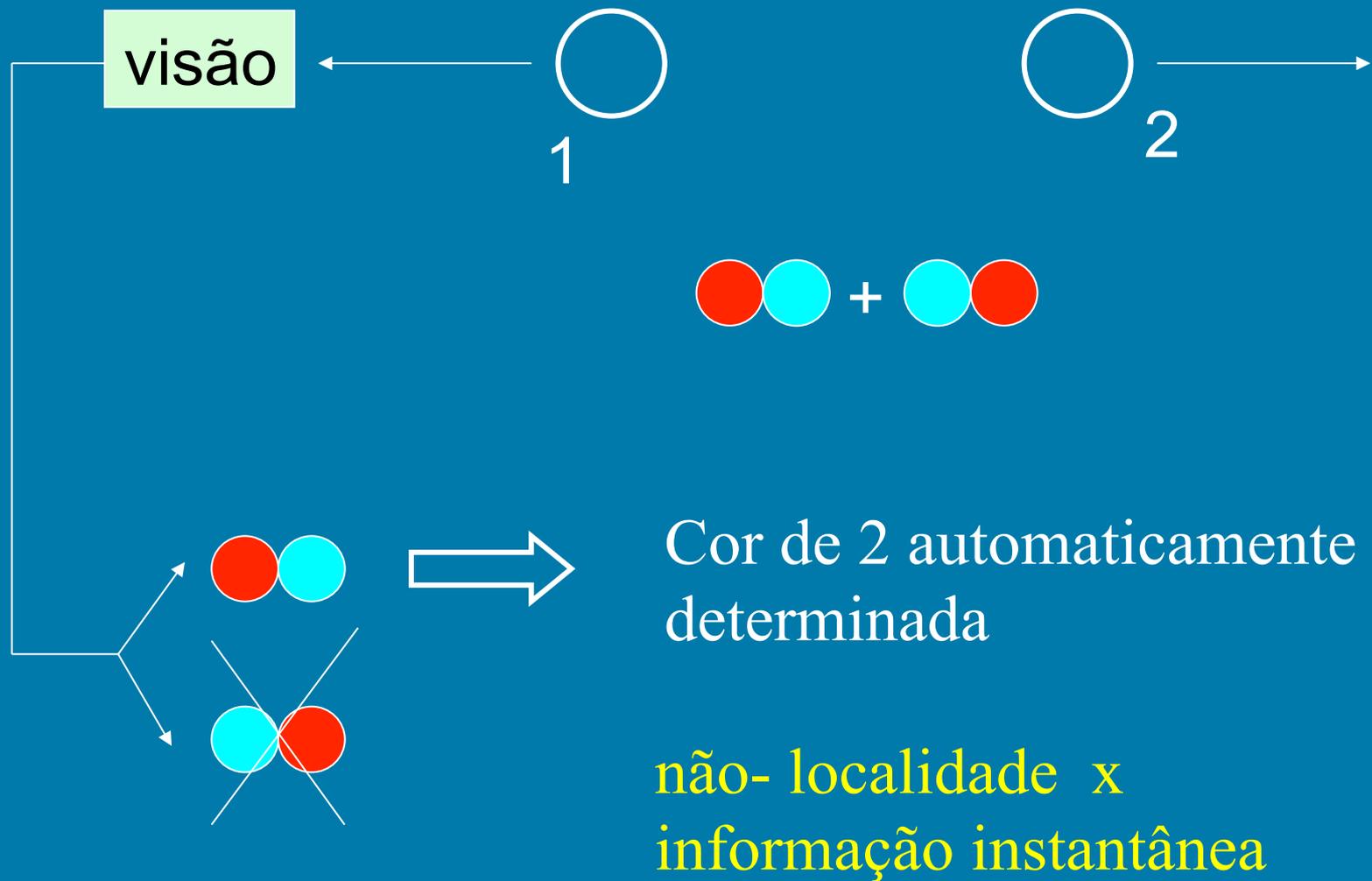
Sobreposição de objetos clássicos ?

# O Par EPR (Einstein, Podolsky & Rosen)



Mesmo separados espacialmente, os objetos 1 e 2 mantêm a sobreposição de alternativas de cores.

# O paradoxo EPR



# Comentários finais

Apesar das suas inusitadas previsões, a mecânica quântica trata de questões reais relativas a propriedades de sistemas físicos que são mensuráveis em um laboratório.

Os seus resultados são precisos e gozam de inquestionável utilidade prática.

Só para se ter uma idéia da aplicabilidade desta teoria, podemos mencionar que dela dependem o nosso aparelho de CD, o controle remoto de nossas TVs, os aparelhos de ressonância magnética em hospitais ou até mesmo os já tão populares microcomputadores.

# Comentários finais

Todos os dispositivos eletrônicos usados nos equipamentos da chamada *tecnologia de ponta* só puderam ser projetados porque conhecemos a mecânica quântica. A título de informação, mais que 30% do PIB americano é devido a estas tecnologias.

Como podemos ver, tudo indica que a mecânica quântica seja a teoria correta para descrever os fenômenos físicos em qualquer escala de energia. O universo macroscópico só seria um caso particular onde vários efeitos contribuem para o desaparecimento dos resultados inusitados da física quântica e para o qual há uma forma mais eficiente de descrição; a mecânica newtoniana.

# Comentários finais

Nesta apresentação usamos a chamada *interpretação ortodoxa* ou *de Copenhagen* da mecânica quântica, mas gostaríamos de enfatizar que as experiências aqui apresentadas não correspondem a situações reais. Elas representam uma versão bem simplificada daquelas que tentam imitar.

Muitos autores, por não se sentirem confortáveis com a interpretação ortodoxa da mecânica quântica, tentam criar teorias alternativas para substituí-la. Entretanto, apesar da sua estranheza, a mecânica quântica não apresentou qualquer falha desde que foi elaborada na década de 1920. Portanto, não há qualquer resultado experimental que aponte a direção onde devemos buscar as evidências para substituir a mecânica quântica por uma nova teoria.