

**Esta palestra,
“Os Mistérios da Mecânica Quântica”,
foi inspirada no artigo**

**Quantum Mechanics Mysteries: Reality, Observer, Prediction, Collapse,
and Correlated States**

By Ana Elisa D. Barioni, Felipe B. Mazzi, Elsa Bifano Pimenta, Willian Vieira dos Santos, and
Marco A. P. Lima

Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Universidade Estadual de Campinas

<https://arxiv.org/abs/2106.02161>



**James Clerk
Maxwell**
1831–1879



Retrato póstumo, por Madame Feytaud, 1842

**Pierre Simon
Laplace**
1749–1827



**Michael
Faraday**
1791–1867



Isaac Newton
1643–1727



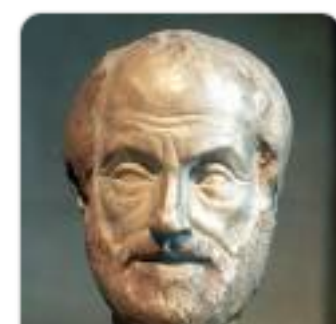
**Johannes
Kepler**
1571–1630



Galileu Galilei
1564–1642



**Nicolau
Copérnico**
1473–1543



Aristóteles
384 a.C.–3...

Alguns dos pais da Física Clássica: eles mimaram a gente

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}$$

Para resolver, precisamos saber



achar $\vec{r}(t)$ e $\vec{v}(t)$

$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F} \text{ (as forças que atuam na partícula)} \\ \vec{r}(t_0) \text{ e } \vec{v}(t_0) \end{array} \right.$



Erwin
Schrödinger
1887–1961



Paul Dirac
1902–1984



Werner
Heisenberg
1901–1976



Niels Bohr
1885–1962



Albert
Einstein
1879–1955



Richard
Feynman
1918–1988



Max Born
1882–1970



Louis de Broglie
1892–1987

Alguns dos pais da Física Quântica: Boom Tecnológico

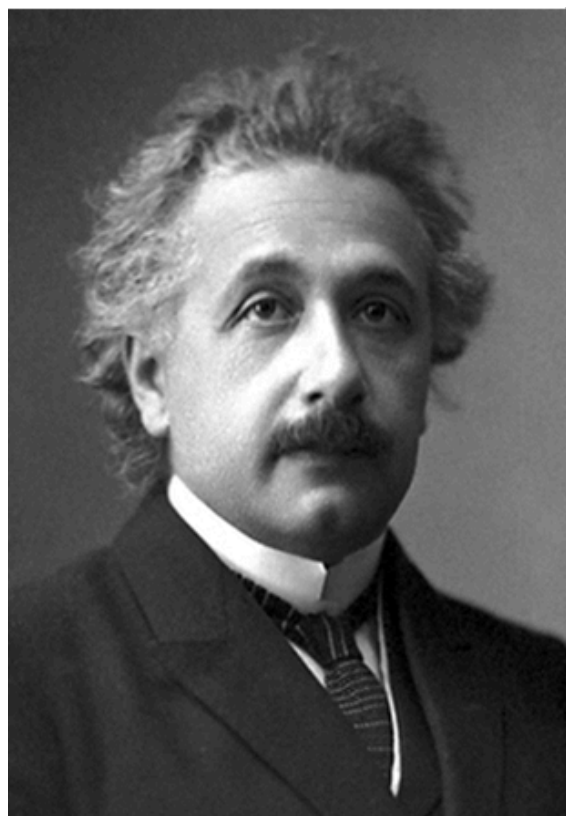
$$i\hbar \frac{d\Psi(\vec{r}, t)}{dt} = H\Psi(\vec{r}, t)$$

Para resolver isso, precisamos saber



$\Psi(\vec{r}, t_0)$
 H (o ambiente da partícula)

achar $\Psi(\vec{r}, t)$



"Não posso acreditar seriamente nisso [teoria quântica] porque a teoria não pode ser conciliada com a ideia de que a física deve representar uma realidade no tempo e no espaço, livre de ações fantasmagóricas à distância"

"Deus não joga dados com o universo."

Albert Einstein



"Einstein, pare de dizer a Deus o que fazer!"

"Não existe mundo quântico. Existe apenas uma descrição física abstrata. É errado pensar que o dever da física é descobrir como a natureza é. Física é aquilo que nós podemos dizer sobre a natureza."

"Se alguém diz que pode pensar sobre Física Quântica sem ficar tonto é mentira."

Niels Bohr

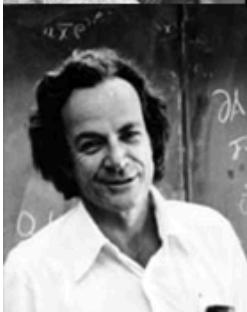


"A Física quântica forneceu a refutação definitiva do princípio de causalidade." - Werner Heisenberg



"A física quântica revela uma unidade básica do universo." - Erwin Schrödinger

"A estrutura matemática da teoria quântica passou por inúmeros testes com sucesso e agora é universalmente aceita como uma descrição consistente e precisa de todos os fenômenos atômicos." - Erwin Schrödinger



"Se você acha que entendeu alguma coisa sobre mecânica quântica, então é porque você não entendeu nada." - Richard Feynman



“Parece que Einstein estava duplamente errado quando disse: Deus não joga dados. Deus não só definitivamente joga dados, mas às vezes ele nos confunde jogando-os onde eles não podem ser vistos.”

“Assim, Deus joga dados com o universo. Todas as evidências apontam para ele ser um jogador inveterado, que joga os dados em todas as ocasiões possíveis.”

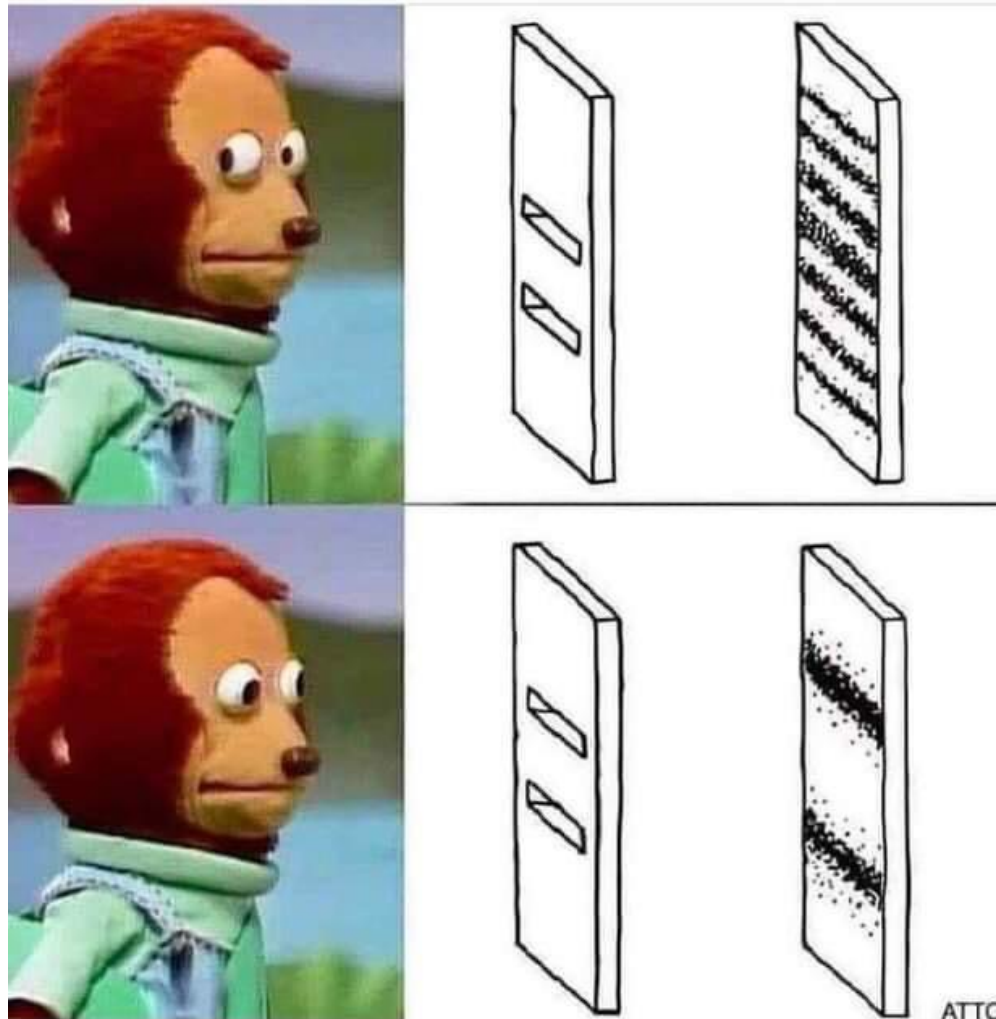
Stephen Hawking

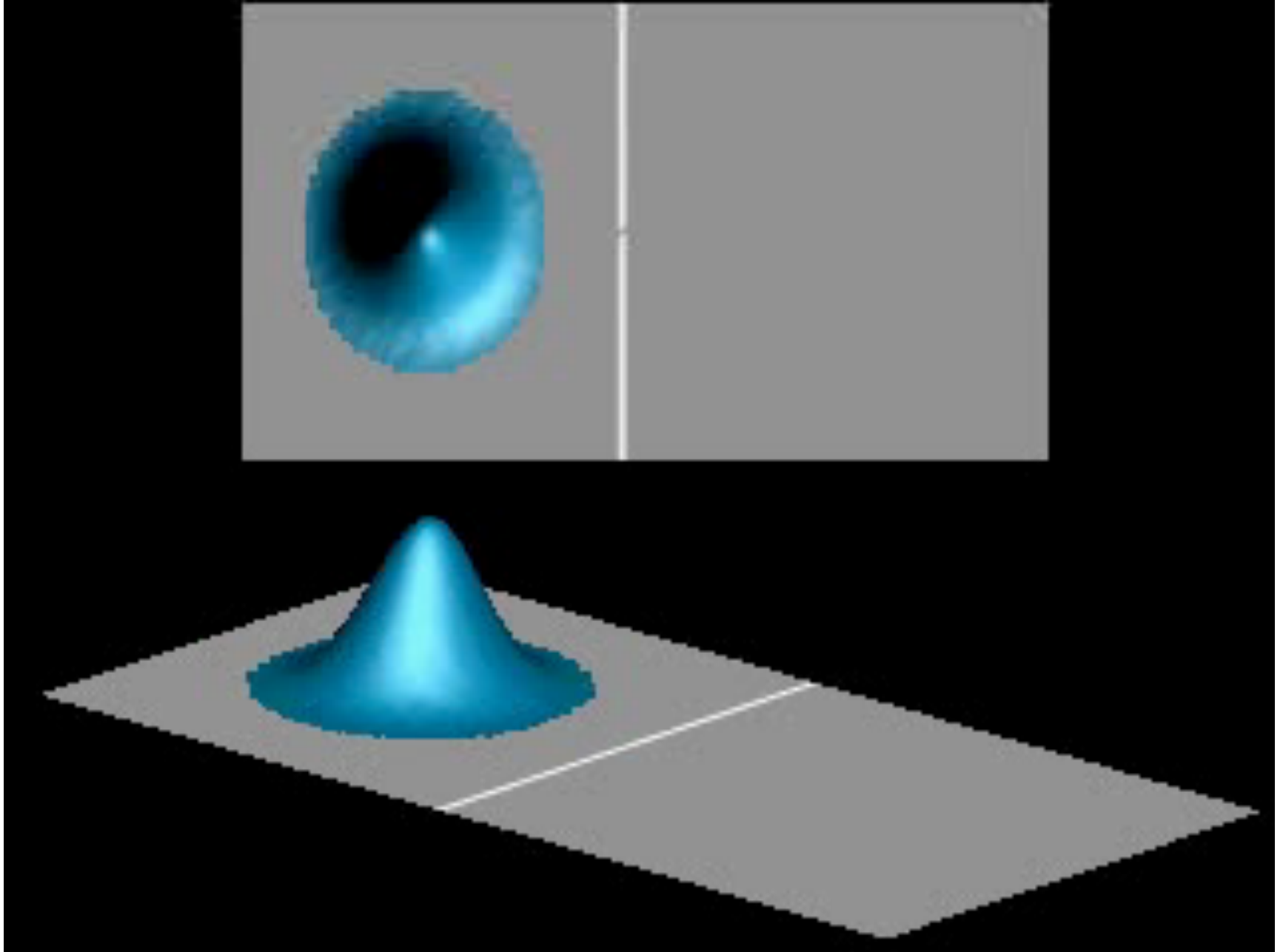
Os Mistérios da Mecânica Quântica (em 2021) ainda existem?

Druyan and B. Braga, *Cosmos: Possible Worlds* (2020), Fuzzy Door Productions.

Presented by Neil deGrasse Tyson, S1:E9 (17'), Magic Without Lies, National Geographic.

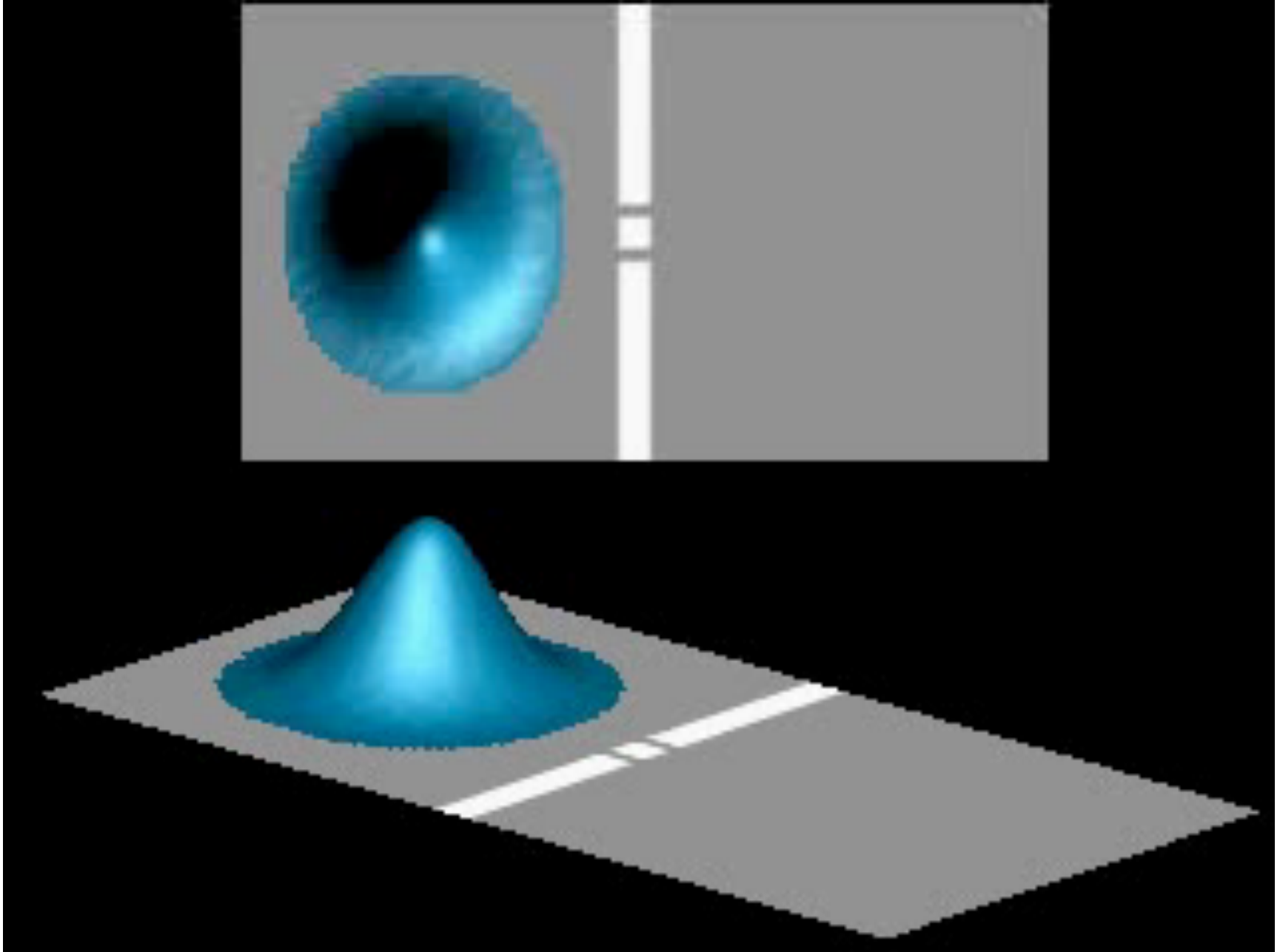
<https://www.youtube.com/watch?v=Ms-CVF540fo&t=60s>





Difração: uma fenda

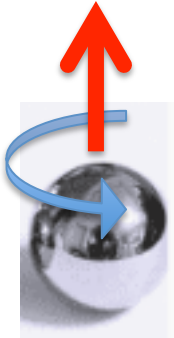
Para ver as animações, visite: <http://www.embd.be/quantummechanics/>



Interferência – duas fendas

Para ver as animações, visite: <http://www.embd.be/quantummechanics/>

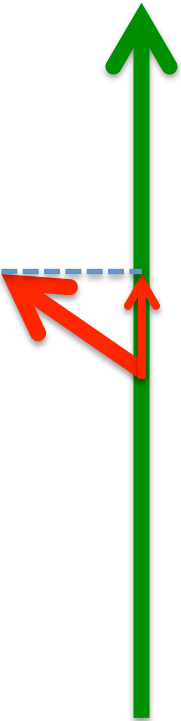
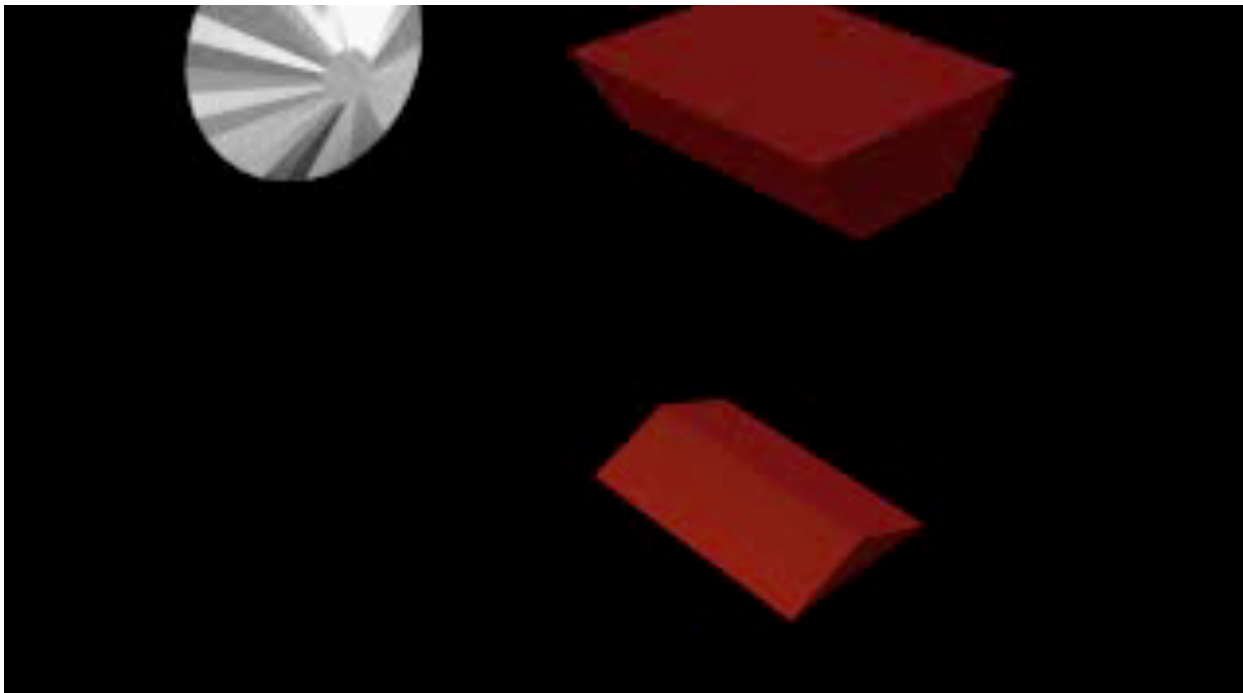
Visão Clássica do spin



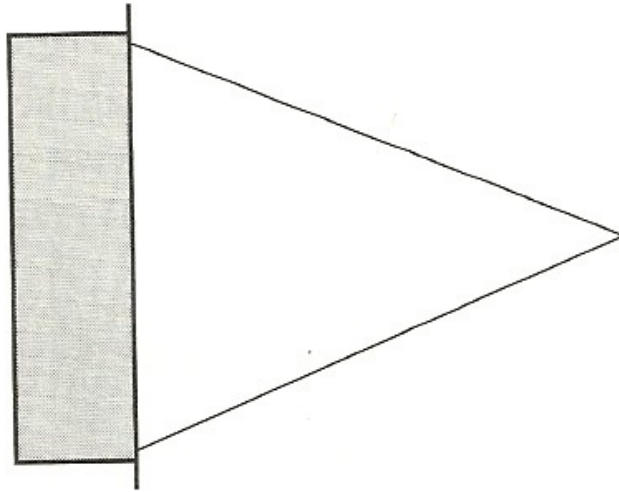
Momentos magnéticos (imã) do átomo apontam como as flechas vermelhas.



Quando passam no aparelho a força é proporcional à componente da flecha vermelha ao longo da flecha verde



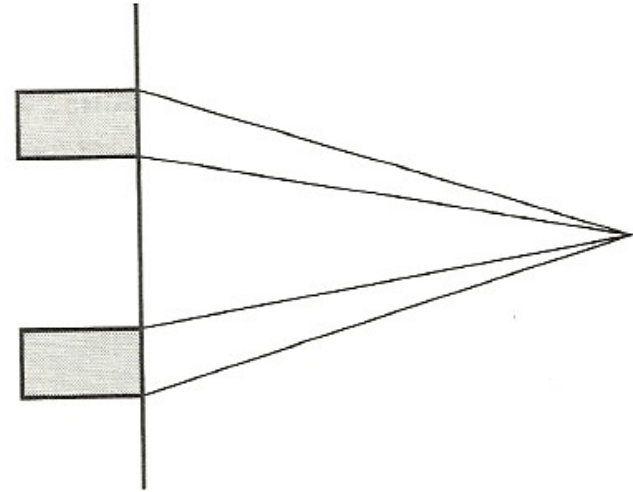
(a) O que esperar?



(a)

Para um momento de dipolo arbitrariamente orientado, quanto vale μ_z ? Que tal $\forall$ valor entre $-\mu \leq \mu_z \leq \mu$

(b) O que se viu?



(b)

Dois valores de μ_z ,
correspondentes à:
 $S_z = \hbar/2$ e $-\hbar/2$,
 $\hbar = 1,0546 \times 10^{-27} \text{ erg.s}$
 $= 6,5822 \times 10^{-16} \text{ eV.s.}$

Nada especial com a direção z . Poderia ser x , y , ou u .

Uma sequência de experimentos de Stern-Gerlach

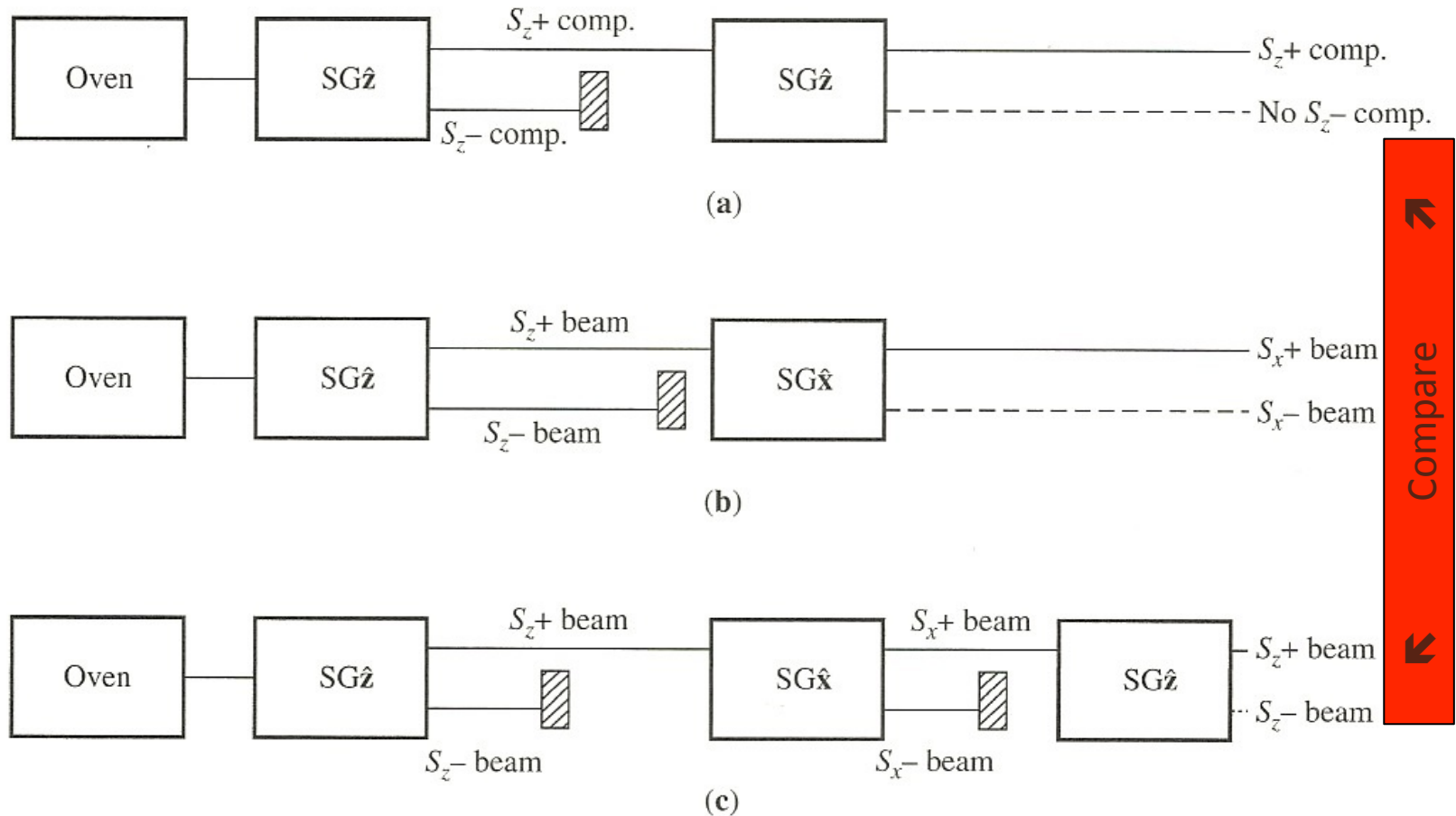
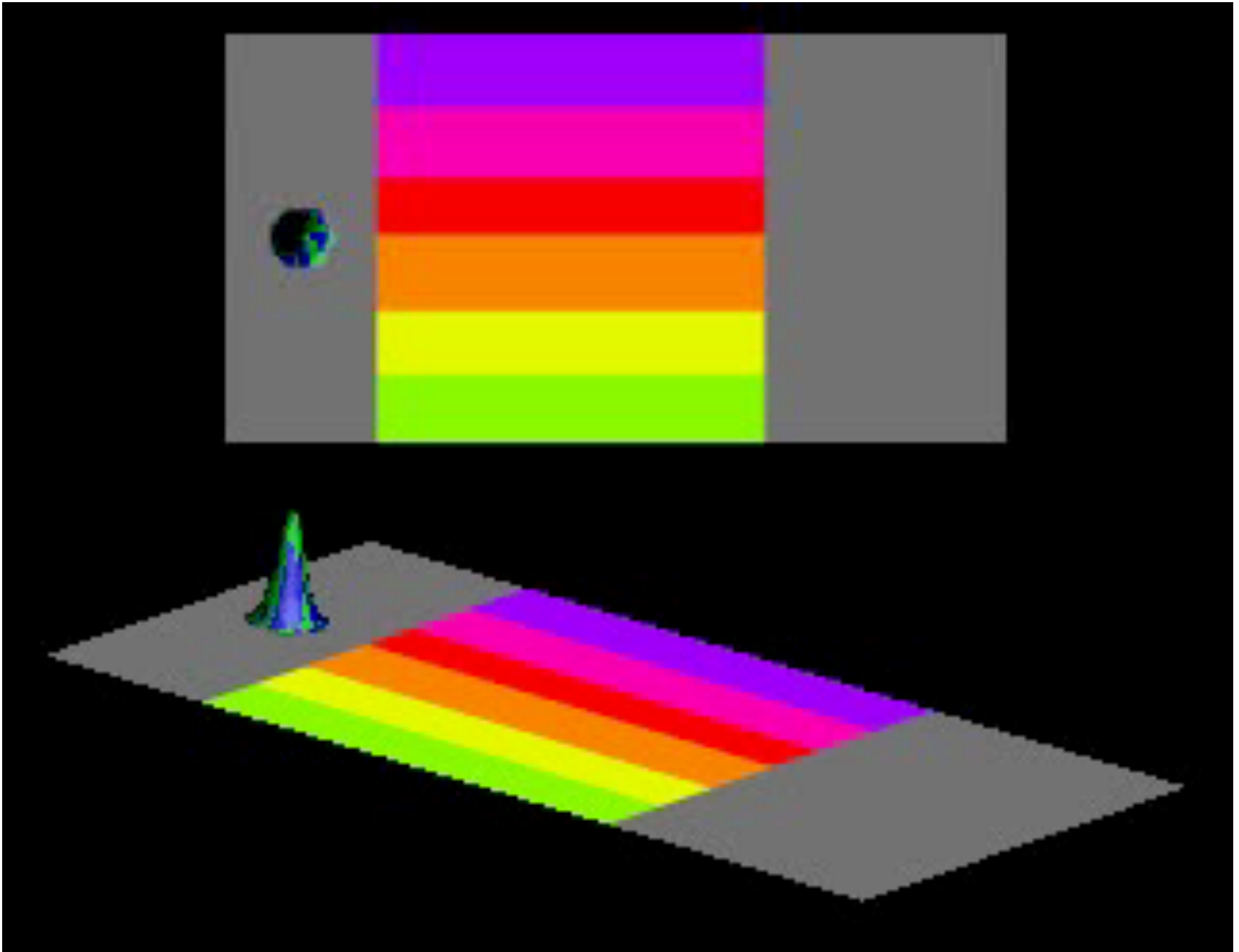


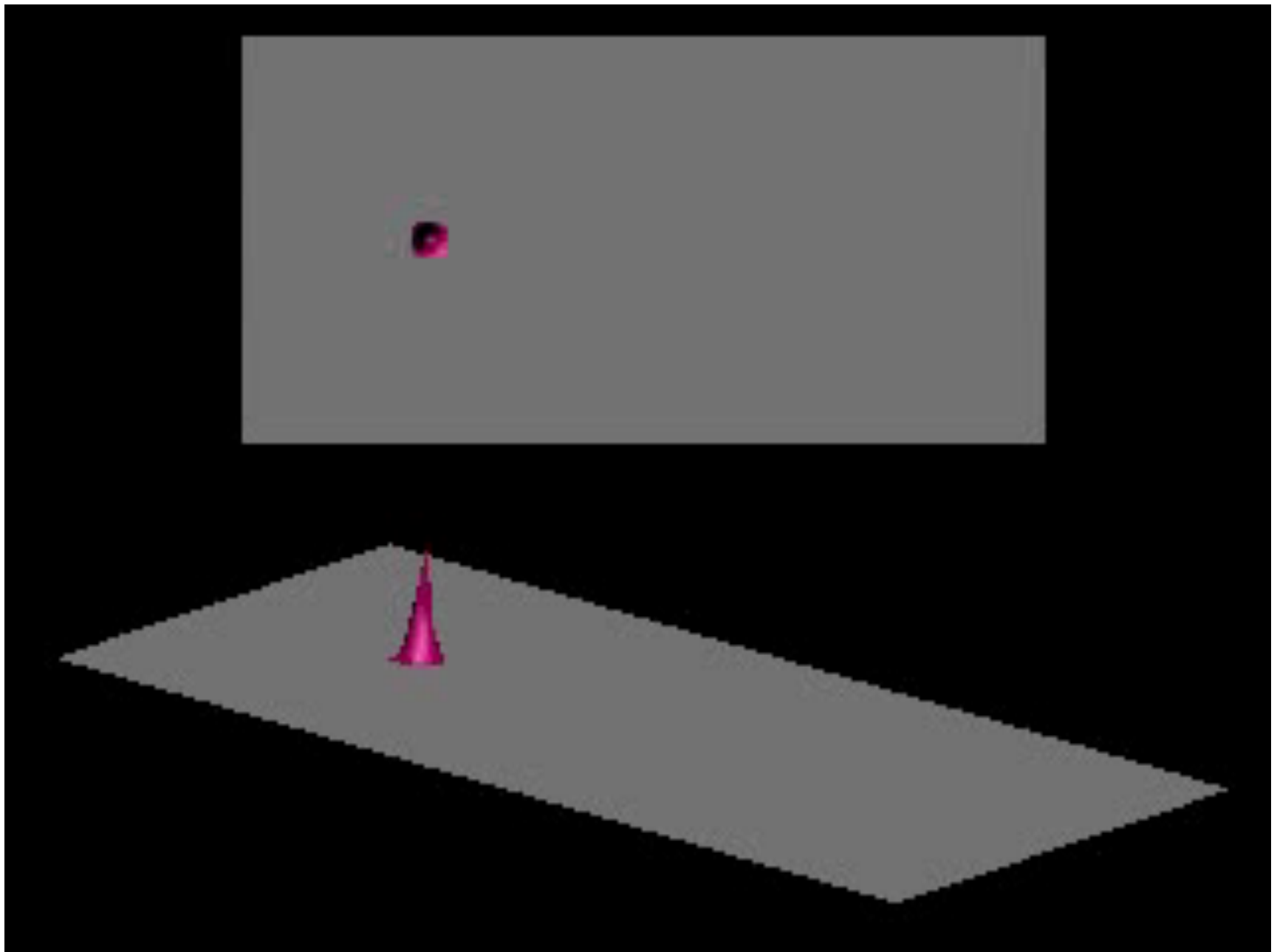
FIGURE 1.3 Sequential Stern-Gerlach experiments.

O que esperar de momento angular clássico?

$$L = I\omega$$

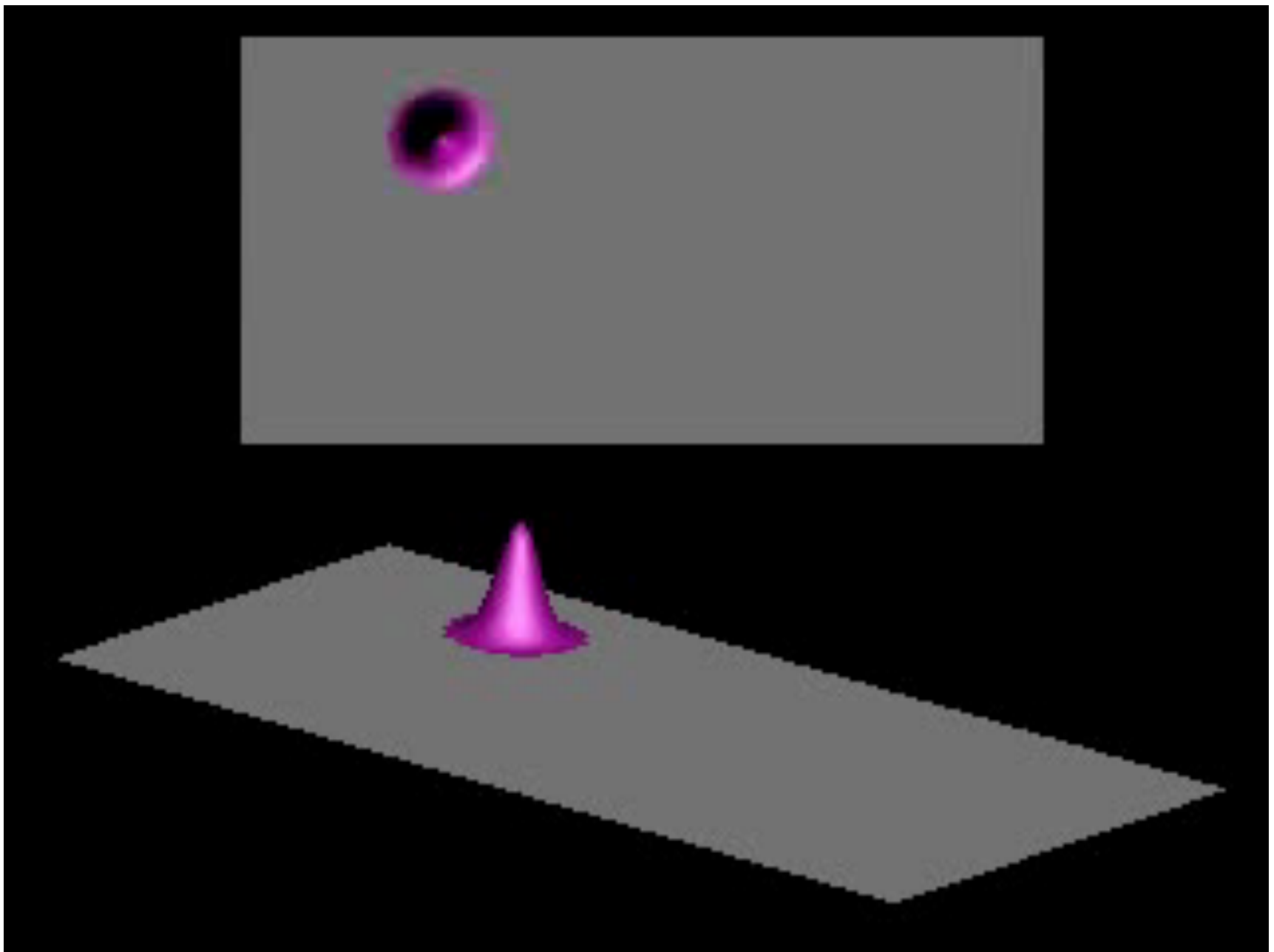


Experimento de Stern-Gerlach: visão quântica



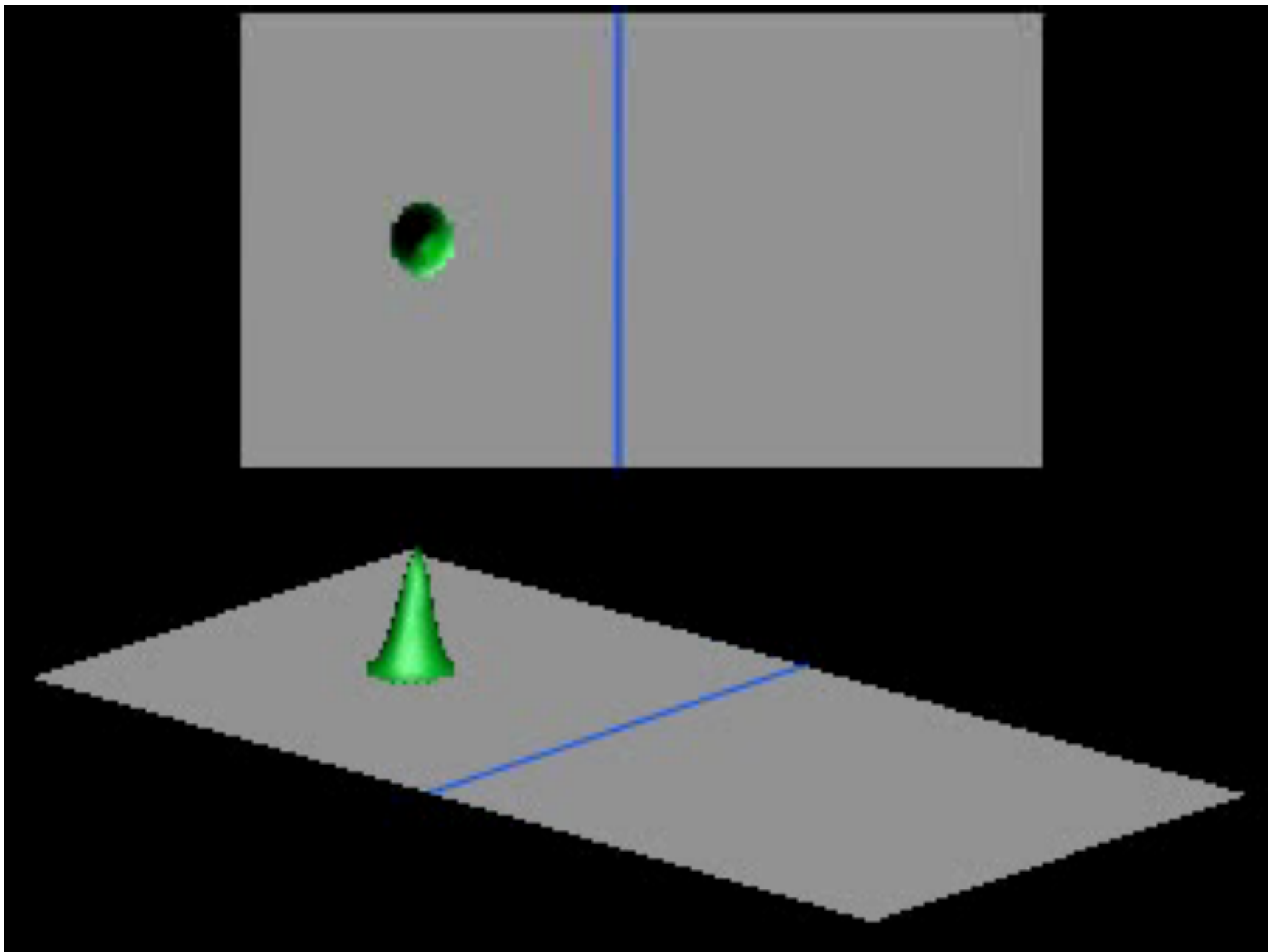
Partícula livre

Para ver as animações, visite: <http://www.embd.be/quantummechanics/>



Partícula carregada em um campo magnético constante

Para ver as animações, visite: <http://www.embd.be/quantummechanics/>



Efeito Túnel

Para ver as animações, visite: <http://www.embd.be/quantummechanics/>

Interferência Quântica Induzida por Gravidade

Experimento de correlação com nêutrons (massa m_n)

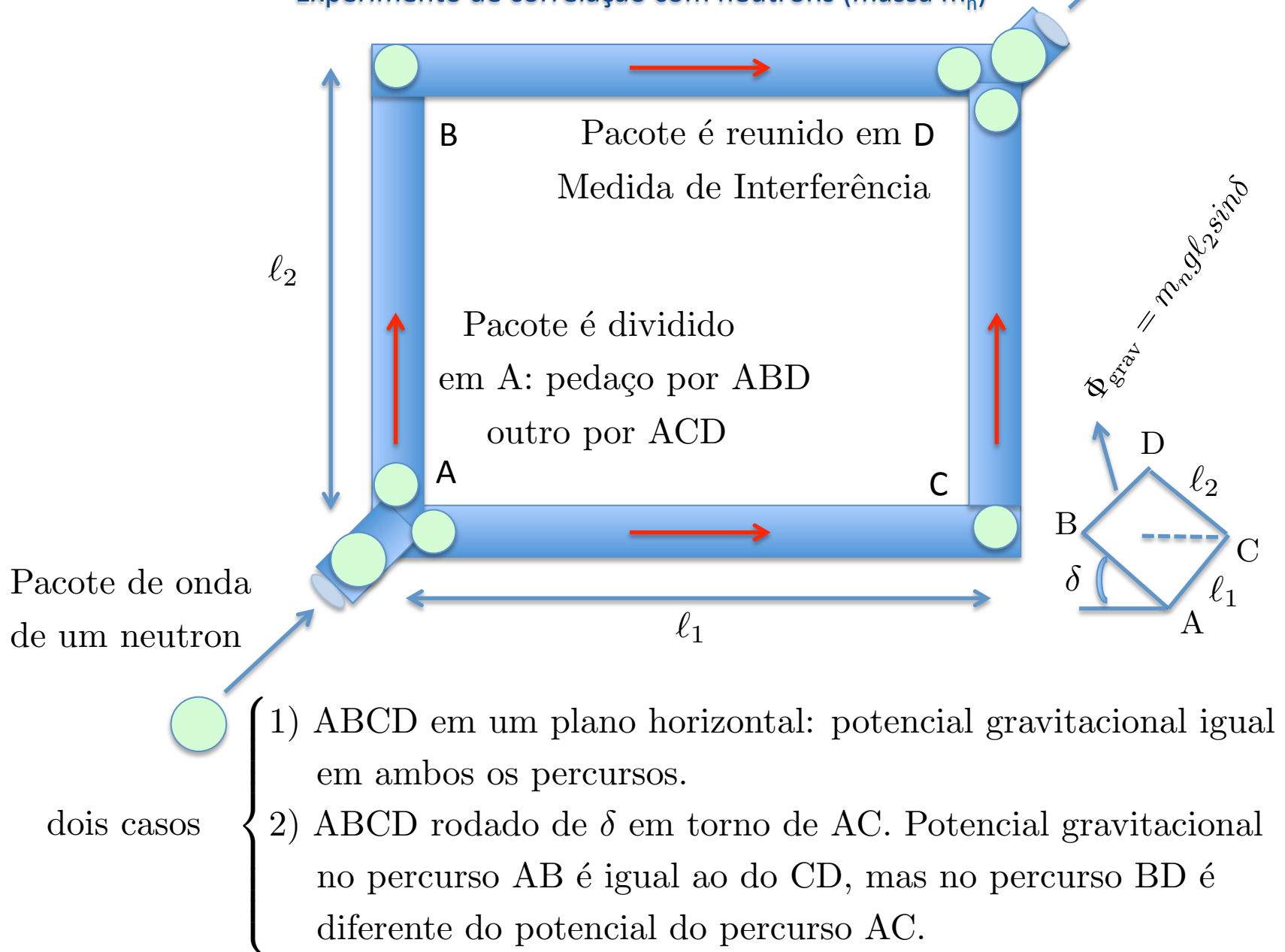
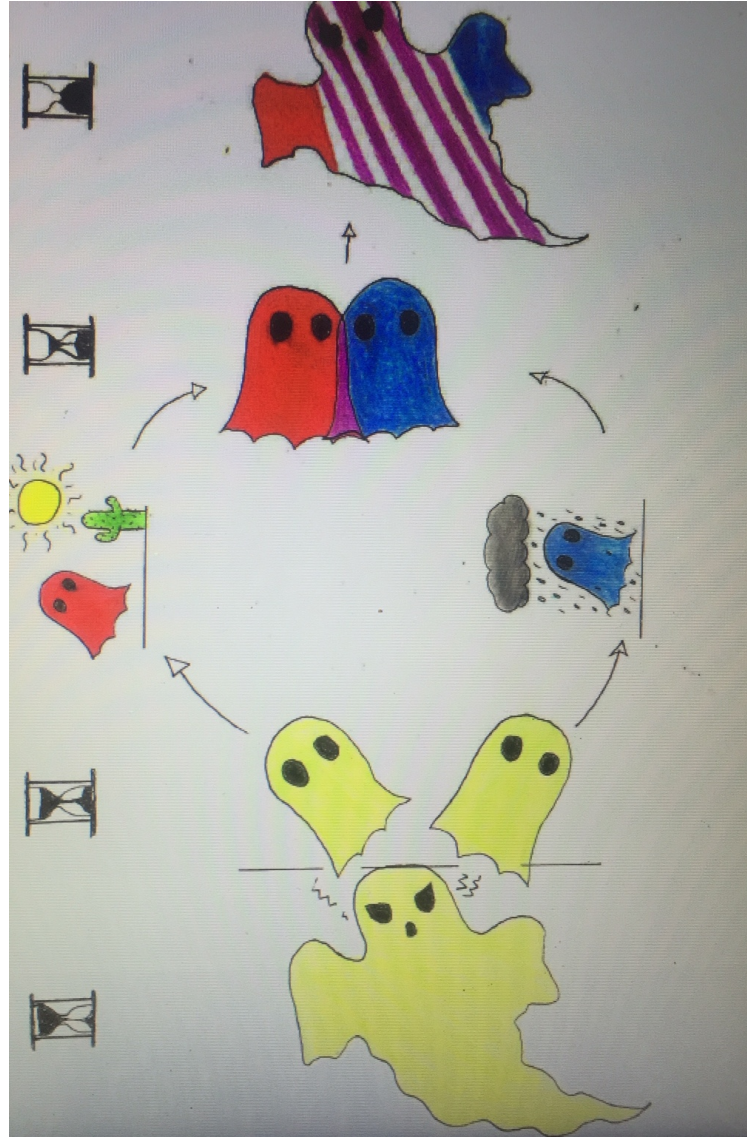
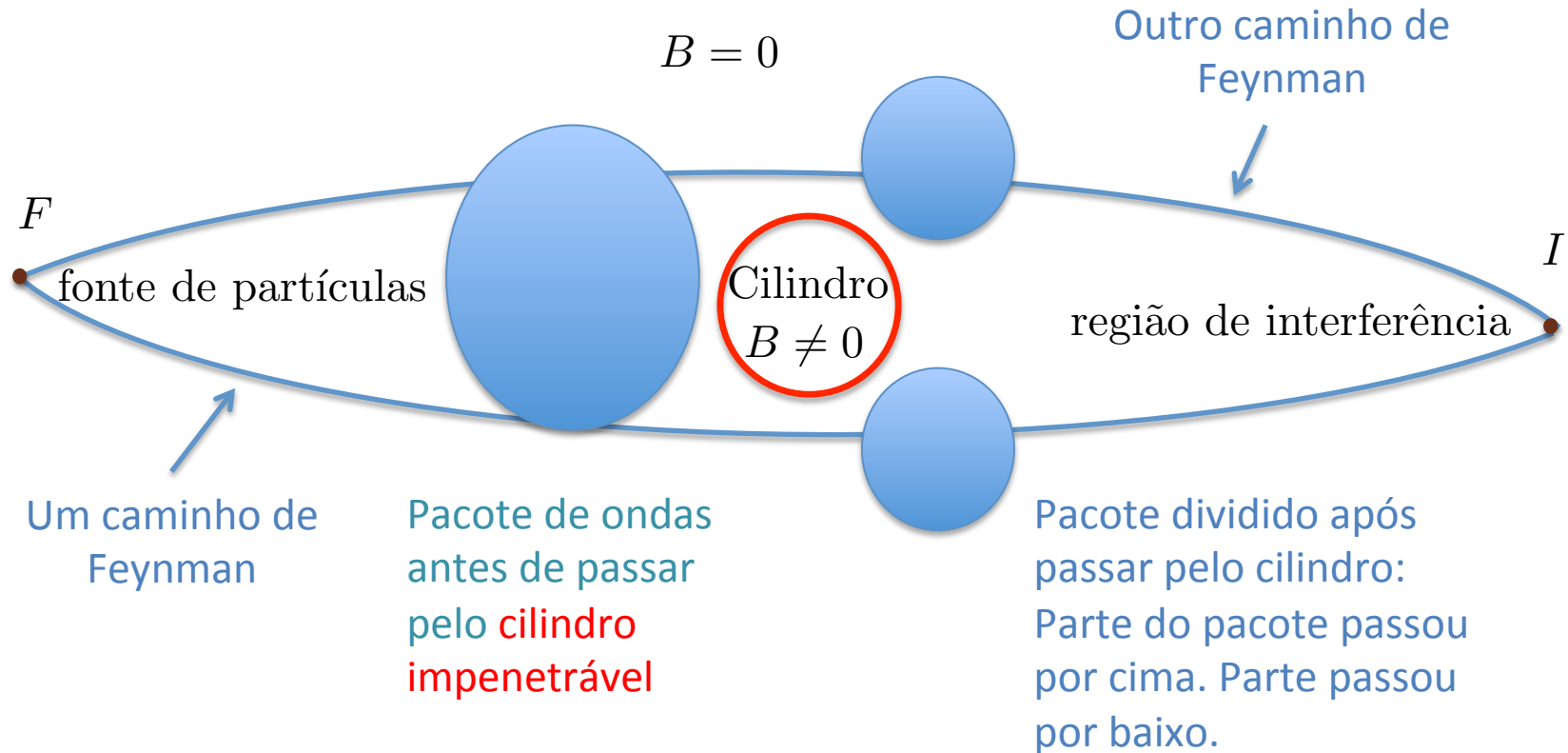


Figura do artigo, Gabriela M. Amaral, David Q. Aruquipa, Ludwing F. M. Camacho, Luiz F. C. Faria, Sofía I. C. Guzmán, Damaris T. Maimone, Melissa Mendes, Marco A. P. Lima, "Quantum 'Ghosts'", Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, no 3, e3309 (2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0052>



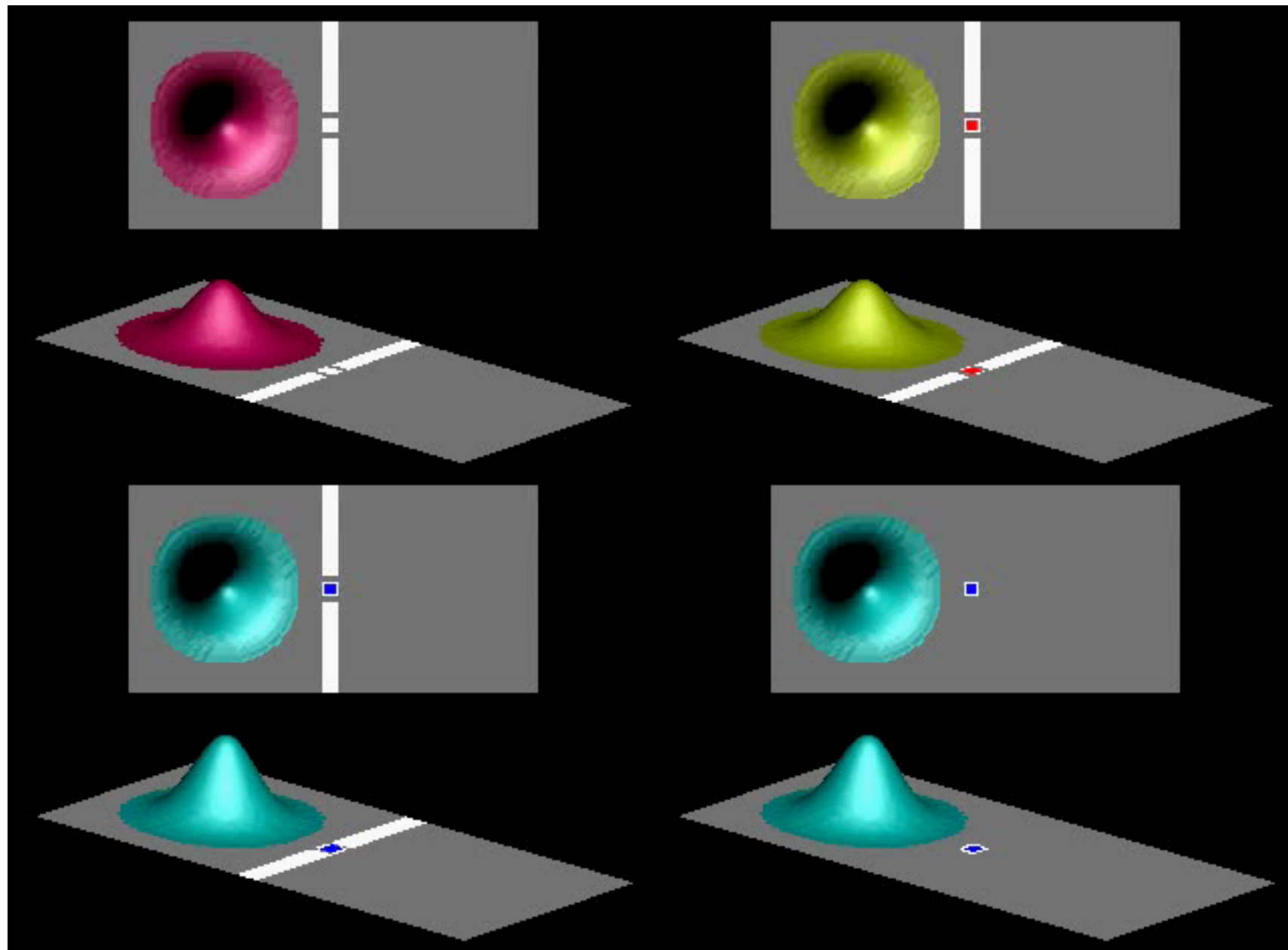
O efeito de Aharanov-Bohm

Experimento de correlação

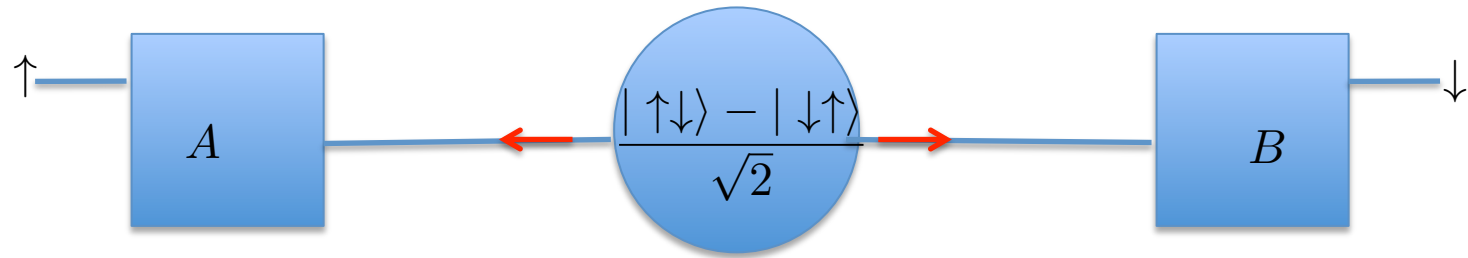


Queremos estudar como a probabilidade de encontrar a partícula na região de interferência I depende do fluxo magnético. O estudo será feito com integrais de Feynman. A partícula não pode penetrar no cilindro, assim, de novo, ela percebe o potencial vetor, mas não vai onde $\mathbf{B} \neq 0$. $\mathbf{B} = 0$ fora do cilindro.

O efeito de Aharanov-Bohm



Medidas de Correlação de Spin



Suponha que seja possível criar um composto com momento magnético zero, a partir de duas partículas com spin. Para isso se um spin aponta para cima o outro precisa apontar para baixo

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|1: S_z+; 2: S_z-\rangle - |1: S_z-; 2: S_z+\rangle)$$

Se fazemos uma medida sobre a partícula 1 e encontramos S_z+ , o sistema colapsa para $|1: S_z+; 2: S_z-\rangle$, ou seja, a medida sobre a partícula 1, que aparentemente parece uma medida isolada, de fato, é uma medida no sistema todo. Isso vale para qualquer direção

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|1: S_n+; 2: S_n-\rangle - |1: S_n-; 2: S_n+\rangle) \text{ medindo } 1: S_n+ \longrightarrow |1: S_n+; 2: S_n-\rangle$$

Primeira regra de interpretação

Não há como determinar o estado inicial de uma partícula de antemão, a menos que:

- você tenha interferido no sistema, fazendo uma medição de um determinada observável que causa o colapso do estado original a um auto-estado de sua observável ou
- porque a natureza (o ambiente) colapsou o estado original para um determinado auto-estado de alguma observável e você sabe qual ele é.

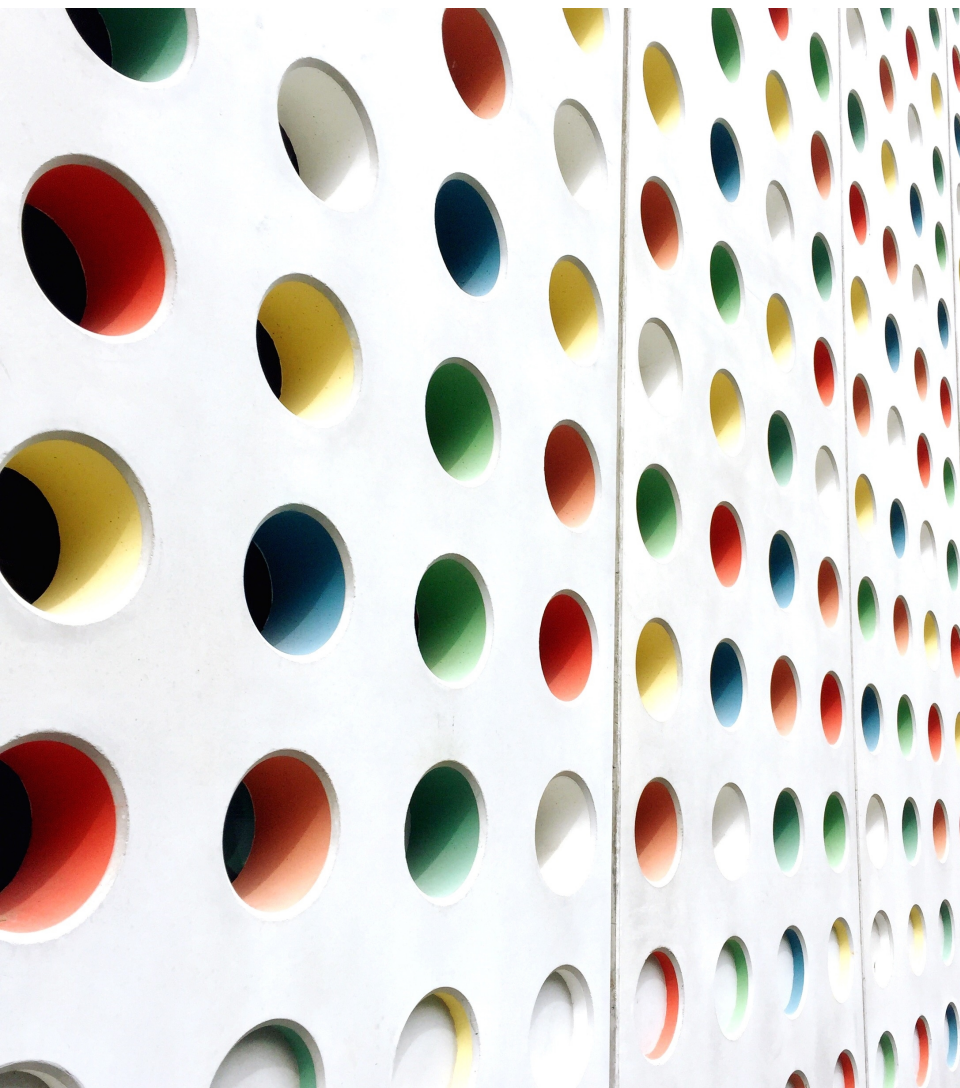
De qualquer forma, você não tem ideia sobre o estado original (o estado antes de qualquer um desses colapsos).

$$i\hbar \frac{d\Psi(\vec{r}, t)}{dt} = H\Psi(\vec{r}, t)$$

Segunda regra de interpretação

- a função de onda é apenas um mapa de possibilidades e probabilidades. O ambiente (descrito pelo Hamiltoniano) molda o pacote, mas o pacote de ondas não muda o ambiente.
- Apenas a partícula (dentro do pacote) pode interagir com o ambiente. E quando isso acontece, você tem um colapso do pacote de ondas. O mapa (essa invenção humana) de probabilidades e possibilidades zera em todos os lugares, exceto na região onde ocorreu a interação com o meio ambiente.

$$i\hbar \frac{d\Psi(\vec{r}, t)}{dt} = H\Psi(\vec{r}, t)$$



O mistério do colapso

Ana Elisa D. Barioni

Origem do
mistério: o
que está
acontecendo?

O que é o colapso?

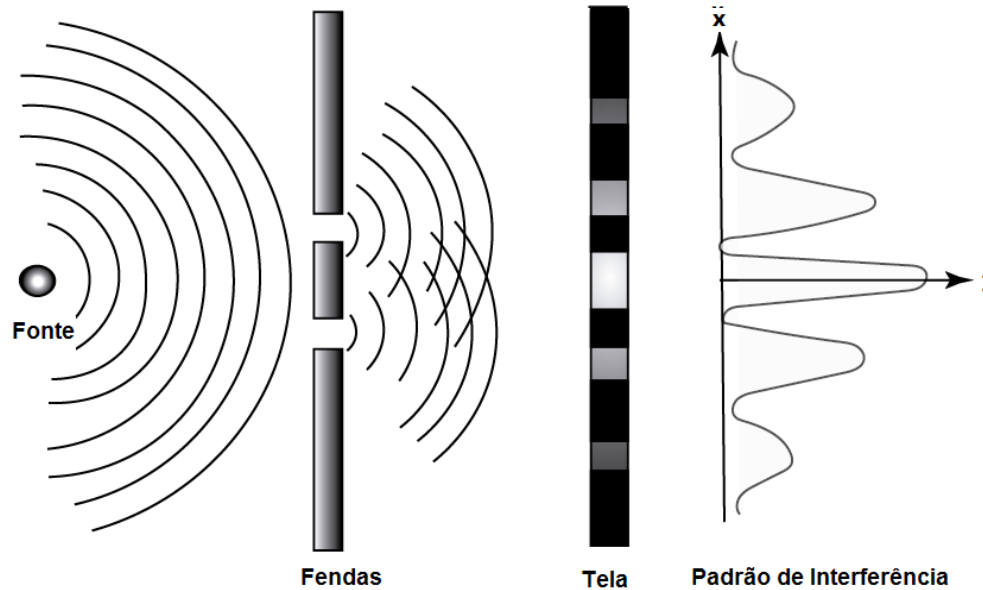
- Não conhecemos o estado da partícula antes de realizar uma medida (1ª regra)
- Supomos que o estado é uma superposição de possíveis resultados

$$|\psi\rangle = \sum_m c_m |a_m\rangle$$

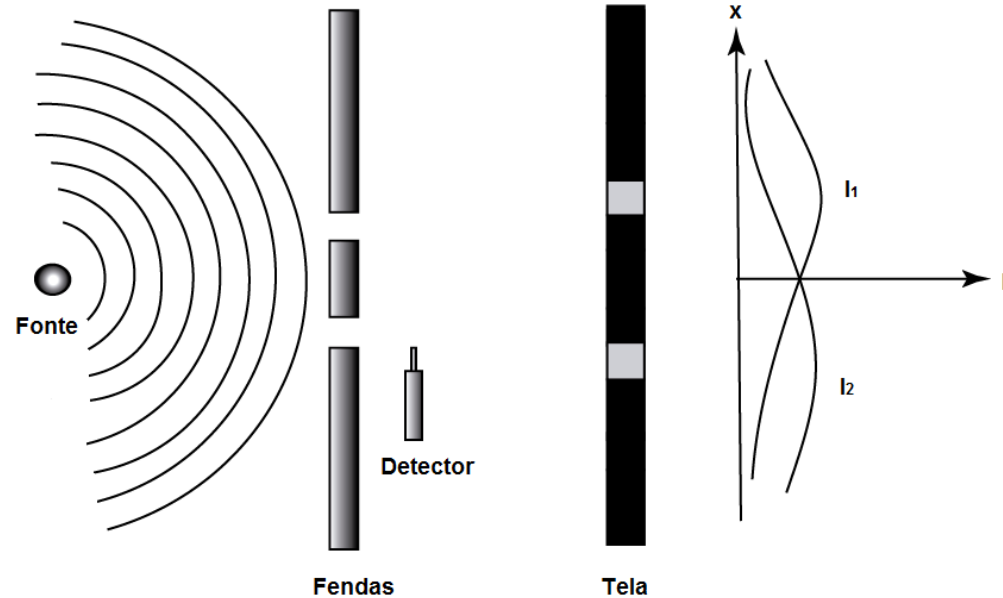
- A medida imediatamente “colapsa” o estado para um dos possíveis resultados

$$|\psi\rangle = \sum_m c_m |a_m\rangle \xrightarrow{\text{medida}} |\psi\rangle = |a_m\rangle$$

Origem do mistério: o que está acontecendo?



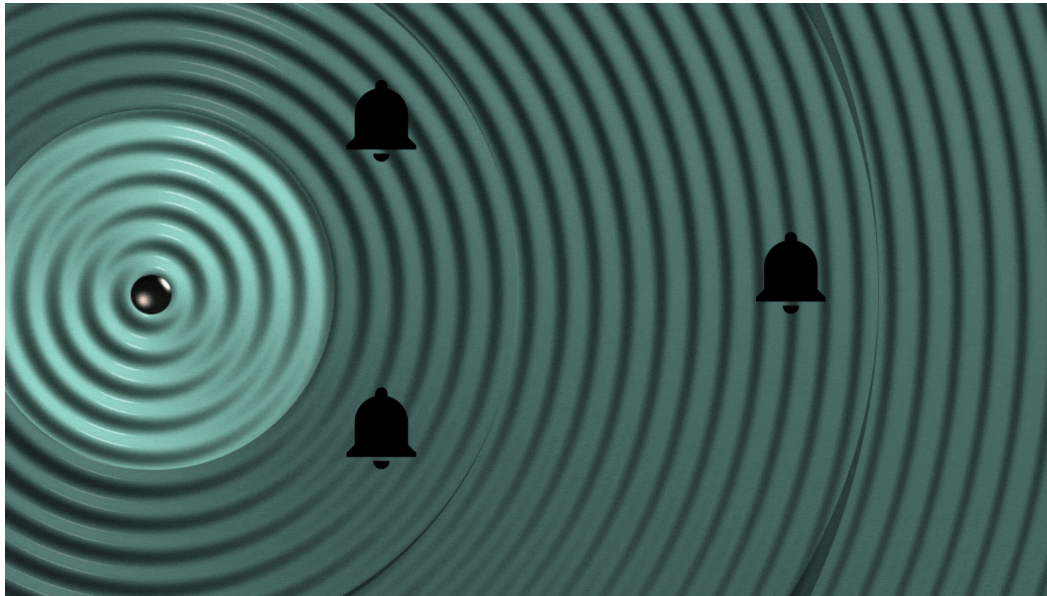
Origem do mistério: o que está acontecendo?



Um exemplo clássico

- Imagine uma onda circular se propagando na água
- Se na superfície forem colocados alguns sinos que, ao serem balançados, soam
- O que irá acontecer quando a onda chegar na posição dos sinos?

Um exemplo clássico

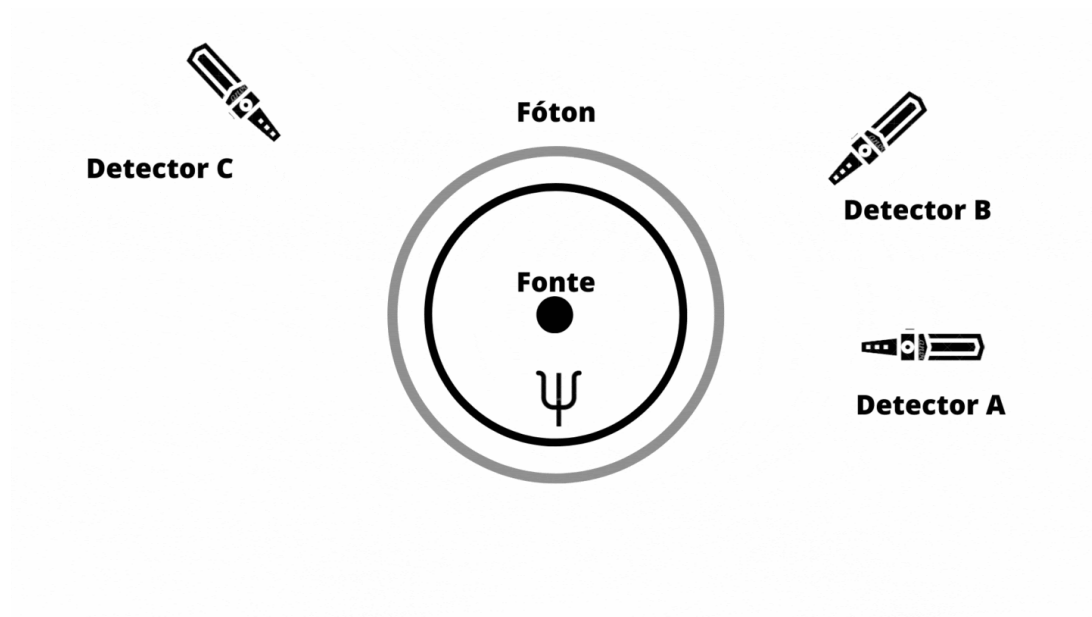


O que
aconteceria
no caso
quântico?

O que aconteceria no caso quântico?

- Nesse caso em vez de:
 - Ondas aquáticas $\longrightarrow$ onda de propagação do fóton
 - Sinos $\longrightarrow$ detectores de fótons

Bolha de Einstein



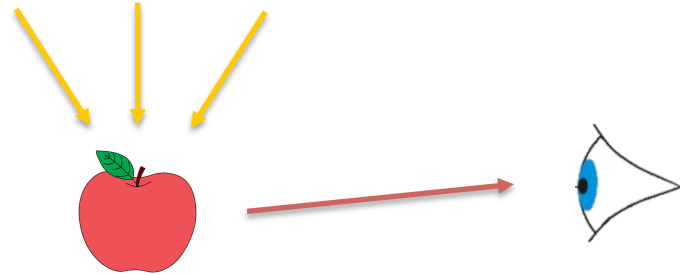
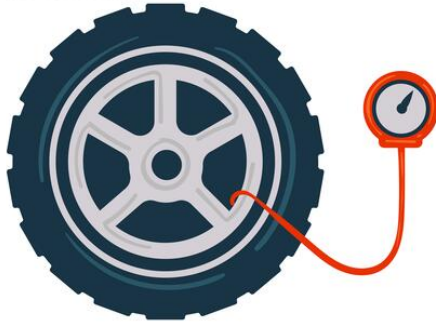
Bolha de Einstein sob a 2ª regra

- A função de onda é apenas um mapa de probabilidades e não muda o ambiente. Portanto, não a tratamos como um ente físico que carrega informação
- Apenas a partícula pode interagir com o ambiente (detector)
- Neste caso, temos o colapso.

Efeito do Observador

Felipe B. Mazzi

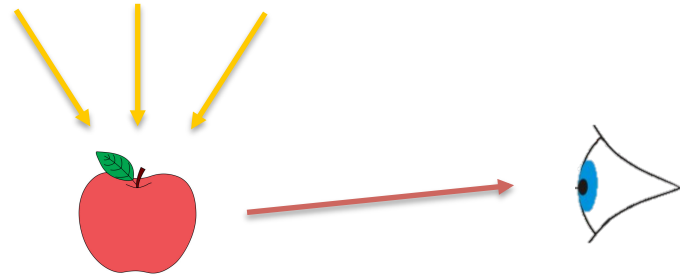
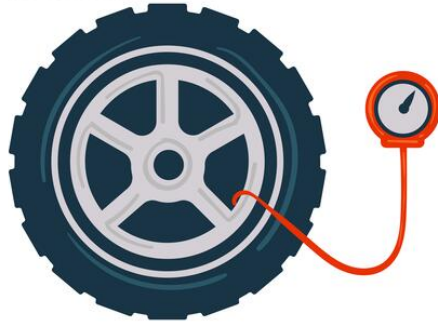
- O ato de observação altera o fenômeno observado?



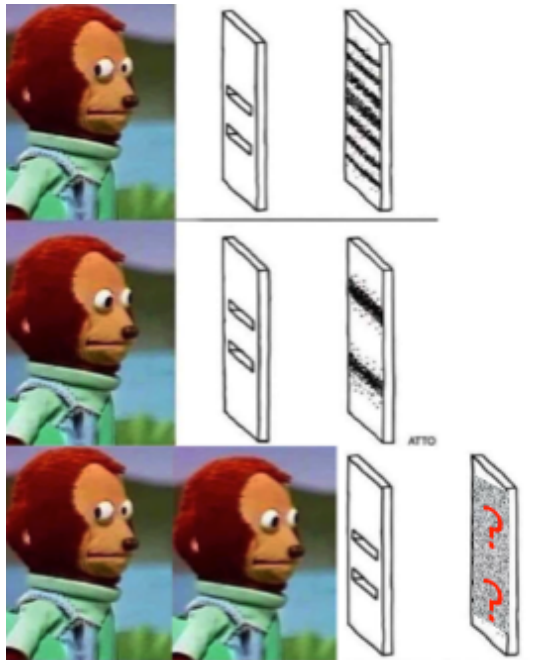
Efeito do Observador

Felipe B. Mazzi

- O ato de observação altera o fenômeno observado?



- E na mecânica quântica?

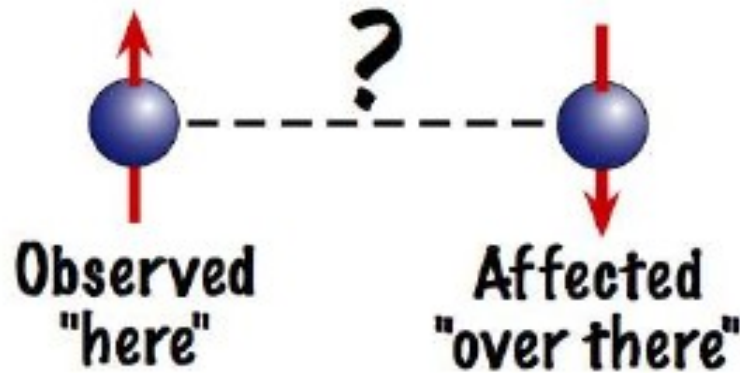


O resultado depende
de “estarmos
olhando”?

NÃO!

Efeito do Observador

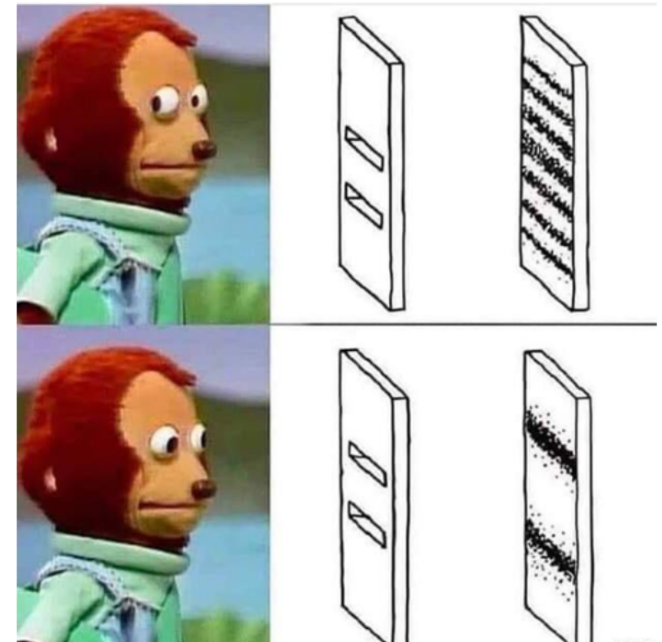
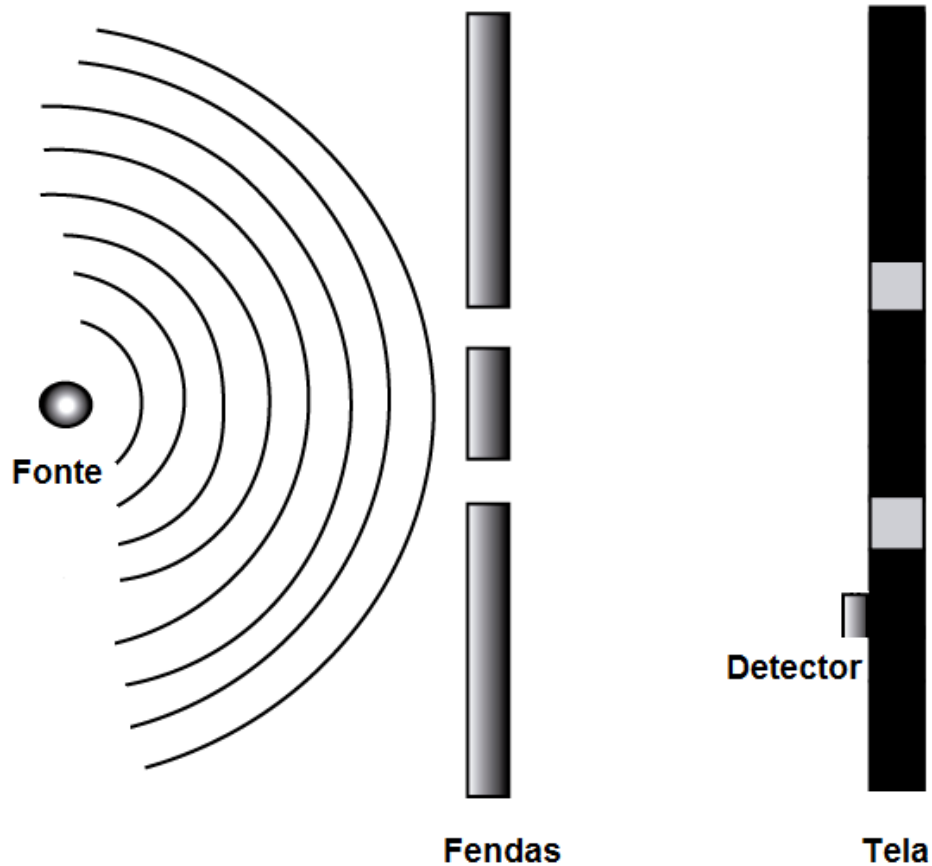
- Partícula entrelaçadas



- O que muda quando tomamos conhecimento do estado de uma das partículas?

Efeito do Observador

- Experimento da dupla fenda



Partículas entrelaçadas

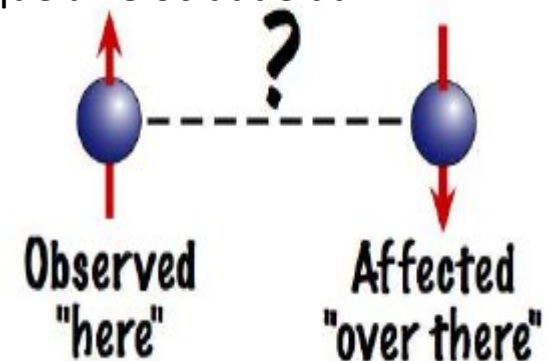
Willian Vieira dos Santos

❖ Experimento:

- ❖ Duas partículas-irmãs (par elétron-pósitron) são separadas por um processo físico e levam consigo uma propriedade intrínseca oposta de spin (up ou down)
- ❖ Viajam em direções opostas até uma grande distância
- ❖ A Mecânica Quântica diz que cada uma delas pode ter uma mistura de estados de spin
- ❖ O spin não está determinado até se efetuar a medição de uma das partículas
- ❖ Mas ao efetuar a medição de uma, a outra colapsa para o estado oposto instantaneamente

❖ Problema:

- ❖ A informação da medição viajou mais rápida que a velocidade da luz
- ❖ Teoria da relatividade diz que nada viaja mais rápido que a velocidade da luz



Partículas entrelaçadas

Willian Vieira dos Santos

- ❖ Paradoxo EPR (Einstein-Podolsky-Rosen, 1935)
 - ❖ Ação fantasmagórica a distância
 - ❖ A Mecânica Quântica está incompleta (variáveis escondidas)
- ❖ Interpretação de Copenhagen (Bohr, 1935)
 - ❖ Revisão radical de atitude a respeito da realidade física
- ❖ John S. Bell elabora relações matemáticas de desigualdades (1964) apoiando variáveis escondidas
 - ❖ Ponto a favor ao EPR: nenhuma teoria local pode fazer previsões como mostra a MQ
- ❖ Trabalhos de S. J. Freedman e J. F. Clauser violam as desigualdades de Bell (1972)
 - ❖ Mecânica Quântica é não-local
 - ❖ Interpretação de Copenhagen se mantém correta.

Partículas entrelaçadas

- ❖ Depois que as partículas foram separadas, você pode dizer que o sistema está realmente correlacionado durante uma medição?
 - ❖ De acordo com a regra de interpretação 1: NÃO
 - ❖ A única conclusão é que este estado colapsado era parte do estado original
 - ❖ Esse argumento por si só resolve as preocupações de Einstein
 - ❖ Nenhuma mensagem (informação) é transmitida mais rápido que a velocidade da luz
- ❖ A preparação do sistema envolve um colapso com as seguintes propriedades
 - ❖ (1) o estado único global garante que o spin de uma partícula esteja para cima e a da outra esteja para baixo, se medida na mesma direção
 - ❖ (2) a separação garante que apenas uma partícula será encontrada em cada local
- ❖ Se a direção da medição não for a mesma, as informações reveladas pelo colapso tornam-se irrelevantes para a outra medição
 - ❖ Se você encontrar spin para cima em um local, o pacote de spin para baixo desaparece neste local
 - ❖ O pacote com spin para cima no outro local também desaparece
 - ❖ O novo mapa devido à medição (houve um novo colapso) é o de spin para baixo

Gato de Schrödinger

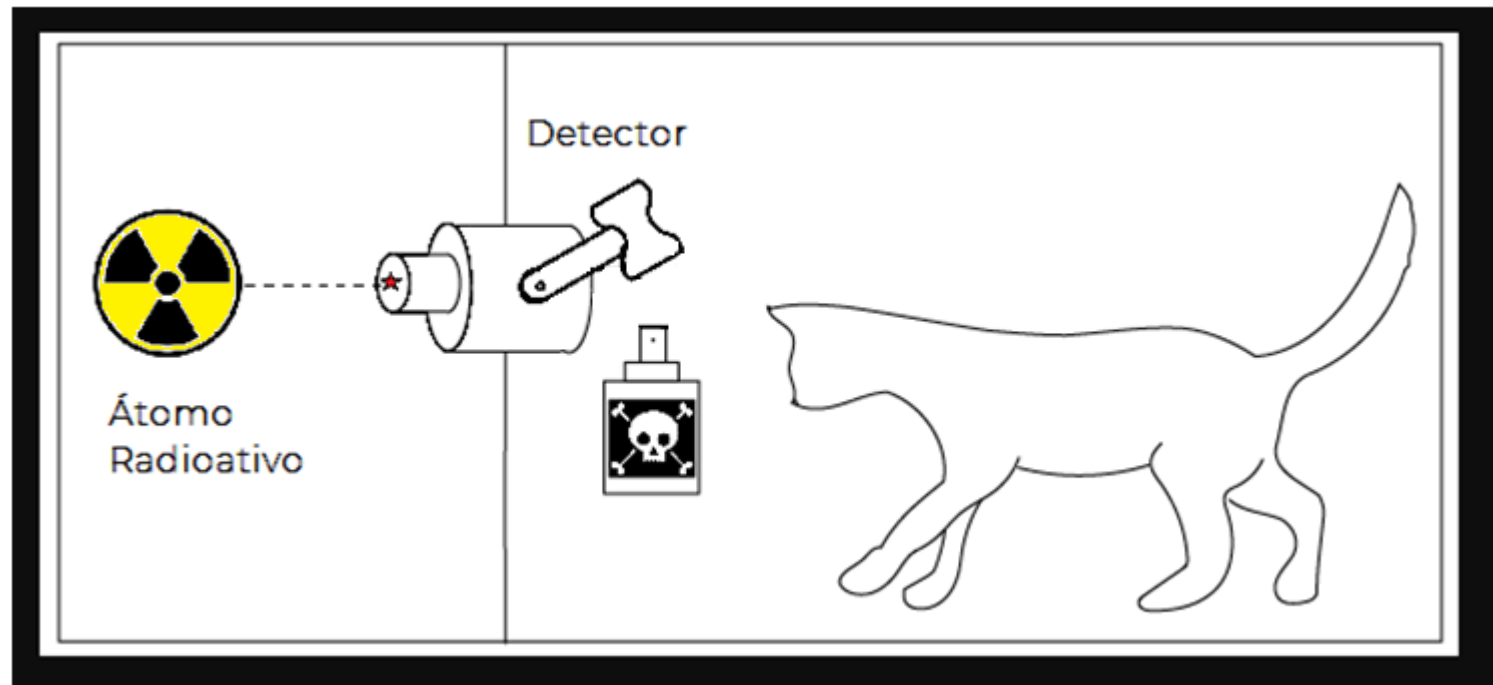
Elsa Bifano Pimenta

O interesse no gato de Schrödinger cresceu tanto que faz parte da cultura popular



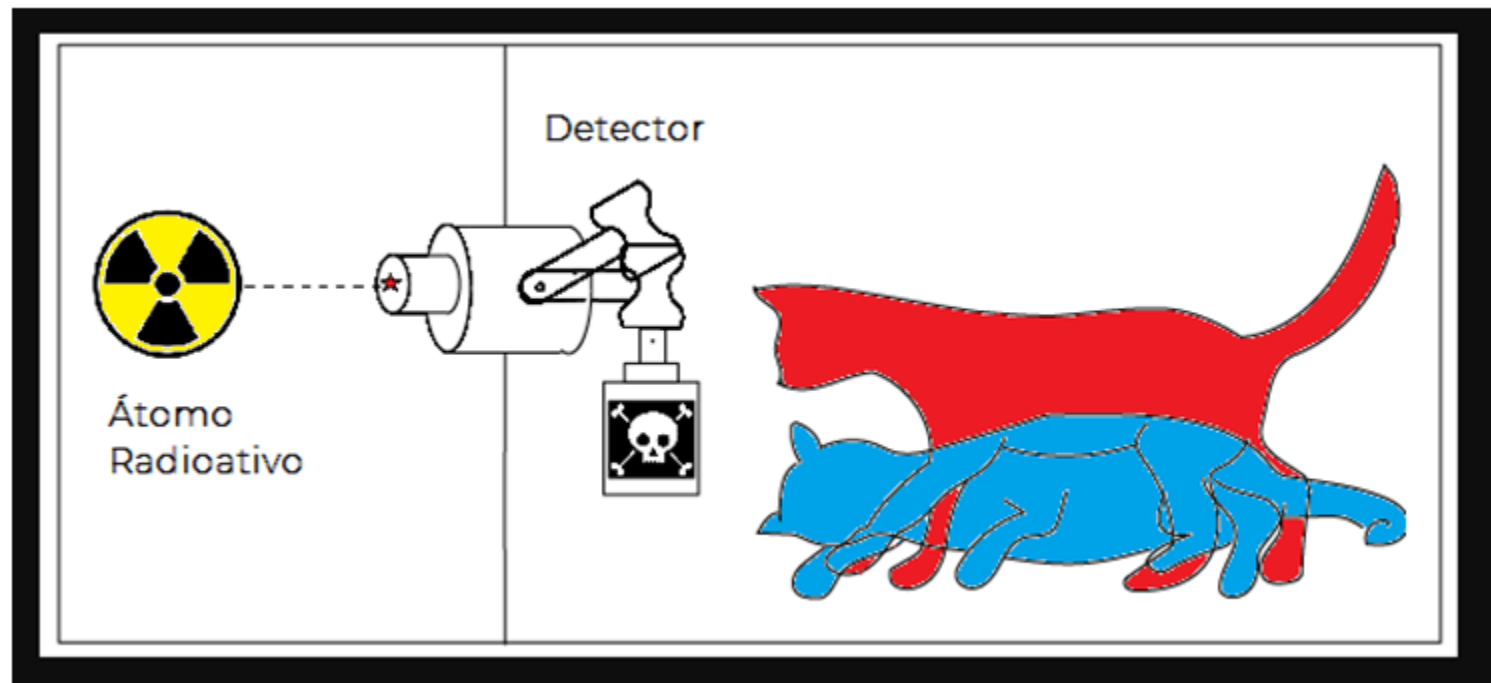
Gato de Schrödinger

Schrödinger criou um experimento mental chamado
Paradoxo do gato



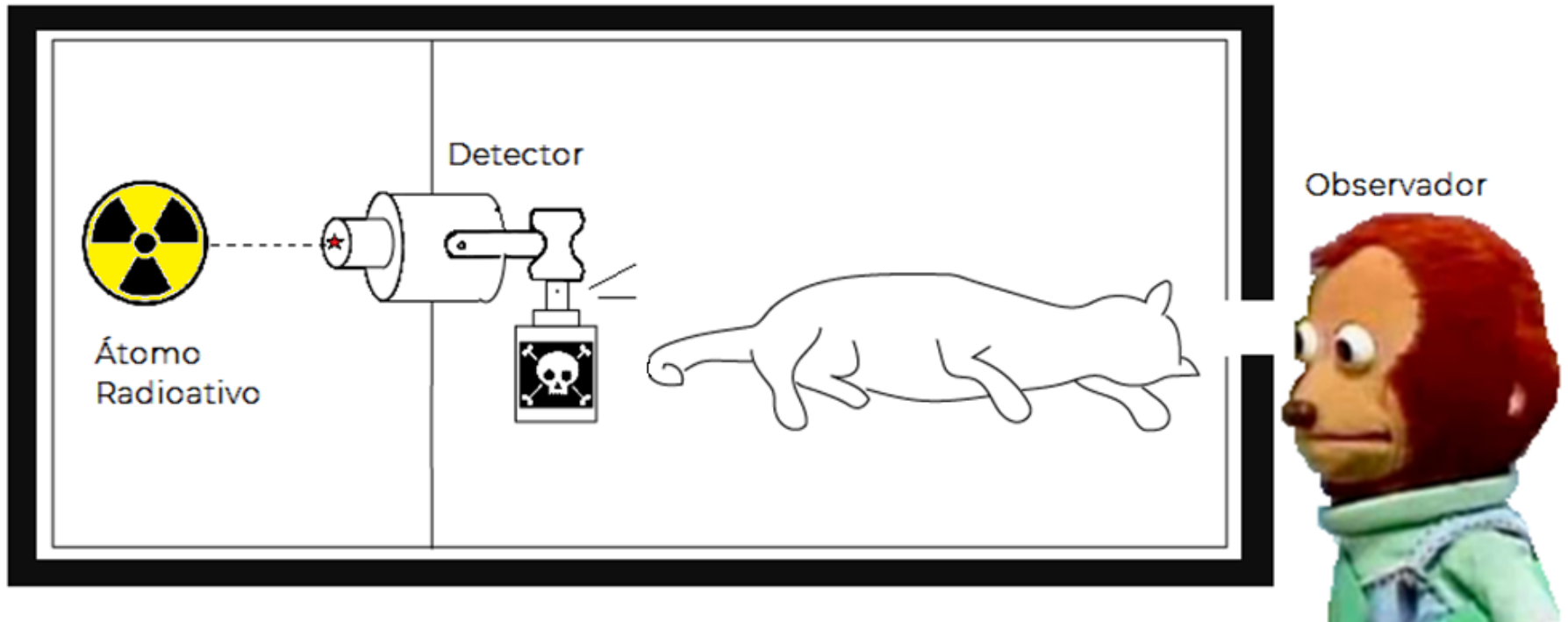
Gato de Schrödinger

De acordo com Schrödinger, o gato poderia estar
vivo e morto



Gato de Schrödinger

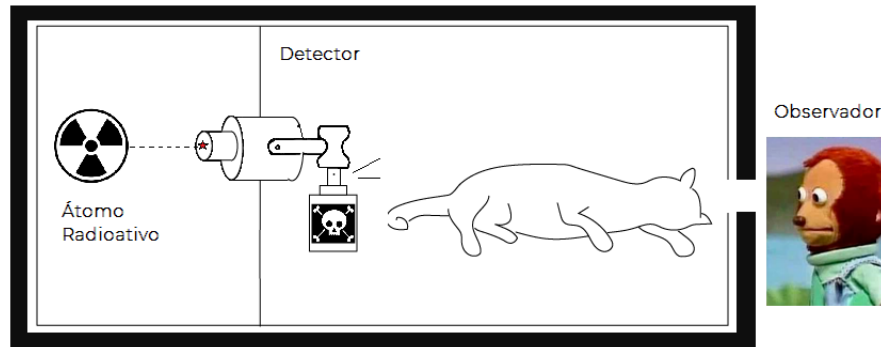
Quando a caixa é aberta pelo observador..



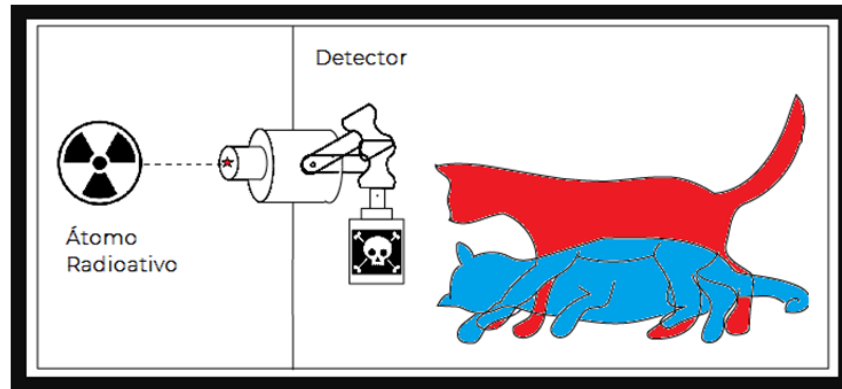
Gato de Schrödinger

Questões:

1- O observador provoca o colapso?

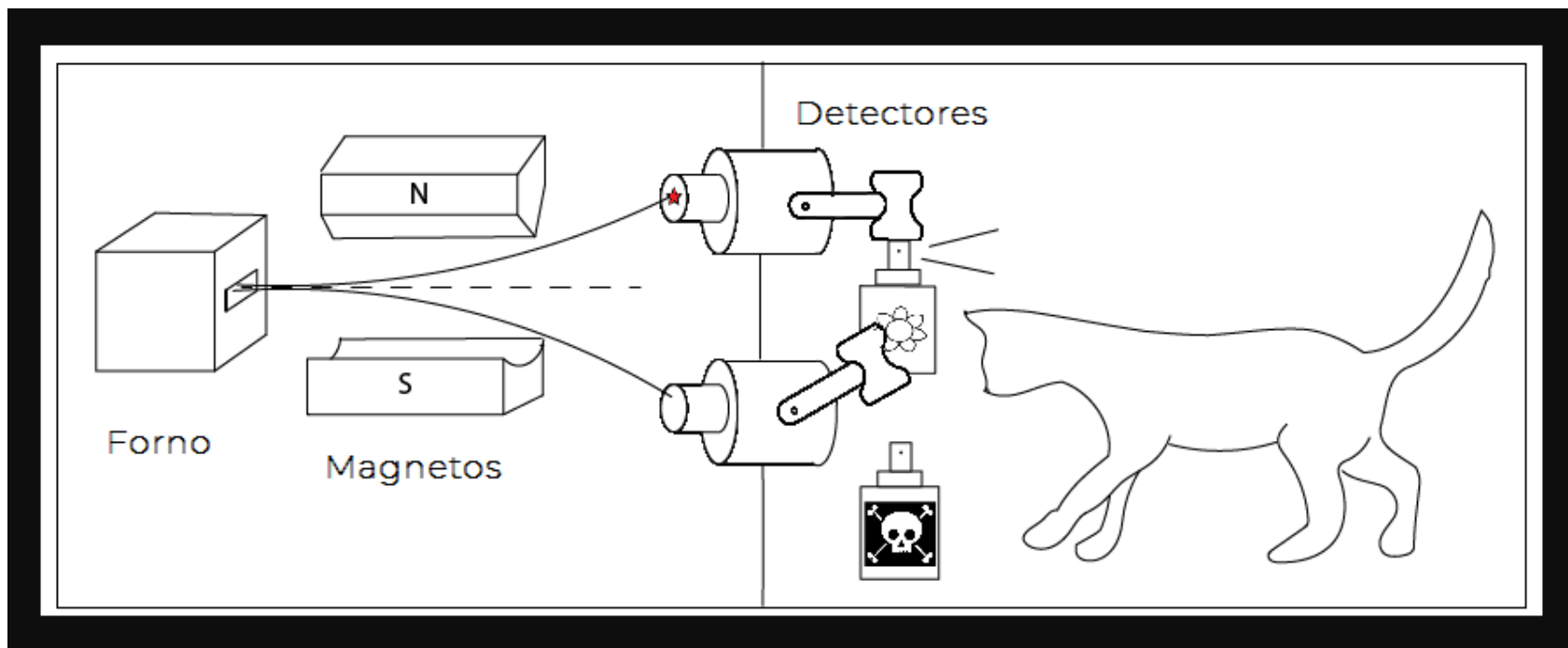


2- Ocorre a superposição do gato quando a caixa está fechada?

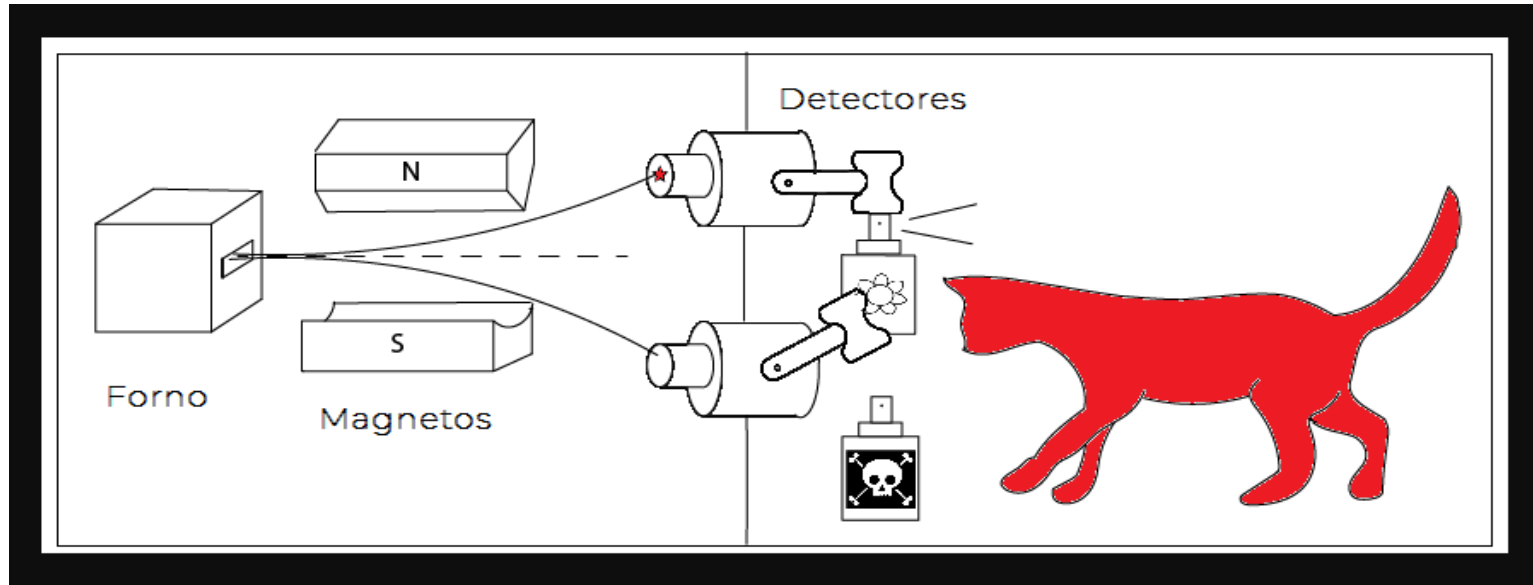


Gato de Schrödinger

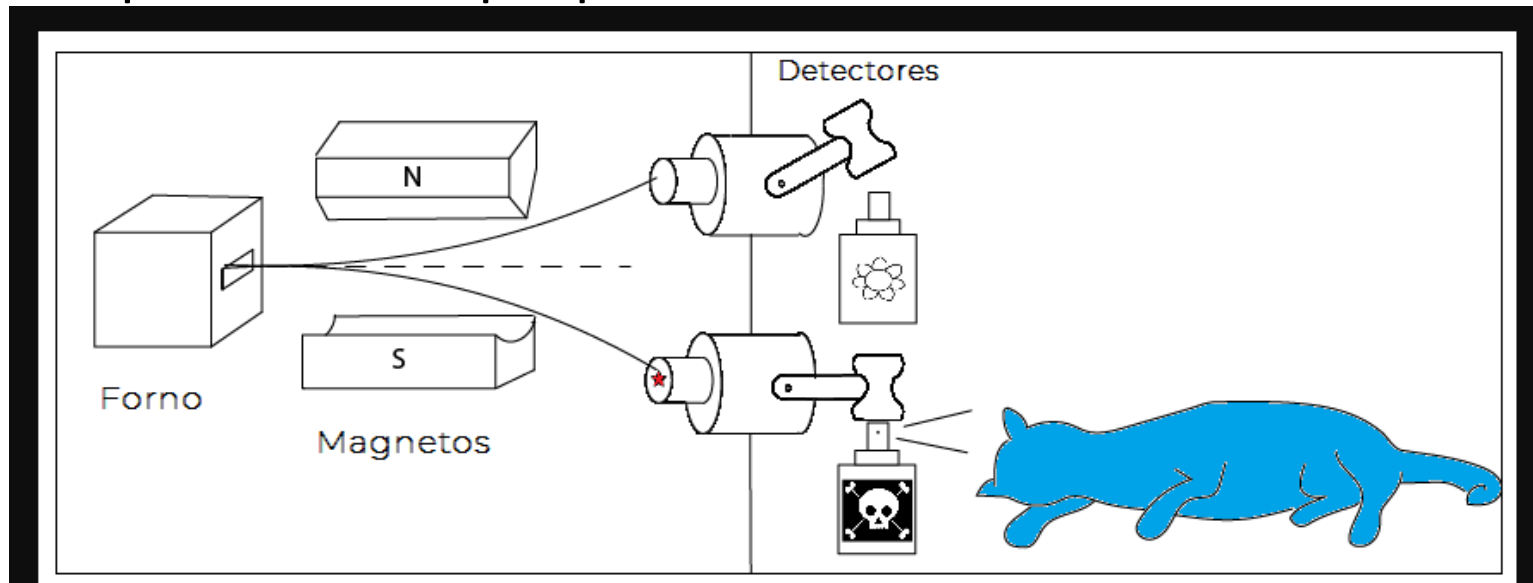
Vamos olhar o paradoxo com ajuda do experimento Stern-Gerlach:



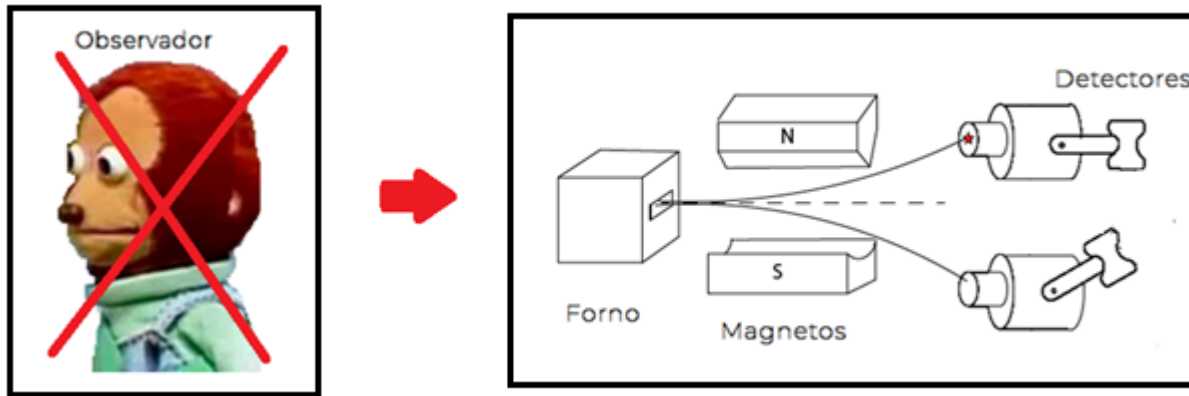
Se a partícula for spin para cima



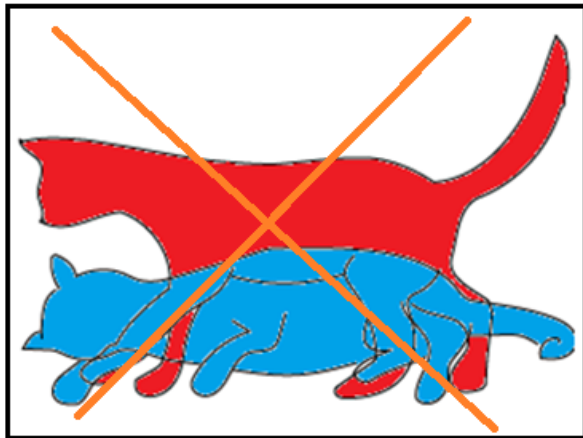
Se a partícula for spin para baixo



1- O observador provoca o colapso?



2-Ocorre a superposição do gato vivo gato morto quando a caixa está fechada?



$$i\hbar \frac{d\Psi(\vec{r}, t)}{dt} = H\Psi(\vec{r}, t)$$

Colapsos e Observadores

Colapsos acontecem o tempo todo sem qualquer observador

- No início do universo tínhamos um plasma quente. Elétrons e prótons, com seus enormes pacotes de ondas, encontraram-se para formar átomos de hidrogênio. Ninguém estava observando.
- Se você jogar um elétron de alta energia contra um gás ou uma superfície, ele irá ionizar seu caminho. Cada colisão causa um colapso da função de onda até que o elétron seja parado e preso formando um ânion atômico ou molecular (a situação final se nada mais acontecer).
- Campos gravitacionais remodelam pacotes de ondas o tempo todo (a formação de estrelas é um bom exemplo). Nenhum observador é necessário.
- O observador no experimento de fenda dupla pode destruir o padrão de interferência agindo no mapa de probabilidades e/ou causando colapsos, mas é importante lembrar que a natureza (o ambiente) faz isso o tempo todo. A Mecânica Quântica impõe regras duras, mas claras, para prever o que pode acontecer.

Conclusão

A teoria está completa. Só precisamos aceitar a ideia de que não podemos saber tudo.