

Mecânica quântica



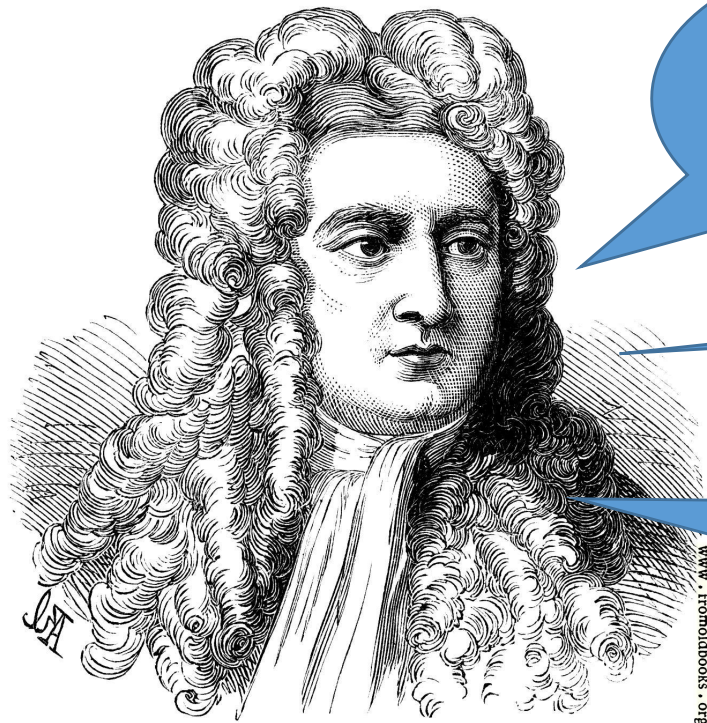
1927 Solvay Conference on Quantum Mechanics. Photograph by Benjamin Couprie, Institut International de Physique Solvay, Brussels, Belgium. From back to front and from left to right : Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, Jules-Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Howard Fowler, Léon Brillouin, Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr, Irving Langmuir, Max Planck, Marie Skłodowska Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles-Eugène Guye, Charles Thomson Rees Wilson, Owen Willans Richardson

Resumo

- Um pouco da história da Mecânica Quântica
 - Os problemas que a tornaram necessária
 - O que ela resolve hoje em dia
- O que é mecânica quântica?
 - Dualidade onda-partícula
 - A função de onda
 - Princípio da incerteza
 - Algumas coisas estranhas

Antes da mecânica quântica

- Mecânica clássica - Newton e suas três leis

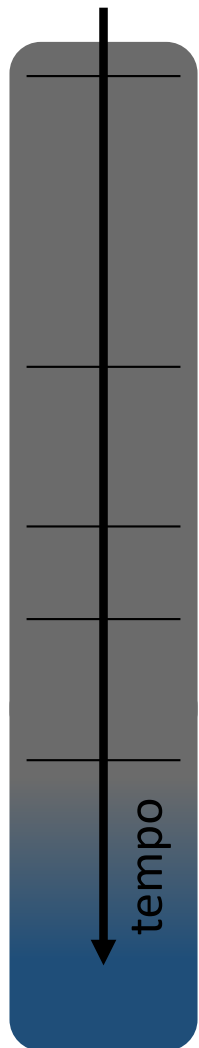


Um objeto
tende a manter
seu estado de
movimento

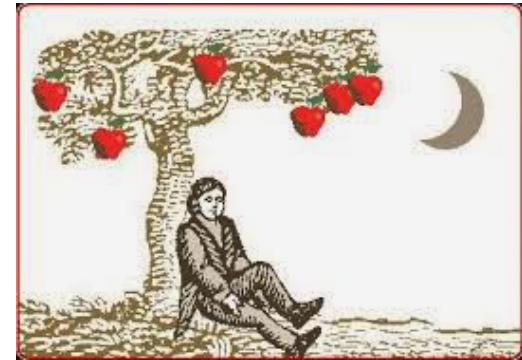
$$F = ma$$

Para cada ação tem
uma reação oposta
e de igual
magnitude

A mecânica clássica reinava até o início do séc. XX



1687 – *Philosophiae Mathematica*
Newton



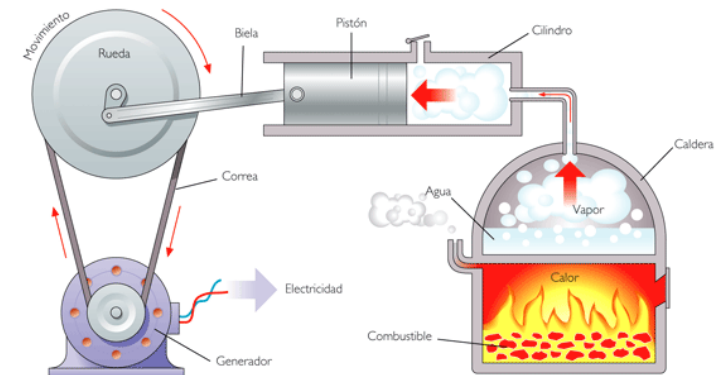
1788 – *Mecanique Analytique*
Lagrange

1834 – Mecânica Hamiltoniana

1864 – Eq. Maxwell - Eletromagnetismo

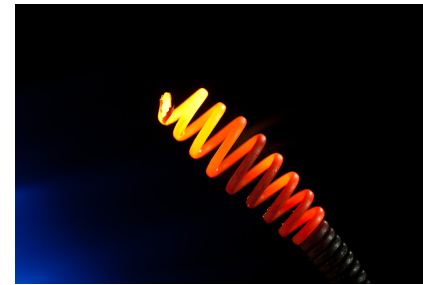


1900 – Entropia - Boltzman

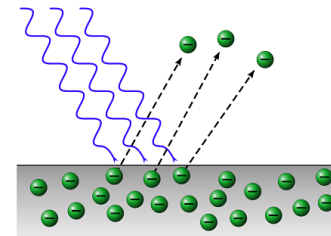


No final do séc. XIX, início do séc. XX

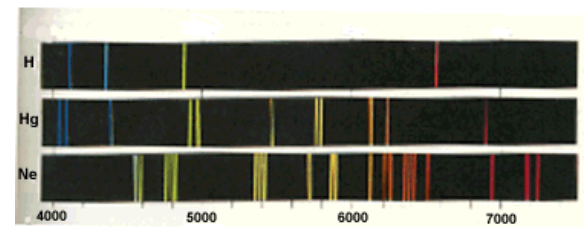
- Vários fenômenos não eram explicados pela física clássica



A radiação de
Corpo negro

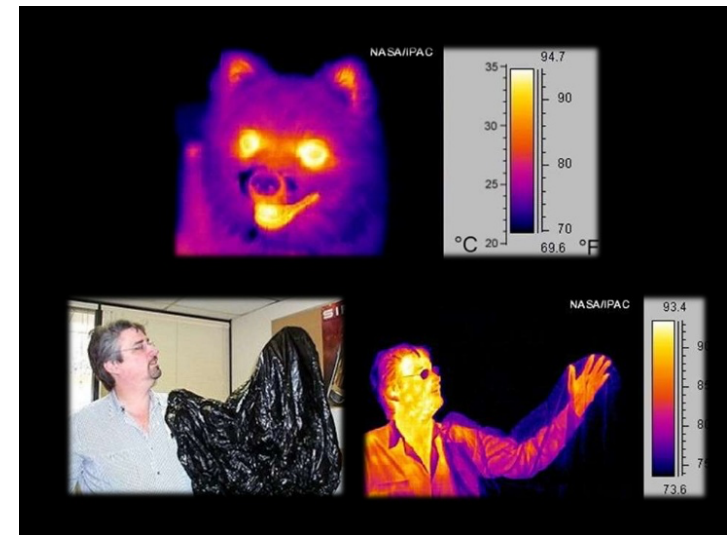
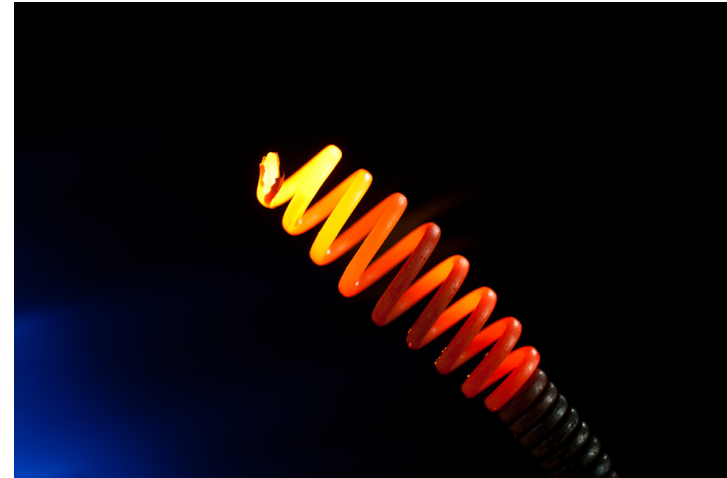
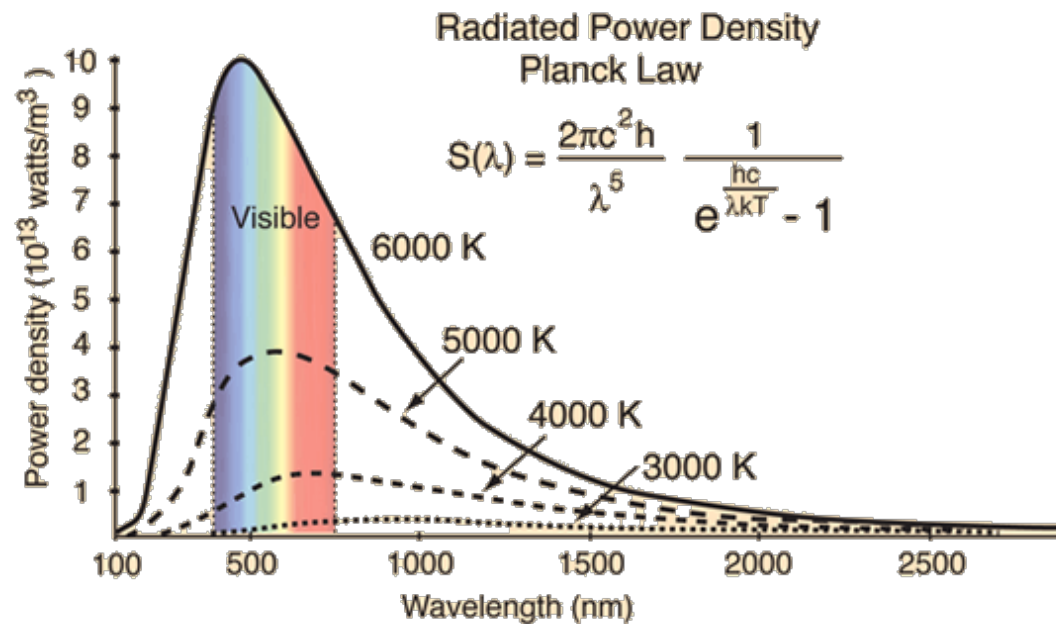


Efeito
Fotoelétrico



A luz emitida
Por átomos

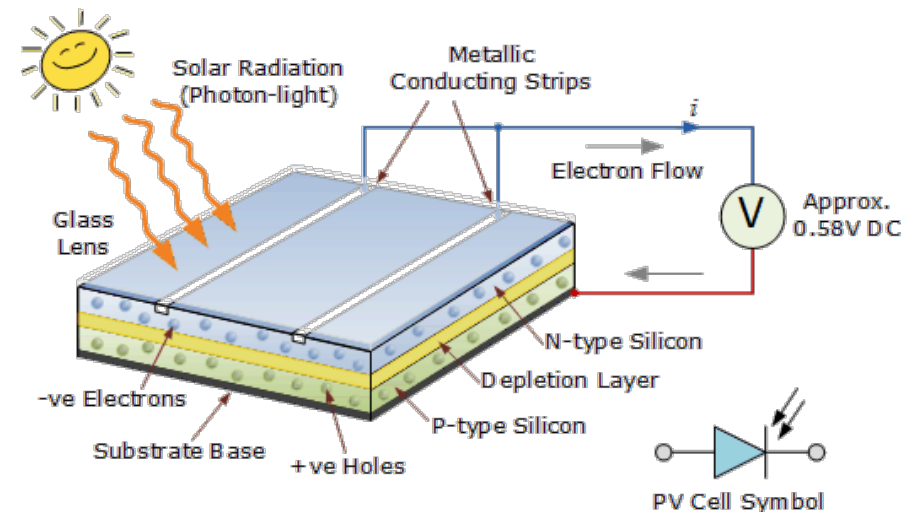
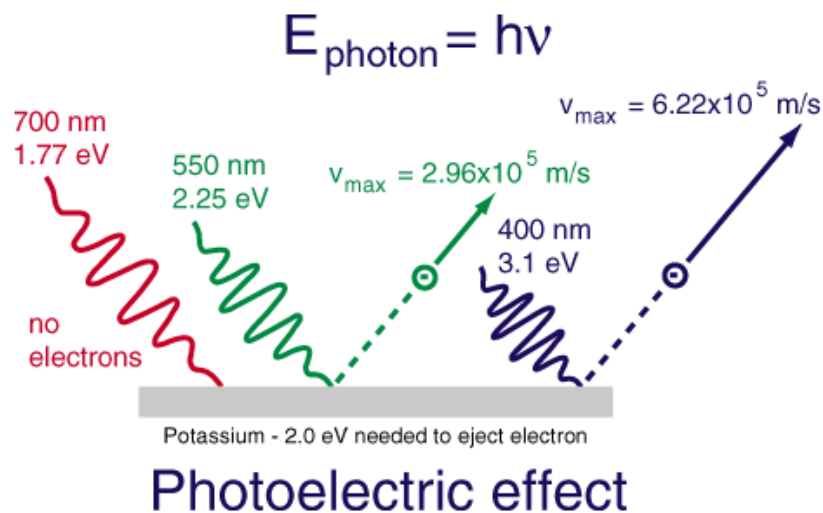
Radiação de corpo negro



1901 – Max Planck – Energia dos osciladores que emitem radiação é quantizada --
constante de Planck $h \sim 6.63 \times 10^{-34}$ Js

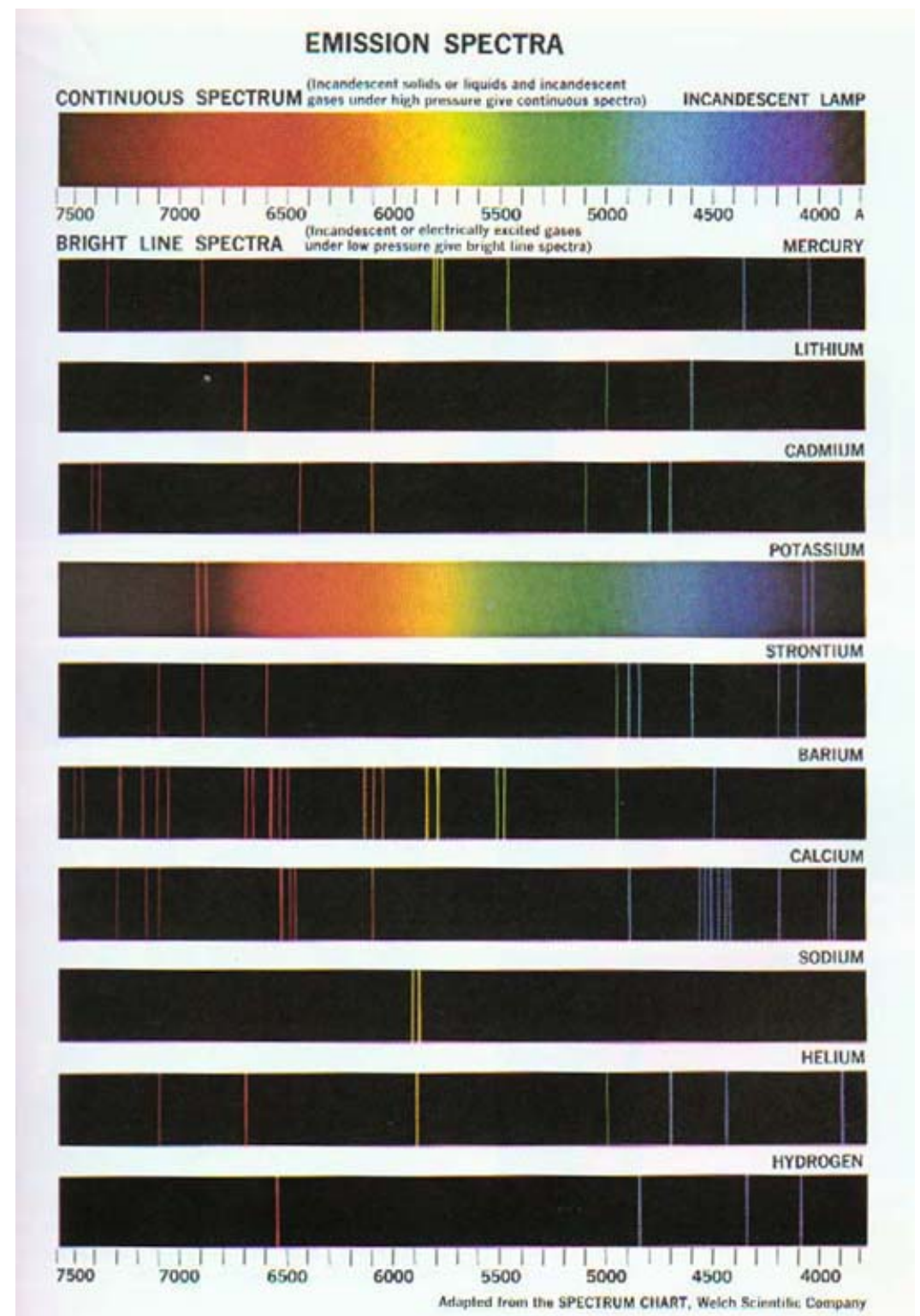
O efeito fotoelétrico

- Elétrons são arrancados de metais quando a luz incide sobre ele
 - Mas não funciona para luz vermelha, não importa a intensidade da luz
 - Mas funciona para luz azul, mesmo sendo bem fraquinha
 - Einstein explicou isto explicando que a luz é feita de "partículas" chamadas fótons
 - Um fóton "bate" em um elétron, arrancando ele do metal.
 - Fótons azuis são mais energéticos que fótons vermelhos



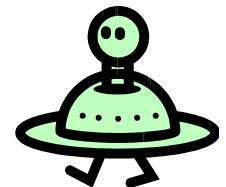
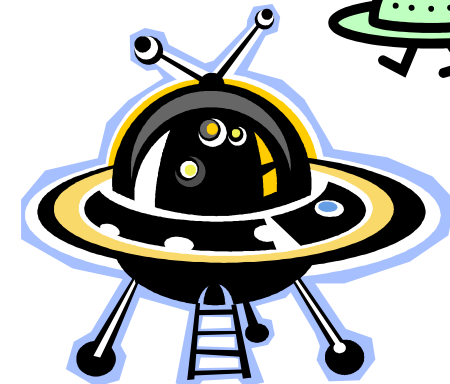
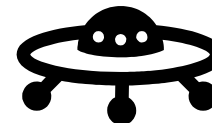
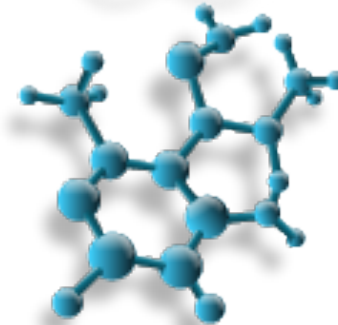
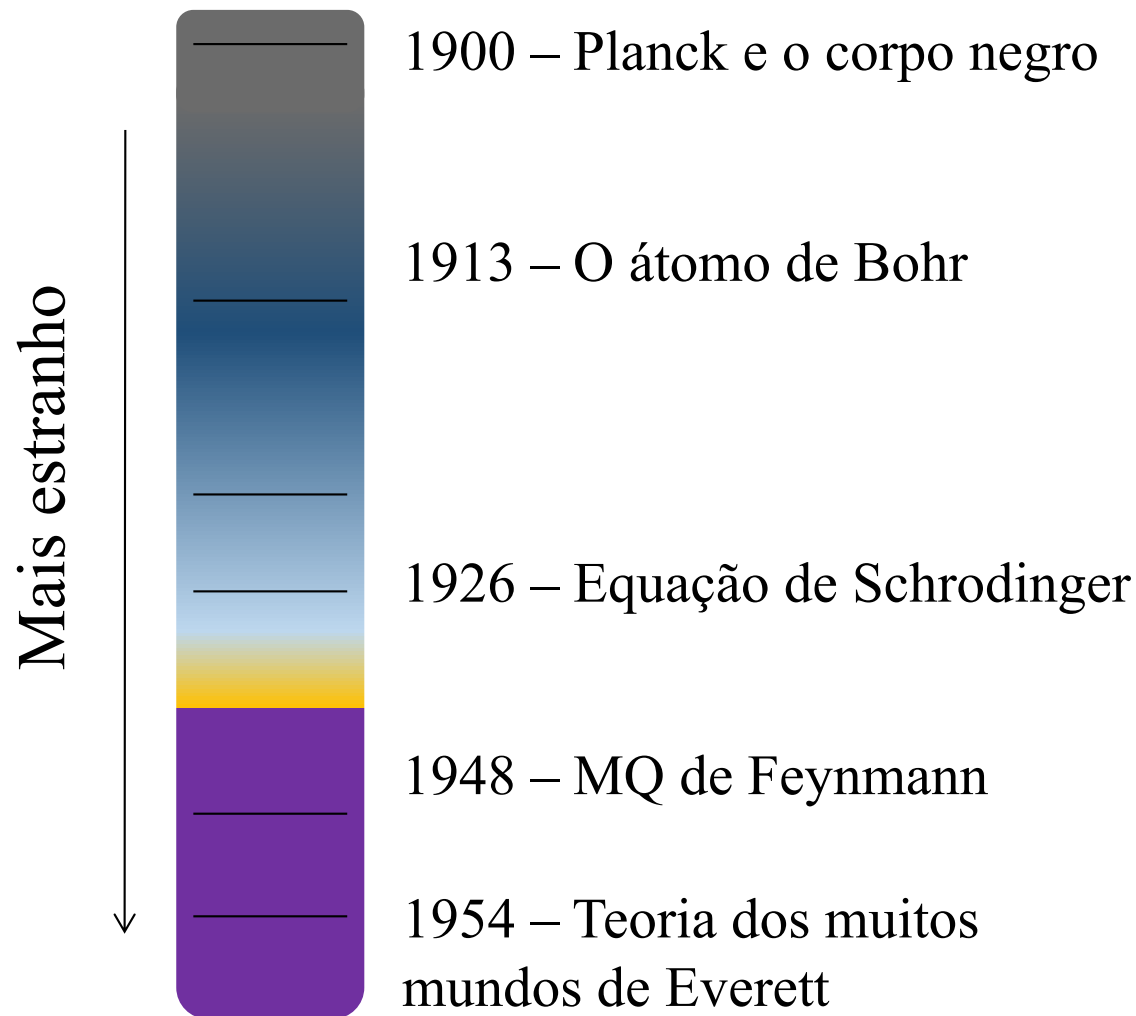
Luz emitida por átomos

- Cada átomo emite luz em "cores" características
 - Cada átomo tem uma "impressão digital"
 - Luz é emitida somente em frequências bem definidas
 - O hidrogênio, que tem apenas UM elétron, emite luz de várias cores



A mecânica quântica

A Mecânica quântica foi desenvolvida para explicar estes fenômenos e vem se mostrando uma das teorias em física mais bem sucedidas da história



A Mecânica Quântica é necessária

- Sem ela nós seríamos incapazes de ter:
 - Dispositivos semicondutores
 - Computadores, celulares, tablets, calculadoras, etc.
 - Lasers
 - CD, DVD, leitores de código de barras, canetinha laser ☺
 - Ressonância magnética
 - Reatores nucleares
 - Relógios atômicos
- Contudo os físicos demoraram para aceitar a MQ
 - Ela não é intuitiva. Alias é estranha para \$&#e\$!!@

A mecânica quântica é a base de funcionamento do universo

- Contudo, seus efeitos desaparecem em larga escala



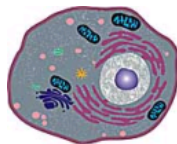
1 metro

Clássico



1 milímetro

Clássico



1 micrometro

Clássico

A escala de transição não é muito clara

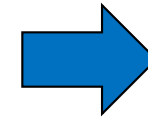
1 nanometer

Quântico

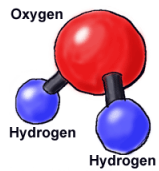
Sem os fenômenos quânticos



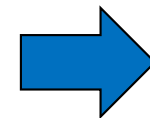
Muitas reações biológicas
Não seriam possíveis.



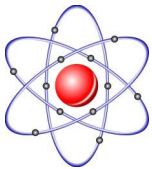
Vida não existe



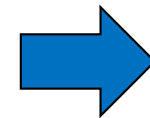
Ligações químicas seriam
Impossíveis



Todas moléculas
desintegrariam



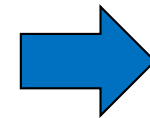
Átomos seriam instáveis



Universo não
Existiria como é



Não existiria cura quântica



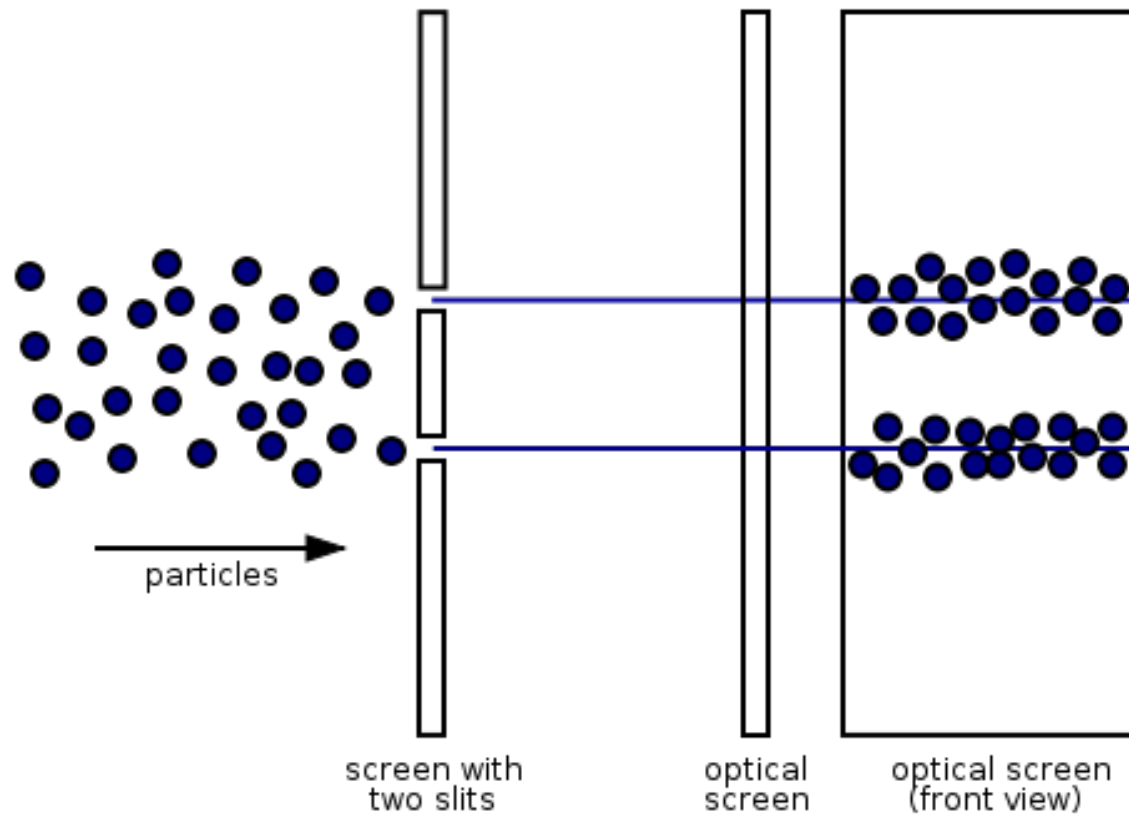
AINDA BEM!!!

Dualidade onda-partícula

- Einstein mostrou que ondas eletromagnéticas (luz) apresentavam comportamento de partículas (fótons)
- Seria possível que partículas, no mundo quântico, apresentassem comportamento de ondas?
- Se sim, quando uma onda é partícula e quando uma partícula é onda?

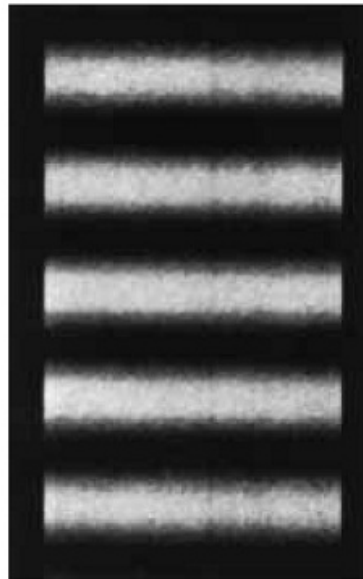
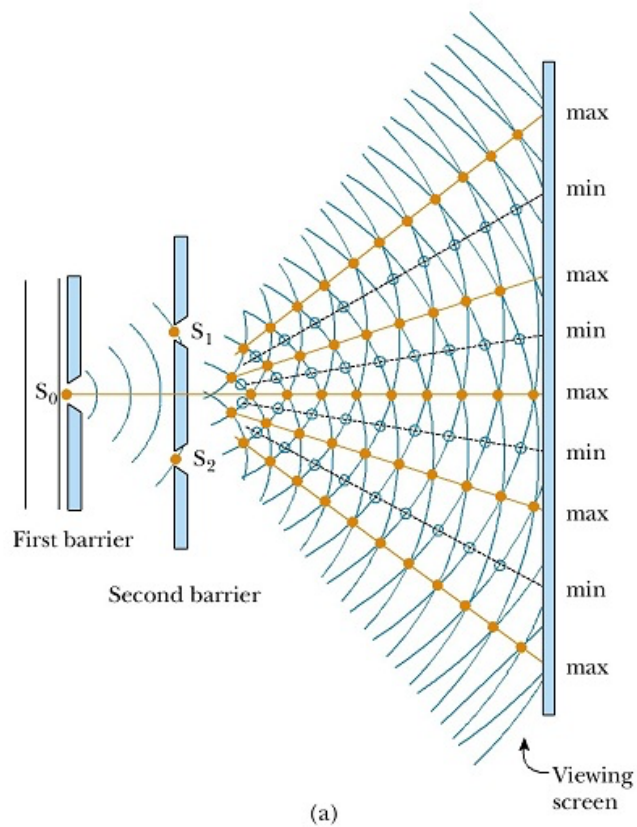
Dualidade onda-partícula

- Partículas clássicas passando por duas fendas

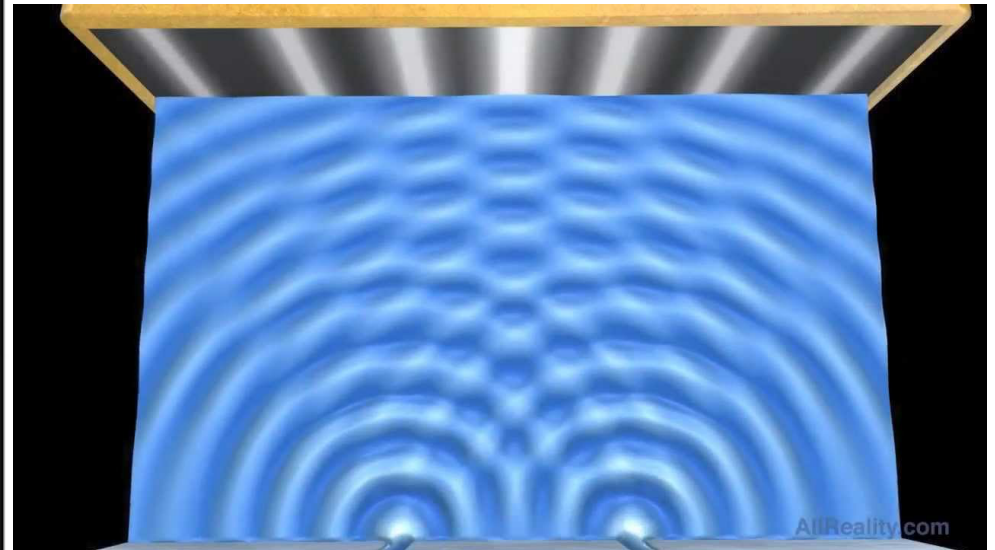


Dualidade onda-partícula

- Ondas passando por duas fendas e interferência entre ondas



(b)



Dualidade onda-partícula

**WAVE
PARTICLE DUALITY**

All the animations and explanations on
www.toutestquantique.fr

Ondas de matéria – relação de *de Broglie*

- Luz possui comportamento de partícula e onda
- Partículas de matéria quântica também apresentam comportamento ondulatório. Uma partícula de momento p possui comprimento de onda dado pela relação de de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

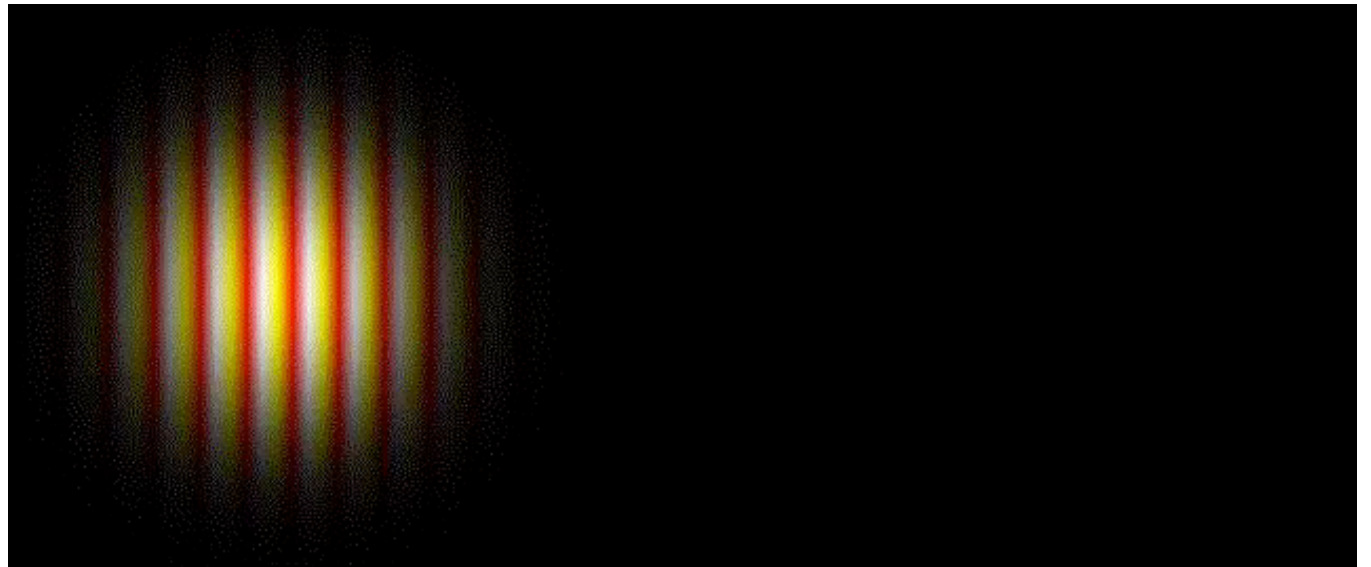
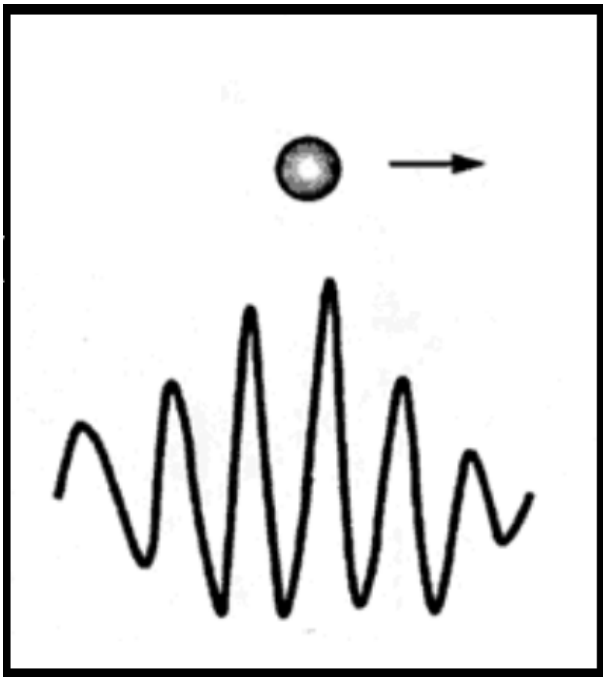
- Fenômenos ondulatórios se manifestam nas dimensões típicas do comprimento de onda

Princípios básicos da mecânica quântica

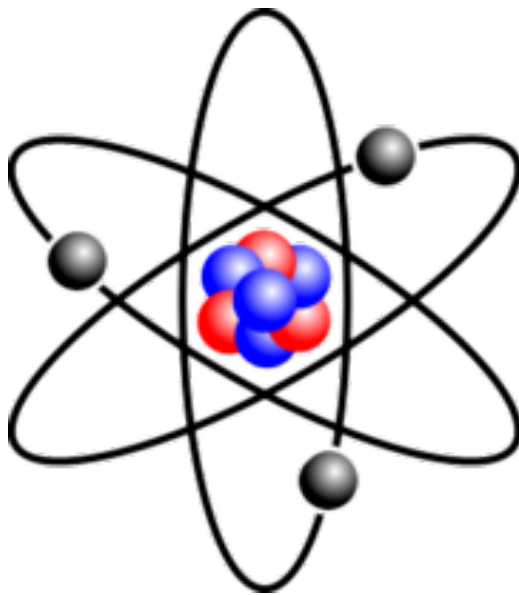
- Toda informação do sistema é fornecida pela função de onda que descreve o sistema
 - O "módulo quadrado" da função de onda estabelece a "probabilidade" de encontrar um estado quântico com determinadas propriedades
- A evolução de um sistema quântico (em baixas velocidades) é governada pela eq. de Schrodinger
- Toda quantidade física mensurável é descrita por um operador que atua sobre o estado do sistema

Função de onda: uma partícula quântica

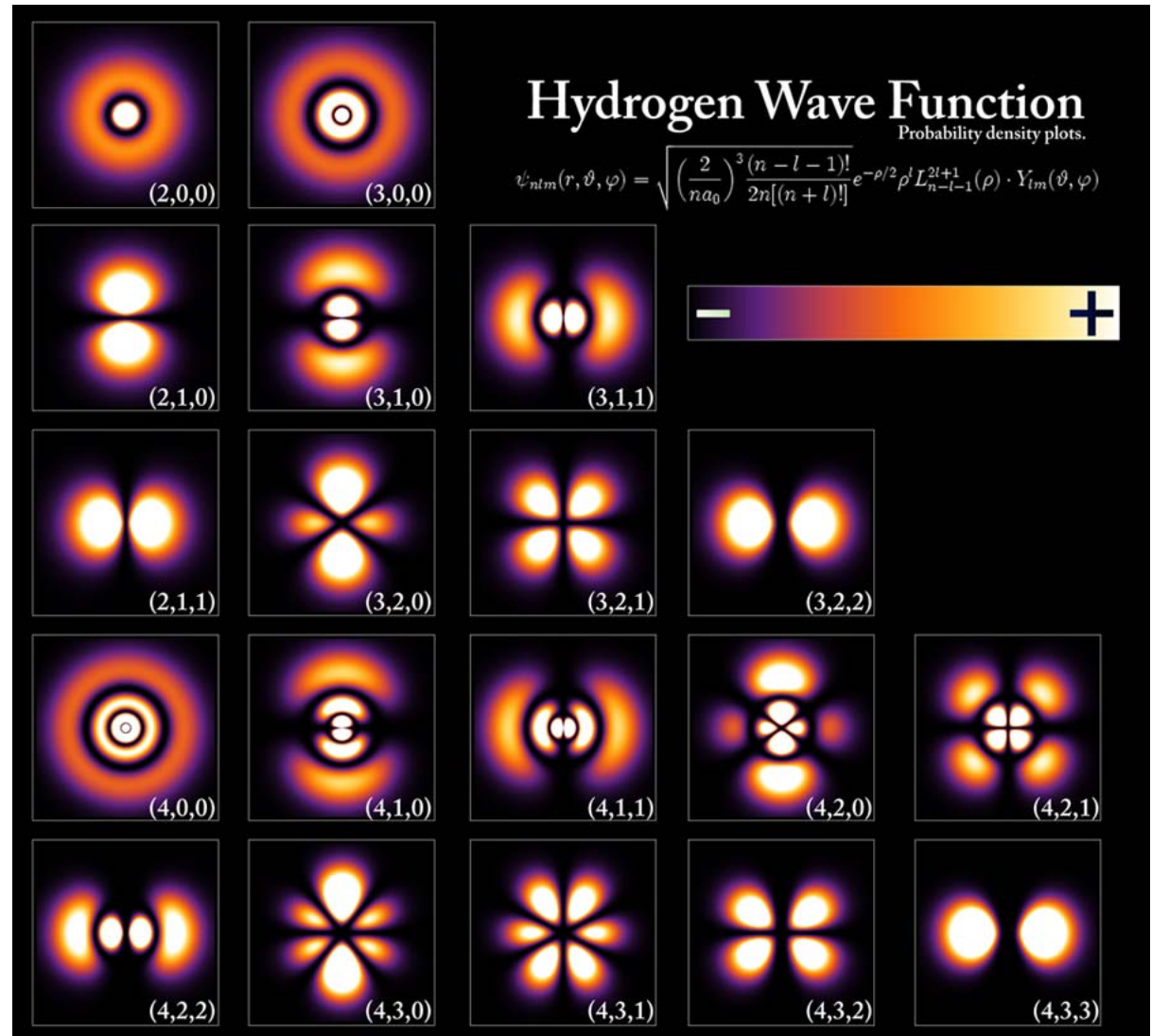
- Uma partícula quântica é representada por um "pulso" (pacote) de onda que se propaga



Exemplo: orbitais em um átomo de hidrogênio

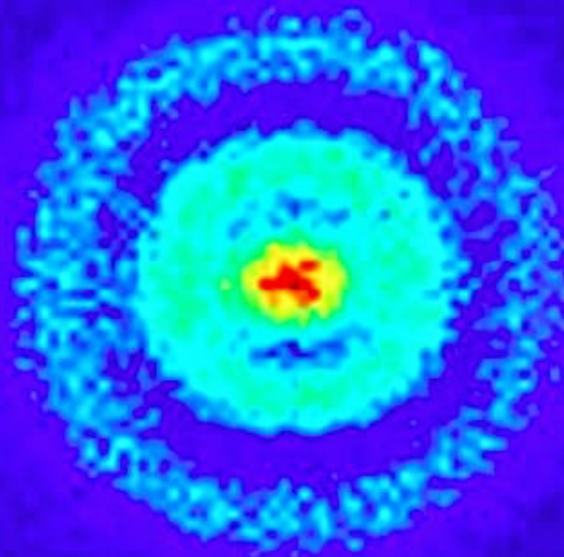


ERRADO!!!!



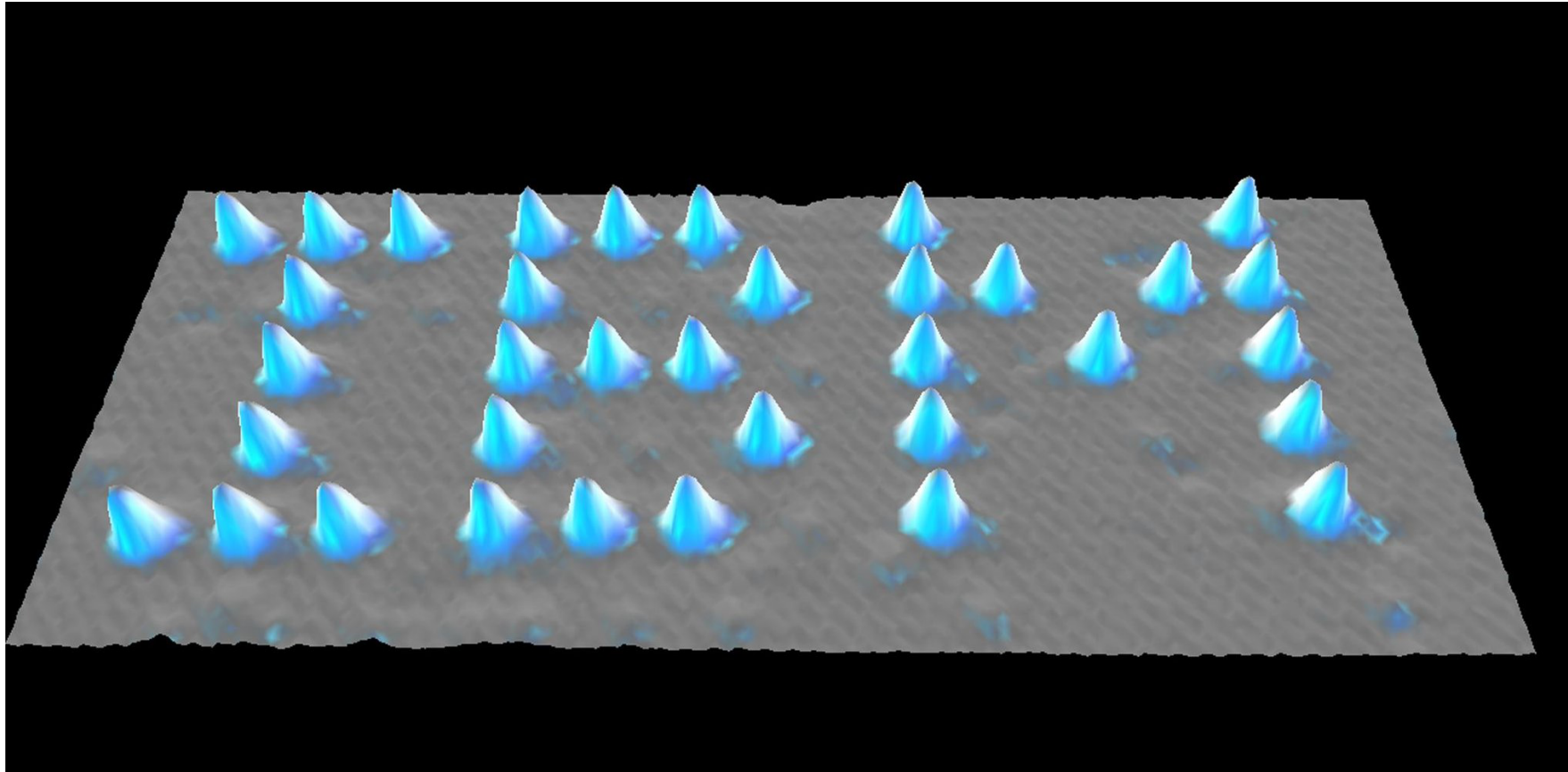
Exemplo: orbitais em um átomo de hidrogênio

This is a hydrogen atom.



This photograph shows the atom's electron orbital - the first time we have ever been able to observe the wave function of an atom. To capture this image scientists used a quantum microscope, a device capable of seeing into the quantum realm.

E nós podemos manipular estas coisas



Átomos de Xenônio em uma superfície metálica posicionados por
Um microscópio de tunelamento – IBM, 1990

O princípio da incerteza

- Consequência da natureza ondulatória das partículas quânticas
- Em mecânica quântica, variáveis complementares não podem ser simultaneamente determinadas com precisão infinita

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

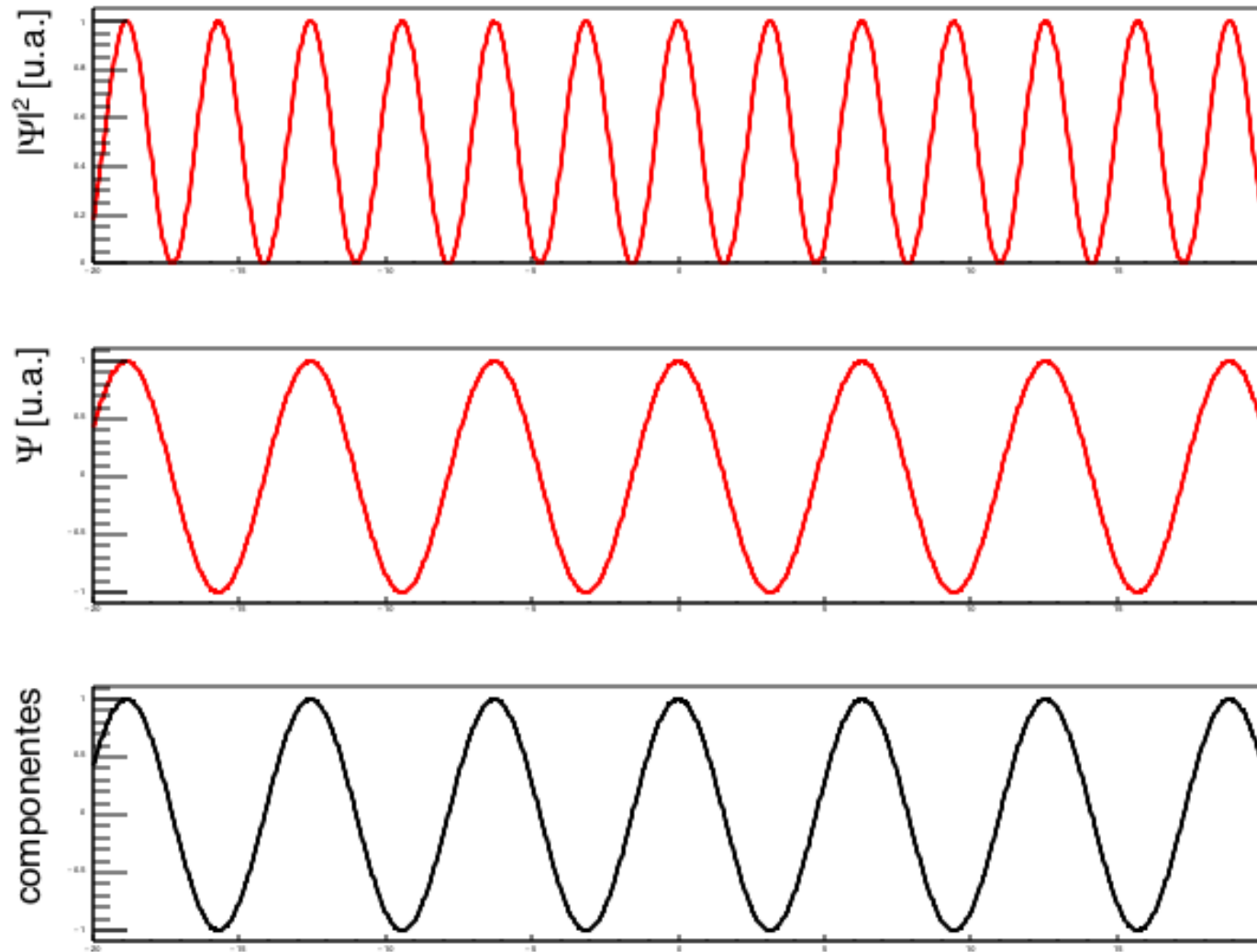
- Ex:
 - momento e posição
 - tempo e energia
 - momento angular e ângulo

Exemplo: pacotes de onda

- Uma onda simples possui uma estrutura do tipo $\sin(kx - \omega t)$ onde:
 - $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
 - Como λ está relacionado ao momento pela relação de de Broglie, k é proporcional ao momento da partícula representada pela onda.
- Princípio da superposição de onda
 - Ondas se superpõem, interferindo construtiva ou destrutivamente, dependendo da posição no espaço e instante no tempo

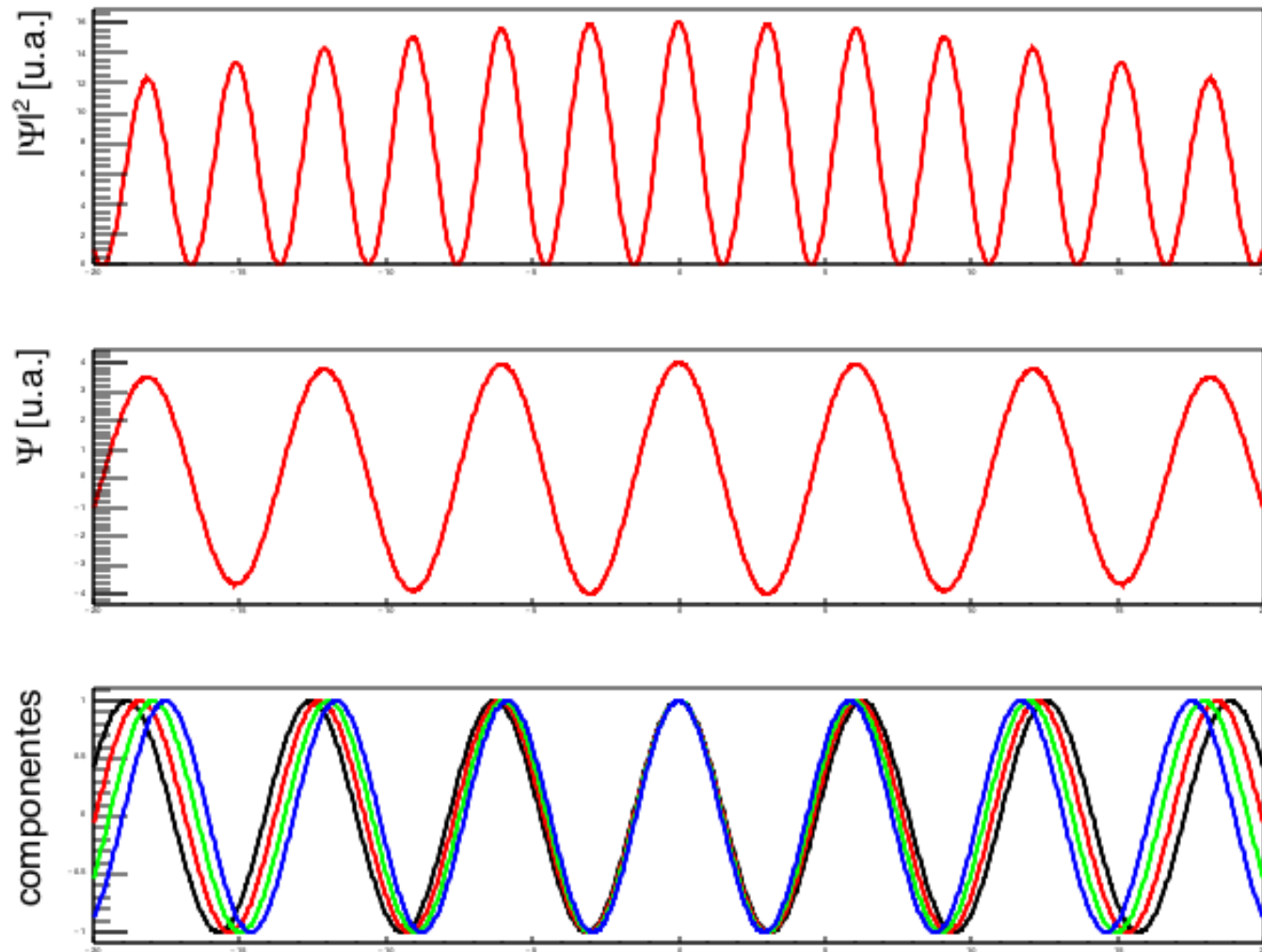
Exemplo: pacotes de onda

$k = 1$, uma onda apenas



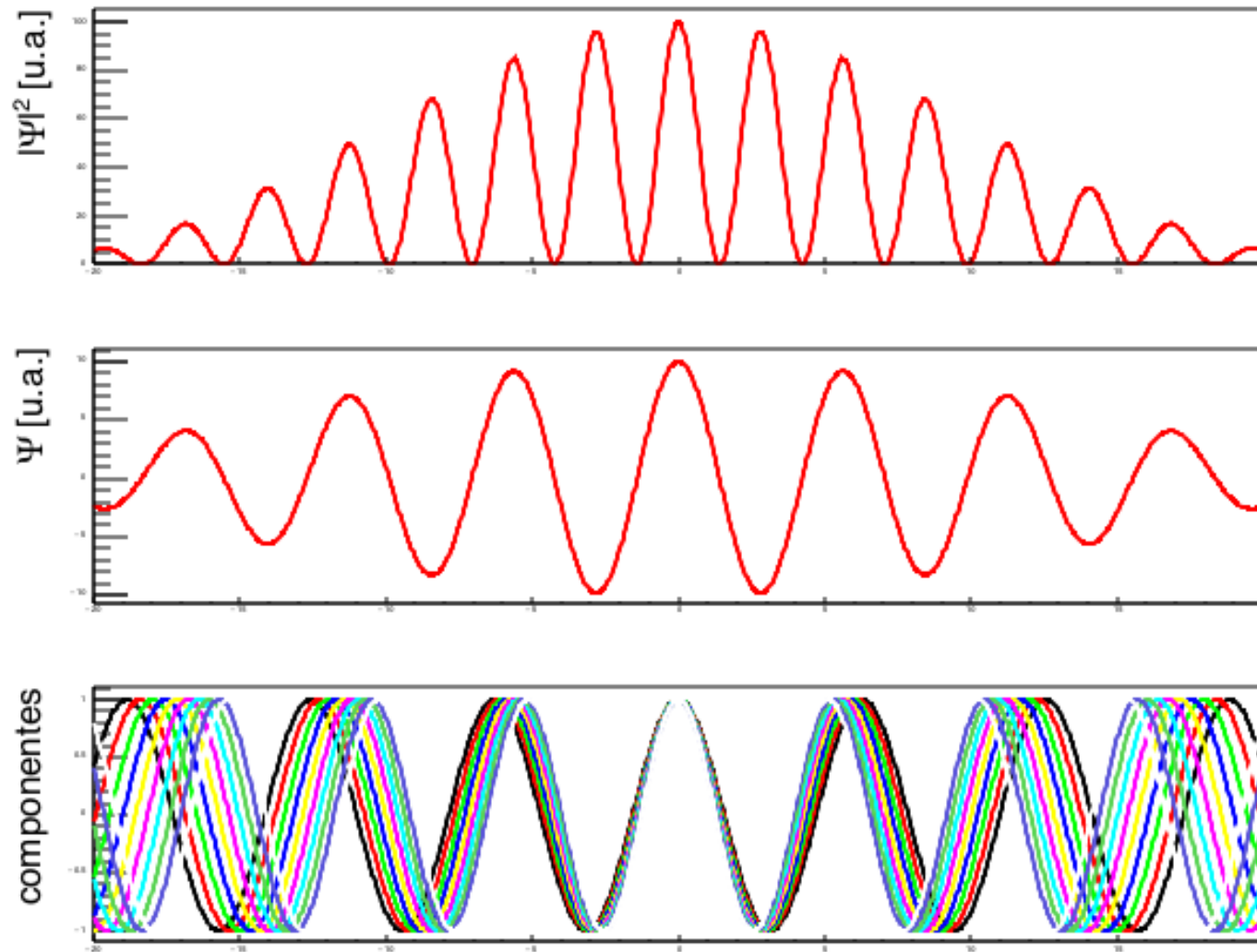
Exemplo: pacotes de onda

$1 < k < 1.1$, quatro onda apenas



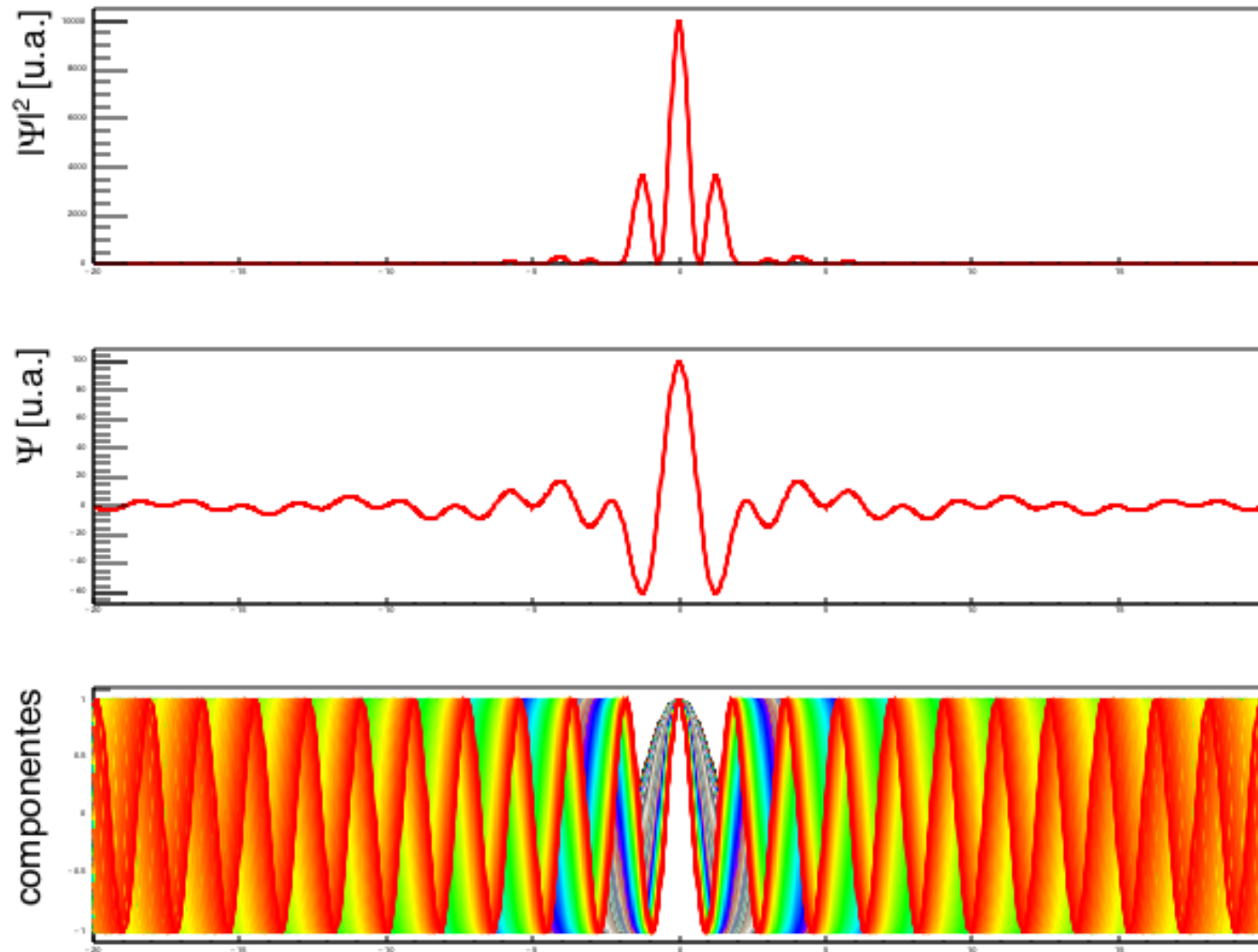
Exemplo: pacotes de onda

$1 < k < 1.25$, 10 ondas



Exemplo: pacotes de onda

$1 < k < 2.5$, 100 ondas



Um sistema quântico pode ser a superposição de estados diferentes

Elefante clássico

Possibilidades diferentes:



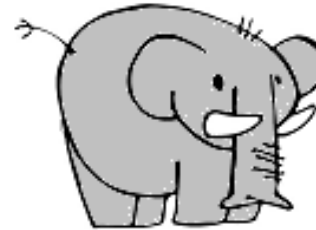
Cinza



colorido

Elefante quântico

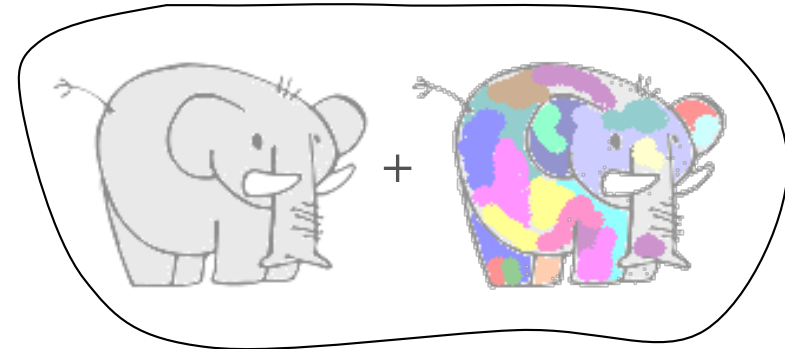
Estados válidos



Cinza



Colorido

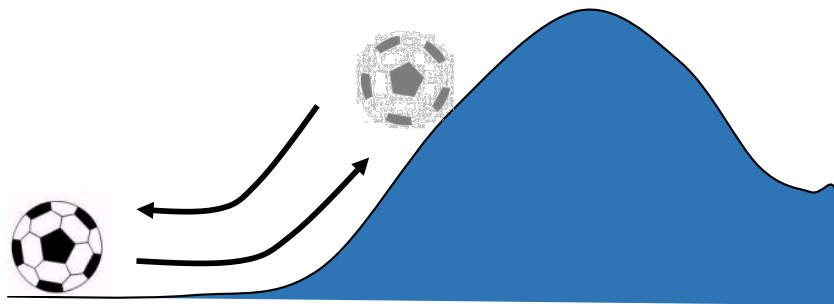


Cinza E colorido

Algumas consequências estranhas da evolução quântica de um sistema

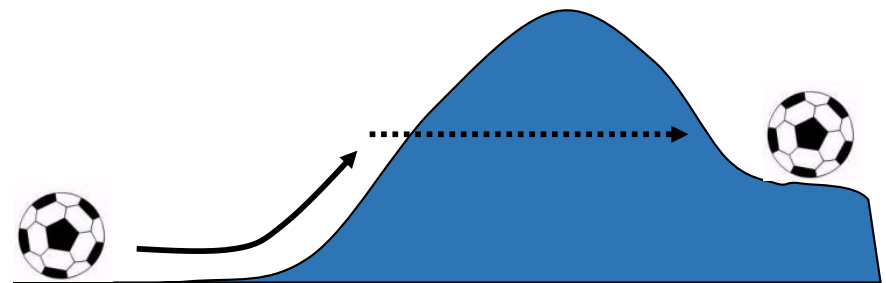
- O tunelamento quântico → partículas quânticas podem atravessar uma barreira

Bola clássica



Se a energia não for suficiente
Ela não atravessa o morro

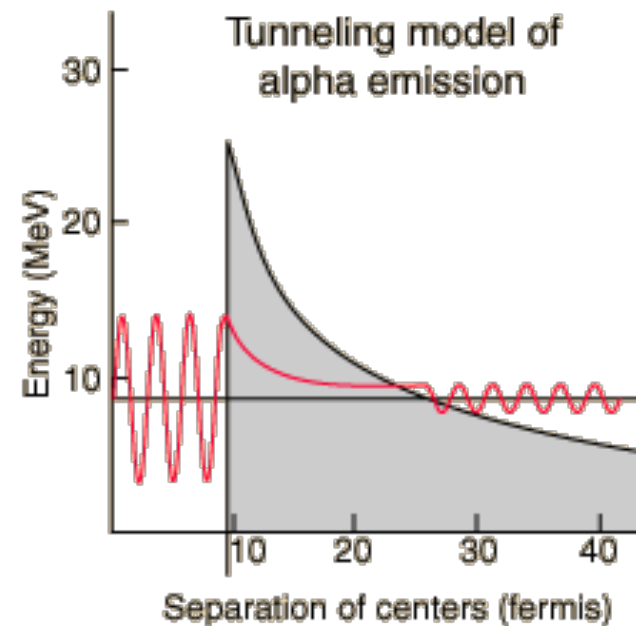
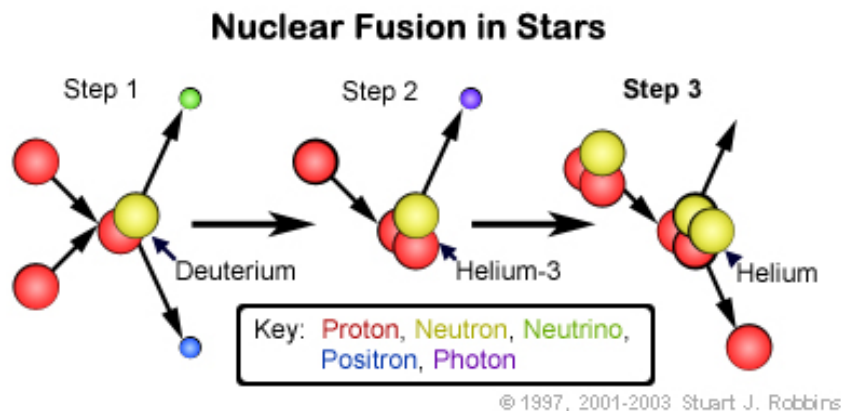
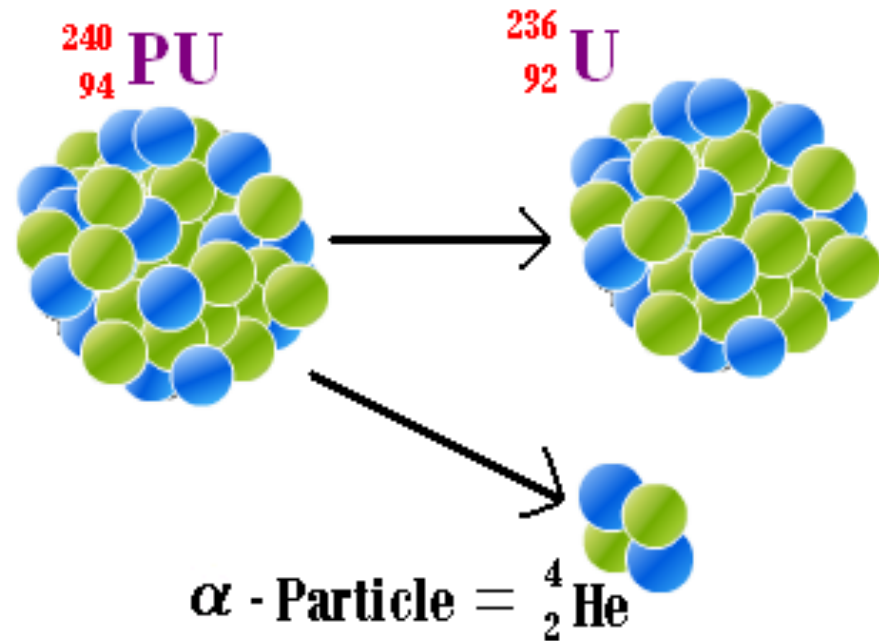
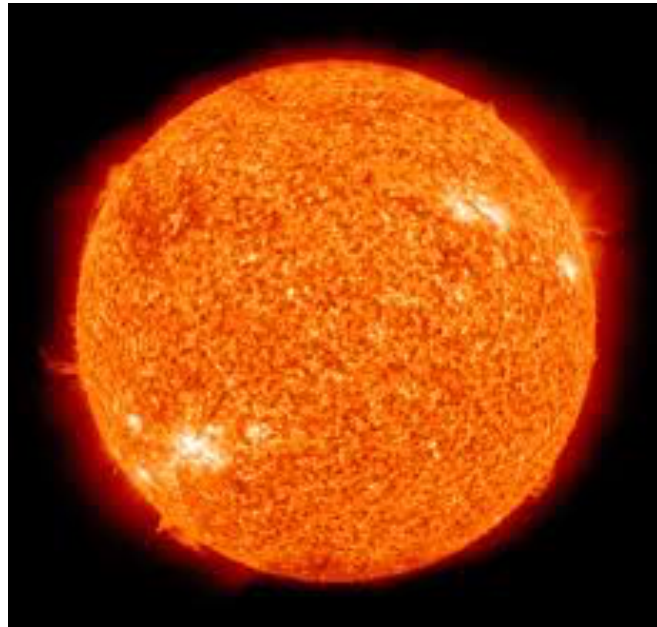
Bola quântica



Uma bola quântica pode
Atravessar o morro mesmo não
Tendo energia suficiente

O tunelamento quântico

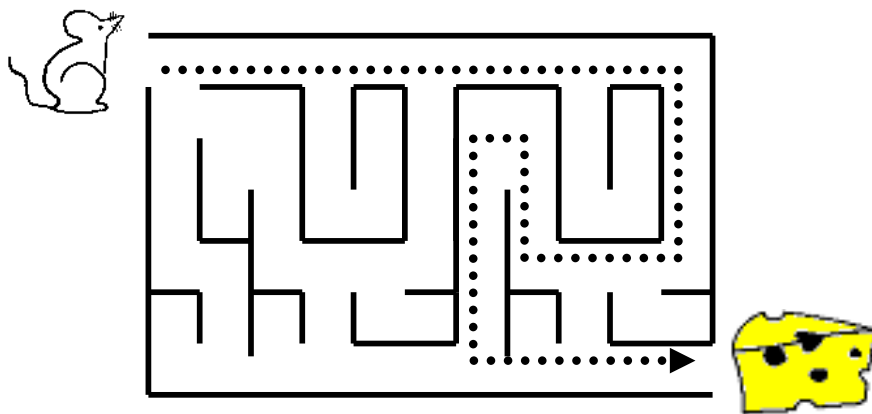
Isso existe mesmo?



Algumas consequências estranhas da evolução quântica de um sistema

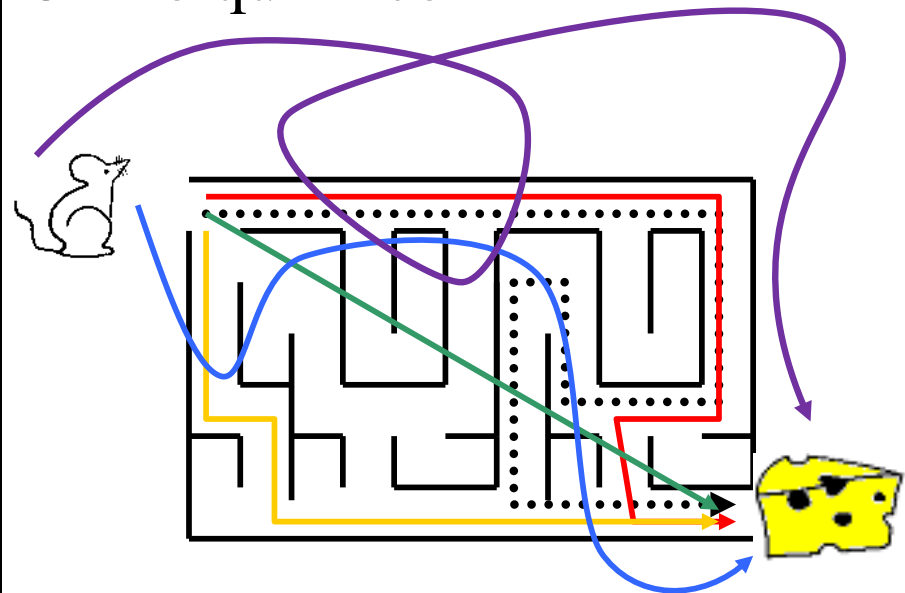
- Qual caminho uma partícula segue para sair de A e ir até B? Se ela for quântica, todos os caminhos

O rato clássico em um labirinto



Partículas clássicas seguem uma trajetória bem definida de acordo com as leis de Newton

O rato quântico



A MQ diz que todas as "trajetórias" são possíveis e ocorrem simultaneamente

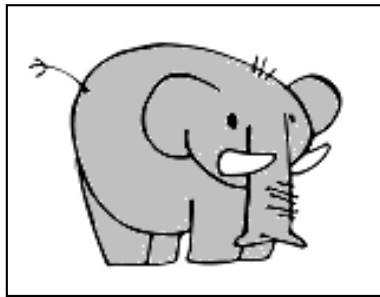
Obtendo propriedades físicas de um sistema quântico – fazendo medidas

- Tecnicamente, medidas são resultados da atuação de um operador sobre o estado quântico.
- Várias implicações (depende de um curso mais avançado para explicar)
 - Alguns observáveis só podem ter alguns valores
 - A medida é intrinsecamente probabilística
 - Medir altera o sistema quântico

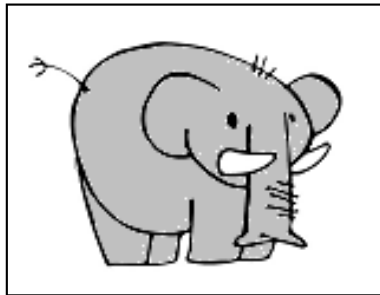
Consequência estranha

- Mesmo sabendo exatamente a função de onda do sistema eu posso obter um valor diferente a cada medida

O elefante clássico



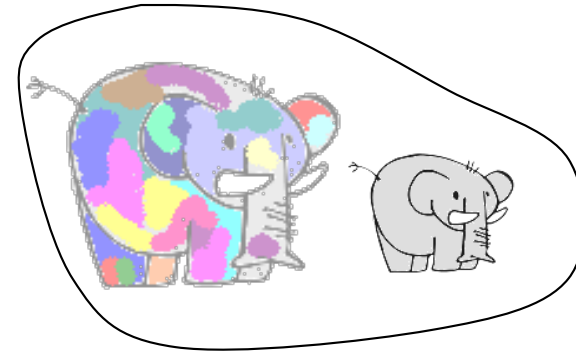
Antes de
medir



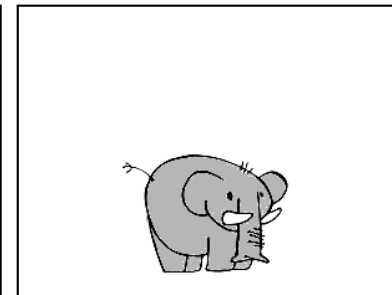
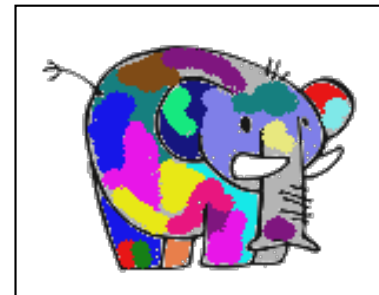
Depois de
medir

Resultado é determinístico

Elefante quântico



ou

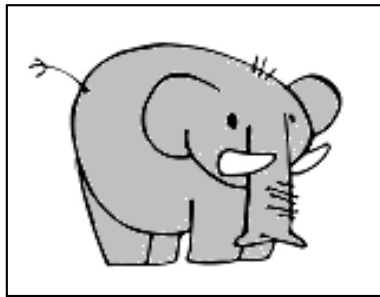


Para um estado conhecido,
Resultado é probabilístico

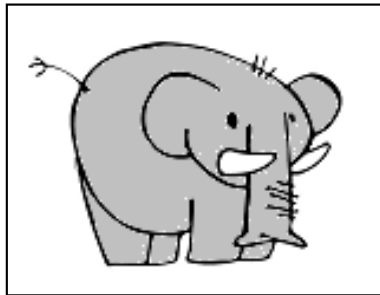
Consequência estranha

- Medir altera o estado do sistema

O elefante clássico



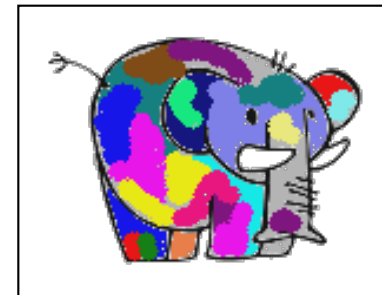
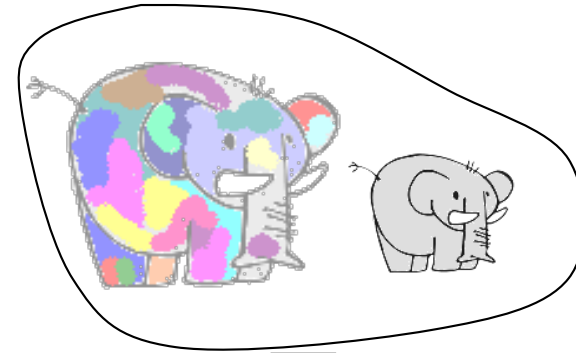
Antes de
medir



Depois de
medir

Sistema permanece inalterado

Elefante quântico



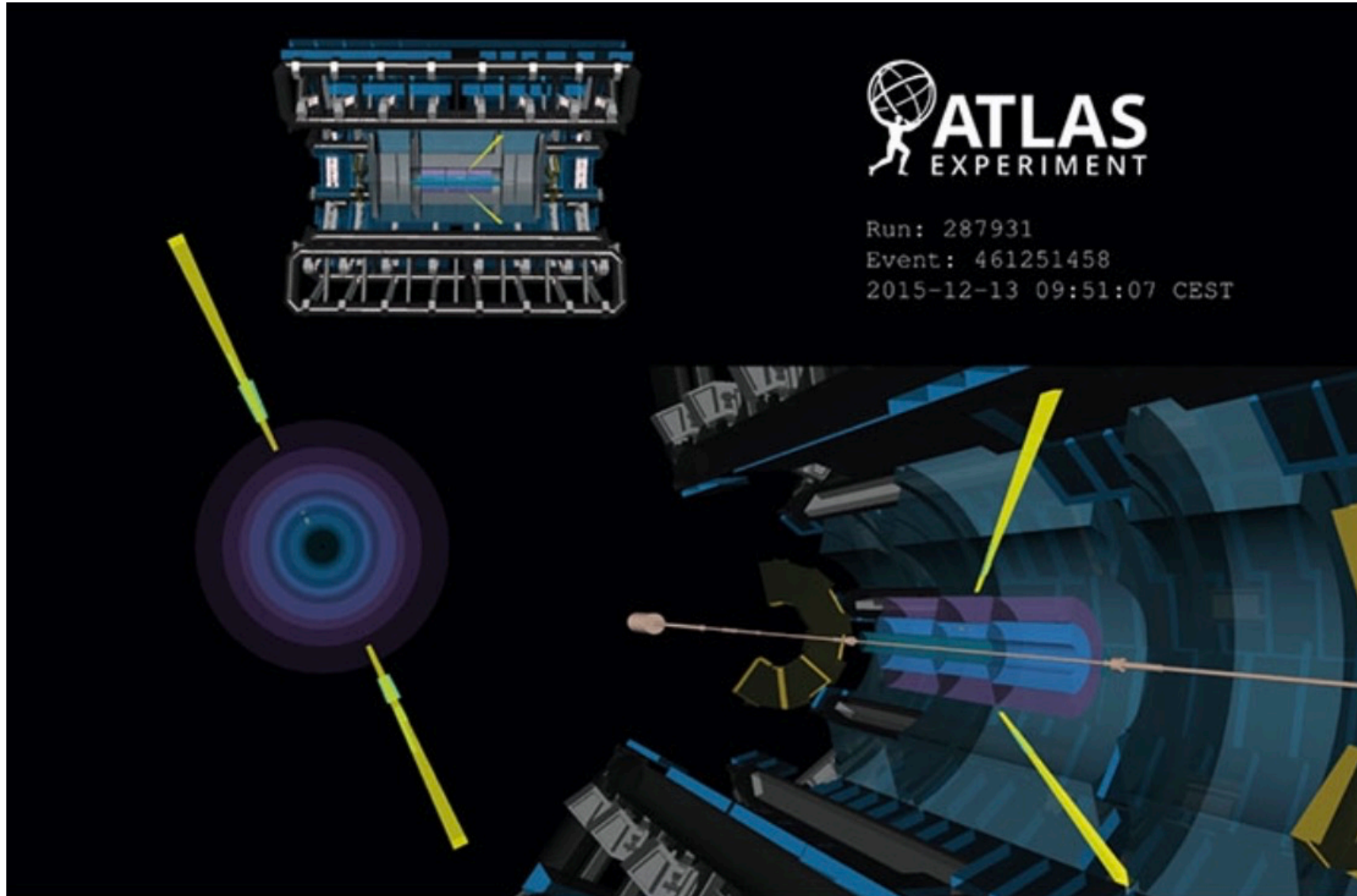
Depois de medir o sistema
é alterado e evolui de acordo
Com o resultado da medida

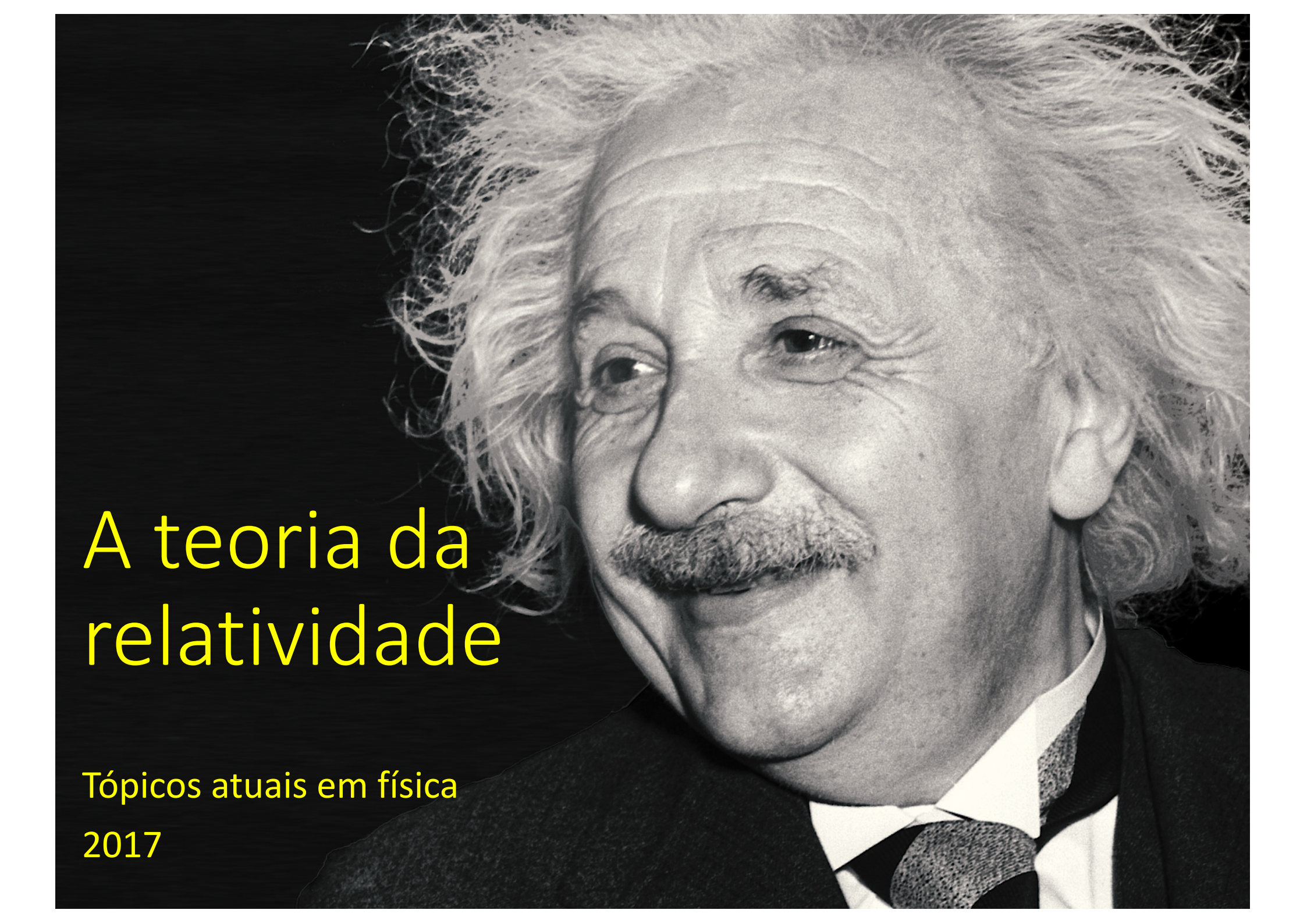
Em resumo

- A MQ surgiu para explicar uma série de fenômenos microscópicos a partir do início do séc. XX.
- MQ define as regras do jogo para sistemas geralmente muito pequenos
- Sistemas quânticos são probabilísticos
 - Mesmo assim as regras são muito bem definidas. Não caia na besteira de quem fala "vale qualquer coisa"
- As propriedades de um sistema quântico dependem do ato de observar e medir
 - De novo, com regras muito bem definidas.

Ainda ontem (14/8/2017) ATLAS@LHC

dois fótons colidindo (13 colisões/4 bilhões de eventos)



A black and white portrait of Albert Einstein, showing his characteristic wild, white hair and mustache. He is wearing a dark suit jacket, a white shirt, and a patterned tie. The background is dark.

A teoria da relatividade

Tópicos atuais em física
2017

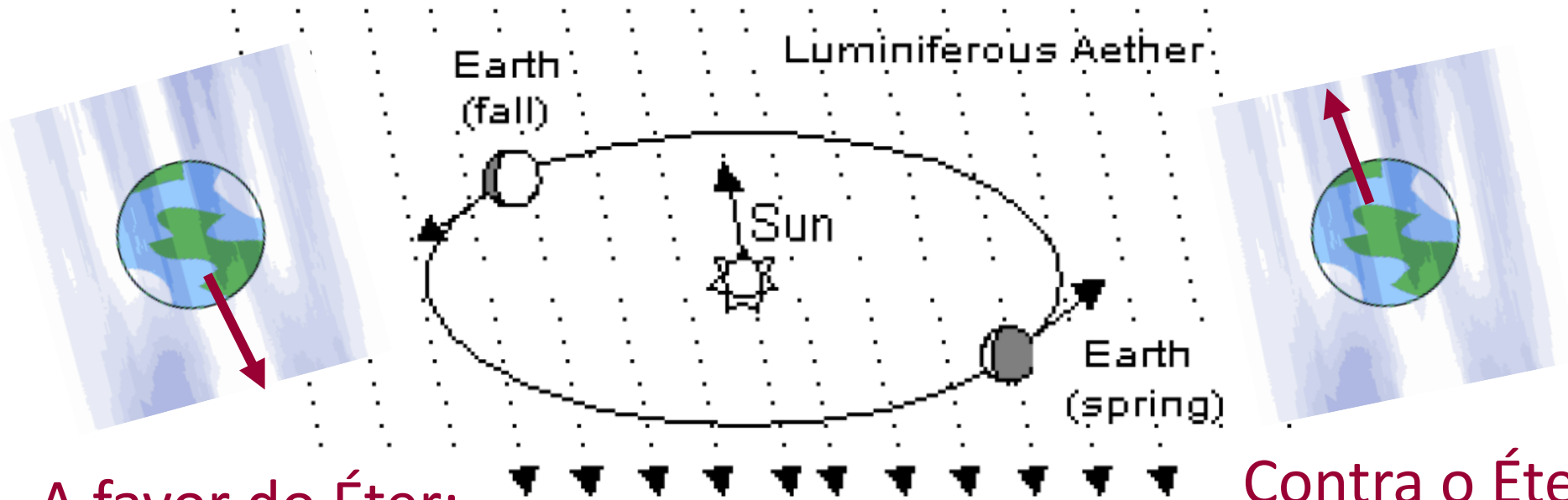
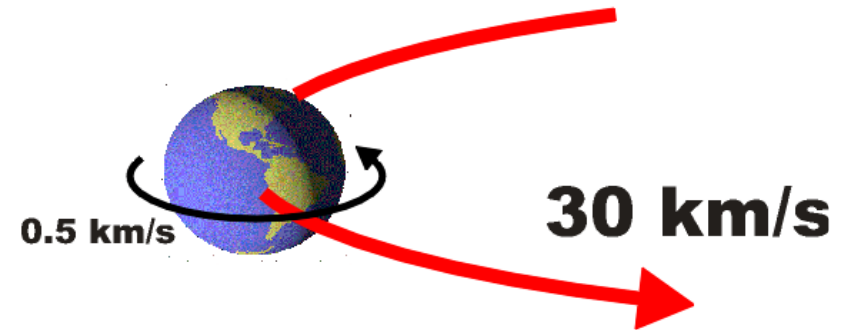
De onde vem a teoria da relatividade?

- Maxwell, no final do séc. XIX, explicou que a luz era uma onda eletromagnética
 - Foi o entendimento da natureza eletromagnética da luz que a teoria da relatividade se fez necessária.
 - De acordo com suas equações, um pulso de luz emitido em qualquer direção se moveria com velocidade c , independente da direção
 - $C = 299792458 \text{ m/s}$
- Mas o que acontece se o pulso de luz for emitido em uma fonte em movimento?
 - Esta pergunta deixou a comunidade científica maluca até 1905

A intuição clássica

- Ondas precisam de um meio para se propagarem
 - Este meio foi denominado de Éter e, segundo a ideia da época, a luz se moveria com velocidade c neste meio
- O que acontece quando um corpo em movimento no Éter, observa a luz?
 - Segundo Galileo, velocidades se somam ou se subtraem, dependendo do movimento relativo entre os corpos
 - O mesmo deveria acontecer se observarmos a luz, certo?

A Terra como um meio em movimento no Éter



A favor do Éter:
Luz se move mais
rapidamente

Contra o Éter:
Luz se move mais
devagar

O experimento de Michelson-Morley

- Arranjo experimental que media a velocidade da luz em qualquer direção
 - Em todas as direções medidas a velocidade da luz era a mesma
 - Não foi encontrado o Éter e a velocidade da luz independe da velocidade relativa do emissor
 - Prêmio Nobel de Física em 1907

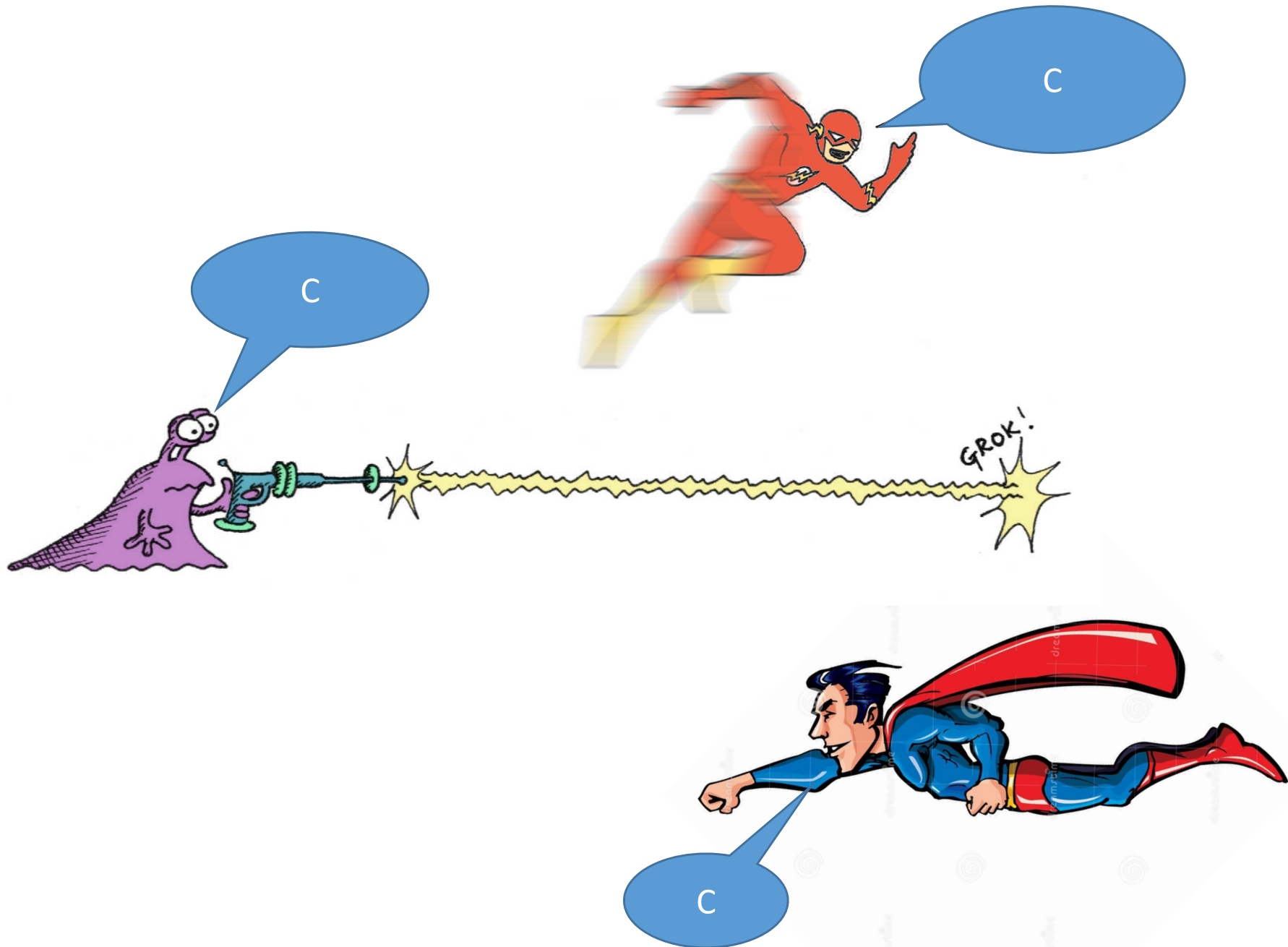


A.A. Michelson
1852 - 1931



E.W. Morley
1838 - 1923

O que isso significa?



O grande problema

- O eletromagnetismo não era compatível com a física clássica
 - As leis do eletromagnetismo não se mantinham se nós mudássemos o observador
- Como conciliar o eletromagnetismo com a mecânica novamente?
 - Será que a mecânica estava errada ou ela só vale em algumas circunstâncias?

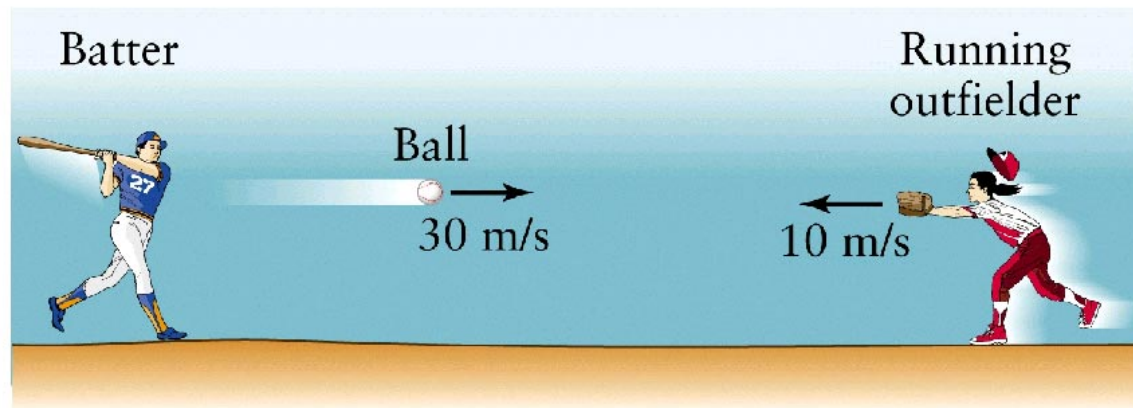
Como isso é possível?

- Nos anos seguintes ao experimento de Michelson-Morley, muitos tentaram explicar os resultados
- Em particular, dois matemáticos, C. F. Fitzgerald e H. A. Lorentz, construíram uma formulação matemática (as transformações de Lorentz) que conseguiam explicar os resultados do experimento mas eles não tinham nenhuma interpretação para o que tudo isso significava
- Em 1905, Albert Einstein resolveu o assunto

A teoria da relatividade restrita

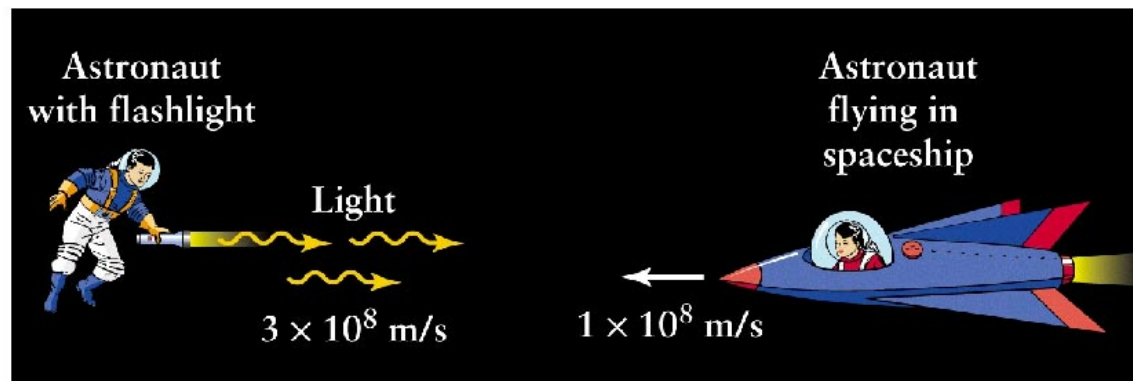
- Albert Einstein, em 1905, propôs a teoria da relatividade restrita, para explicar os fenômenos observados no eletromagnetismo
- Dois princípios:
 - As leis da física devem ser igualmente válidas seja qual for a escolha de referencial inercial
 - A velocidade da luz no espaço vazio é sempre a mesma, independente do referencial inicial, independente da velocidade do referencial ou da velocidade da fonte de luz.

Comparação entre Galileo e Einstein



As seen by outfielder, ball is approaching her at $(30 \text{ m/s}) + (10 \text{ m/s}) = 40 \text{ m/s}$

a



Incorrect Newtonian description:

As seen by astronaut in spaceship, light is approaching her at $(3 \times 10^8 \text{ m/s}) + (1 \times 10^8 \text{ m/s}) = 4 \times 10^8 \text{ m/s}$

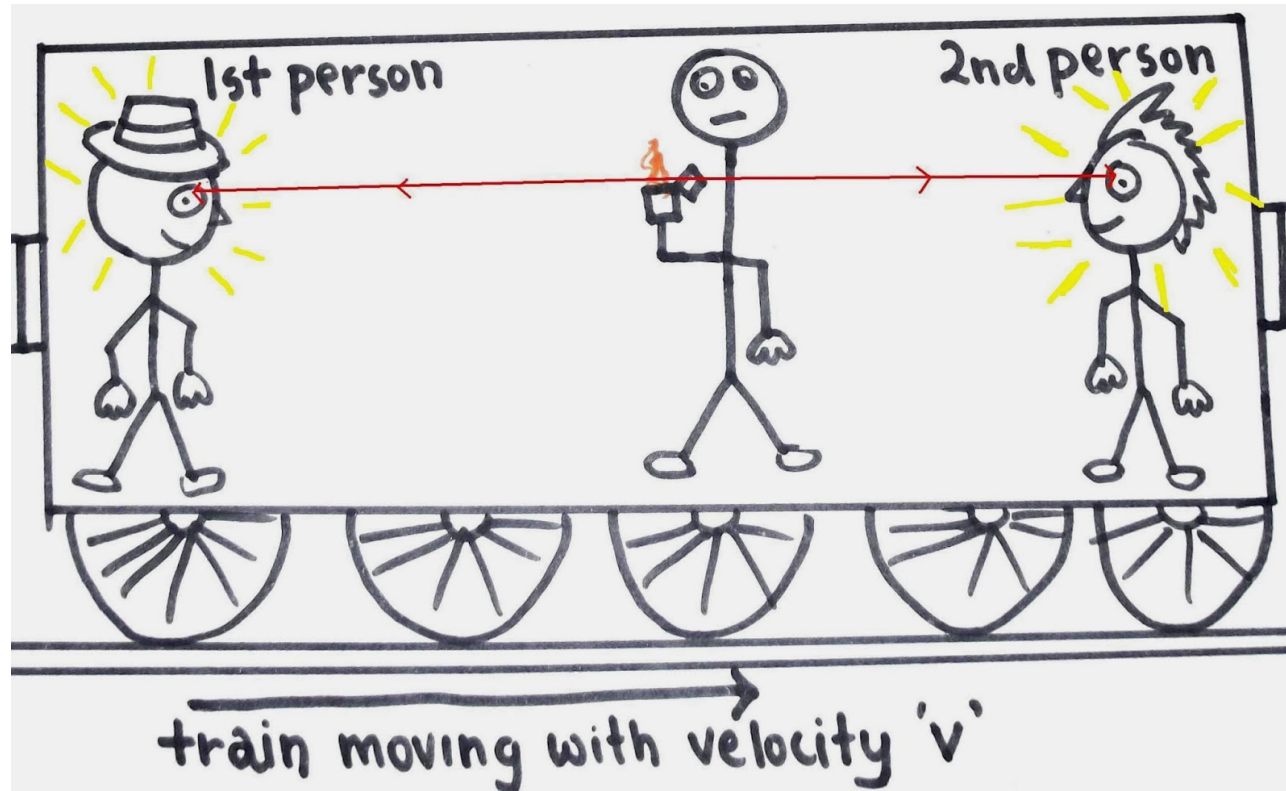
Correct Einsteinian description:

As seen by astronaut in spaceship, light is approaching her at $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Coisas muito estranhas que decorrem destes princípios

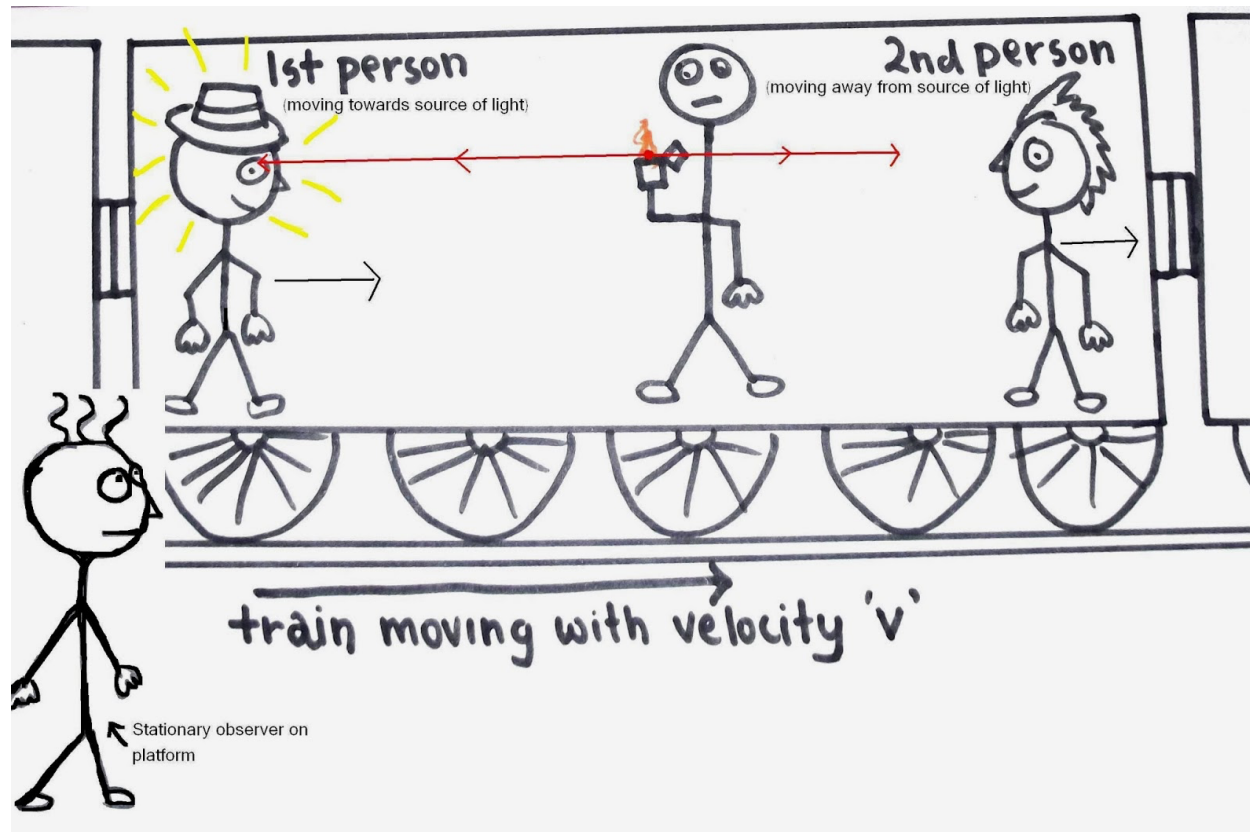
- Eventos que são simultâneos em para um observador não são simultâneos para outro observador e movimento
- O tempo passa de forma diferente para dois observadores, um se movendo em relação ao outro
- O tamanho dos objetos depende de quem observa
- Nada se move mais rápido que a velocidade da luz
- Massa e energia estão relacionadas. Na verdade, massa é uma "forma" de energia

Simultaneidade de eventos



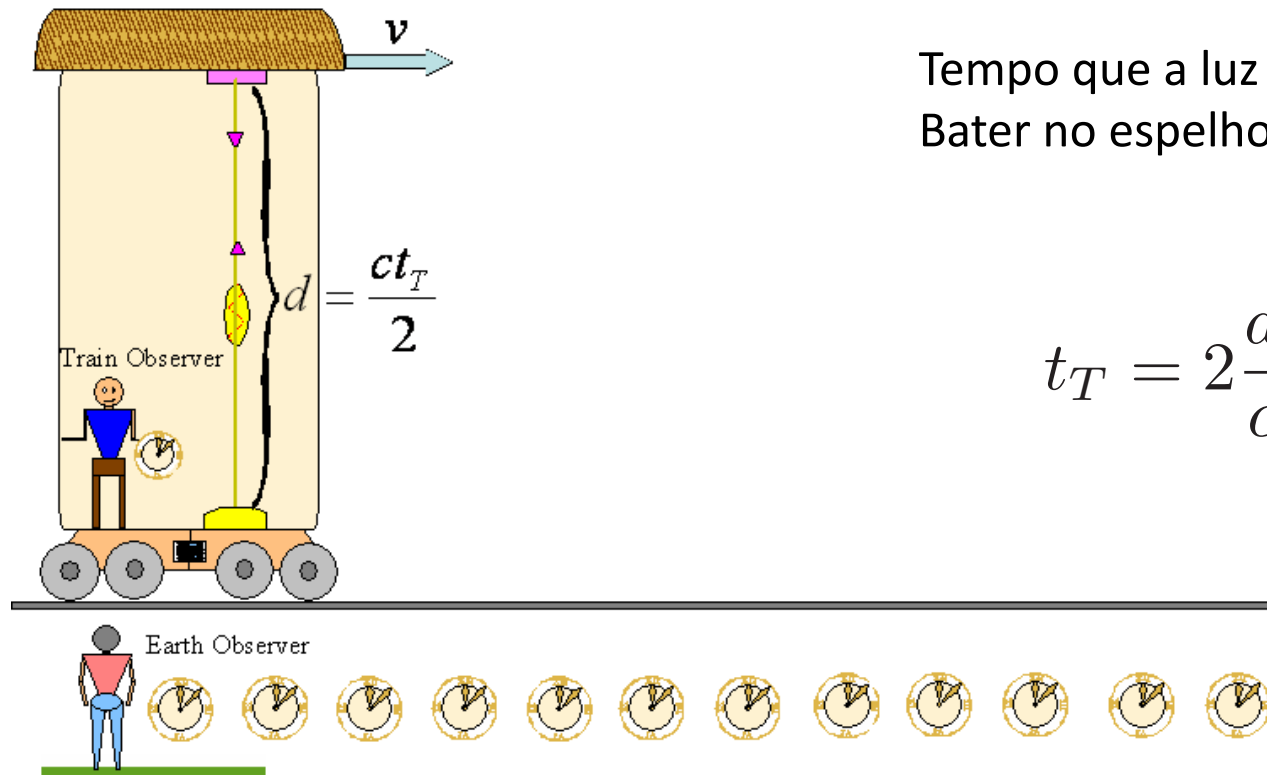
Para o carinha que acendeu o isqueiro, é óbvio que os
Dois observadores percebem o isqueiro acender ao mesmo
instante

Simultaneidade de eventos



Para um observador externo, que vê o trem se mover,
Pelo fato da velocidade da luz ser a mesma em qualquer referencial,
Ele observa que a pessoa da esquerda vê o isqueiro acender primeiro
Que a pessoa da direita

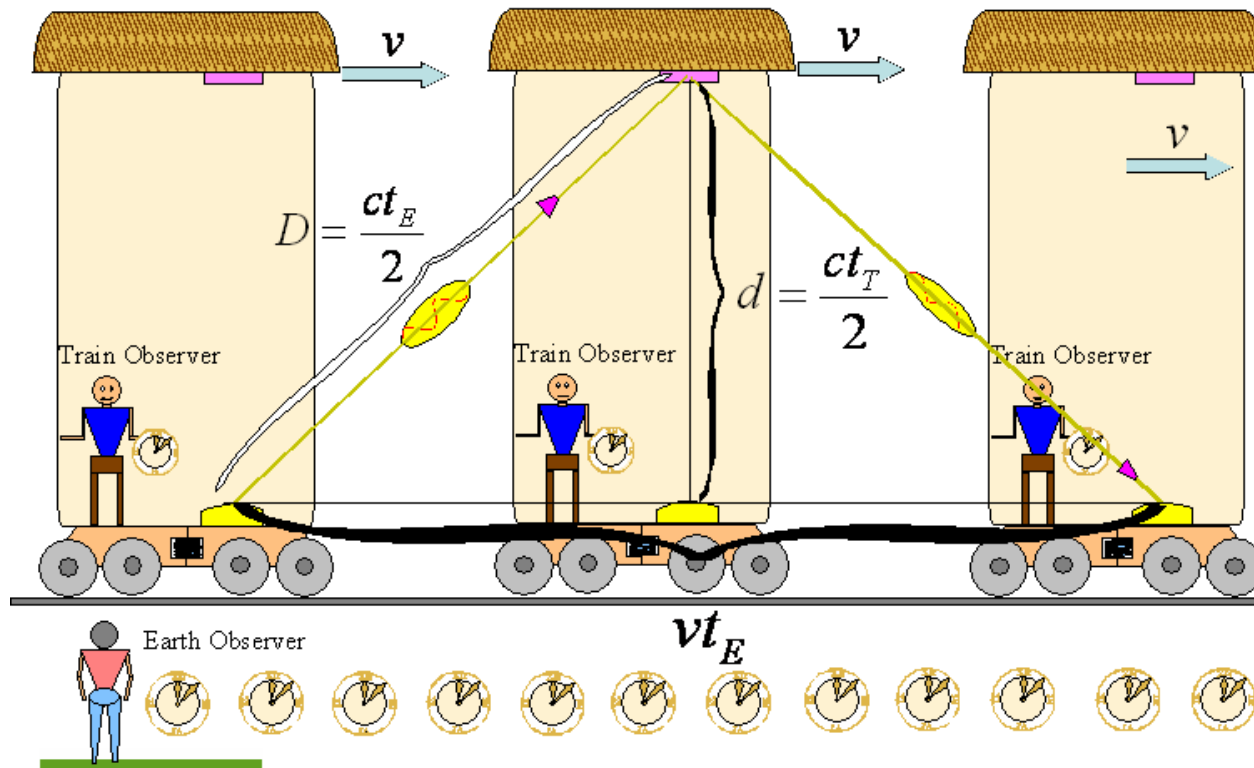
Dilatação do tempo



Tempo que a luz leva para sair da fonte,
Bater no espelho e voltar para a fonte

$$t_T = 2\frac{d}{c} \rightarrow d = c\frac{t_T}{2}$$

Dilatação do tempo



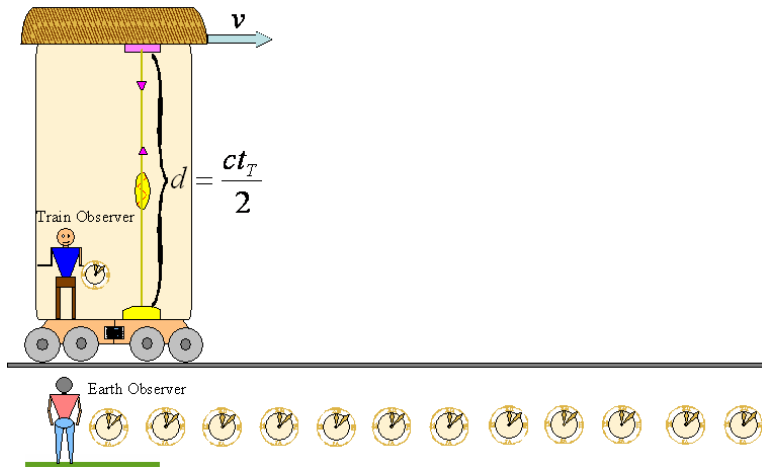
Tempo que a luz leva para sair da fonte,
Bater no espelho e voltar para a fonte

$$t_E = 2 \frac{D}{c}$$

Só que, usando Pitágoras

$$D^2 = d^2 + \left(\frac{vt_E}{2} \right)^2$$

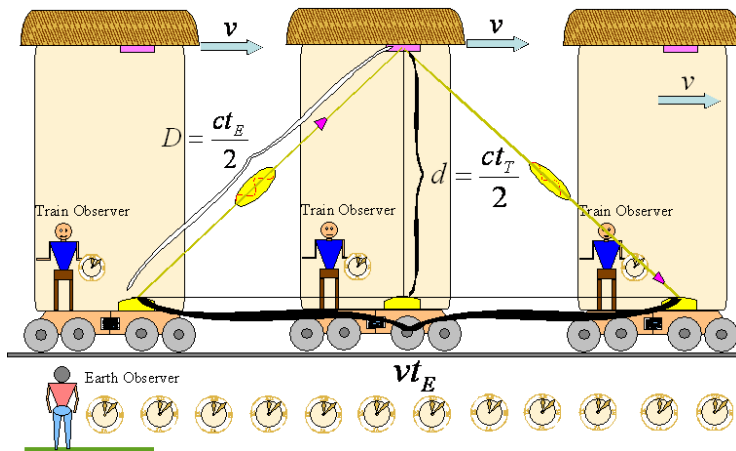
Dilatação do tempo



$$t_T = 2\frac{d}{c} \rightarrow d = c\frac{t_T}{2}$$

$$t_E = 2\frac{D}{c} \quad D^2 = d^2 + \left(\frac{vt_E}{2}\right)^2$$

Um pouco de manipulação



$$t_E = \frac{t_T}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma t_T$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Dilatação do tempo

- Na relatividade, intervalos de tempo medidos por dois observadores em referenciais inerciais diferentes são diferentes
- Um observador em repouso vê que, em relógios em movimentos, o tempo passa mais “devagar”

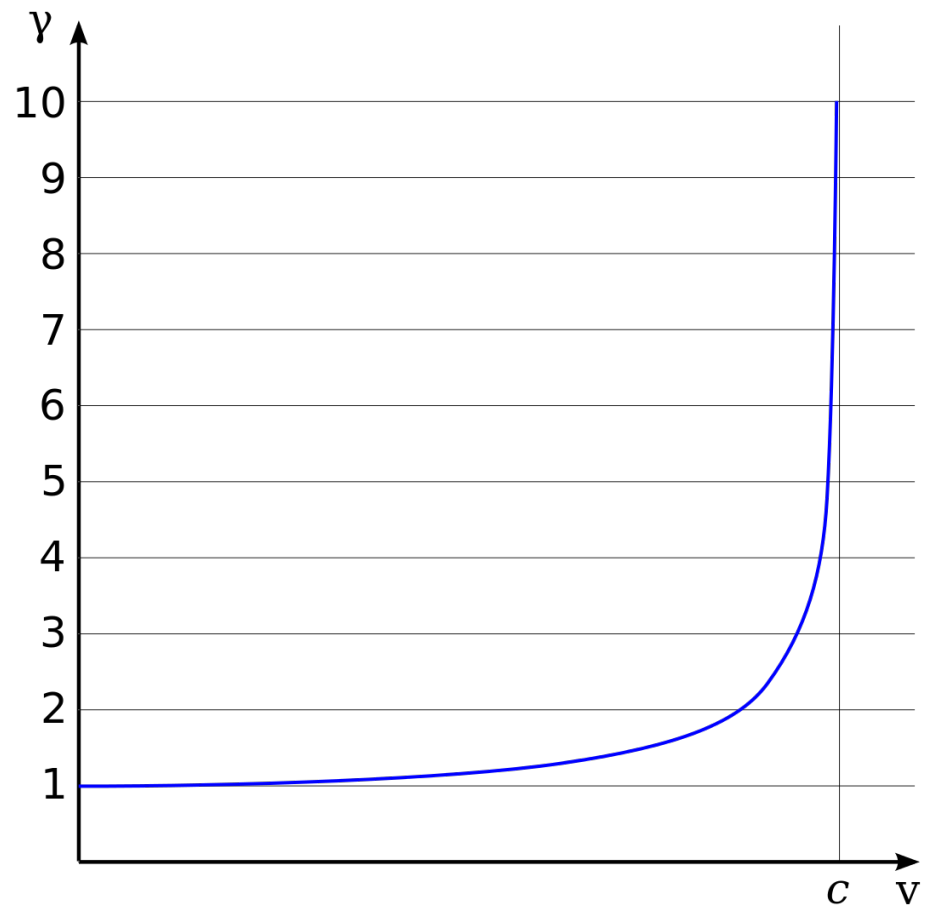
$$t_E = \frac{t_T}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma t_T$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

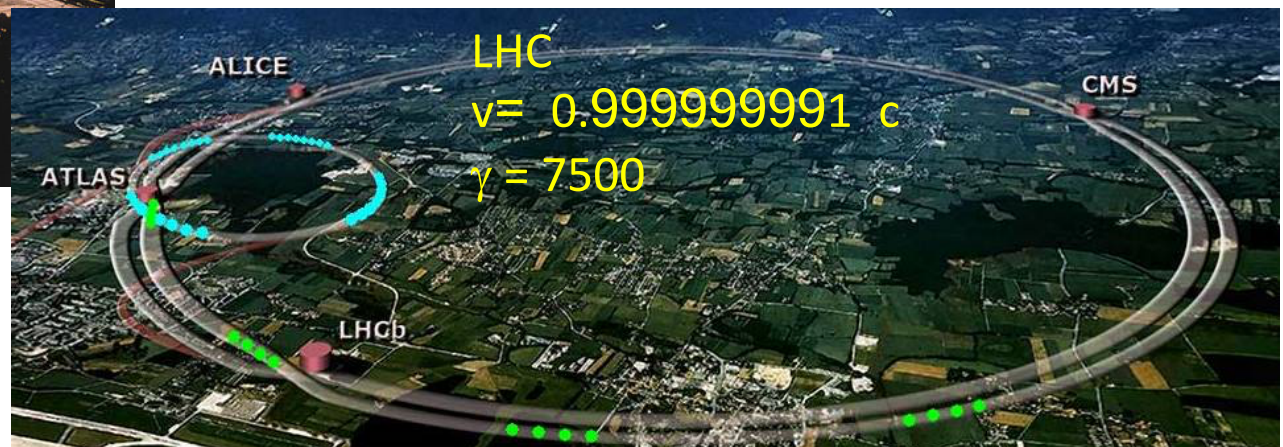
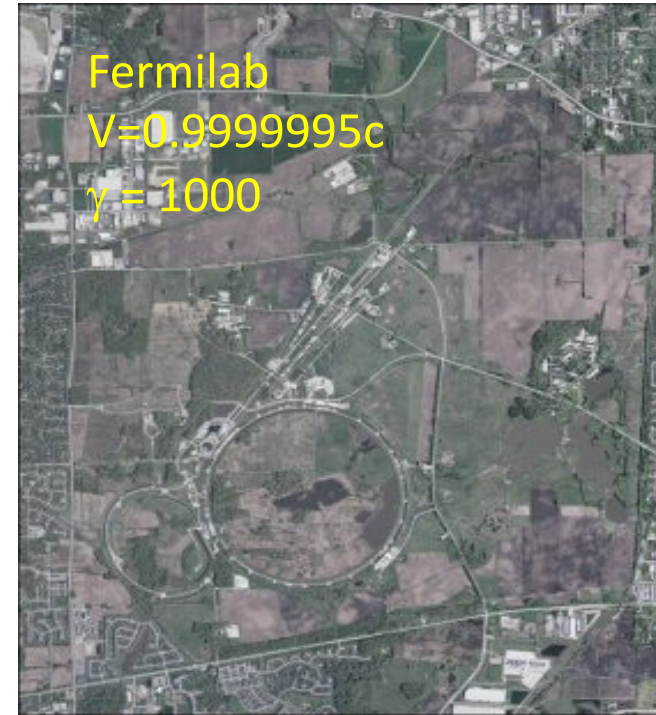
Fator gama de Lorentz

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

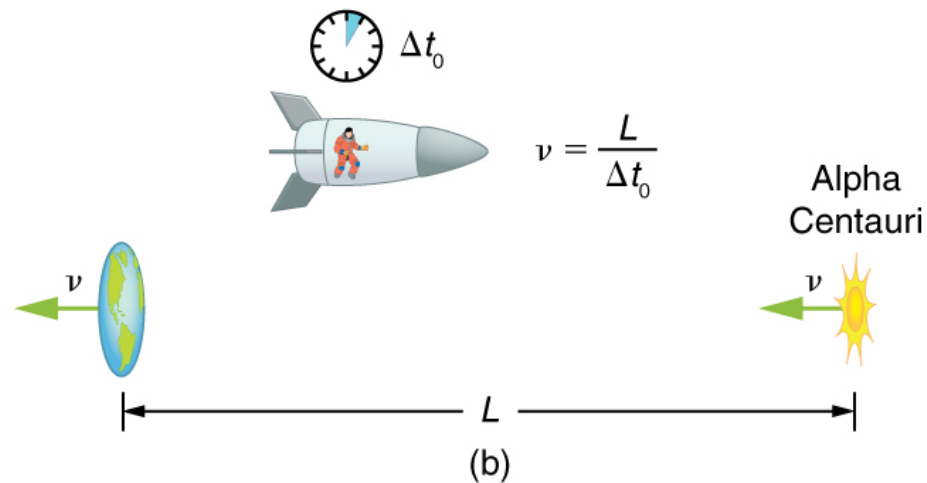
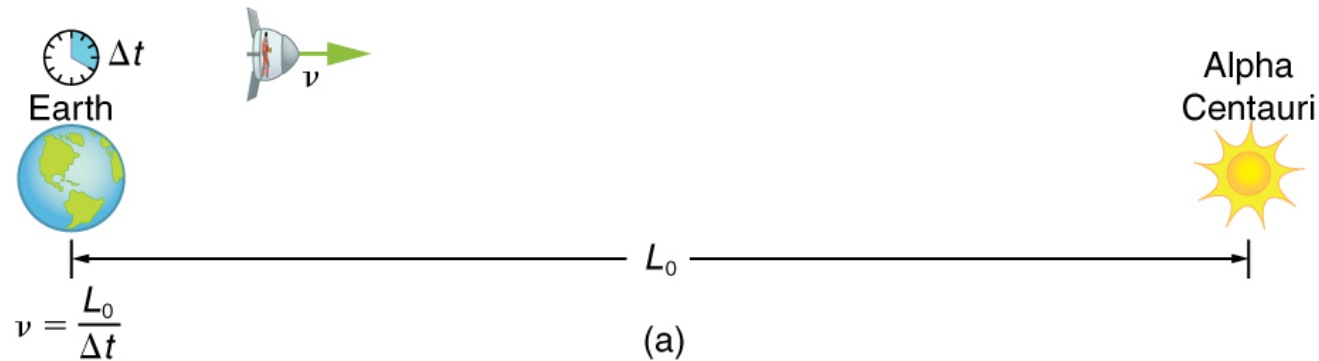
Speed Of Time Traveller	Lorentz Factor	Time equivalent to 1 sec on earth
0.9	2.29	2.29 sec
0.99	7.09	7.09 sec
0.999	22.37	22.37 sec
0.9999	70.71	1 min 11 sec
0.99999	223.61	3 min 44 sec
0.999999	707.11	11 min 47 sec
0.9999999	2236.07	37 min 16 secs
0.99999999	7071.07	1 hr 58 min
0.999999999	22360.68	6hr 12 min



Como anda o tempo nos aceleradores pelo mundo?



Contração do espaço



$$\frac{L_0}{\Delta T} = \frac{L}{\Delta T_0} \rightarrow L = L_0 \frac{\Delta T_0}{\Delta T} \rightarrow L = \frac{L_0}{\gamma}$$

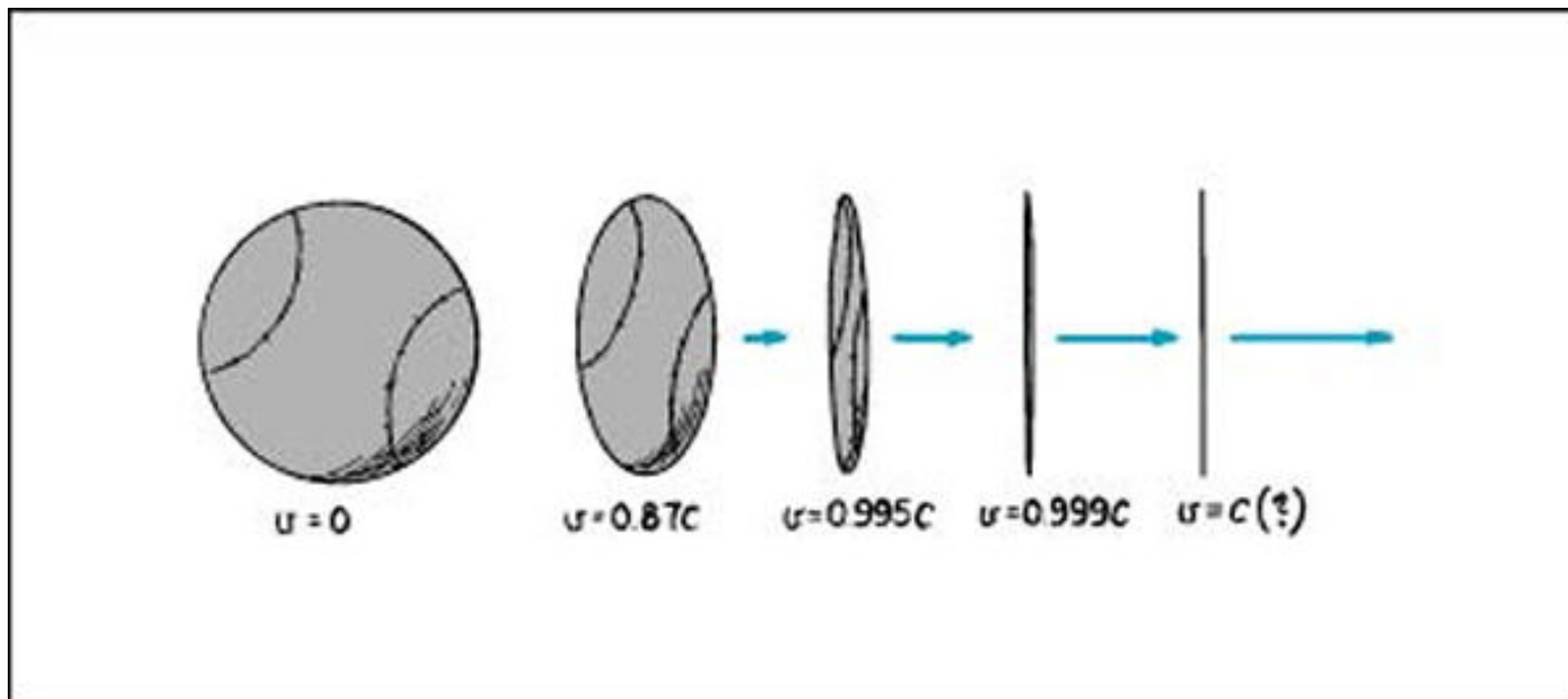
Contração do espaço

- Na relatividade, o tamanho dos objetos diminuem na direção em que eles se movem em relação ao tamanho deles em repouso
- Contração do espaço

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Contração do espaço



Momento na relatividade

- Por razões diversas, o momento de um corpo na relatividade é dado por:

$$\vec{p} = \gamma m_0 \vec{v}$$

- Isto tem implicações diretas na segunda lei de Newton

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \vec{p}$$

- No passado, para fazer um paralelo à mecânica clássica, definia-se massa relativística

$$m = \gamma m_0 \rightarrow \vec{p} = m \vec{v}$$

- Na medida em que o corpo se aproximava da velocidade da luz, sua massa aumentava para dificultar o aumento da velocidade. Esta ideia é cada vez menos usada.

Relação entre massa e energia

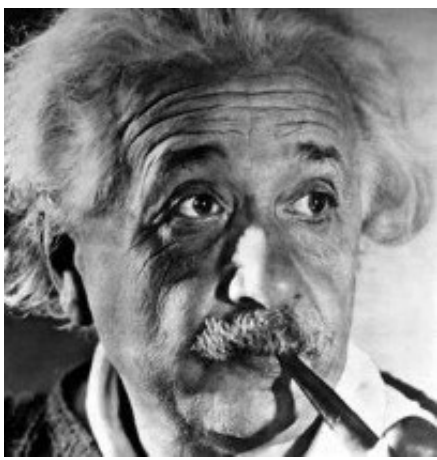
- A velocidade da luz é um limite na relatividade
 - Se você acelera um corpo a velocidade chega perto à da luz mas nunca chega lá
 - Neste caso, a quantidade de energia necessária é muito grande e maior que $\frac{1}{2} mv^2$.
- Qual a implicação disto para as leis de Newton?
 - Se uma força constante é aplicada, segundo Newton, a aceleração é constante
 - Mas, na relatividade, quando a velocidade é muito elevada, o corpo vai resistindo mais à aceleração. A aceleração deixa de ser constante.

Energia

- Como consequência, a energia de uma partícula, na relatividade, é dada por:

$$E = mc^2 = \sqrt{(m_0c^2)^2 + (pc)^2}$$

- Alguns pontos importantes
 - Não é preciso ter massa para ter momento, basta ter energia
 - Massa e energia estão relacionados
 - Energia "pesa"
 - Energia pode ser convertida em massa e massa pode ser convertida em energia

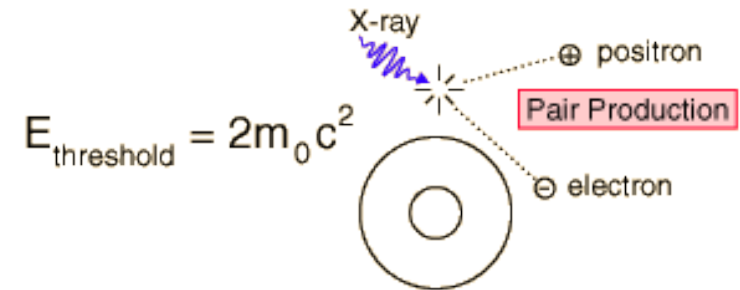
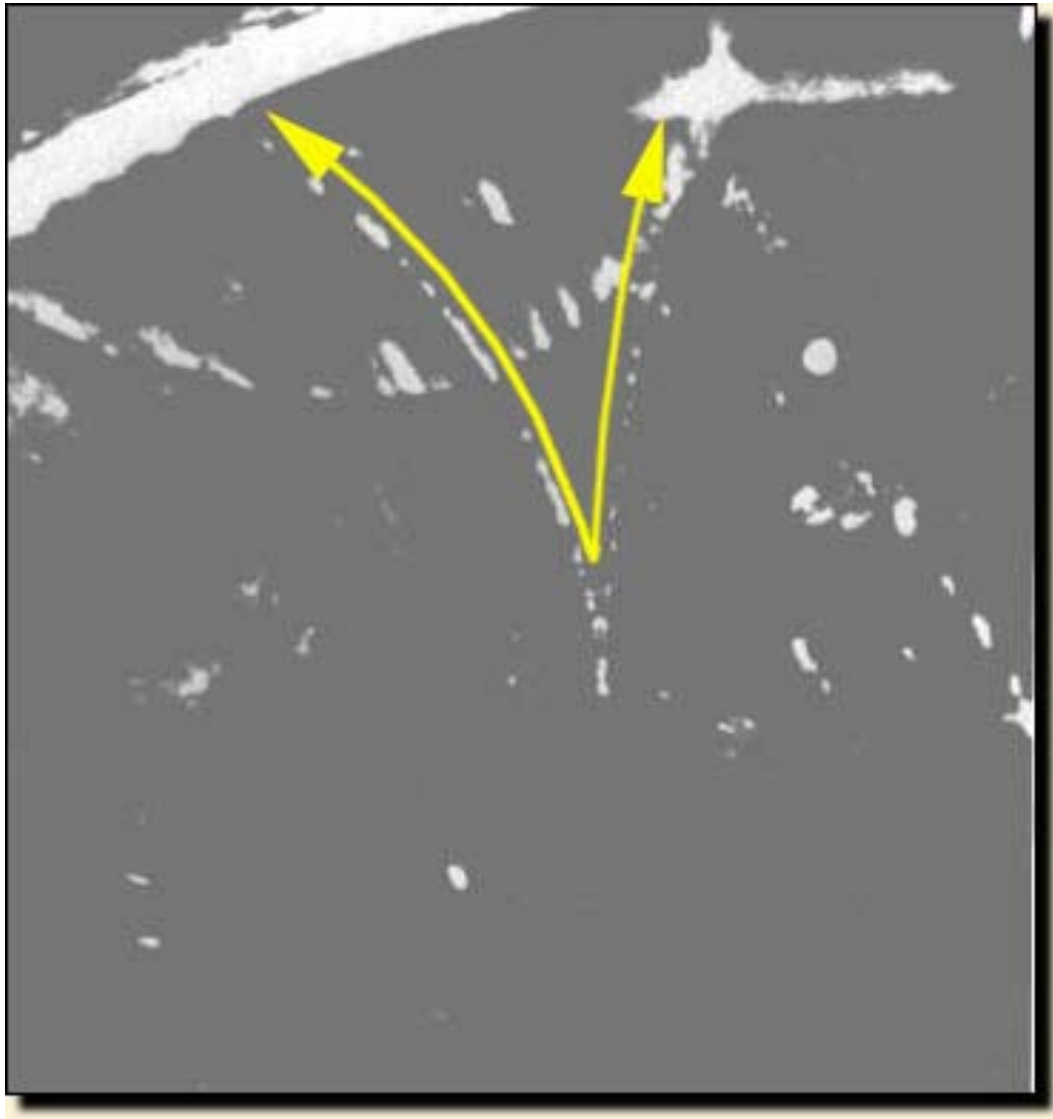


$$E = mc^2$$

"It followed from the special theory of relativity that mass and energy are both but different manifestations of the same thing -- a somewhat unfamiliar conception for the average mind.

Furthermore, the equation E is equal to $m c$ -squared, in which energy is put equal to mass, multiplied by the square of the velocity of light, showed that very small amounts of mass may be converted into a very large amount of energy and vice versa. The mass and energy were in fact equivalent, according to the formula mentioned before. This was demonstrated by Cockcroft and Walton in 1932, experimentally."

Vendo energia virar massa



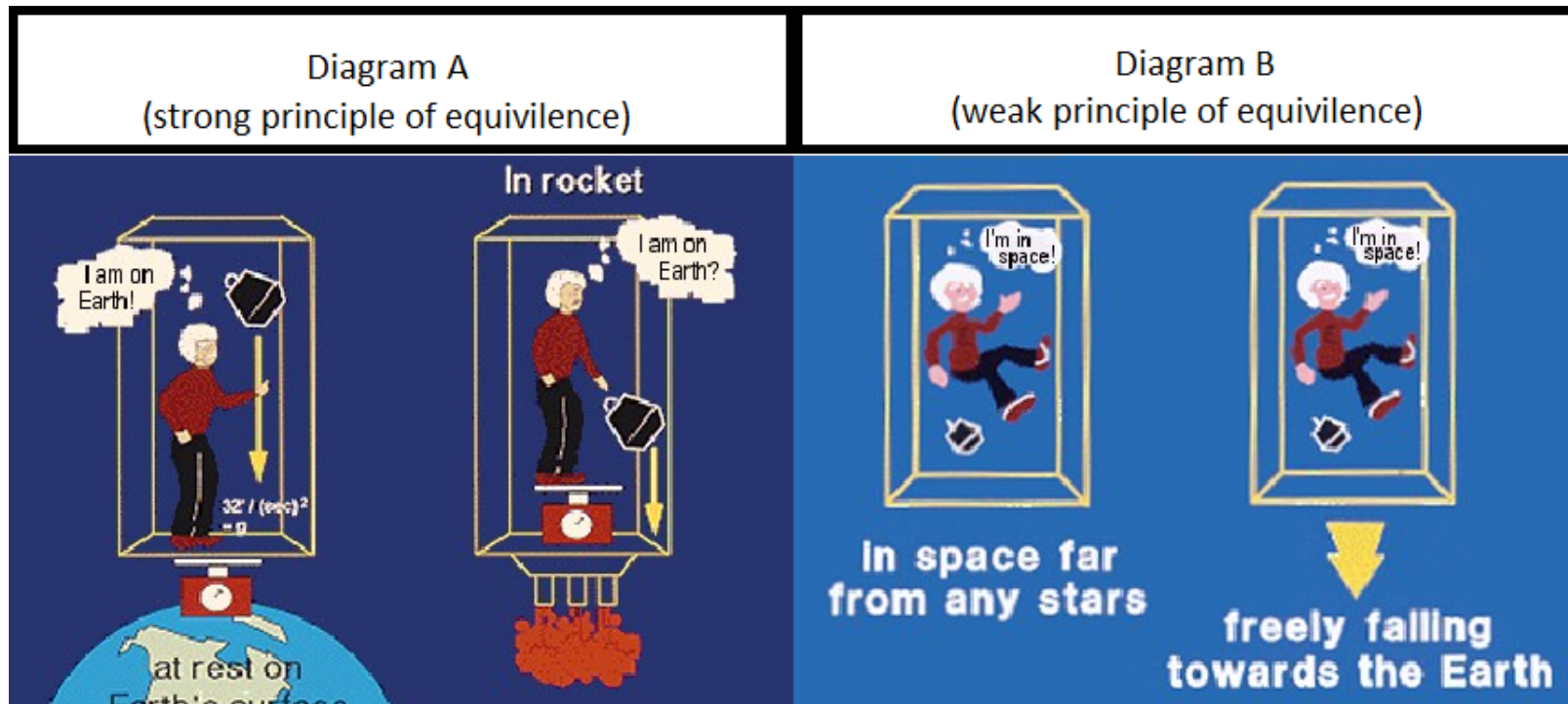
Paris, 1933, Irène e Frédéric Joliot-Curie

Foto da conversão de energia em massa. Um quantum de luz (fóton), sem massa (invisível na foto), converte-se em um par de partículas com massa.

E referenciais acelerados?

O princípio da equivalência – relatividade geral

- “ There is no experiment that can be done in a small confined space that can detect the difference between a uniform gravitational field and an equivalent uniform acceleration.”



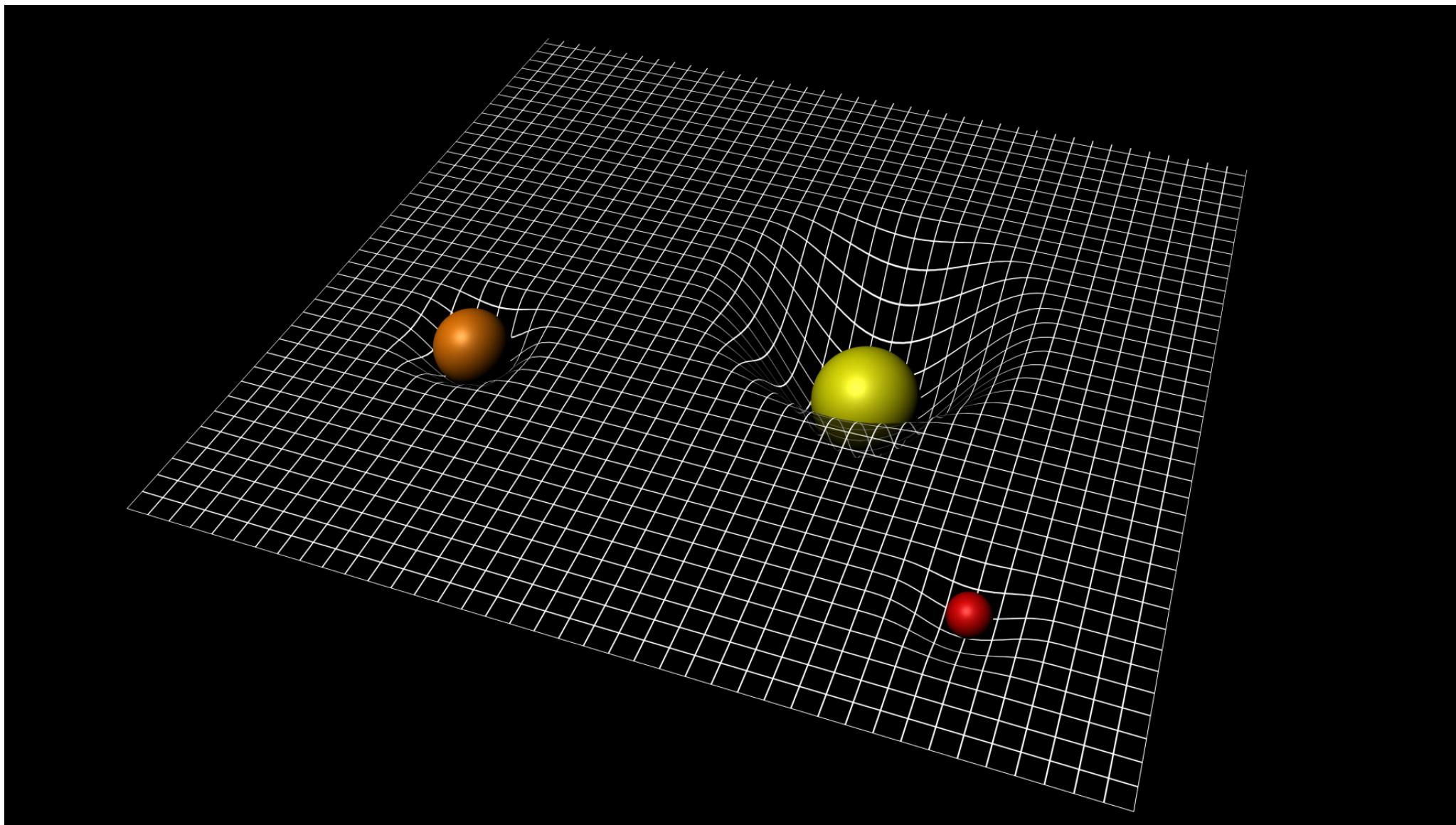
Relatividade geral

- Desenvolvida por Einstein entre 1907 e 1915
 - 1907 – “For an observer falling freely from the roof of a house, the gravitational field does not exist”
 - Uso da relatividade restrita em referenciais acelerados previu que a gravidade pode gerar dilatação temporal
 - 1911 – Previsão de lentes gravitacionais
 - Luz pode ser desviada por campos gravitacionais
 - 1912 – Einstein concentra-se em desenvolver uma teoria para o espaço-tempo puramente geométrica
 - 1916 – Einstein publica o seu trabalho de teoria da relatividade geral

O que é a relatividade geral

- A relatividade geral é uma teoria sobre gravitação que substitui a teoria gravitacional de Newton usando a ideia de que o espaço-tempo se distorce na presença de energia (massa), resultando no que a gente sente como sendo atração gravitacional.
 - Gravitação não é força!

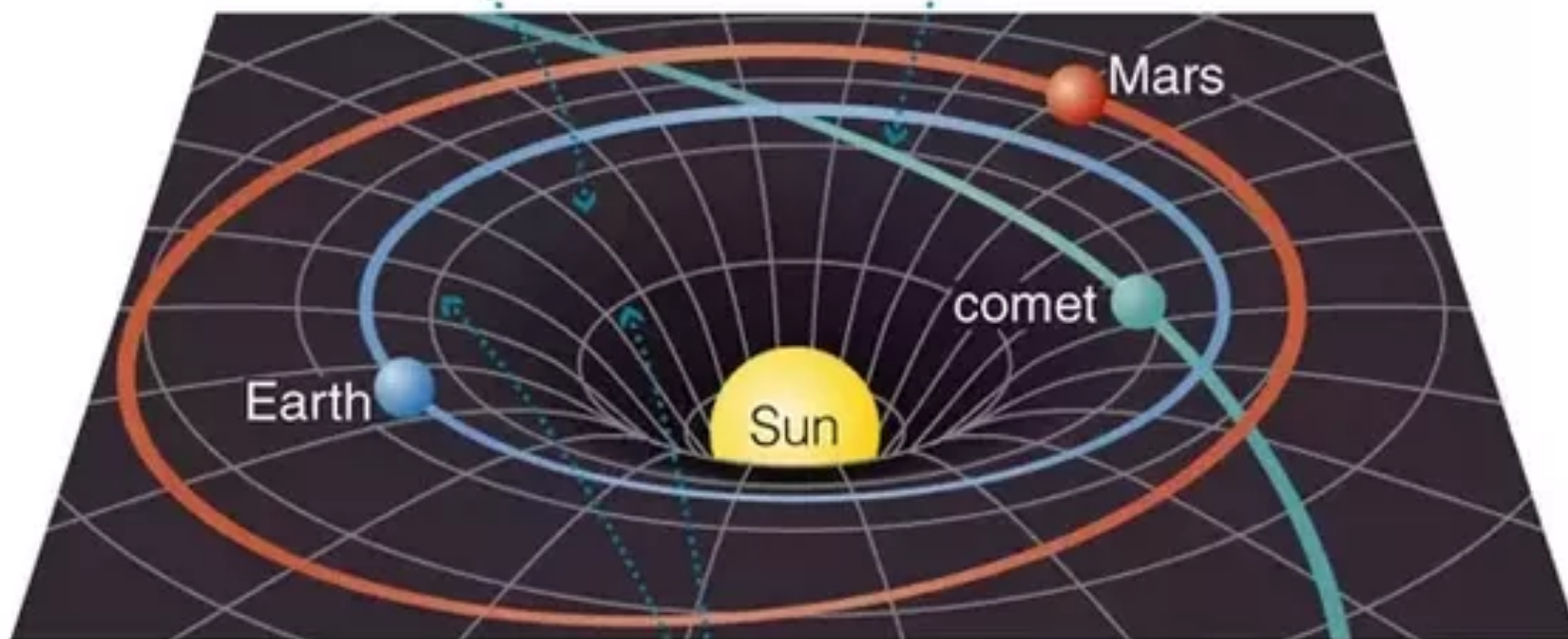
Curvatura no espaço-tempo



Trajetórias no espaço tempo

The mass of the Sun causes spacetime to curve . . .

. . . so freely moving objects (such as planets and comets) follow the straightest possible paths allowed by the curvature of spacetime.

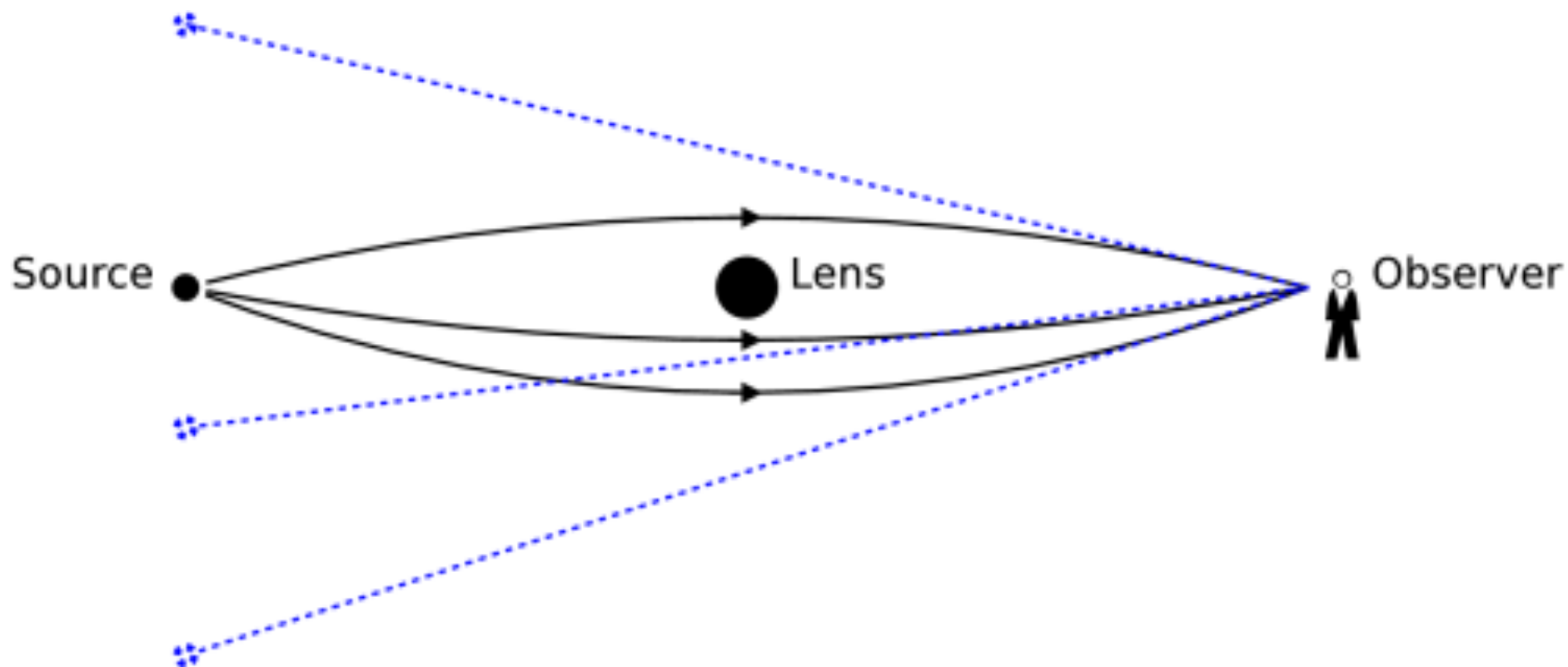


Circles that were evenly spaced in flat spacetime become more widely spaced near the central mass.

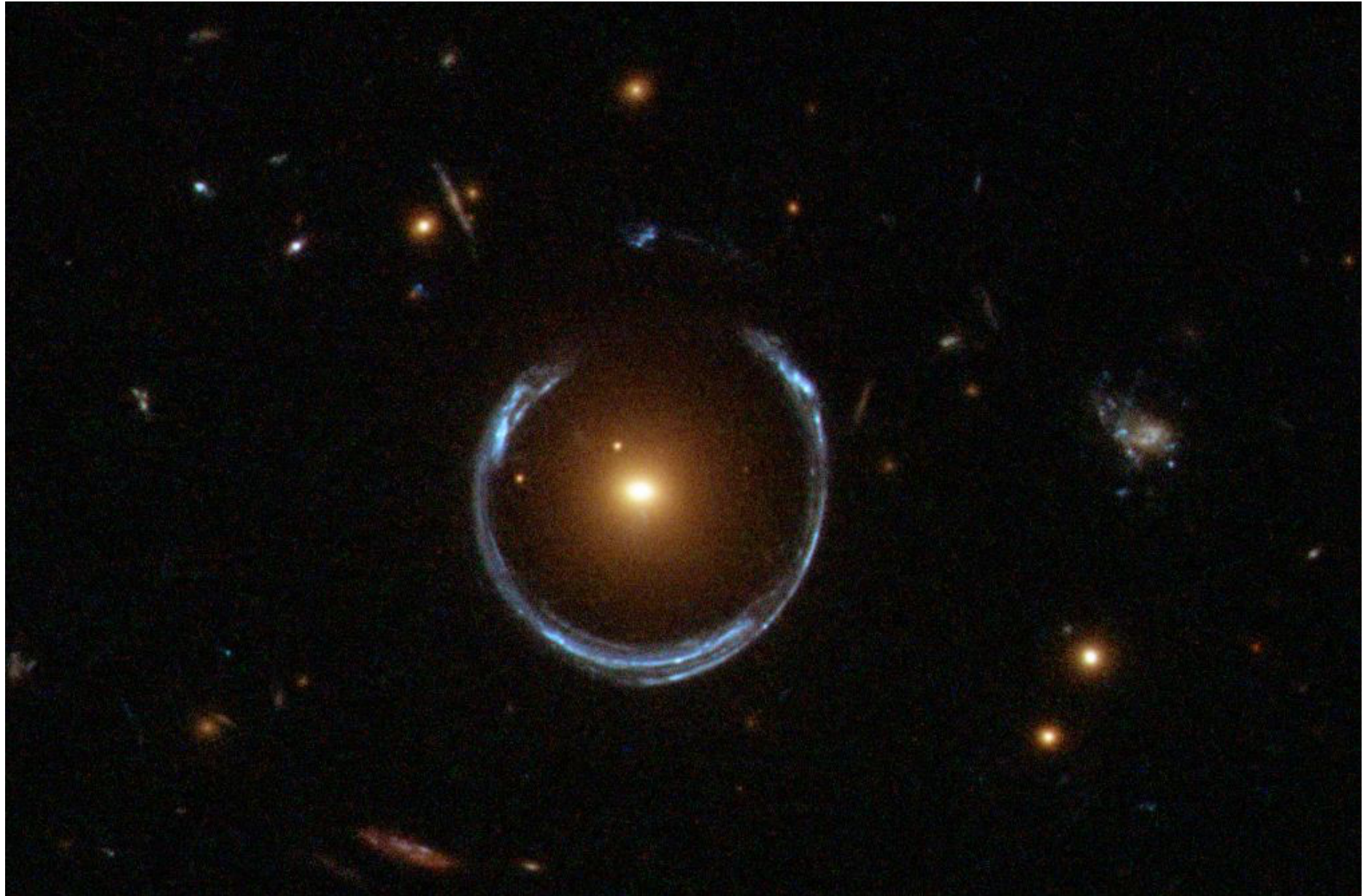
Algumas previsões da relatividade geral

- Dentre outras
 - Lentes gravitacionais
 - A luz sofre desvios ao passar por distorções no espaço-tempo
 - Buracos negros
 - Grandes distorções no espaço-tempo
 - Ondas gravitacionais
 - Como as distorções no espaço-tempo se propagam

Lentes gravitacionais



Lentes gravitacionais

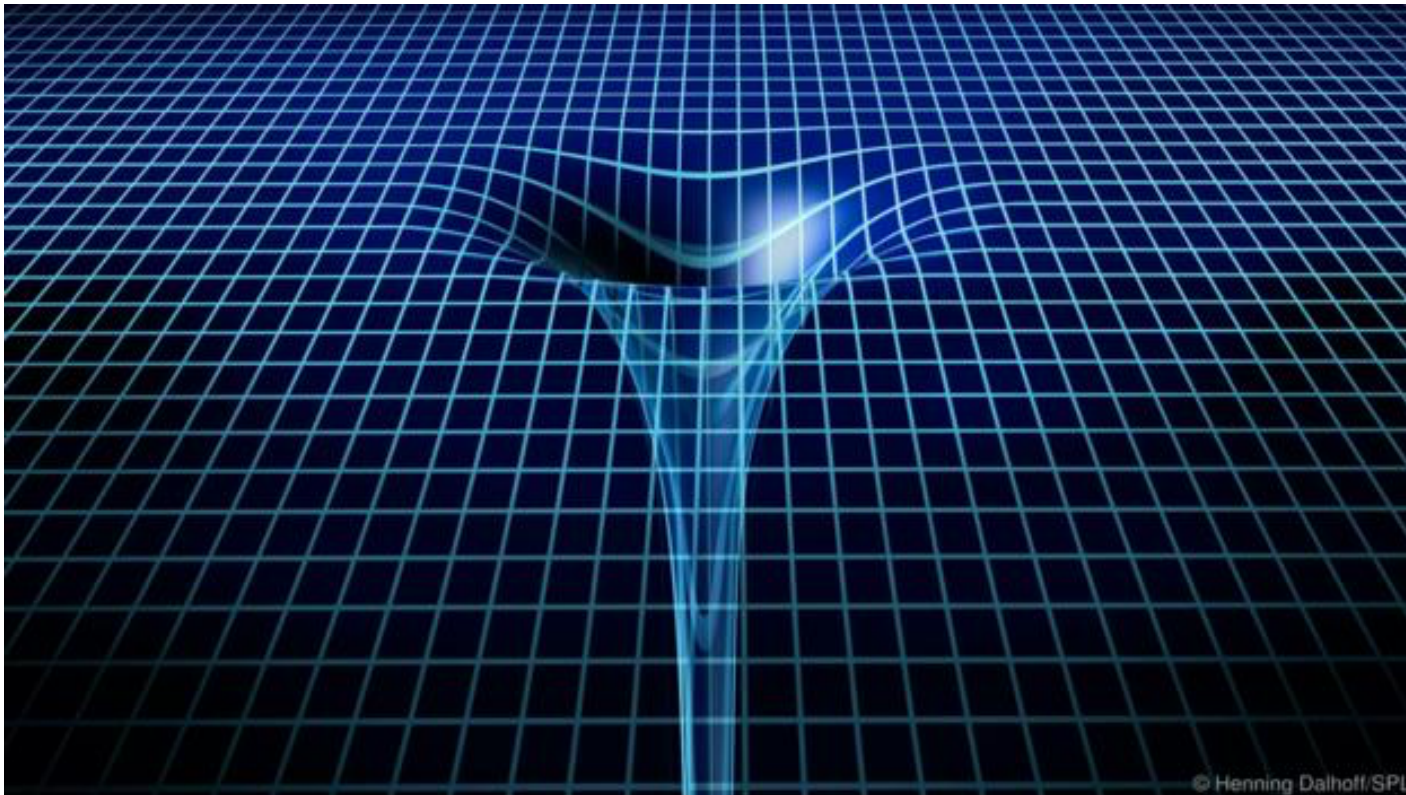


Lentes gravitacionais



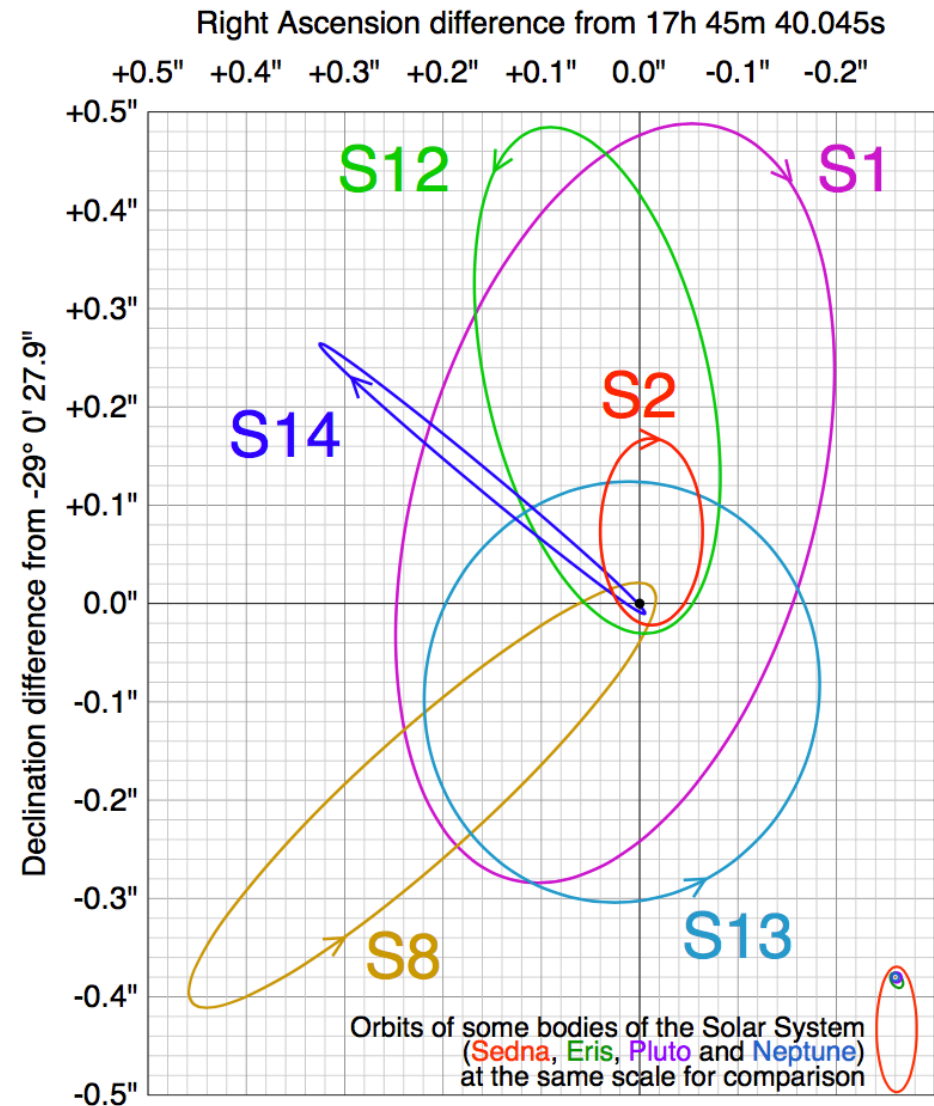
Buracos negros

- Objetos supermassivos e superdensos que causam tanta distorção no espaço-tempo que nem a luz consegue escapar da sua atração gravitacional



Na Via Lactea

- Há evidências de que no centro da Via Lactea há um buraco negro supermassivo
 - Estrelas que orbitam uma região supermassiva no centro da galaxia com períodos muito curtos
 - 4 milhões de massas solares!



Na Via Lactea

ESO Video News Reel 46/08

Unprecedented 16-year long study tracks
stars orbiting Milky Way black hole.

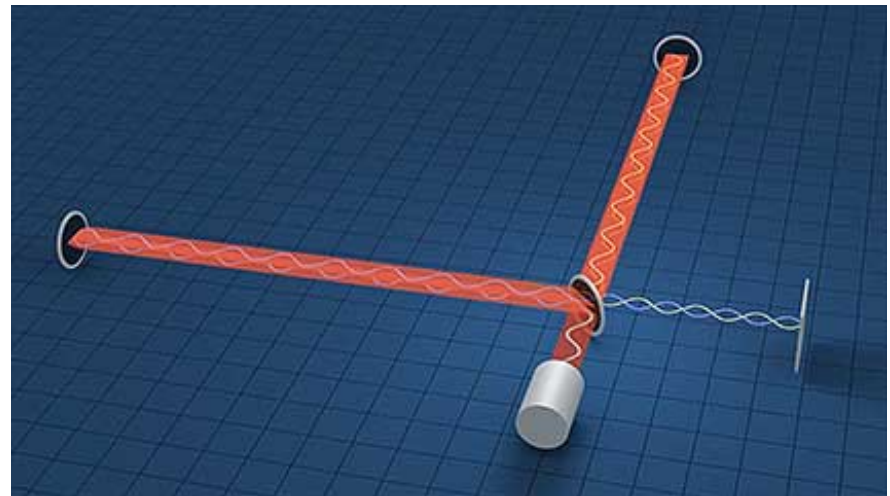
B-roll

European Southern Observatory

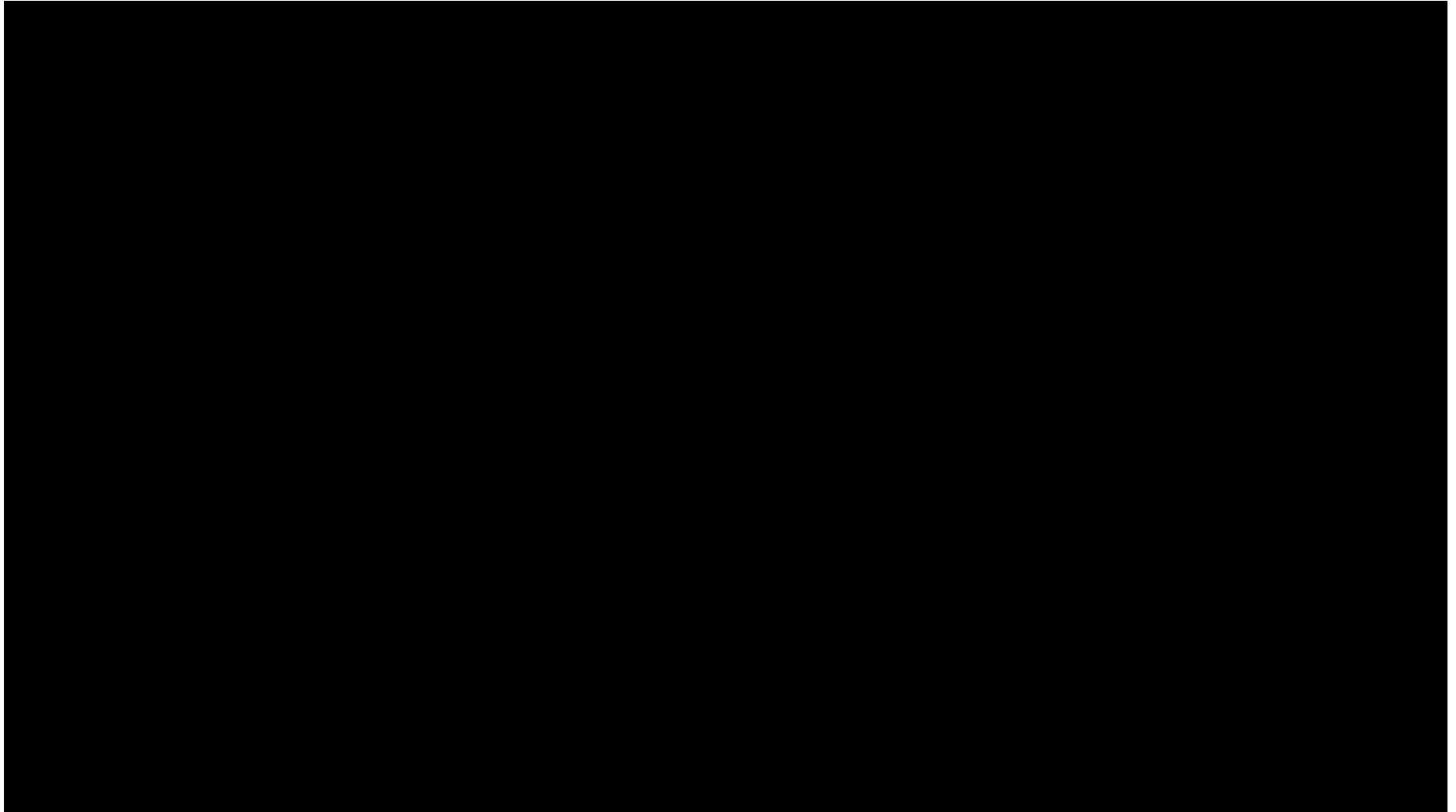
Copyright ESO 2008

Ondas gravitacionais

- Flutuações na curvatura do espaço-tempo se propagam como ondas
- Objetos massivos distorcem o espaço-tempo e um objeto se movendo faz com que esta distorção se mova
 - LIGO – Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory



Ondas gravitacionais



Varias consequências

- Nas próximas aulas nós veremos como as propriedades da relatividade e de mecânica quântica afetam a estrutura do universo
 - Física de partículas elementares
 - Física Nuclear
- E mais ... cosmologia, informação quântica, física aplicada, nanotecnologia, semi/supercondutores, etc.

Calendário da disciplina

Data	Tópico
22/8	Física de partículas (Suaide)
29/8	Física de partículas (Suaide)
12/9	Física Molecular (Kaline Coutinho)
19/9	Física Atmosférica (Alexandre Correia)
26/9	Cristalografia (Marcia Fantini)
3/10	Física Nuclear e radioatividade (Suaide)
10/10	Física Nuclear e energia (Suaide)
17/10	Semicondutores e supercondutores (Valmir Chitta)
24/10	Física de plasmas (Zwinglio Guimarães)
31/10	Cosmologia (Raul Abramo)
7/11	Nanotecnologia (Antonio Domingues dos Santos)
14/11	Ótica quântica (Paulo Nusseinzveig)
28/11	Arqueometria e patrimônio cultural (Marcia Rizutto)
5/12	Aula de encerramento (Suaide)