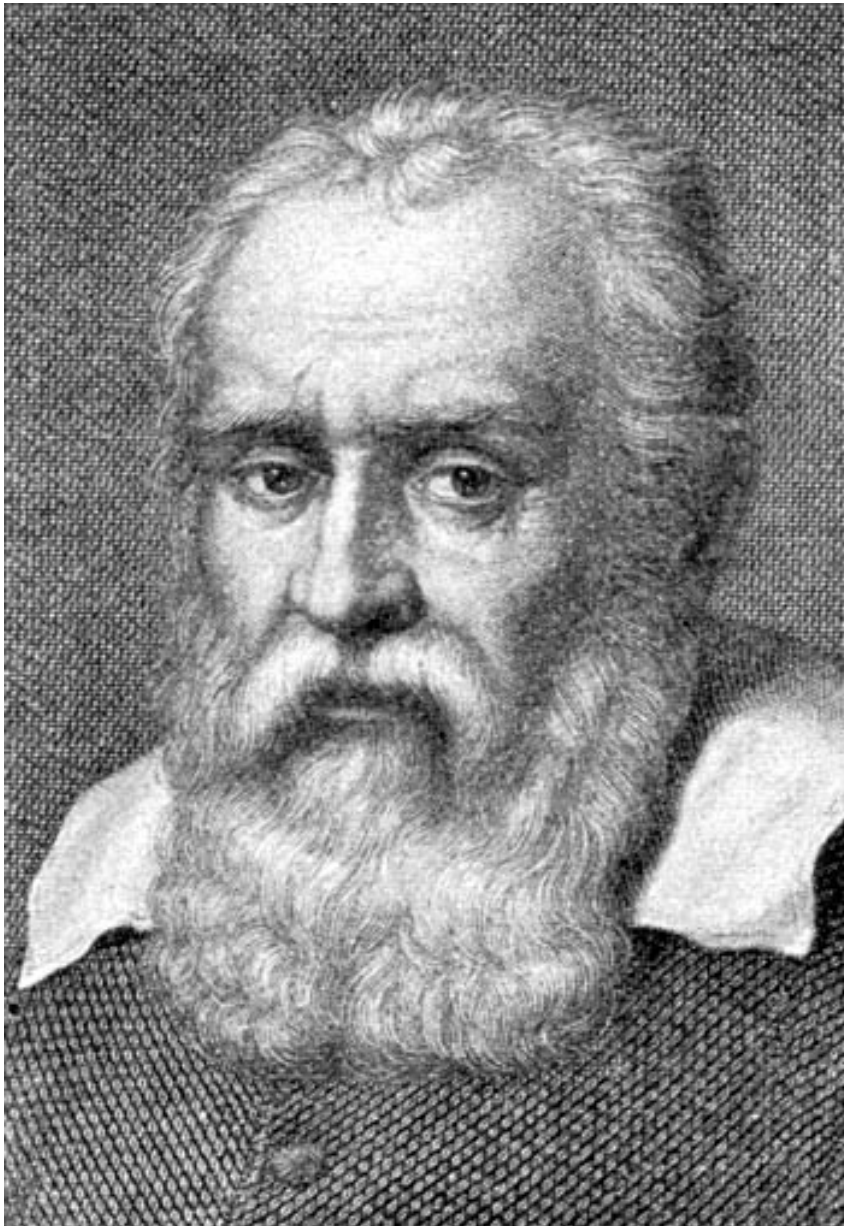


Introdução à Relatividade Restrita

Relatividade de Galileu
Transformações de Galileu
A velocidade da luz no vácuo, c
A experiência de Michelson-Morley
Postulados da Relatividade Restrita
Introdução à Relatividade Restrita
Dilatação dos tempos
Contração dos comprimentos
Transformações de Lorentz
Cone de Luz e Intervalo Invariante
Paradoxo dos Gêmeos
Adição de Velocidades
Energia, Momento e Massa Invariante

*“Quando se senta ao lado de uma rapariga bonita durante 2 horas, parecem 2 minutos.
Quando se senta em cima de uma chapa quente durante 2 minutos, parecem 2 horas.
Isso é relatividade!”*

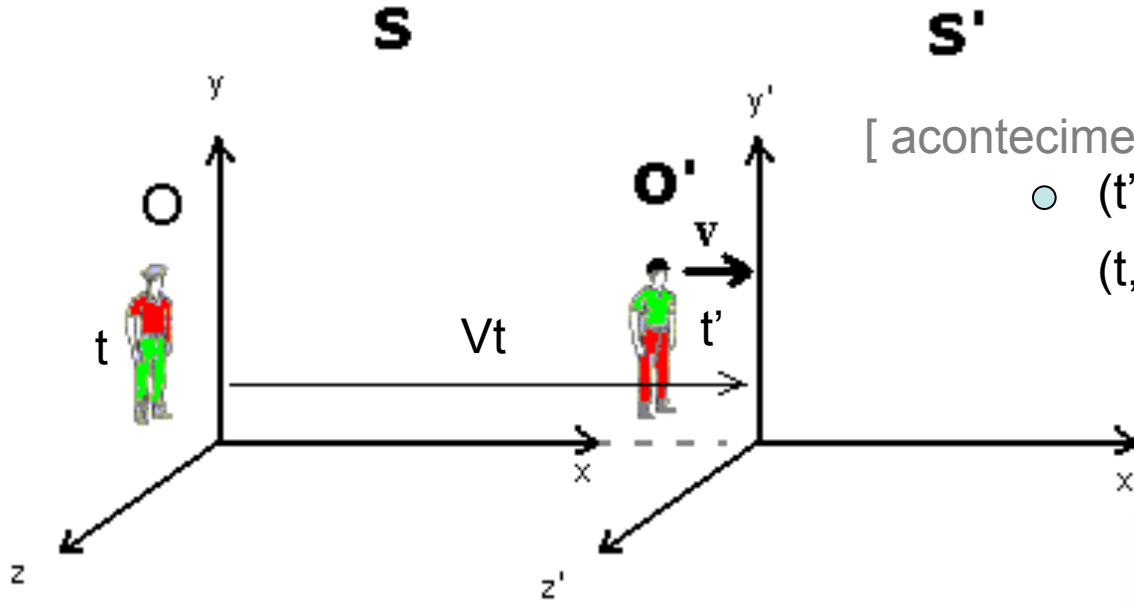
Albert Einstein (1879-1955)



Nenhum observador realizando experiências pode determinar se está em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme

Galileo Galilei 1564-1642

Transformações de Galileu



[acontecimento \Rightarrow (tempo, espaço)]

○ (t', x', y', z')

(t, x, y, z)

$$x' = x - V t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

$$v_{x'}' = v_x - V$$

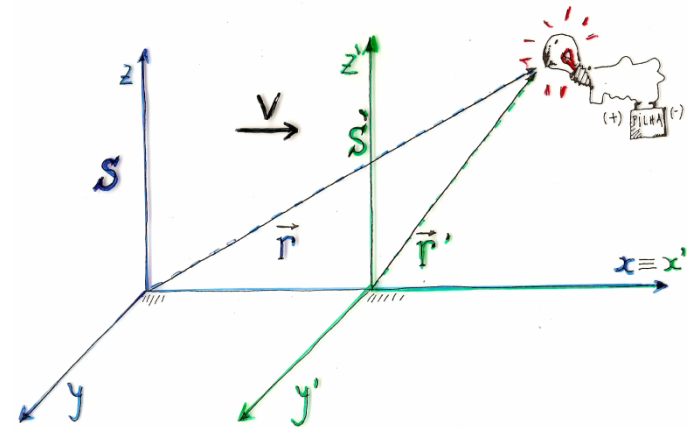
$$v_{y'}' = v_y$$

$$v_{z'}' = v_z$$

$$a_{x'}' = a_x$$

$$a_{y'}' = a_y$$

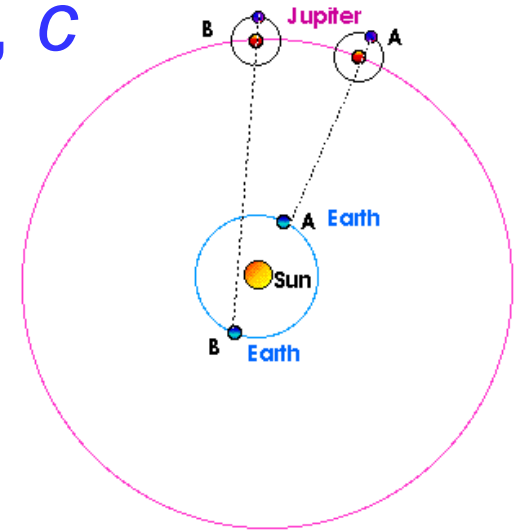
$$a_{z'}' = a_z$$



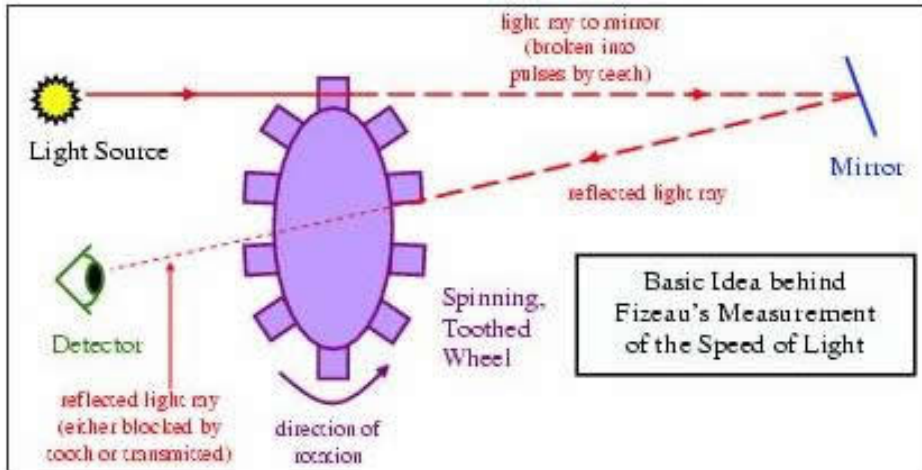
A questão da Velocidade da Luz, c



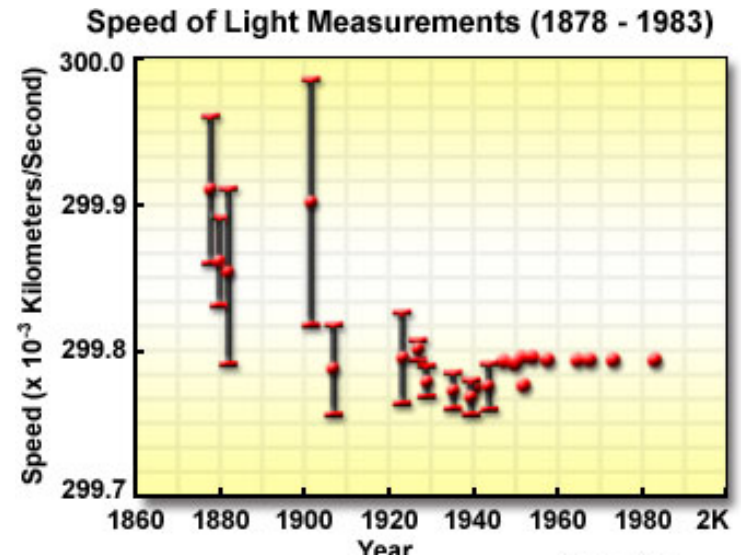
Galileo



Roemer 1670



Fizeau ~ 1850



As medidas da Velocidade da Luz no vazio, c

TABLE 23-3
THE SPEED OF LIGHT: SOME SELECTED MEASUREMENTS

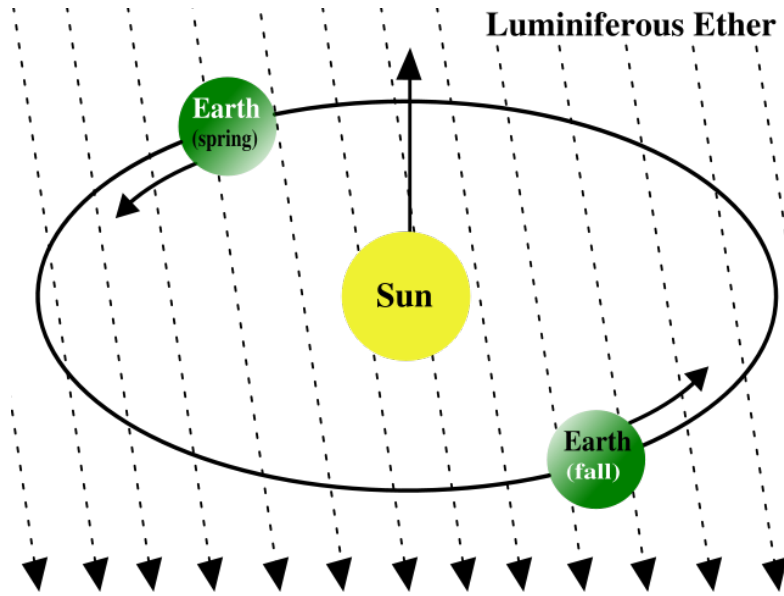
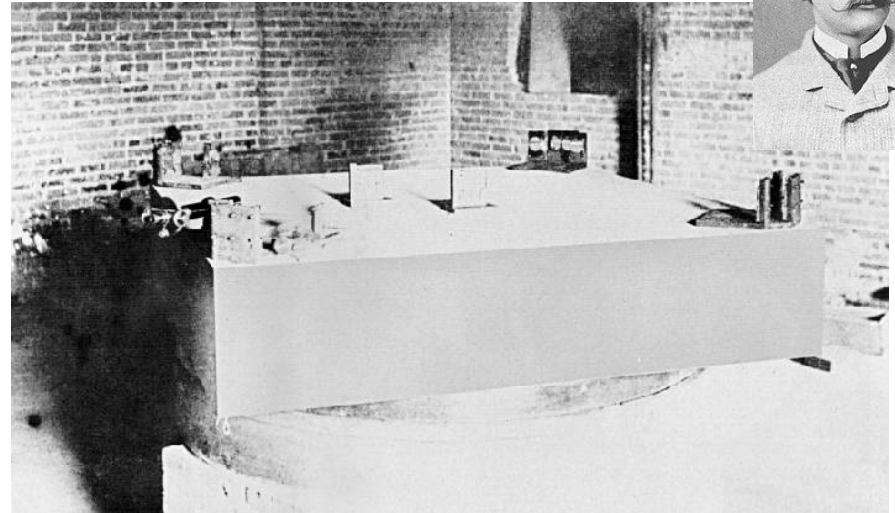
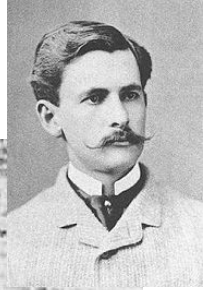
DATE	EXPERIMENTER	COUNTRY	EXPERIMENTAL METHOD	SPEED (10^8 m/s)	UNCERTAINTY (m/s)
1600	Galileo	Italy	Lanterns and shutters	“Fast”	?
1676	Roemer	France	Moons of Jupiter	2.14	?
1729	Bradley	England	Aberration of light	3.08	?
1849	Fizeau	France	Toothed wheel	3.14	?
1879	Michelson	United States	Rotating mirror	2.99910	75,000
	Michelson	United States	Rotating mirror	2.99798	22,000
1950	Essen	England	Microwave cavity	2.997925	1,000
1958	Froome	England	Interferometer	2.997925	100
1972	Evenson et al.	United States	Laser method	2.997924574	1.1
1974	Blaney et al.	England	Laser method	2.997924590	0.6
1976	Woods et al.	England	Laser method	2.997924588	0.2
1983	Internationally adopted value:			2.99792458	Exact

Velocidade da Luz em relação à Terra:

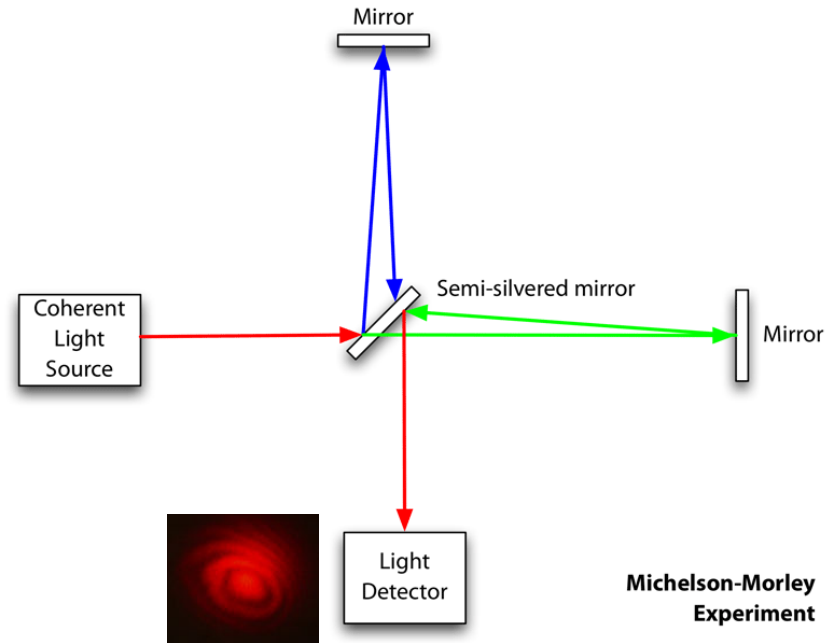
Michelson–Morley

1887 – procuram detectar as interferências devidas ao movimento da Terra no éter (30 km/s). Resolução: 8 km/s.

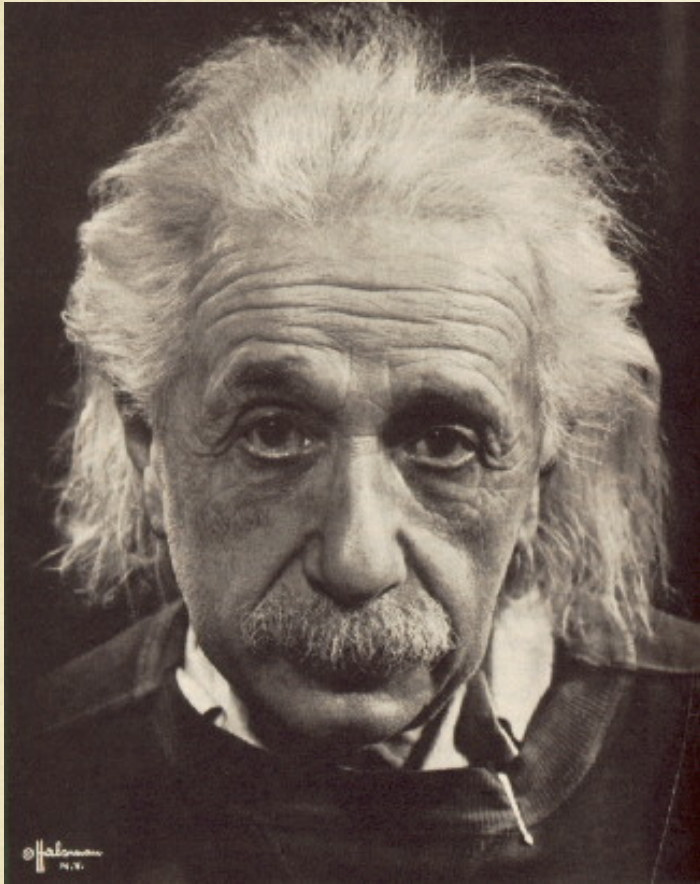
Michelson



=> c não depende do observador!

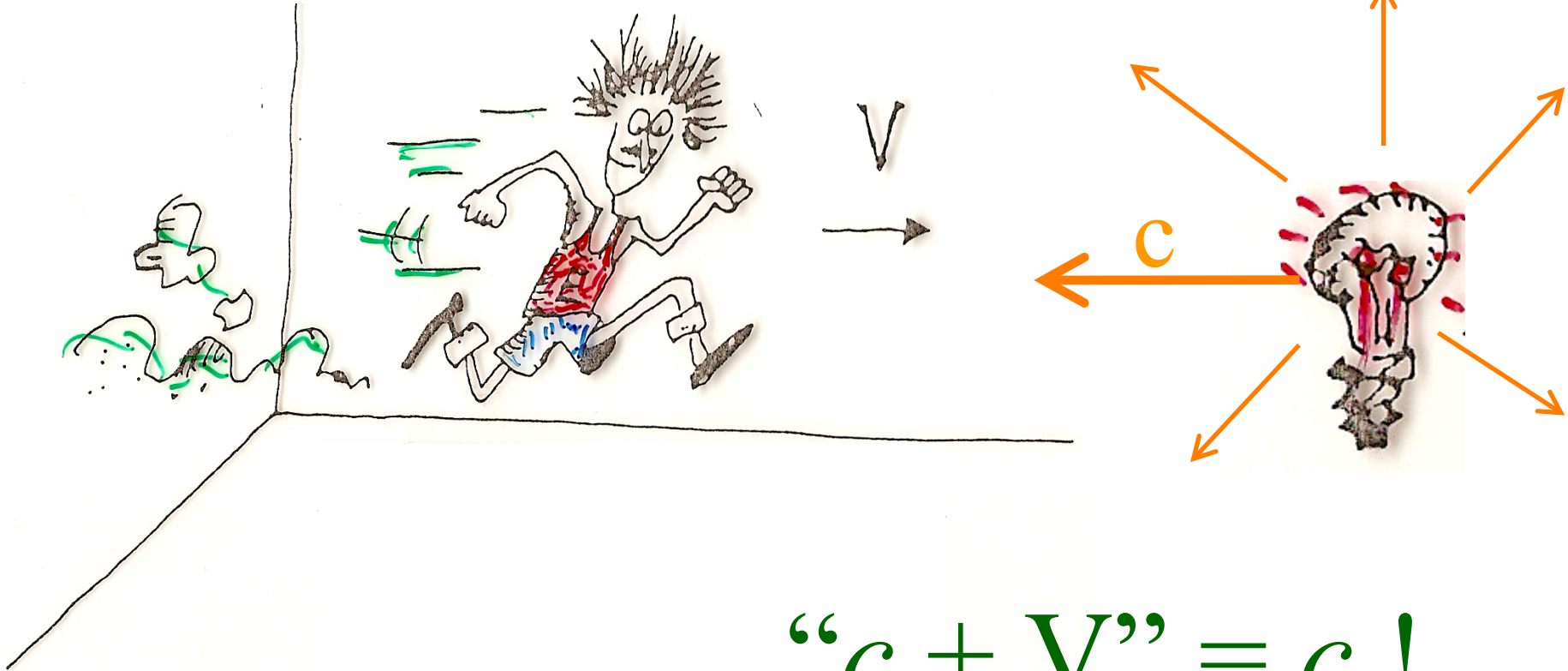
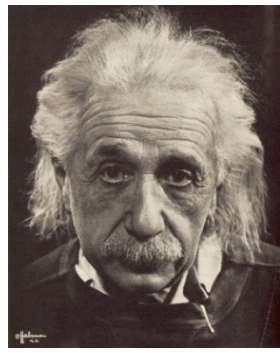


Postulados Relatividade Restrita



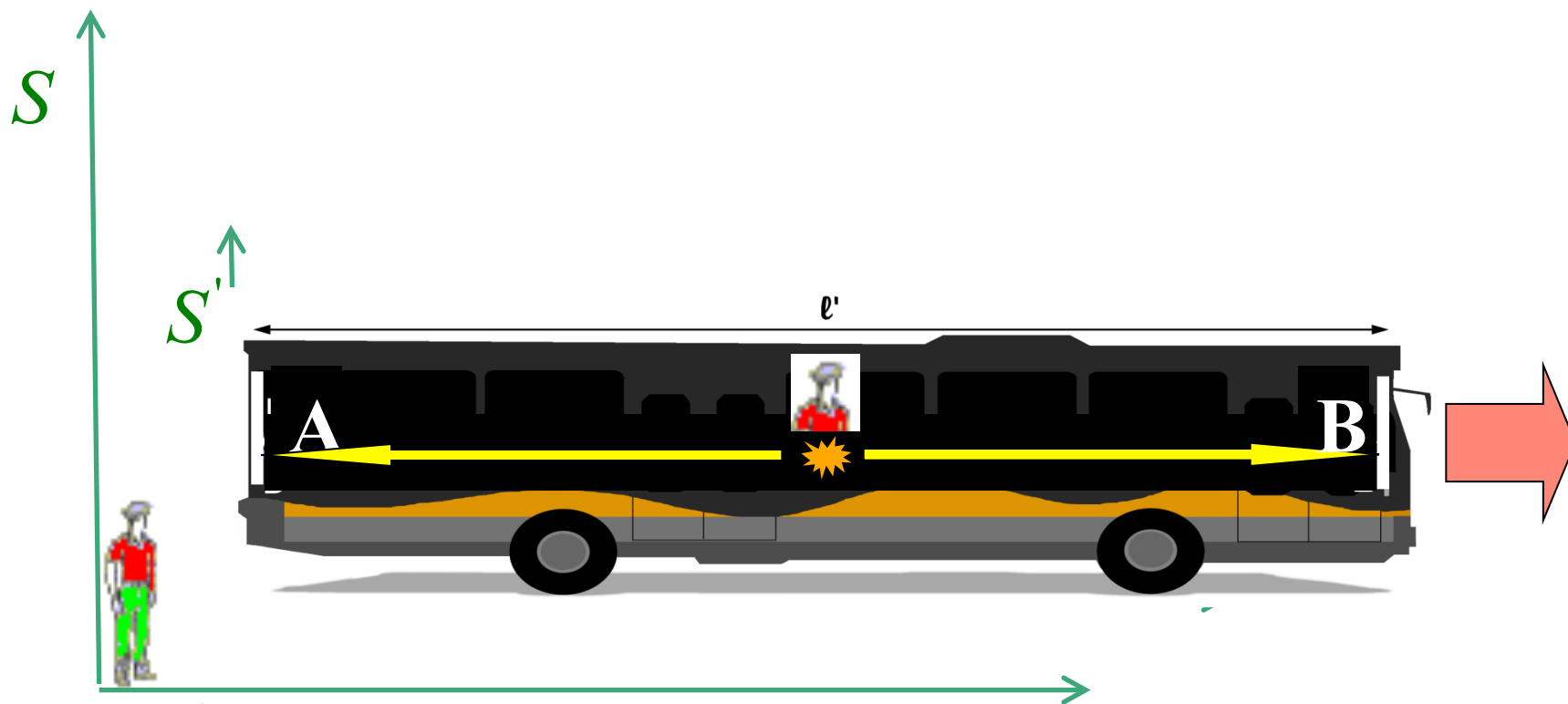
1. Todas as Leis da Física são as mesmas para todos os referenciais de inércia.
2. A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor $c=299792548$ m/s para todos os referenciais inerciais, independentemente das velocidades do observador ou receptor.

A relatividade restrita



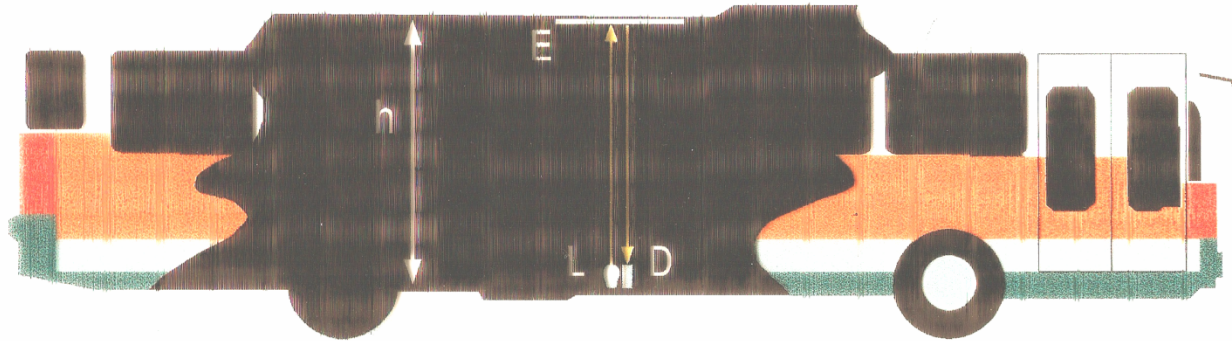
$$“c + V” = c!$$

Simultaneidade

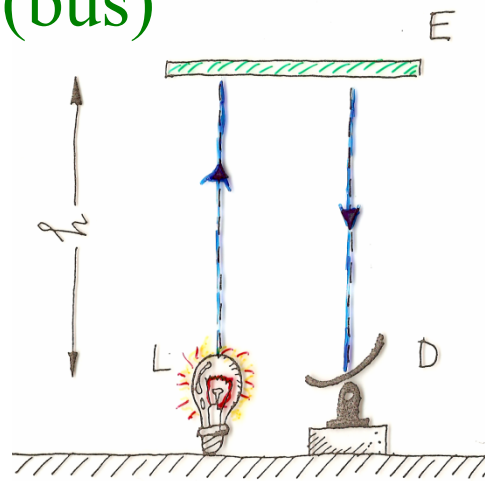


Dois acontecimentos simultâneos para um observador podem não ser simultâneos para outro

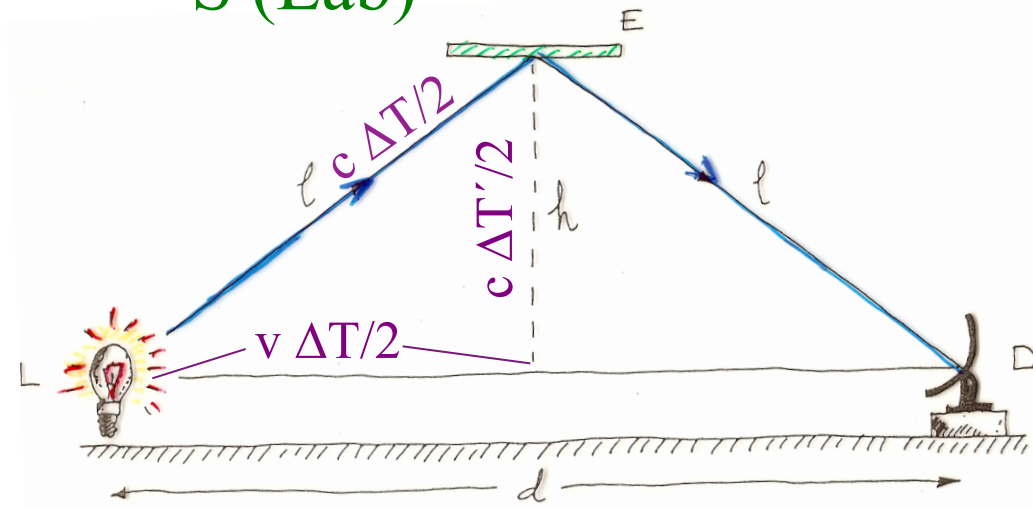
Dilatação do Tempo



S' (bus)

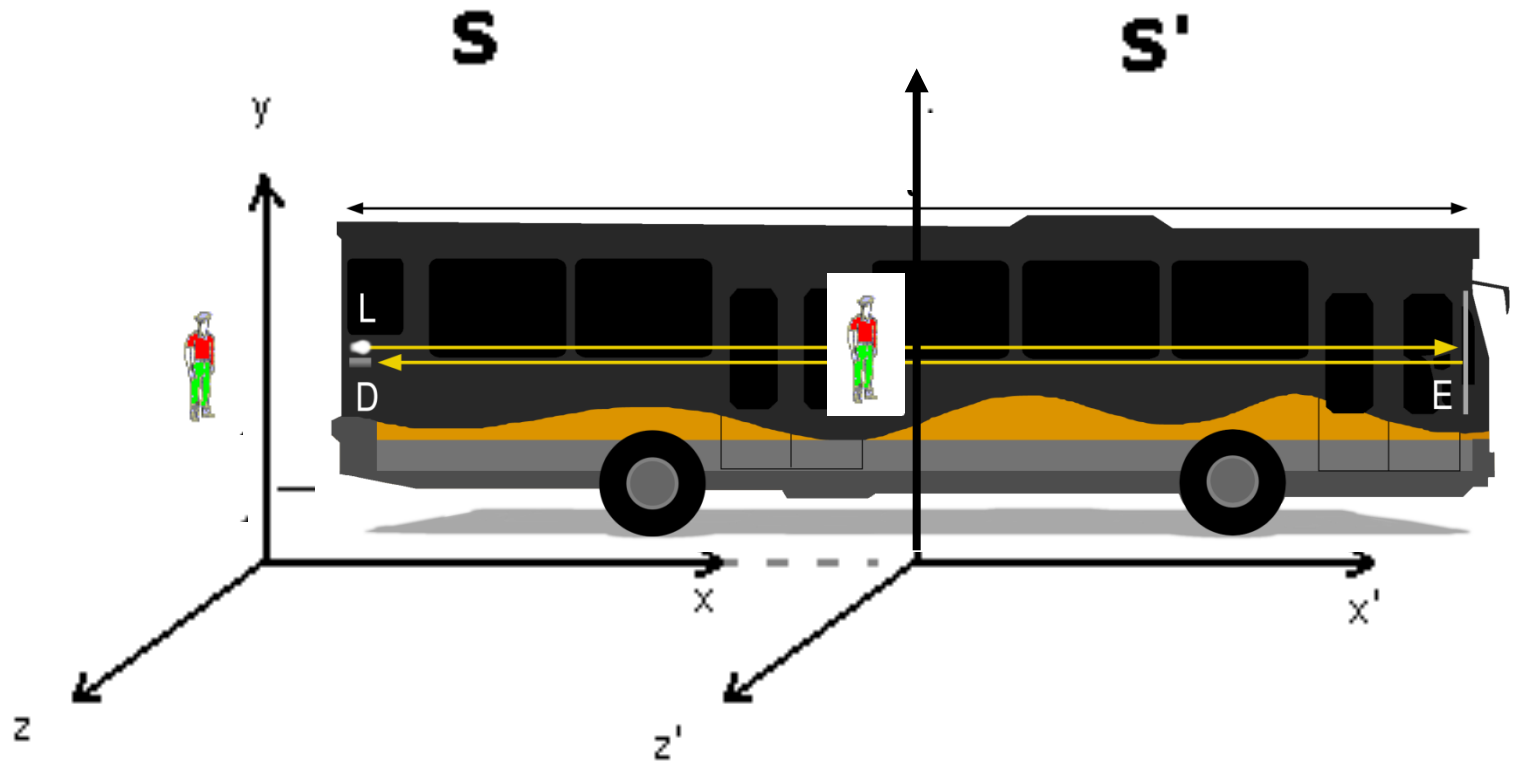


S (Lab)



$$\Delta T = \Delta T' / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

Contração do Comprimento



$$\Delta t' = 2l' / c$$

$$\Delta t_1 = (l + v \Delta t_1) / c \quad e \quad \Delta t_2 = (l - v \Delta t_2) / c$$

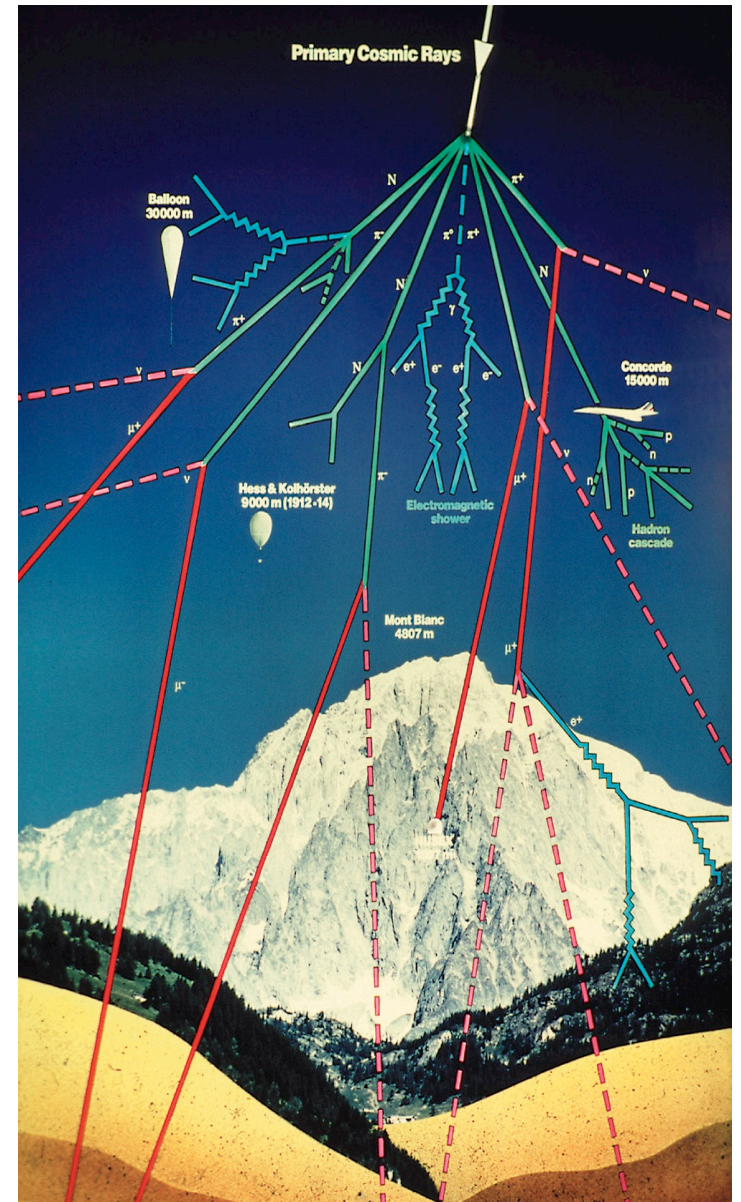
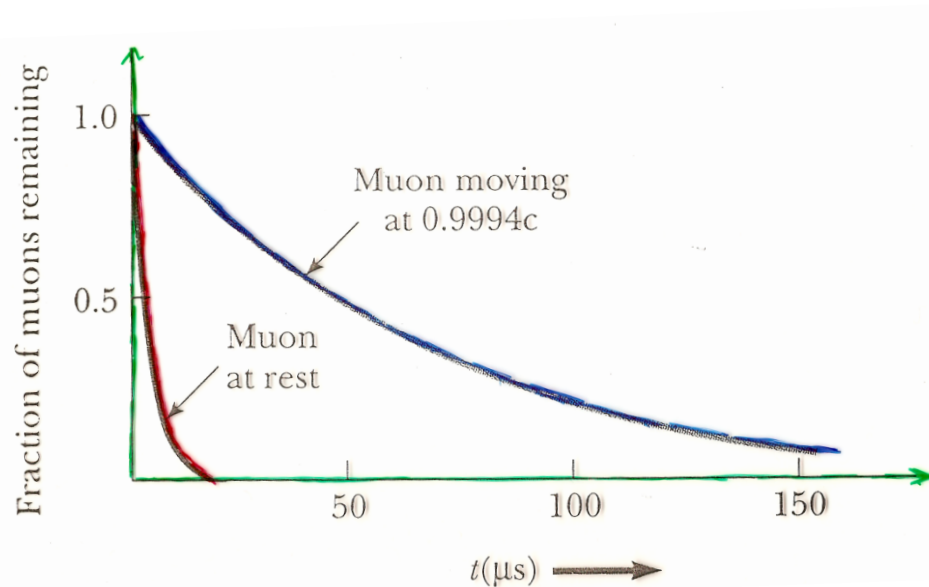
$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = 2l / (c (1 - v^2 / c^2))$$

$$\Delta t = \Delta t' / \sqrt{1 - v^2 / c^2} = 2l' / (c \sqrt{1 - v^2 / c^2})$$

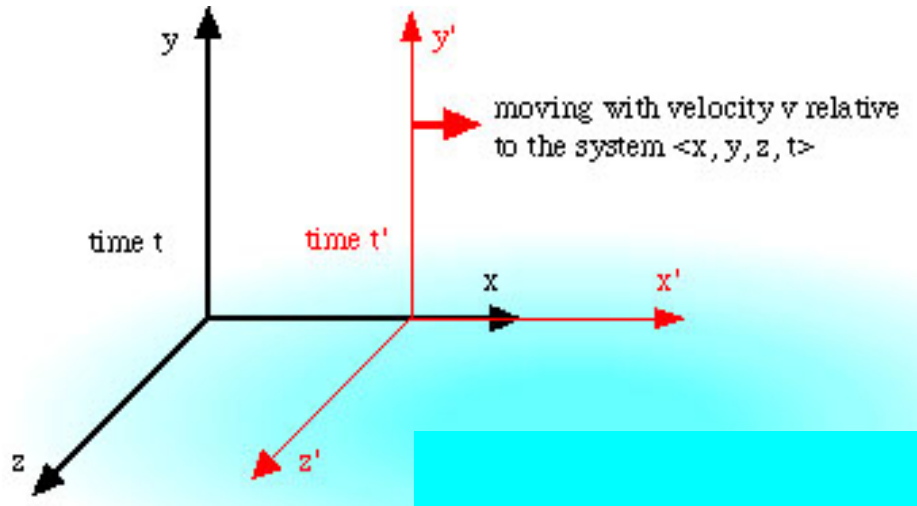
$$\Delta L = \Delta L' \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

Muões à superfície da Terra

Muões são produzidos no topo da atmosfera, mas são detectados à superfície da Terra!!!



Transformações de Lorentz



$$x' = (x - v t) / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = (t - v x / c^2) / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

$$\beta = v / c$$

$$\tau = c t$$

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}$$

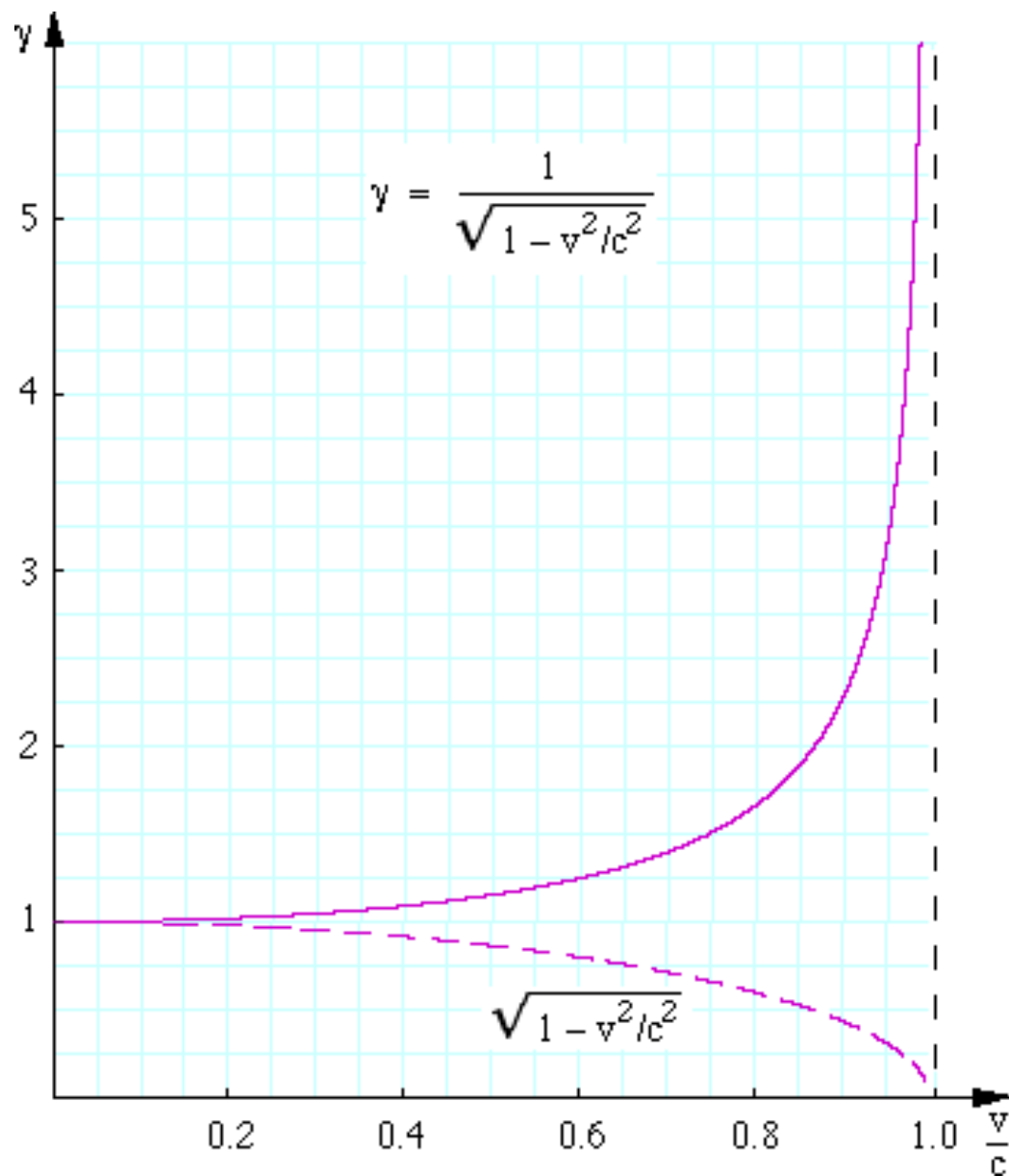
$$x' = \gamma (x - \beta \tau)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$\tau' = \gamma (\tau - \beta x)$$

O Factor de Lorentz γ



Um relógio em S'

$$x = \gamma (x' + \beta \tau')$$

$$\tau = \gamma (\tau' + \beta x')$$

A'

$$\begin{cases} x'_A = 0 \\ \tau'_A = 0 \end{cases}$$

B'

$$\begin{cases} x'_B = 0 \\ \tau'_B = cT' \end{cases}$$

A

$$\begin{cases} x_A = 0 \\ \tau_A = 0 \end{cases}$$

B

$$\begin{cases} x_B = \gamma \beta cT' \\ \tau_B = \gamma cT' \end{cases}$$



Dilatação de tempo!

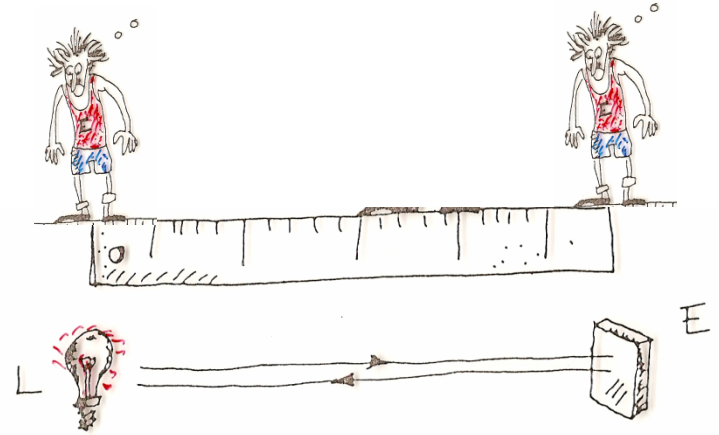
Praga astronomical clock



Uma régua em S'

$$x = \gamma (x' + \beta \tau')$$

$$\tau = \gamma (\tau' + \beta x')$$



$$A' \begin{cases} x'_A = 0 \\ \tau'_B = 0 \end{cases}$$

$$A \begin{cases} x_A = 0 \\ \tau_A = 0 \end{cases}$$

$$(x_B - x_A) = L + v T_B \\ = L + \beta \tau_B$$

$$B' \begin{cases} x'_B = L' \\ \tau'_B = 0 \end{cases}$$

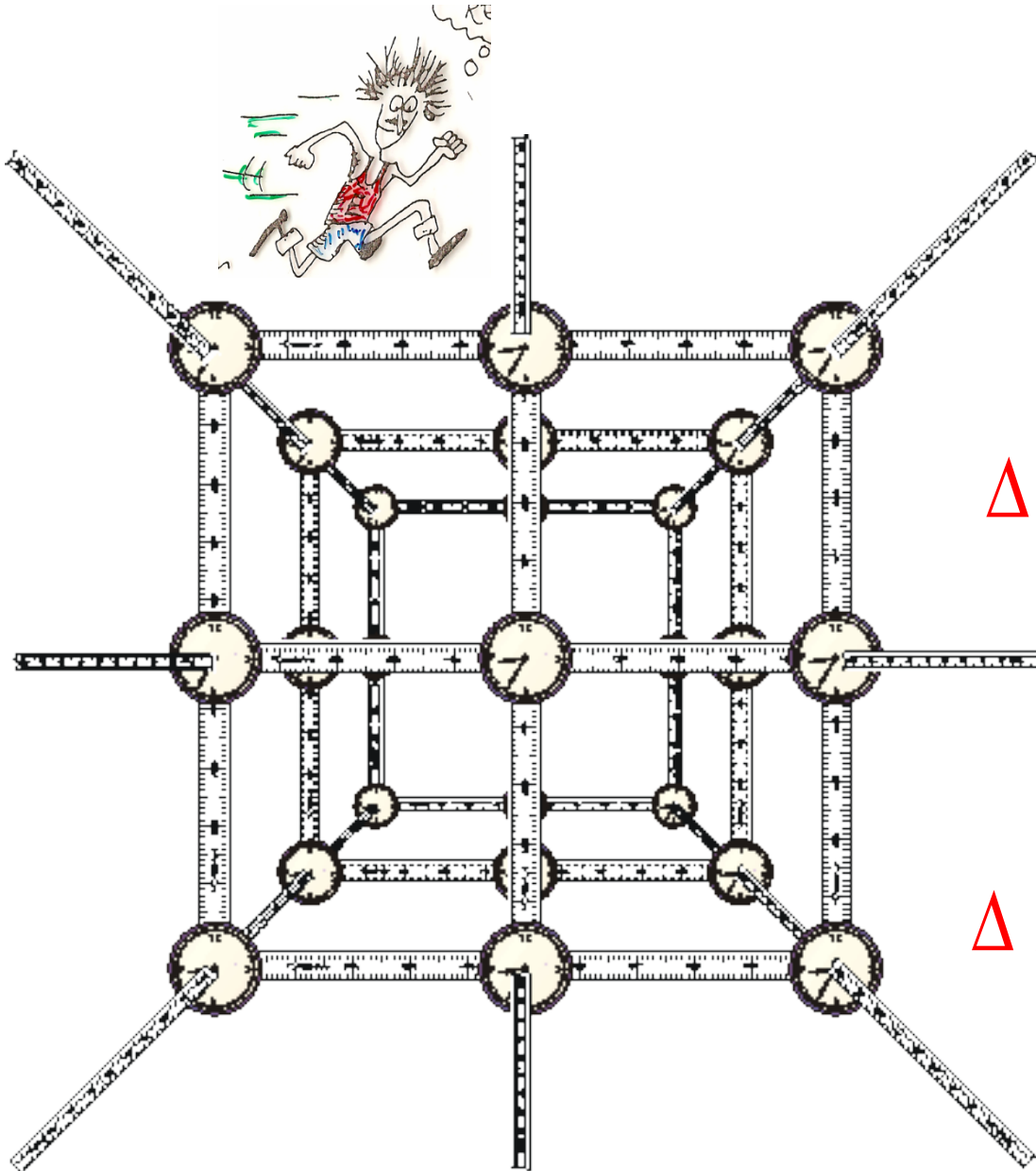
$$B \begin{cases} x_B = \gamma L' \\ \tau_B = \gamma \beta L' \end{cases}$$

$$L = \gamma L' - \beta (\gamma \beta L')$$

$$L = L' / \gamma$$

↑ Contração do comprimento!

O espaço e o tempo não são absolutos!



$$\Delta T = \Delta T' / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$



$$\Delta L = \Delta L' \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

Intervalo espaço-tempo

$s^2 = \Delta^2\tau - (\Delta^2x + \Delta^2y + \Delta^2z)$ é um invariante de Lorentz!

$$s'^2 = s^2 \quad !$$

$s^2 > 0$ intervalo tipo-tempo (A-B)

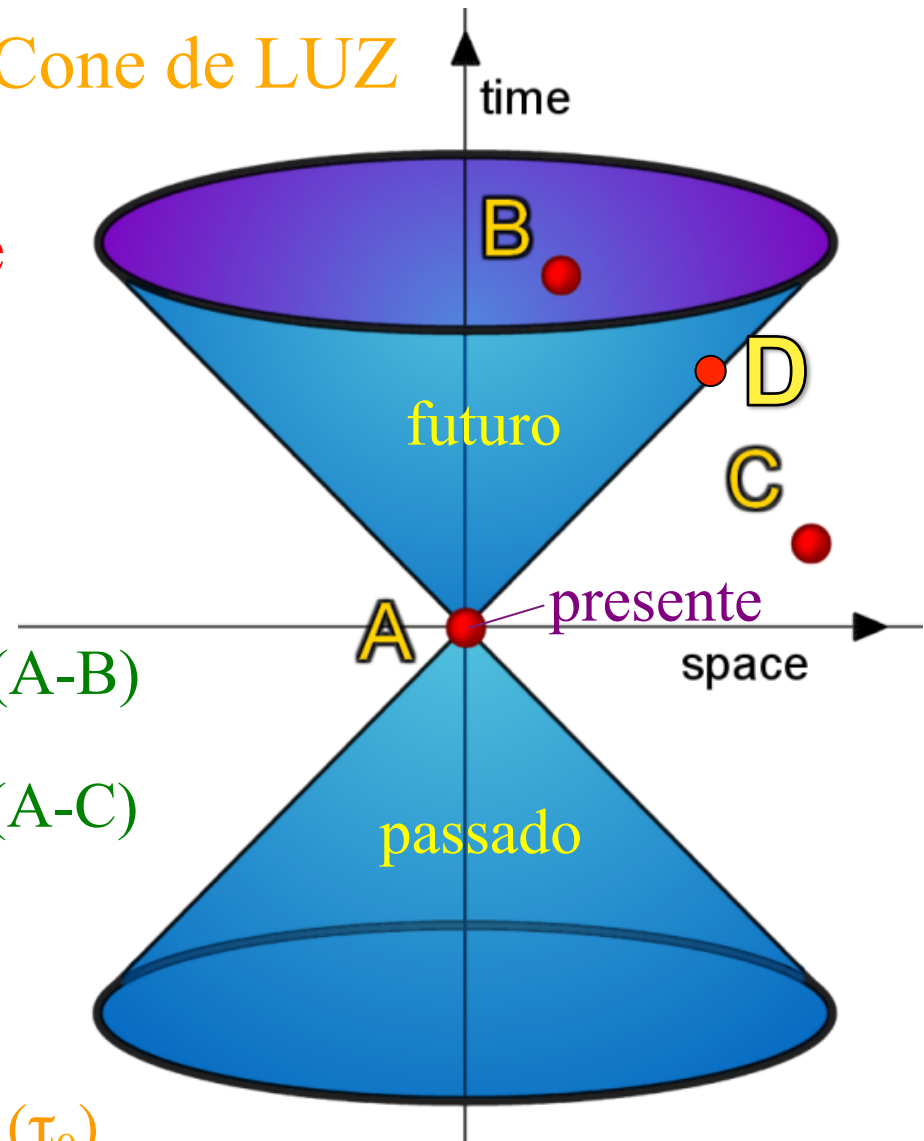
$s^2 < 0$ intervalo tipo-espaço (A-C)

$s^2 = 0$ intervalo de luz (A-D)

If $s^2 > 0$: $\sqrt{s^2} =$ tempo próprio (τ_0)

If $s^2 < 0$: $\sqrt{-s^2} =$ comprimento em repouso (L_0)

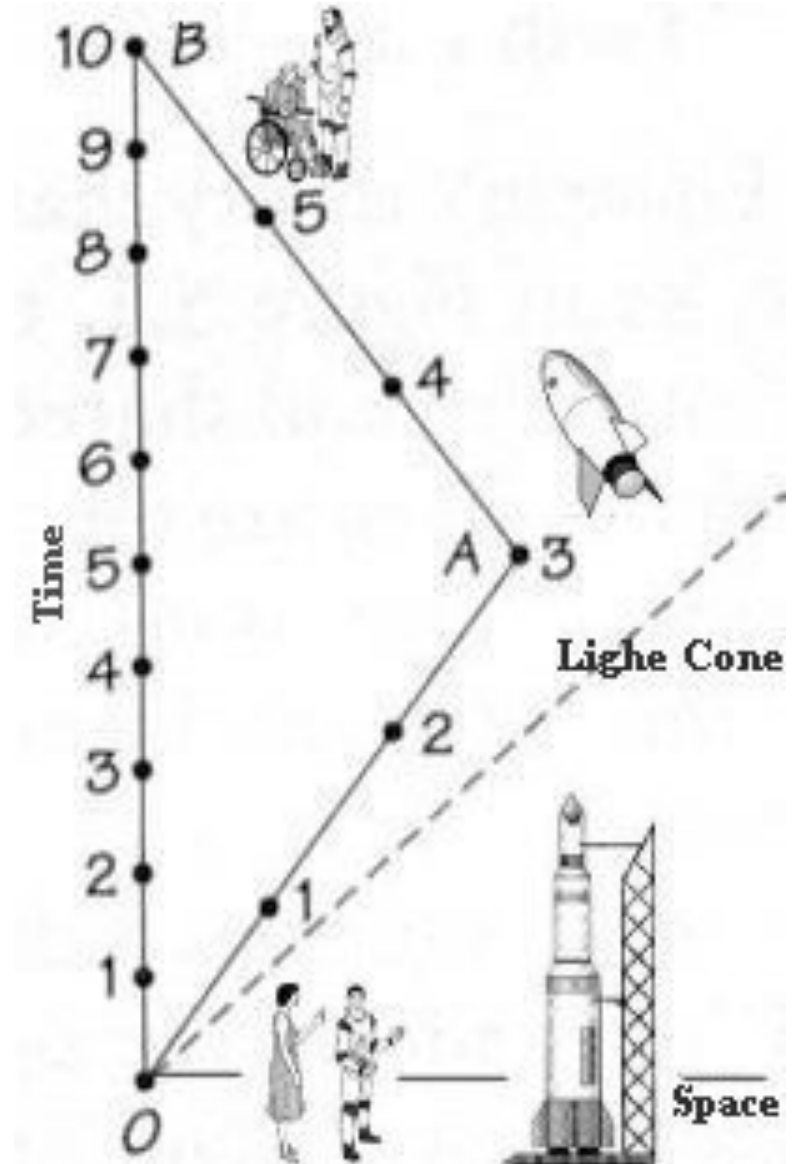
Cone de LUZ



O Paradoxo dos Gémeos

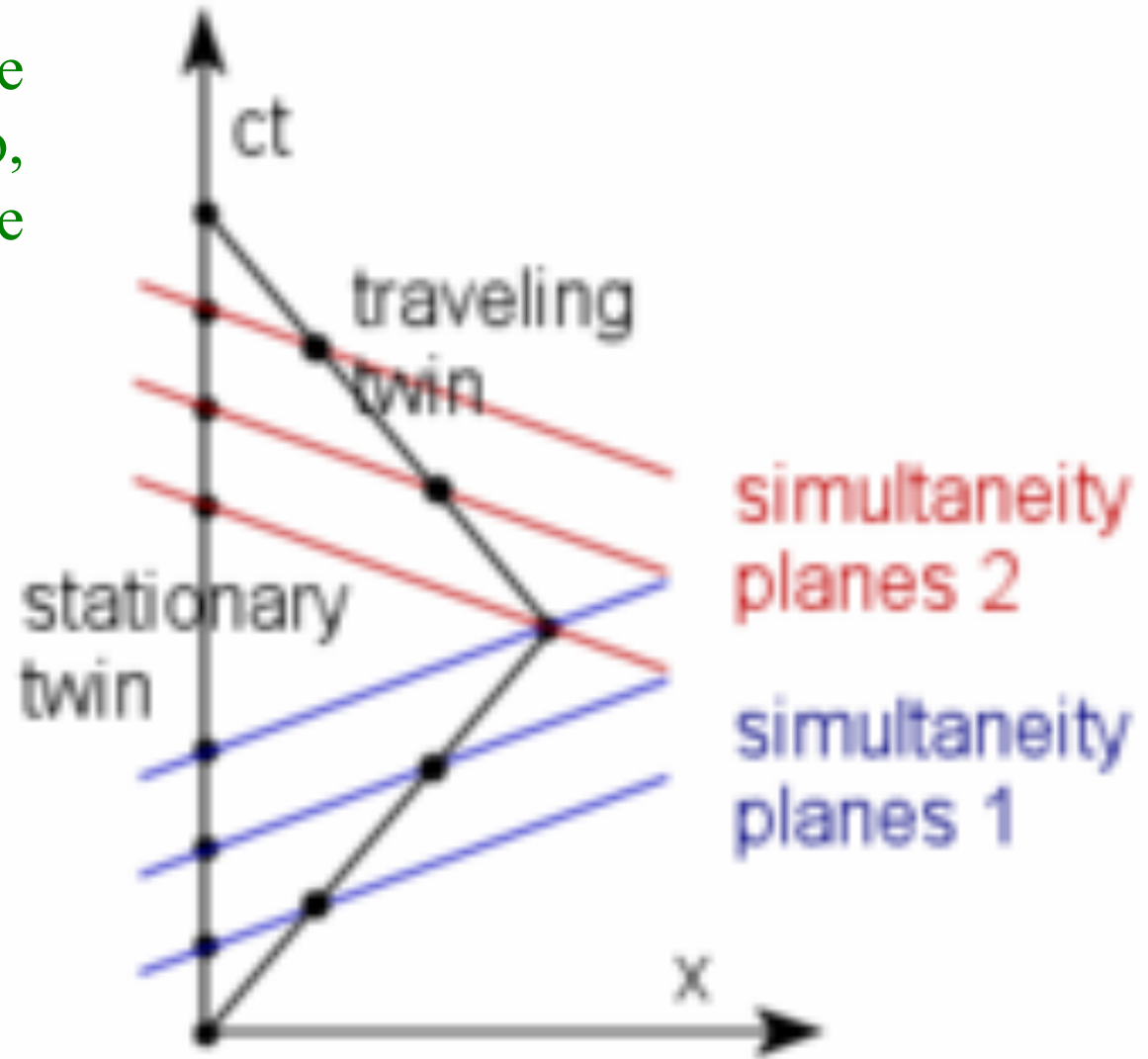
Um dos gémeos parte numa viagem espacial, durante a qual viaja com velocidade próxima de c , enquanto a irmã permanece na Terra. No regresso descobrirá que a sua irmã envelheceu mais do que ele próprio!

O paradoxo surge porque pode-se argumentar que a irmã está deslocando-se com velocidade próxima de c , relativamente ao irmão, e portanto deveria ser o irmão a ficar mais velho.



A viagem do irmão

Quando o irmão viajante inverte o seu movimento, altera o seu plano de simultaneidade!



Transformações de Velocidades

$$\tau \equiv ct$$

$$v_x = dx / dt = c dx / d\tau$$

$$v'_x = dx' / dt' = c dx' / d\tau'$$

$$v_x = c \frac{\gamma(dx' + \beta d\tau')}{\gamma(d\tau' + \beta dx')} = \frac{v'_x + V}{1 + V v'_x / c^2}$$

$$v_y = c \frac{dy'}{\gamma(d\tau' + \beta dx')} = \frac{v'_y}{\gamma(1 + V v'_x / c^2)}$$

$$v_z = c \frac{dz'}{\gamma(d\tau' + \beta dx')} = \frac{v'_z}{\gamma(1 + V v'_x / c^2)}$$

$$\beta = V / c \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$x = \gamma (x' + \beta \tau')$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$\tau = \gamma (\tau' + \beta x')$$

$$v'_x = c \rightarrow v_x = c !!!$$

$$V \cong 0 \rightarrow v = v' + V !!!$$

Energia e Momento linear (quantidade de mov.)

$$E = mc^2 + c^2 p^2$$

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v} = \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p_x' = \gamma \left(p_x - \beta \frac{E}{c} \right) \\ p_y' = p_y \\ p_z' = p_z \\ \frac{E'}{c} = \gamma \left(\frac{E}{c} - \beta p_x \right) \end{array} \right.$$

$$m^2 c^2 = \frac{E^2}{c^2} - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2$$

➔ **MASSA INVARIANTE!**

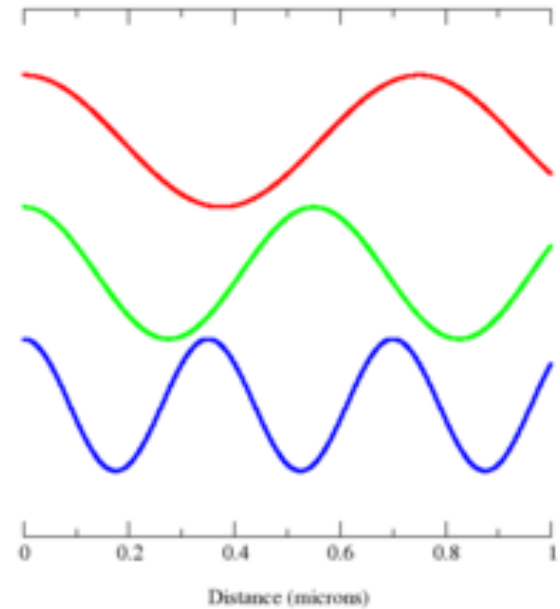
O Fóton – γ

$$m_{\gamma} = 0$$

$$E_{\gamma} = p_{\gamma} c$$

$$E_{\gamma} = h f = h c / \lambda$$

$$p_{\gamma} = E_{\gamma} / c = h / \lambda$$



Outras partículas de massa nula:

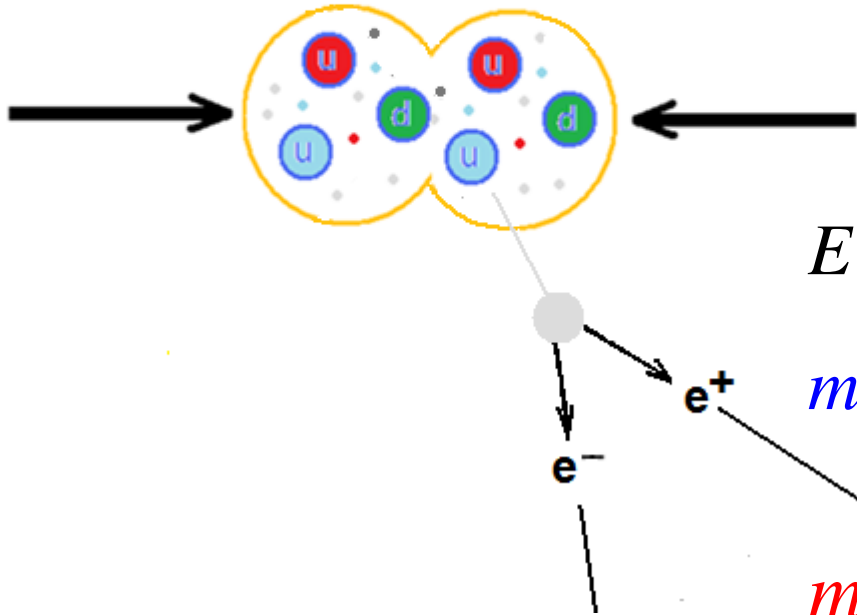
$$m = 0 \Rightarrow E = p c$$

(e não existem referenciais solidários com fótons, ou com outros objectos de massa nula)

Como se encontra uma nova partícula?

Espectro de massa de pares de partículas

- Eventos com duas partículas
- Pesquisa de partículas X que decaem nessas duas part.
Calcula-se $m(X)$ a partir da energia-momento das partíc.



$$E = mc^2 \Rightarrow E^2 = m^2 c^4 + c^2 p^2$$

$$m = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - c^2 (p_1 + p_2)^2} / c^2$$

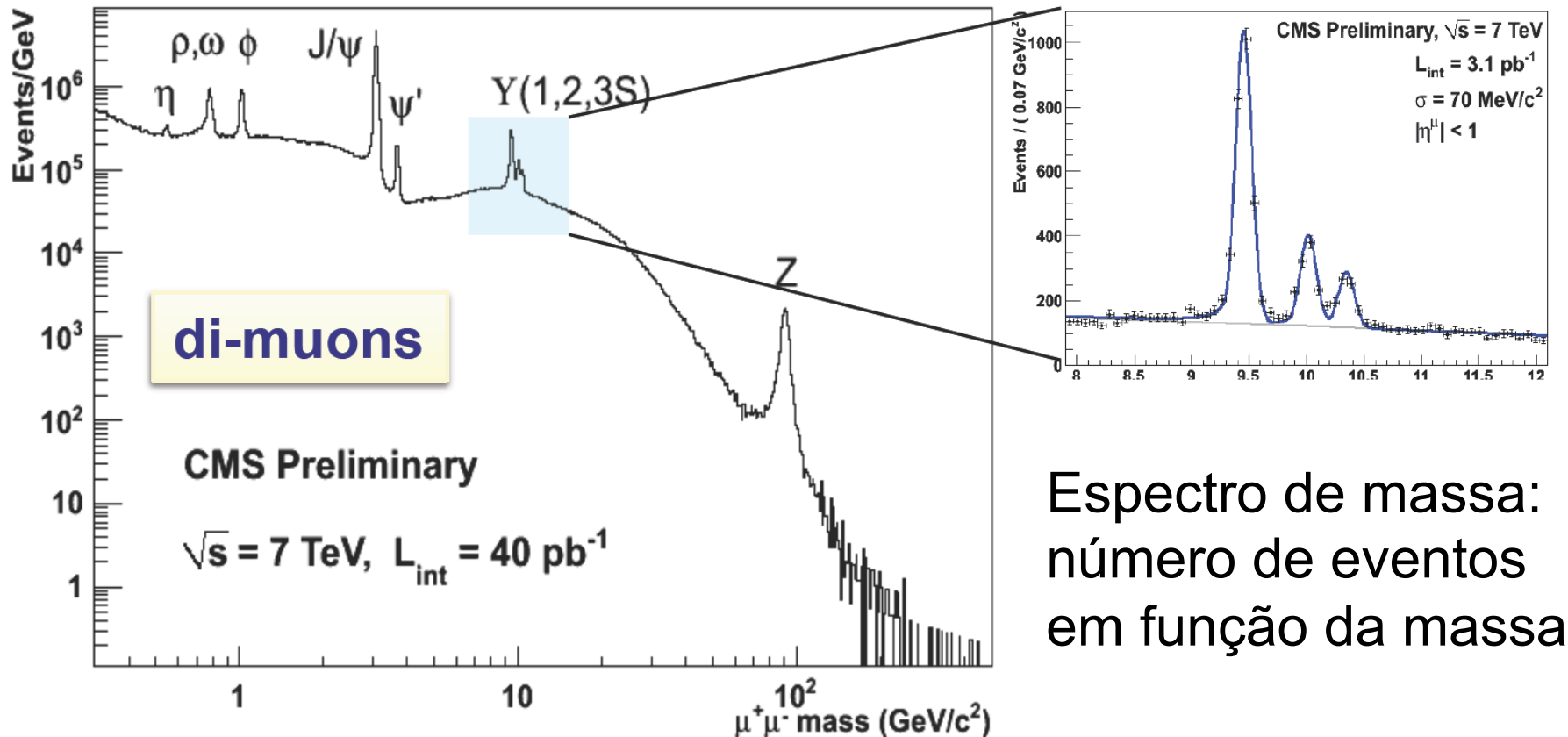
$$mc^2 \sim \sqrt{2E_1 E_2 (1 - \cos A_{12})}$$

Exemplo:

Espectro de massa de pares de muões



- Eventos com dois muões
- Pesquisa de partículas X que decaem em dois muões:
...e faz-se uma distribuição dos valores de $m(X)$

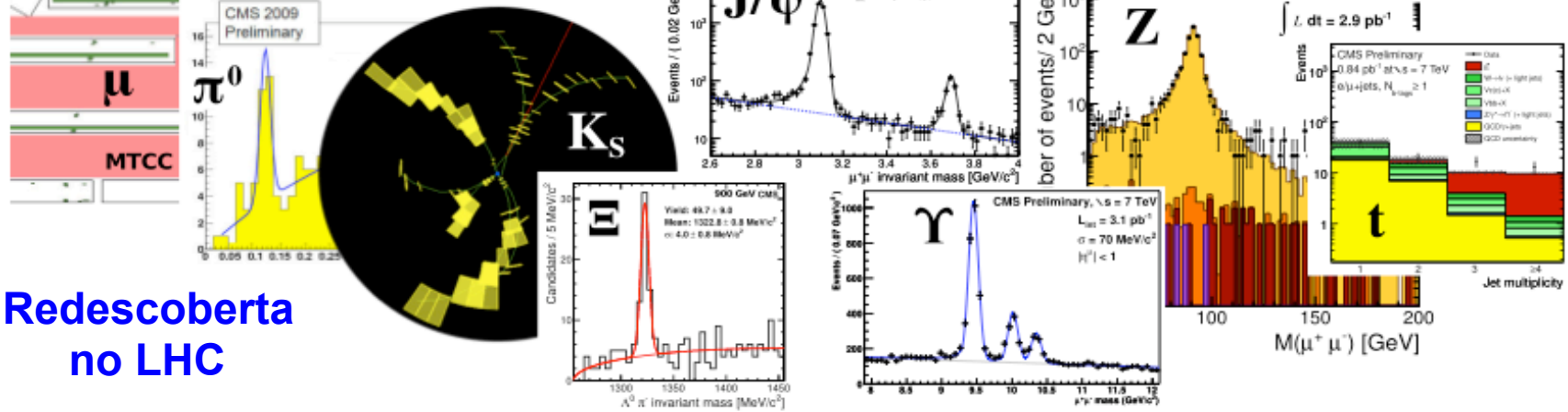
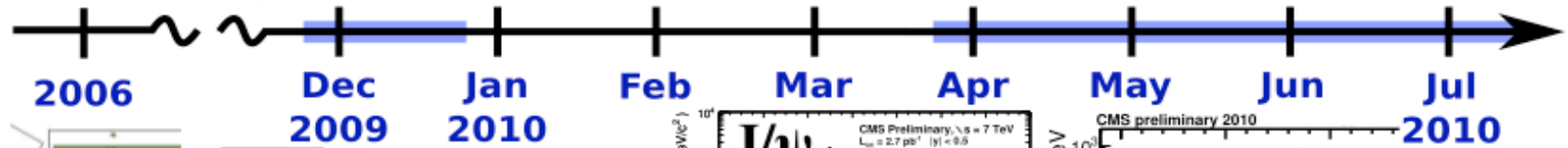
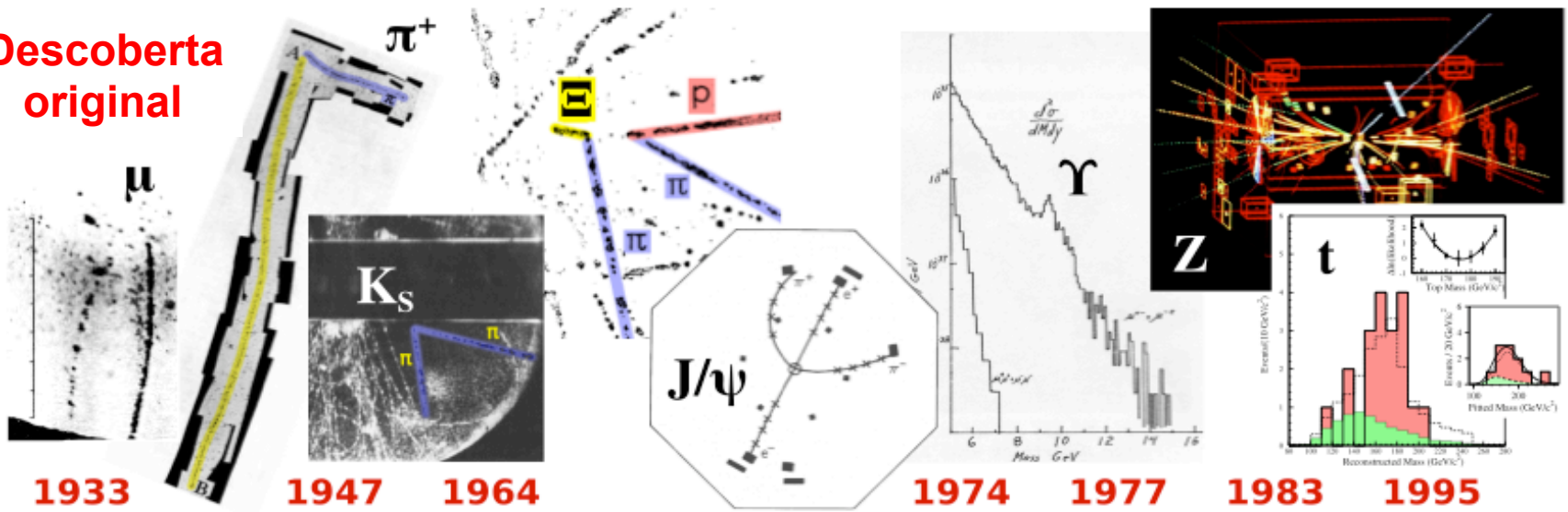


Espectro de massa:
número de eventos
em função da massa

LHC 2010-11: Redescoberta do modelo padrão



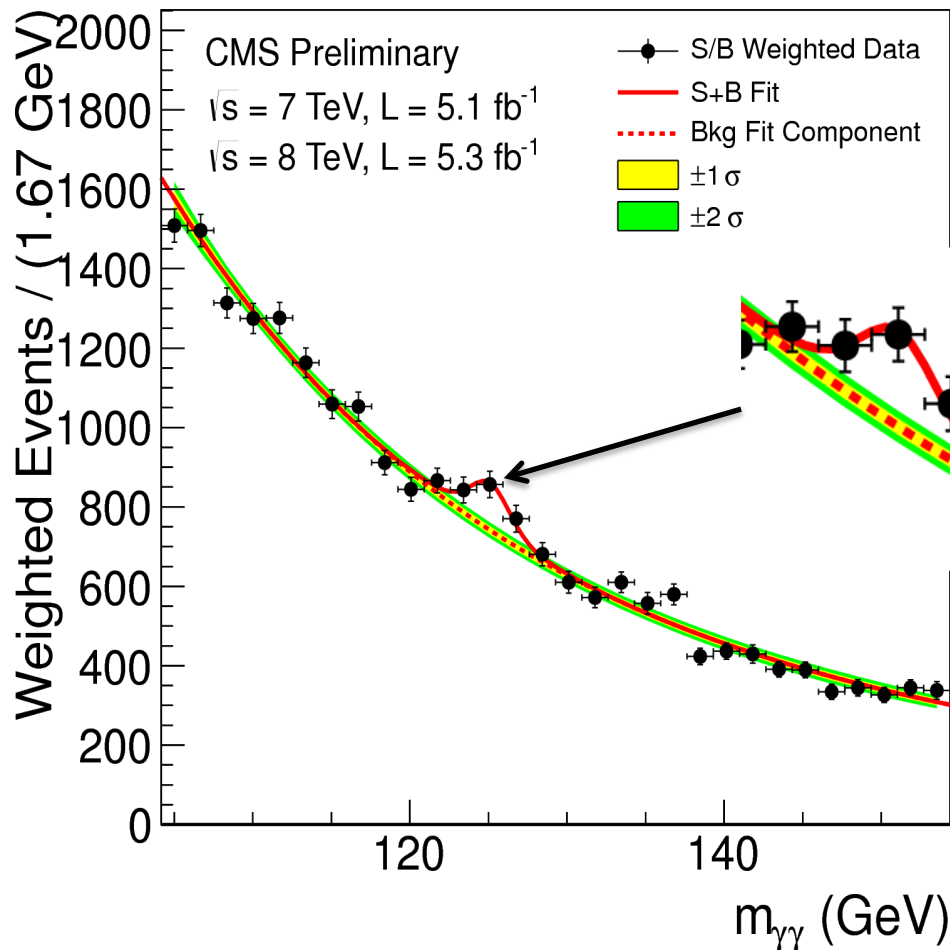
Descoberta original



Redescoberta no LHC

Distribuição de massa dos 2 fótons, $m(\gamma\gamma)$

Soma das distribuições de cada classe de acontec., ponderada por S/B

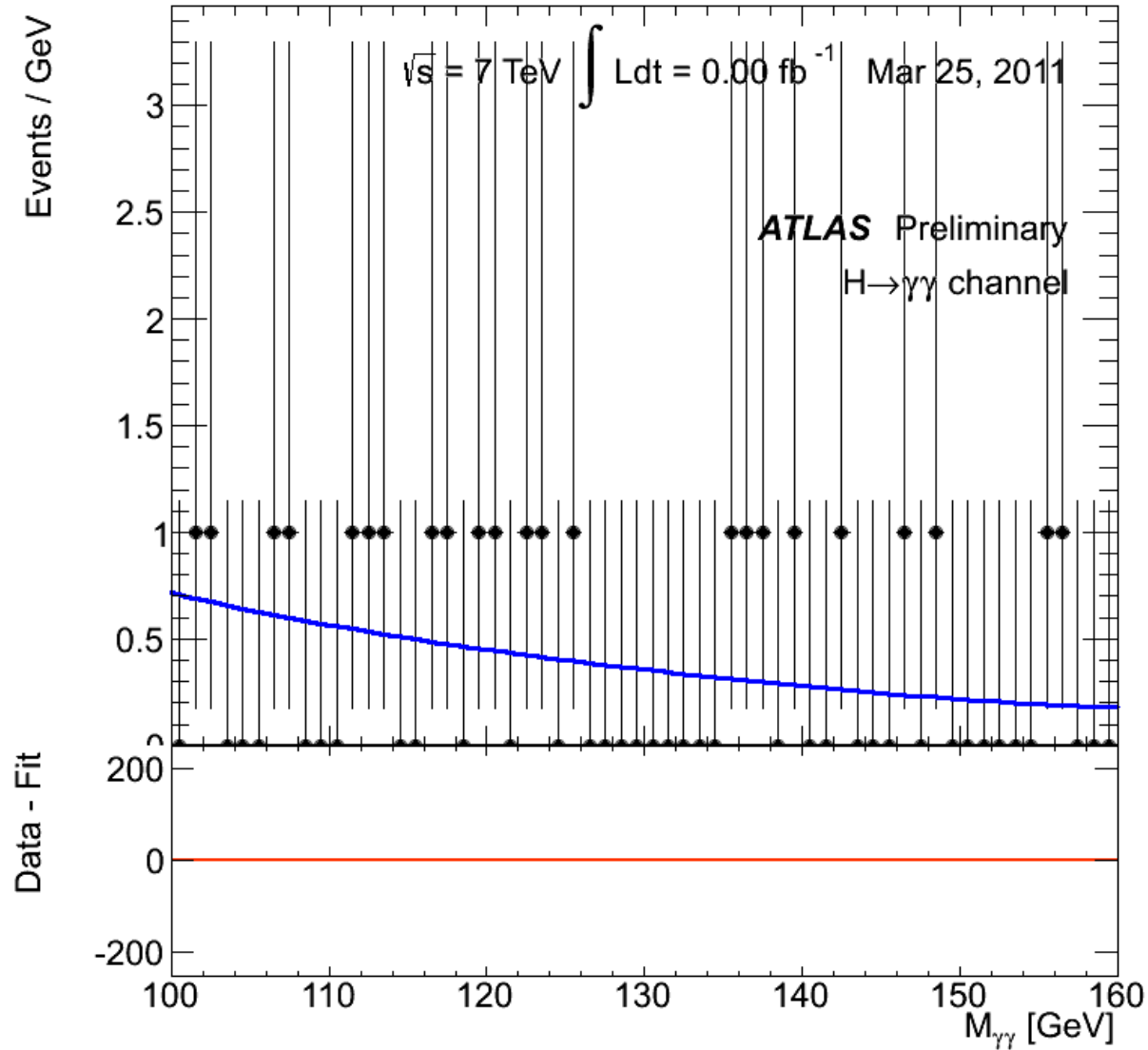


Na distribuição de massa $\gamma\gamma$ há um excesso de acontecimentos sobre o fundo, para massas $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$.

A observação do estado final em 2 fótons implica que a **nova partícula é um bóson**, não um fermião, e que **não pode ser uma partícula de "spin 1"**.

Não há outra partícula fundamental com estas propriedades!

Resultados ATLAS para $H \rightarrow \gamma\gamma$:



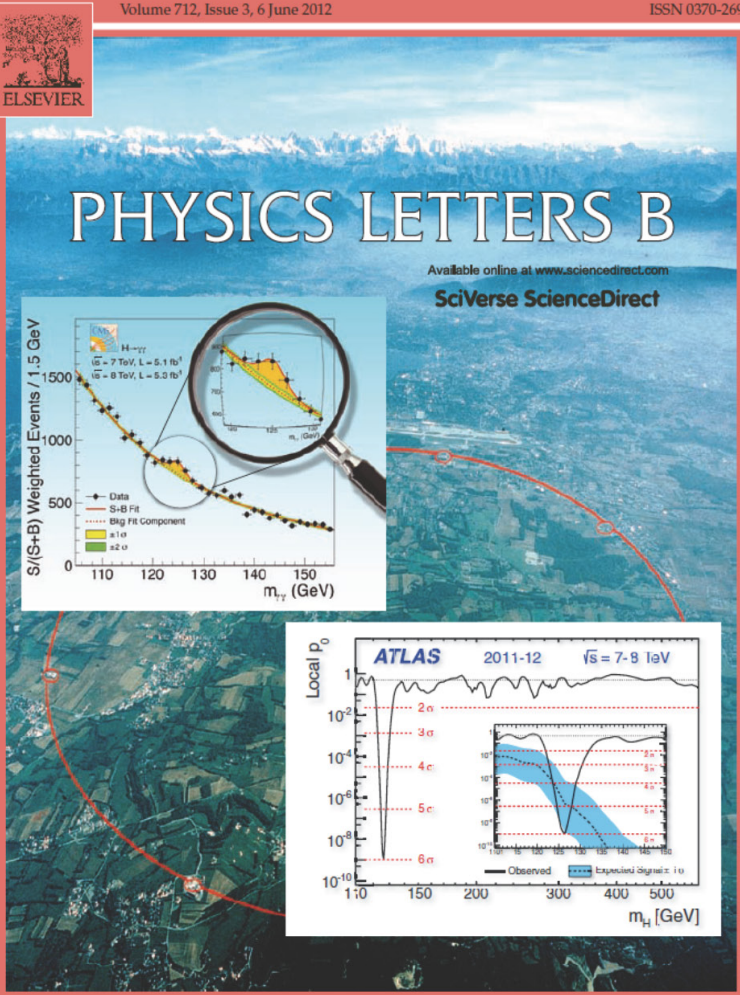
A Descoberta do bóson de Higgs

Volume 712, Issue 3, 6 June 2012 ISSN 0370-2693

ELSEVIER

PHYSICS LETTERS B

Available online at www.sciencedirect.com
SciVerse ScienceDirect



The cover features two main plots. The top plot shows the signal-to-background ratio $S/(S+B)$ Weighted Events / 1.5 GeV versus the Higgs boson mass m_{H^0} (GeV). It includes data points, a fit line, and a magnified view of the peak around 125 GeV. The bottom plot shows the ATLAS Local p_0 versus m_{H^0} [GeV] for the 2011-12 run at $\sqrt{s} = 7-8$ TeV. It displays the observed data and the expected signal for a 1σ discovery, with significance levels from 2σ to 6σ indicated by horizontal dashed lines.

<http://www.elsevier.com/locate/physletb>

The Economist

JULY 7TH - 13TH 2012 Economist.com

In praise of charter schools
Britain's banking scandal spreads
Volkswagen overtakes the rest
A power struggle at the Vatican
When Lonesome George met Nora

A giant leap for science



The cover image shows a man in a dark suit jumping over a vibrant, multi-colored nebula in space. He is holding papers, and several other papers are floating around him. The scene is set against a dark background with stars.

Finding the Higgs boson



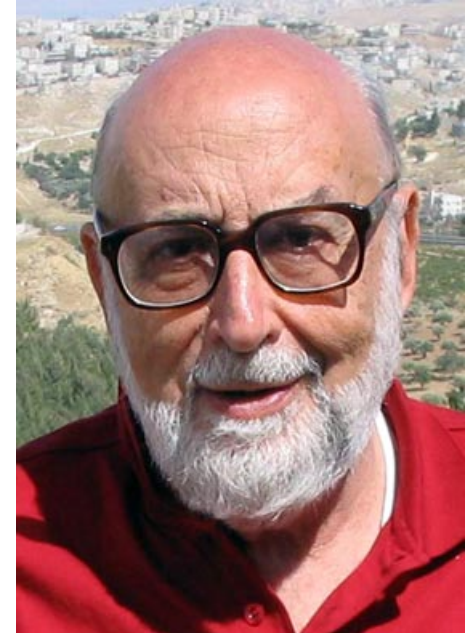
A Descoberta do bóson de Higgs... ...premiada com o Prémio Nobel 2013:



**Peter Higgs,
Inglês,
nascido em
1929,
Univ.
Edimburgo**



**François Englert,
Belga,
nascido em 1932,
U. Libre
de Bruxelles**



*"for the **theoretical discovery** of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the **discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider**"*