

- \* Criação de Albert Einstein (1879-1955) realizada em 1905 e constitui um dos dois grandes avanços de Física do século XX. (intro?)
- \* Considerada exotérica ela pode ser explicada com um mínimo de sofisticação matemática.
- \* A TR não pode mais ser considerada uma conjectura, pois até as previsões mais bizarras foram verificadas experimentalmente.
- \* A TR mostra que a Física Clássica dá resultados completamente errados quando aplicada a fenômenos de alta velocidade.
- \* Revê as mais óbvias pressuposições com relação à natureza do espaço e do tempo. Devem ser modificadas.
- \* Usos de TR (MQ, luz, aceleradores, etc.)
- \* Mecânica Newtoniana (mundo macroscópico)  
baixas velocidades e corpos grandes
  - satélite artificial ao redor da Terra  
 $v \cong 8 \times 10^4 \text{ m/s}$   $\frac{v}{c} = 0,00027 = 2,7 \times 10^{-4}$
  - ondas sonoras  
 $v \cong 332 \text{ m/s} \Rightarrow \frac{v}{c} = 0,000001 = 1 \times 10^{-6}$
  - não há limite para a velocidade que uma partícula pode atingir (a velocidade de luz não desempenha nenhum papel especial)

\* Luz (maior velocidade)

\* Mundo microscópico : e<sup>-</sup> e' acelerado com uma ddp = 10 MeV

1 eV ≡ carga de 1 e<sup>-</sup> acelerada por uma tensão de 1 V

1 eV = 1,6 x 10<sup>-19</sup> J

m<sub>0</sub> = 9,11 x 10<sup>-31</sup> kg (massa de repouso)

ε<sub>0</sub> = 8,85 x 10<sup>-12</sup> F/m (permissividade elétrica do vácuo)

μ<sub>0</sub> = 1,26 x 10<sup>-6</sup> H/m (permeabilidade magnética do vácuo)

E<sub>1</sub> = 10 MeV = 1,6 x 10<sup>-19</sup> x 10 x 10<sup>6</sup> = 1,6 x 10<sup>-12</sup> J

E = m<sub>0</sub>c<sup>2</sup> + K = m<sub>0</sub>c<sup>2</sup> + m<sub>0</sub>c<sup>2</sup> [ (1 - u<sup>2</sup>/c<sup>2</sup>)<sup>-1/2</sup> - 1 ]  
E =  $\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$  u = cx ⇒ E =  $\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - x^2}}$  ⇒

1,6 x 10<sup>-12</sup> =  $\frac{9,11 \times 10^{-31} \times (3 \times 10^8)^2}{(1 - x_1^2)^{1/2}}$  ⇒ x<sub>1</sub> = 0,9987  
v<sub>1</sub> = 0,9987c

K<sub>1</sub> =  $\frac{1}{2} m_0 v_1^2$  >  $\frac{K_1}{K_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2$  ⇒ K<sub>2</sub> = 40 MeV ⇒ ~~v<sub>2</sub> = 1,99874c~~  
K<sub>2</sub> =  $\frac{1}{2} m_0 v_2^2$  ??

v<sub>2</sub> =  $\frac{40 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19}}{(1 - x_2^2)^{1/2}}$  ⇒ v<sub>2</sub> = 0,9999c

Teoria da Relatividade Especial (1905)

Tema de R. Restrita  
(Einstein, 1905)

Sistemas de referência inerciais

$\frac{u}{c} = 0 \Rightarrow \frac{u}{c} = 1$  (cte)

Tema de R. Geral

Sistemas de referência não inerciais

Mecânica Newtoniana é um caso especial de T.R  
(tempo como grandeza absoluta!)

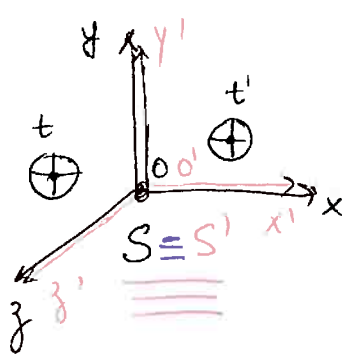
\* Descrições de um movimento ou evento físico

- Evento: Algo que acontece independentemente do sistema de referência  
exemplo: raio de luz / lâmpada acesa / colisões de 2 partículas

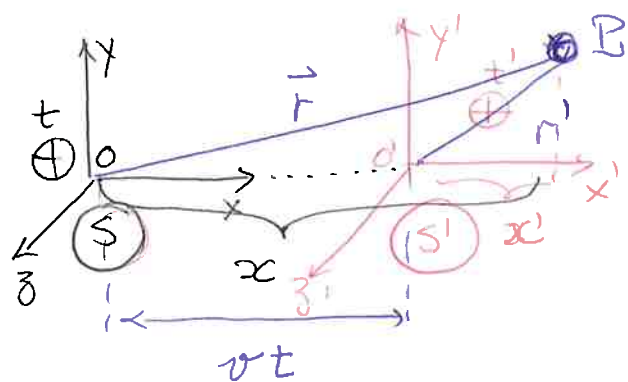
descrições do evento } posições (coordenadas) e tempo (t)

$(x, y, z, t) \Rightarrow$  escolha de um referencial para ter coordenadas diferentes em  $\neq$ s referenciais, mas as leis da Física são as mesmas.

\* Sistemas de referência



S' se movimenta com velocidade  $\vec{v} = v\hat{i} = v\hat{x}$



$$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$$

$$\vec{r}' = x'\hat{i}' + y'\hat{j}' + z'\hat{k}'$$

$$\vec{OO}' = vt\hat{i}$$

Hipótese da Mecânica Clássica  
Medidas de Tempo são absolutas

$$x' = x - vt$$

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{d(x - vt)}{dt} = \frac{dx}{dt} - v$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{u' = u - v}$$

Generalizando para 3 dimensões

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{OO}' = \vec{r} - \vec{v}t \Rightarrow \frac{d\vec{r}'}{dt'} = \frac{d\vec{r}}{dt} - \vec{v} \Rightarrow$$

$$\boxed{|\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}|}$$

Se  $\vec{v}$  e' constante  $\Rightarrow \vec{a}' = \frac{d\vec{u}'}{dt'} = \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{a}$

$$\vec{F}' = m\vec{a}' = m\vec{a} = \vec{F}$$

\* Forças da natureza } gravitacional elétrica =>

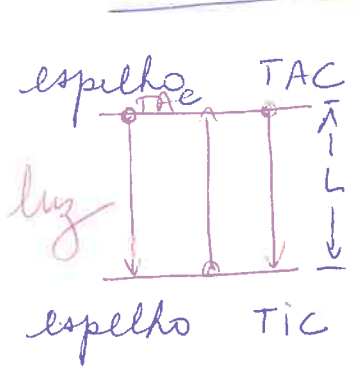
dependem de distância (mútuas entre os corpos)

F = ma ≡ FG ≡ invariante

(distância relativa não muda)

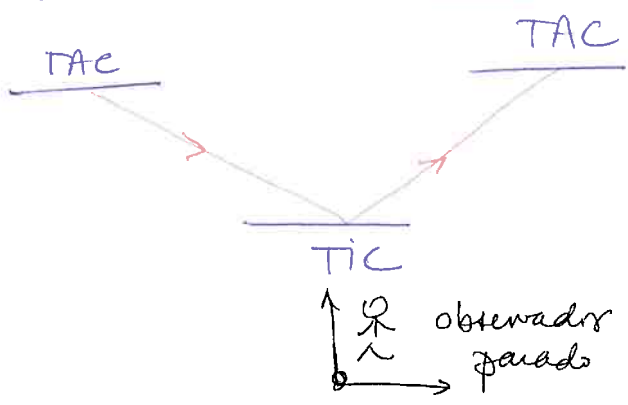
As leis de Newton são invariantes frente à transformações de Galileu.

\* Como ficaria a medida da velocidade da luz num sistema em movimento?



TAC TIC TAC => períodos  
Δts = 2L / c

Vamos colocar este relógio em movimento para a direita com velocidade v:



Observador parado

$\vec{c}_{medida} = \vec{c} + \vec{v}$

$\vec{c}_{medida} - \vec{v} = \vec{c}$

$\vec{u} = \vec{v} = \vec{u}'$

$c_{medida} = \sqrt{c^2 + v^2}$

$c_{medida} > c$   
!!!

Não havia resultados experimentais que verificassem esta relação.

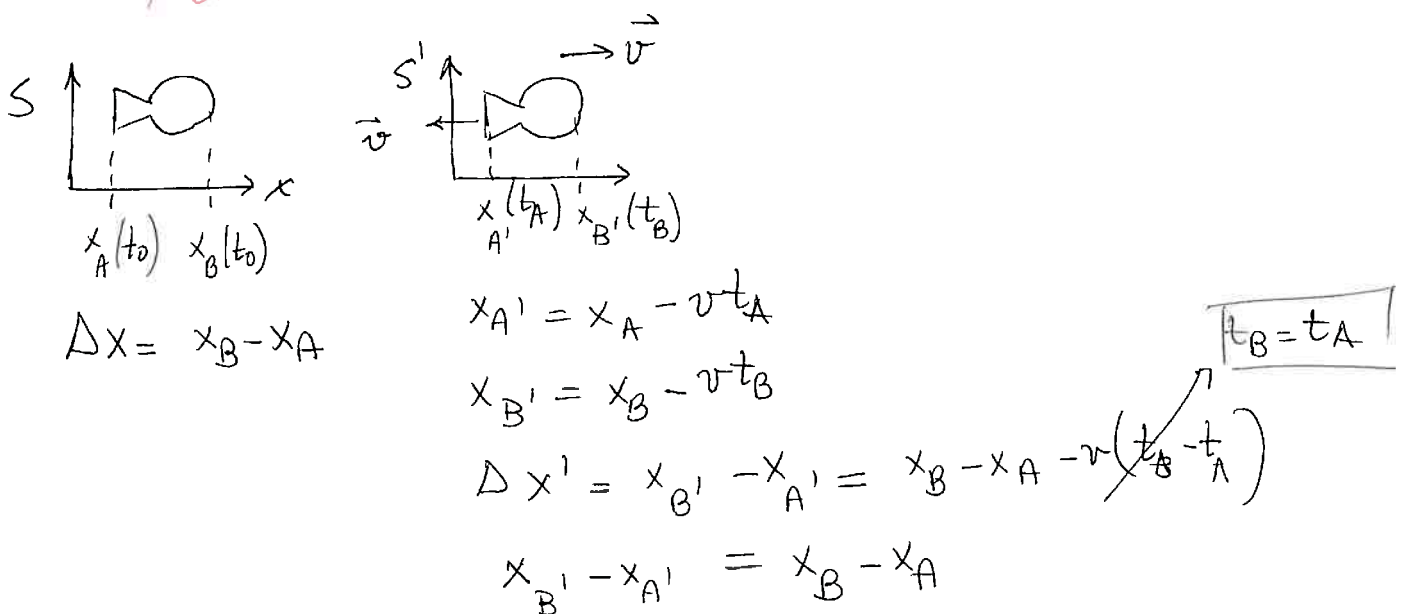
\* Até agora vimos que diferentes observadores podem medir diferentes posições, diferentes velocidades, mas as transformações dos sistemas de referência não alteram as leis da Física.

Força - Conservação de momento, Conservação de energia.

\* Medidas do intervalo de tempo e comprimentos são (5)  
absolutas  $\Rightarrow$  quantidades inalteradas  $\Rightarrow$  invariantes da transformação

\* Se as leis da Física ficam inalteradas  $\Rightarrow$  nenhum sistema inercial é preferido sobre qualquer outro, pois as leis da Mecânica são iguais em todos eles.

\* Desta forma, se um sistema está em movimento relativo com relação a um outro sistema de referência, não conseguimos, a partir de um experimento que se move em relação a quem se este experimento ficar confinado a um sistema único  $\Rightarrow$  Só podemos determinar velocidades relativas e não a velocidade absoluta  $\Rightarrow$  Relatividade Newtoniana.



Medidas de intervalo de tempo e espaço são absolutas nos referenciais inerciais (Galileu)

\* Maxwell (1860)  $\rightarrow$  Leis do Eletromagnetismo

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \text{ no vácuo}$$

Se a velocidade da luz no vácuo era  $c$  (invariante)

deveria haver um sistema inercial preferencial

no qual se pudesse medir a velocidade da luz

como sendo exatamente  $c$

} Em um sistema  $S'$   
se movendo com  $v = cte$   
um observador mediria  
 $c-v$  a  $c+v$ , dependendo

\* O que há de errado nisso? da direção do movimento.

A velocidade  $c$  da luz não é um invariante?

\* O fato de que o princípio da relatividade galileiano é aplicável às Leis de Newton da Mecânica, mas não às Leis de Maxwell do Eletromagnetismo sugere as seguintes alternativas:

- 1) Leis de Mecânica corretas
- Leis de Maxwell corretas
- Transformações de Galileu corretas

} Localizar experimentalmente o sistema do éter (sistema absoluto)

- 2) Leis de Mecânica corretas
- Transformações de Galileu corretas
- Leis de Maxwell incorretas

} Reformular as Leis do Eletromagnetismo para que as transformações de Galileu fossem aplicáveis

- 3) Leis de Mecânica incorretas
- Leis de Maxwell corretas

} Leis de Transformações de Galileu  
não seriam as de Galileu

Reformular a Mecânica Newtoniana

## \* Tentativas para localizar o sistema absoluto (éter) (7)

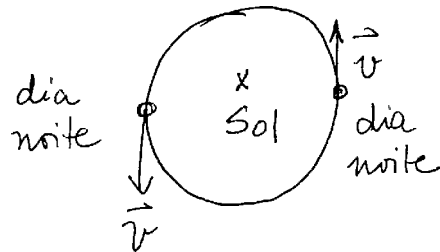
- Mediu a velocidade da luz em uma variedade de sistemas inerciais procurando evidências do éter  
(velocidade da luz =  $c$ )

→ A experiência de Michelson - Morley

Terra em rotação e translação ao redor do sol

$$\vec{c}' = \vec{c} + \vec{v} \quad \left. \begin{array}{l} \text{dia e noite} \\ \text{diferentes estações do ano} \\ \text{(éter fixo em relação ao Sol)} \end{array} \right\}$$

$$\frac{v^2}{c^2} \approx 10^{-8}$$



→ Tentativa de explicar a experiência de M.M. retendo ainda o conceito de um sistema de éter preferencial  
(Fitzgerald, 1892 e Lorentz)

→ Os corpos são contraídos na direção do movimento relativo ao éter estacionário (fator  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ )

→ Teoria eletrônica sofisticada e artificial. Os resultados previstos por ela nos foram encontrados experimentalmente

Na experiência de M.M.  $l_1 = l_2 = l \Rightarrow l_1 \neq l_2$

deveria haver deslocamento das franjas de interferência, mas não foi observado.

→ hipótese de arrastamento do éter  $\Rightarrow$  contradiz resultados experimentais.

## \* Tentativas para modificar a eletrodinâmica

8

Velocidade da luz dependente da velocidade da fonte  $\Rightarrow$  teorias de emissão  $\Rightarrow$  nos havia evidências experimentais  $(c + kv_s)$   $h \sim 2 \times 10^{-3}$

Conclusão: Hipótese de  $etv$  é insustentável

Leis da Eletrodinâmica estão corretas.

A velocidade da luz é a mesma em todos os sistemas inerciais independentemente do movimento da fonte e do observador.

\* A propagação das ondas eletromagnéticas difere totalmente de todos os outros tipos de ondas.

\* O postulado básico de teoria da relatividade, com relação à constância da velocidade da luz, é um fato da natureza.

\* Princípio da Relatividade é aplicável à Mecânica e ao Eletromagnetismo  $\Rightarrow$  transformações galileanas devem ser substituídas e, as leis da Mecânica consistentes com estas transformações precisam ser modificadas



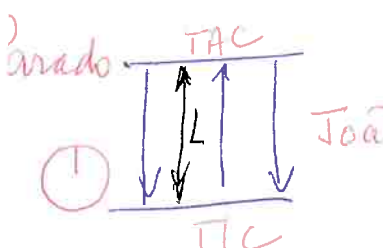
# x Postulados da Teoria da Relatividade Especial

- 1) As leis da Física são as mesmas em todos os sistemas inerciais. Não existe nenhum sistema inercial preferencial. (Princípio da Relatividade)
- 2) A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor  $c$  em todos os sistemas inerciais.

⇒ Objetivo: Obter as equações de transformação entre dois sistemas inerciais, movendo-se uniformemente, os quais conservam a velocidade da luz constante.

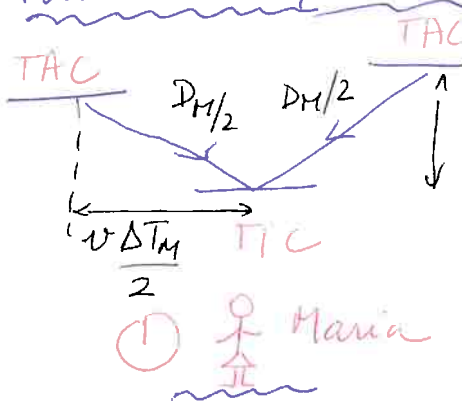
## Transformações de Lorentz

↳ Voltamos ao experimento do relógio de luz com espelhos:



Mec. Cláss.	$\Delta T_J = \frac{2L}{c}$	} <u>Conceito de tempo próprio</u> tempo medido em um <u>relógio em repouso</u>
Teo. Rel.	$\Delta t_J = \frac{2L}{c}$	

\* João começa a se movimentar p/ a direita com velocidade  $v$



Mec. Cláss.  $D_M = 2 \sqrt{L^2 + \left(\frac{v \Delta T_M}{2}\right)^2}$  (1)

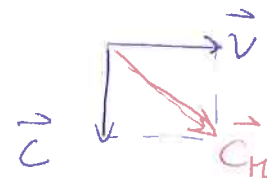
MC

$\Delta T_M = \frac{D_M}{c_M}$  (2)

$c_M \equiv$  velocidade do raio de luz em relação a Maria

$\Delta T_M \equiv$  tempo entre 2 TACs

$c_M = \sqrt{c^2 + v^2}$



∴ De (1) e (2)

$$D_M = c \Delta T_M = \sqrt{c^2 + v^2} \Delta T_M = 2 \sqrt{L^2 + \left(\frac{v \Delta T_M}{2}\right)^2} \text{ (quadrado)}$$

$$(c^2 + v^2) \Delta T_M^2 = 4 \left[ L^2 + \left(\frac{v \Delta T_M}{2}\right)^2 \right]$$

$$c^2 \Delta T_M^2 + v^2 \Delta T_M^2 = 4L^2 + v^2 \Delta T_M^2$$

$$\boxed{\Delta T_M = \frac{2L}{c}} \rightarrow \boxed{\Delta T_J = \frac{2L}{c}}$$

o tempo é absoluto

TR

Teo. Rel.

Para Maria a distância percorrida pela luz entre

2 TACs  $d_m$  é dada por

$$d_m = 2 \sqrt{L^2 + \left(\frac{v \Delta t_m}{2}\right)^2} \quad (3)$$

$$\Delta t_m = \frac{d_m}{c} \quad (4)$$

$$d_J = 2L$$

$$\Delta t_J = \frac{2L}{c}$$

↑  
tempo próprio  
relojão de Jozé  
em repouso

De (3) e (4)

$$d_m = c \Delta t_m = 2 \sqrt{L^2 + \left(\frac{v \Delta t_m}{2}\right)^2}$$

$$c^2 \Delta t_m^2 = 4 \left[ L^2 + \frac{v^2 \Delta t_m^2}{4} \right]$$

$$c^2 \Delta t_m^2 = 4L^2 + v^2 \Delta t_m^2$$

$$(c^2 - v^2) \Delta t_m^2 = 4L^2 \Rightarrow \Delta t_m = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2L}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t_m \neq \Delta t_J$$

o tempo na  $\delta$  é mais absoluto.

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_J}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Como  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \leq 1 \Rightarrow \Delta t_m \geq \Delta t_J$

(Maria encerra o tempo de Jozé dilatado)

Análogo

$$\Delta t_J = \gamma \Delta t_M$$

\* Qualquer observador em relação ao qual o relógio de Joas está em movimento medirá um intervalo de tempo entre 2 TACs sucessivos do relógio de Joas que será sempre maior que  $\Delta t_J$ . Quem carrega o relógio medirá sempre o menor intervalo de tempo possível.

Simetria :  $\Delta t_M = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Delta t_J$

Exemplo :  $v = \frac{\sqrt{3}}{2} c \Rightarrow \frac{v}{c} = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow \frac{v^2}{c^2} = \frac{3}{4}$

$$\Delta t_M = \frac{\Delta t_J}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t_J}{\sqrt{1 - \frac{3}{4}}} = 2 \Delta t_J$$

Maria usará seu relógio : TIC TAC TIC TAC TIC TAC  
 E o de Joas : TIC TAC TIC

O tempo de Joas aparece dilatado para Maria

Notação :  $T_0 \equiv$  tempo próprio (medido em um relógio em repouso  $\Rightarrow$  Joas)

$T \equiv$  medido num referencial em movimento relativo com velocidade  $v$  em relação ao local em que os eventos ocorreram.

$$\beta = \frac{v}{c} \Rightarrow T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma T_0 \Rightarrow \boxed{T = \gamma T_0} \text{ e } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \Rightarrow \boxed{\Delta t_M = \gamma \Delta t_J}$$

Exemplos

$$\frac{v}{c} = 0,01 \Rightarrow \underline{T = 1,005 T_0} ; \frac{v}{c} = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow \underline{T = 2 T_0} ; \frac{v}{c} = 0,98 \Rightarrow \underline{T = 5 T_0}$$

E o espaço?