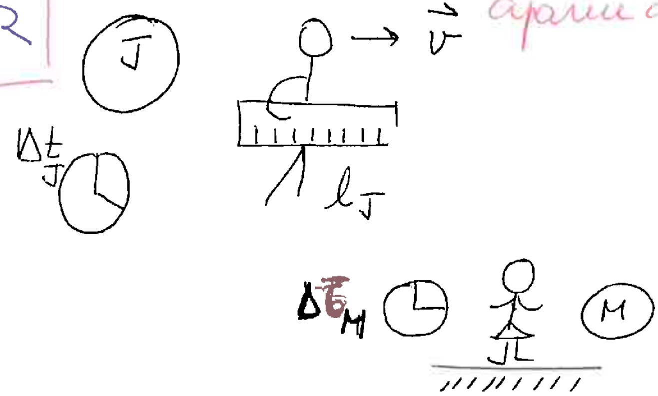
* O que ocorre com o espaço? 6ª AULA ①

* Vimos que o tempo de João aparece dilatado para Maria

TR



A velocidade de João vista por Maria é

$$v_M = \frac{l_M}{\Delta t_M}$$

onde l_M é o comprimento da régua de João vista por Maria

João aproveita e mede a velocidade de Maria:

$$v_J = \frac{l_J}{\Delta t_J} \quad \text{(ponto de vista do João)}$$

$$\Delta t_J = \gamma \Delta t_M \quad (\gamma > 1)$$ NÃO!!

(João enxerga o tempo de Maria comprimido)

Mas $v_J = v_M \Rightarrow \frac{l_M}{\cancel{\Delta t_M}} = \frac{l_J}{\Delta t_J} = \frac{l_J}{\gamma \cancel{\Delta t_M}} \Rightarrow l_M = \frac{l_J}{\gamma}$

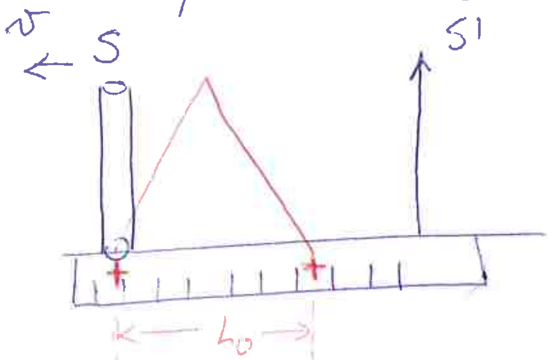
$$\boxed{L = \frac{L_0}{\gamma}}$$

$$L = \underbrace{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}_{\leq 1} L_0 \Rightarrow \boxed{L < L_0}$$

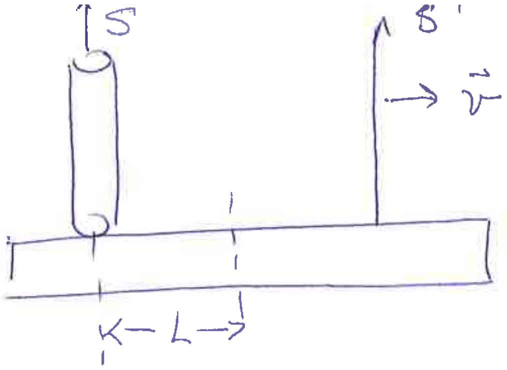
O comprimento da régua de João aparece contraído para Maria

contração do espaço

<u>Outra forma</u>: Um tubo está em repouso no referencial S e um pulso de luz percorre o tubo para cima e para baixo



O observador em S' verá o tubo e o observador em S movendo-se para a esquerda com velocidade v.
O pulso de luz produz marcas na régua ligada no referencial S', quando parte e quando chega de volta à base do tubo. A distância é L_0 e o intervalo de tempo transcorrido é T, ambos em relação a S'. $\Rightarrow \boxed{v = \frac{L_0}{T}}$



* Considere a distância entre as 2 marcas da régua de S', mas agora medidas por S.
O observador em S vê S' e sua régua em movimento para a direita com velocidade v

* A distância entre as duas marcas na régua em movimento, medida pelo observador S é L.
* O observador S quando está medindo o comprimento de um objeto em movimento, com sua própria régua, deve ter certeza de anotar a posição das 2 marcas simultaneamente
* O referencial S' se move para a direita com velocidade V, percorrendo uma distância L no intervalo de tempo T_0

$$\boxed{V = \frac{L}{T_0}}$$

S mede com sua própria régua as marcas deixadas na régua de S'
O referencial S' percorre uma distância L no intervalo de tempo T_0.

Eliminando v das duas equações

$$\frac{L_0}{T} = \frac{L}{T_0} \Rightarrow L = L_0 \frac{T_0}{T}$$

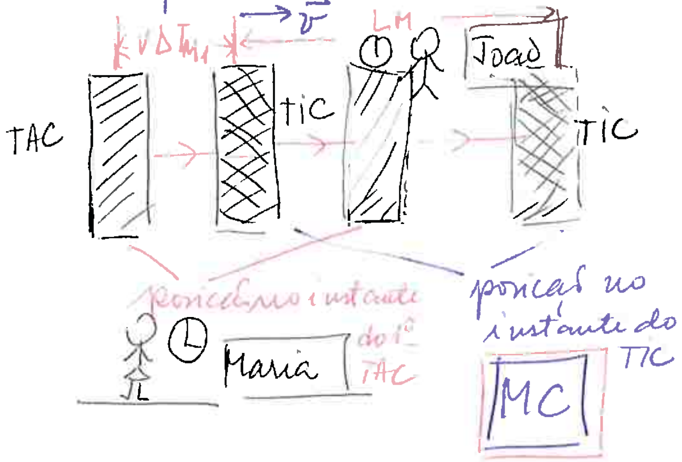
Como $\boxed{T = \gamma T_0} \Rightarrow L = L_0 \frac{\cancel{T_0}}{\cancel{T_0}\,\gamma} \Rightarrow \boxed{L = \frac{L_0}{\gamma}}$

$$L = L_0 \underbrace{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}_{< 1} \quad \text{(contração do espaço)}$$

comprimento próprio

Conceito de Simultaneidade

Espelho Vertical



João carrega um relógio de espelhos verticais e passa por Maria com velocidade v para a direita
- Qual é, para ela, o intervalo de tempo entre 2 TACS sucessivos do relógio de João?

Dividir o intervalo ΔT_M entre 2 TACs em duas partes:
- o intervalo entre o 1º TAC e o TIC $\Rightarrow \Delta T_{M_1}$
- o intervalo entre o TIC e o 2º TAC $\Rightarrow \Delta T_{M_2}$

MC

* Cálculo de ΔT_{M_1}

A luz tem que percorrer uma distância maior que L, já que enquanto ela anda o espelho da direita também o faz, "fugindo do pulso luminoso". Além disso, na $\boxed{MC}$, a velocidade da luz em relação a Maria será $c_{M_1} = c + v$

$$\Delta T_{M_1} = \frac{L_M + v\Delta T_{M_1}}{(c+v)} \Rightarrow (c+v)\Delta T_{M_1} = L_M + v\Delta T_{M_1} \Rightarrow$$

$$\Delta T_{M_1} = \frac{L_M}{c}$$

* Cálculo de ΔT_{M_2}

Entre o TIC e o segundo TAC, o relógio vai de encontro à luz e em relação a Maria, a velocidade da luz seria $c_{M_2} = c - v$, temos portanto

$$\Delta T_{M_2} = \frac{L_M - v\Delta T_{M_2}}{(c-v)} \Rightarrow \Delta T_{M_2} = \frac{L_M}{c}$$

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

Também $L_M = L$

tempo absoluto

$\Delta T_M = \frac{2L_M}{c} = \Delta T_J$ (para o João ambos estão errados!)

TR $\Delta t_{M_1} = \dfrac{l_m + v\,\Delta t_{M_1}}{c} \Rightarrow \Delta t_{M_1} = \dfrac{l_m}{c-v}$

$\Delta t_{M_2} = \dfrac{l_m - v\,\Delta t_{M_2}}{c} \Rightarrow \Delta t_{M_2} = \dfrac{l_m}{c+v}$

$$\Delta t_M = \Delta t_{M_1} + \Delta t_{M_2} = \frac{2\,l_m}{c\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

Mas $\Delta t_M = \dfrac{\Delta \tau_J}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \dfrac{2L}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ (dilatação do tempo)

Igualando $\Rightarrow \dfrac{\cancel{2}\,l_m}{\cancel{c}\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)} = \dfrac{\cancel{2}\,L}{\cancel{c}\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

$$\boxed{l_m = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\;L}$$

Mostra que o espaço entre os espelhos contrai-se para o observador que vê o relógio em movimento.

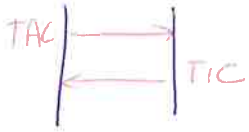
A distância entre 2 espelhos vista por Maria é menor do que a distância própria L vista por João.

* A noção clássica de simultaneidade entre eventos é também alterada na **TR**, onde ela passa a ser algo que depende do observador.

Vamos comparar os relógios de espelhos verticais e horizontais.

João

TAC TIC TAC TIC



TAC TIC TAC TIC

Como Maria vê os dois relógios de João?

Espelhos Horizontais $\Delta t_{M}^{\substack{TAC\\TIC}} = \Delta t_{M}^{\substack{TIC\\TAC}} = \dfrac{L}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

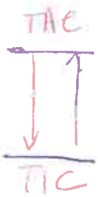
Relógios

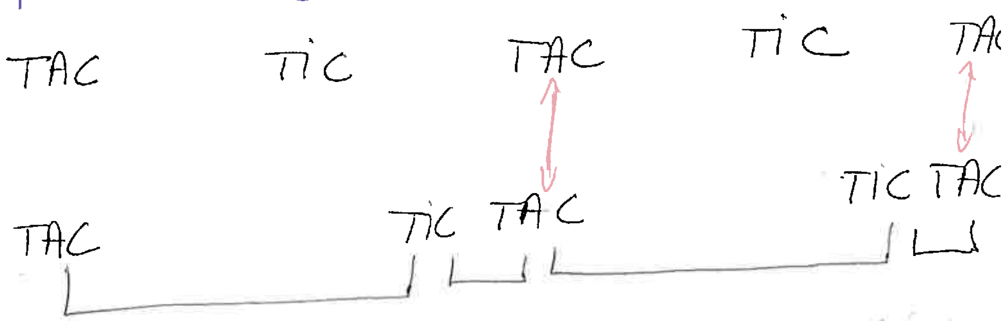
Espelhos Verticais $\Delta t_{M_1}^{\substack{TAC\\TIC}} = \dfrac{l_M}{c-v}$ e $\Delta t_{M_2}^{\substack{TIC\\TAC}} = \dfrac{l_M}{c+v}$

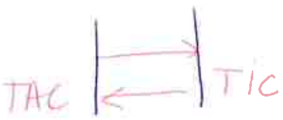
$$\Delta t_{M_1} = \frac{L\sqrt{1-v^2/c^2}}{c-v} \quad e \quad \Delta t_{M_2}^{\substack{TIC\\TAC}} = \frac{L\sqrt{1-v^2/c^2}}{c+v}$$

$$\Delta t_{M_1}^{\substack{TAC\\TIC}} > \Delta t_{M_2}^{\substack{TIC\\TAC}}$$

Maria







Os TACs são simultâneos nos 2 relógios de João, mas os TICs não são p/ Maria.

Exemplo: no relógio de João o intervalo entre um TIC e um TAC é 1 ($L/c = 1$)

$$\begin{cases} TIC - TAC = 1\,s \\ v = \frac{3}{5}c \Rightarrow \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = 0{,}8 \end{cases}$$

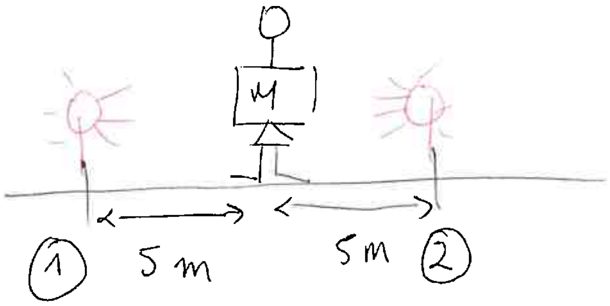
		TAC-TIC	TIC-TAC	TAC-TAC
Relógio de espelhos horizontais	João	1,0	1,0	2,0
	Maria	1,25	1,25	2,5
Relógio de espelhos verticais	João	1,0	1,0	2,0
	Maria	2,0	0,5	2,5

Os TICs nos dois relógios de João são simultâneos no referencial de João, mas isto não acontece no referencial de Maria $\Rightarrow$ TR $\Rightarrow$ espaço-tempo

$\Downarrow$

Conceito de simultaneidade

Conceito: Na Relatividade dizemos que dois eventos são simultâneos num referencial quando as luzes por eles emitidas chegam juntas a um ponto equidistante deles.

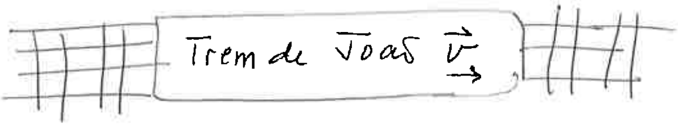


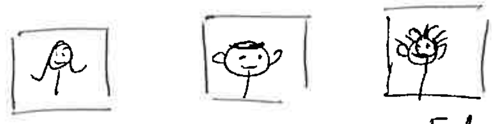
A definição de simultaneidade envolve tanto tempo quanto espaço.

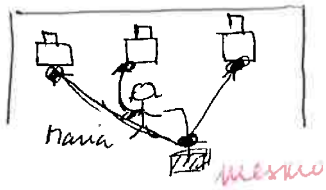
Exemplo: Fotos no trem de João e Maria

Maria está parada numa estação de trem, à noite, com todas as luzes desligadas. Na estação ela colocou a 100 m de si, de cada um de seus lados, duas máquinas fotográficas. A ela, e a uma terceira máquina que carrega na mão, ela ligou fios de mesmo comprimento, conectados a um interruptor, de modo que as 3 máquinas podem ser acionadas ao mesmo tempo, tirando fotos que são simultâneas no referencial da estação, onde Maria está. A luz necessária a cada foto é suprida por um flash acoplado à máquina.

João está num trem, que passará a grande velocidade pela estação. Quando o trem está passando, Maria aciona o interruptor, de modo que João seja fotografado pela máquina do meio. Em cada uma das 3 fotos aparece uma pessoa.







mesmo tempo ⇒ mesma distância

* Estas fotos foram tiradas simultaneamente no referencial da Maria. Mas as fotos não são simultâneas no referencial de João.

O que vê João ⇒ a frente de onda que fotografa Zé chega em João $\Delta t_2 = \frac{L - v\Delta t_2}{c}$

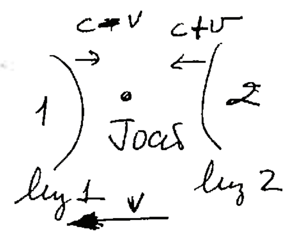
$\Delta t_2 = \frac{L}{c+v}$

⇒ a frente de onda que fotografa Ana chega em João $\Delta t_1 = \frac{L + v\Delta t_1}{c}$

$\Delta t_1 = \frac{L}{c-v}$ ⇒ $\Delta t_2 < \Delta t_1$

Vê as luzes chegarem em tempos ≠s, mas não pode concluir nada sobre as fotos no seu referencial. (Δt_1 leva + tempo) ANA

MC Explicação de João para a diferença de Δt's
Ana e Zé estão à mesma distância de João.
No seu referencial $v_{luz} = c - v$ de 1
$v_{luz} = c + v$ de 2



A luz não chega ao mesmo tempo porque as velocidades das luzes 1 e 2 são diferentes. As emissões são simultâneas.

MR Explicação de João para a diferença de Δt's
Tanto para Maria, quanto para João, as distâncias aparecem contraídas de $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ ⇒ $\lambda_{AJ} = \lambda_{ZJ}$
Se as distâncias são iguais e a velocidade da luz é a mesma c ⇒ as fotos não foram simultâneas
João vê primeiro o flash 2 ⇒ foto de Zé anterior à de Ana