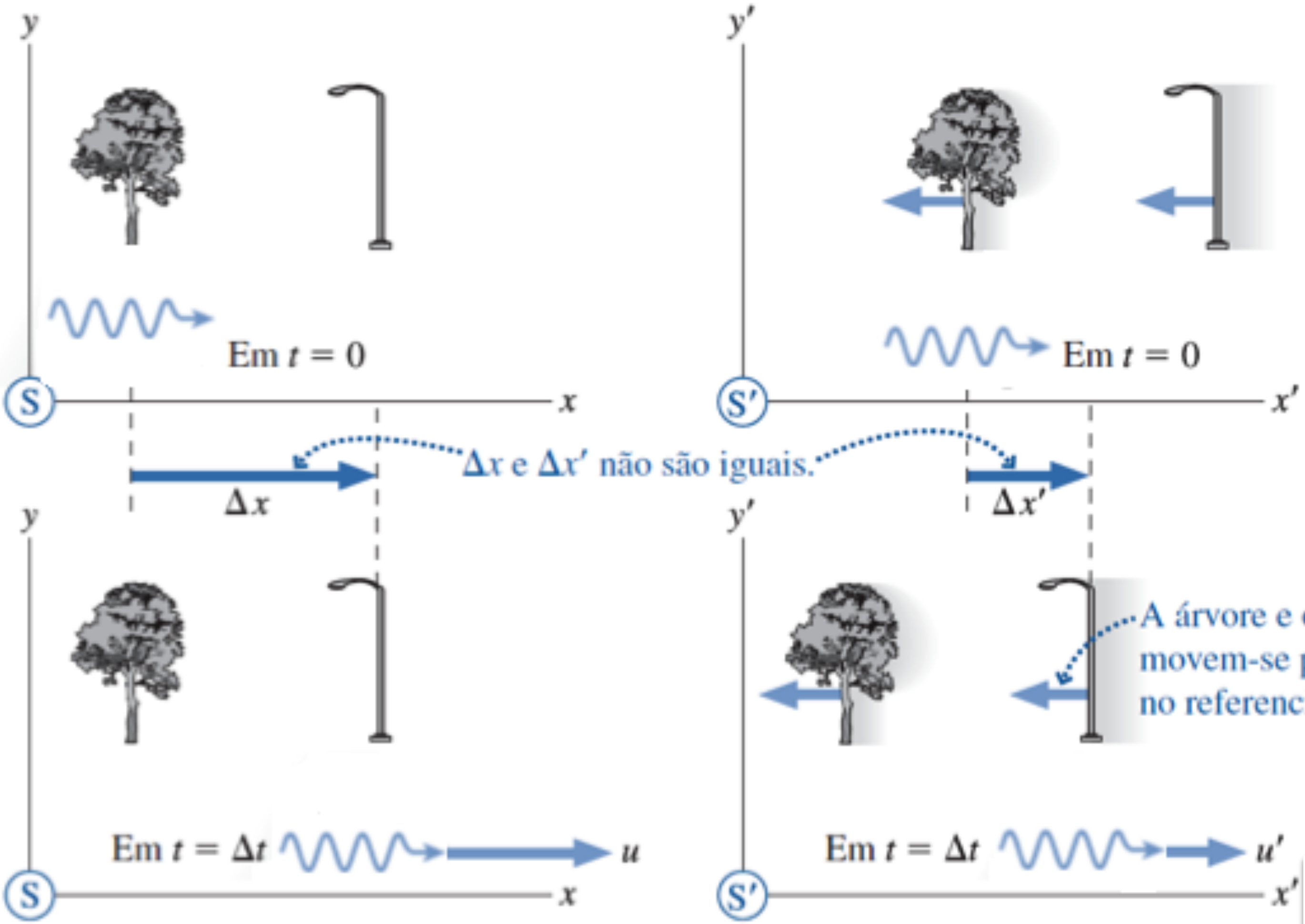
COMO c PODE SER IGUAL EM TODOS OS SRs?

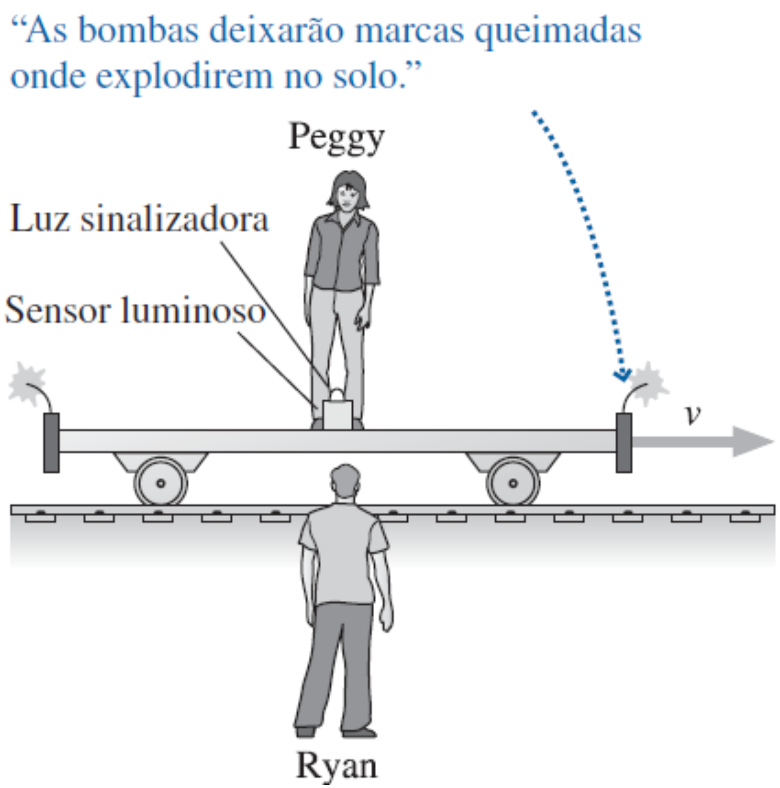


Galileu:
$u' = \Delta x'/\Delta t \neq u = \Delta x/\Delta t$

Mas se ao invés da bicicleta temos um raio de luz:
$u' = u = c$!!

Para isso ocorrer, é preciso
$\Delta t' \neq \Delta t$ (!!?)

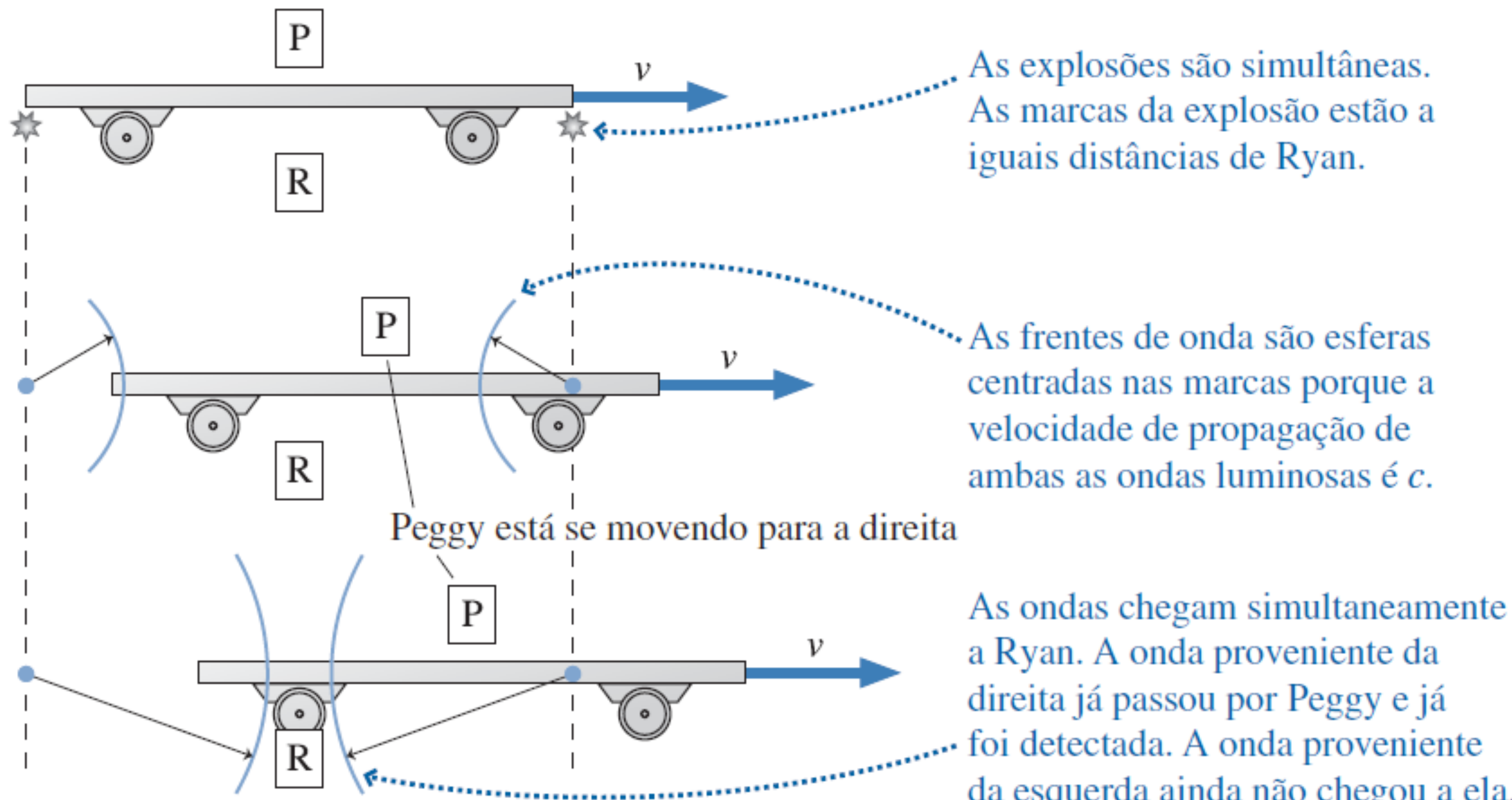
A RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE



1. Se o detector da direita receber o flash de luz antes do detector da esquerda: **VERDE**
2. Se o detector da esquerda receber o flash de luz antes do da direita ou se chegarem simultaneamente: **VERMELHA**

A RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE

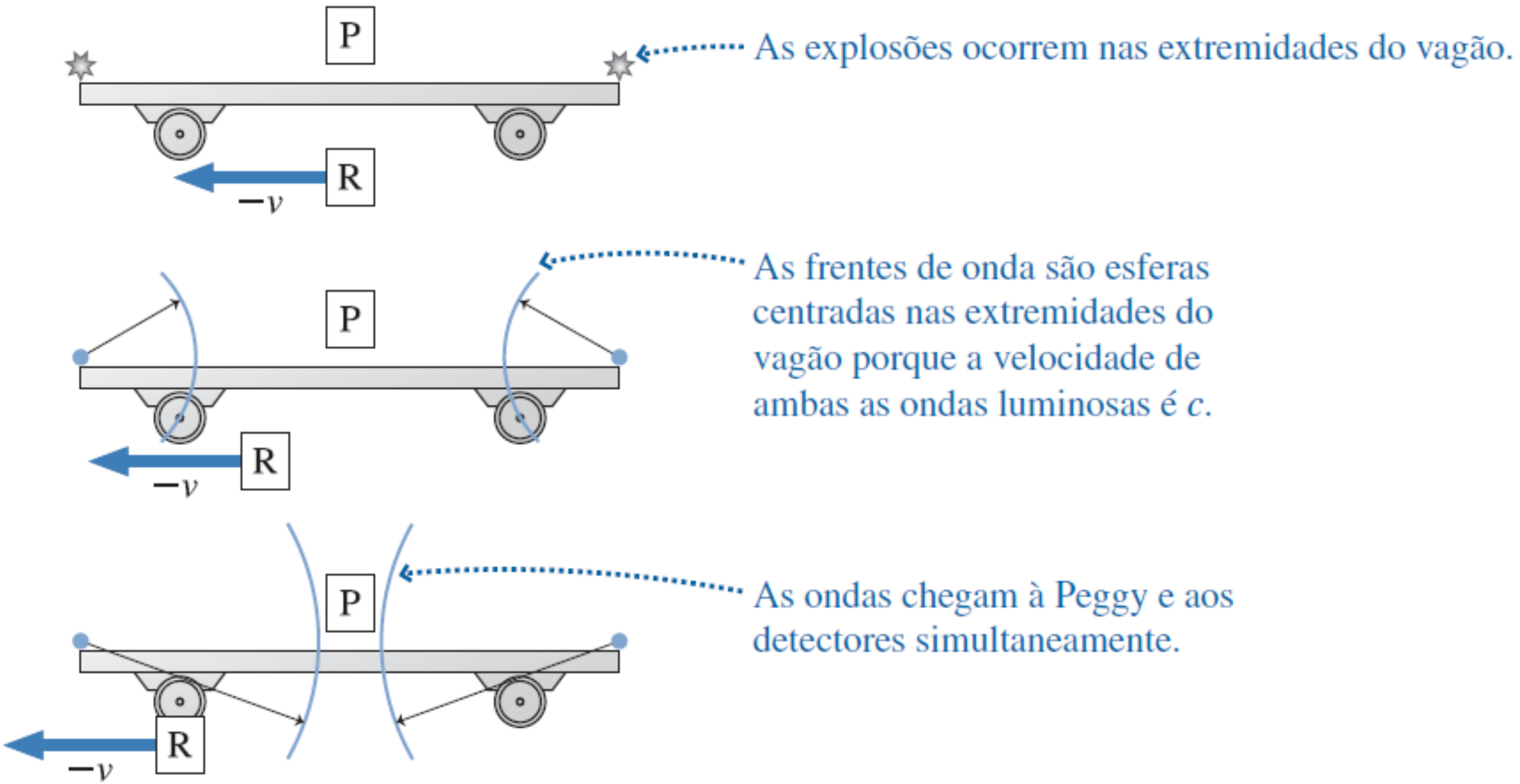
◆ Referencial parado na terra



Para o Ryan a luz é: **VERDE**

A RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE

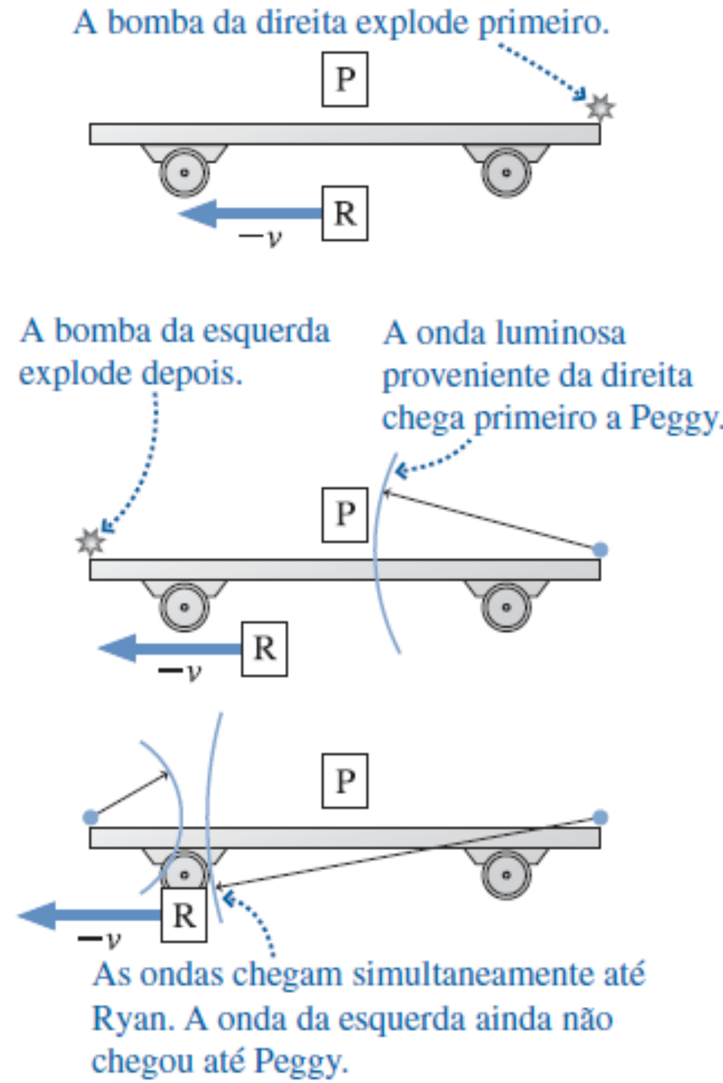
- Referencial parado sobre o vagão



Para Peggy a luz é: **VERMELHA**

A RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE

- Na verdade para Peggy a bomba da direita explode primeiro: **VERDE**



- Dois eventos que ocorrem simultaneamente em um referencial S *não* são simultâneos em qualquer outro referencial S' em movimento relativo a S.

EVENTOS

- Um ***evento*** é uma ocorrência física em um ponto específico no espaço e no tempo.

Ex: na situação acima, o acendimento da luz verde.

- Se um evento ocorre para um observador, ele também ocorre para qualquer outro observador.

Fatos não são relativos!

A *descrição* de um evento poderá ser diferente de acordo com observadores distintos– em particular, observadores em movimento relativo ➡ atribuir valores diferentes para a **posição e instante** de um mesmo evento.

Instituto de Física
Universidade Federal Fluminense

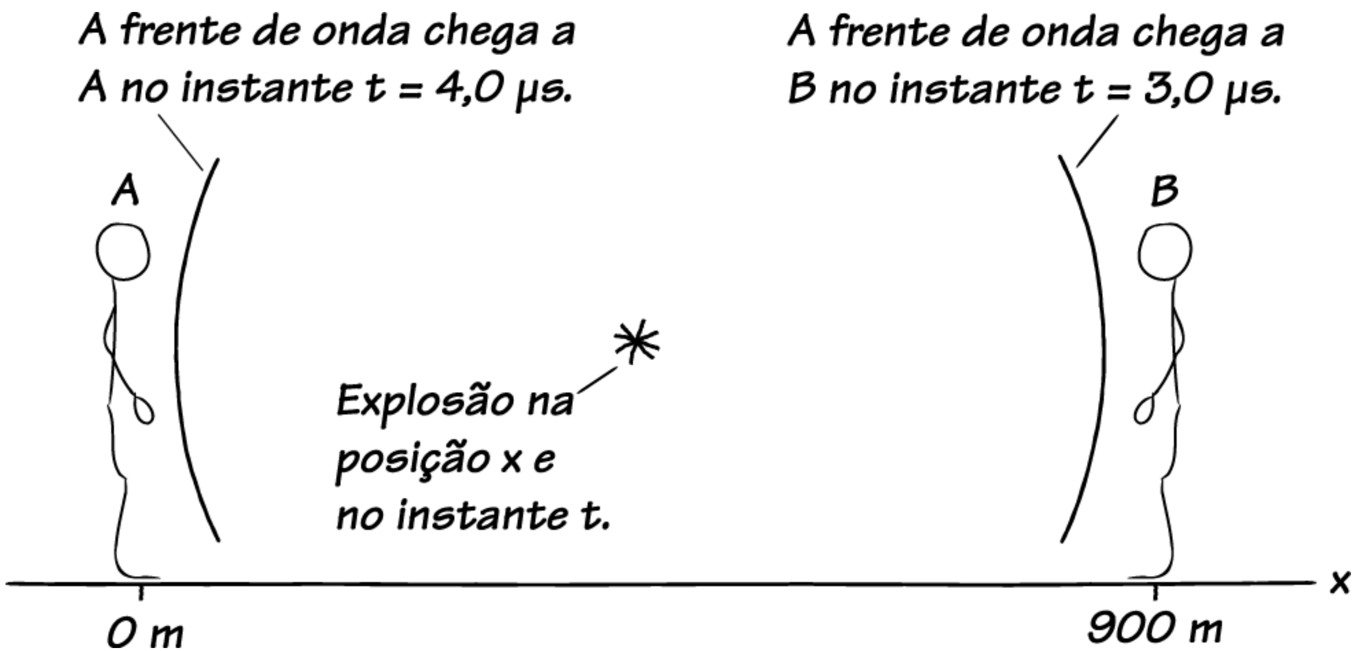
EVENTOS

Suponha que em $t=0$ uma bomba explode na posição dada por $x=300m$

- O **flash de luz** que vem da bomba alcançará o obs. na origem em $t_1=1{,}0\mu s$.
- O **som** da explosão chegará ao observador que não viu a explosão em $t_2=0{,}88s$.

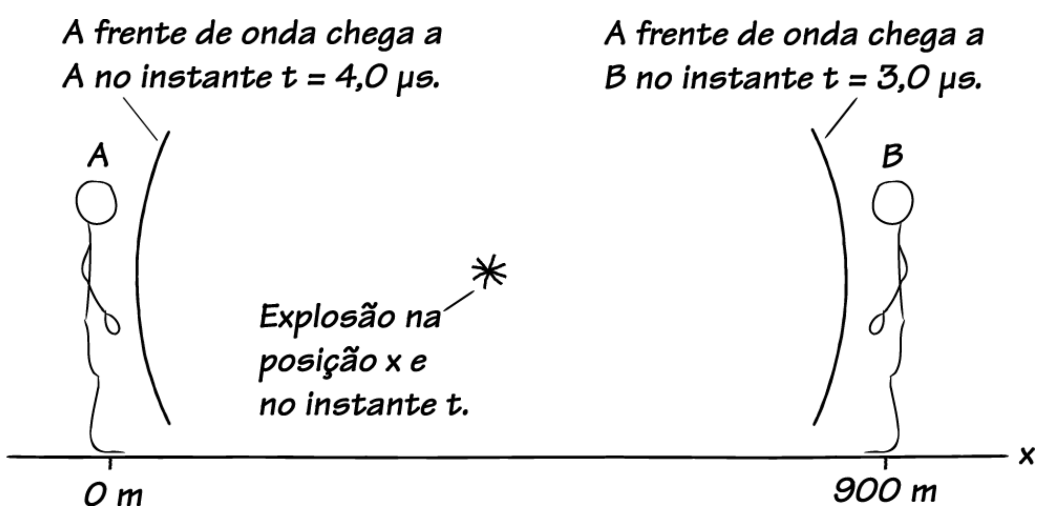
- NENHUM DESSES TEMPOS CORRESPONDE AO MOMENTO DA EXPLOSÃO – TEMPO DO EVENTO

Importante: a **posição e instante** em que um evento *realmente ocorre*, de acordo com um determinado observador *não são* em geral iguais à **posição e instante** aonde este observador está quando *percebe* o evento.



A e B *percebem* a explosão em tempos distintos, mas concordam quanto ao instante e posição em que ela *de fato ocorreu* no referencial comum de ambos (quais foram eles?) .

EVENTOS



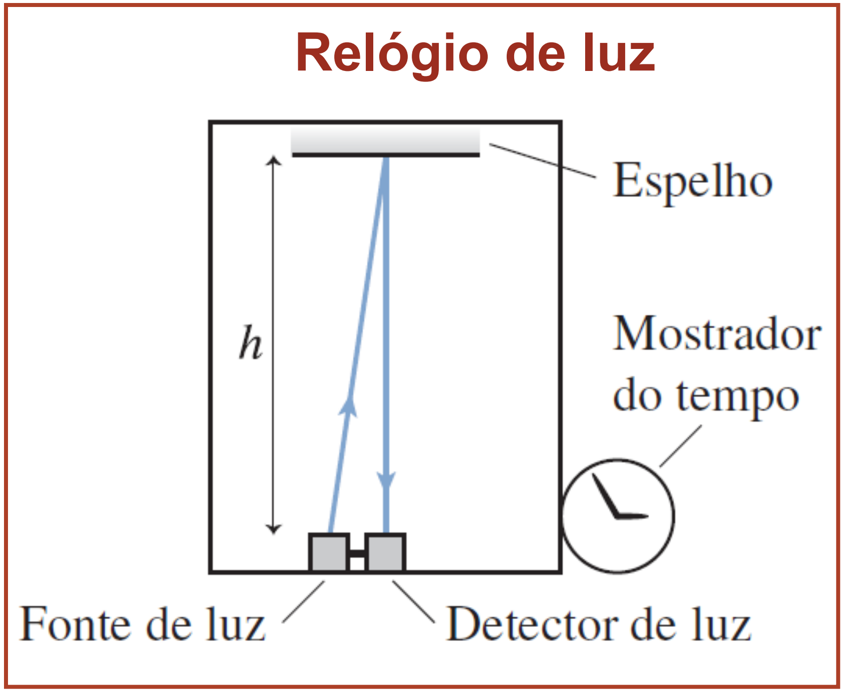
- ✓ O tempo adicional de $1\mu s$ necessário para a luz chegar ao observador A implica que a distância (x-0) é 300m maior do que a distância (900-x)

- ✓ (x-0) = (900-x) + 300

  2x = 1200m x = 600m
- ✓ Portanto o TEMPO do evento explosão é $t = 2\mu s$

DILATAÇÃO TEMPORAL

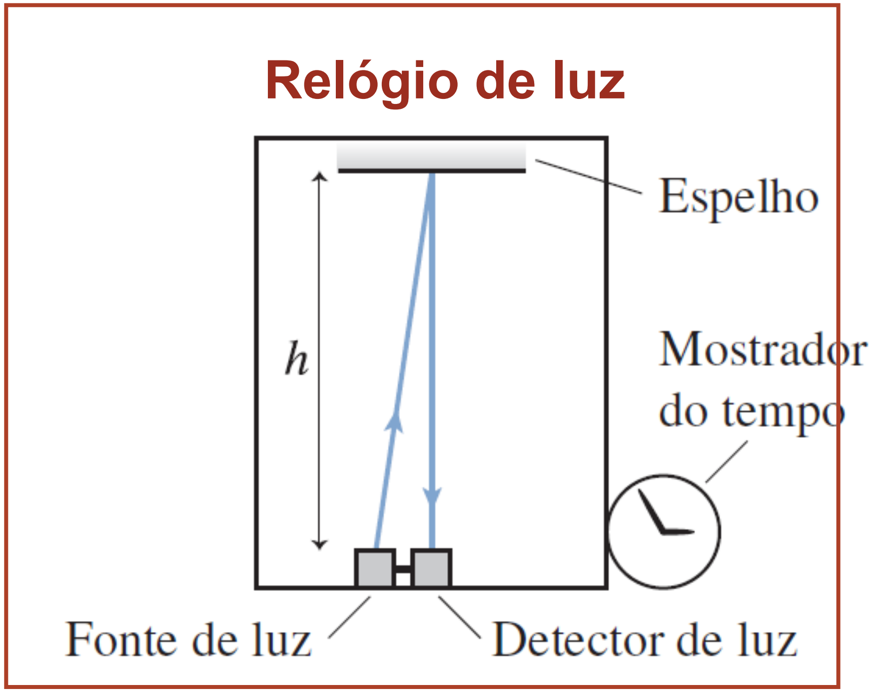
Pelo exemplo de Ryan e Peggy anterior (explosão no vagão) parece que o tempo "passa" diferente para quem está no referencial S e S'.



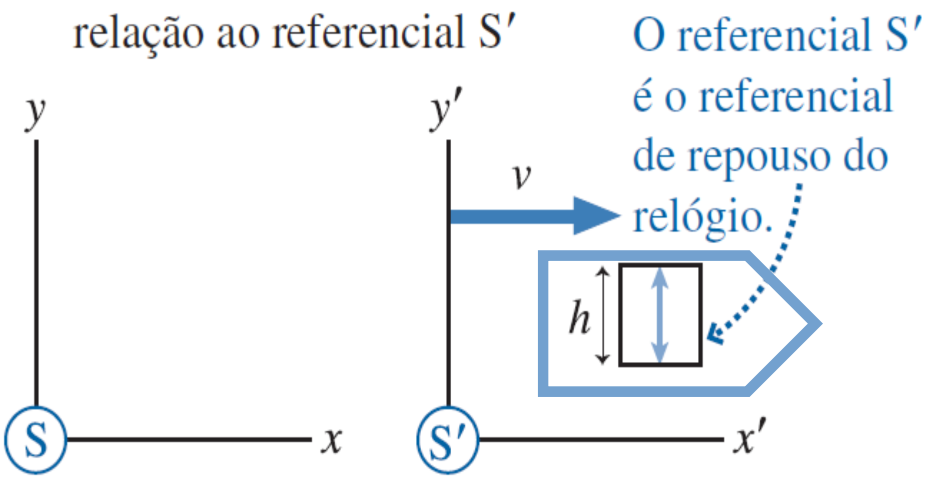
- Considere 2 eventos:
  i) um pulso de luz é emitido;
- **ii)** o pulso retorna e é detectado.

- No referencial S' onde o relógio está em repouso, o tempo entre os dois eventos é

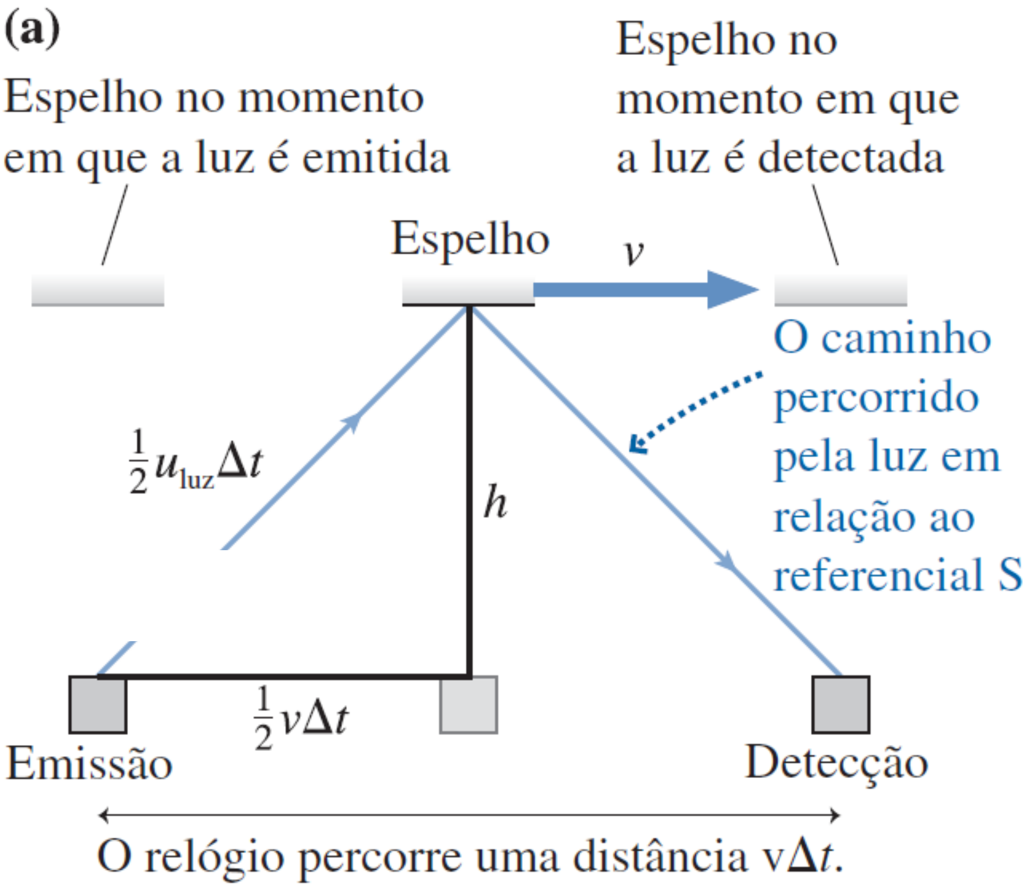
$$\Delta t' = \frac{2h}{c}$$



P: quanto tempo passa entre os mesmos eventos em um referencial *S* onde o relógio se move com velocidade v ?

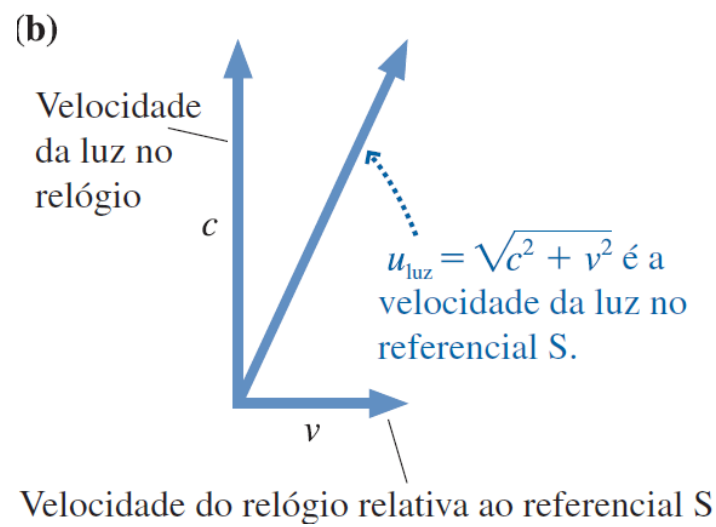


DILATAÇÃO TEMPORAL



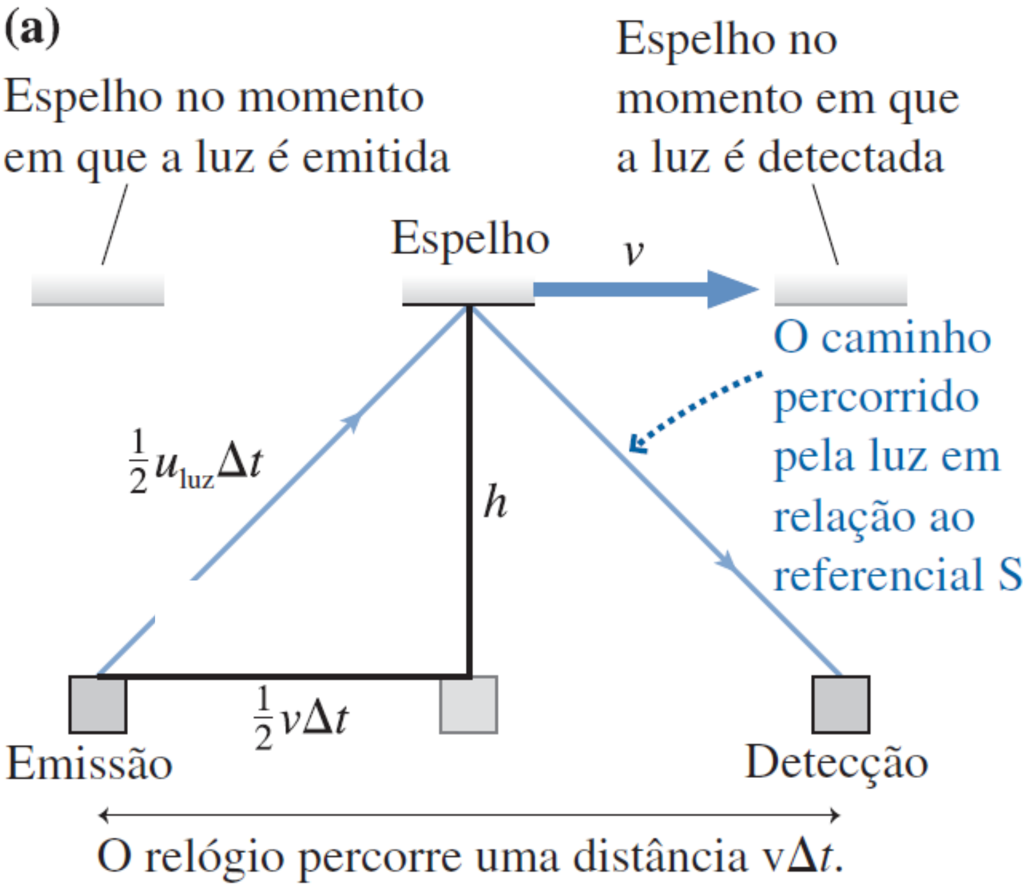
Análise Clássica (incorreta)

$$u_{luz} = \left\| \, \vec{u}_{luz}^{\,\prime} + \vec{v} \, \right\|$$



$$\Delta t = \frac{2h}{c} = \Delta t' ??$$

DILATAÇÃO TEMPORAL



Análise Relativística (correta)

u_{luz} = c !!!

$$\Delta t = \frac{2h/c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \equiv \gamma \Delta t'$$

onde

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

$\beta \equiv v/c < 1$

Instituto de Física
Universidade Federal Fluminense

DILATAÇÃO TEMPORAL

Conclusão: o tempo Δt entre dois eventos, conforme medido no referencial *S* em que o relógio se move, é *maior* do que o registrado no referencial *S'* onde o relógio está em repouso. Chamamos esse efeito de

DILATAÇÃO TEMPORAL

- Definição: **tempo próprio $\Delta\tau$** = tempo medido por um relógio no seu próprio referencial de repouso. No exemplo acima: **$\Delta\tau = \Delta t'$.**
- O tempo próprio **é o menor valor de tempo que pode ser medido entre dois eventos em qualquer referencial inercial.**

"Relógios em movimento andam mais devagar"

"O Tempo é dilatado".

Exemplo 37.5

Saturno dista 1,43 x 10^{12} m do Sol. Um foguete viaja em linha reta do Sol a Saturno com uma velocidade constante de 0,9c relativa ao sistema solar.

Quanto tempo levará para o foguete realizar o percurso em relação a um observador que está na Terra? E em relação a um astronauta que está no foguete?

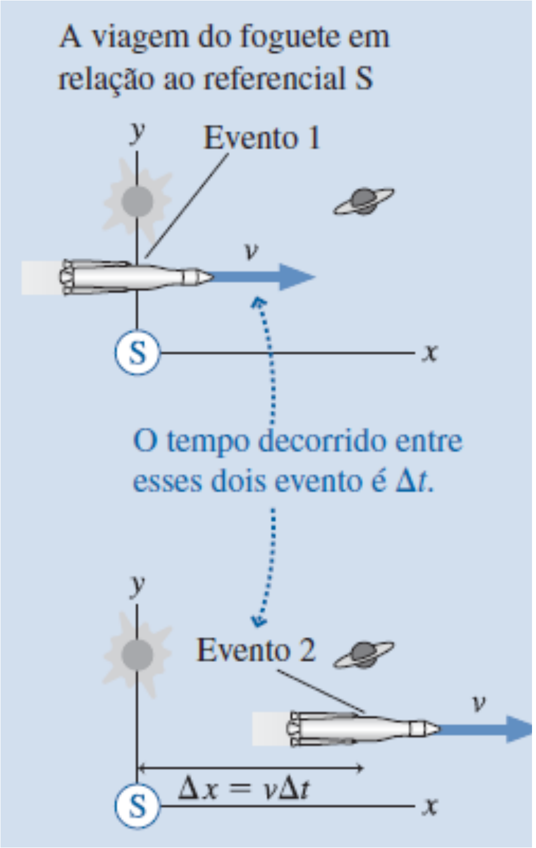
P1: quais são os 2 eventos nesta pergunta?

P2: qual desses tempos é o tempo próprio?

Exemplo 37.5

Saturno dista 1,43 x 10^{12} m do Sol. Um foguete viaja em linha reta do Sol a Saturno com uma velocidade constante de 0,9c relativa ao sistema solar.

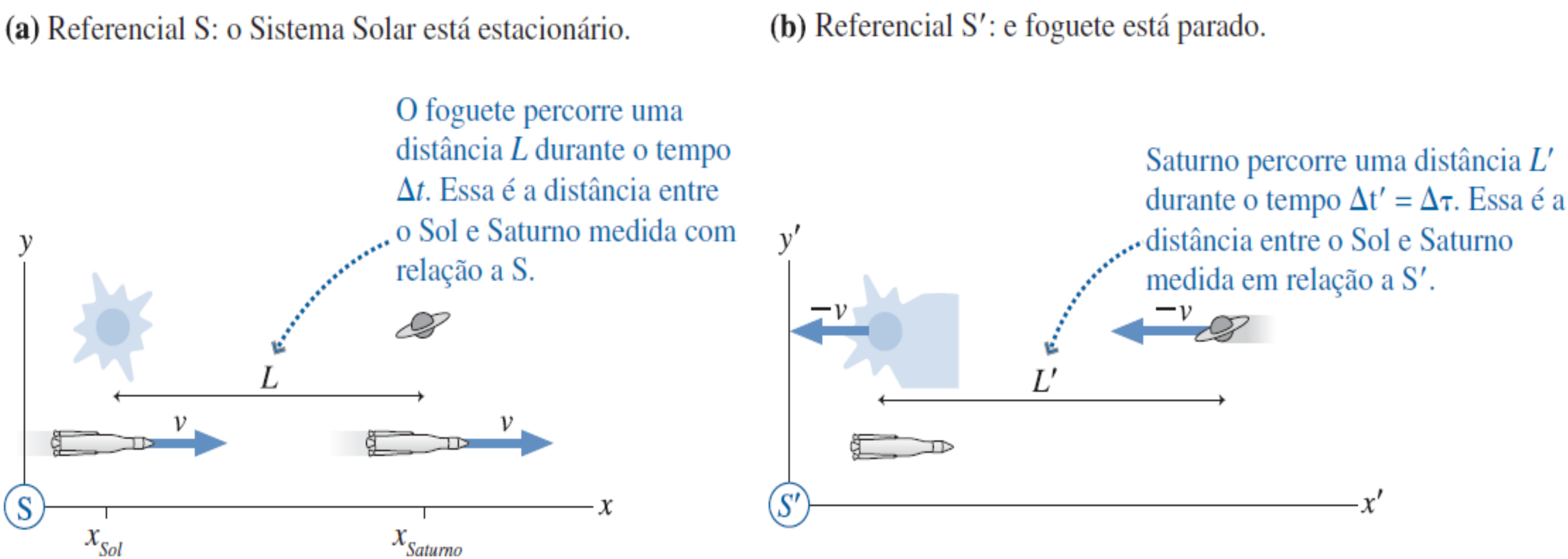
Quanto tempo levará para o foguete realizar o percurso em relação a um observador que está na Terra? E em relação a um astronauta que está no foguete?



R: Δt = 5300 s e $\Delta\tau$ = 2310 s Obs: Ambos estão corretos!!!

CONTRAÇÃO ESPACIAL

O que podemos falar sobre as distâncias? **Exemplo 37.6.**



Na figura acima o foguete viaja em linha reta do sol até Saturno com velocidade 0.9c relativamente ao sistema solar. A distância Saturno-Sol é de $1{,}43 \times 10^{12}$ m. Qual é a distância entre o Sol e Saturno medida em relação ao referencial do foguete?

CONTRAÇÃO ESPACIAL

A velocidade v é a velocidade relativa entre S e S'. Ela tem o mesmo módulo em ambos os referenciais:

$$v = L/\Delta t \quad = L'/\Delta t'$$

Mas $\Delta t'$ = tempo próprio= $\Delta\tau$

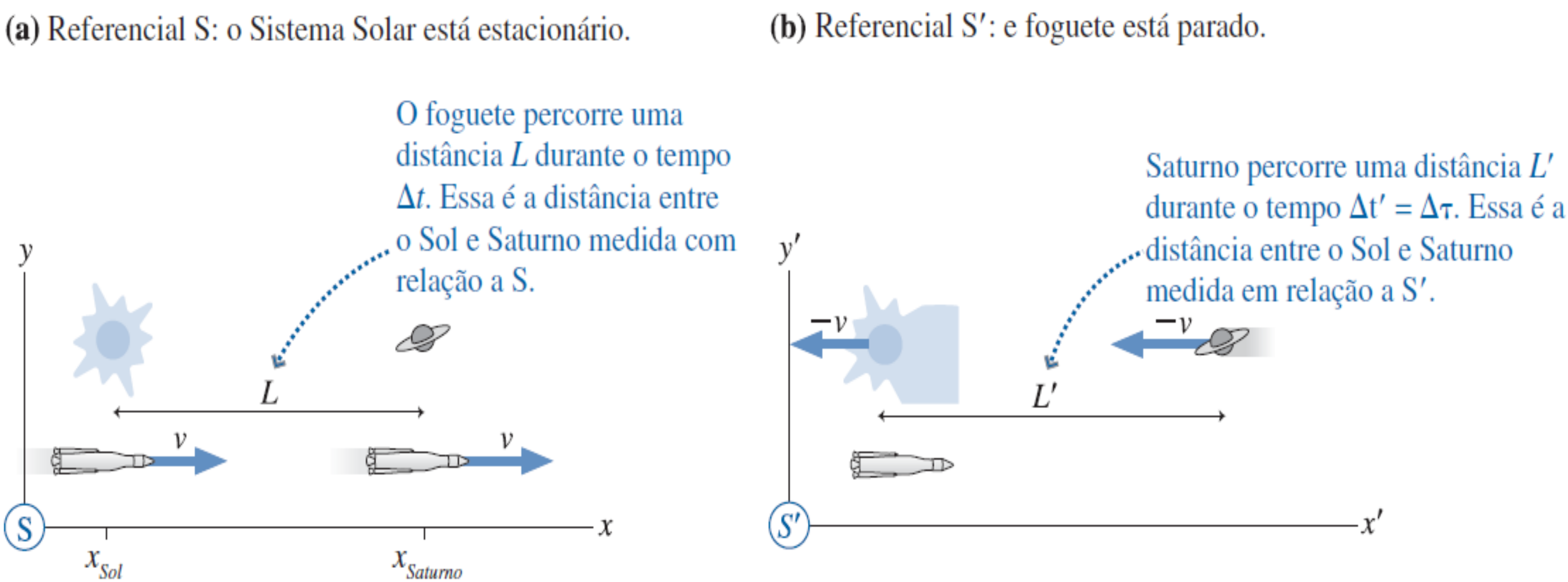
(em S'- pode ser medido por um único relógio)

Usando a dilatação temporal:

$$L/\Delta t \quad = \quad L'/\Delta t' \quad = \quad L'/[(1-\beta^2)^{1/2}\,\Delta t]$$

$$L' = [(1-\beta^2)^{1/2}\,L \qquad\qquad \beta^2 = v^2/c^2$$

Exemplo 37.6.



L = ℓ = a distância própria aqui

A *distância* entre dois eventos também depende do referencial !

$$\boxed{L' = \sqrt{1-(\beta)^2}L = L/\gamma \leq L}$$

contração espacial

R: se β =0.9 e L = 1,43x 10^{12} m: L' = 0,62 x 10^{12} m.

CONTRAÇÃO ESPACIAL

Conclusão: a distância espacial *L* entre dois eventos, conforme medido em um referencial *S* em que a "régua" utilizada se move, é *menor* do que a distância *L'* registrada no referencial *S'* onde a régua está em repouso. Chamamos esse efeito de

CONTRAÇÃO ESPACIAL

Definição: distância própria ℓ = distância medida por uma régua no seu próprio referencial de repouso. No exemplo do foguete que discutimos, ℓ **= L.** A distância própria é o maior valor de distância que pode ser medido entre dois eventos, em qualquer referencial inercial.

"Objetos em movimento ficam menores"

Aproximação quando v<<c

Série de Taylor: para x ~ 0,

$$f(x) = (1+x)^s = 1 + x.\left.\frac{df}{dx}\right|_{x=0} + (\ldots) \simeq 1 + sx$$

$$se\ v \ll c: \begin{cases} \sqrt{1-(\beta)^2} = (1-\frac{v^2}{c^2})^{1/2} \approx 1 - \frac{1v^2}{2c^2} \\ \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = (1-\frac{v^2}{c^2})^{-1/2} \approx 1 + \frac{1v^2}{2c^2} \end{cases}$$

37.9 – Um ônibus escolar de 8,0 m de comprimento passa a 30 m/s. Qual é o valor de sua contração espacial?

Solução: 8,0 m no ref. do ônibus (S') onde ele está em repouso. O comprimento dado é a distância própria (maior possível).

$$L = \sqrt{1-(\beta)^2}L' = \sqrt{1-(\beta)^2}l$$

$$L = \sqrt{1-(\beta)^2}l \approx \left(1 - \frac{1v^2}{2c^2}\right)l$$

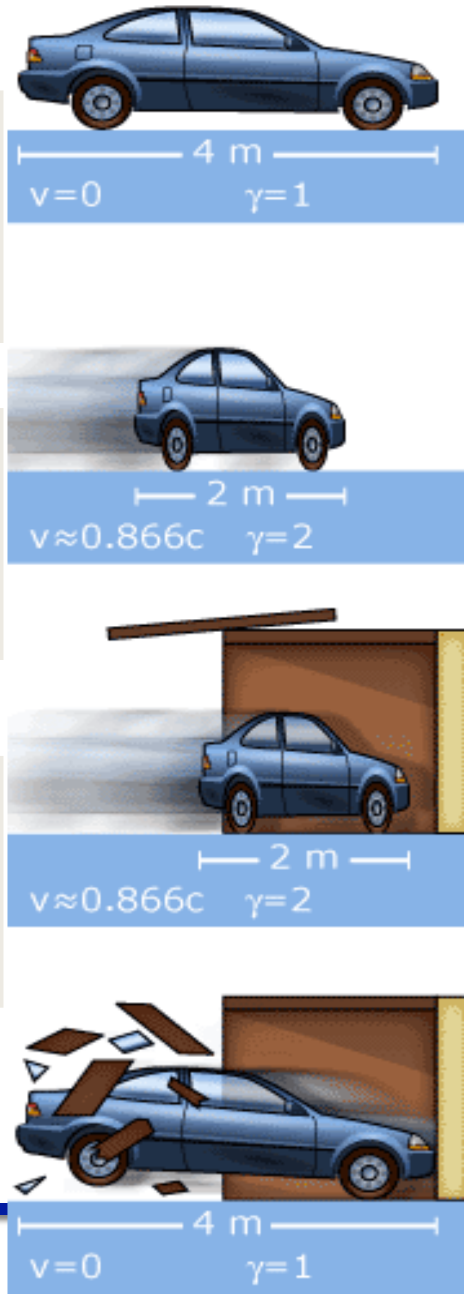
Resposta: $l - L = 4 \times 10^{-14}$ m

Aproximação quando v<<c

O ônibus "encolhe" pouco mais do que o diâmetro do núcleo de um átomo .
→ não percebemos esse efeito no dia a dia.

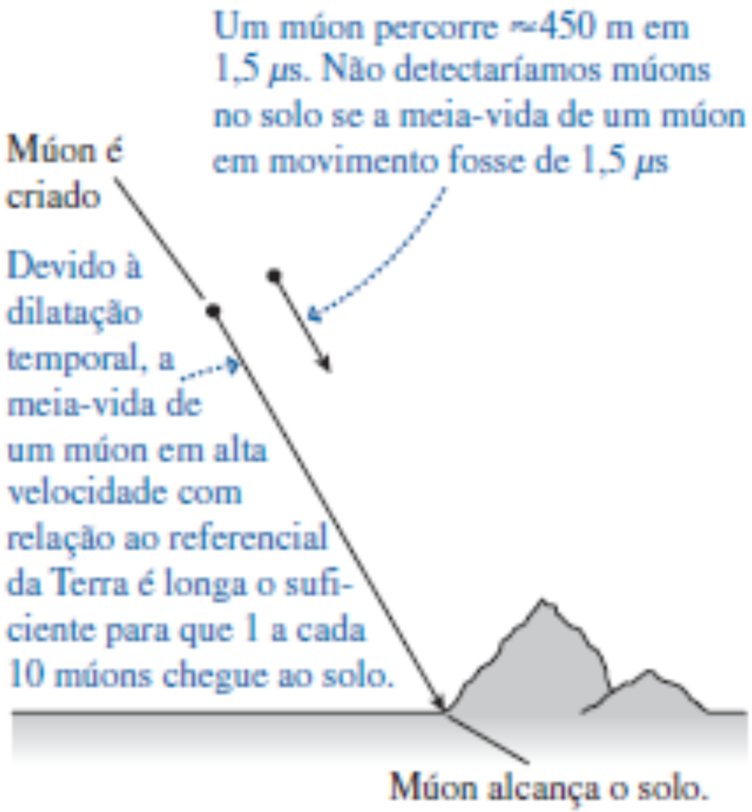
O Caso seria diferente se o ônibus fosse um ônibus espacial e estivesse viajando com uma velocidade relativista!

O importante é saber identificar o REFERENCIAL no qual o corpo tem seu COMPRIMENTO PROPRIO e o seu TEMPO PROPRIO.



Evidência Experimental Direta

Múons são partículas subatômicas instáveis, que são criados constantemente na alta atmosfera (60km). Cerca de 10% deles são observados chegando ao solo, com velocidade v = 0,99969 c



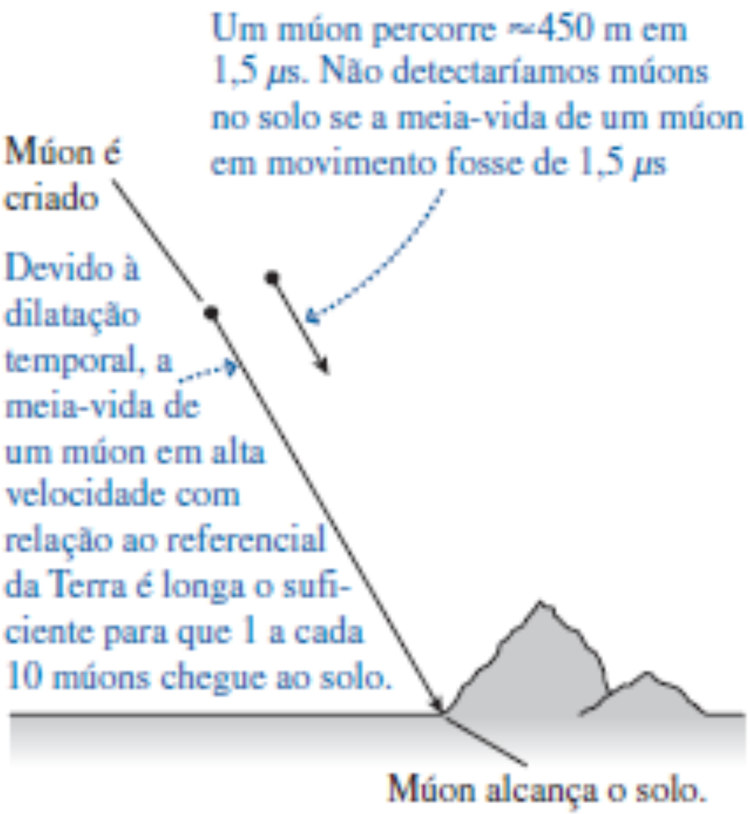
Problema: sabemos que o tempo de meia-vida de um múon é de apenas 1,5μs, o que corresponde a percorrer apenas 450m. Após isso ele tem 50% de chance de ter se desintegrado!!

A fração dos múons capazes de percorrer 60km = 133 x 450m seria apenas

$$(0,5)^{133} \sim 10^{-40} \text{ !!!!!}$$

Evidência Experimental Direta

Múons são partículas subatômicas instáveis, que são criados constantemente na alta atmosfera (60km). Cerca de 10% deles são observados chegando ao solo, com velocidade v = 0,99969 c



Solução: no referencial do solo, o tempo para a queda dos múons é

$$\Delta t = \boldsymbol{L / c = 200\mu s}$$

Devido à dilatação temporal, isto corresponde a **apenas τ=5μs no referencial dos múons** (pois γ~40)**.** Assim, a fração dos múons que chega deve de fato ser

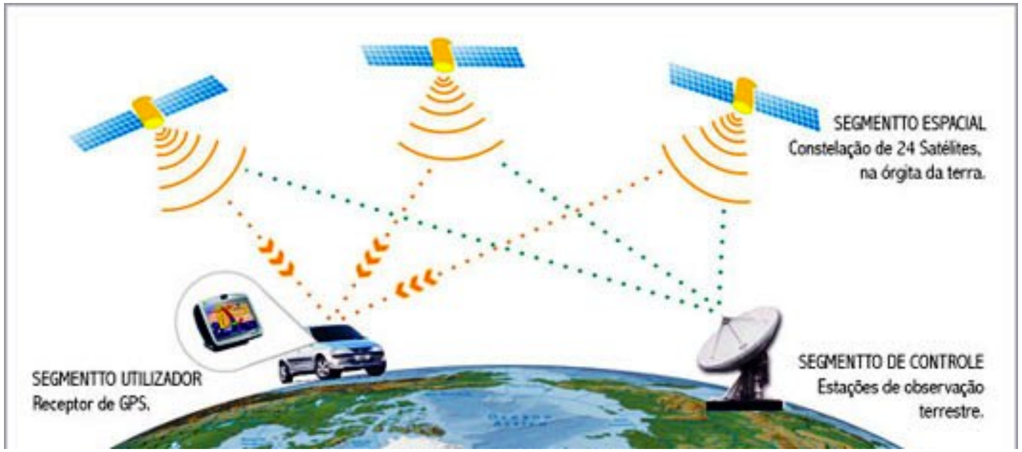
$$\mathbf{(0,5)^{(5\,/\,1,5)} \sim\ 0.1\ \ !!!!!}$$

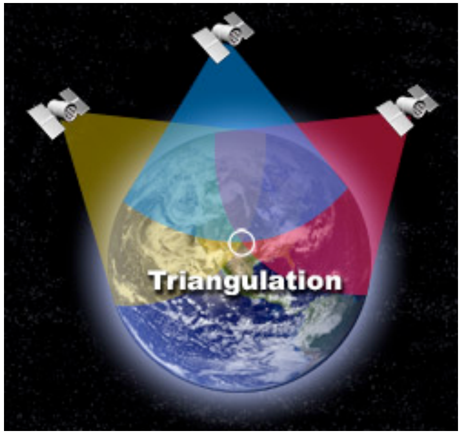
Visto de outra forma, **no referencial dos múons** a distância até o chão é contraída para apenas

$$\boldsymbol{L' = L / \gamma = 1{,}5\ km}$$

Instituto de Física
Universidade Federal Fluminense

DILATAÇÃO TEMPORAL & GPS





- Sistema GPS recebe sinais de satélites orbitando a cerca de 20.000km de altitude. Por estarem em movimento, os relógios atômicos dos satélites medem o tempo diferentemente dos relógios fixos na terra.

Como a órbita dos satélites é conhecida, se pelo menos 3 forem detectados pode-se então obter a posição do receptor por triangulação.

Problema: sem levar em conta os efeitos de dilatação temporal previstos pela relatividade, esses tempos e posições estarão *errados!*

Os GPS usam o **sistema de triangulação** para determinar a localização de um receptor em terra. Para a pergunta "Onde estou?", a resposta pode ser do tipo "Ah, você está a 10 quilômetros da cidade X". Claro que você pode estar a 10 quilômetros em qualquer direção da cidade. Então, é possível traçar um círculo para determinar a possível área em que você se encontra.

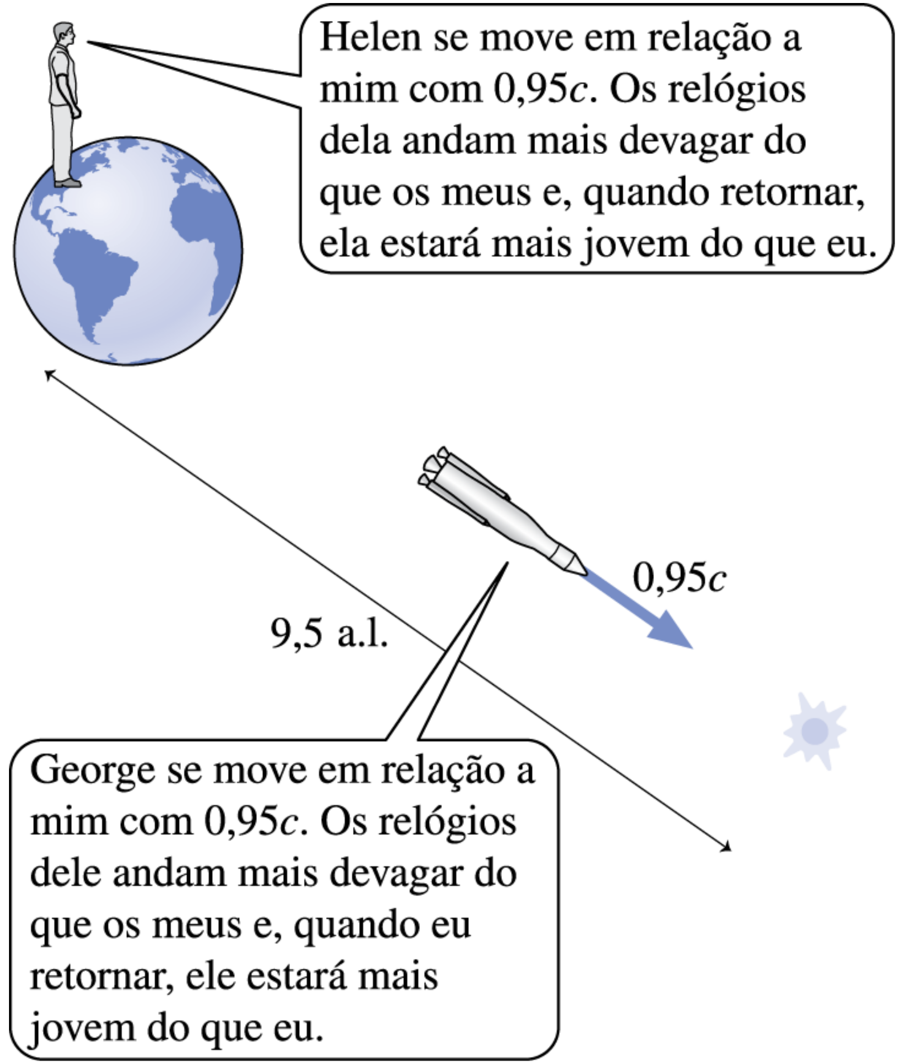
O mesmo pode ser feitos com outros pontos de referência (no nosso caso, Y e Z) e assim fazer a triangulação dos pontos para determinar exatamente a sua posição. O sistema de GPS funciona da mesma forma. Este princípio é chamado de trilateração.

PARADOXO DOS GEMEOS

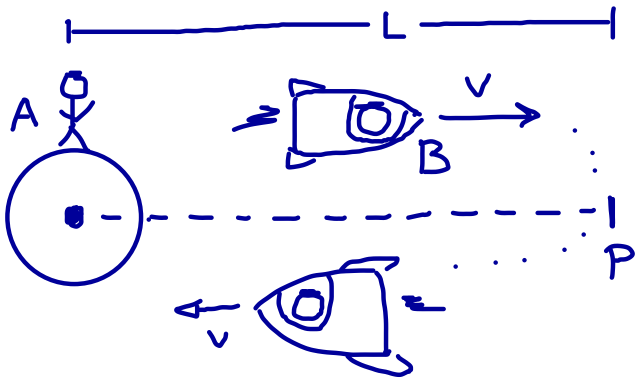
Parece haver uma contradição?!

George e Helen são gêmeos: Helen parte em uma viagem até uma estrela distante. Quando ela volta à Terra, quem estará mais jovem, George ou Helen? Ou terão a mesma idade?

- ✓ Na verdade não há um paradoxo… o referencial de Helen não é sempre inercial!



"PARADOXO" DOS GEMEOS – a solução



(visão do ref. de A)

Contração espacial

Ref. de A:

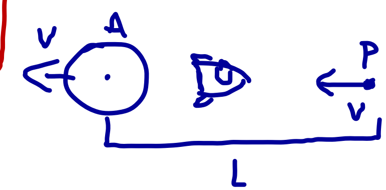
distância entre A e P: L

tempo até reencontro: $\boxed{t_A = \frac{2L}{v}}$

Ref. da ida de B

distância entre A e P: $L' = \overbrace{\sqrt{1 - v^2/c^2}}^{=\gamma^{-1} < 1}\, L < L\,!$

tempo de ida: $\boxed{t_{B_1} = \frac{\gamma^{-1} L}{v}}$

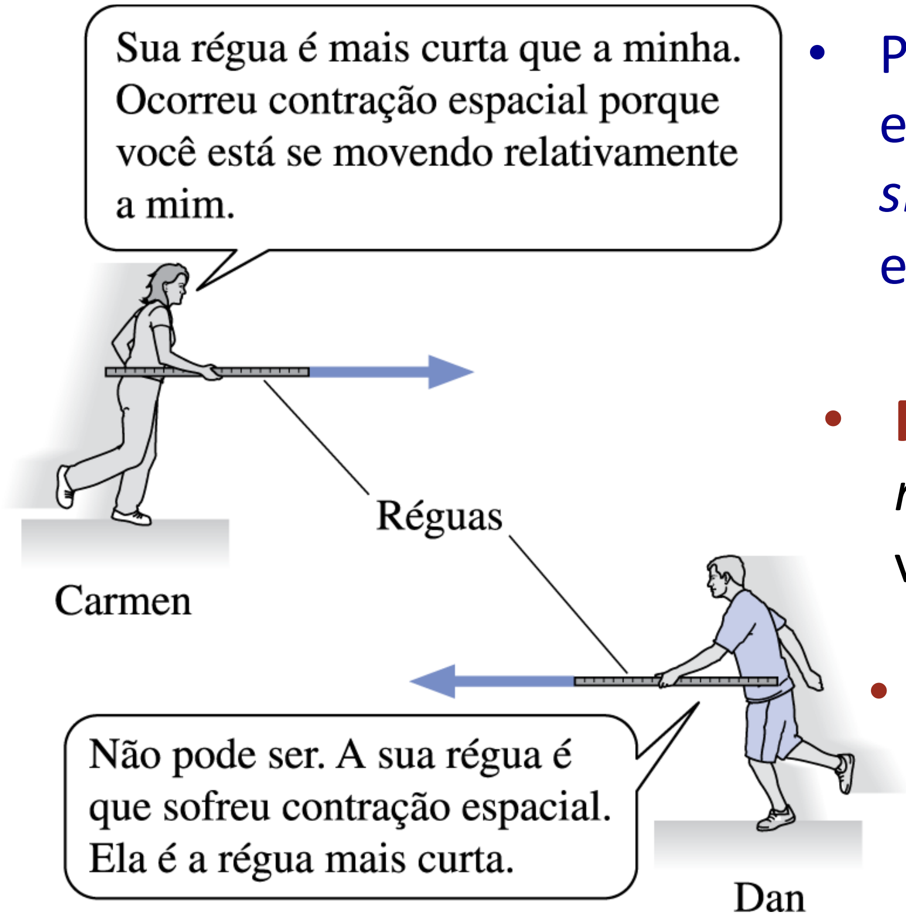


Ref. da volta de B: novamente $L' = \gamma^{-1} L \rightarrow t_{B_2} = \frac{\gamma^{-1} L}{v}$

$\rightarrow \boxed{t_B = \frac{2L}{\gamma v} < t_A\,!}$

→ B está mais novo que A!

OUTRO "PARADOXO"



- Para medir o comprimento de um corpo em movimento, é preciso medir *simultaneamente* a posição de cada extremidade

- **Porém,** eventos simultâneos para Dan *não são simultâneos* para Carmen, e vice-versa!

- Para Carmen, Ben mede *primeiro* a posição da ponta da frente da régua dela, e *depois* a de trás. Ben diz que Carmen faz o mesmo com a régua dele...

OUTRO “PARADOXO”

- Não há conflito entre as medições de Dan e Carmem!

- Em relação a Dan a régua de Carmem sofreu uma **contração espacial** e mede menos de 1m
- Em relação ao referencial de Carmem foi a régua de Dan que sofreu uma **contração espacial** e mede menos de 1m
- Se esse não fosse o caso – se ambos concordassem que uma das réguas é menor do que a outra – teríamos certeza de qual **REFERENCIAL** estaria de fato em movimento e qual estaria realmente reoouso.

- Como aqui cada qual se move em relação ao outro, cada qual **deve obter a mesma medida** para o comprimento da régua do outro.