

Introdução à Teoria da Relatividade Restrita



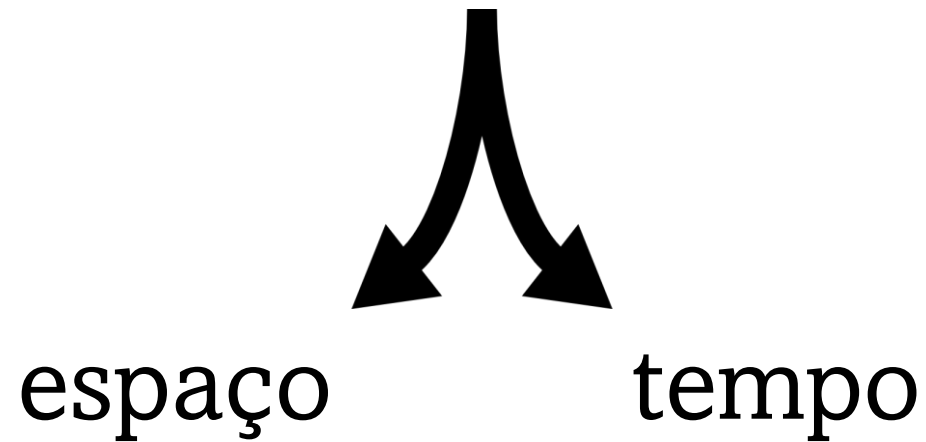
Mirela de Castro Santos

Nov-2025

O que passa na sua cabeça
quando você escuta
“teoria da relatividade”?



O que passa na sua cabeça
quando você escuta
“teoria da relatividade”?



Teoria da Relatividade **Restrita**:

referenciais inerciais, que se movem com velocidade constante um em relação ao outro.

Teoria da Relatividade **Geral**:

considera movimento acelerado; descreve buracos negros, curvatura espaço-tempo e evolução do universo.



Teoria da Relatividade **Restrita**:
referenciais inerciais, que se movem com
velocidade constante um em relação ao
outro.

Teoria da Relatividade **Geral**:
considera movimento acelerado; descreve
buracos negros, curvatura espaço-tempo e
evolução do universo.



O princípio da relatividade de Einstein

- Maxwell e a velocidade da luz. Qual o referencial? Qual o meio de propagação? Éter? A busca do éter se torna um dos grandes problemas experimentais e teóricos do final do século XIX.
- Experimento de Michelson e Morley usando um interferômetro.



O princípio da relatividade de Einstein

- Einstein e o referencial sobre a luz. Como uma pessoa veria a onda luminosa se ela “surfasse” essa onda?



O princípio da relatividade de Einstein

TODAS AS LEIS DA FÍSICA SÃO IGUAIS
EM RELAÇÃO A QUALQUER
REFERENCIAL INERCIAL.



O princípio da relatividade de Einstein

1. As equações de Maxwell preveem que as ondas eletromagnéticas, inclusive a luz, se propagam com velocidade $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$.

2. Portanto, a luz se propaga com velocidade c em relação a todos os referenciais inerciais.

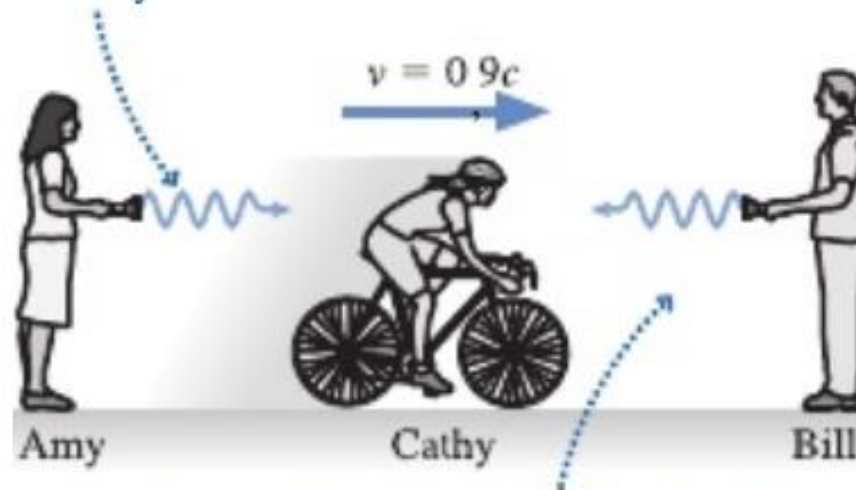


O princípio da relatividade de Einstein

1. As equações de Maxwell preveem que as ondas eletromagnéticas, inclusive a luz, se propagam com velocidade $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$.

2. Portanto, a luz se propaga com velocidade c em relação a todos os referenciais inerciais.

Esta onda luminosa se afasta de Amy a uma velocidade c relativa a Amy e aproxima-se de Cathy com uma velocidade c em relação a Cathy.



Esta onda luminosa se afasta de Bill com uma velocidade c relativa a Bill e se aproxima de Cathy com uma velocidade c em relação a Cathy.

O princípio da relatividade de Einstein

1º Postulado: TODAS AS LEIS DA FÍSICA
SÃO IGUAIS EM RELAÇÃO A QUALQUER
REFERENCIAL INERCIAL.

2º Postulado: A LUZ SE PROPAGA COM
VELOCIDADE c EM RELAÇÃO A TODOS
OS REFERENCIAIS INERCIAIS.



Os múons

são partículas elementares
subatômicas semelhantes aos elétrons,
mas cerca de 200 vezes mais massivas.
Têm uma vida útil curta, decaindo em
elétrons e neutrinos em apenas
alguns microssegundos



Os múons

são partículas elementares subatômicas semelhantes aos elétrons, mas cerca de 200 vezes mais massivas. Têm uma vida útil curta, decaindo em elétrons e neutrinos em apenas alguns microssegundos

Múons da radiação cósmica

- Meia vida: $2,2 \mu s$
- Velocidade na superfície terrestre:

$$0,998 c = 2,992 \times 10^8 m/s$$

- Tempo gasto para percorrer os 15 km da atmosfera:

$$t = \frac{15000}{2,992 \times 10^8} = 50,54 \mu s$$



evento

medição

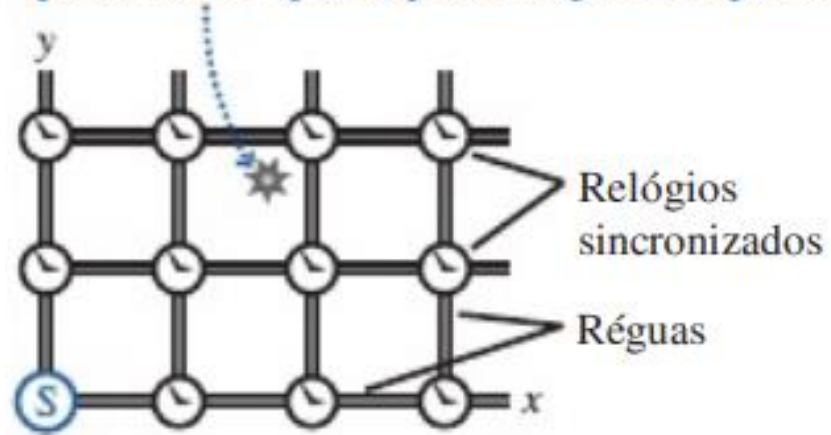


evento

medição

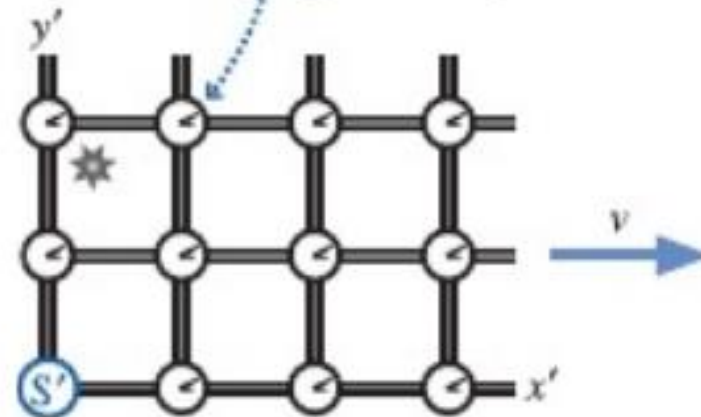


As coordenadas espaço-temporais deste evento são medidas por meio da intersecção mais próxima de réguas e pelo relógio mais próximo.



Referencial S

O referencial S' tem suas próprias réguas e seus próprios relógios.



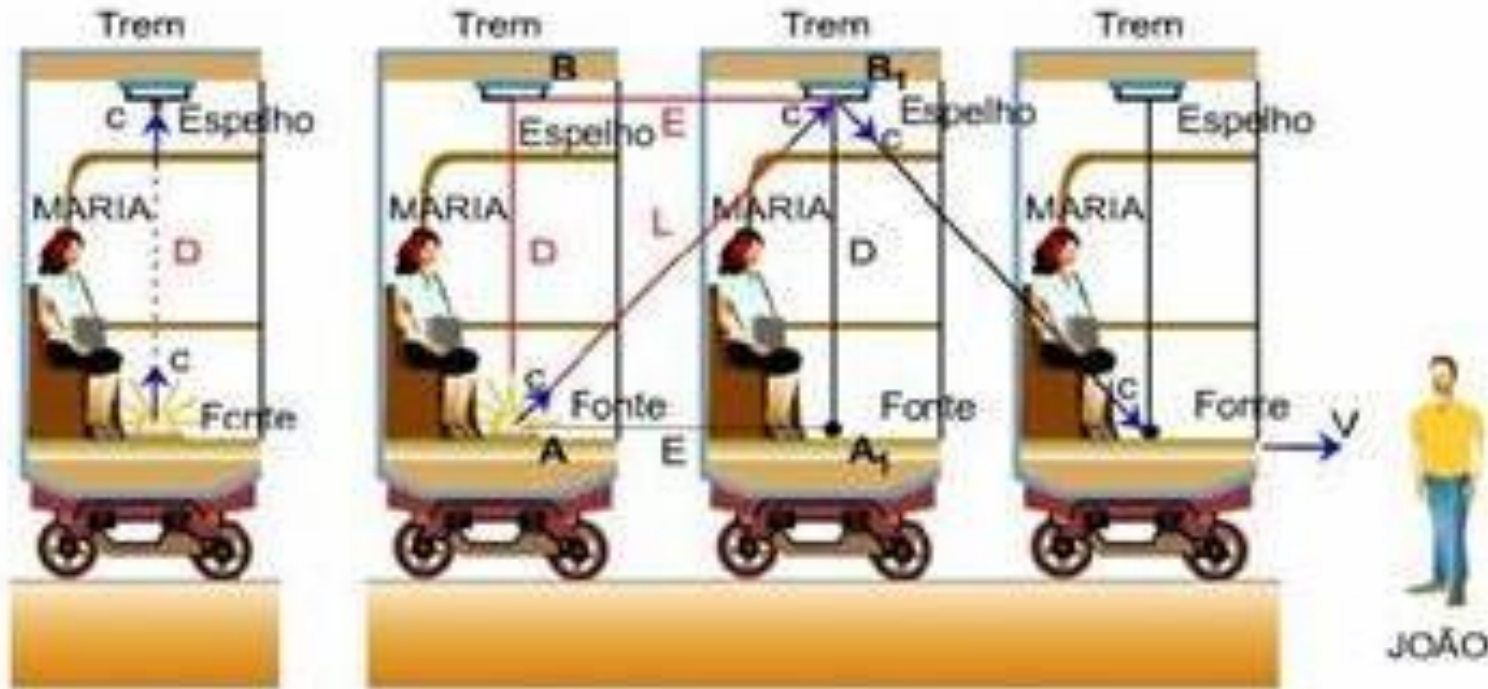
Referencial S'





A dilatação
do tempo

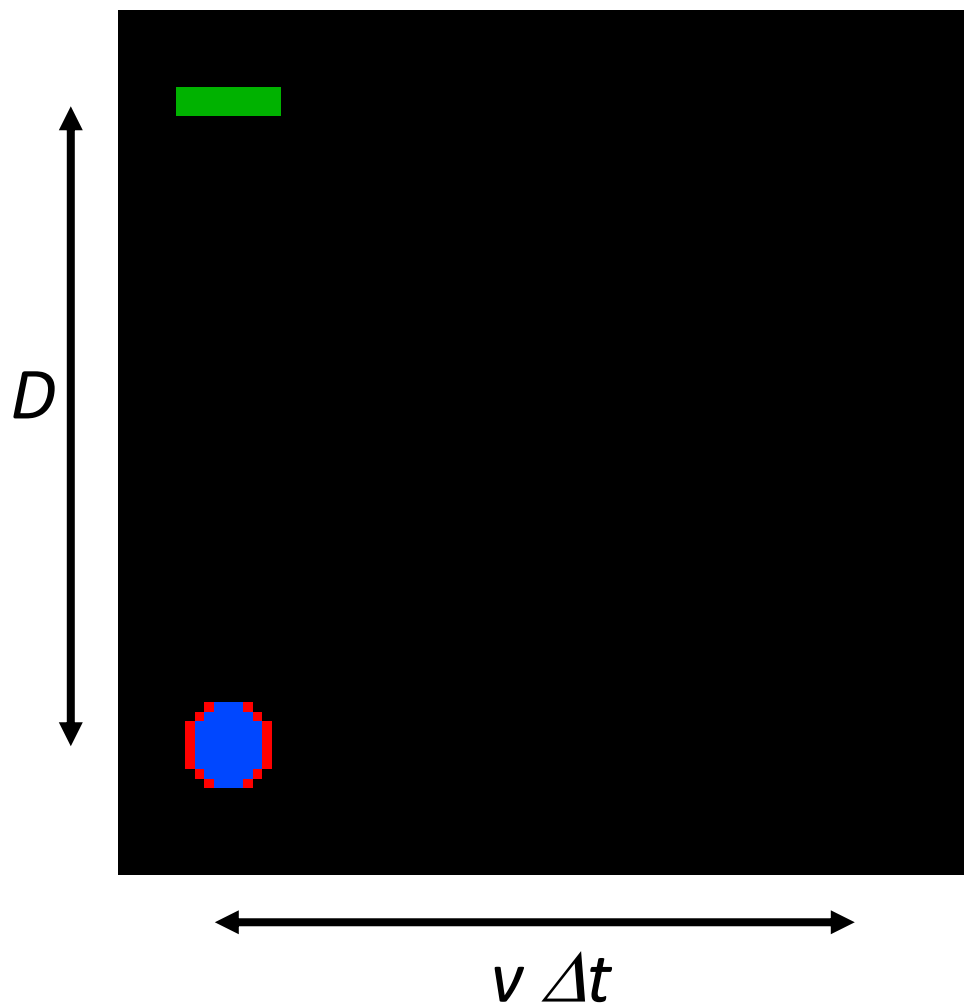
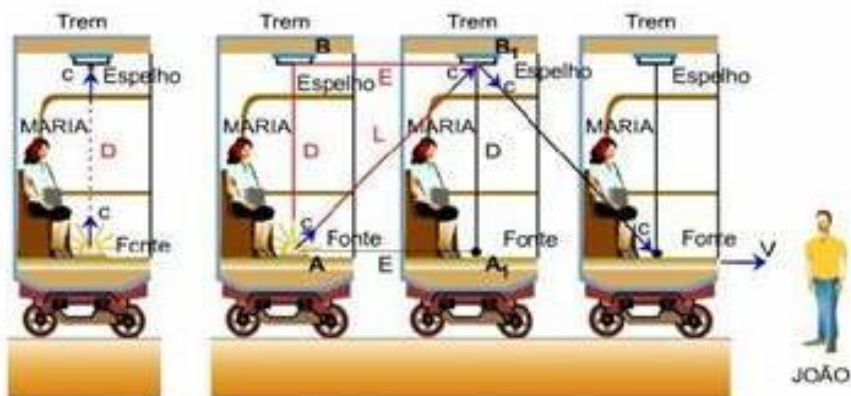
Relógio de luz



Trajetória da Luz
observada por Maria

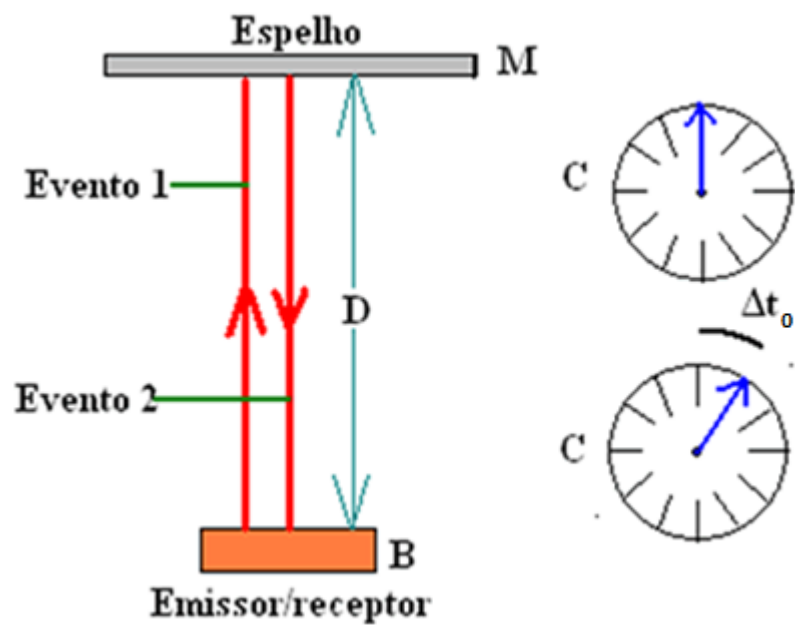
Trajetória da Luz observada por
João. A luz não sofre influência
da velocidade V do trem.

Relógio de luz

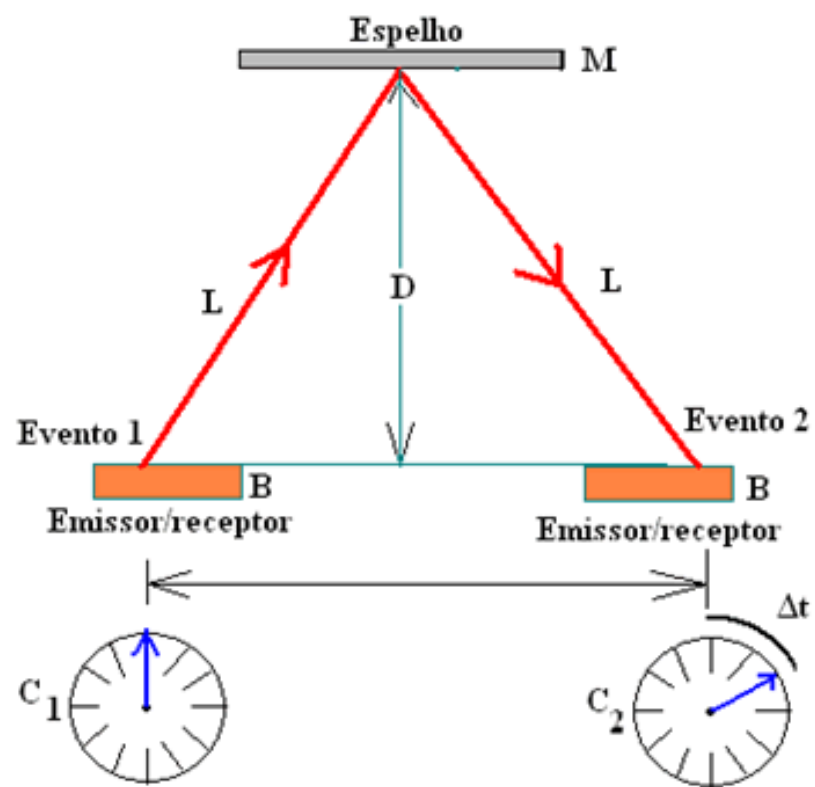


Relógio de luz

Maria

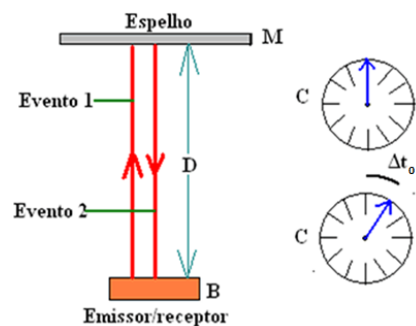


João



Relógio de luz

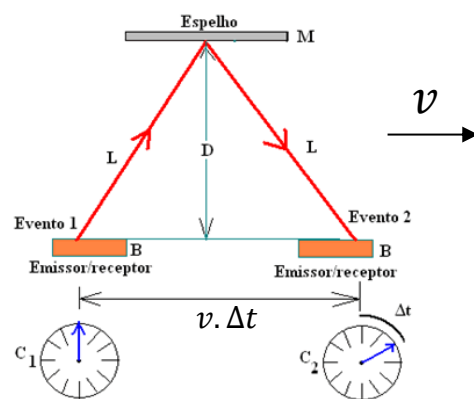
Maria



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

(tempo próprio)

João



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

$$L^2 = D^2 + \left(\frac{v \cdot \Delta t}{2}\right)^2$$

$$\left(\frac{c \cdot \Delta t}{2}\right)^2 = D^2 + \left(\frac{v \cdot \Delta t}{2}\right)^2$$

$$\Delta t = \frac{2D}{c \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

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

Dilatação do tempo

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

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$$

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

Fator de Lorentz, onde $\gamma \geq 1$



Exemplo 01

Os astronautas de uma nave espacial, viajando a uma velocidade $v = 0,6c$ em relação à Terra, interrompem a comunicação com o controle de missão, em Terra, dizendo que pretendem tirar uma soneca por uma hora e que, em seguida, voltarão a se comunicar. Qual é o tempo de duração da soneca, do ponto de vista dos controladores em Terra?

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



Exemplo 01

Os astronautas de uma nave espacial, viajando a uma velocidade $v = 0,6c$ em relação à Terra, interrompem a comunicação com o controle de missão, em Terra, dizendo que pretendem tirar uma soneca por uma hora e que, em seguida, voltarão a se comunicar. Qual é o tempo de duração da soneca, do ponto de vista dos controladores em Terra?

$$\Delta t = \frac{1h}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = 1,25 h$$



Exemplo 02

Raios cósmicos incidentes na alta atmosfera produzem partículas instáveis, denominadas múons. Sabe-se que a vida média de um múon, medida em um referencial em repouso em relação a ele, é de $2,2 \mu s$, aproximadamente. Após esse curtíssimo intervalo de tempo, o múon desintegra-se, dando origem a outras partículas. Muitos múons produzidos na alta atmosfera movem-se a uma velocidade igual a $0,998c$, aproximadamente. Considere $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$.

- a) Calcule a distância que poderiam percorrer antes de se desintegrarem, desconsiderando qualquer efeito relativístico e analise seus resultados.
- b) Calcule, agora, a distância percorrida pelos múons antes de desintegrarem, pela Teoria da Relatividade Restrita e explique seus resultados



Exemplo 02

Raios cósmicos incidentes na alta atmosfera produzem partículas instáveis, denominadas múons. Sabe-se que a vida média de um múon, medida em um referencial em repouso em relação a ele, é de $2,2 \mu s$, aproximadamente. Após esse curtíssimo intervalo de tempo, o múon desintegra-se, dando origem a outras partículas. Muitos múons produzidos na alta atmosfera movem-se a uma velocidade igual a $0,998c$, aproximadamente. Considere $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$.

- a) Calcule a distância que poderiam percorrer antes de se desintegrarem, desconsiderando qualquer efeito relativístico e analise seus resultados.
- b) Calcule, agora, a distância percorrida pelos múons antes de desintegrarem, pela Teoria da Relatividade Restrita e explique seus resultados.

$$\text{a) } d = v \cdot \Delta t' = 0,998 \times 3,0 \times 10^8 \times 2,2 \times 10^{-6} = 658 \text{ m}$$

$$\text{b) } \Delta t = \frac{2,2 \times 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{(0,998c)^2}{c^2}}} \quad \Delta t = 34,9 \times 10^{-6} \text{ s} \quad d = v \cdot \Delta t = 10.400 \text{ m}$$



Paradoxo dos gêmeos

Existiam dois gêmeos idênticos, A e B. O gêmeo A fez uma viagem espacial para um planeta localizado a uma distância de 8 anos-luz da Terra e com uma velocidade de $0,5\ c$, enquanto o gêmeo B permaneceu na Terra. Ambos tiveram seus relógios ajustados e marcavam a mesma hora antes da viagem. Para o gêmeo que ficou na Terra, a distância percorrida pela nave permaneceu a mesma, mas para o que viajou com velocidade de $0,5\ c$, o cálculo da distância foi feito utilizando-se a equação da contração do comprimento.

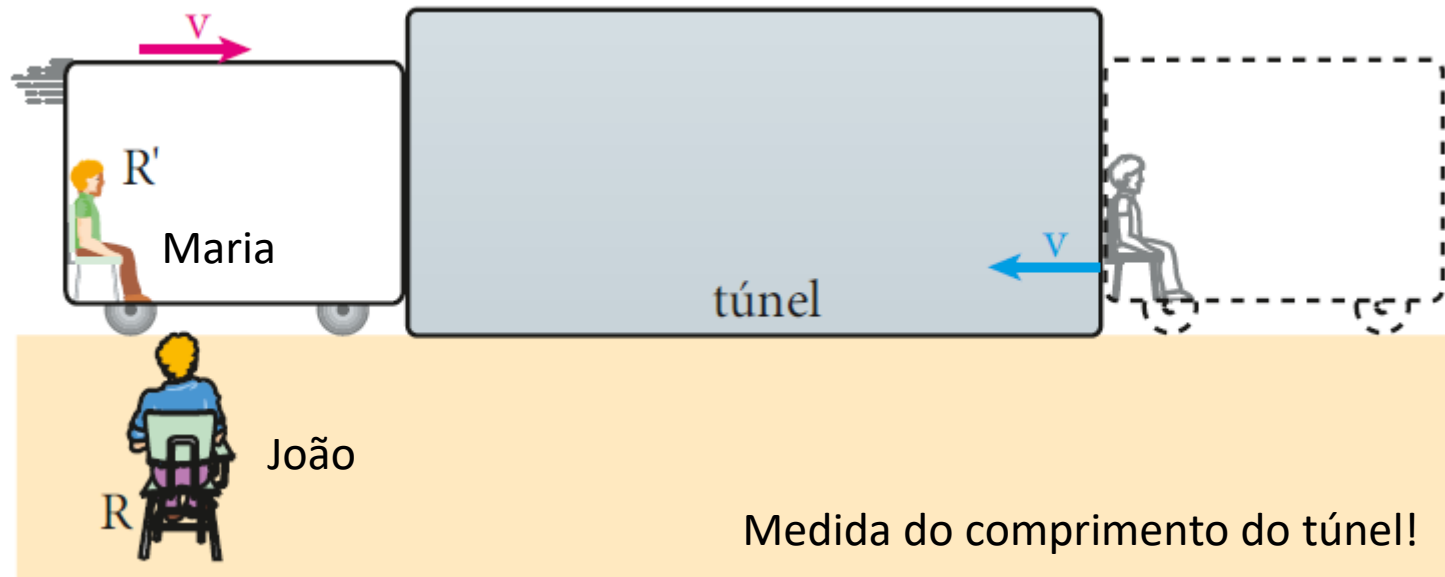
A distância percorrida pelo irmão que viajou foi de 7 anos-luz. Assim, a viagem para o gêmeo B demorou 16 anos ($8/0,5$) para ida e 16 para volta, somando 32 anos, enquanto para o gêmeo A foi de 14 ($7/0,5$) anos para ida e 14 para a volta, totalizando 28 anos. Percebemos que o gêmeo que ficou na Terra envelheceu 4 anos a mais do que o que viajou.





Contração
do espaço

Contração do espaço



Para o João, referencial em repouso em relação ao túnel:

$$L = v \cdot \Delta t$$

(espaço próprio)

Para a Maria, referencial móvel em relação ao túnel:

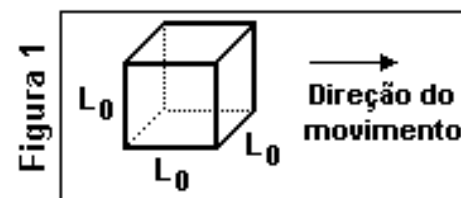
$$L' = v \cdot \Delta t'$$
$$L' = v \cdot \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L' = L \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

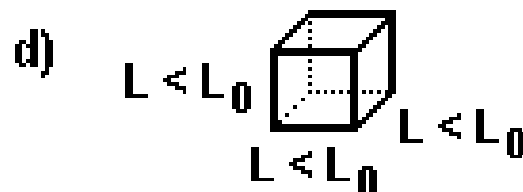
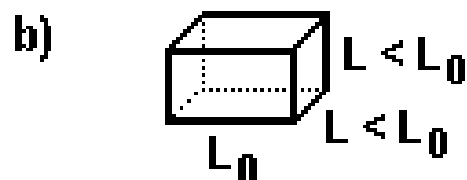
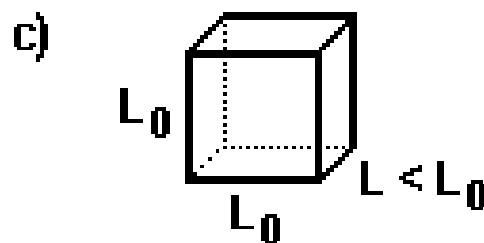
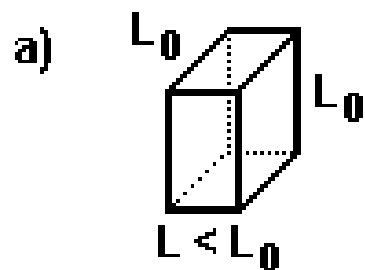
Exemplo 03

Depois de uma aula sobre Relatividade, em sua escola, Sílvia pegou um cubo de lado L_0 que estava sobre a mesa e fez a seguinte questão para ela:

Como seria a forma desse cubo se ele estivesse se movendo, com velocidade relativística constante, conforme direção indicada na figura 1?



A resposta correta de Tereza a essa pergunta foi:



Exemplo 04

Maria, encontra-se em um trem espacial que move-se com uma velocidade v e João encontra-se em repouso em relação à uma plataforma na Terra, com uma régua de 1,0 m de comprimento, na mesma direção do movimento de Maria. Maria mede o comprimento de 0,866 m para a régua que João está segurando. Qual o valor da velocidade v do trem?



Exemplo 04

Maria, encontra-se em um trem espacial que move-se com uma velocidade v e João encontra-se em repouso em relação à uma plataforma na Terra, com uma régua de 1,0 m de comprimento, na mesma direção do movimento de Maria. Maria mede o comprimento de 0,866 m para a régua que João está segurando. Qual o valor da velocidade v do trem?

$$L' = L \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

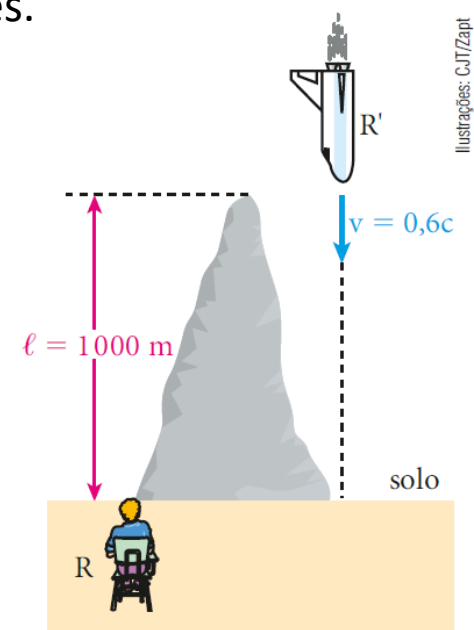
$$0,866 = 1,0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$v = 0,5c$$



Exemplo 05

Uma nave dirige-se verticalmente de encontro ao solo, com velocidade v igual a $0,6c$ em relação a ele. Em certo instante, ela está começando a passar por um pico de 1000 m de altura, medida por um observador fixo no solo. Determine a que altura que a nave se encontra nesse mesmo instante, medida por um de seus tripulantes.



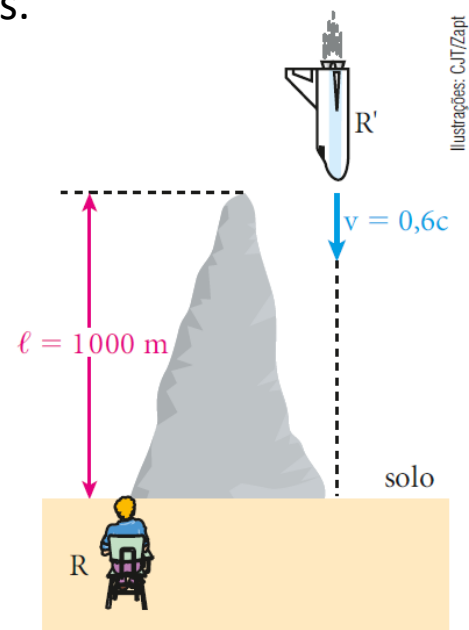
Exemplo 05

Uma nave dirige-se verticalmente de encontro ao solo, com velocidade v igual a $0,6c$ em relação a ele. Em certo instante, ela está começando a passar por um pico de 1000 m de altura, medida por um observador fixo no solo. Determine a que altura que a nave se encontra nesse mesmo instante, medida por um de seus tripulantes.

$$L' = L \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L' = 1000 \sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}$$

$$L' = 800\text{ m}$$





Energia
relativística

A equivalência massa-energia

A energia relativística foi descoberta por Einstein, em 1905. Essa teoria mostra que massa e energia são grandezas equivalentes, sendo que qualquer massa possui energia associada a ela e vice-versa. Matematicamente, essa relação é definida pela famosa equação de Einstein:

$$E = m \cdot c^2$$

A equação da energia relativística mostra que a máxima energia que um corpo pode possuir é obtida pela multiplicação da massa pela velocidade da luz ao quadrado. O que também significa que uma quantidade mínima de massa pode produzir quantidades imensas de energia. Por exemplo: um corpo com massa $m = 1,0 \text{ kg}$ pode produzir $9 \times 10^{16} \text{ J}$ de energia.



Relatividade das massas

A massa é a medida da inércia de um corpo. Assim, à medida que a velocidade de um corpo aumenta sua inércia também aumenta e quando a velocidade do corpo tende à velocidade da luz (a maior possível), sua inércia e, conseqüentemente, sua massa, tende ao infinito.

Portanto, além do espaço e do tempo, na teoria da relatividade, a massa também varia e essa variação é fornecida pela expressão:

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



Exemplo 06

Quando um elétron de massa $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ é acelerado até atingir 60% da velocidade da luz ($v = 0,6c$), o que acontecerá com sua massa (m) em relação à sua massa em repouso (m')?

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

$$m = \frac{m'}{0,8}$$

$$m = \frac{m'}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}}$$

$$m = 1,14 \times 10^{-30} \text{ kg}$$



Hora de Música

Parabolicamará Gilberto Gil



Antes mundo era pequeno
Porque Terra era grande
Hoje mundo é muito grande
Porque Terra é pequena
Do tamanho da antena
Parabolicamará

Ê volta do mundo, camará
Ê, ê, mundo dá volta, camará

Antes longe era distante
Perto só quando dava
Quando muito ali defronte
E o horizonte acabava
Hoje lá trás dos montes
dendê em casa camará

Ê volta do mundo, camará (...)
De jangada leva uma eternidade
De saveiro leva uma encarnação

Pela onda luminosa
Leva o tempo de um raio

Tempo que levava Rosa
Pra aprumar o balaio
Quando sentia
Que o balaio ía escorregar
Ê volta do mundo, camará (...)
Esse tempo nunca passa
Não é de ontem nem de hoje
Mora no som da cabaça
Nem tá preso nem foge

No instante que tange o
berimbau
Meu camará

Ê volta do mundo, camará (...)
De jangada leva uma eternidade
De saveiro leva uma encarnação
De avião o tempo de uma
saudades

Esse tempo não tem rédea
Vem nas asas do vento
O momento da tragédia
Chico Ferreira e Bento
Só souberam na hora do destino
Apresentar