

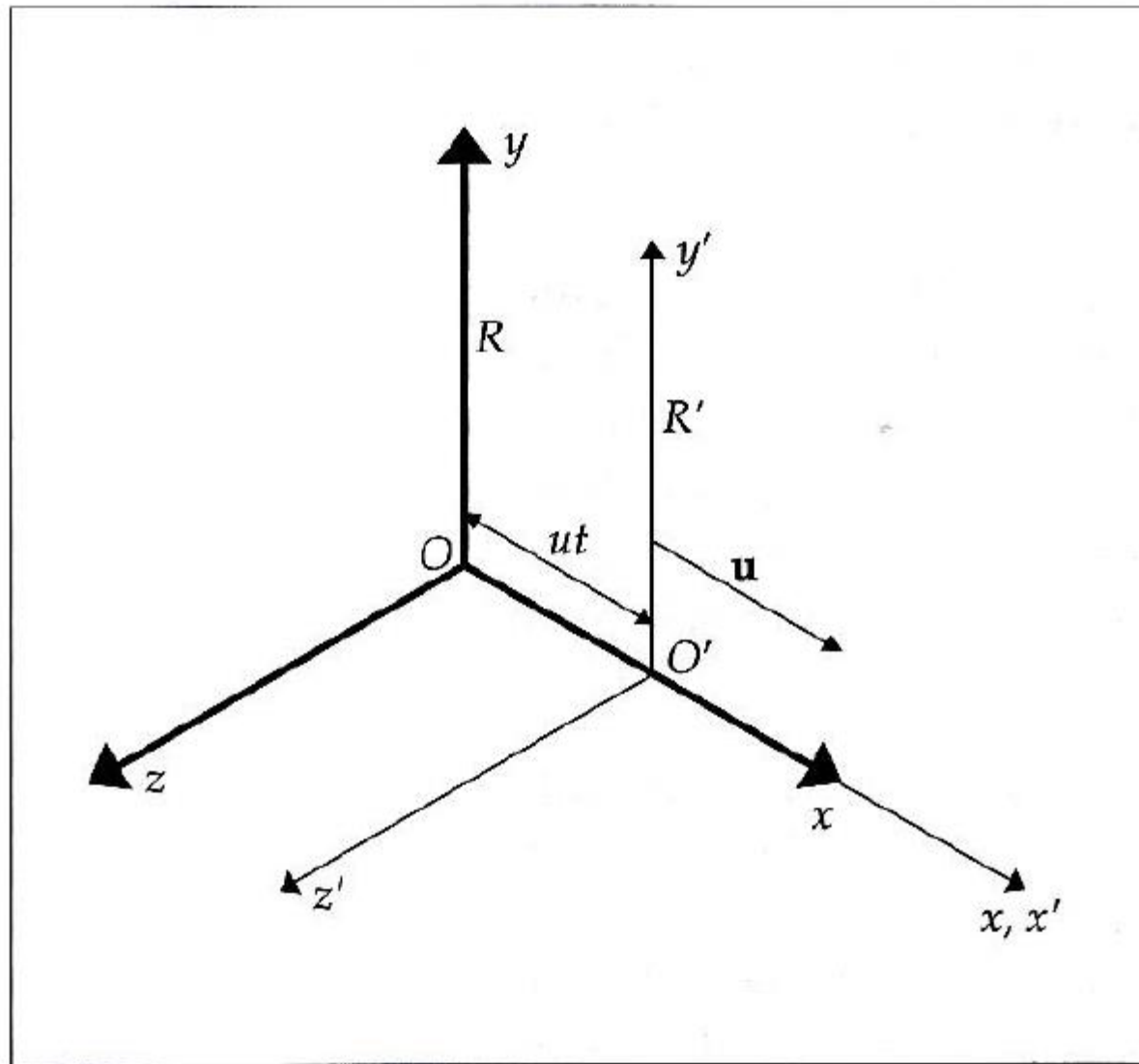
Relatividade Restrita

A Teoria da Relatividade Restrita foi proposta por Albert Einstein, em 1905, no mesmo ano que ele publicou o seu famoso trabalho sobre o efeito fotoelétrico. As ideias de Einstein tiveram enorme impacto na ciência do século 20, bem como importantes implicações filosóficas, epistemológicas e culturais. A visão do mundo embutida na teoria da relatividade é bastante diferente da oriunda da chamada mecânica clássica e levou bastante tempo para ser aceita. Mesmo em 1922, ano em que Einstein foi agraciado com o prêmio Nobel, não havia consenso na comunidade científica acerca da validade da teoria da relatividade, tendo o prêmio Nobel sido concedido pelo seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico.

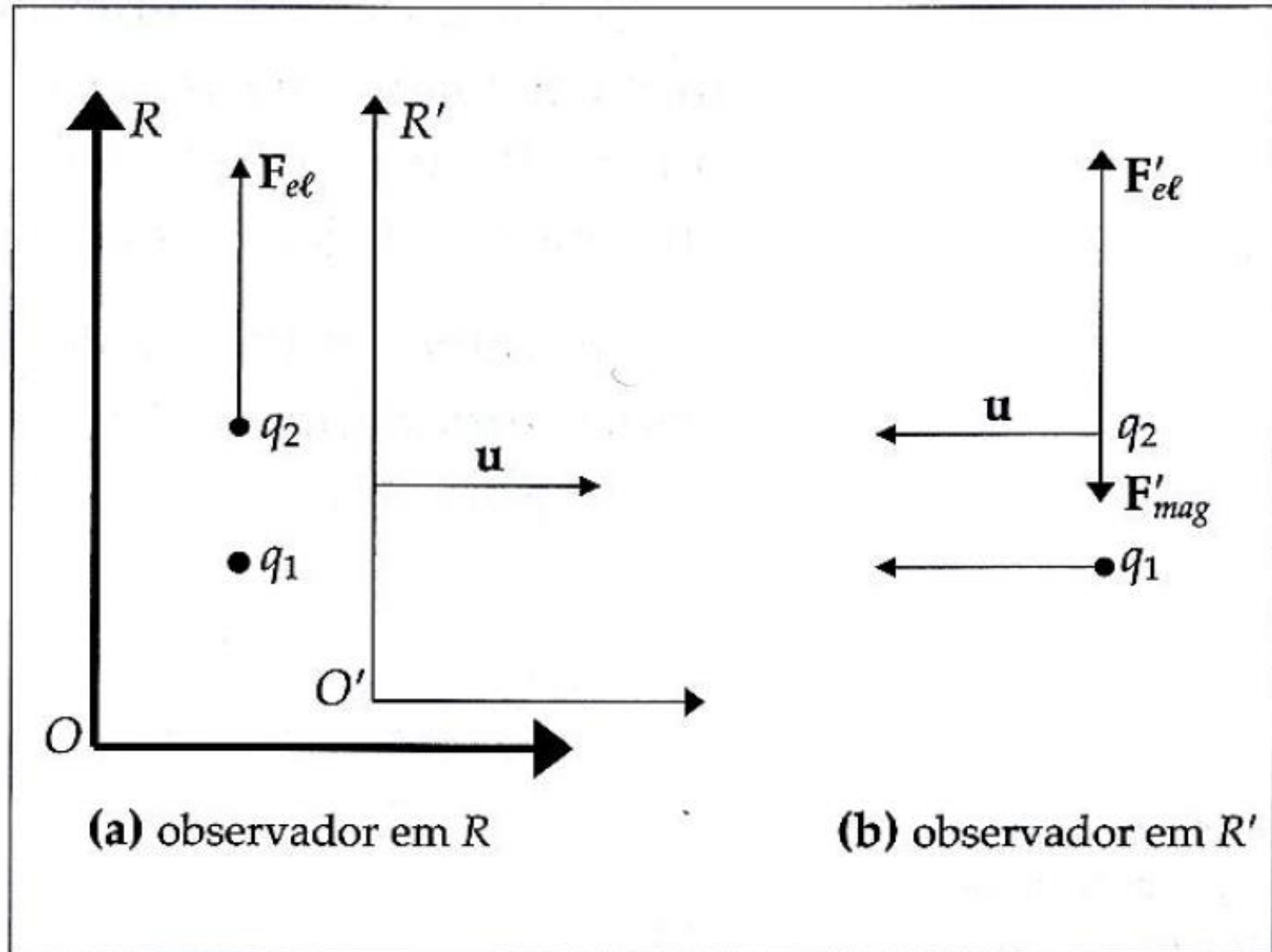
A relatividade mudou o modo de trabalhar em ciência. Segundo a concepção existente e dominante na época, o conhecimento científico deveria ter início em observações cuidadosas do comportamento dos fenômenos da natureza, que mostrariam a existência de uma regularidade. Estas percepções levariam à formulação de leis que, após serem testadas e generalizadas, passariam a fazer parte de teorias.

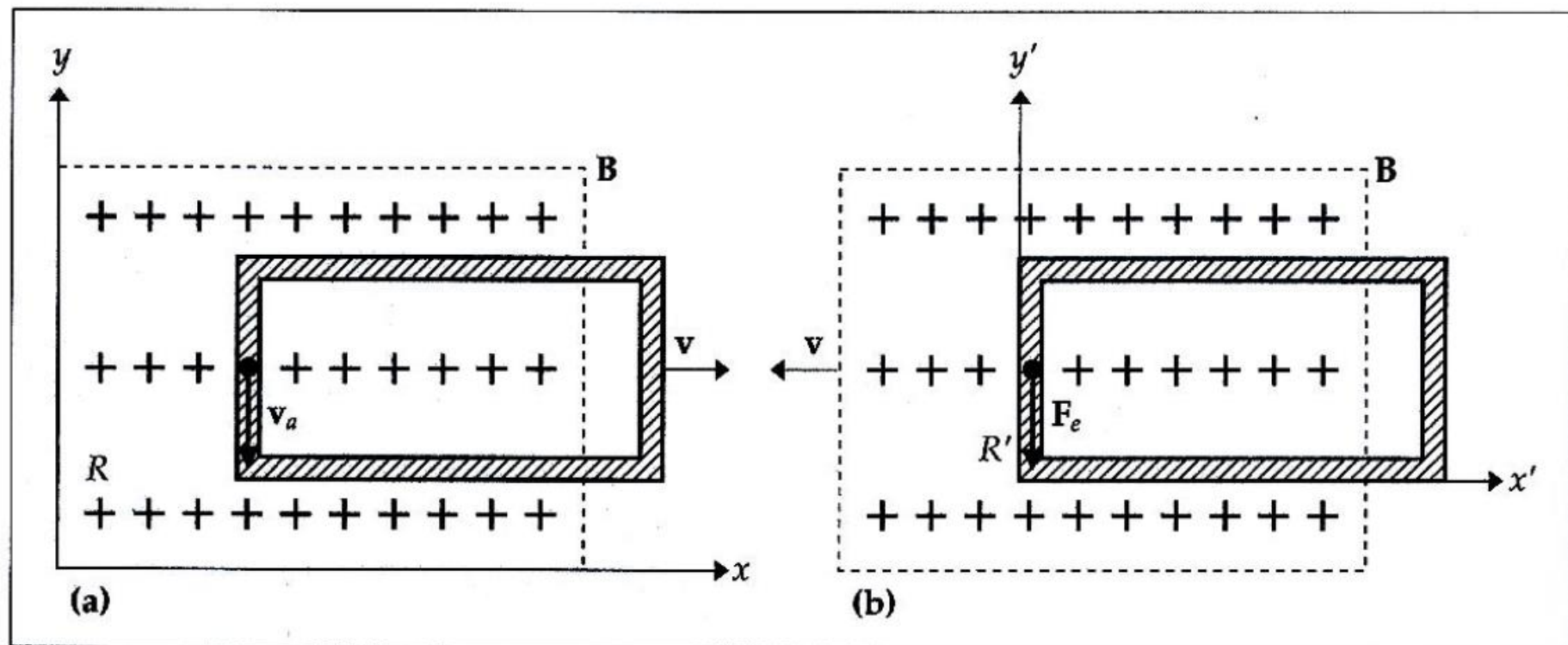
O modo como a relatividade foi gerada é completamente diferente à visão do processo científico existente. Ao ser proposta, a teoria da relatividade possuía pouco ou nenhum suporte empírico, sendo concebida a partir de concepções gerais sobre o universo.

Referenciais Inerciais



Incompatibilidade das TG no eletromagnetismo



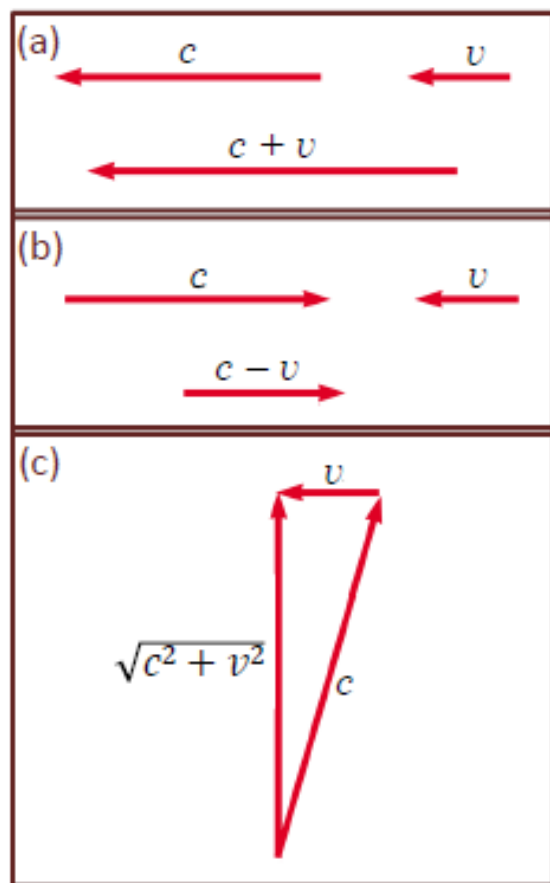


A velocidade da luz

1800: Físicos achavam que a luz se movia através de um meio chamado éter e que a velocidade da luz era c (3×10^8 m/s) em um referencial especial e absoluto, em repouso em relação ao éter, e que a equação de transformação de velocidade de Galileo era esperada ser válida em qualquer referencial que se movesse com velocidade v relativa ao referencial absoluto do éter. A existência deste referencial absoluto mostraria que a luz era similar a todos os outros tipos de ondas clássicas e que as idéias de Newton sobre um referencial absoluto seriam verdadeiras. Assim, a comprovação da existência do éter era essencial. Experiências envolvendo a luz se movendo em um meio, mesmo nas velocidades mais altas que poderiam ser obtidas em laboratório, não eram capazes de detectar mudanças tão pequenas quanto $c \pm v$. Em meados de 1880, cientistas decidiram utilizar a Terra como o referencial em movimento para melhorar as chances de detectar pequenas mudanças na velocidade da luz. Como observadores fixos na Terra, seríamos estacionários e o referencial do éter, contendo o meio para a propagação da luz, passaria por nós com velocidade v . A determinação da velocidade da luz, nestas circunstâncias, é como determinar a velocidade de um avião viajando em uma corrente de ar (vento), ou seja, podemos pensar em um “vento do éter” soprando através do aparato de medida fixo na Terra.

A velocidade da luz

Um método direto para detectar o “vento do éter” usa um aparato fixo na Terra para medir a influência deste vento na velocidade da luz. Se v é a velocidade do éter em relação a Terra, então a velocidade da luz deveria ter seu valor máximo, $c + v$, quando se propagando a favor do vento (a),

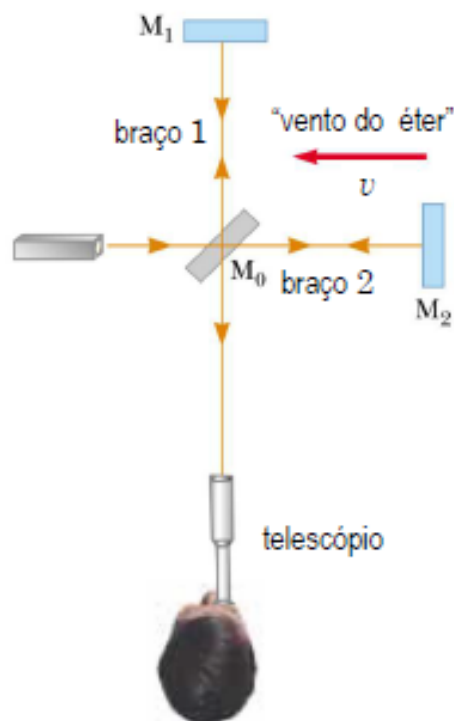


mínimo, $c - v$, quando se propagando contra o vento (b), e um valor intermediário, $\sqrt{c^2 + v^2}$, quando se propagando em direção perpendicular ao “vento do éter”. Se é assumido que o Sol está em repouso no éter, então a velocidade do “vento do éter” deveria ser igual à velocidade orbital da Terra ao redor do Sol, que tem a magnitude aproximada de 3×10^4 m/s. Assim, seria possível detectar uma mudança, na velocidade, de aproximadamente 1 parte em 10^4 para medidas efetuadas a favor ou contra o vento. Entretanto, todas as tentativas efetuadas para detectar tais modificações e estabelecer a existência do éter e do referencial absoluto, se mostraram frustradas. Com isso, concluiu-se que a equação de transformação de velocidades de Galileo estava incorreta.

Velocidade da luz

Experiência de Michelson-Morley

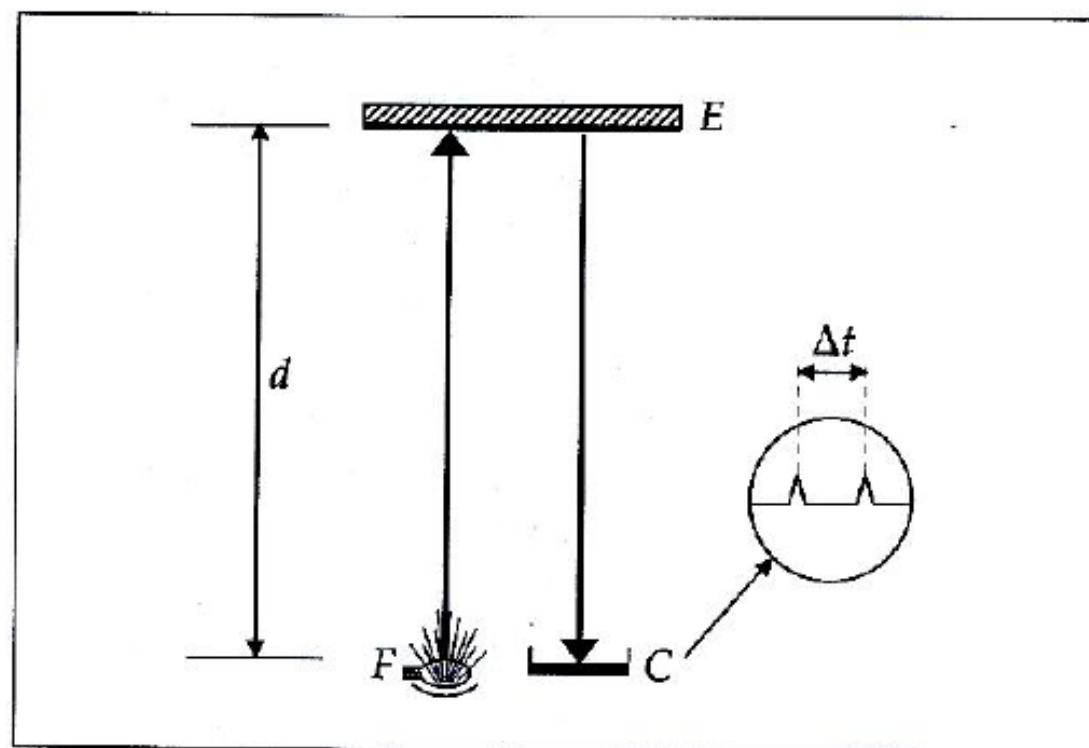
O experimento mais famoso elaborado para detectar as pequenas diferenças na velocidade da luz foi feito em 1881 por A. A. Michelson e repetido, sob várias e diferentes condições, por ele e Edward W. Morley. O arranjo do interferômetro foi de-



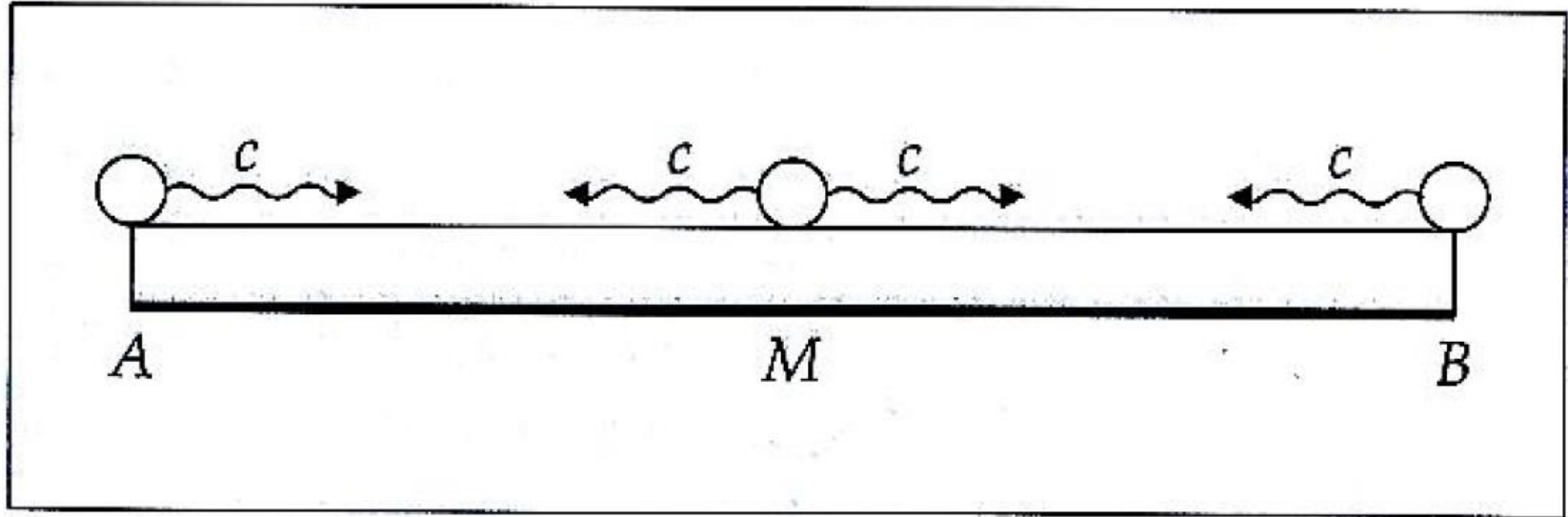
senhado para detectar a velocidade da Terra em relação ao hipotético éter. O braço 2 foi alinhado ao longo da direção de movimento da Terra através do espaço. A Terra se movendo através do éter com velocidade v é equivalente ao éter fluindo pela Terra no sentido oposto, com velocidade v . Este "vento do éter" soprando no sentido oposto ao do movimento da Terra deveria dar uma medida da velocidade da luz, no referencial da Terra, de $c - v$, ao ser detectada no espelho M_2 , se se propagando através do caminho do braço 2, e de $c + v$ ao ser detectada no espelho M_2 , se se propagando através do caminho do braço 1 (após reflexão no espelho M_1), onde c é a velocidade da luz no referencial do éter.

Tabela 3.1

	Física clássica	TRE
Referencial absoluto	O éter é um referencial absoluto.	Não existe referencial absoluto.
Velocidade da luz	A velocidade da luz deve ser medida no referencial do éter e independe do movimento da fonte.	A velocidade da luz é absoluta e independe do movimento da fonte.
Relação espaço-tempo	Espaço e tempo são independentes e absolutos.	Espaço e tempo são interdependentes e relativos e formam o espaço-tempo, que é absoluto.
Transformação entre referenciais inerciais	É feita pela TG.	É feita pela TL.

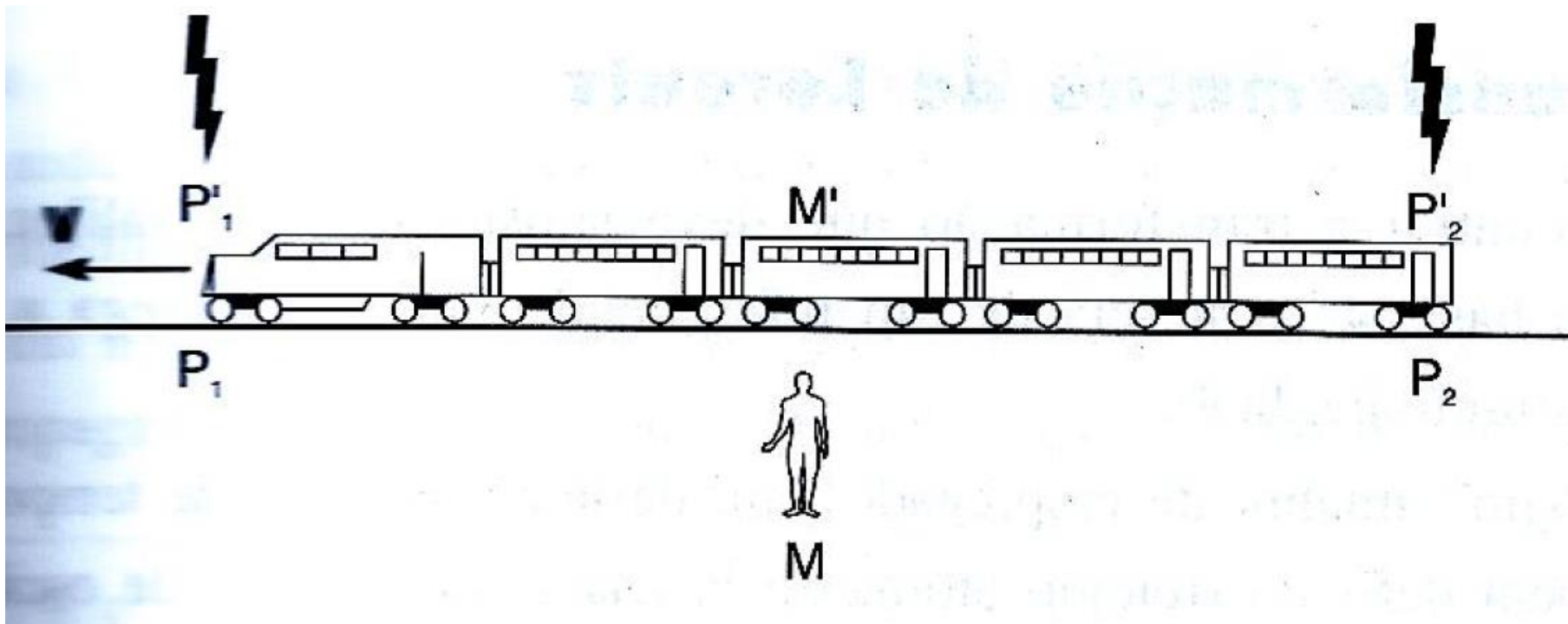


Sincronização de relógios no mesmo referencial



Toda medida de tempo se baseia numa verificação de simultaneidade

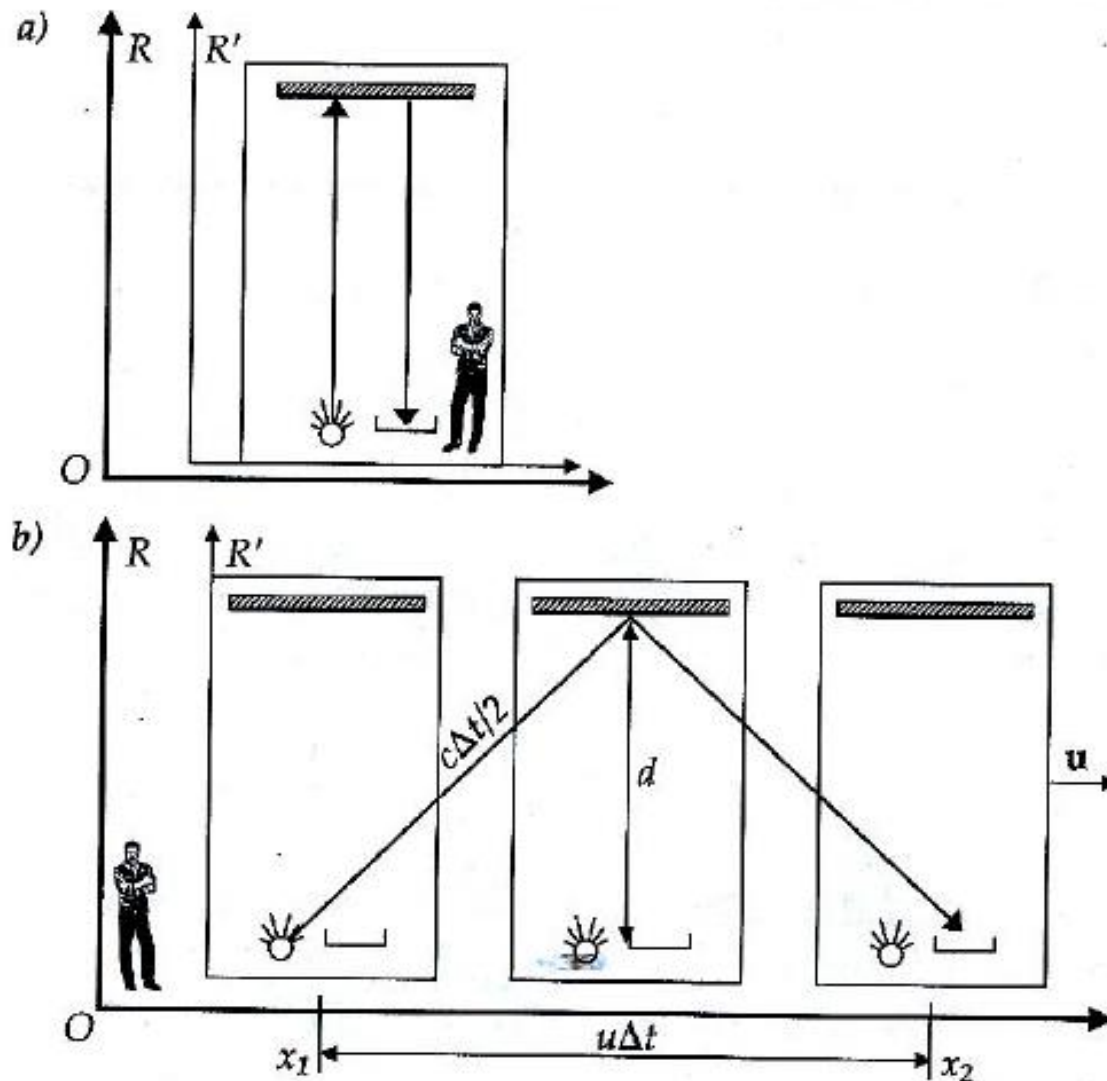
Se dois eventos em um referencial inercial são simultâneos para
Um observador estacionário neste referencial, serão simultâneos
Para qualquer outro observador estacionário no mesmo referencial



Eventos 1 e 2 são simultâneos em R , já que chegam em M no mesmo instante.

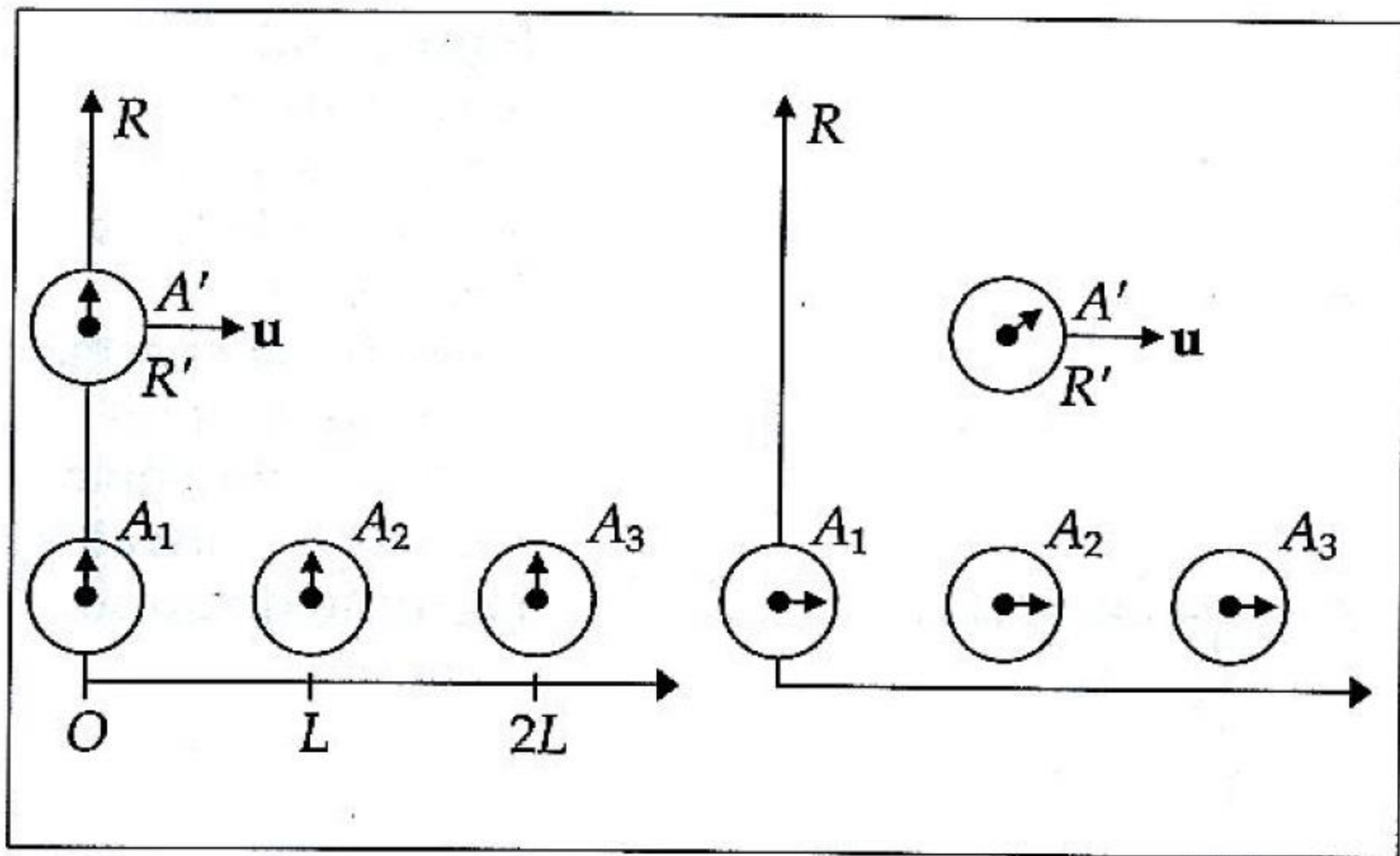
Entretanto, não são simultâneos em R' , já que o sinal do evento 1 chega antes em M' do que o sinal 2.

Dilatação do tempo



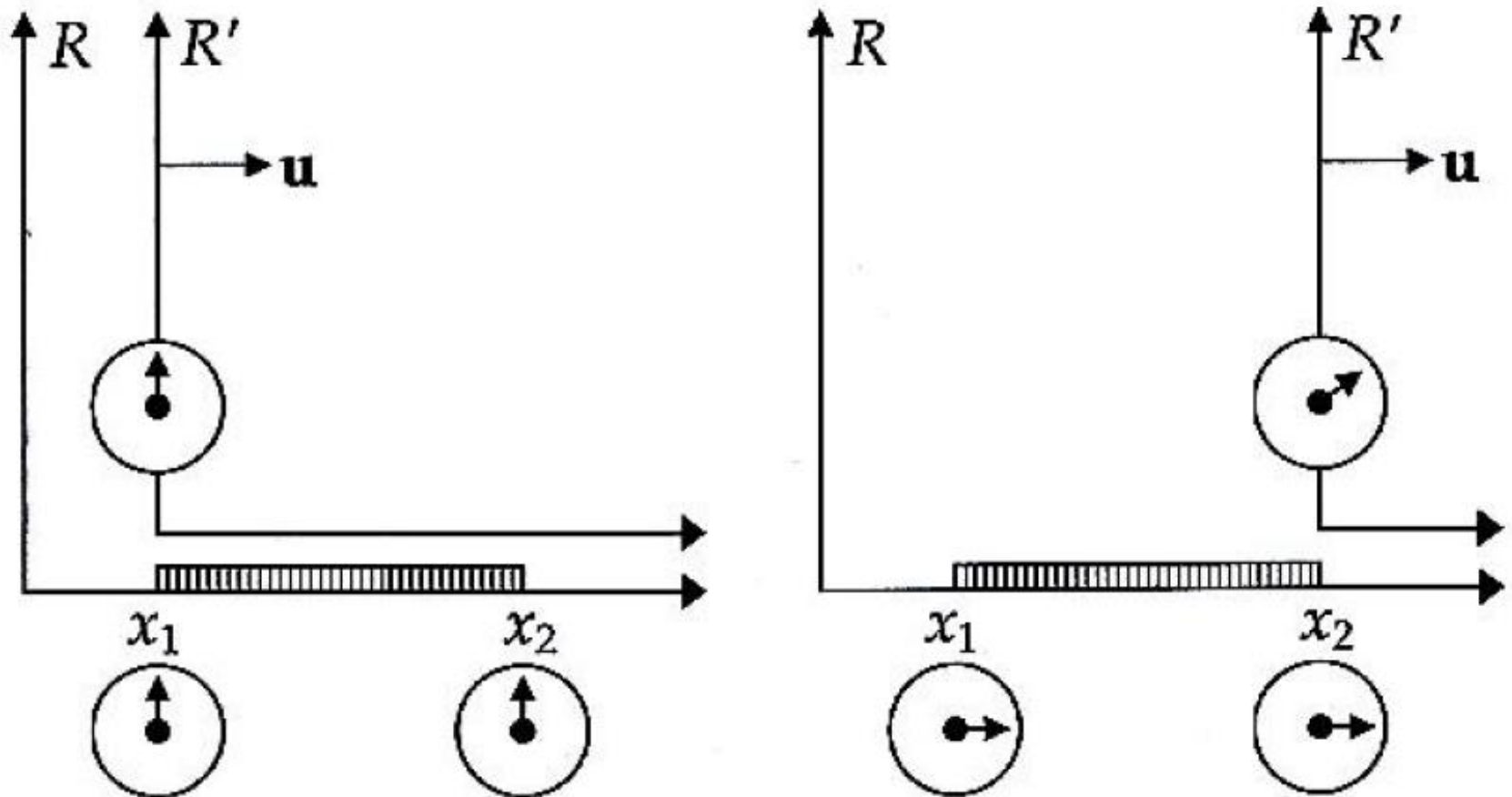
$$\Delta t = \gamma \Delta \tau$$

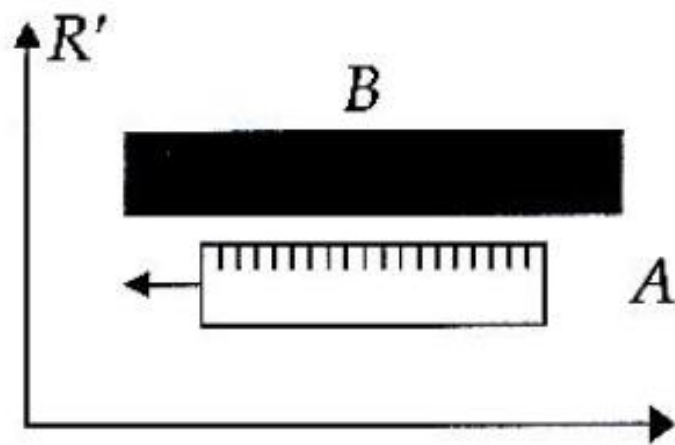
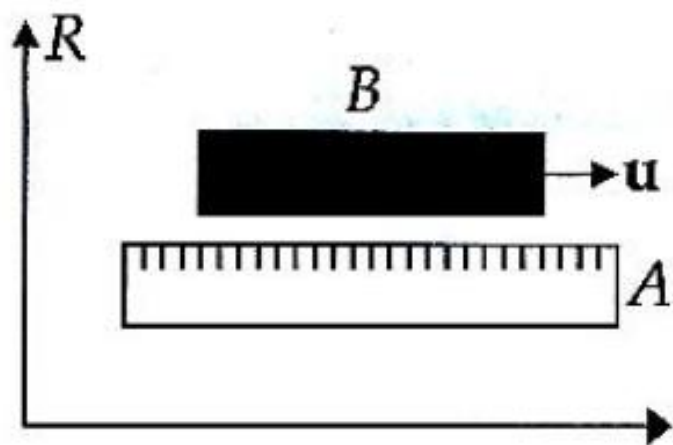
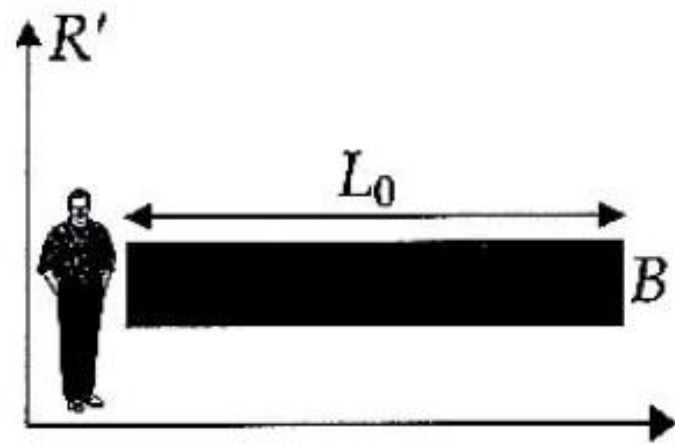
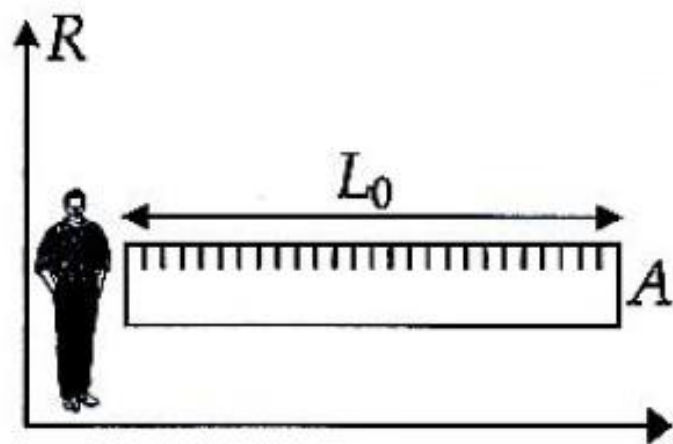
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$



Relógios A_1 , A_2 , A_3 , previamente sincronizados, andam mais rápido que relógio A' .

Contração do comprimento na direção do movimento





Relatividade Restrita

Um observador em repouso, em relação a uma régua, não pode perceber a sua contração, mas alguém que a observe em movimento, pode. Einstein afirmou (1911): *“A questão se a contração existe ou não é confusa. Ela “realmente” não existe, na medida em que não existe para um observador que se move com a barra; ela “realmente” existe, entretanto, no sentido em que pode, em princípio, ser demonstrada por um observador em repouso”*. Por exemplo, para documentar a contração do espaço, vamos pensar em fotografias e supor que não hajam distorções quando fotografamos um objeto que se move com velocidade muito alta, da ordem de c . Se colocássemos, lado a lado, um auto-retrato de João e a foto tirada por Maria, teríamos a seguinte situação

Auto-retrato



Foto tirada por
Maria



Relatividade Restrita

Se, por outro lado, fosse João quem tirasse uma foto de Maria, ela apareceria contraída na direção do movimento, pois o efeito da contração é simétrico, e teríamos

Foto tirada por João

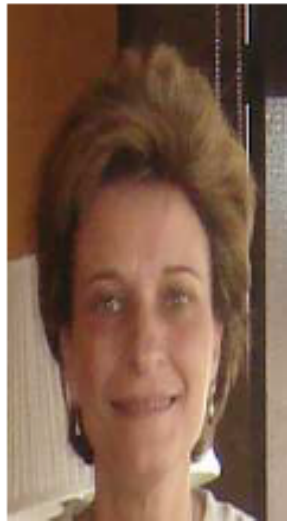
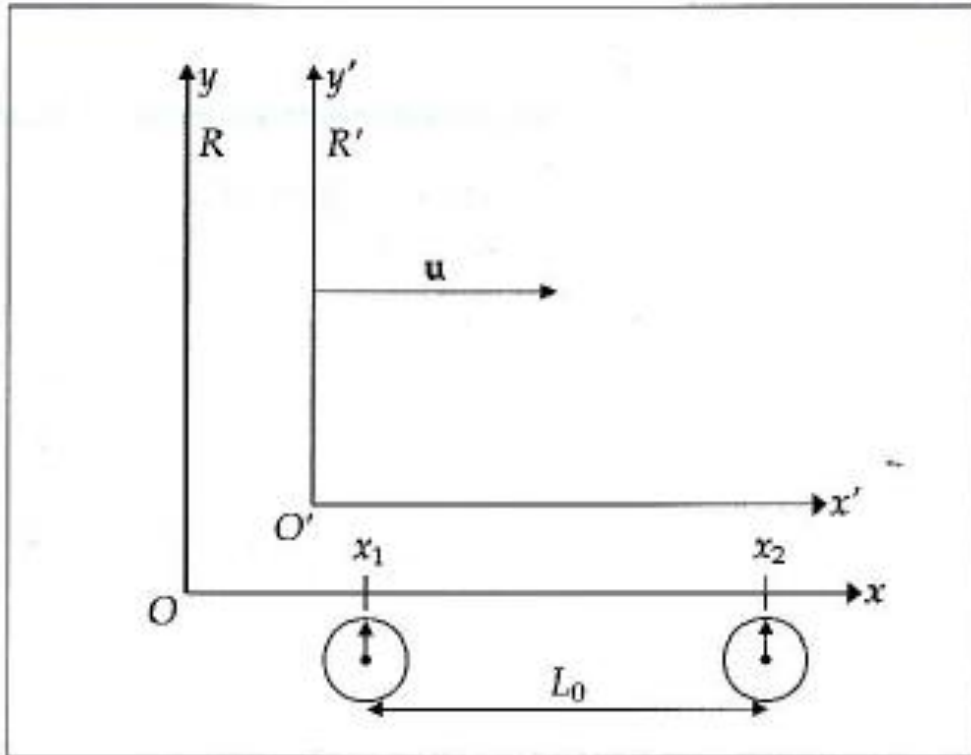


Foto tirada por Maria



Esse tipo de situação não é viável na prática, pois não existe tecnologia que permita que pessoas se movam com velocidades relativas tão altas. Em geral, é muito difícil dotar corpos macroscópicos de velocidades tão altas, pois as energias de aceleração são muito grandes. No caso de partículas microscópicas, por outro lado, isso é relativamente fácil.

Diferença de sincronização de relógios

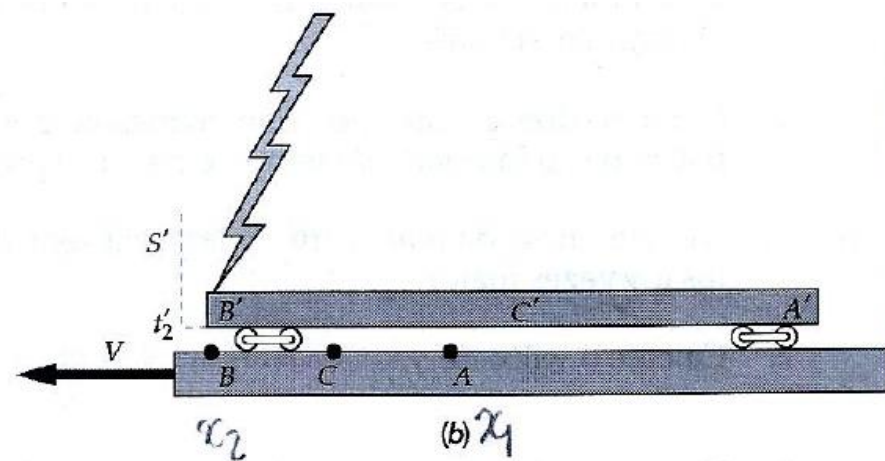
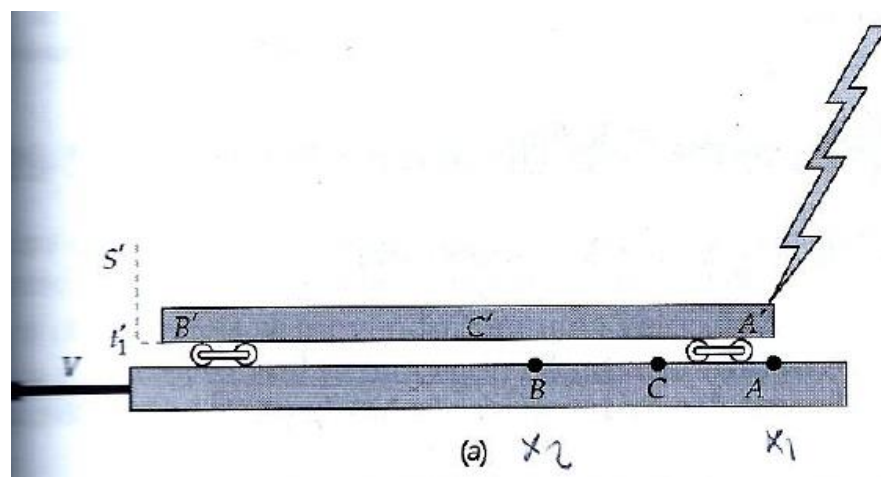
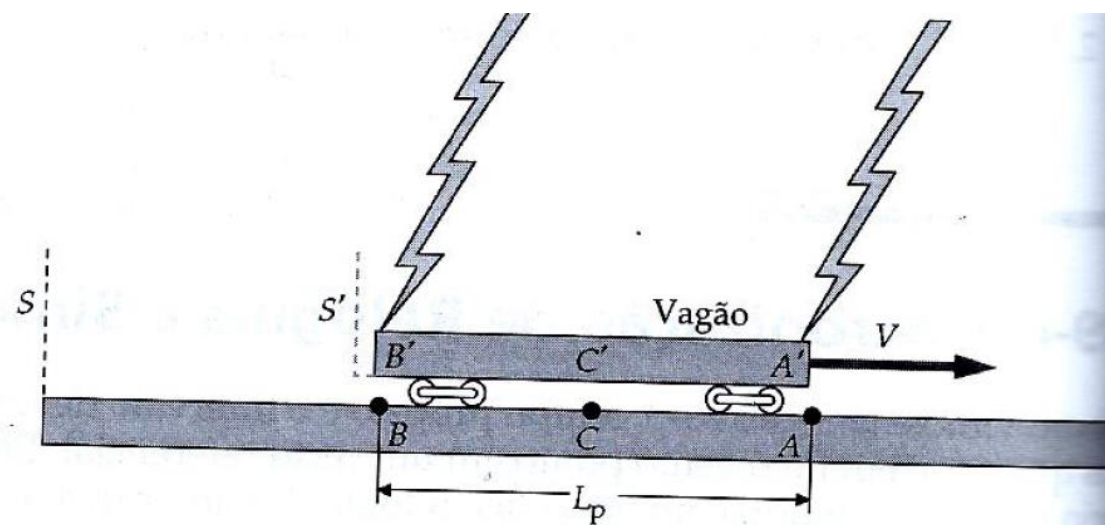


Dois relógios situados no referencial inercial R , separados pela distância L_0 , sincronizados, não estão sincronizados em outro referencial inercial R' .

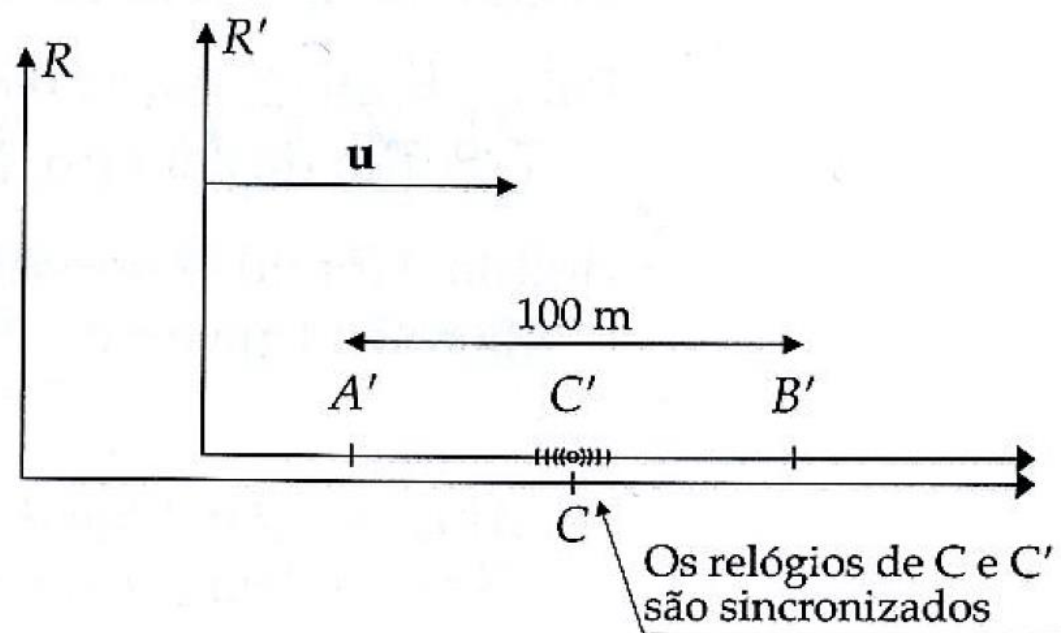
$$\Delta t' = -\gamma \frac{u}{c^2} L_0$$

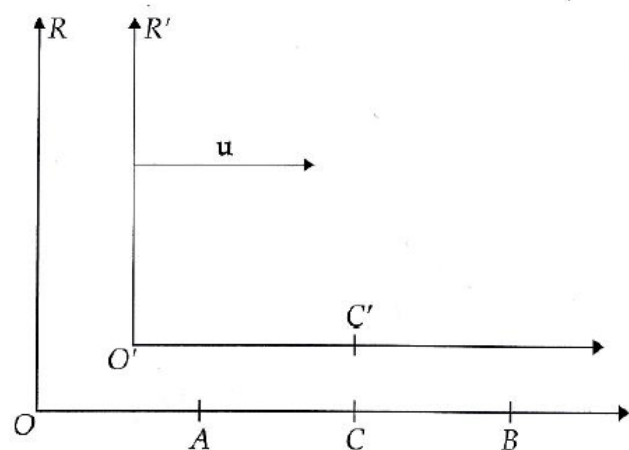
$$\Delta t' = \gamma \Delta t$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\Delta t'}{\gamma} = -\frac{u}{c^2} L_0$$



Uma astronave cujo comprimento próprio é 100 m passa por uma plataforma espacial com velocidade $u = 0,6c$. O piloto pode acender duas lâmpadas, colocadas nas extremidades A' e B' da nave, por meio de sinais luminosos mandados do ponto C' , situado no meio da distância $A'B'$. O piloto, situado em C' , ao passar pelo observador C , situado na plataforma, dispara um *flash*. Piloto e observador disparam seus relógios nesse momento. Ache: (a) a distância entre as lâmpadas para o observador na plataforma; (b) a separação entre os clarões em A' e B' no relógio do piloto em C' ; (c) a separação entre esses clarões no relógio do observador em C .





Na Figura 3.5, um observador C no referencial R coloca relógios nos pontos A e B , distantes um do outro 10 minutos-luz e uma lâmpada no ponto intermediário de A e B , onde permanece. O observador C' está no referencial R' , que se move com velocidade $u = 0,6 c$ relativa a R , paralelamente ao eixo x . Quando C' passa por C ambos acionam seus relógios e, nesse momento, C dispara um pulso de luz para sincronizar os relógios A e B .

- Qual é a distância medida por C' entre os relógios A e B ?
- Quais são as indicações do relógio de C' quando o pulso de luz chega a A e B ?
- Qual é o intervalo de tempo entre a recepção do pulso de luz em A e B , de acordo com C ?
- Quanto tempo o relógio A está adiantado ou atrasado em relação ao relógio B , de acordo com C' ?

Transformações de Lorentz: dilatação do tempo

Vamos imaginar que existam duas bombas idênticas, com pavios iguais, que levam um tempo τ para explodir, quando em repouso (τ é o tempo próprio de explosão de cada bomba). Maria acende os pavios das duas ao mesmo tempo. No instante em que as bombas são acesas, João, passando de carro com velocidade v para a direita, pega a bomba número 2 e a leva. Para estudar como a explosão das duas bombas são observadas por João e Maria e como descrever os eventos nos dois referenciais, vamos listar os principais eventos adotando como origem do espaço-tempo dos dois referenciais, o acendimento das duas bombas e a passagem de João por Maria, e que a velocidade relativa se dá ao longo do eixo x dos dois referenciais, não havendo, portanto, modificações nas posições relativas aos eixos y e z .

Evento de referência: acendimento das bombas e passagem de João

$$S_M: (0,0,0,0)$$

$$S_J: (0,0,0,0)$$

Evento A: explosão da bomba 1 (Maria)

$$S_M: (0,0,0,\tau)$$

$$S_J: (x_J^A, 0, 0, t_J^A)$$

Evento B: explosão da bomba 2 (João)

$$S_M: (x_M^B, 0, 0, t_M^B)$$

$$S_J: (0,0,0,\tau)$$

Transformações de Lorentz: dilatação do tempo

Para obtermos as coordenadas do **Evento B**, no referencial de Maria, devemos usar as transformações de Lorentz do referencial de João para o de Maria ($S_J \rightarrow S_M$), pois já sabemos as coordenadas do **evento A** neste referencial. Assim,

Evento A: explosão da bomba 1 (Maria)

$$S_M: (0,0,0,\tau)$$

Evento B: explosão da bomba 2 (João), no referencial de Maria será:

$$x_M^B = \gamma(x_J^B + vt_J^B) = \gamma(0 + v\tau) = \gamma v\tau$$

$$t_M^B = \gamma(t_J^B + (v/c^2)x_J^B) = \gamma(\tau + 0) = \gamma\tau$$

$$S_M: (x_M^B, 0, 0, t_M^B) = (\gamma v\tau, 0, 0, \gamma\tau)$$



Transformações de Lorentz: dilatação do tempo

Para obtermos as coordenadas do **Evento A**, no referencial de João, devemos usar as transformações de Lorentz do referencial de Maria para o de João ($S_M \rightarrow S_J$), pois já sabemos as coordenadas do **evento B** neste referencial.

Evento B: explosão da bomba 2 (João)

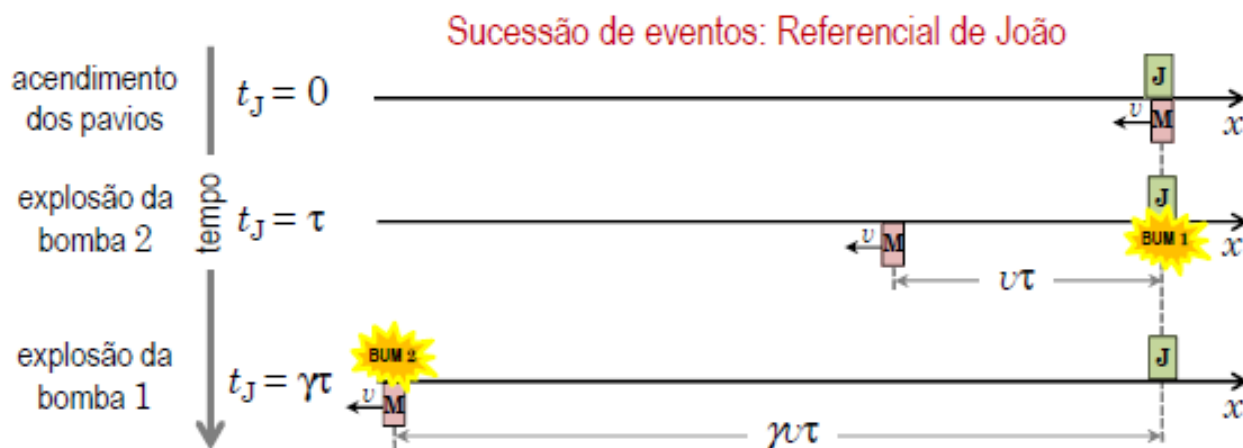
$$S_J: (0,0,0,\tau)$$

Evento A: explosão da bomba 1 (Maria), no referencial de João será:

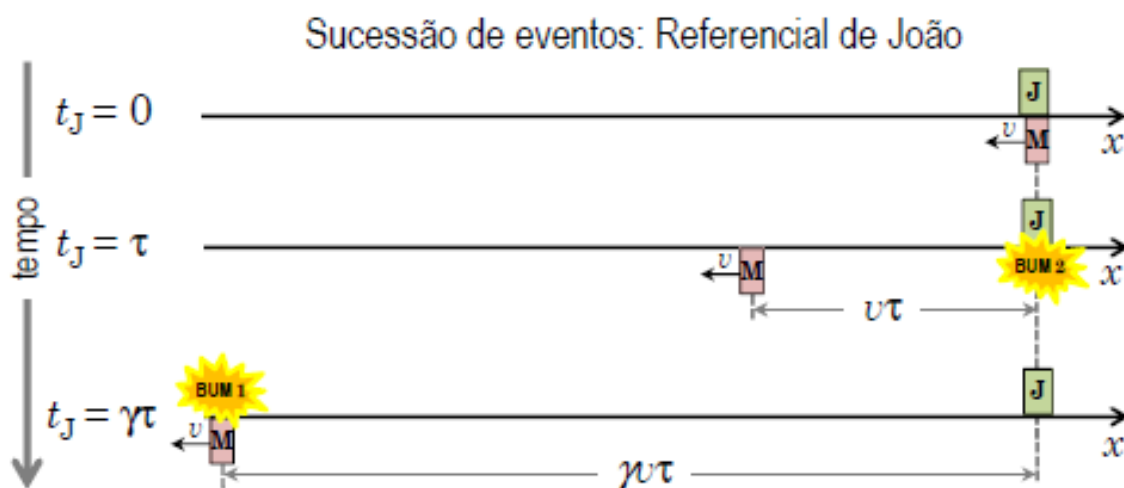
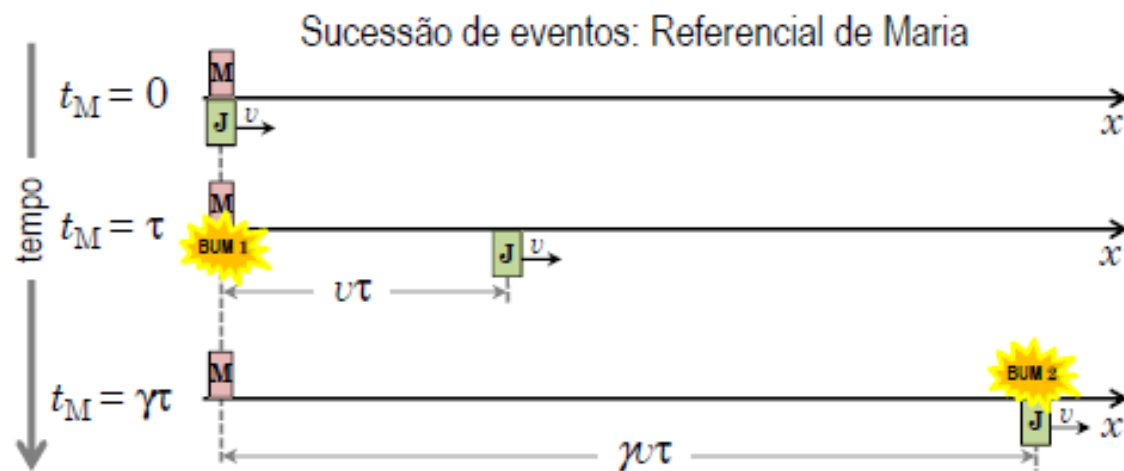
$$x_J^A = \gamma(x_M^A - vt_M^A) = \gamma(0 - v\tau) = -\gamma v\tau$$

$$t_J^A = \gamma(t_M^A - (v/c^2)x_M^A) = \gamma(\tau + 0) = \gamma\tau$$

$$S_J: (x_J^A, 0, 0, t_J^A) = (-\gamma v\tau, 0, 0, \gamma\tau)$$



Transformações de Lorentz: dilatação do tempo

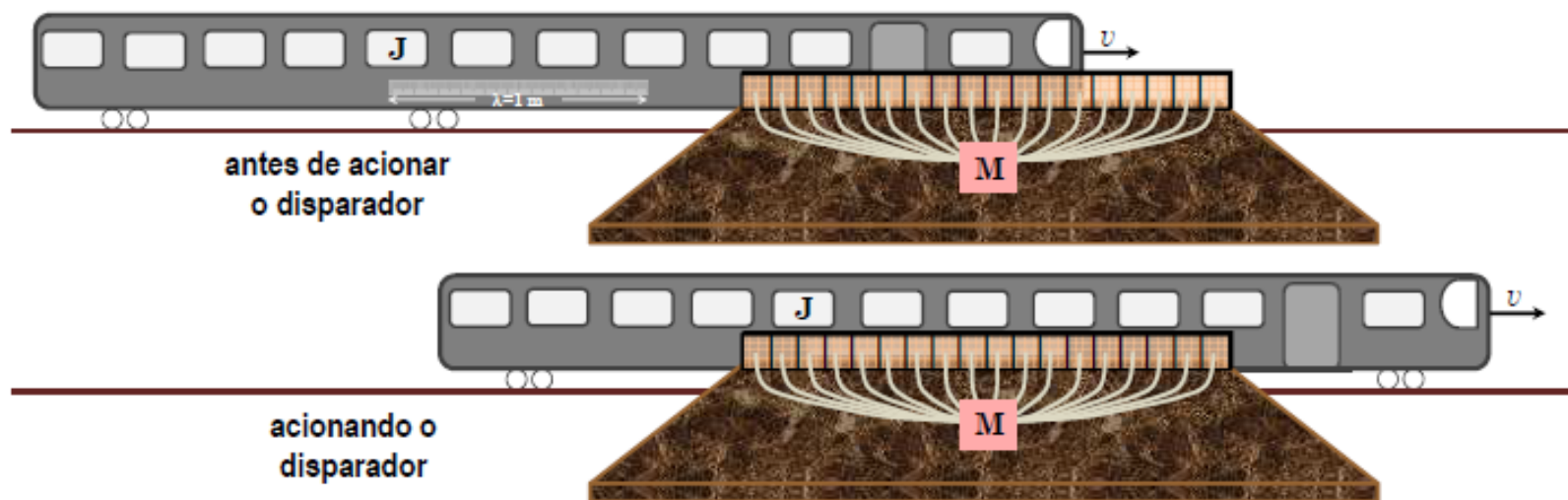


Transformações de Lorentz: dilatação do tempo

Inicialmente, há o acendimento dos pavios em $(0,0,0,0)$ dos dois referenciais. Em seguida, passados τ segundos, no referencial de Maria, há a explosão da bomba 1, na origem do sistema. Depois, passados $\gamma\tau$ segundos, a bomba 2 explode, na posição $\gamma v\tau$. Assim, apesar de idênticas, as bombas não explodem simultaneamente. A bomba 2, em movimento em relação a Maria, demora mais para explodir, do que a que ficou em repouso, indicando que houve dilatação do tempo. Essa dilatação é um efeito real, pois mesmo sem sair do seu referencial, Maria poderia medir a posição de onde explodiu a bomba 2 (formou uma cratera no chão). Medindo esta distância, em seu referencial, e sabendo qual a velocidade v relativa entre os referenciais, ela pode calcular facilmente o instante em que a bomba 2 explodiu, em seu referencial ($t = x/v$), e comparar com o resultado da medida direta do instante em que a bomba 1 explodiu. No referencial de João, também as bombas não explodem simultaneamente, mas agora a bomba 2 explode antes da bomba 1, pois no referencial de João é o tempo de Maria que aparece dilatado e, portanto, a bomba que ela carrega demora mais para explodir.

Transformações de Lorentz: contração do espaço

João viaja em um trem que se desloca com velocidade $v = 4c/5$, para a direita em relação à Terra, onde existe uma régua de comprimento $\lambda = 1 \text{ m}$, paralelamente à direção de sua velocidade. Maria está na plataforma de uma estação. Ela alinha um número muito grande de máquinas fotográficas, dispostas lado a lado, conectadas por fios de mesmo comprimento a um disparador.



Acionando o disparador, Maria pode tirar fotos simultâneas, no seu referencial, capazes de abranger a régua inteira. Este sistema permite a ela medir o comprimento da régua de João. Para isso, ela deve fazer o sistema funcionar e revelar as fotos, inspecionando-as. Ela encontrará, em uma delas, a extremidade esquerda da régua e, em outra, a direita. Para obter o comprimento da régua de João basta, em seguida, medir as distâncias entre os pontos, na plataforma, onde estavam as duas máquinas que tiraram estas fotos.

Transformações de Lorentz: contração do espaço

Os eventos mais importantes que, efetivamente, mostram o tamanho da régua, são as fotos dos seus dois extremos. Estes eventos são, por construção, simultâneos no referencial da estação. Entretanto, nada podemos afirmar, a priori, sobre os instantes em que eles ocorrem no referencial do trem, onde está João.

Evento de referência: foto da extremidade esquerda da régua: $S_M: (0,0,0,0)$ e $S_J: (0,0,0,0)$

Evento A: foto da extremidade direita da régua: $S_M: (x_M^A, 0, 0, 0)$ e $S_J: (\lambda, 0, 0, t_J^A)$

$$\lambda = \gamma[x_M^A] \Rightarrow x_M^A = \lambda/\gamma$$
$$t_J^A = \gamma[-v x_M^A/c^2] = -v \gamma x_M^A/c^2 \Rightarrow t_J^A = -v\lambda/c^2$$

O comprimento da régua no referencial de Maria, L_M , é dado pela distância entre as duas máquinas fotográficas que participaram do dois eventos (**evento de referência e evento A**), que é dado por $L_M = x_M^A - 0 = \lambda/\gamma$. Usando a velocidade do trem temos que $\gamma=5/3$ e o comprimento da régua, medido por Maria, é $L_M = 0,6$ m. Concluimos, então, que o comprimento da régua tornou-se menor no referencial de Maria. Note que essa contração não é aparente. Ela é real e está registrada nas fotos tiradas!