

Teoria da Relatividade

Profª Maira Souza

1905 - *Annus Mirabilis*

- Albert Einstein – 25 anos
- Funcionário departamento de patentes na Suíça

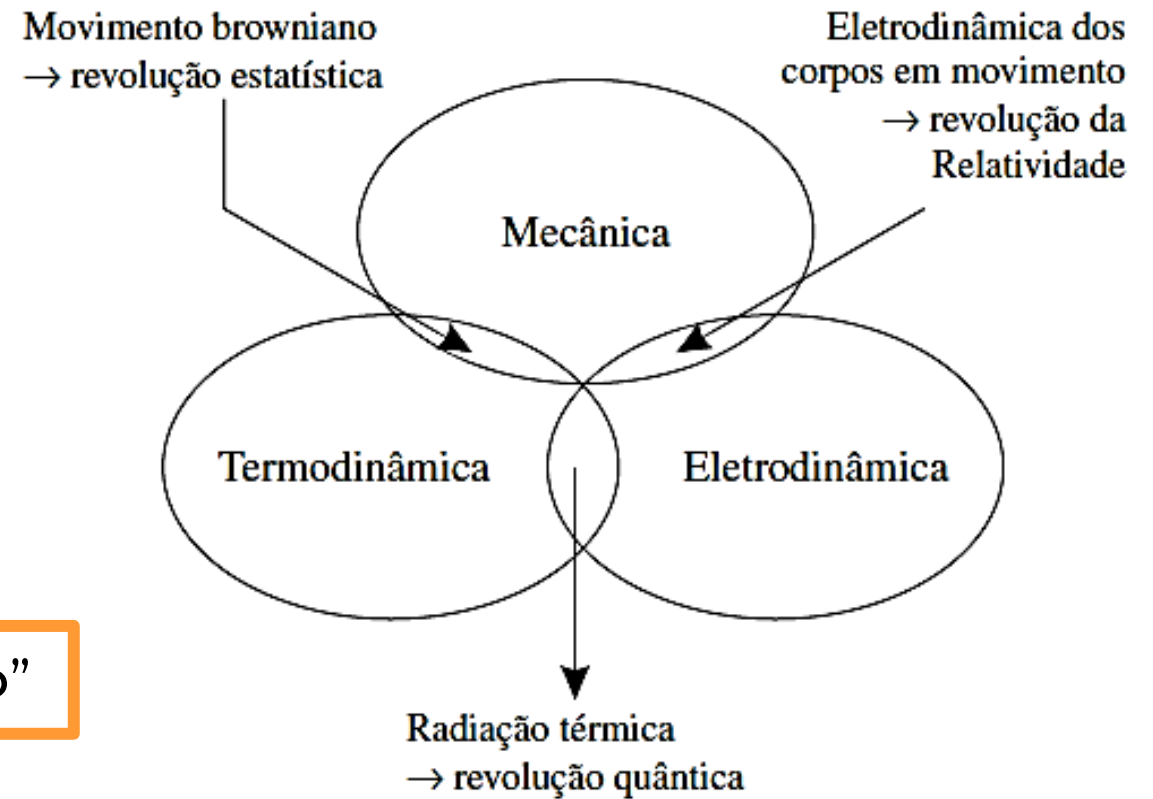
Publicação de 5 artigos



Artigos

- ✓ “Sobre um ponto de vista heurístico concernente à geração e transformação da luz”
- ✓ “Sobre uma nova determinação das dimensões moleculares”
- ✓ “Sobre o movimento de partículas suspensas em fluidos em repouso, como postulado pela teoria molecular do calor”
- ✓ “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”
- ✓ “A inércia de um corpo depende da sua energia?”

Problemas de fronteira na física clássica



Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento

1

Princípio da relatividade:

As leis da física são as mesmas em qualquer sistema de referência inercial.

2

Velocidade da luz:

A velocidade da luz no vácuo é sempre a mesma em qualquer sistema de referência inercial e não depende da velocidade da fonte.

CONSEQUÊNCIAS

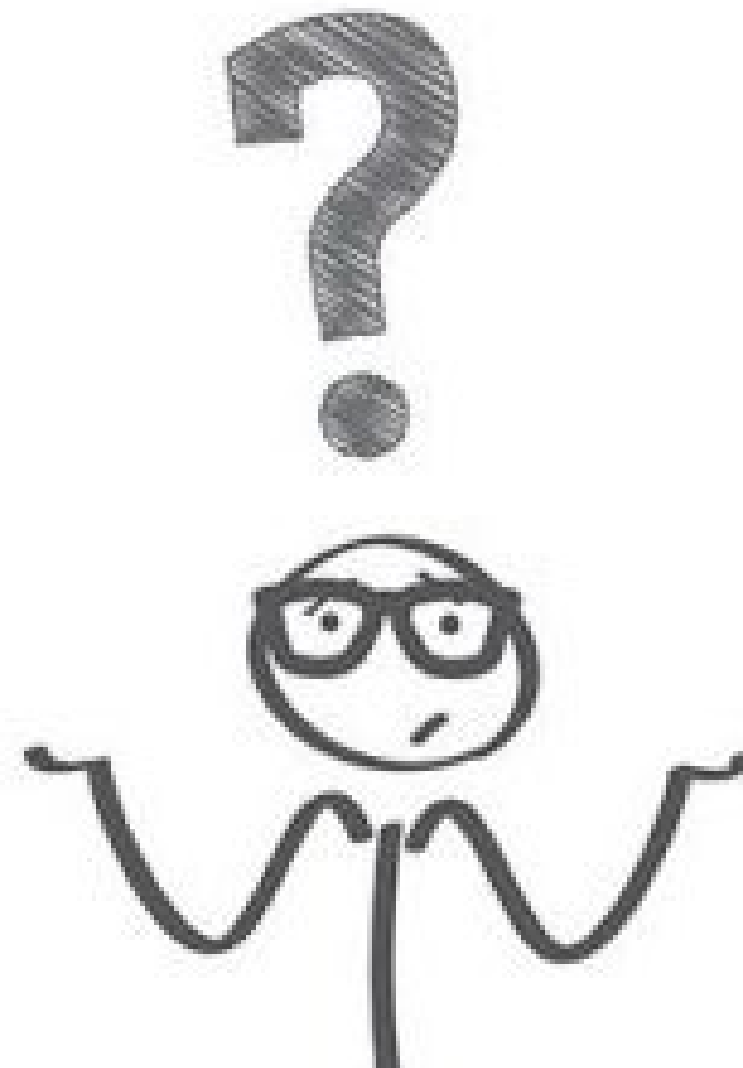


Eventos não são simultâneos para todos os referenciais

Referenciais em movimento relativo medem distâncias e tempos diferentes

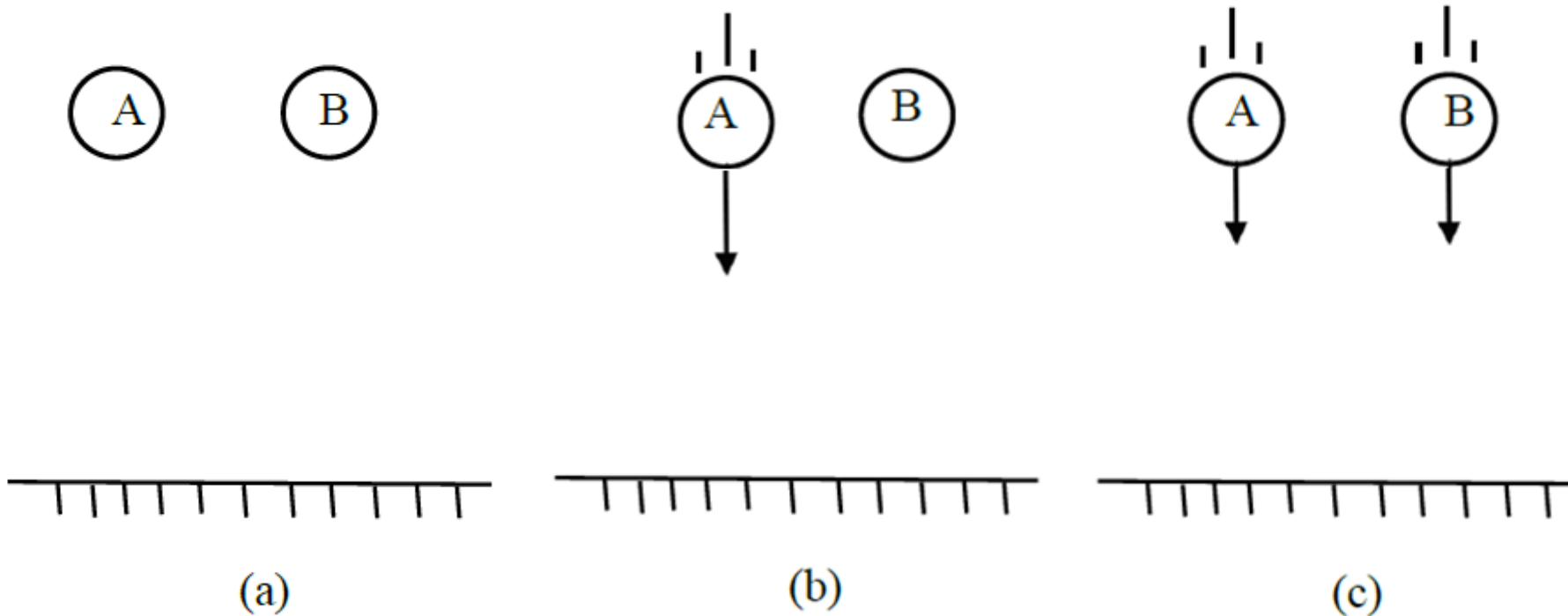
Necessidade de reformulação das leis de Newton para preservar a lei de conservação de energia e conservação do momento linear

Por que a Teoria da Relatividade foi criada?



Relatividade de Galileu

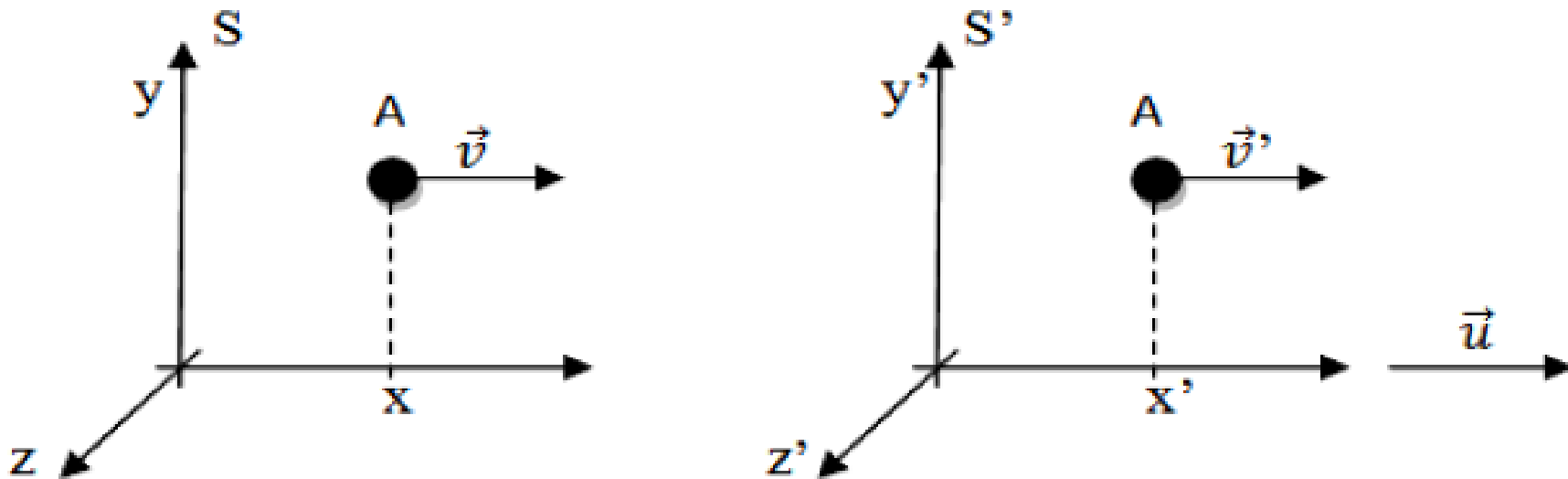
O movimento de um corpo é sempre relativo a um referencial adotado



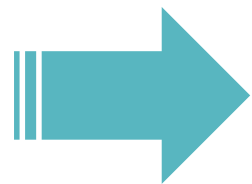
<https://www.youtube.com/watch?v=ssS9k2RK-XE>

Transformações de Galileu

Quando um novo referencial (S') se encontra em movimento uniforme, na direção x , com velocidade \vec{u} , em relação ao primeiro referencial (S), é possível efetuar uma transformação matemática e transpor as informações do movimento do corpo A do referencial S para o referencial S'



$$\begin{cases} x' = x - u_x t \\ y' = y - u_y t \\ z' = z - u_z t \\ t' = t \end{cases}$$



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

Lembrando:
2ª Lei de Newton

$$\vec{F}_R = m \cdot \vec{a}$$

$$\vec{a}' = \vec{a} - \vec{a}_u \quad \rightarrow \quad \vec{a}_u = 0 \quad \rightarrow \quad \vec{a}' = \vec{a}$$

Tempo é absoluto,
não depende do
referencial!

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



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

EXEMPLOS

SITUAÇÃO 1



APROXIMAÇÃO

$$\begin{aligned} V_A &> V_B \\ V_{AB} &> 0 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} V_A &> 0 \\ V_B &> 0 \end{aligned}$$



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

$$V_{AB} = V_A - V_B$$

EXEMPLOS

SITUAÇÃO 2



AFASTAMENTO

$$\begin{aligned} v_A &< v_B \\ v_{AB} &< 0 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} v_A &> 0 \\ v_B &> 0 \end{aligned}$$



$$v' = v - u$$

$$v_{AB} = v_A - v_B$$

EXEMPLOS

SITUAÇÃO 3



APROXIMAÇÃO

$$V_B - \text{negativa}$$
$$V_{AB} > 0$$



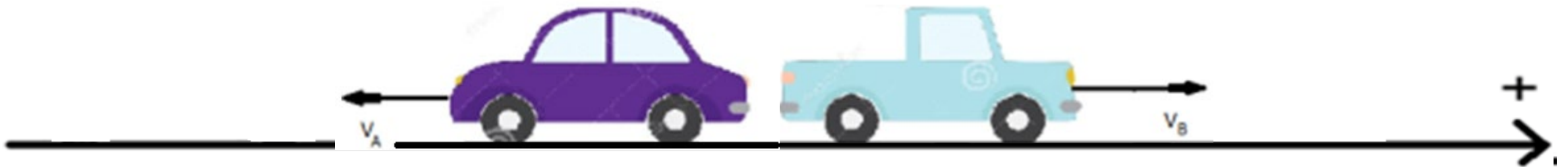
$$V_A > 0$$
$$V_B < 0$$



$$v' = v - u$$
$$V_{AB} = V_A - (-V_B)$$

EXEMPLOS

SITUAÇÃO 4



AFASTAMENTO

$$v_A - \text{negativa}$$
$$v_{AB} < 0$$

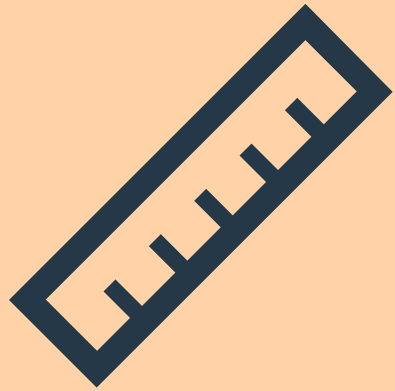


$$v_A < 0$$
$$v_B > 0$$



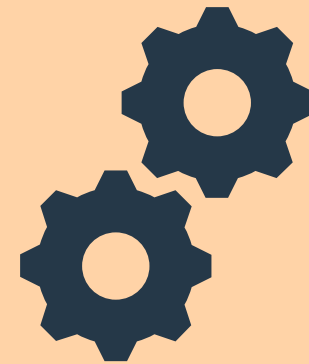
$$v' = v - u$$

$$v_{AB} = -v_A - v_B$$



A aceleração
permanece a
mesma – F_r igual

As leis físicas são
as mesmas em
qualquer
referencial inercial!



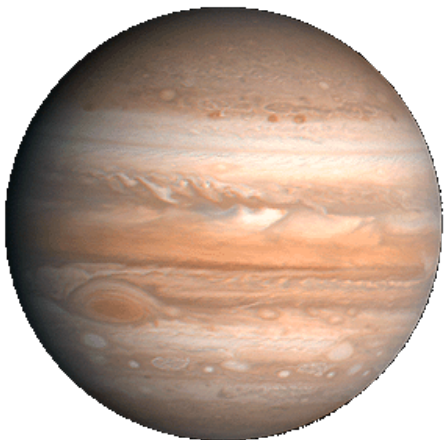
EXERCÍCIOS:

- 1) Você está em um ônibus e joga uma bolinha para cima. Desenhe a trajetória da bolinha que você vê. Desenhe a trajetória da bolinha para alguém na rua.
- 2) Dois carros A e B estão percorrendo uma estrada retilínea com velocidades constantes de 30 m/s e 20 m/s, respectivamente, e separados por uma distância de 100 m em certo instante de observação. Quanto tempo leva até o carro A alcançar o carro B?
- 3) Dois automóveis, A e B, deslocam-se com movimento retilíneo uniforme no mesmo sentido em uma estrada, com velocidades $v_A = 120 \text{ km/h}$ e $v_B = 80 \text{ km/h}$. Responda:
 - a) Qual é a velocidade do carro A em relação ao carro B?
 - b) Em determinado momento, o carro A está a 500 m atrás B. Quanto tempo o carro A levará para alcançar o carro B?

Medição da velocidade da luz – velocidade finita!

- Século XVI pelo astrônomo dinamarquês Olaf Roemer (1644-1710)

Observações astronômicas: previsão dos eclipses das luas de Júpiter



$\cong 3000000000 \text{ m/s}$



James Clerk Maxwell (1831-1879)

Equações de Maxwell - união leis Coulomb, Oersted, Ampère, Biot e Savart, Faraday e Lenz.

União de fenômenos elétricos e magnéticos.



$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Lei de Faraday

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Lei de Ampère-Maxwell

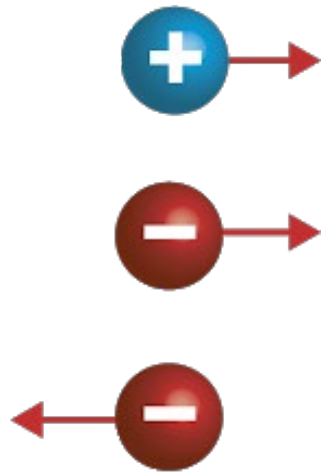
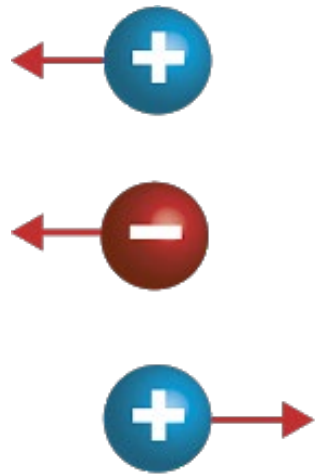
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Lei de Gauss Elétrica

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

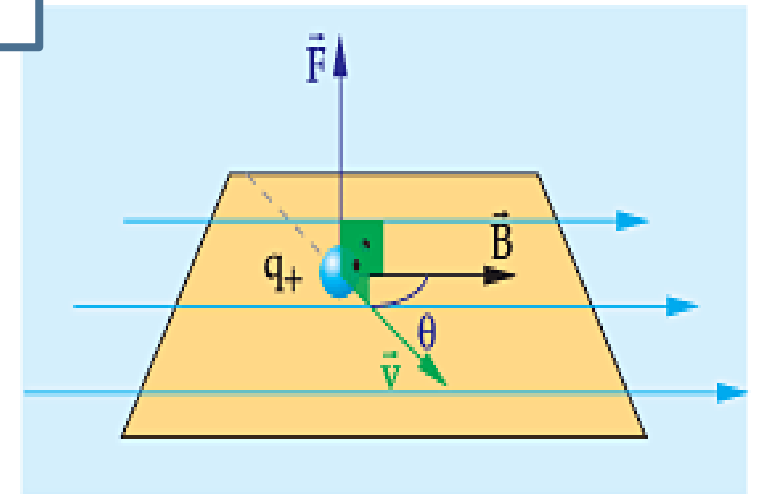
Lei de Gauss Magnética

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



Força Elétrica

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$$



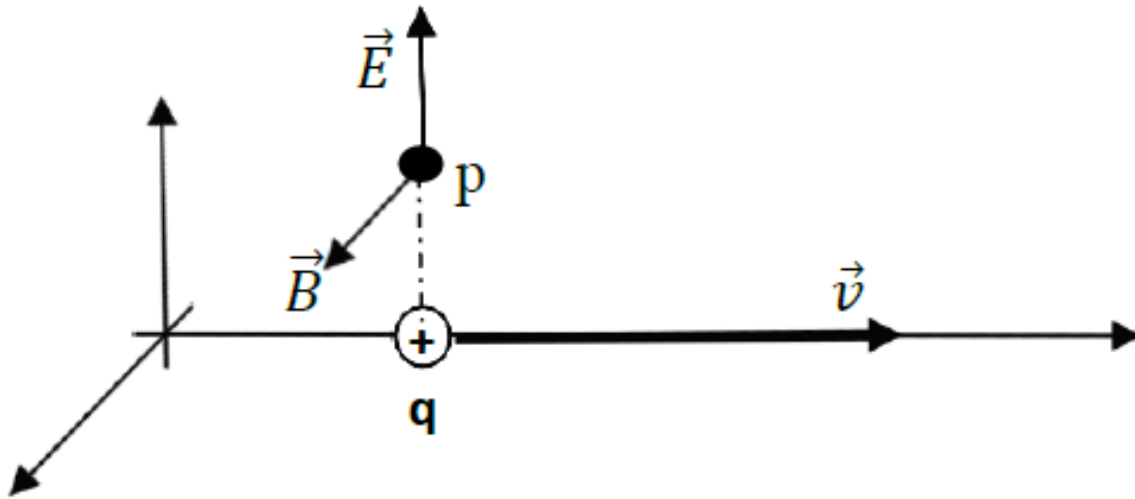
Força Magnética

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{v} \cdot \vec{B}$$

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



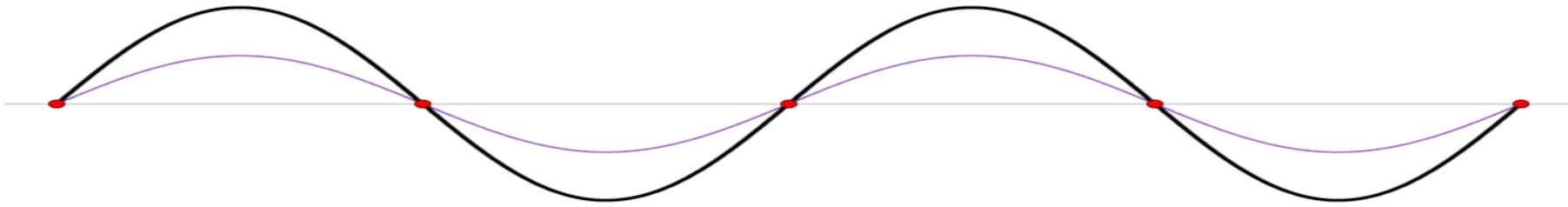
FORÇA DE LORENTZ



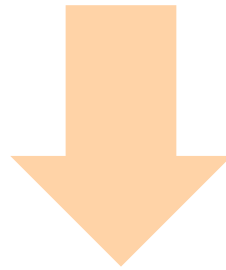
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 q}{4\pi r^2} \vec{v} \times \hat{r}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

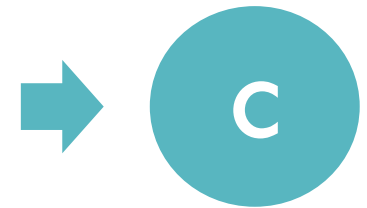
A partir dessas equações é possível prever a existência de ondas eletromagnéticas no vácuo e calcular sua velocidade

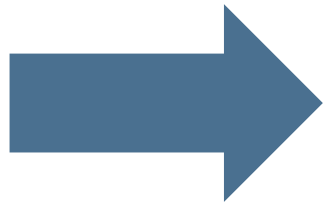


Para uma onda que se propaga no vácuo em uma dimensão



$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$





Velocidade de onda eletromagnética é constante e muito próxima a da luz. A luz poderia ser uma relação entre os campos magnético (B) e elétrico (E).



A velocidade das ondulações transversais no nosso meio hipotético, calculada a partir das experiências de eletromagnetismo efetuadas pelos Srs. Kolhraush e Weber (311.000 km/s), tem um valor tão próximo do valor da velocidade da luz calculado a partir de experiências da óptica realizadas pelo Sr. Fizeau que é difícil evitar a inferência de que a luz consistirá em ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos.

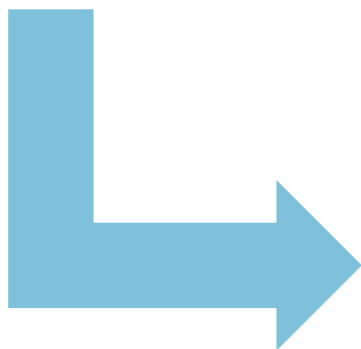
Ondas eletromagnéticas são geradas quando cargas elétricas são aceleradas



Resultados de Maxwell confirmados por Hertz em 1887

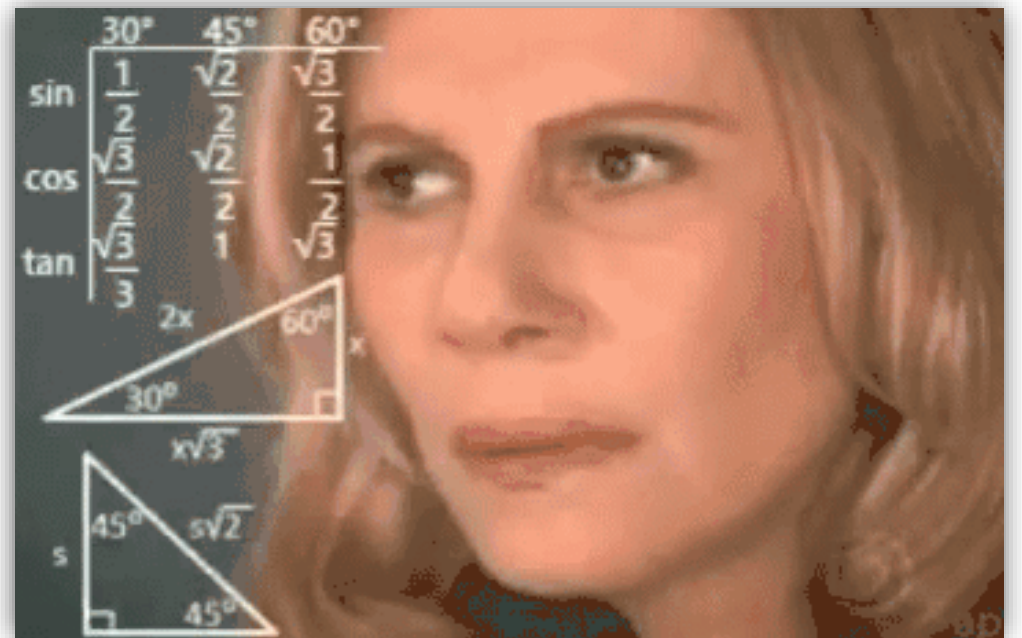
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

As forças elétrica e magnética dependem de ϵ_0 e de μ_0 , esses valores não podem depender do referencial, para que as forças permaneçam as mesmas.



Incoerência entre a relatividade de Galileu e as ondas eletromagnéticas

A partir de qual referencial a velocidade da luz é c ?



Três Possibilidades

1

O Princípio da Relatividade só é válido na Mecânica Clássica. Na eletrodinâmica era necessária a adoção de um referencial privilegiado – éter.

2

O Princípio da Relatividade é válido na Mecânica Clássica e na Eletrodinâmica, mas as equações de Maxwell estão incorretas.

3

O Princípio da Relatividade é válido na Mecânica Clássica e na Eletrodinâmica, mas as leis de Newton e a Relatividade de Galileu precisam ser reformuladas.

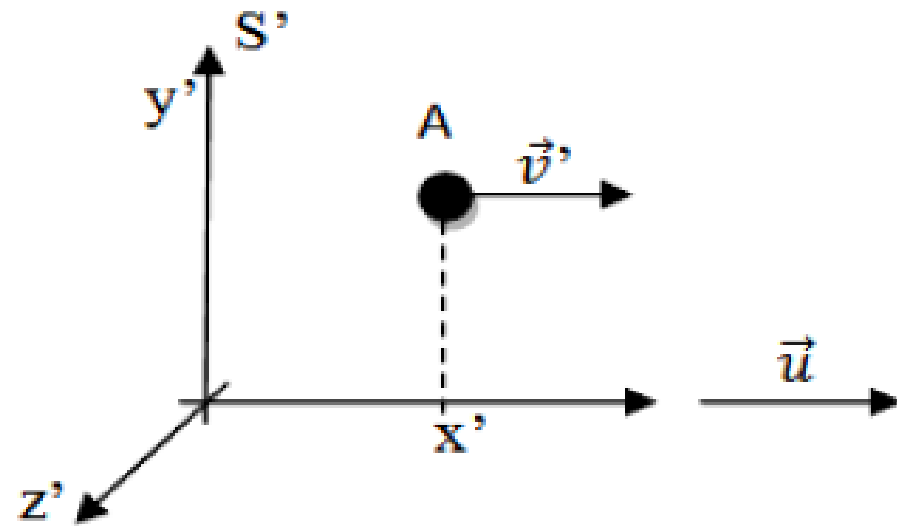
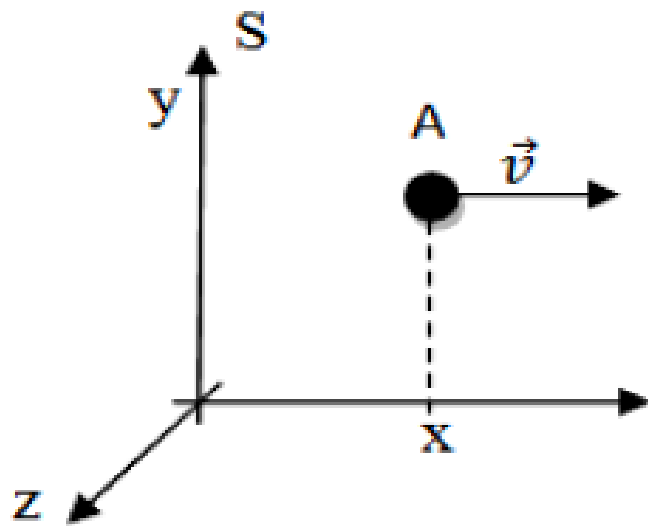
Transformações de Lorentz

Hendrick Lorentz (1853-1928)

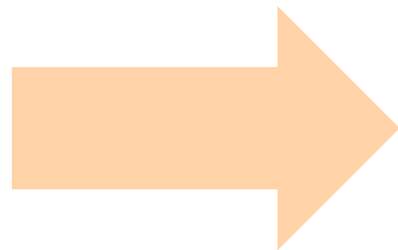


Buscava compatibilizar o eletromagnetismo de Maxwell e a Mecânica

$$F_{R1} = F_{R1}$$



γ_u - Fator de Lorentz



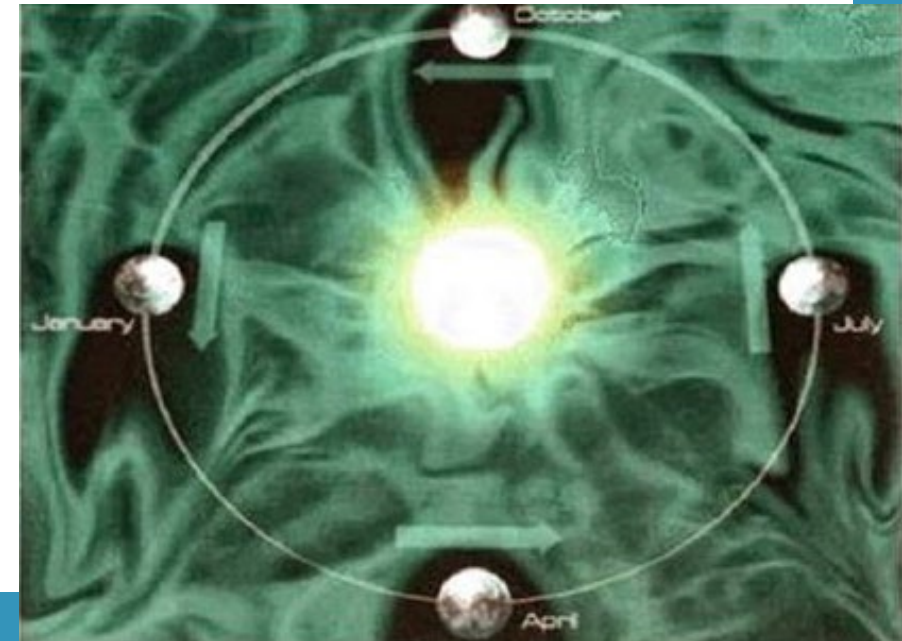
$$\gamma_u = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Transformações de Lorentz

$$\begin{cases} x' = \gamma_u(x - ut) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma_u\left(t - \frac{u}{c^2}x\right) \end{cases}$$

Éter

- ✓ Preenchia todo o universo.
- ✓ Referencial absoluto para a velocidade das ondas eletromagnéticas (unificação das teorias de calor, luz, magnetismo e eletricidade).
- ✓ Penetrava em toda matéria e interagiu eletromagneticamente com ela.

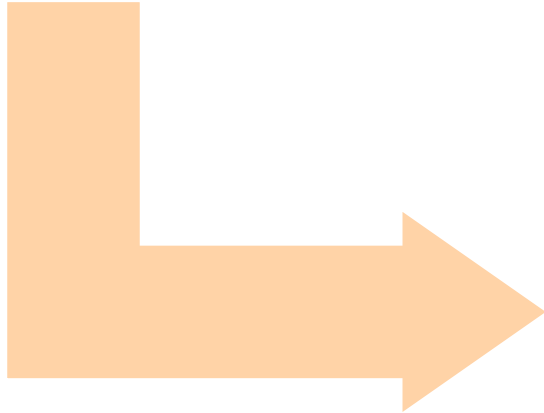


- ✓ A rapidez da luz seria independente da fonte
- ✓ Surgiu o “tempo local” – transformação para o tempo que depende do referencial

Henri Poincaré (1854-1912):
tempo local é o marcado por
relógios em repouso em
relação ao éter

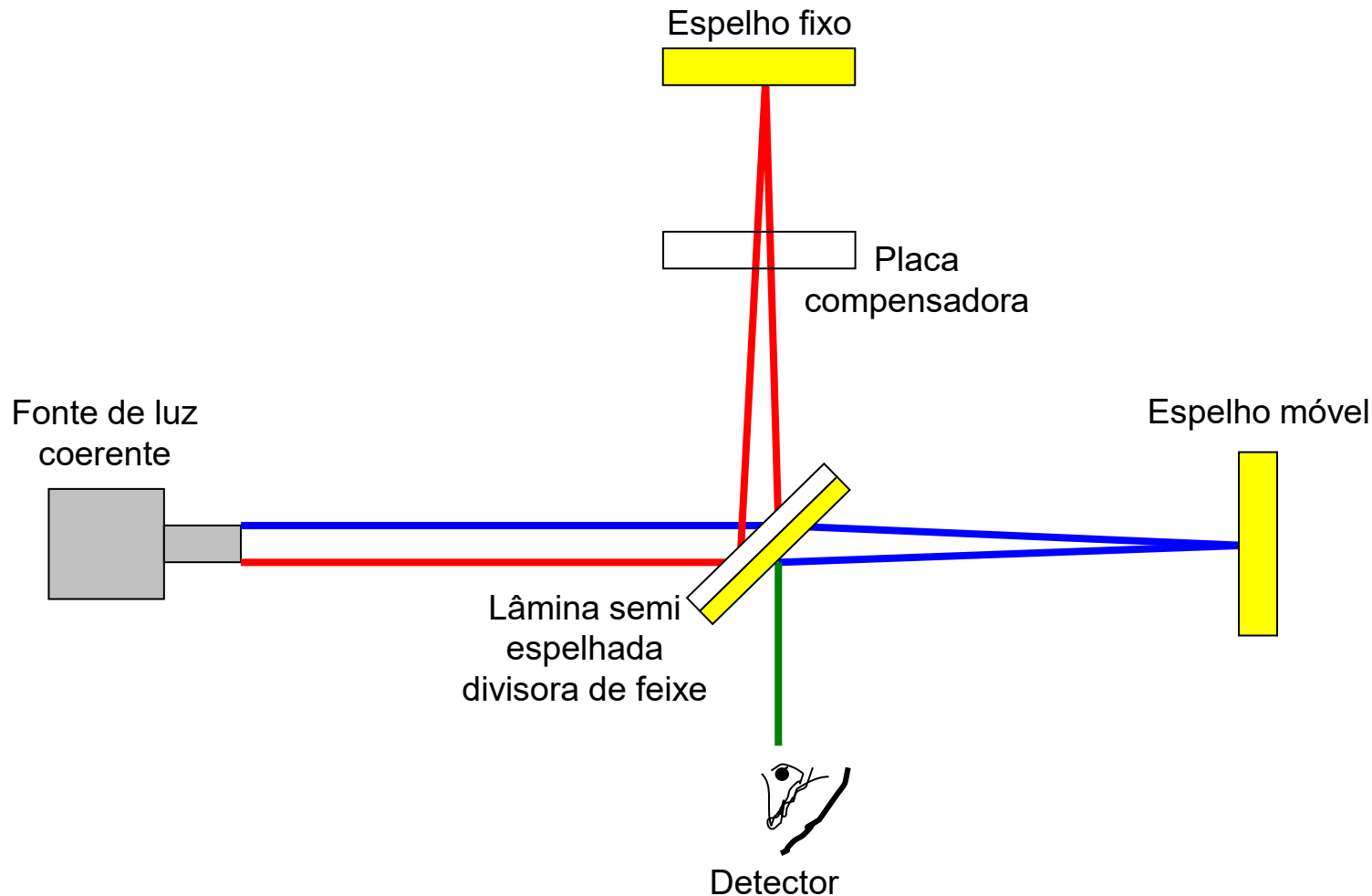


Um observador com velocidade v em relação ao éter mediria como rapidez da luz o valor $v' = c + v$, ou $v' = c - v$



A Terra se movimentaria em relação ao éter, então seria possível detectar um "vento de éter"

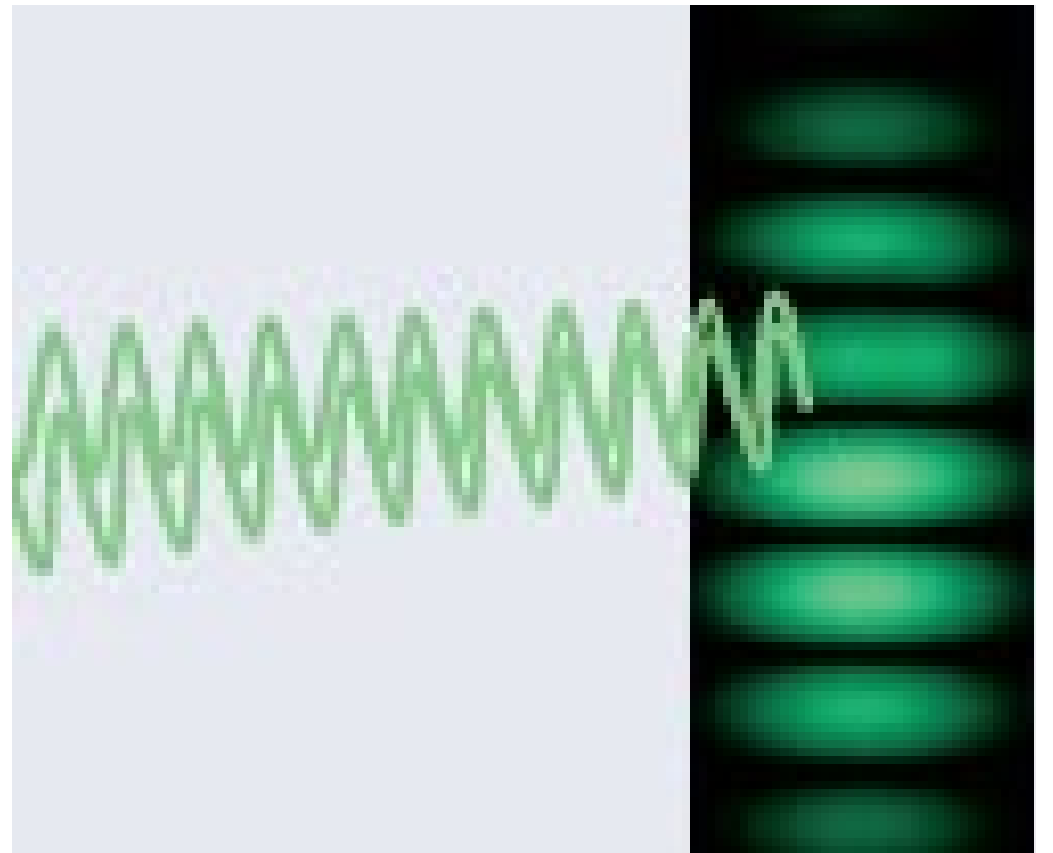
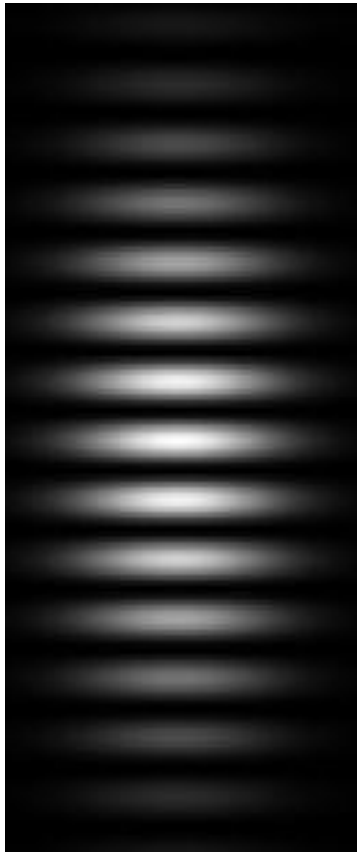
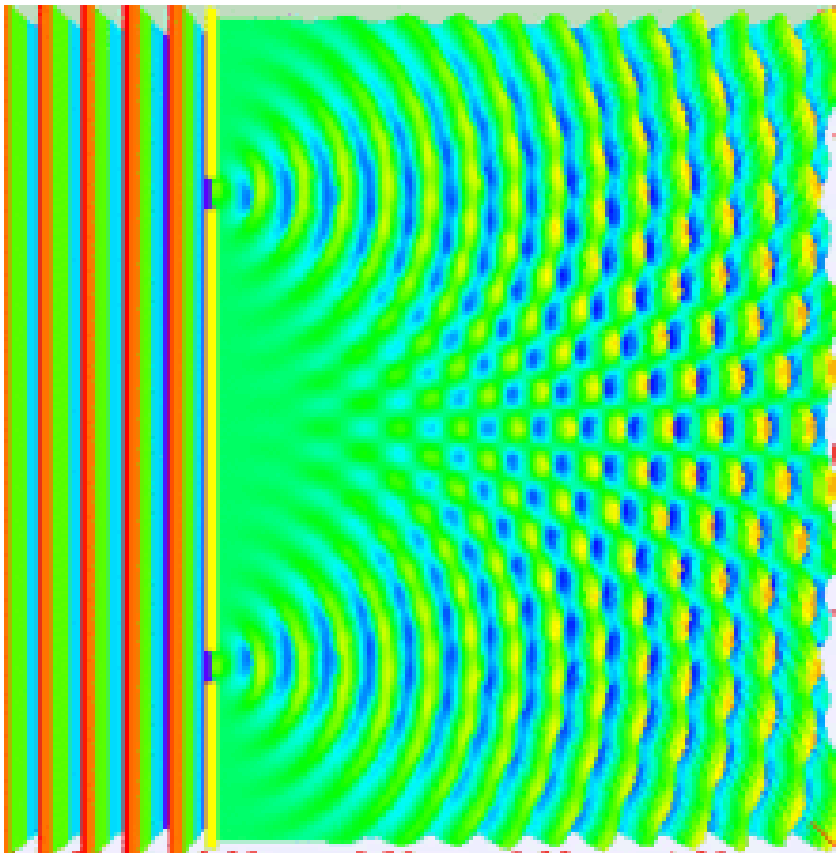
Experiência de Michelson-Morley 1887

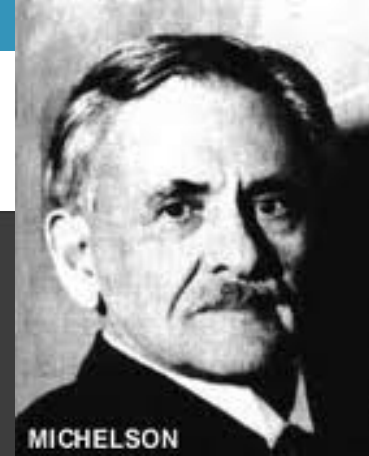


Albert
Michelson
(1852-1931)

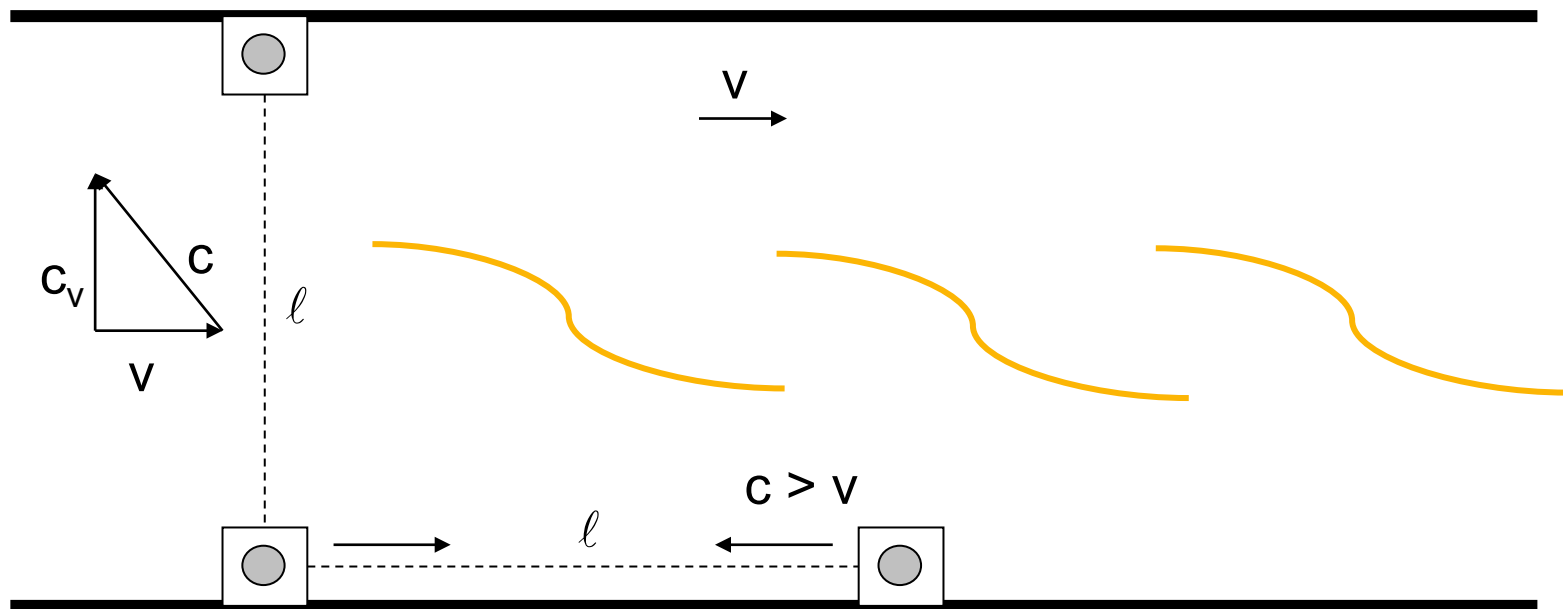
e
Edward Morley
(1838-1923)

Quando duas ondas se cruzam, formam um padrão de interferência!

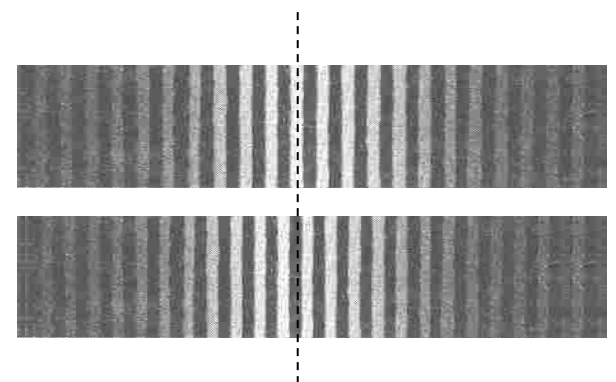




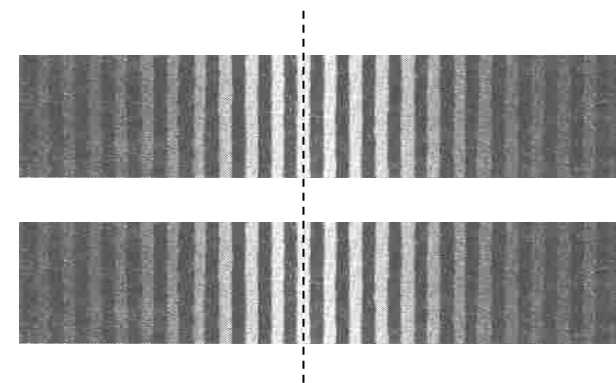
<https://www.youtube.com/watch?v=if3lc6jT-28>



Aspecto esperado



Aspecto obtido

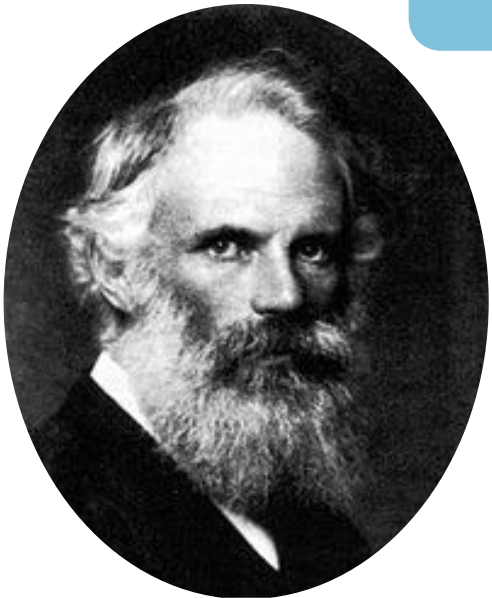


ÉTER NÃO FOI DETECTADO!

George Francis FitzGerald (1851-1901)

Comprimento do interferômetro sofreu modificação na direção em que teve movimento relativo ao éter

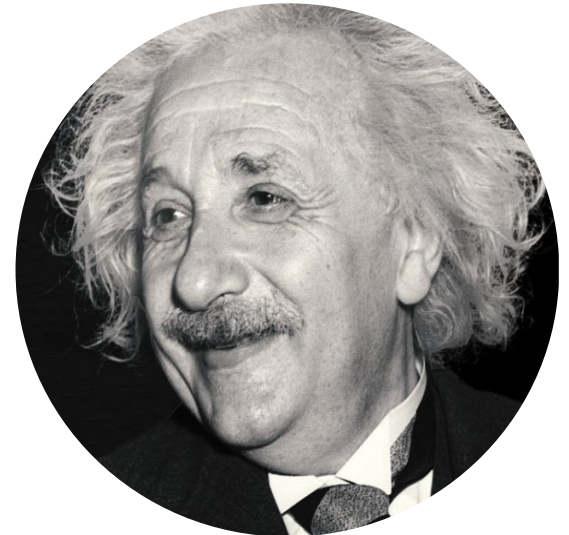
Braço do interferômetro utilizado por Michelson-Morley se contraiu devido ao movimento da Terra através do éter



“O primeiro exemplo deste gênero é a bem conhecida experiência interferencial de Michelson, cujo resultado negativo nos levou, a mim e a Fitzgerald, à conclusão de que as dimensões dos corpos rígidos se modificam um pouco em consequência do seu movimento através do éter”. (LORENTZ, 1904)

Albert Einstein (1879-1955)

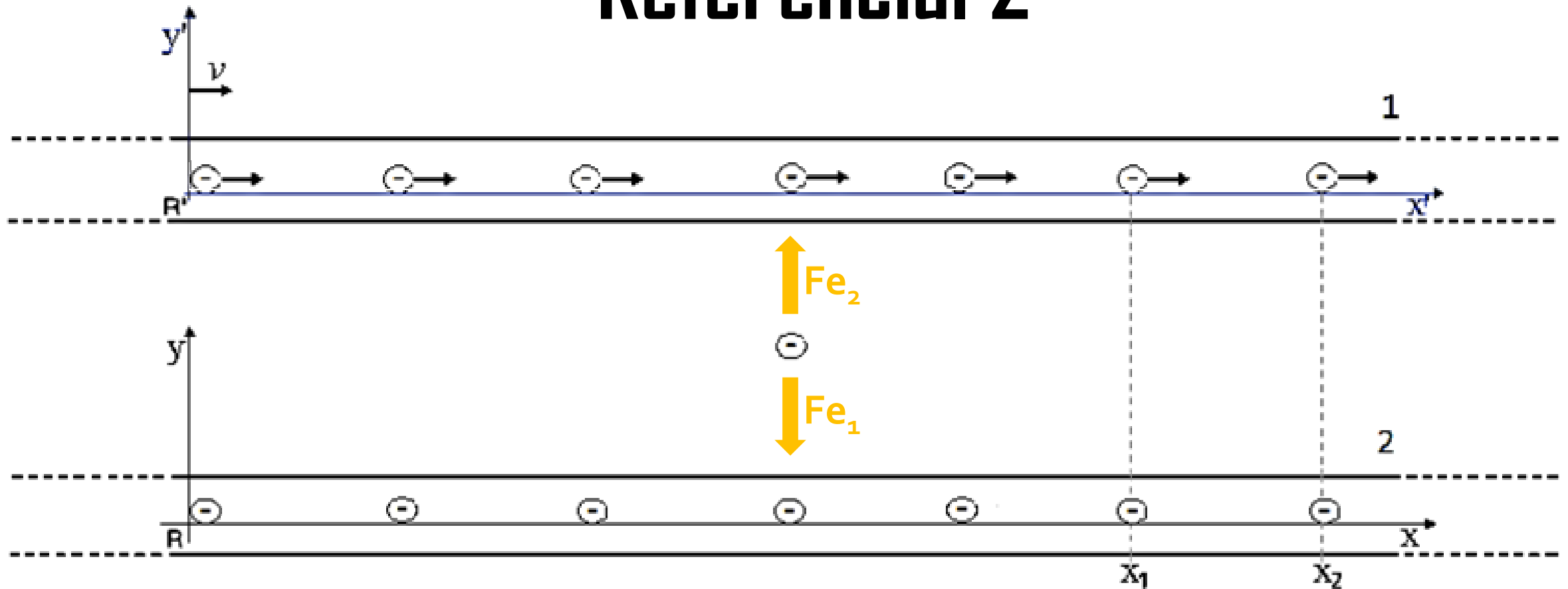
- Ideia do éter em repouso trazia assimetria – fenômenos de indução
- Princípio da Relatividade de Galileu deveria ser estendido a todas as leis da Física
- A rapidez da luz devia ser absoluta e as medidas do valor dessa rapidez seriam sempre as mesmas, independente do referencial
- Espaço e tempo relativos – reformulação das transformações de Galileu
- Transformações de Lorentz se mostraram adequadas



Na construção da teoria da relatividade especial, a seguinte [...] ideia a respeito da indução eletromagnética de Faraday desempenhou um papel orientador. De acordo com Faraday, o movimento relativo entre um ímã e um circuito elétrico fechado induz uma corrente elétrica neste último. Se é o ímã ou o condutor que se move, isso não importa; apenas o movimento relativo tem significado. [...] O fenômeno da indução eletromagnética [...] levou-me a postular o princípio da relatividade (especial) (EINSTEIN *apud* STACHEL, 2005, p. 130).

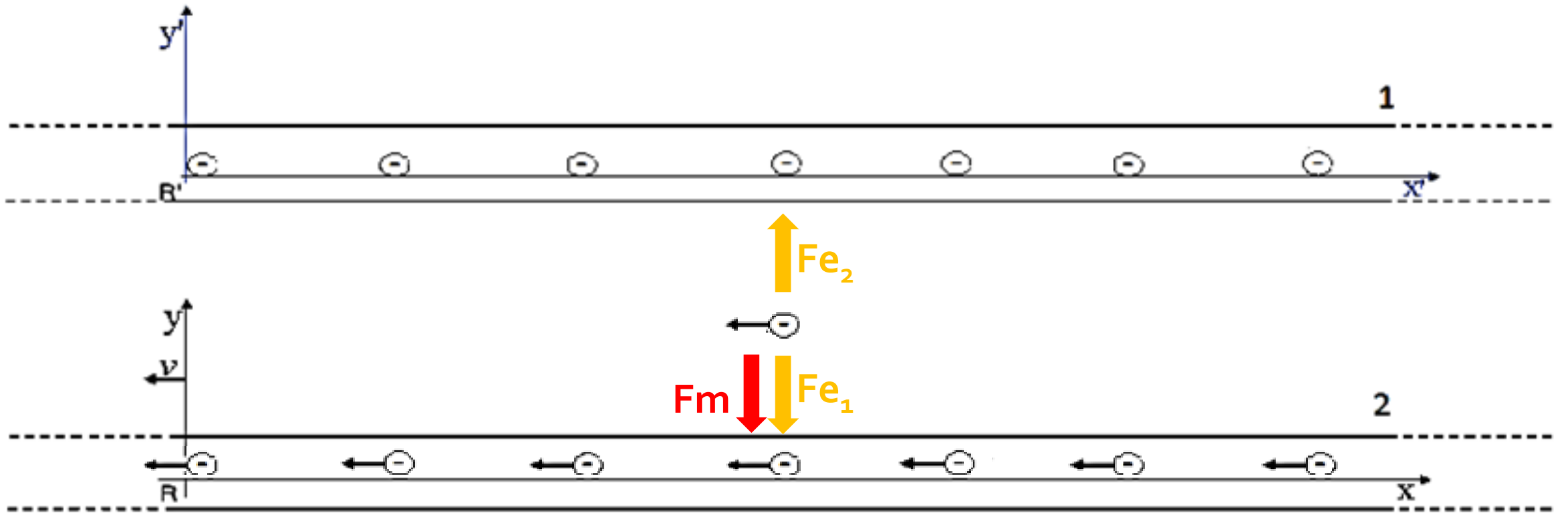
Mecanicamente, todos os referenciais inerciais são equivalentes. De acordo com a experiência, essa equivalência também estende-se à óptica e à eletrodinâmica. Entretanto, não me parecia que a equivalência pudesse ser obtida na teoria eletrodinâmica. Logo fiquei convencido de que isso baseava-se em uma profunda incompletude do sistema teórico. O desejo de descobrir e superar isso gerou em mim um estado de tensão psíquica que, após sete anos de pesquisas em vão, foi resolvido pela relativização dos conceitos de tempo e de comprimento (EINSTEIN *apud* STACHEL, 2005, p. 129).

Referencial 2



$$Fr = 0$$

Referencial 1



$$F_r \neq 0$$

$$F = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Teoria da Relatividade Especial/Restrita

1

Princípio da relatividade:

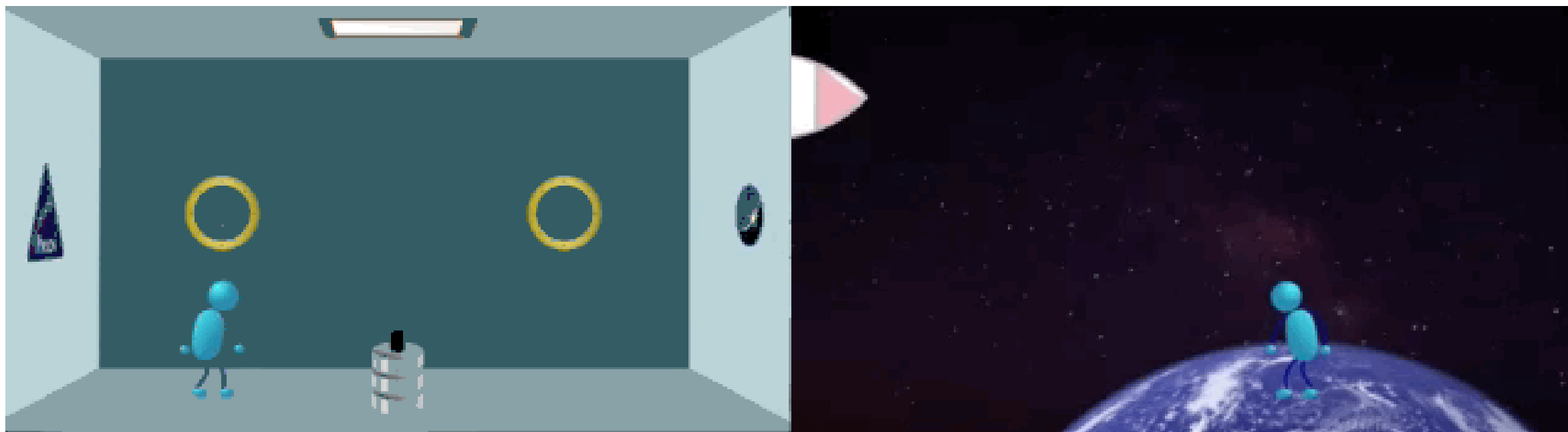
As leis da Física são as mesmas em qualquer sistema de referência inercial.

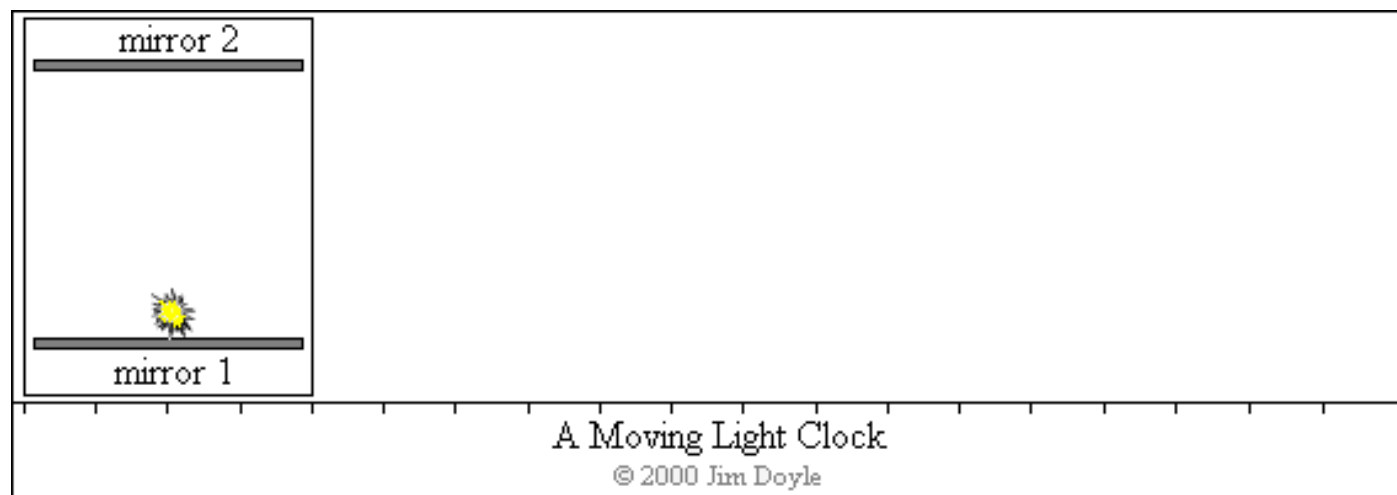
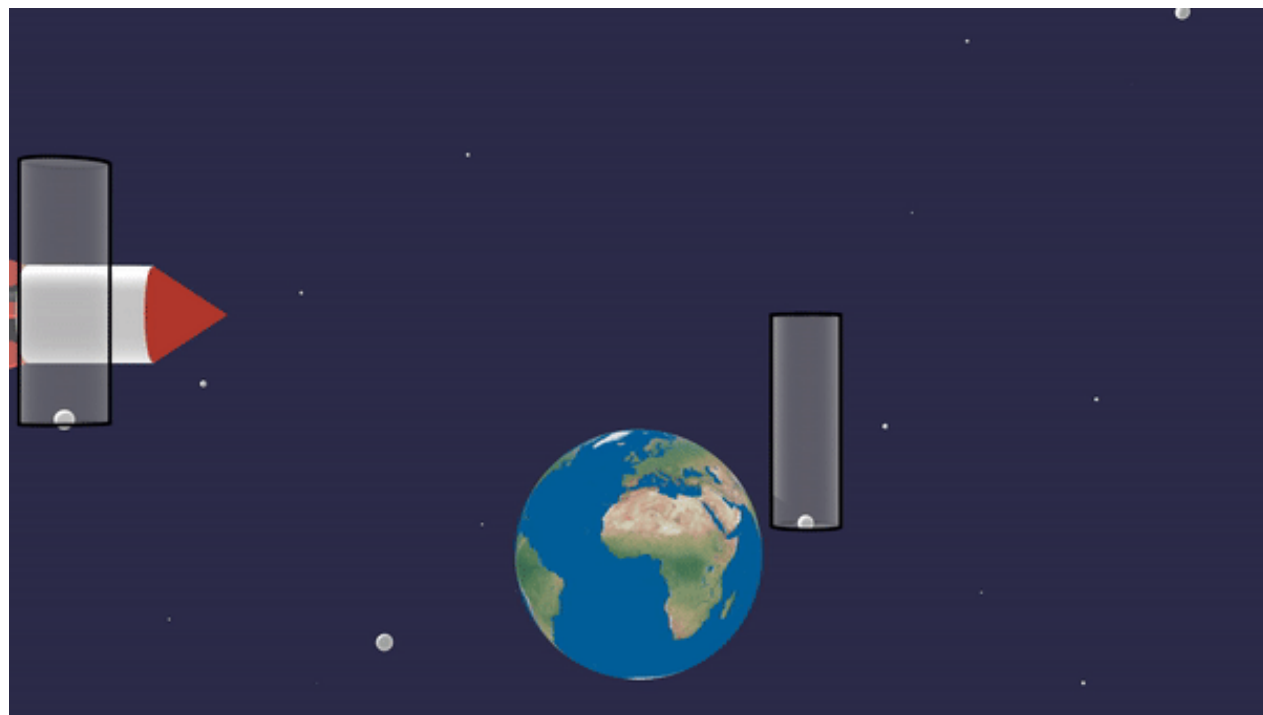
2

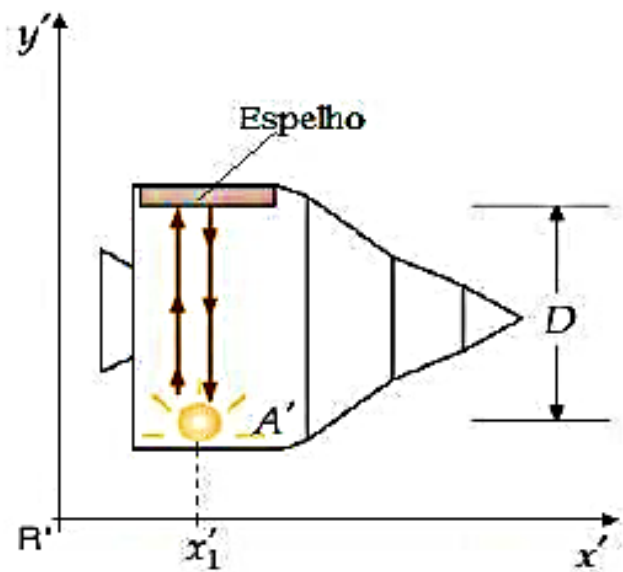
Velocidade da luz:

A velocidade da luz no vácuo é sempre a mesma em qualquer sistema de referência inercial e não depende da velocidade da fonte.

Teoria da Relatividade Especial/Restrita

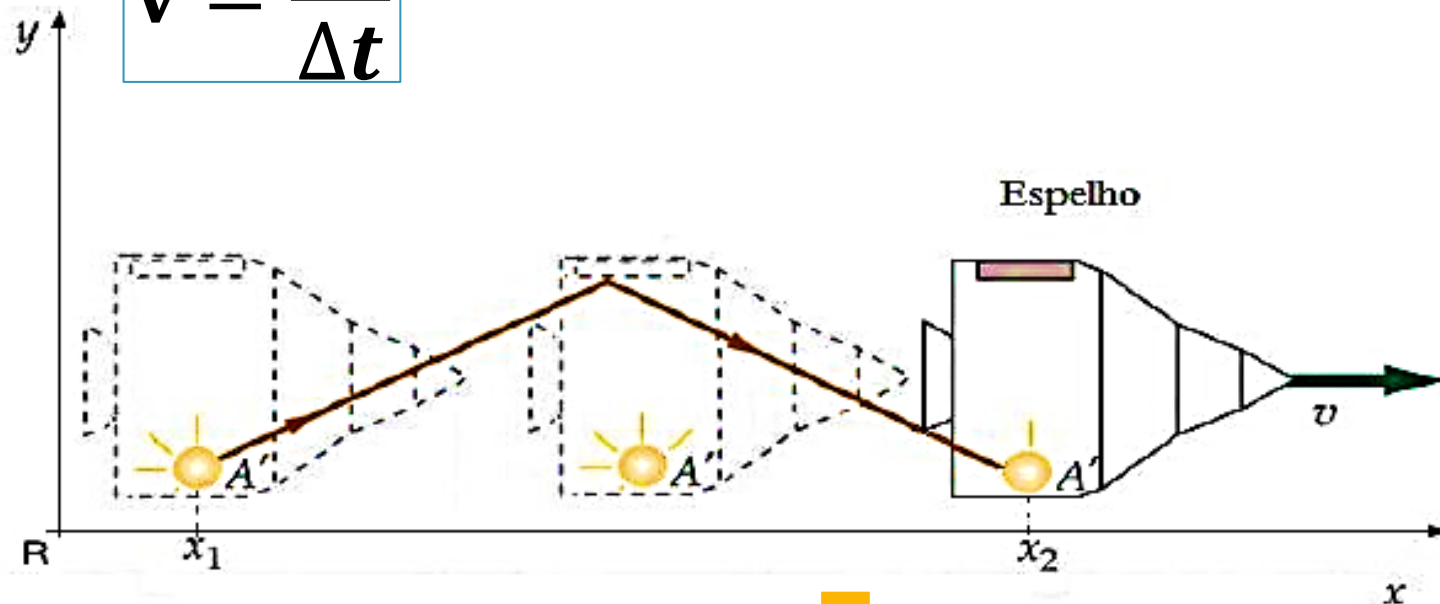






$$c = \frac{2D}{\Delta t}$$

$$\mathbf{v} = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$



$$c = \frac{2D}{\Delta t} + v$$

$$\frac{2D}{\Delta t} \neq \frac{2D}{\Delta t} + v$$

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

$$\mathbf{x}' = \gamma \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{v} \cdot t)$$

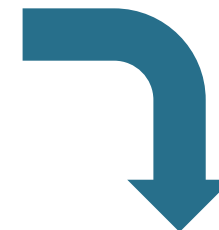
$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{x}}{c^2} \right)$$

Dilatação Temporal

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



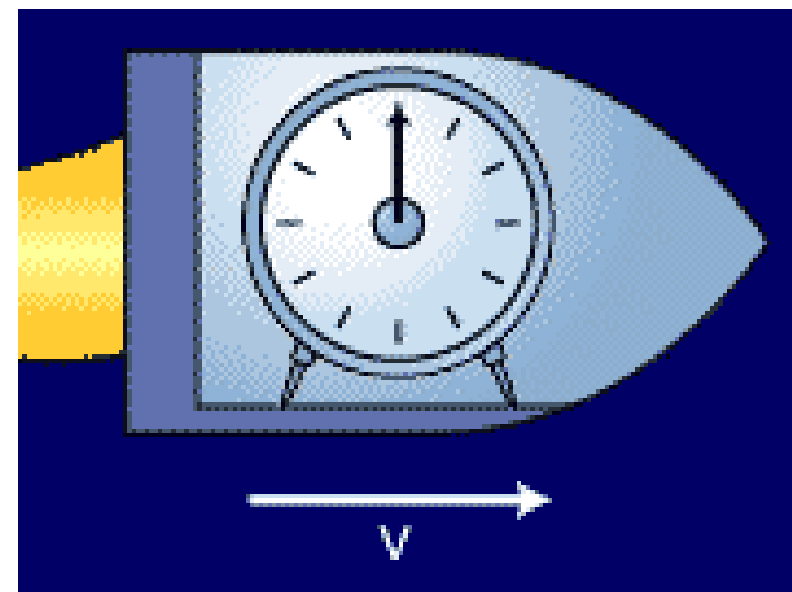
$$\Delta t = \Delta t_0 \cdot \gamma$$

$$t_0 < t$$

O tempo passa mais devagar para um referencial que está em movimento em relação a outro!



$$v=0$$



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

$$\mathbf{x}' = \gamma \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{v} \cdot \mathbf{t})$$

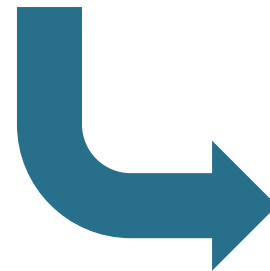
$$\mathbf{y}' = \mathbf{y}$$

$$\mathbf{z}' = \mathbf{z}$$

$$\mathbf{t}' = \gamma \cdot \left(\mathbf{t} - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{x}}{c^2} \right)$$

Contração Espacial

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$



$$L_0 > L$$

$$\mathbf{L} = \frac{\mathbf{L}_0}{\gamma}$$

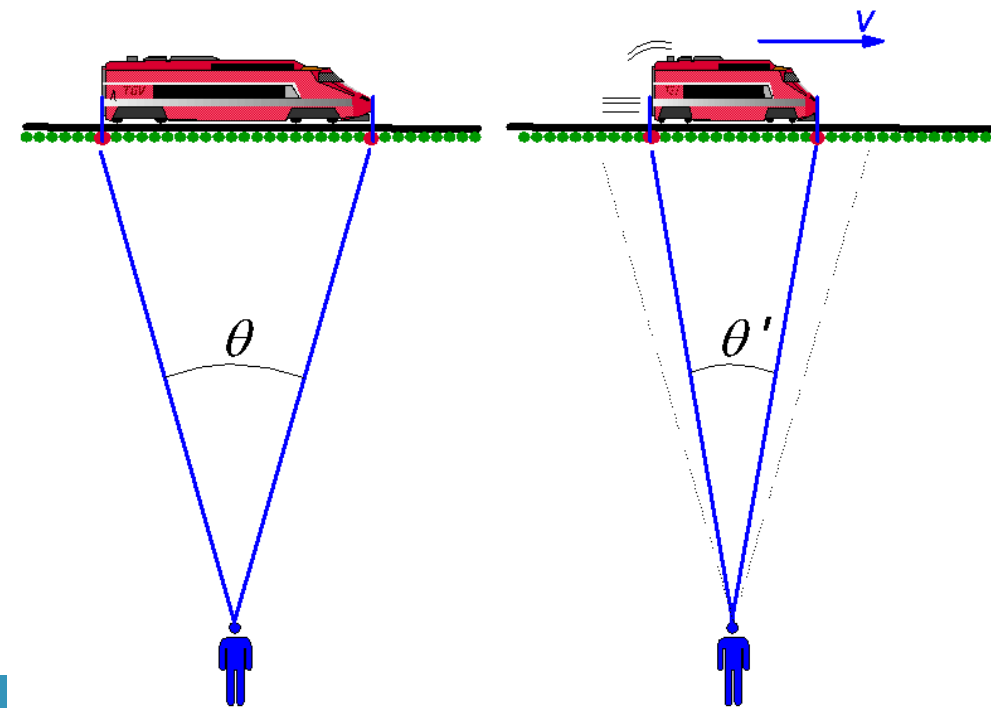
A

B

O tamanho de um objeto quando medido de um referencial em movimento é menor!



$$v=0$$



Soma de Velocidades

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v' \cdot u}{c^2}}$$

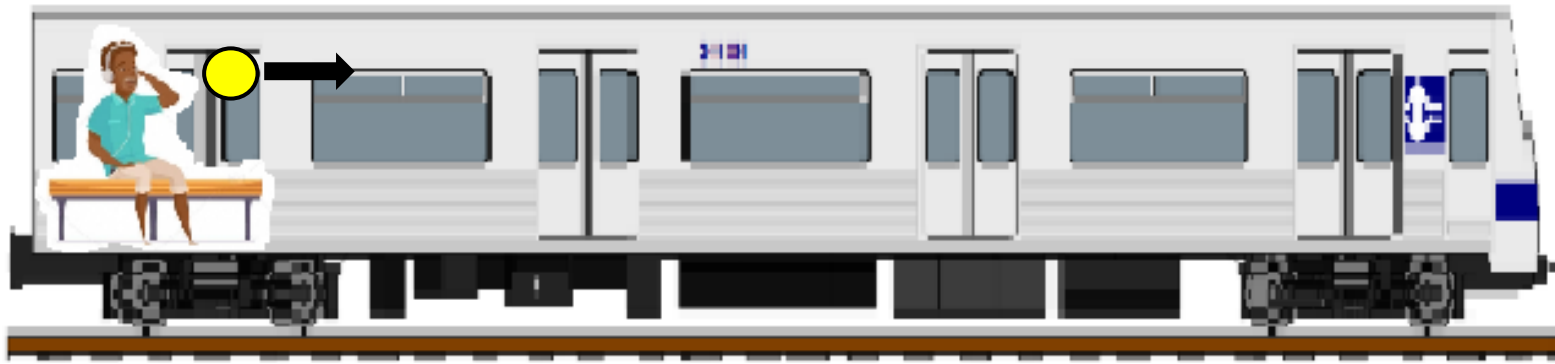
$$v' = \frac{v - u}{1 - \frac{v \cdot u}{c^2}}$$

Galileu

$$v' = v - u$$

Velocidade da luz é a mesma em qualquer referencial!

<https://www.youtube.com/watch?v=TxJnZnPYDqg&t=2s>



Transformação de Galileu:

$$v' = v - u$$



$$5 = v - 50$$



$$v = 5 + 50$$



$$v = 55 \text{ km/h}$$

$$\begin{aligned} v' &= 5 \text{ km/h} \\ u &= 50 \text{ km/h} \\ v &= ? \end{aligned}$$



Transformação de Galileu:

$$v' = v - u$$



$$c = v - 50$$



$$v = c + 50$$



$$v = c + 50 \text{ km/h}$$

$$\begin{aligned} v' &= c \\ u &= 50 \text{ km/h} \\ v &= ? \end{aligned}$$

Mas a velocidade da luz é a mesma em todos referenciais!

Transformação de Lorentz:

$$\begin{aligned}v' &= c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \\u &= 30 \text{ m/s} \\v &= ?\end{aligned}$$

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v' \cdot u}{c^2}}$$



$$v = \frac{c + 30}{1 + \frac{c \cdot 30}{c^2}}$$



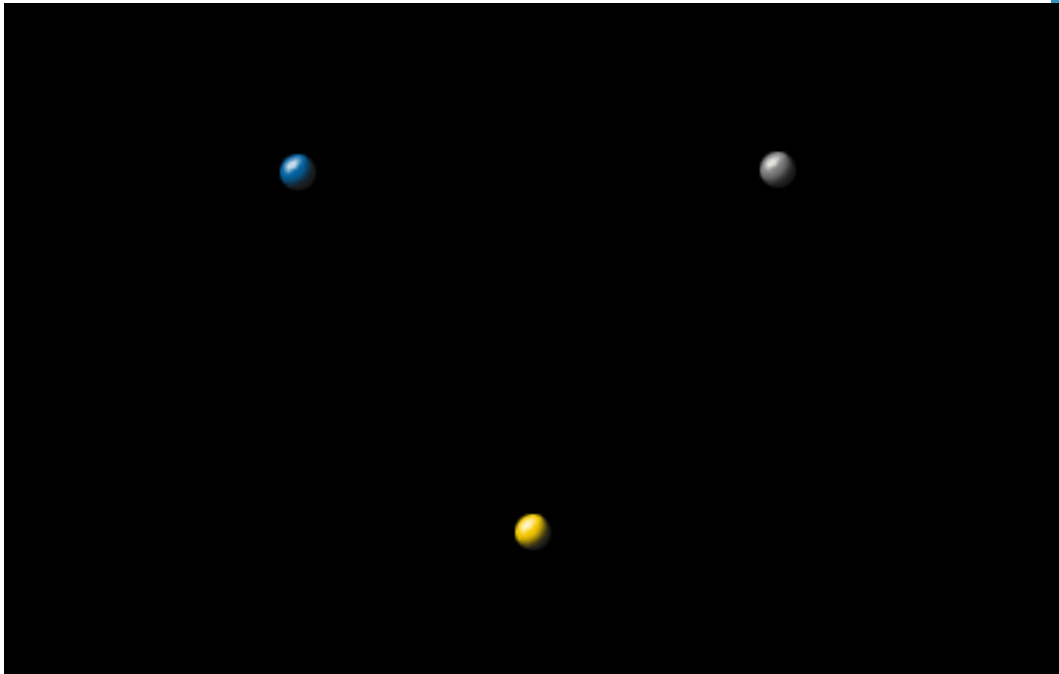
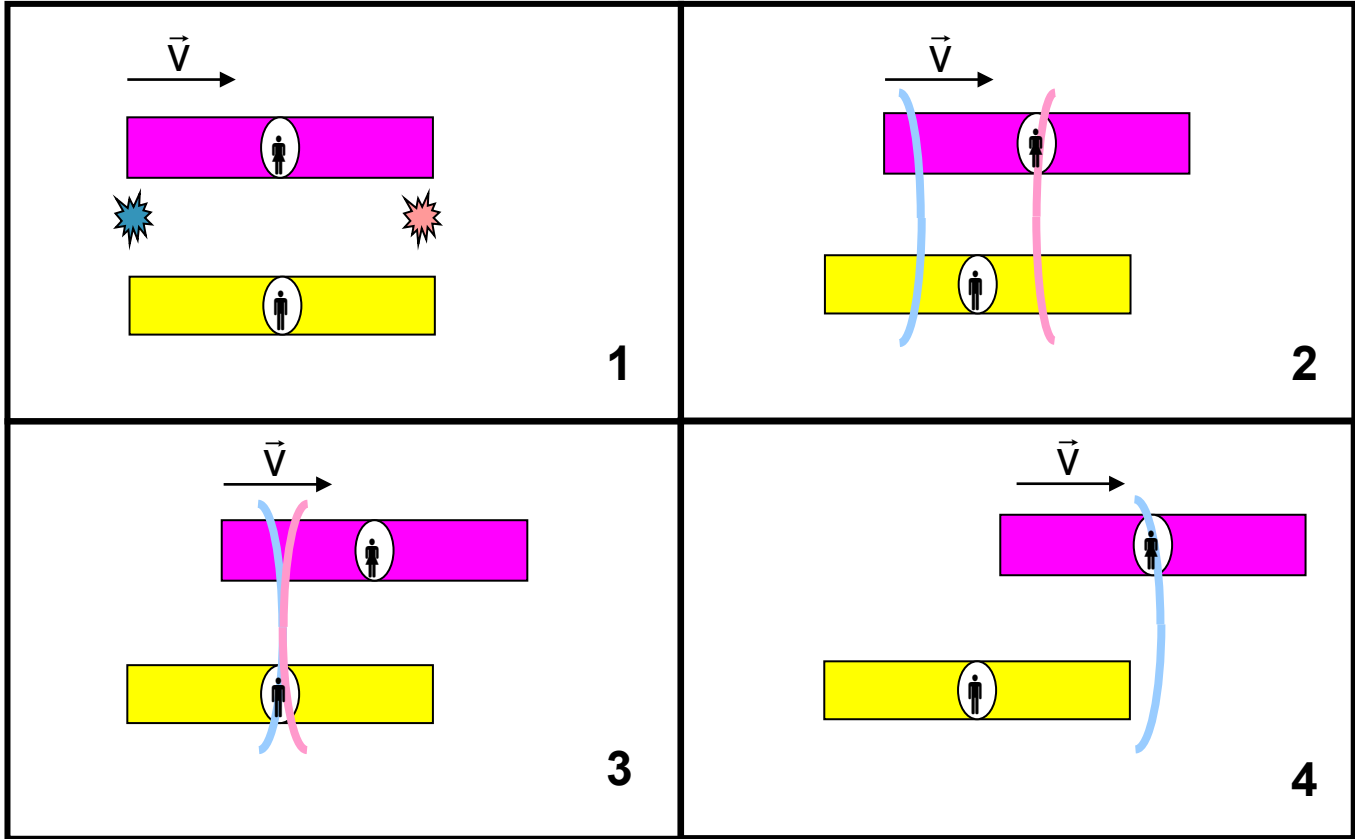
$$v = \frac{3 \cdot 10^8 + 30}{1 + \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 30}{(3 \cdot 10^8)^2}}$$



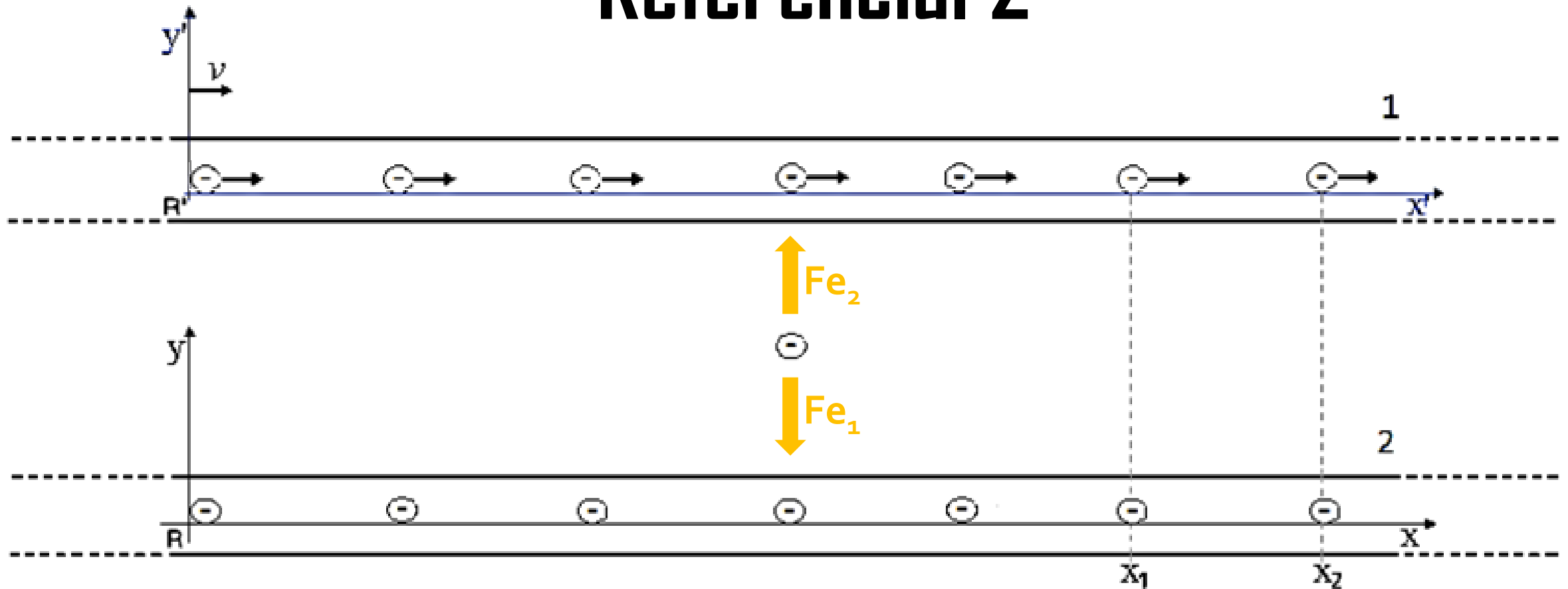
$$v = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

A velocidade da luz é a mesma em todos referenciais!

Simultaneidade

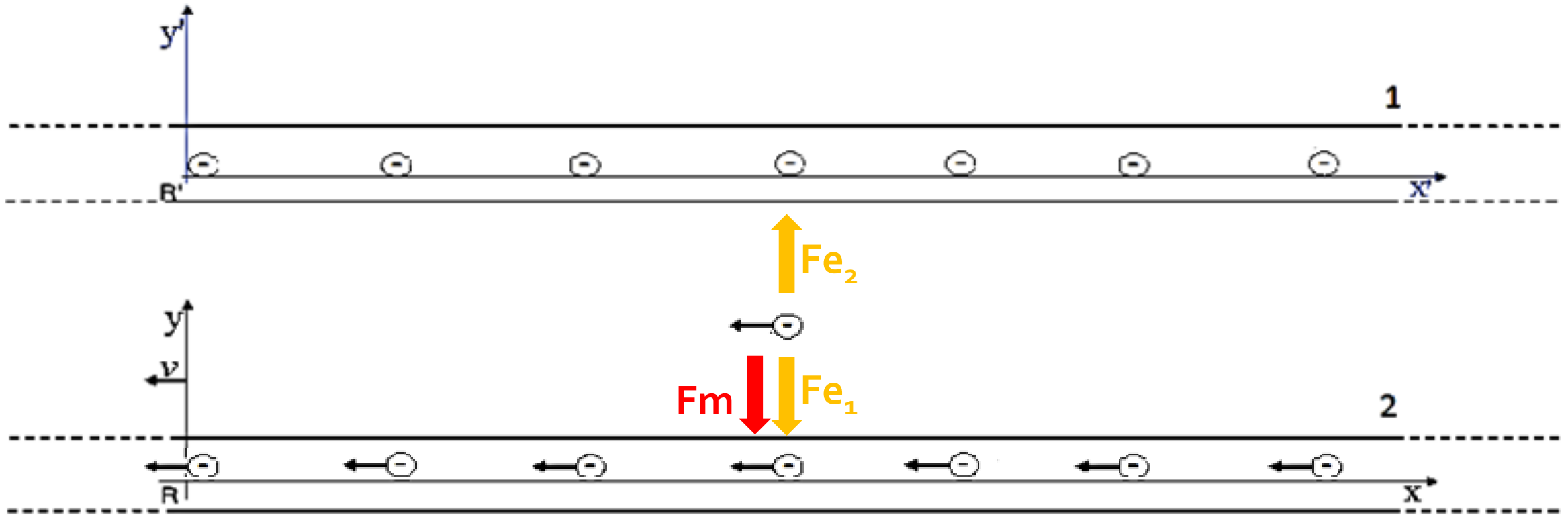


Referencial 2



$$Fr = 0$$

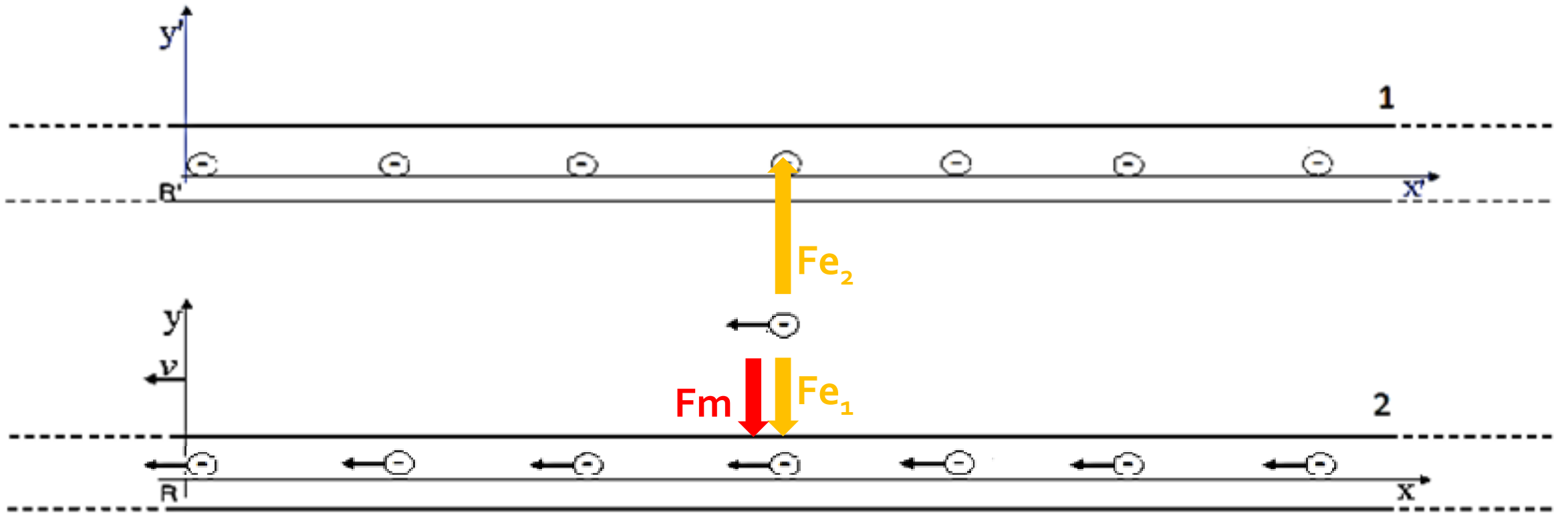
Referencial 1 - Galileu



$$F_r \neq 0$$

$$F = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Referencial 1 - Relatividade



$$F_r = 0$$

EXERCÍCIOS

1) Considere dois irmãos gêmeos. Suponha que um deles faz uma viagem numa espaçonave que se desloca numa velocidade igual a $0,8c$. A espaçonave faz uma viagem de ida e volta para fora do Sistema Solar durante 4 anos para o irmão que está na Terra. No momento da partida, os irmãos tinham 10 anos de idade. Qual será a idade de cada um no momento da chegada da espaçonave de volta à Terra?

2) Um astronauta viaja em uma nave com velocidade de $0,92c$. Nestas condições, se o astronauta realiza uma viagem desde a Terra até uma estação orbital, levando 12 anos para ele, na Terra, teria se passado quanto tempo?

EXERCÍCIOS

3) (Ufpe-Adaptada) Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado para uma estação espacial a uma velocidade constante $v = 0,8c$. No referencial da espaçonave, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada na estação espacial foi de 12 meses. Qual o tempo transcorrido no referencial da Terra, em meses?

a) 18 meses; b) 20 meses; c) 22 meses; d) 24 meses; e) 26 meses.

4) (Cefet-MG-Adaptada) Um bastão, em repouso, possui 2 m de comprimento. Se ele é posto em movimento, paralelamente ao seu eixo, até atingir uma velocidade de $0,6c$, seu comprimento será igual a:

a) 1,6 m; b) 1,7 m; c) 1,8 m; d) 1,9 m; e) 2 m.



**Isso é tudo,
pessoal!**

Referências

EINSTEIN, A. Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. **Ann. D. Physics.** v. 17, 1905.

FIASCA, A. B. A. **Aplicando Metodologias Ativas e Explorando Tecnologias Móveis em Aulas de Relatividade Restrita no Ensino Médio.** 2018. 173 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física), Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2018.

FREZZA, J. S. **Construção de modelos e teorias físicas: da Mecânica Clássica de Newton à Mecânica Relativística de Einstein.** 2015. 95 f. Tese (Doutorado em Educação), Programa de Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

GIANCRISTOFARO, Marco. **Inteferemetro Michelson.** 2016 (3min09s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=if3lc6jT-28>. Acesso em: 07 de Out. 2019.

JOANRISE. **Quem está em movimento 2.** 2010 (49s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ssS9k2RK-XE>. Acesso em: 03 de Jun. 2019.

LORENTZ, H. A. Fenômenos eletromagnéticos num sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz. **Proceedings Acad. Sc. Amsterdam** 6. 1904.

MONÇORES, E. O. **Uma proposta para facilitar a prática docente no ensino da Teoria da Relatividade Especial no Ensino Médio.** 2014. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências), Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ensino de Ciências, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Nilópolis, 2014.

RENN, J. A física clássica de cabeça para baixo: como Einstein descobriu a Teoria da Relatividade Especial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, 2004.

RUSSELL, B. **ABC da Relatividade.** 5ª edição. Zahar Editores: Rio de Janeiro, 1974. TV Brasil. **Rápido como a luz.** (1min48s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=TxJnZnPYDqg&t=2s>. Acesso em: 07 de Out. 2019.

YAZBEK, G. **Como foi medida a velocidade da luz?** Revista Galileu. Disponível em <http://revistagalileu.globo.com/Galileu/0,6993,ECT530241-1716-5,00.html/>. Acesso em 11 Ago. 2019.