

Física IV

2020

Professor: Valdir Guimarães

E-mail: valdir.guimaraes@usp.br

Aula-5: Relatividade Restrita

Em 1905 Einstein publicou 5 artigos (aos 26 anos)

- ❑ **“Sobre um ponto de vista heurístico concernente a geração e transformação da luz”**
Baseado nas ideias de Max Plank ele explica o efeito fotoelétrico.
- ❑ **“Sobre uma nova determinação das dimensões moleculares”**
dimensões moleculares através do calor específico e viscosidade (tese de doutorado).
- ❑ **“Sobre o movimento de partículas suspensas em fluídos em repouso, como postulado pela teoria molecular do calor.”**
movimento browniano.
- ❑ **“Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”**
Baseado na ideia da modificação do espaço-tempo. Esboço da teoria da relatividade.
- ❑ **“A inércia de um corpo depende da sua energia?”**
Equação $E=mc^2$

Einstein publica em média 5 artigos por ano até receber o premio Nobel.

Em 1921. Ganha o premio Nobel pelo efeito fotoelétrico.

Um pouco antes de 1900, a física clássica, eletromagnetismo, termodinâmica, pareciam bem estabelecidos.

Problemas:

- ❑ Luz (teoria ondulatória ou corpuscular)
- ❑ Radiação do corpo negro.
- ❑ Raio-X
- ❑ Linhas de absorção e emissão

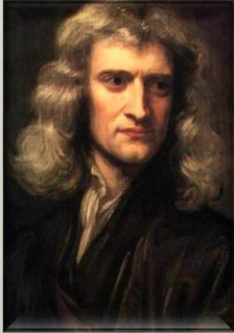


Física Moderna



Mecânica Quântica

Primeira lei de Newton

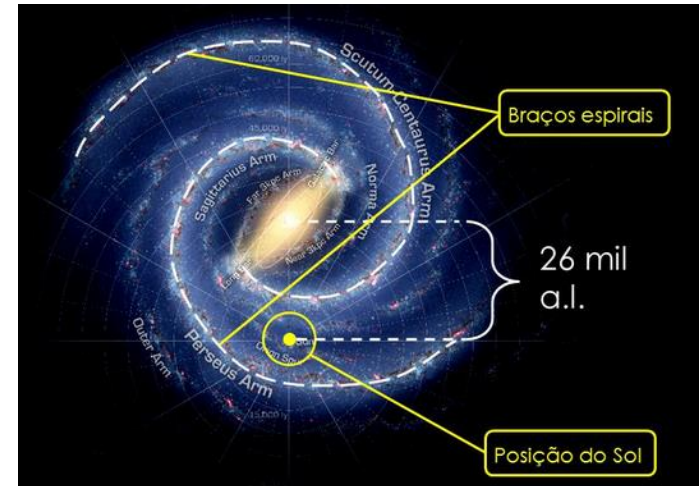
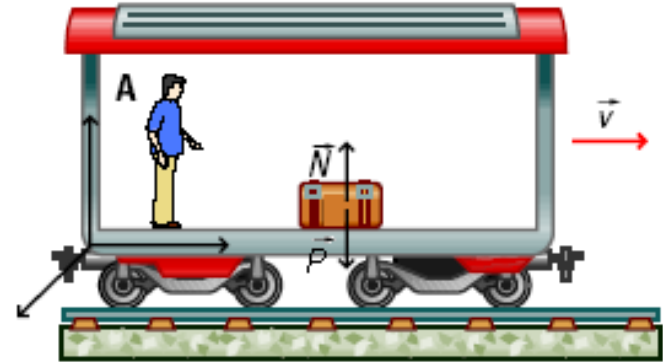


Isaac Newton
(1642 – 1727)

Lei da Inércia: Na ausência de forças um corpo está em repouso ou em movimento retilíneo uniforme.

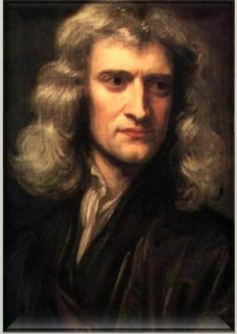
- Repouso ou movimento em relação a um referencial?
- Existe um referencial absoluto?
- Tempo e espaço são absolutos?
- Nenhuma experiência da física é capaz de distinguir repouso do mov. Retilíneo uniforme.

Qual a sua velocidade ?

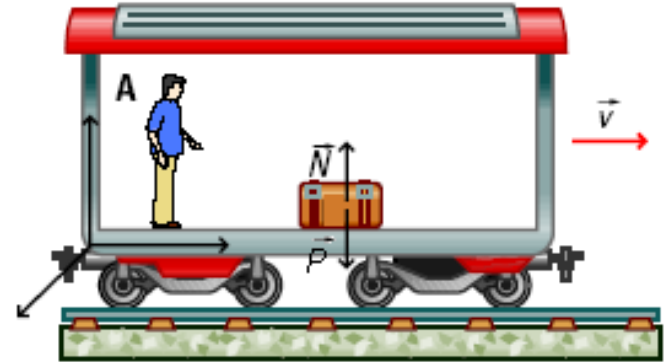


- 0 m/s em relação a sua cadeira
- 400 m/s em relação ao centro da terra (rotação)
- 30,000 m/s em relação ao Sol (órbita)
- 220,000 m/s em relação ao centro da Galaxia
- 370,000 m/s em relação ao fundo cósmico

Primeira lei de Newton

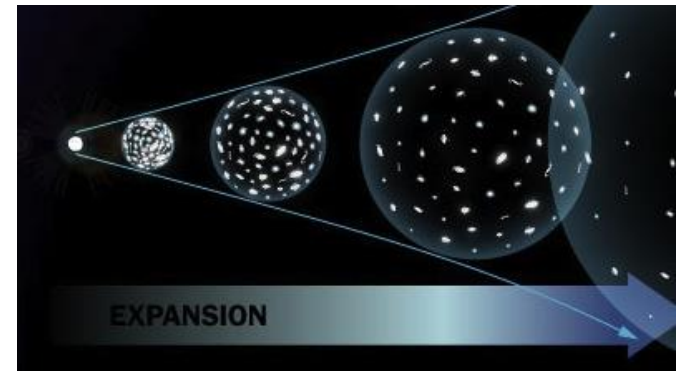


Isaac Newton
(1642 – 1727)



Lei da Inércia: Na ausência de forças um corpo está em repouso ou em movimento retilíneo uniforme.

- Repouso ou movimento em relação a um referencial?
- Existe um referencial absoluto?
- Tempo e espaço são absolutos?
- Nenhuma experiência da física é capaz de distinguir repouso do mov. Retilíneo uniforme.



Qual a sua velocidade ?

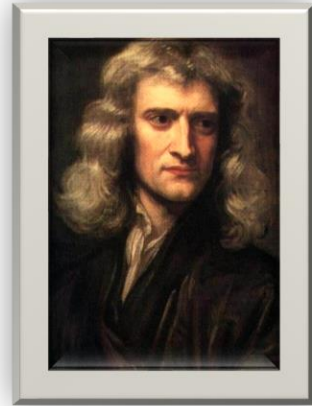
- 0 m/s em relação a sua cadeira
- 400 m/s em relação ao centro da terra (rotação)
- 30,000 m/s em relação ao Sol (órbita)
- 220,000 m/s em relação ao centro da Galaxia
- 370,000 m/s em relação ao fundo cósmico

Segunda lei de Newton



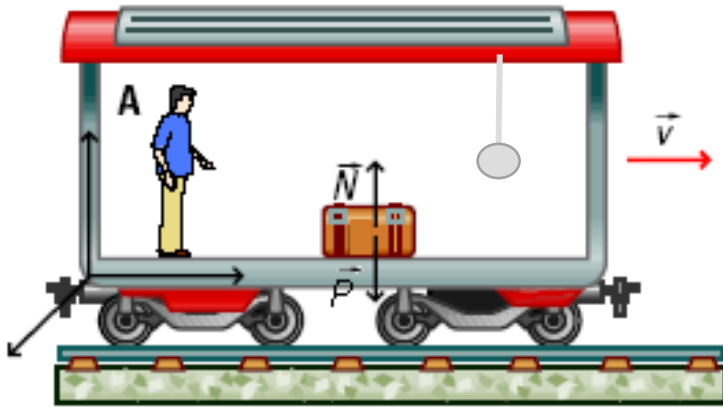
Força: $F = m \cdot a$ $F = \frac{\Delta P}{\Delta t}$

Força é igual a taxa de variação do momento.

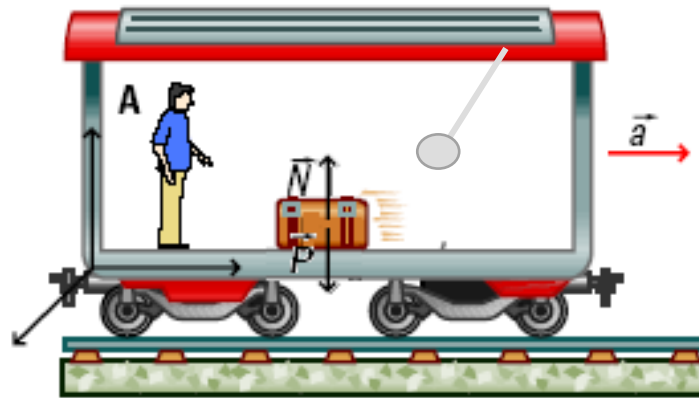


Isaac Newton
(1642 – 1727)

Existe um referencial inercial onde as leis de Newton são válidas?



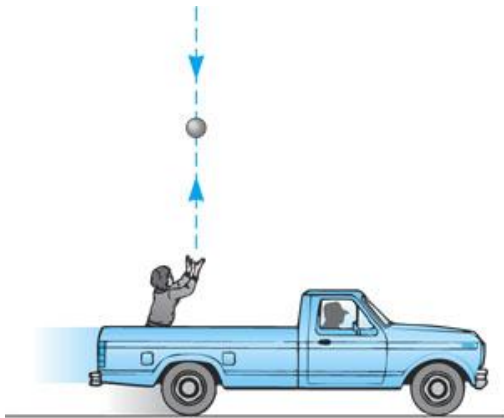
Em repouso ou
Movimento
uniforme retilíneo



Movimento acelerado
Referenciais inerciais -> verifica-se a lei da inércia.
Referenciais não inerciais -> a lei da inércia não é válida.

Qual referencial é absolutamente inercial? Idéia do éter

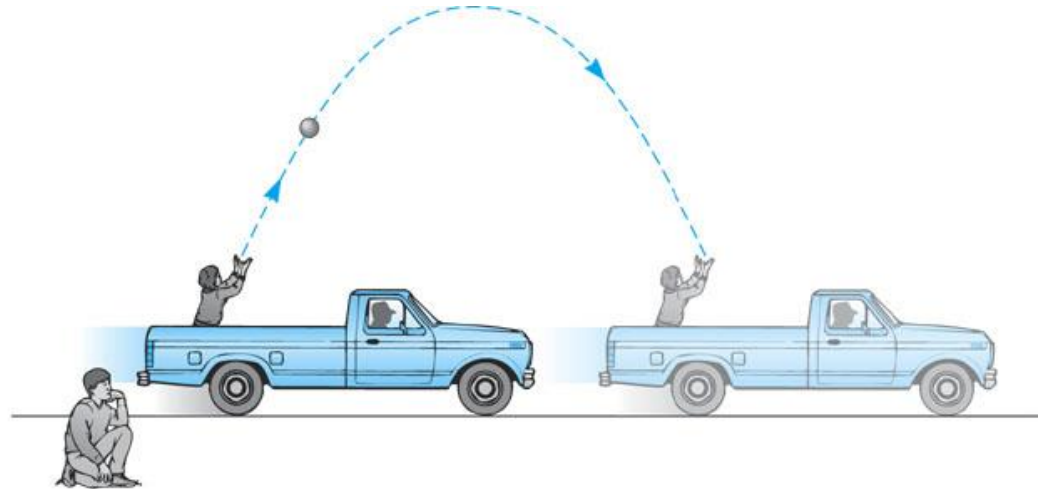
Experiment at rest



(a)

© 2005 Brooks/Cole - Thomson

Experiment in moving frame



(b)

Vemos coisas diferentes dependendo do referencial.

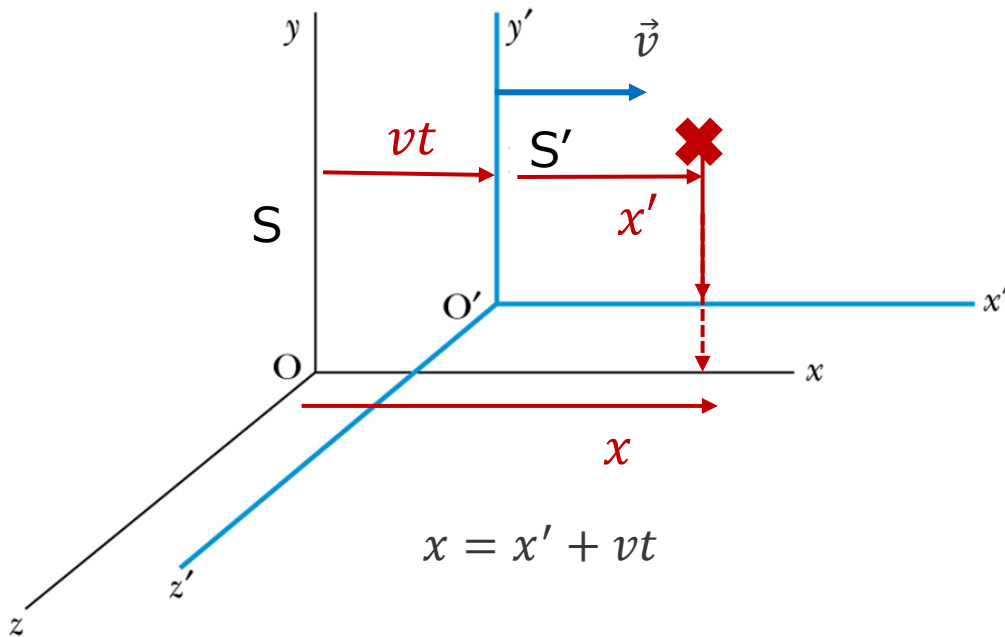
Nossa visão é relativa.

A relatividade restrita trata exatamente da física dos movimentos relativos onde tempos e espaço não são absolutos:



As leis que regem o movimento são as mesmas para qualquer sistema inercial de referencia.

Para $t = t' = 0 \Rightarrow O = O'$



Transformadas de Galileo

$$x' = x - vt$$

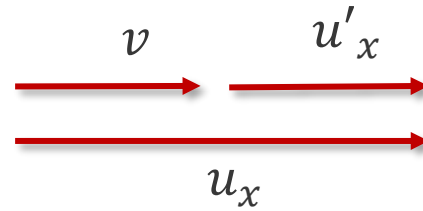
$$y' = y$$

$$z' = z$$

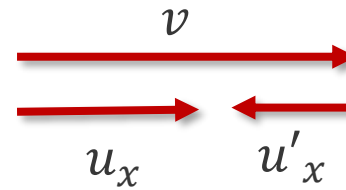
$$t' = t$$

Adição de velocidades de acordo com a relatividade de Galileo

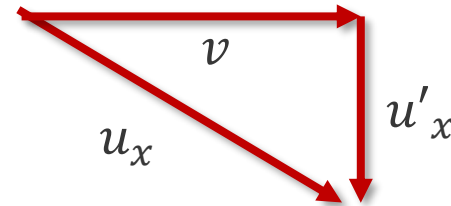
$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d(x-vt)}{dt} = \frac{dx}{dt} - v = u_x - v$$



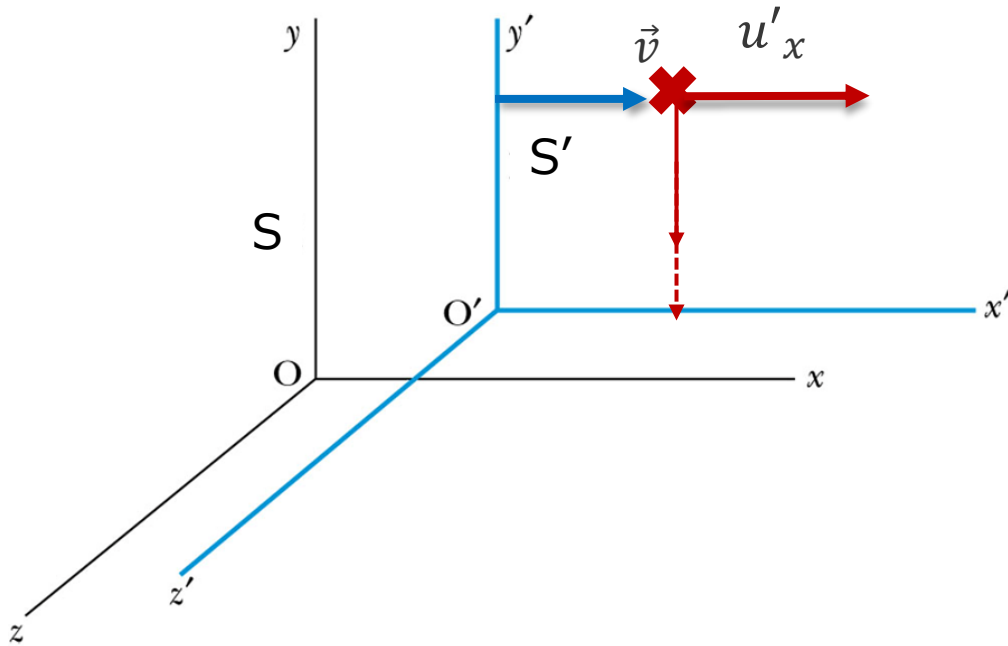
$$u_x = v + u'_x$$



$$u_x = v - u'_x$$



$$u_x = \sqrt{u_x'^2 + v^2}$$



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

$$a' = \frac{du'_x}{dt'} = \frac{d(u_x - v)}{dt} = \frac{du_x}{dt} - \frac{dv}{dt} = a$$

$a' = a$ Referencial S' é um referencial inercial

Luz é uma onda ou partícula ?

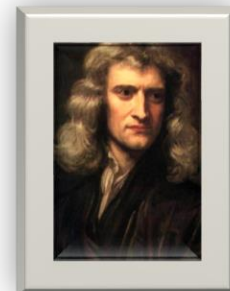


Luz é uma onda
precisa do éter para se
propagar



Christian Huygens
(1629 – 1695)

Luz é uma partícula
pode se propagar no vácuo



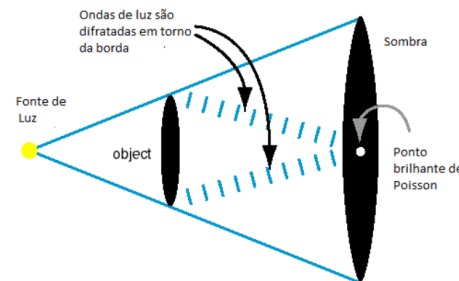
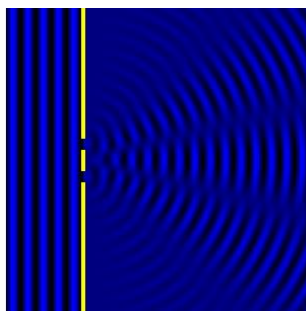
Isaac Newton
(1642 – 1727)

Interferência

(experiência de Young)

Difração

refração



Previsão de Poisson

Se a luz é uma onda ela precisa de um meio para se propagar



Éter

Medida da velocidade da luz no século 19

<http://www.speed-light.info/measurement.htm>

H. Fizeau - Francês - 1849

Variou a frequência da roda dentada até que a luz incidente e refletida passasse entre dois dentes;

Distância $\Delta S = 8630m$ tempo

$f = 12.6$ rotações por segundo

720 dentes

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = 2 \times 720 \times 2 \times 8630 = 3.13 \times 10^8 m/s$$

Foucault mediu a relação entre velocidade da luz no ar e na água $v_{\text{agua}} > v_{\text{ar}}$

determinou o índice de refração da água.

Para que a onda tenha essa velocidade é preciso que o éter seja extremamente rígido e com baixa viscosidade !!!!!

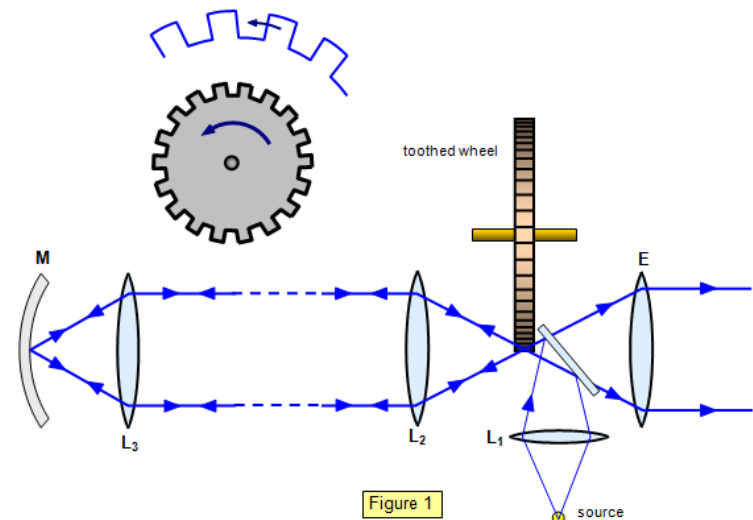
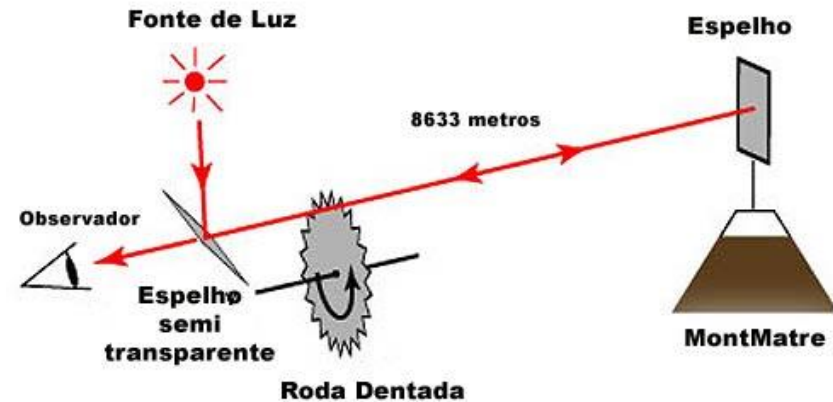
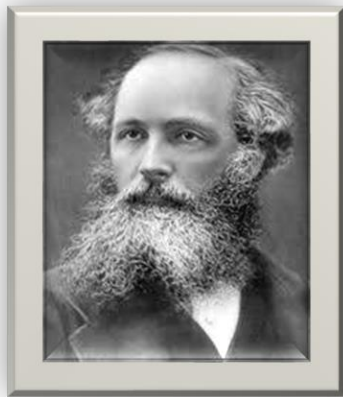


Figure 1

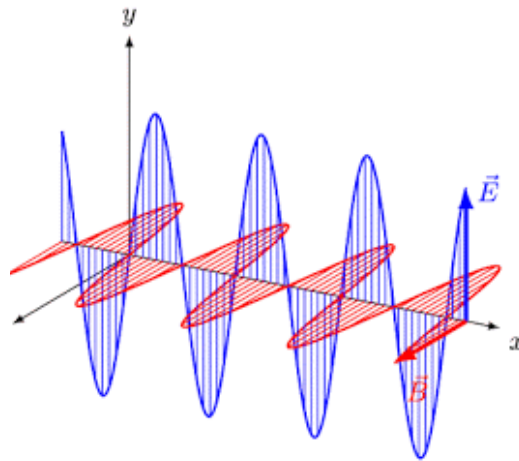
Eletrromagnetismo



James Clerk Maxwell
(1831 - 1879)

- ❑ Maxwell desenvolveu uma teoria unificando a eletricidade e magnetismo (eletromagnetismo).
- ❑ Como consequência demonstrou que a luz era uma onda eletromagnética.
- ❑ Explicou todos os fenômenos do eletromagnetismo mas também os fenômenos de interferência, refração, reflexão etc.
- ❑ Valor obtido para velocidade da luz concordava com os valores obtidos por Fizeau e Foucault

Nome	Forma diferencial	Forma integral
Lei de Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oiint_{\partial V} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q(V)}{\epsilon_0}$
Lei de Gauss para o magnetismo	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oiint_{\partial V} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$
Lei de Faraday da indução	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi_{B,S}}{\partial t}$
Lei de Ampère (com a correção de Maxwell)	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_S + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \Phi_{E,S}}{\partial t}$



- ❑ Não precisa de éter para se propagar mas Maxwell acreditava na sua existência
- ❑ Teria a mesma velocidade independente da velocidade da fonte ???
- ❑ Mas e a adição de velocidade da relatividade de Galileo ??

Propostas?

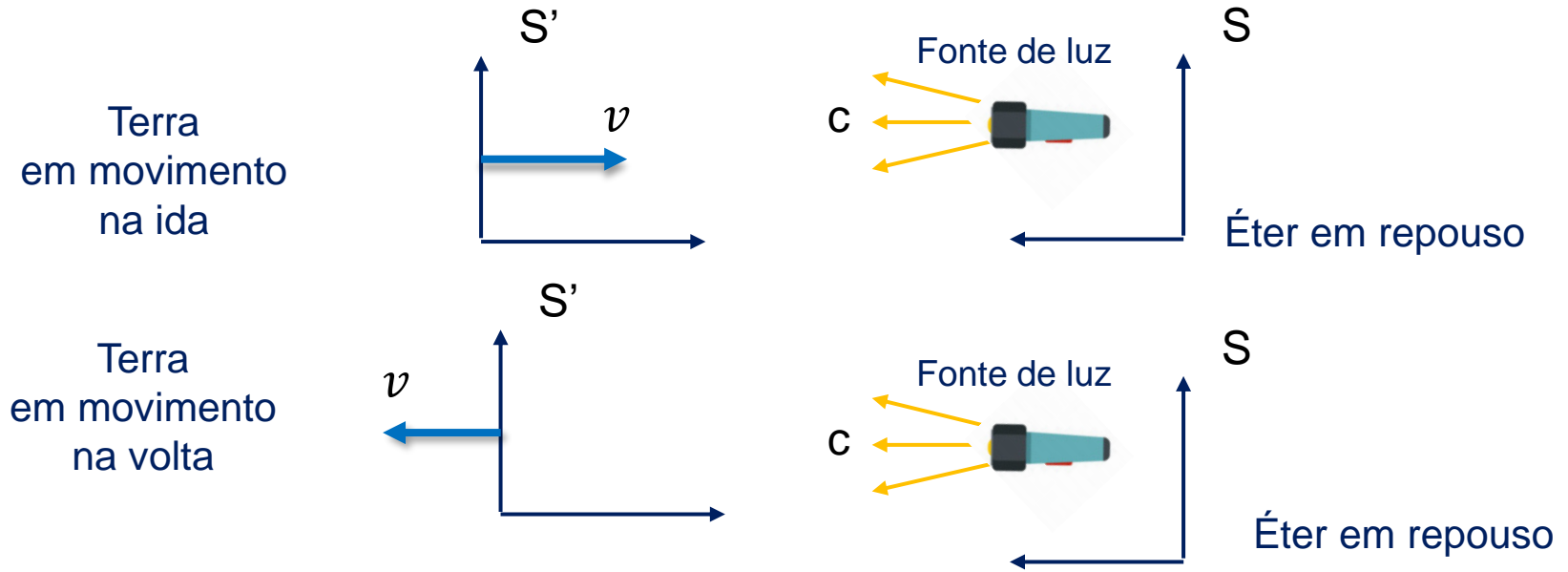
I	Mecanica de Newton (OK)	Equações de Maxwell (OK)	Relatividade de Galileo (precisa ser revista)
II	Mecanica de Newton (OK)	Equações de Maxwell (precisa ser revista)	Relatividade de Galileo (OK)
III	Mecanica de Newton (Precisa ser revista)	Equações de Maxwell (OK)	Relatividade de Galileo (precisa ser revista)

- ❑ Espaço e tempo são absolutos e a velocidade da luz é relativa (depende do referencial)
- ❑ Espaço e tempo são relativos (depende do referencial) e a velocidade da luz é absoluta.

Movimento da Terra em relação a luz

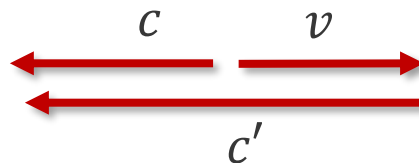
Solução

verificar se a velocidade da luz "c" é mesmo constante independente do referencial.

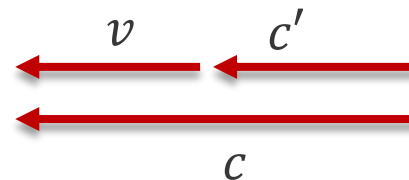


c' = luz observada em S'

ida $c' = c + v$



volta $c' = c - v$



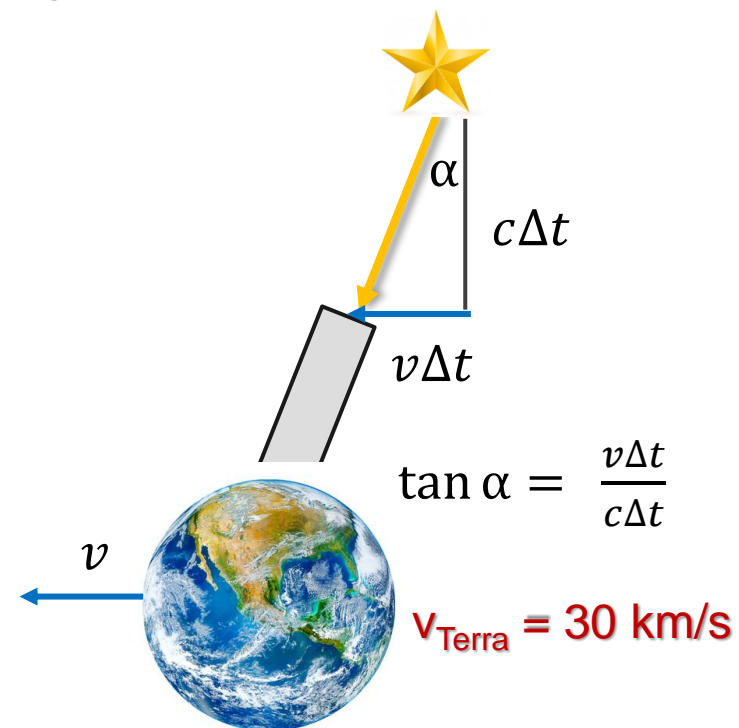
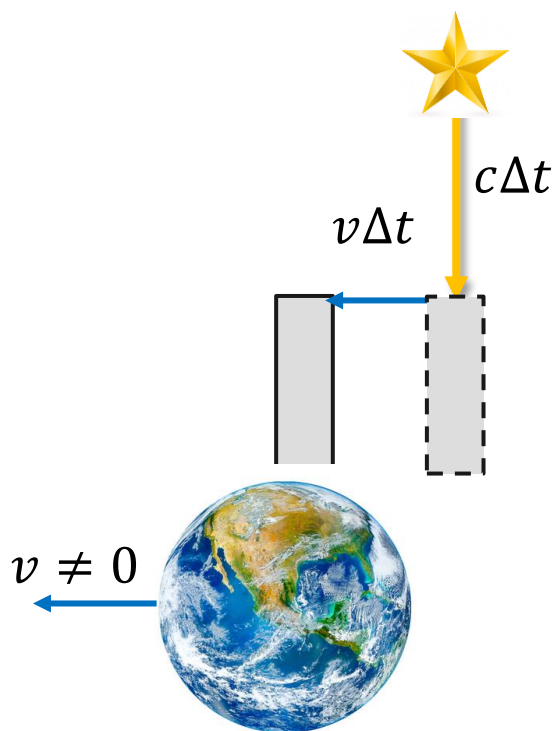
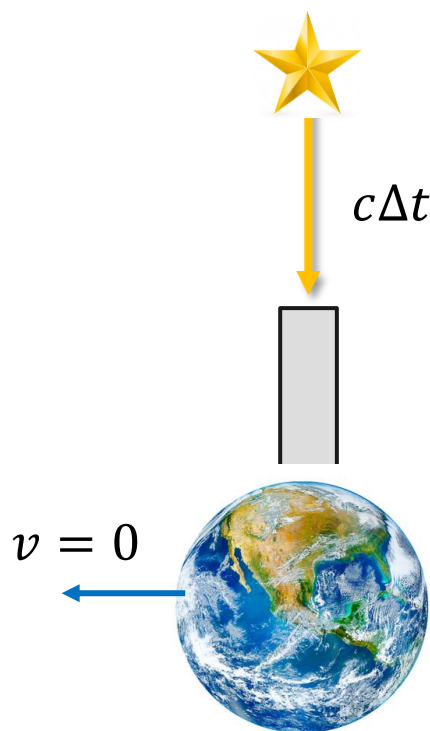
Aberração estelar

Velocidade da Terra e aberração estelar

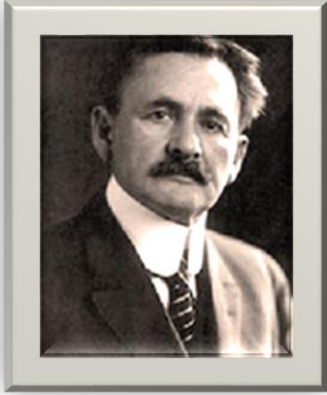
Source's rest frame



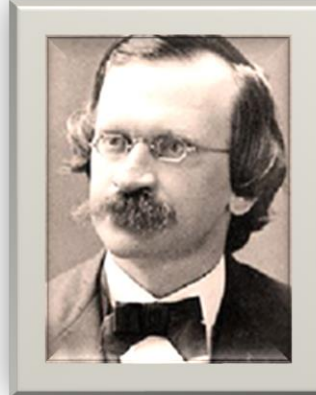
Observer's rest frame



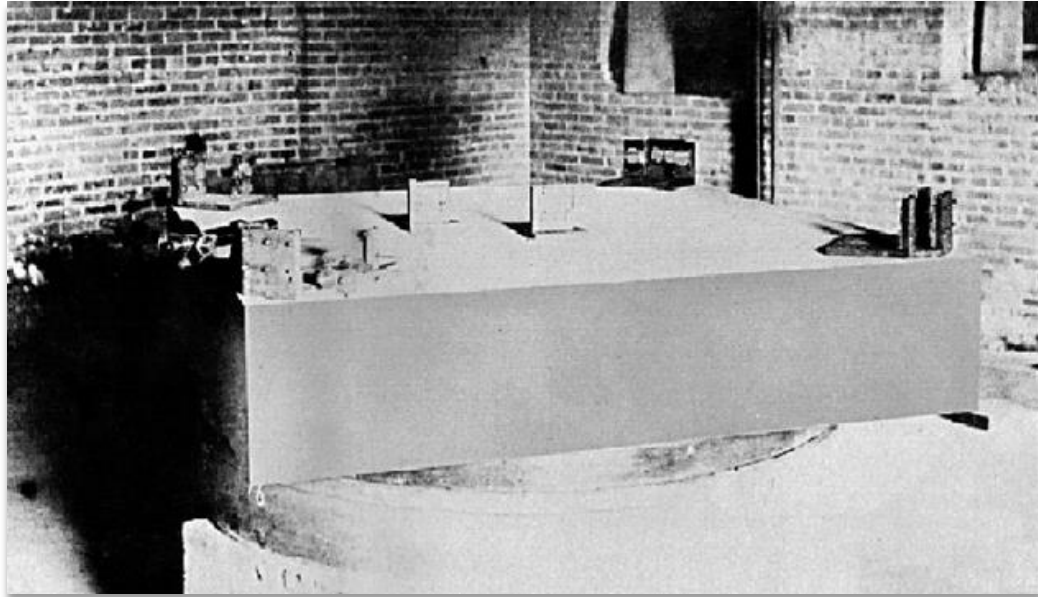
Interferômetro de Michelson e Morley



Albert Michelson
(1831 - 1879)

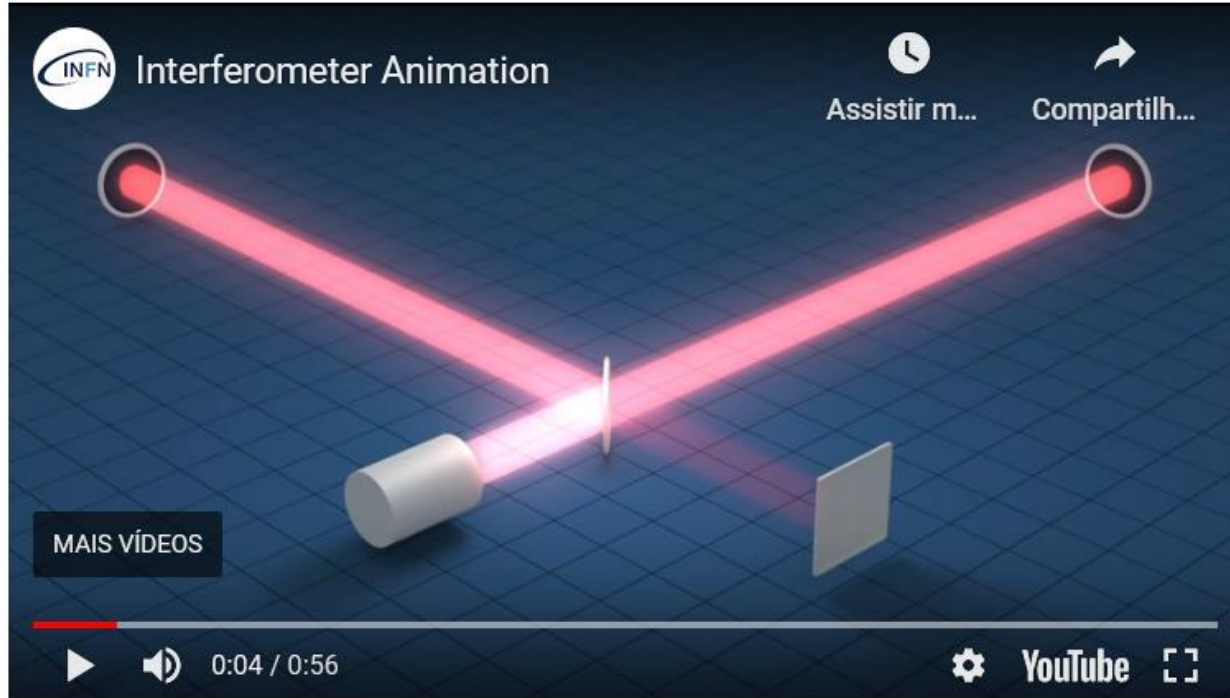


Edward Morley
(1838 - 1923)

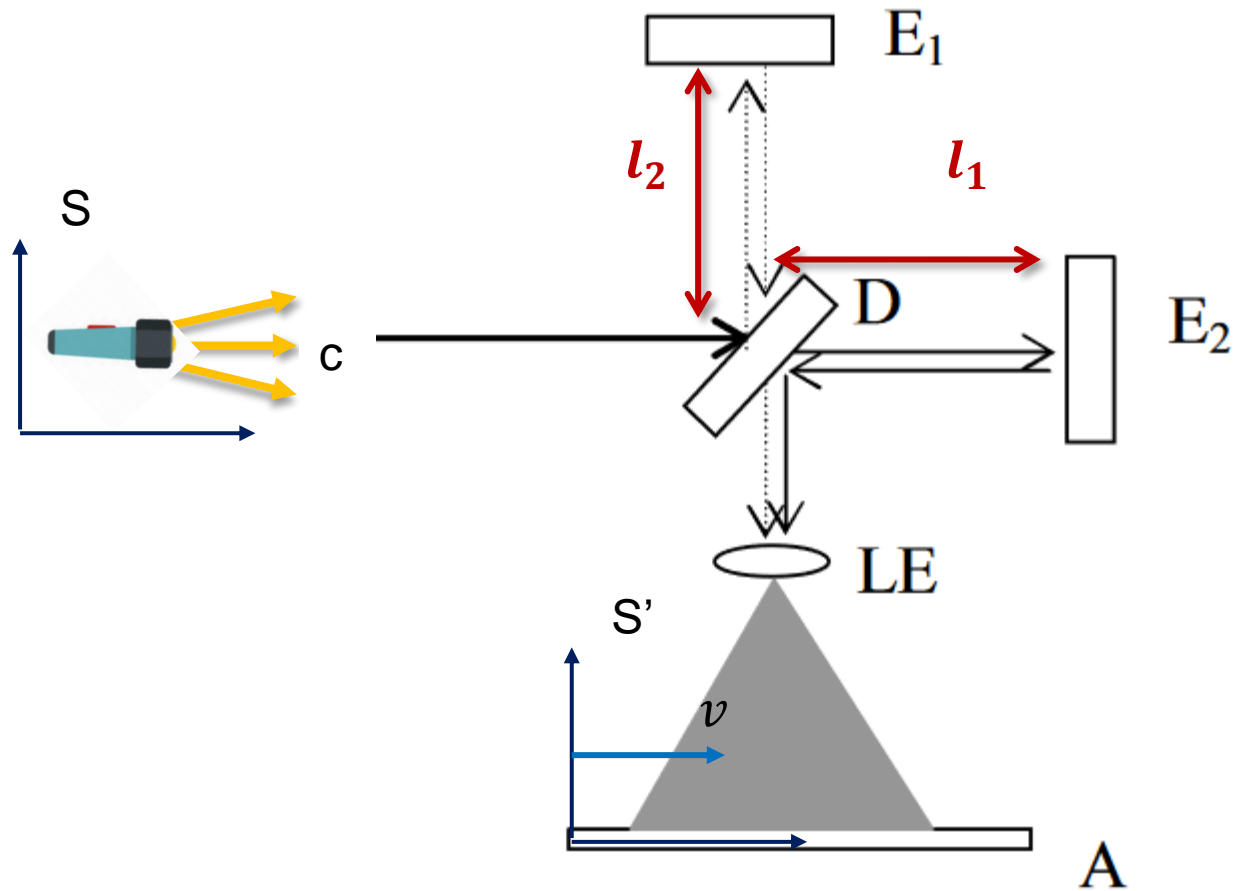


Interferômetro de Michaelson e Morley

<https://www.youtube.com/watch?v=6aHF0etDT18>



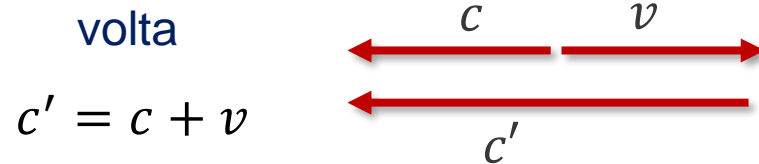
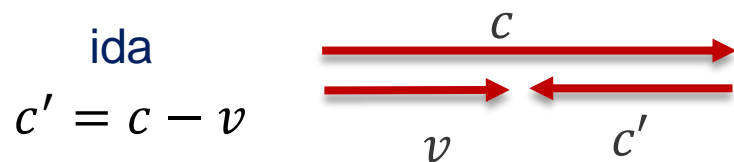
Interferômetro de Michaelson e Morley



- c = velocidade da luz em relação ao éter
- c' = velocidade da luz medida na Terra
- v = velocidade da Terra (interferômetro) em relação ao éter

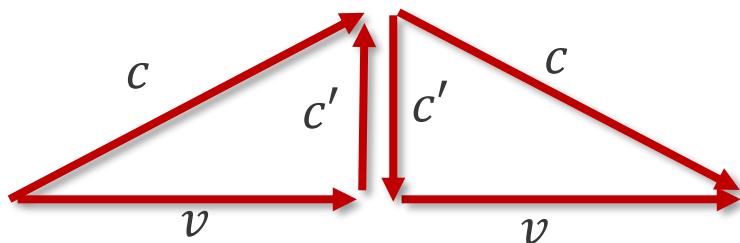
o que acontece ao longo de l_1

c' = luz observada em S'



$$\Delta t_1 = \frac{l_1}{c'} + \frac{l_1}{c'} = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v} = 2 \frac{l_1}{c} \frac{1}{(1-\frac{v^2}{c^2})}$$

o que acontece ao longo de l_2



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

$$\Delta t_2 = 2 \frac{l_2}{c'} = \frac{2l_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Se $\Delta t_2 \neq \Delta t_1$ então deveremos ter uma diferença de caminho entre l_1 e l_2 .



Podemos ajustar para ter uma interferência construtiva.



A relatividade de Galileo estaria correta

Qual seria a diferença de caminho:

$$\delta = c(\Delta t_1 - \Delta t_2) = c\left(\frac{2l_1}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - \frac{2l_2}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right) = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(\frac{l_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - l_2\right)$$

Como é muito difícil construir um aparelho com exatamente o mesmo valor de l_1 e l_2 (com a precisão desejada) o interferômetro foi girado trocando l_1 por l_2 .

$$\delta' = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(-\frac{l_2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} + l_1\right)$$

$$l_1 = l_2 = 1,2 \text{ m}$$

$$\lambda = 6 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$v = 30 \text{ km/s}$$

$$d_n = \frac{\delta' - \delta}{\lambda}$$

esperado:

$$d_n = 0,040 \pm 0,001$$

observado

$$d_n = 0,0 \pm 0,001$$

$$l_1 = l_2 = 11,0 \text{ m}$$

$$\lambda = 6 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$v = 30 \text{ km/s}$$

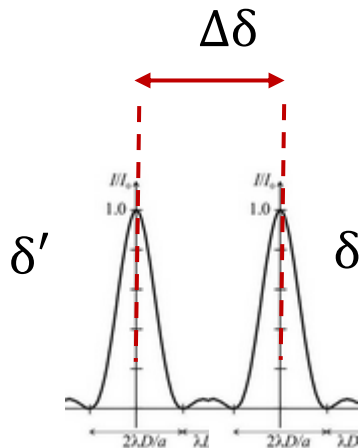
$$d_n = \frac{\delta' - \delta}{\lambda}$$

esperado:

$$d_n = 0,40 \pm 0,001$$

observado

$$d_n = 0,0 \pm 0,001$$



É como se a Terra não se movesse em relação ao éter ou então a velocidade da luz não dependesse do movimento do referencial

Proposta de Lorentz

Lorentz propôs que o espaço seria contraído na direção de v

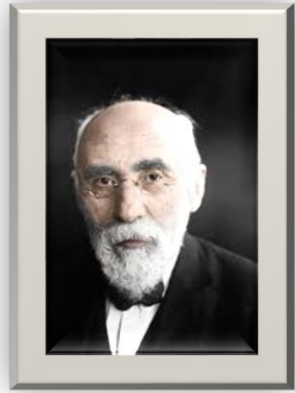
$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Se multiplicarmos o comprimento na direção do movimento por: $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

$$\delta = c(\Delta t_1 - \Delta t_2) = \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(\frac{l_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - l_2 \right)$$



$$\delta = c(\Delta t_1 - \Delta t_2) = \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(\frac{l_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \times \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} - l_2 \right) = 0 //$$



Hendrik Lorentz
(1853 - 1928)



Premio Nobel 1902

Proposta de Einstein



Albert Einstein

(1879 - 1955)



Premio Nobel 1921

Einstein então propôs a teoria da relatividade restrita com as seguintes propostas:

Todos os sistemas inerciais são equivalentes para a formulação das leis da Física

A luz se propaga no vácuo de modo retilíneo e com a mesma velocidade c em todas as direções e em todos os sistemas inerciais (independente da velocidade da fonte)

Velocidade da luz c é absoluta
Tempo e espaço são relativos e dependem do referencial

1927 Solvay Congress Conference on Electrons and Photons

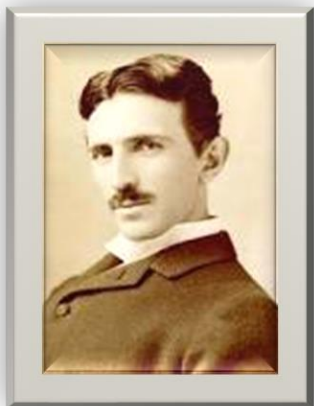


SOLVAY CONFERENCE 1927

colourized by pastincolour.com

A. PICARD E. HENRIOT P. EHRENFEST Ed. HERSEN Th. DE DONDER E. SCHRÖDINGER E. VERSCHAFFELT W. PAULI W. HEISENBERG R.H FOWLER L. BRILLOUIN
P. DEBYE M. KNUDSEN W.L. BRAGG H.A. KRAMERS P.A.M. DIRAC A.H. COMPTON L. de BROGLIE M. BORN N. BOHR
I. LANGMUIR M. PLANCK Mme CURIE H.A. LORENTZ A. EINSTEIN P. LANGEVIN Ch.E. GUYE C.T.R. WILSON O W. RICHARDSON

Absents : Sir W.H. BRAGG, H. DESLANDRES et E. VAN AUBEL



Nicola Tesla
(1856 - 1943)

Nikola Tesla viveu nos Estados Unidos.

Ele é considerado um dos maiores injustiçados do mundo da ciência. Pai de diversas invenções relacionadas ao eletromagnéticos não creditadas ao seu nome, Tesla permitiu que o mundo em que vivemos se tornasse real. Corrente alternada (AC), motor elétrico com corrente AC, transmissão de onda eletromagnética,

<https://canaltech.com.br/curiosidades/nikola-tesla-genio-futurista-e-de-coracao-benevolente-nascia-ha-162-anos-117558/>

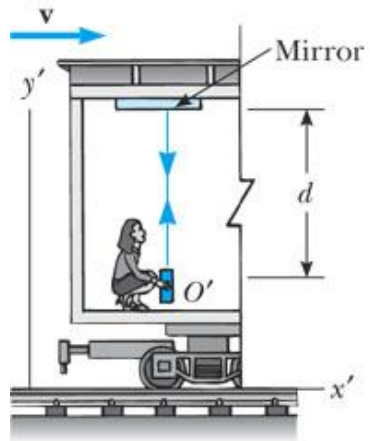
Tesla arrumava briga com muita gente importante. Foi um ferrenho contestador da teoria da relatividade e brigou com Einstein durante muito tempo:

De acordo com Tesla: “A teoria da relatividade é uma massa de erros violentamente oposta aos ensinamentos dos grandes homens da ciência do passado e até do senso comum. A teoria amarra todos esses erros e falácias e os veste em roupas matemáticas elegantes que fascinam, encantam e deixam as pessoas cegas. Os exponentes dela são homens muito brilhantes, mas eles são metafísicos, não são cientistas. Nem uma só proposta da teoria da relatividade foi provada”, disparou

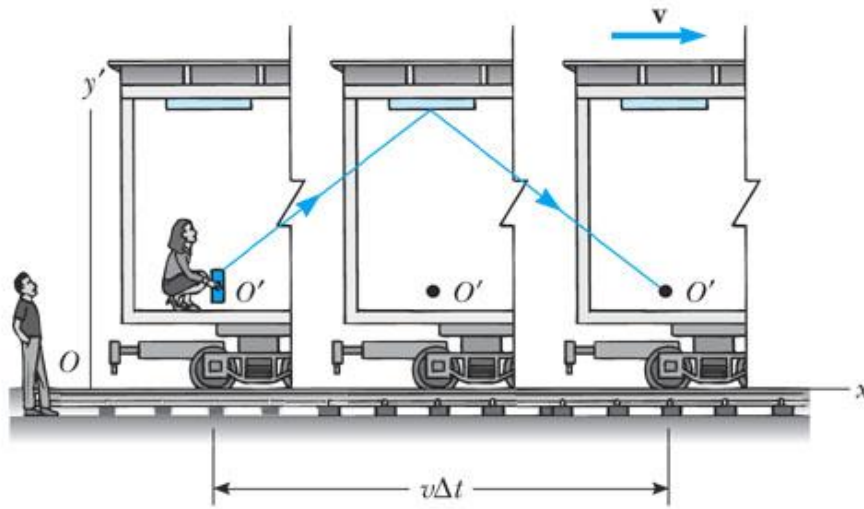
Videos sobre o interferômetro de Michelson Morley

<https://www.youtube.com/watch?v=7qJoRNseyLQ>

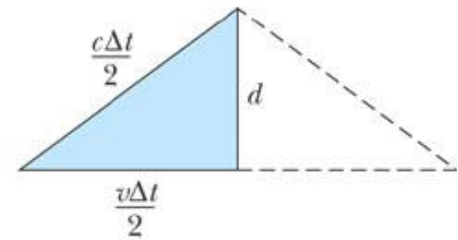
<https://www.youtube.com/watch?v=RYb1fTT1Www>



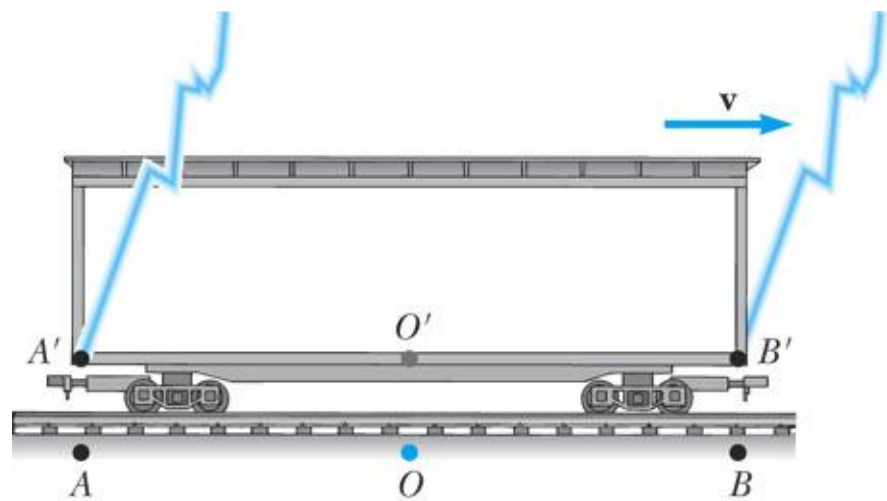
(a)



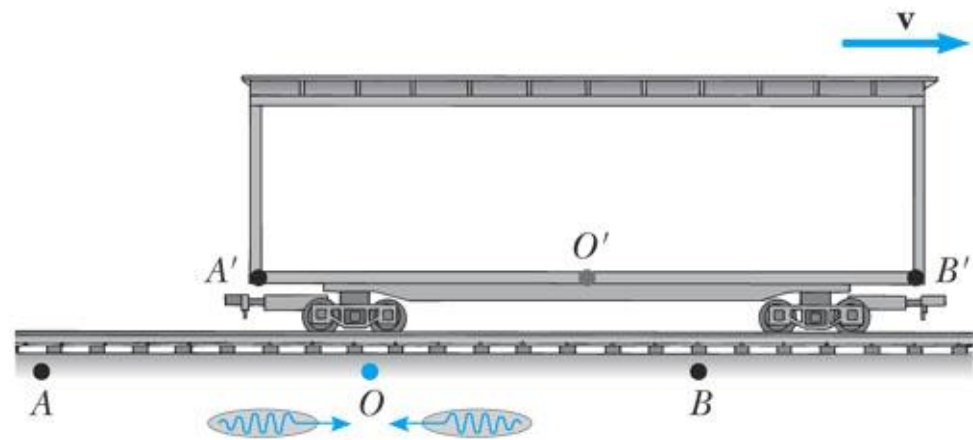
(b)



(c)



(a)



(b)