

**Universidade de São Paulo
Instituto de Física**

RELATIVIDADE - 4300374

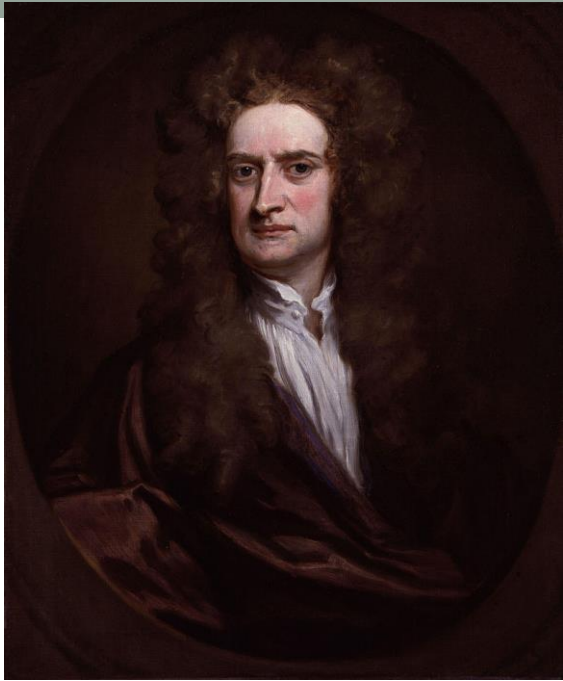
AULA 02

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=101531>

**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto
Pelletron – sala 220
rizzutto@if.usp.br**

**Monitor: Marcelo Marcelino de Carvalho
marcelo_marcelino@usp.br**

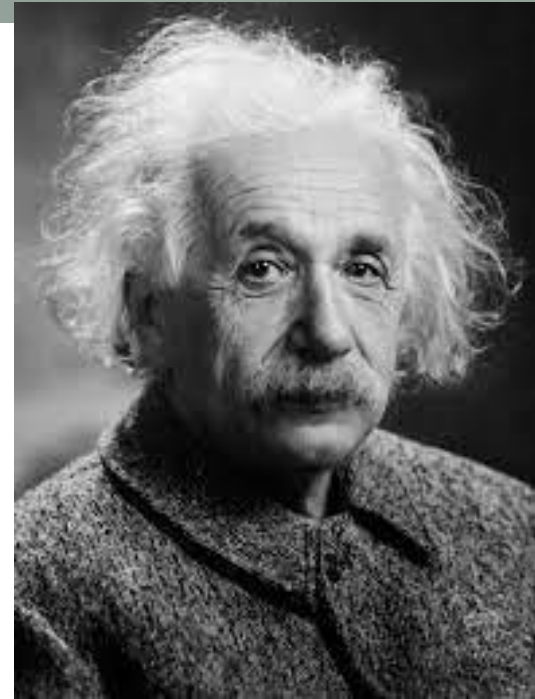
2o. Semestre de 2022



Newton - 1686

Intervalos de tempo e espaço são absolutos e a velocidade da luz é relativa

$$a = \frac{F}{m}$$



Einstein - 1905

A velocidade de luz é absoluta e os intervalos de tempo e espaço são relativos

Mas não foi rapidamente aceita 1922 recebeu Nobel pelo efeito fotoelétrico

$$a = \frac{F}{m} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}$$

Final do Sec. XIX – Problemas resolvidos:

- Mecânica e a gravitação regiam o movimento dos corpos celestes e terrestres
- Fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos unificados pelo eletromagnetismo de Maxwell.
- Termodinâmica utilizada para aumentar a expansão industrial da época

O que queremos

- Compreender o conflito entre a relatividade da mecânica clássica e o eletromagnetismo a fim de motivar os princípios da teoria da relatividade

Discutir a contradição entre o princípio da relatividade na mecânica clássica e o eletromagnetismo no final do século XIX e início do século XX

Referências:

- seção 6.1 HMN, capítulo 17 MJMS, capítulo 1 JP

O conflito

A conciliação é possível a partir de uma destas três hipóteses :

1. As leis da mecânica e do eletromagnetismo são válidas, mas o princípio da relatividade clássico não se aplica a todos os referenciais. Existe um referencial especial (absoluto), chamado de **éter**, onde a velocidade da luz é c e é possível medir um movimento retilíneo e uniforme em relação a ele
2. O eletromagnetismo precisa ser modificado para acomodar diferentes valores da velocidade da luz conforme o referencial inercial
3. A mecânica precisa ser modificada (transformações de Galileu) para acomodar o valor constante da velocidade da luz

A fim de se preservar as aparentes inconsistências entre a mecânica e o eletromagnetismo, a alternativa mais “atraente” seria aquela que preserva ambas as teorias como eram conhecidas, ou seja, a hipótese do éter ●

O Éter

No século XIX as evidências eram bastante claras: luz é onda.

Todavia, toda experiência com ondas até então exigia que as ondas fossem propagadas em algum meio material: ondas sonoras no ar, ondas de água na água, ondas elásticas nos mais diversos meios elásticos.

Era inconcebível que a luz não se propagasse em um meio material e sim no vazio.

Pensou-se então que as ondas eletromagnéticas propagavam-se como as ondas elásticas num meio **material chamado de éter**

O Éter

O meio **material éter**

Enchia todo o espaço do universo tanto em regiões de vácuo como em regiões preenchidas com matéria comum.

Deveria ter propriedades quase contraditórias:

Deveria ser muito rígido, para que a velocidade de propagação do distúrbio luminoso fosse altíssima (299.792.458 m/s),

mas também deveria ser arrastado com baixíssima resistência, para não interferir no movimento planetário, por exemplo.

- Ao longo do tempo os fenômenos elétricos e magnéticos foram sendo **atribuídos ao éter**, que foi se tornando cada vez mais estranho para acomodar todas as propriedades elétricas, magnéticas e óticas.
- Por fim, em meados do século XIX, James C. Maxwell conseguiu formular uma teoria que unia os fenômenos elétricos, magnéticos e óticos, o eletromagnetismo, com base em uma teoria de éter muito sofisticada.
- Poucos anos depois, o mesmo Maxwell sugeriu que o eletromagnetismo sustentava-se independentemente do éter, bastando admitir a existência de campos, elétrico e magnético, que pudessem ser propagados no vácuo.

MAS, a ideia não era simples de ser aceita:

uma modificação tão profunda na visão - de - mundo

Newtoniana, que tanto sucesso já havia tido, e abandonar a materialização do Espaço e do Tempo Absolutos e Verdadeiros, o éter.

Como resolver a questão?

medir a velocidade relativa em relação ao éter

Várias tentativas foram realizadas, sendo a mais conhecida os experimentos de interferometria de Michelson e Morley em 1881

Que é a tentativa mais famosa de medir a velocidade da terra em relação ao éter

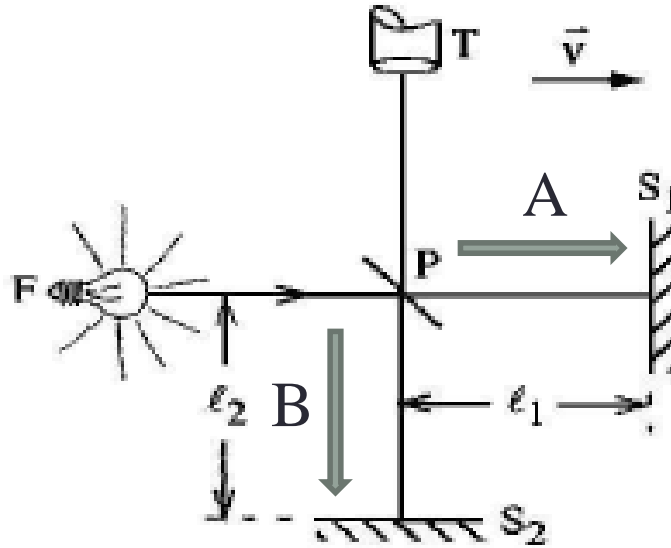
Ideia era usar a luz propagando-se no vácuo (ou no ar com $n_{\text{ar}}=1$, n é o índice de refração)

A velocidade da luz será c em relação ao éter e

$$\vec{c}' = \vec{c} - \vec{V}$$

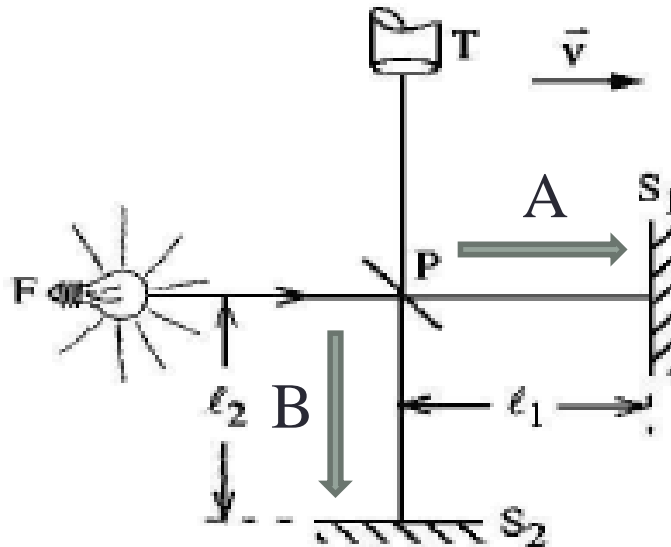
em relação à Terra, sendo \vec{V} a velocidade da Terra em relação ao éter

O experimento de Michelson e Morley



Feixe de luz sai da fonte e é dividido no ponto P (espelho semitransparente) em dois feixes (A e B). Depois estes feixes são refletidos nos espelhos S_1 e S_2 e voltam para o ponto P e interferem no feixe $A+B$ no telescópio T .

O experimento de Michelson e Morley



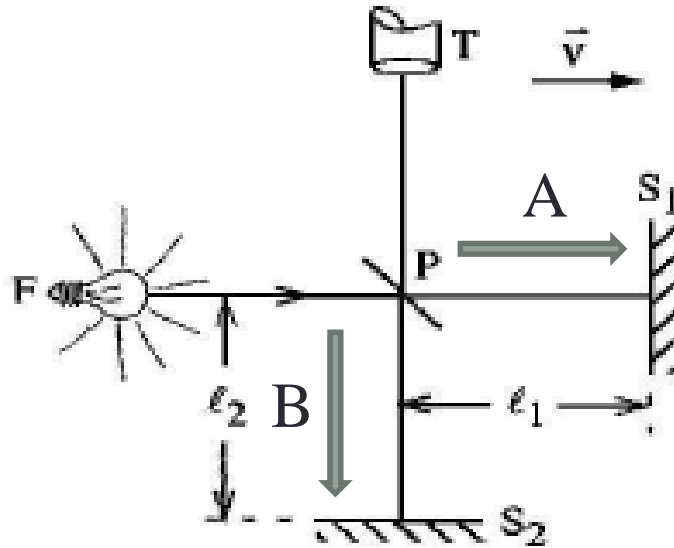
Vamos supor que o interferômetro mova-se, em relação ao éter, com velocidade v na direção PS1:

No caminho PS1 a luz terá velocidade $c-v$ e na volta $c+v$

O tempo de ida e volta para percorrer este espaço l_1 será igual a:

$$\Delta t_1 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v}$$
$$\Delta t_1 = \frac{(c+v)l_1 + (c-v)l_1}{c^2 - v^2} = \frac{2cl_1}{c^2 - v^2} = \frac{2cl_1}{c^2(1 - (\frac{v}{c})^2)} = \frac{2l_1}{c(1 - \beta^2)} \quad \text{onde } \beta = \frac{v}{c}$$

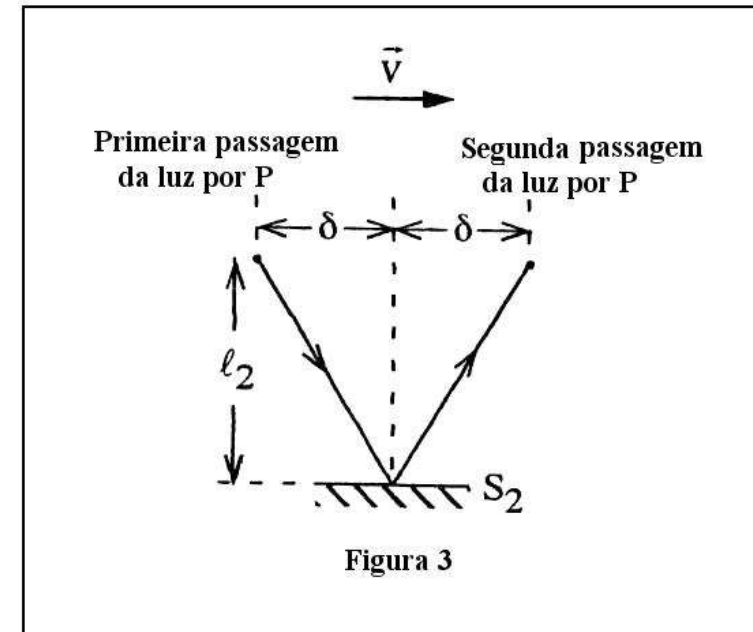
O experimento de Michelson e Morley

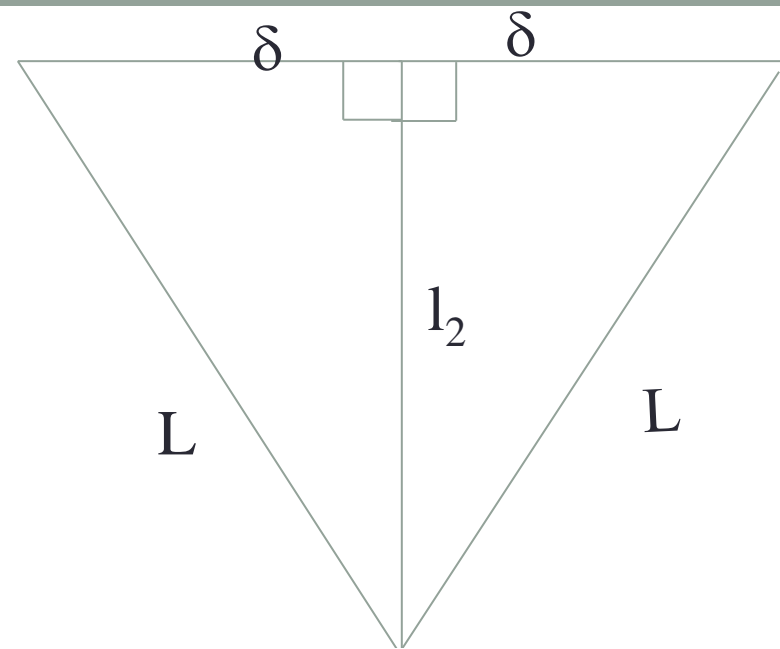
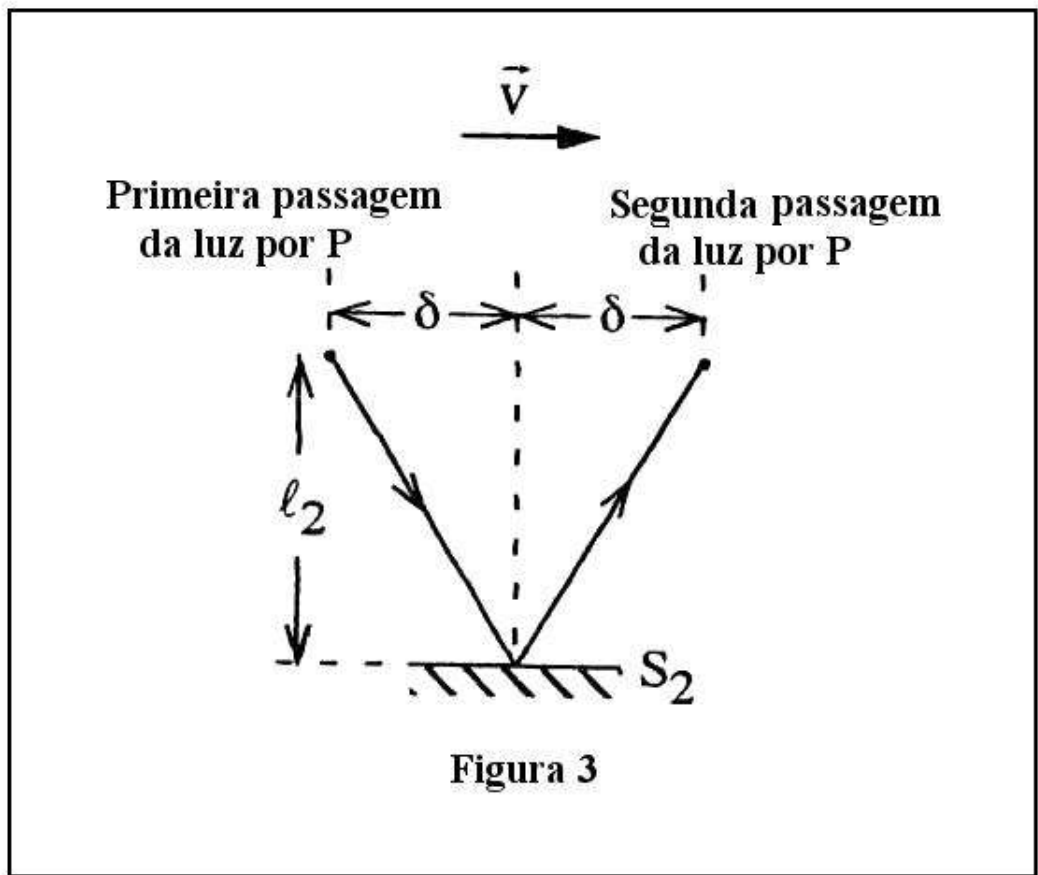


No caminho PS_2 este é perpendicular a velocidade do interferômetro em relação ao éter.

Para percorrer ℓ_2

Pensar que o espelho P terá se movido a uma distância δ enquanto a luz vai de P a S_2 e mais uma distância δ na volta de S_2 a P





$$\Delta t_2 = \frac{2L}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{l_2^2 + \left(\frac{V \cdot \Delta t_2}{2}\right)^2}$$

Sendo:

$$\Delta t_2^2 = \frac{4}{c^2} \left(l_2^2 + \frac{V^2 \cdot \Delta t_2^2}{4} \right) = \frac{4}{c^2} l_2^2 + \frac{V^2}{c^2} \Delta t_2^2$$

$$\Delta t_2^2 = \frac{4}{c^2} l_2^2 \cdot \frac{1}{1 - \frac{V^2}{c^2}} = \frac{4l_2^2}{c^2(1 - \beta^2)}$$

temos:

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

$$\delta = \frac{V\Delta t_2}{2} \quad L^2 = \delta^2 + l_2^2$$

LG

A diferença no caminho percorrido pela luz em cada braço do interferômetro será:

$$\Delta S = c(\Delta t_1 - \Delta t_2)$$

$$\Delta t_1 = \frac{2l_1}{c(1 - \beta^2)} \quad \Delta t_2 = \frac{2l_2}{c\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \beta = \frac{V}{c}$$

$$\Delta S = c \left(\frac{2l_1}{c(1 - \beta^2)} - \frac{2l_2}{c\sqrt{1 - \beta^2}} \right)$$

$$\Delta S = \frac{2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \left(\frac{l_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - l_2 \right)$$

Se $\beta \ll 1$ (que é o caso da velocidade da Terra, $\sim 30\text{km/s}$) a diferença de caminho será bem pequena devido ao movimento do planeta no éter

Uma forma de melhorar a sensibilidade da medida é girar os braços de 90° , ou seja, trocar as direções de l_1 e l_2 ,
Então

$$\Delta t_1 = \frac{2l_1}{c(1-\beta^2)}, \quad \Delta t_2 = \frac{2l_2}{c\sqrt{1-\beta^2}}$$

irão mudar resultando em:

$$\Delta t_1' = \frac{2l_1}{c\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \Delta t_2' = \frac{2l_2}{c(1-\beta^2)}$$

E uma diferença de caminho ótico dada por:

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

Com isso, a diferença de caminho ótico entre uma medida e outra, se houver uma velocidade relativa ao éter, é:

$$\Delta S = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left(\frac{l_1}{\sqrt{1-\beta^2}} - l_2 \right)$$

$$\Delta S' = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left(l_1 - \frac{l_2}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)$$

$$\Delta S' - \Delta S = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left(l_1 - \frac{l_2}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) - \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left(\frac{l_1}{\sqrt{1-\beta^2}} - l_2 \right)$$

$$\Delta S' - \Delta S = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} (l_1 + l_2) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)$$

Cujo efeito deverá ser mais perceptível

$$\Delta S' - \Delta S = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}}(l_1 + l_2) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)$$

Fazer a expansão $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = (1 - \beta^2)^{-1/2} = 1 + \frac{1}{2}\beta^2$

Tem-se a mudança no caminho ótico em relação ao comprimento de onda utilizado:

$$\Delta m = \frac{\Delta S' - \Delta S}{\lambda} \approx \frac{2}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2}\beta^2 \right) (l_1 + l_2) \left(1 - 1 - \frac{1}{2}\beta^2 \right)$$

$$\Delta m \approx \frac{2}{\lambda} (l_1 + l_2) \left(1 + \frac{1}{2}\beta^2 \right) \left(-\frac{1}{2}\beta^2 \right) =$$

$$\Delta m \approx -\frac{(l_1 + l_2)}{\lambda} \beta^2 - \frac{(l_1 + l_2)}{\lambda} \beta^4$$

$$\Delta m \approx -\frac{(l_1 + l_2)}{\lambda} \beta^2 - \frac{(l_1 + l_2)}{\lambda} \beta^4$$

Desprezando o termo β^4 temos:

$$\Delta m \approx -\frac{(l_1 + l_2)}{\lambda} \beta^2$$

No experimento de Michelson e Morley usaram $l_1=l_2=1,2\text{m}$ e $\lambda=6 \times 10^{-7}\text{m}$ e sendo :

$$\beta = \frac{30}{3 \times 10^5} = 1 \times 10^{-4}$$

Temos:
$$\Delta m \approx \frac{(2,4)}{6 \times 10^{-7}} (1 \times 10^{-4})^2 = 0,04$$

No experimento de Michelson e Morley em 1887 usaram $l_1=l_2=11\text{m}$

$$\Delta m \approx \frac{(22)}{6 \times 10^{-7}} (1 \times 10^{-4})^2 = 0,4$$

Em ambos os casos, deveria ter se notado um padrão de interferência diferente em cada um dos casos, o que não foi observado!

O experimento de Michelson e Morley

CONCLUSÃO

Nenhum deslocamento foi observado!

Michelson e Morley puderam afirmar que a velocidade da Terra em relação ao éter era inferior a 10 km/s. Em outras palavras, a velocidade da luz era a mesma, tanto na Terra quanto no éter, e a Lei de

Adição de Velocidades de Galileu necessitava de correções, pelo menos quando aplicada a fenômenos de altas velocidades, comparáveis a da luz.

CONTRAÇÃO DE COMPRIMENTO DE LORENTZ - FITZGERALD