

# **Universidade de São Paulo**

## **Instituto de Física**

**RELATIVIDADE - 4300374**

---

**AULA 03**

<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**

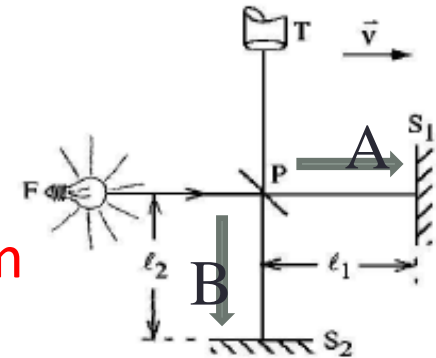
**marcelo\_marcelino@usp.br**

**2o. Semestre de 2022**

# O experimento de Michelson e Morley (MM) - 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.



Tentativa para preservar o conceito de um sistema preferencial do éter

- A aberração da luz estelar
- A hipótese da Contração de Lorentz-Fitzgerald

# A aberração da luz estelar

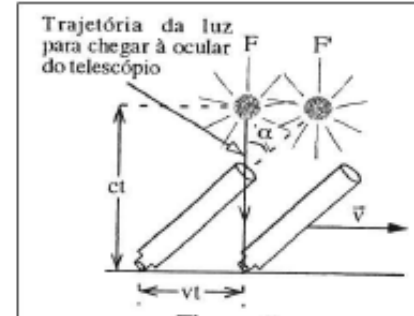
Uma forma de explicar o resultado nulo do experimento de Michelson - Morley era supor que o éter fosse localmente arrastado pela Terra em seu movimento pelo espaço. Nesse caso o interferômetro estaria em repouso em relação ao éter local e seria natural esperar que nada fosse detectado.

Todavia, se a fonte de luz estivesse localizada fora da Terra tal explicação deixaria de valer.

Na verdade, o conhecido fenômeno de aberração da luz estelar, facilmente explicado em termos da teoria do éter, não deveria ocorrer se o éter fosse arrastado pela Terra.

# A aberração da luz estelar

Um telescópio que tente observar uma estrela no zênite, por exemplo, como a fonte F:



Não deve ser apontado diretamente para a fonte de luz (estrela) mas sim deve ser inclinado para direção F' para compensar o efeito do avanço da Terra pelo éter com velocidade v.

O ângulo  $\alpha$  da inclinação pode ser dado por:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{v}{c}\right) \cong \text{20,5''} \text{ Segundos de arco para } v \sim 30 \text{ km/s (velocidade da Terra em torno do sol)}$$

E este resultado está em excelente acordo com a observação astronômica de Bradley (1728),

Mas este não deveria ocorrer se o éter fosse arrastado pela Terra.... Algo errado

O éter não é arrastado junto com a Terra, não explicamos o resultado do Michelson-Morely por meio do arrastamento do éter

# CONTRAÇÃO DE COMPRIMENTO DE LORENTZ - FITZGERALD

Outra tentativa de provar o conceito do éter:

Fitzgerald (1892) propôs uma hipótese (depois complementada por Lorentz) para explicar o resultado nulo do experimento de Michelson-Morley.

Hipótese: todos os corpos são contraídos na direção do movimento

relativo ao éter por um fator :  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{1 - \beta^2}$        $\beta = \frac{v}{c}$

Sendo assim, o comprimento  $\ell$  de um corpo quando em movimento com relação ao éter, na experiência de M-M seria escrito por:

$$l_1 = l_1^0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

$$l_2 = l_2^0$$

Comprimeto do braço PS1

$l_1^0$  e  $l_2^0$  São comprimentos em repouso

Não tem contração pois o movimento é perpendicular

# CONTRAÇÃO DE COMPRIMENTO DE LORENTZ – FITZGERALD (LF)

$$\beta = \frac{v}{c}$$

No experimento resultante, tem-se por hipótese que os comprimentos em ângulos retos em relação ao movimento não são afetados

E com rotação de  $90^\circ$

$$\Delta t = \frac{2}{c} \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} (l1^0 - l2^0)$$

$$\Delta t' = \frac{2}{c} \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} (l1^0 - l2^0)$$

E portanto, nenhum descolamento de franja será esperado na rotação do interferômetro pois  $\Delta t' - \Delta t = 0$

No entanto, se o experimento for repetido com outra velocidade  $v'$  do interferômetro em relação ao éter o resultado será para o deslocamento das franjas:

$$n = \frac{l1^0 - l2^0}{\lambda} \left( \frac{v'^2}{c^2} - \frac{v^2}{c^2} \right)$$

No entanto este efeito não foi observado e a contração de LF não era correta

# CONTRAÇÃO DE COMPRIMENTO DE LORENTZ – FITZGERALD (LF)

No entanto este efeito não foi observado e a contração de LF não era correta



Na realidade, nós teremos a contração de LF na teoria da relatividade de Einstein



O que está incorreto é a teoria do éter e as noções de espaço- tempo absoluto. Ou seja a hipótese do éter é insustentável



A velocidade da luz (radiação eletromagnética) é a mesma em todos os sistemas inerciais, independentemente do movimento relativo da fonte e do observador

## Princípio da Relatividade

Sabia-se que a mecânica de Newton dava conta de todos os fenômenos que envolviam baixas velocidades mas que havia problemas em descrever o único fenômeno de alta velocidade conhecido, a propagação da luz.

Por outro lado, o eletromagnetismo de Maxwell descrevia os fenômenos ópticos com perfeição. Por que não manter o eletromagnetismo inalterado e modificar o que fosse necessário na mecânica para que esta fosse compatível com as previsões do eletromagnetismo?

Para conciliar a mecânica e o Eletromagnetismo, o Princípio da Relatividade tem que ser aplicado.

Albert Einstein em 1905 propõe novos princípios em seu trabalho “Sobre a eletrodinâmica de corpos em Movimento”.



PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE de Einstein propõe dois postulados:

1) TODOS OS SISTEMAS INERCIAIS SÃO EQUIVALENTES PARA A FORMULAÇÃO DE TODAS AS LEIS DA NATUREZA

- Uma consequência imediata deste Princípio é a abolição do éter como sistema inercial privilegiado.
  - O segundo passo de Einstein foi elevar um fato experimentalmente verificado à condição de postulado básico da teoria:

PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE de Einstein propõe dois postulados:

**2) A LUZ PROPAGA-SE, NO VÁCUO, DE MODO RETILÍNEO E COM A MESMA VELOCIDADE  $c$  EM TODOS OS TEMPOS, EM TODAS AS DIREÇÕES E EM TODOS OS SISTEMAS INERCIAIS, A DESPEITO DO ESTADO DE MOVIMENTO DA FONTE DE LUZ (tanto se a luz for emitida por um corpo em repouso como por um corpo em movimento uniforme.**

Este segundo postulado afirma, em particular, que a despeito do quão rápido nos aproximemos ou afastemos de um sinal luminoso este sempre terá a mesma velocidade  $c$  em relação a nós.

Einstein percebeu que esta consequência elementar da LEI DE PROPAGACAO DA LUZ exige que nossas noções de Espaço e Tempo sejam seriamente revistas.

# “Sobre a eletrodinâmica de corpos em Movimento”

Einstein 1905:

Consequências destes postulados:

## SIMULTANEIDADE:

Quando digo, por exemplo, que "o trem chega aqui às sete horas" quero dizer algo como "a sobreposição do ponteiro pequeno do meu relógio sobre o algarismo sete e a chegada do trem são eventos simultâneos".

O parágrafo acima é um excerto do artigo de 1905 de Albert Einstein publicado nos *Annalen der Physik* e ilustra a importância da noção de simultaneidade de eventos na descrição que fazemos da natureza.

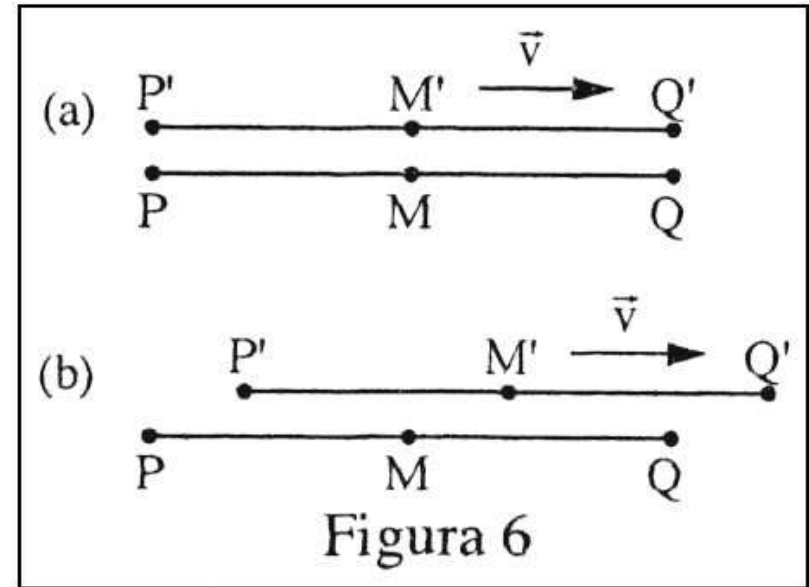
# “Sobre a eletrodinâmica de corpos em Movimento”

Einstein 1905.

## SIMULTANEIDADE:

Suponha que dois eventos  $P$  e  $Q$ , que acontecem nos pontos  $P$  e  $Q$  do sistema inercial  $S$ , sejam simultâneos.  $S'$  é um sistema inercial que se move na direção  $PQ$  com velocidade  $v$  e nele  $P'$  e  $Q'$  são os pontos em que os eventos  $P$  e  $Q$  ocorrem, enquanto  $M'$  e o ponto médio do segmento  $P'Q'$

Situação vista de  $S$  está na parte (a) da figura ao lado



# “Sobre a eletrodinâmica de corpos em Movimento”

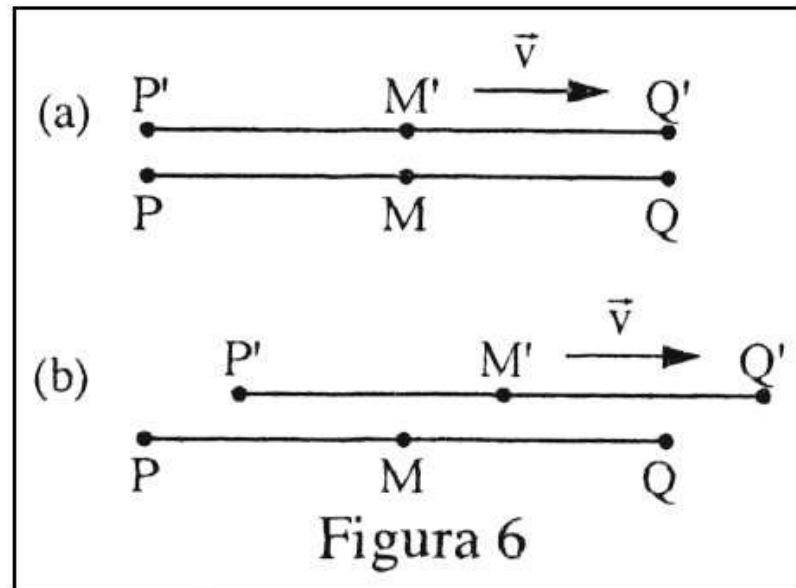
Einstein 1905.

## SIMULTANEIDADE:

Na parte b da figura temos a situação que aconteceria se a luz vinda do ponto P que chegou ao ponto médio M do seguimento PQ. Uma vez que os eventos P e Q são simultâneos em S a luz que vem dos pontos P e Q chegará simultaneamente em M.

Como a luz leva um certo tempo entre sua emissão e sua chegada ao ponto M, os dois pontos médios M e M' não mais coincidirão quando a luz chegar a M. Os dois sinais luminosos, vindos de P e de Q, não podem se encontrar tanto em M quanto em M' e portanto concluímos que a simultaneidade de eventos em S não leva, necessariamente, à simultaneidade eventos em S'.

A noção de Tempo Absoluto é incompatível com tal conclusão e daí vem a necessidade de revisão de nossas concepções de Espaço e Tempo.



## Definição de Einstein da simultaneidade

- No que implica esses dois postulados? Quais são as consequências para a Mecânica Clássica de se impor que a velocidade da luz é constante em qualquer referencial?