Física para a Engenharia II

Aula 1 - Relatividade

Página da disciplina: http://stoa.usp.br
cursos → IF → POLI → 4320196
Notas de aula: http://romeo.if.usp.br/~vchitta

Prof. Valmir A. Chitta

e-mail: vchitta@if.usp.br
tel: 3091-7099
Ed. Mário Schenberg, sala 209

1 de Agosto de 2011

Sumário

Sumário

As três leis de Newton do movimento

- Um corpo permanece em repouso ou em movimento retilíneo uniforme a menos que uma força atue sobre si

As três leis de Newton do movimento

- Um corpo permanece em repouso ou em movimento retilíneo uniforme a menos que uma força atue sobre si
- Um corpo que sofre a ação de uma força move-se de modo tal que a taxa de variação temporal do momento linear seja igual à força

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

As três leis de Newton do movimento

- Um corpo permanece em repouso ou em movimento retilíneo uniforme a menos que uma força atue sobre si
- Um corpo que sofre a ação de uma força move-se de modo tal que a taxa de variação temporal do momento linear seja igual à força

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

- Se dois corpos exercem forças um sobre o outro estas serão iguais em magnitude e opostas em sentido

As três leis de Newton do movimento

- Um corpo permanece em repouso ou em movimento retilíneo uniforme a menos que uma força atue sobre si
- Um corpo que sofre a ação de uma força move-se de modo tal que a taxa de variação temporal do momento linear seja igual à força

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

- Se dois corpos exercem forças um sobre o outro estas serão iguais em magnitude e opostas em sentido
- Intervalos de espaço e tempo são absolutos e a velocidade da luz é relativa

Espaço e tempo absolutos

- **Lei da inércia (Galileu):** repouso ou movimento retilíneo uniforme em relação a que?

- **Lei da inércia (Galileu):** repouso ou movimento retilíneo uniforme em relação a que?
- **Newton**: ao Espaço e Tempo Absolutos

Movimento

- É possível detectar o estado de movimento em relação ao Espaço e ao Tempo Absolutos?

Movimento

- É possível detectar o estado de movimento em relação ao Espaço e ao Tempo Absolutos?
  - Não é possível distinguir, por qualquer meio mecânico, entre um movimento retilíneo uniforme em relação aos Espaço e Tempo Absolutos e outro movimento retilíneo uniforme em relação a um sistema de referência que executa, também, algum movimento retilíneo uniforme em relação aos Espaço e Tempo Absolutos

Movimento

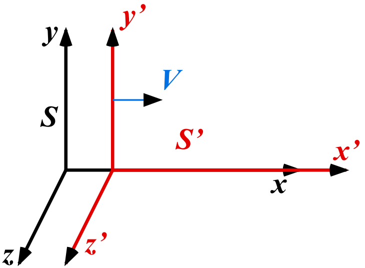
- É possível detectar o estado de movimento em relação ao Espaço e ao Tempo Absolutos?
  - Não é possível distinguir, por qualquer meio mecânico, entre um movimento retilíneo uniforme em relação aos Espaço e Tempo Absolutos e outro movimento retilíneo uniforme em relação a um sistema de referência que executa, também, algum movimento retilíneo uniforme em relação aos Espaço e Tempo Absolutos
  - É impossível descobrir se se está em movimento retilíneo uniforme ou em repouso realizando apenas experiências mecânicas

Princípio da relatividade galileana

- O **Princípio da Relatividade Galileana** propõe que as leis que regem o movimento dos corpos sejam as mesmas em qualquer sistema inercial de referência

Transformação de Galileu

- Corpo de massa constante, m, sob a ação de uma força $\vec{F}'$ no sistema inercial S', que se move com velocidade $\vec{V} = V\hat{\imath}$ em relação ao sistema inercial S. Os eixos x e x', y e y' e z e z' são paralelos entre si e no momento em que as origens O e O' coincidiram as escalas de tempo foram sincronizadas em zero em ambos os sistemas. Um evento que ocorre no instante de tempo t nas coordenadas (x, y, z) no sistema inercial S será descrito, no sistema S', pelas coordenadas (x', y', z') e pelo instante de tempo t'



$$t' = t$$

$$x' = x - Vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Relação entre velocidades

- Lei da adição de velocidades de Galileu

$$t' = t$$

$$x' = x - Vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d}{dt}(x - Vt) = \frac{dx}{dt} - V = v_x - V$$

Relação entre velocidades

- Lei da adição de velocidades de Galileu

$$t' = t$$

$$x' = x - Vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d}{dt}(x - Vt) = \frac{dx}{dt} - V = v_x - V$$

$$v'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{dt} = v_y$$

Relação entre velocidades

- Lei da adição de velocidades de Galileu

$$t' = t$$

$$x' = x - Vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d}{dt}(x - Vt) = \frac{dx}{dt} - V = v_x - V$$

$$v'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{dt} = v_y$$

$$v'_z = \frac{dz'}{dt'} = \frac{dz}{dt} = v_z$$

Aceleração

$$v'_x = v_x - V$$

$$v'_y = v_y$$

$$v'_z = v_z$$

$$a'_x = \frac{dv'_x}{dt'} = \frac{d}{dt}(v_x - V) = \frac{dv_x}{dt} = a_x$$

Aceleração

$$v'_x = v_x - V$$

$$v'_y = v_y$$

$$v'_z = v_z$$

$$a'_x = \frac{dv'_x}{dt'} = \frac{d}{dt}(v_x - V) = \frac{dv_x}{dt} = a_x$$

$$a'_y = \frac{dv'_y}{dt'} = \frac{dv_y}{dt} = a_y$$

Aceleração

$$v'_x = v_x - V$$

$$v'_y = v_y$$

$$v'_z = v_z$$

$$a'_x = \frac{dv'_x}{dt'} = \frac{d}{dt}(v_x - V) = \frac{dv_x}{dt} = a_x$$

$$a'_y = \frac{dv'_y}{dt'} = \frac{dv_y}{dt} = a_y$$

$$a'_z = \frac{dv'_z}{dt'} = \frac{dv_z}{dt} = a_z$$

Segunda lei de Newton em S'

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

Segunda lei de Newton em S'

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

- As leis do movimento têm a mesma forma em qualquer sistema inercial

Segunda lei de Newton em S'

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

- As leis do movimento têm a mesma forma em qualquer sistema inercial
- Nenhuma experiência mecânica será capaz de distinguir entre repouso ou movimento retilíneo uniforme em relação aos Espaço e Tempo Absolutos

Segunda lei de Newton em S'

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

- As leis do movimento têm a mesma forma em qualquer sistema inercial
- Nenhuma experiência mecânica será capaz de distinguir entre repouso ou movimento retilíneo uniforme em relação aos Espaço e Tempo Absolutos
- Eletromagnetismo?

Sumário

Século XIX

- Evidências claras de que luz é uma onda

Século XIX

- Evidências claras de que luz é uma onda
- Necessidade de um meio material para a propagação de ondas, inclusive a luz

Século XIX

- Evidências claras de que luz é uma onda
- Necessidade de um meio material para a propagação de ondas, inclusive a luz
- Meio de propagação da luz: **éter**

Século XIX

- Evidências claras de que luz é uma onda
- Necessidade de um meio material para a propagação de ondas, inclusive a luz
- Meio de propagação da luz: **éter**
  - **Muito rígido:** para que a velocidade de propagação fosse muito alta (velocidade da luz $c = 299792458$ m/s)

Século XIX

- Evidências claras de que luz é uma onda
- Necessidade de um meio material para a propagação de ondas, inclusive a luz
- Meio de propagação da luz: **éter**
  - **Muito rígido:** para que a velocidade de propagação fosse muito alta (velocidade da luz $c = 299792458$ m/s)
  - **Arrastado com resistência muito baixa:** não interferir no movimento planetário

Século XIX

- Evidências claras de que luz é uma onda
- Necessidade de um meio material para a propagação de ondas, inclusive a luz
- Meio de propagação da luz: **éter**
  - **Muito rígido:** para que a velocidade de propagação fosse muito alta (velocidade da luz $c = 299792458$ m/s)
  - **Arrastado com resistência muito baixa:** não interferir no movimento planetário
  - **Fenômenos elétricos, magnéticos e óticos:** propriedades cada vez mais estranhas

Século XIX

- Evidências claras de que luz é uma onda
- Necessidade de um meio material para a propagação de ondas, inclusive a luz
- Meio de propagação da luz: **éter**
  - **Muito rígido:** para que a velocidade de propagação fosse muito alta (velocidade da luz $c = 299792458$ m/s)
  - **Arrastado com resistência muito baixa:** não interferir no movimento planetário
  - **Fenômenos elétricos, magnéticos e óticos:** propriedades cada vez mais estranhas
- James C. Maxwell: o eletromagnetismo podia sustentar-se independentemente do éter

Possibilidades

- A mecânica newtoniana e as equações de Maxwell são válidas, mas o princípio da relatividade não se aplica a todas as leis físicas: existe um referencial absoluto (o éter), onde a velocidade da luz é c em todas as direções, e deve ser possível, por meio de experiências eletromagnéticas, detetar um movimento retilíneo e uniforme em relação ao referencial absoluto do éter.

Possibilidades

- A mecânica newtoniana e as equações de Maxwell são válidas, mas o princípio da relatividade não se aplica a todas as leis físicas: existe um referencial absoluto (o éter), onde a velocidade da luz é c em todas as direções, e deve ser possível, por meio de experiências eletromagnéticas, detetar um movimento retilíneo e uniforme em relação ao referencial absoluto do éter.
- O princípio da relatividade aplica-se a todas as leis físicas e a mecânica newtoniana é correta. Nesse caso, as equações de Maxwell teriam de ser modificadas, e deveria ser possível observar desvios das leis da eletrodinâmica clássica.

Possibilidades

- A mecânica newtoniana e as equações de Maxwell são válidas, mas o princípio da relatividade não se aplica a todas as leis físicas: existe um referencial absoluto (o éter), onde a velocidade da luz é c em todas as direções, e deve ser possível, por meio de experiências eletromagnéticas, detetar um movimento retilíneo e uniforme em relação ao referencial absoluto do éter.
- O princípio da relatividade aplica-se a todas as leis físicas e a mecânica newtoniana é correta. Nesse caso, as equações de Maxwell teriam de ser modificadas, e deveria ser possível observar desvios das leis da eletrodinâmica clássica.
- O princípio da relatividade aplica-se a todas as leis físicas, e as equações de Maxwell são corretas. Nesse caso, a mecânica newtoniana e a transformação de Galileu não podem ser corretas: deve ser possível observar desvios das leis da mecânica newtoniana.

Sumário

Século XIX

- **Luz:** vibração coordenada de campos elétrico e magnético acoplados que se propaga no éter, que estaria em repouso absoluto em relação ao Espaço e Tempo Absolutos de Newton

Século XIX

- **Luz:** vibração coordenada de campos elétrico e magnético acoplados que se propaga no éter, que estaria em repouso absoluto em relação ao Espaço e Tempo Absolutos de Newton
- Eletromagnetismo de Maxwell
  - Luz se propaga com a mesma velocidade a despeito do estado de movimento, em relação ao éter, do sistema inercial no qual é observada

Século XIX

- **Luz:** vibração coordenada de campos elétrico e magnético acoplados que se propaga no éter, que estaria em repouso absoluto em relação ao Espaço e Tempo Absolutos de Newton
- Eletromagnetismo de Maxwell
  - Luz se propaga com a mesma velocidade a despeito do estado de movimento, em relação ao éter, do sistema inercial no qual é observada
  - desacordo com a lei de adição de velocidades de Galileu ($\vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}$)

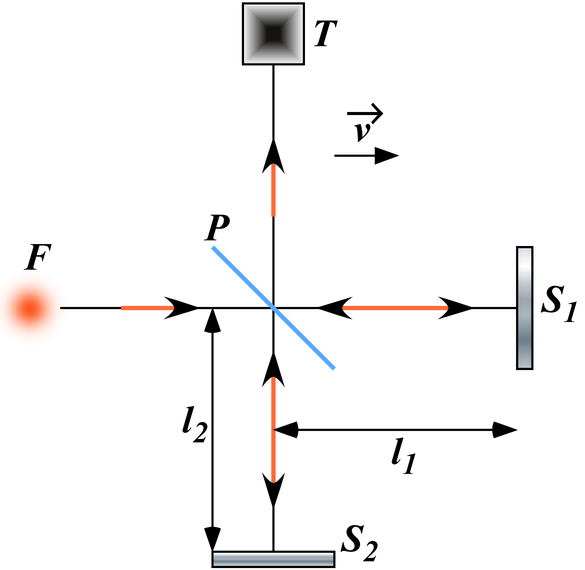
Século XIX

- **Luz:** vibração coordenada de campos elétrico e magnético acoplados que se propaga no éter, que estaria em repouso absoluto em relação ao Espaço e Tempo Absolutos de Newton
- Eletromagnetismo de Maxwell
  - Luz se propaga com a mesma velocidade a despeito do estado de movimento, em relação ao éter, do sistema inercial no qual é observada
  - desacordo com a lei de adição de velocidades de Galileu ($\vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}$)
  - Proposição: eletromagnetismo de Maxwell válido apenas no sistema de repouso do éter, sendo modificado nos outros sistemas inerciais

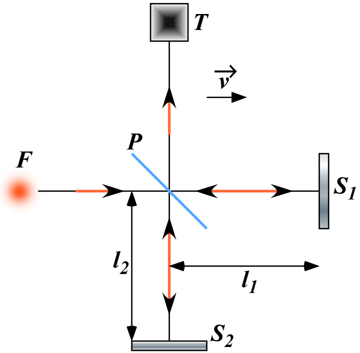
Século XIX

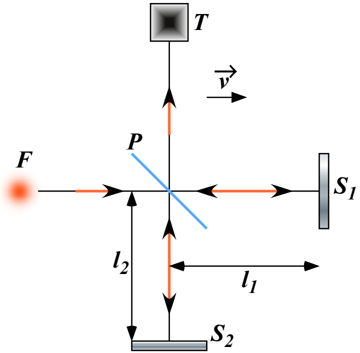
- **Luz:** vibração coordenada de campos elétrico e magnético acoplados que se propaga no éter, que estaria em repouso absoluto em relação ao Espaço e Tempo Absolutos de Newton
- Eletromagnetismo de Maxwell
  - Luz se propaga com a mesma velocidade a despeito do estado de movimento, em relação ao éter, do sistema inercial no qual é observada
  - desacordo com a lei de adição de velocidades de Galileu ($\vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}$)
  - Proposição: eletromagnetismo de Maxwell válido apenas no sistema de repouso do éter, sendo modificado nos outros sistemas inerciais
- Basta medir a velocidade da luz na Terra para descobrir a velocidade da Terra em relação ao éter

Experimento



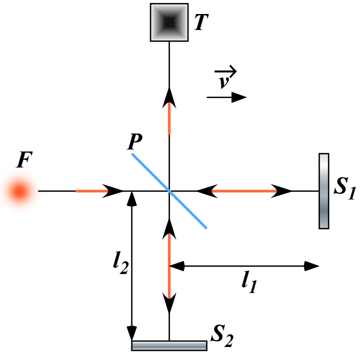
- 1881 - $l_1 \simeq l_2 \simeq 1,2$ m e fonte de luz na Terra



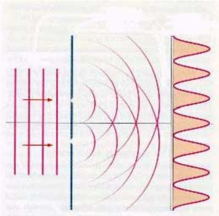


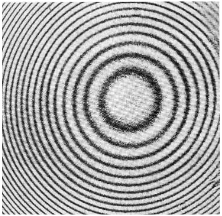
- 1881 - $l_1 \simeq l_2 \simeq 1,2$ m e fonte de luz na Terra
- 1887 - $l_1 \simeq l_2 \simeq 11$ m e fonte de luz o Sol

Interferência

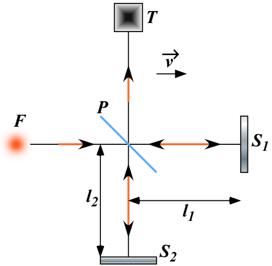


- 1881 - $l_1 \simeq l_2 \simeq 1,2$ m e fonte de luz na Terra
- 1887 - $l_1 \simeq l_2 \simeq 11$ m e fonte de luz o Sol
- Em T deve-se observar máximos e mínimos de intensidade (franjas de interferência) se houver diferença de caminho ótico entre PS_1P e PS_2P ($l_1 \neq l_2$) ou na velocidade de propagação



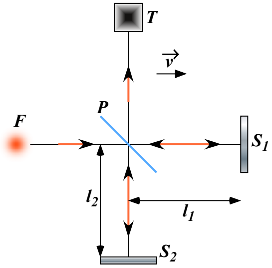


Interferômetro em movimento, com velocidade v na direção de PS_1



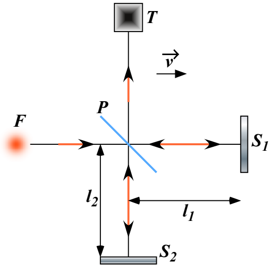
- v: velocidade do laboratório em relação ao éter $=$ velocidade de translação da Terra $\simeq 30$ km/s

Interferômetro em movimento, com velocidade v na direção de PS_1



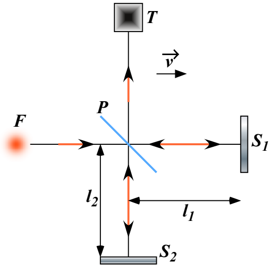
- v: velocidade do laboratório em relação ao éter $=$ velocidade de translação da Terra $\simeq 30$ km/s
- Velocidade da luz no percurso de P a S_1: $c - v$

Interferômetro em movimento, com velocidade v na direção de PS_1



- v: velocidade do laboratório em relação ao éter $=$ velocidade de translação da Terra $\simeq 30$ km/s
- Velocidade da luz no percurso de P a S_1: $c - v$
- Velocidade da luz no percurso de S_1 a P: $c + v$

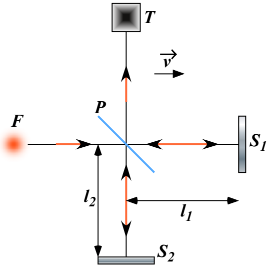
Interferômetro em movimento, com velocidade v na direção de PS_1



- v: velocidade do laboratório em relação ao éter $=$ velocidade de translação da Terra $\simeq 30$ km/s
- Velocidade da luz no percurso de P a S_1: $c - v$
- Velocidade da luz no percurso de S_1 a P: $c + v$
- Tempo para percorrer PS_1P

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

Interferômetro em movimento, com velocidade v na direção de PS_1

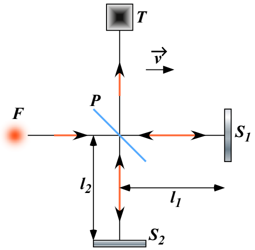


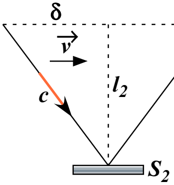
- v: velocidade do laboratório em relação ao éter $=$ velocidade de translação da Terra $\simeq 30$ km/s
- Velocidade da luz no percurso de P a S_1: $c - v$
- Velocidade da luz no percurso de S_1 a P: $c + v$
- Tempo para percorrer PS_1P

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

- Se a velocidade de propagação é a mesma $\Rightarrow \; \frac{v^2}{c^2} = 0 \;\; \Rightarrow \Delta t_1 = \frac{2l_1}{c}$

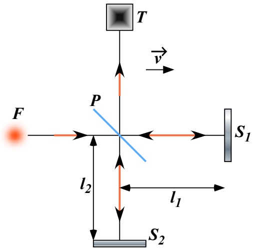
Caminho PS_2P

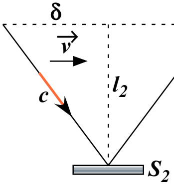




$$\frac{v}{c} = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + l_2^2}}$$

Caminho PS_2P

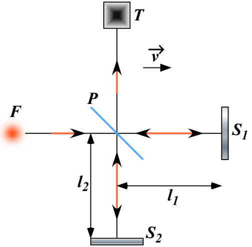


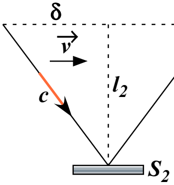


$$\frac{v}{c} = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + l_2^2}}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + l_2^2}$$

Caminho PS_2P



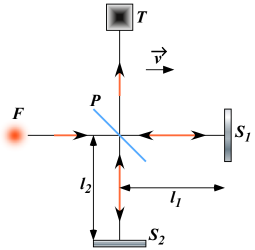


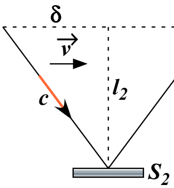
$$\frac{v}{c} = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + l_2^2}}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + l_2^2}$$

$$\delta^2 = \frac{l_2^2 v^2}{(c^2 - v^2)}$$

Caminho PS_2P





$$\frac{v}{c} = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + l_2^2}}$$

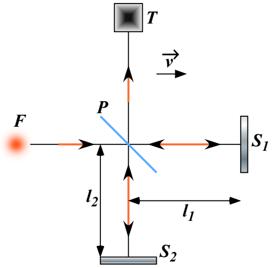
$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + l_2^2}$$

$$\delta^2 = \frac{l_2^2 v^2}{(c^2 - v^2)}$$

- Caminho PS_2P

$$z = 2\sqrt{\delta^2 + l_2^2} = 2\sqrt{\frac{l_2^2 v^2}{(c^2 - v^2)} + l_2^2}$$

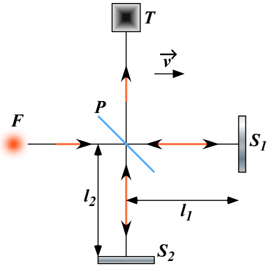
Tempo para percorrer PS_2P



$$z = 2\sqrt{\frac{l_2^2 v^2}{(c^2 - v^2)} + l_2^2}$$

$$\Delta t_2 = \frac{z}{c} \quad = \quad \frac{1}{c} 2\sqrt{\frac{l_2^2 v^2}{(c^2 - v^2)} + l_2^2}$$

Tempo para percorrer PS_2P

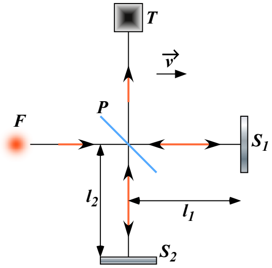


$$z = 2\sqrt{\frac{l_2^2 v^2}{(c^2 - v^2)} + l_2^2}$$

$$\Delta t_2 = \frac{z}{c} = \frac{1}{c} 2\sqrt{\frac{l_2^2 v^2}{(c^2 - v^2)} + l_2^2}$$

$$= \frac{2}{c}\sqrt{\frac{l_2^2 c^2}{(c^2 - v^2)}}$$

Tempo para percorrer PS_2P



$$z = 2\sqrt{\frac{l_2^2 v^2}{(c^2 - v^2)} + l_2^2}$$

$$\Delta t_2 = \frac{z}{c} = \frac{1}{c}2\sqrt{\frac{l_2^2 v^2}{(c^2 - v^2)} + l_2^2}$$

$$= \frac{2}{c}\sqrt{\frac{l_2^2 c^2}{(c^2 - v^2)}}$$

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

Diferença de caminho ótico

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

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

Diferença de caminho ótico

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

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

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

Diferença de caminho ótico

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

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

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

$$\Delta = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left[\frac{l_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - l_2\right]$$

l_1 exatamente igual a l_2?

- Se a velocidade de propagação é a mesma $\Rightarrow$ $\frac{v^2}{c^2} = 0$

$$\Delta = \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left[\frac{l_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - l_2 \right]$$

l_1 exatamente igual a l_2?

- Se a velocidade de propagação é a mesma $\Rightarrow \frac{v^2}{c^2} = 0$

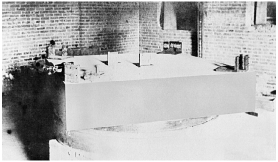
$$\Delta = \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left[\frac{l_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - l_2 \right]$$

$$\Delta = 2(l_1 - l_2)$$

- Uma medida de interferência poderia implicar uma diferença entre l_1 e l_2

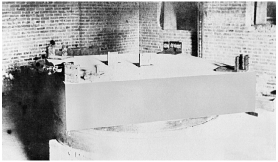
Girando

- Difícil ter l_1 exatamente igual a l_2



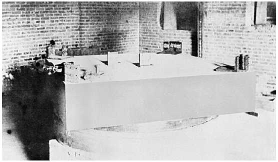
Girando

- Difícil ter l_1 exatamente igual a l_2
- Girar o interferômetro de 90°

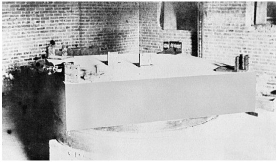


Girando

- Difícil ter l_1 exatamente igual a l_2
- Girar o interferômetro de 90°
- v ao longo de PS_2



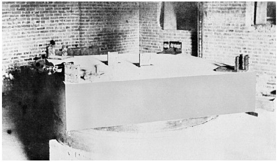
Girando



- Difícil ter l_1 exatamente igual a l_2
- Girar o interferômetro de 90°
- v ao longo de PS_2
- Os papeis de l_1 e l_2 são trocados

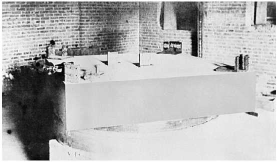
Girando

- Difícil ter l_1 exatamente igual a l_2
- Girar o interferômetro de 90°
- v ao longo de PS_2
- Os papeis de l_1 e l_2 são trocados



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

Girando



- Difícil ter l_1 exatamente igual a l_2
- Girar o interferômetro de 90°
- v ao longo de PS_2
- Os papeis de l_1 e l_2 são trocados

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

$$\Delta' = \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left[l_1 - \frac{l_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right]$$

Deslocamento de n franjas

- Rodar de $90^\circ \Rightarrow$ deslocamento no padrão de interferência de n franjas

Deslocamento de n franjas

- Rodar de $90^\circ \Rightarrow$ deslocamento no padrão de interferência de n franjas
- Radiação com comprimento de onda λ

Deslocamento de n franjas

- Rodar de 90° $\Rightarrow$ deslocamento no padrão de interferência de n franjas
- Radiação com comprimento de onda λ

$$\Delta = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left[\frac{l_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - l_2\right] \quad \text{e} \quad \Delta' = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left[l_1 - \frac{l_2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right]$$

$$n = \frac{\Delta' - \Delta}{\lambda}$$

Deslocamento de n franjas

- Rodar de 90° $\Rightarrow$ deslocamento no padrão de interferência de n franjas
- Radiação com comprimento de onda λ

$$\Delta = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left[\frac{l_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - l_2\right] \quad \text{e} \quad \Delta' = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left[l_1 - \frac{l_2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right]$$

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

Deslocamento de n franjas

- Rodar de 90° $\Rightarrow$ deslocamento no padrão de interferência de n franjas
- Radiação com comprimento de onda λ

$$\Delta = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left[\frac{l_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - l_2\right] \quad \text{e} \quad \Delta' = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left[l_1 - \frac{l_2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right]$$

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

- Se a velocidade de propagação é a mesma $\Rightarrow$ $\frac{v^2}{c^2} = 0 \quad \Rightarrow n = 0$

Aproximando

- Para $x \ll 1$ temos

$$(1+x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \dots$$

Aproximando

- Para $x \ll 1$ temos

$$(1+x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \ldots$$

- Como $\frac{v}{c} \ll 1$

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} = 1 + \frac{v^2}{c^2} + \frac{v^4}{c^4} + \ldots \simeq \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)$$

Aproximando

- Para $x \ll 1$ temos

$$(1+x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \dots$$

- Como $\frac{v}{c} \ll 1$

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} = 1 + \frac{v^2}{c^2} + \frac{v^4}{c^4} + \dots \simeq \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = 1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8}\frac{v^4}{c^4} + \dots \simeq \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

Usando a aproximação

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

Usando a aproximação

$$
\begin{aligned}
n &= \frac{2(l_1 + l_2)}{\lambda\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right) \\
&\simeq \frac{2(l_1 + l_2)}{\lambda}\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)\left[1 - \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)\right]
\end{aligned}
$$

Usando a aproximação

$$
\begin{aligned}
n &= \frac{2(l_1 + l_2)}{\lambda\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right) \\
&\simeq \frac{2(l_1 + l_2)}{\lambda}\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)\left[1 - \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)\right] \\
&\simeq \frac{2(l_1 + l_2)}{\lambda}\left(-\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} - \frac{1}{4}\frac{v^4}{c^4}\right)
\end{aligned}
$$

Usando a aproximação

$$
\begin{aligned}
n &= \frac{2(l_1+l_2)}{\lambda\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(1-\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right) \\
&\simeq \frac{2(l_1+l_2)}{\lambda}\left(1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)\left[1-\left(1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)\right] \\
&\simeq \frac{2(l_1+l_2)}{\lambda}\left(-\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}-\frac{1}{4}\frac{v^4}{c^4}\right) \\
&\simeq -\frac{(l_1+l_2)}{\lambda}\frac{v^2}{c^2}
\end{aligned}
$$

Resultado

$$n \simeq -\frac{(l_1 + l_2)}{\lambda}\frac{v^2}{c^2}$$

$$l_1 \simeq l_2 = 11\ m \qquad v = 30\ km/s \qquad \lambda = 6 \times 10^{-7}\ m$$

Resultado

$$n \simeq -\frac{(l_1 + l_2)}{\lambda} \frac{v^2}{c^2}$$

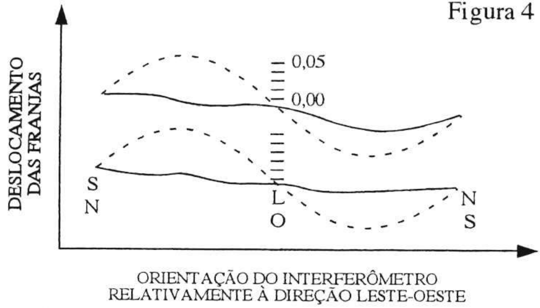
$l_1 \simeq l_2 = 11 \ m \qquad v = 30 \ km/s \qquad \lambda = 6 \times 10^{-7} \ m$

$n \simeq 0,40$ franjas (precisão $0,05$ franjas)

NADA OBSERVADO

Resultado

Figura 4



Michelson e Morley (citação): "Os resultados das observações estão expressos graficamente (na figura). A superior é a curva correspondente a observações feitas ao meio-dia, a inferior corresponde a observações feitas à tarde. As curvas tracejadas representam *um oitavo* dos deslocamentos teóricos. Parece razoável concluir da figura que se houver qualquer deslocamento devido ao movimento da Terra, relativamente ao éter, ele não pode ser muito maior que 0,01 da distância entre as franjas".

Conclusões

- Velocidade da Terra em relação ao éter deveria ser inferior a 10 km/s

Conclusões

- Velocidade da Terra em relação ao éter deveria ser inferior a 10 km/s
- $\Rightarrow$ a velocidade da luz era a mesma, tanto na Terra quanto no éter

Conclusões

- Velocidade da Terra em relação ao éter deveria ser inferior a 10 km/s
- $\Rightarrow$ a velocidade da luz era a mesma, tanto na Terra quanto no éter
- Corrigir a lei de adição de velocidades de Galileu

Conclusões

- Velocidade da Terra em relação ao éter deveria ser inferior a 10 km/s
- $\Rightarrow$ a velocidade da luz era a mesma, tanto na Terra quanto no éter
- Corrigir a lei de adição de velocidades de Galileu
- Como tentar explicar?

Sumário

Aberração da luz estelar

- Suposição: o éter é localmente arrastado pela Terra

Aberração da luz estelar

- Suposição: o éter é localmente arrastado pela Terra
- Interferômetro estaria em repouso em relação ao éter local, assim nada seria detectado

Aberração da luz estelar

- Suposição: o éter é localmente arrastado pela Terra
- Interferômetro estaria em repouso em relação ao éter local, assim nada seria detectado
- Se a fonte de luz estivesse localizada fora da Terra essa explicação deixaria de valer

Aberração da luz estelar

- Suposição: o éter é localmente arrastado pela Terra
- Interferômetro estaria em repouso em relação ao éter local, assim nada seria detectado
- Se a fonte de luz estivesse localizada fora da Terra essa explicação deixaria de valer
- Aberração da luz estelar

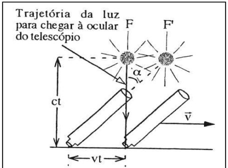


Figura 5

Sumário

Conciliar resultados controversos

- Manter a relatividade de Galileu

Conciliar resultados controversos

- Manter a relatividade de Galileu
- Manter Éter ou Espaço e Tempo Absolutos

Conciliar resultados controversos

- Manter a relatividade de Galileu
- Manter Éter ou Espaço e Tempo Absolutos
- **Contração de comprimento de Lorentz-Fitzgerald:** todo corpo em movimento com velocidade v, através do éter, tem sua dimensão, na direção do movimento, contraída por

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

Conciliar resultados controversos

- Manter a relatividade de Galileu
- Manter Éter ou Espaço e Tempo Absolutos
- **Contração de comprimento de Lorentz-Fitzgerald:** todo corpo em movimento com velocidade v, através do éter, tem sua dimensão, na direção do movimento, contraída por

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

- **Dilatação do tempo de Lorentz:** instrumentos de medida de tempo registram, quando em movimento em relação ao éter, intervalos de tempo maiores que os intervalos de tempo medidos pelos relógios em repouso em relação ao éter

$$t \rightarrow \frac{t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$