Notas de aula

Física Geral 4 - F 428

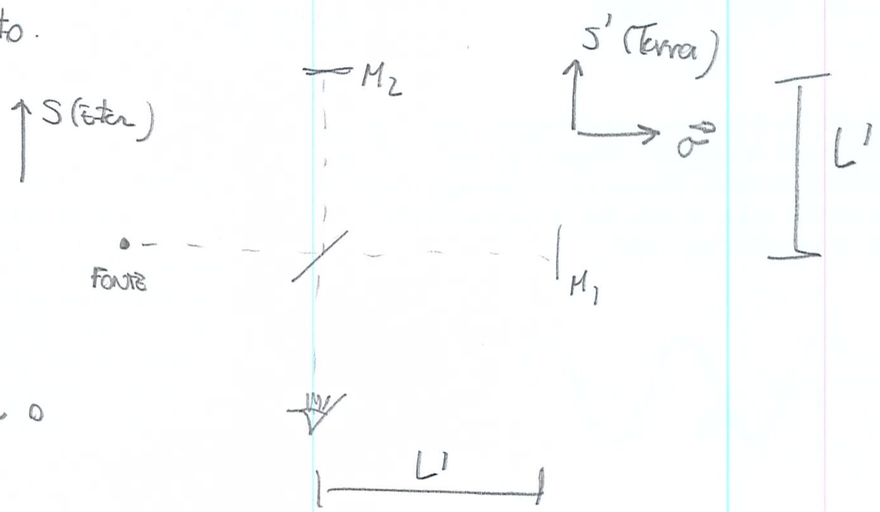
Odilon D. D. Couto Jr.

Instituto de Física "Gleb Wataghin"
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Departamento de Física da Matéria Condensada

http://sites.ifi.unicamp.br/odilon

EXPERIMENTO DE MICHELSON - MORLEY   NOBEL 1907

Eter: referencial absoluto.



Pela transf. de Galileu, para o braço // a $\vec{v}$

$$t_1' = \underbrace{\frac{L'}{c-v}}_{c'\,\text{ida}} + \underbrace{\frac{L'}{c+v}}_{c'\,\text{volta}} = \frac{2cL'}{c^2-v^2} = \frac{2L'/c}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

braço $\perp$ a $\vec{v}$

⇒ Exemplo do barco atravessando o rio.

$$t_2' = \frac{2L'}{\sqrt{c^2-v^2}} = \frac{2L'/c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

⇒ $t_1 > t_2$ ⇒ $t_1 - t_2 \neq 0$

Rodando o interferômetro ⇒ $\frac{v}{c}$ é mudado ⇒ o padrão de interferência deveria se mover. ⇒ $t_2' = t_1'$

⇒ L' se contrai para L no 1º braço ⇒ $\frac{2L}{c}\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} = \frac{2L'}{c}\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

⇒ $L = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\,L'$ onde $L < L'$

Interpretação 1:

- O comprimento real do braço 1 é L', mas ele se contrai para L devido ao movimento.

- A contração não é percebida porque a régua usada em S' tb é contraída.

- Transformação de Galileu $c' = c - v$ mantida.

Interpretação 2

- Velocidade da luz não depende do referencial inercial.

- Transformação de Lorentz.

- Hipótese seguida por Einstein.

AULA 6 RELATIVIDADE II

⇒ MECÂNICA NÃO RELATIVÍSTICA: ⇒ Conservação: Momento
Energia

$\vec{F} = m\vec{a}$ ⇒ 2º lei de Newton: invariante sob. transf. de Galileu

Momento: $\sum \vec{F}_{int} = 0$ ⇒ $\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{v}_i = \sum_{f=1}^{N} m_f v_f$ ⇒ 3º lei de Newton

$\hookrightarrow \vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vec{v})$

Energia: $E_i = E_f$

⇒ MECÂNICA RELATIVÍSTICA: 2º postulado de Einstein: todas as leis devem ser as mesmas em qq. ref. inercial ⇒ 2º invariante sob. transf. de Lorentz.

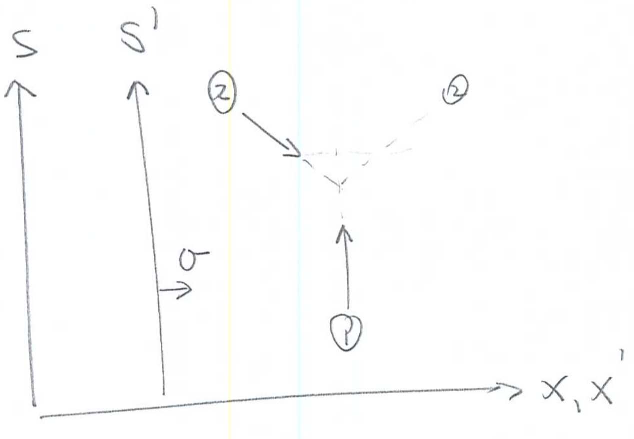
$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t)$

$\Delta t' = \gamma(\Delta t - \frac{v}{c^2}\Delta x)$

⇒ $V' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{V - v}{1 - \frac{v}{c^2}V}$ ⇒ $\boxed{V_x' = \frac{V_x - v}{1 - \frac{v}{c^2}V_x}}$

$\Delta y' = \Delta y$

⇒ Colisão 2D: $V_y' = \frac{\Delta y'}{\Delta t'} = \frac{\Delta y}{\Delta t'} = \frac{\Delta y}{\gamma(\Delta t - \frac{v}{c^2}\Delta x)} = \frac{V_y}{\gamma(1 - \frac{v}{c^2}V_x)}$



Sistema S.

⇒ $\sum m_i v_i = \sum m_f v_f$

Sistema S'

$\sum m_i v_i' \neq \sum m_i v_f'$ ⇒ Não conserva.

⇒ Para impor segundo postulado: modificação na forma do momento.

$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ fica, mas agora $\boxed{\vec{p} = \gamma m_0 \vec{v}}$

m_0 = massa de repouso. ⇒ medida no ref. onde partícula está parada (ex. S')

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ ⇒ $v = |\vec{v}|$ $\vec{v}$ é a velocidade da partícula num outro referencial (ex. S).

$\boxed{m = \gamma m_0}$

Cons. de Momento:

S: $\sum m_i v_i = \sum m_f v_f$ $m_i = \gamma_i m_0^i$ $\gamma_i = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v_i^2}{c^2}}}$

S' = $\sum m_i' v_i' - \sum m_f' v_f'$ $m_i' = \gamma_i' m_0^i$ $\gamma_i' = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v_i'^2}{c^2}}}$

Nota: $v \ll c$ ⇒ $m \to m_0$ ⇒ recuperamos transf. de Galileu.

⇒ $v \to c$ ⇒ $m \gg m_0$ ⇒ corpos em velocidade alta são mais pesados.

⇒ Altos campos para partículas aceleradas em microtrons

⇒ Inércia agora é vista em $\vec{p} = \gamma m_0 \vec{v}$ ⇒ $v \to c$ ⇒ $|\vec{p}| \to \infty$ c $v \to c$

⇒ $\vec{F}$ = cte ⇒ $\vec{v} \to \infty$

⇒ Relativisticamente NÃO!

Energia

$$m = \gamma m_0 = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}\, m_0$$

Expansão binomial:

$$[1-x^2]^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2}x^2 + \frac{3}{8}x^4 + \dots$$

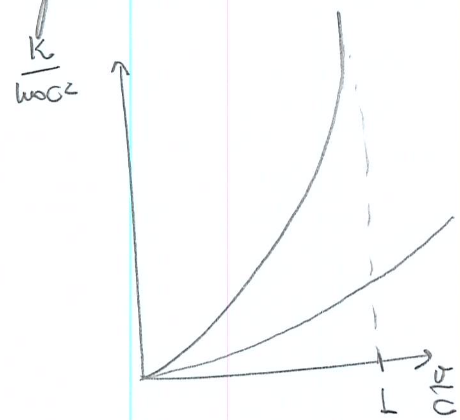
$$\left[1-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{v}{c}\right)^2 + \frac{3}{8}\left(\frac{v}{c}\right)^4 + \frac{5}{16}\left(\frac{v}{c}\right)^6 + \dots$$

$$mc^2 = m_0c^2 + \underbrace{\frac{1}{2}m_0v^2 + \frac{3}{8}m_0\frac{v^4}{c^2} + \frac{5}{8}m_0\frac{v^6}{c^4} + \dots}$$ $\Rightarrow [J] =$ energia.

$$K = \frac{1}{2}m_0v^2 + \frac{3}{8}m_0\frac{v^4}{c^4} + \dots$$ $v \ll c \Rightarrow K \simeq \frac{1}{2}m_0v^2 \Rightarrow$ não relativístico

$\boxed{E = mc^2} \Rightarrow$ energia total

$mc^2 = \gamma m_0 c^2 = m_0c^2 + K \Rightarrow \boxed{K = (\gamma - 1)m_0c^2}$ para um corpo de velocidade v



$\Downarrow$

MOSTRAR GRÁFICO

$\boxed{E_0 = m_0c^2} \Rightarrow$ Energia de repouso.

Conservação de energia: $E_i = E_f \Rightarrow E_0^i + K_i = E_0^f + K_f$

$$\Rightarrow K_f - K_i = \Delta K = E_0^i - E_0^f = (m_0^i - m_0^f)c^2 = -\Delta M c^2$$

$\Rightarrow$ Massa transformada em energia cinética.

TEOREMA TRABALHO ENERGIA CINÉTICA: $W = \Delta K \Rightarrow v \to c \Rightarrow W \to \infty$

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

O princípio de conservação de energia continua válido na relatividade. O que muda é que massa e energia cinética podem ser intercambiadas.

Em processos químicos e nucleares, costumamos escrever:

$$E_{0i} = E_{0f} + Q$$

Q é a quantidade de energia liberada ou absorvida pelo sistema.

$$E_{0i} = M_{0i} c^2 \qquad E_{0f} = M_{0f} c^2$$

$$\Rightarrow Q = (M_{0i} - M_{0f}) c^2 = -\Delta M c^2$$

Se o sistema perde massa: $\Delta M < 0 \Rightarrow Q > 0$ libera energia
reação exotérmica

$\Delta M > 0 \Rightarrow Q < 0 \Rightarrow$ absorve energia.

Em reações químicas $\Delta M \cong 0 \Rightarrow$ Químicos tratavam conservação de massa e energia separadamente

Reações nucleares ΔM é grande e pode ser medido.

MOMENTO E ENERGIA

$$p = \gamma m v \Rightarrow v = \frac{p}{\gamma m} \qquad K = (\gamma - 1) m_0 c^2 \Rightarrow K = \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} m_0 c^2$$

Eliminando v nas duas equações temos:

$$\boxed{(pc)^2 = K^2 + 2K m_0 c^2}$$ que é diferente da expressão clássica

$$K = \frac{p^2}{2m}$$

Além disso: $E = m_0c^2 + k$:

$$\Rightarrow \boxed{E^2 = (m_0c^2)^2 + k^2 + 2m_0c^2 = (m_0c^2)^2 + (pc)^2}$$

se $m_0 = 0 \Rightarrow E = pc \Rightarrow p = \frac{E}{c}$ energia e momento de um fóton.

$\Rightarrow$ Pressão de radiação.

$\Rightarrow$ Conexão entre luz e matéria

EFEITO DOPPLER

No efeito Doppler clássico, a mudança de frequência depende das velocidades relativas entre onda e fonte e detector:

$$f' = f_0\left(\frac{v \pm v_D}{v \mp v_f}\right)$$

$v \rightarrow$ som

$\pm \rightarrow$ aproximação

$\mp \rightarrow$ afastamento

Como a luz é uma onda espera-se que esse efeito também ocorra quando fonte e detector se movem. No entanto, c não depende do referencial.

$\Rightarrow$ Efeito deve depender apenas da velocidade relativa entre fonte e detector.

Seja uma onda eletromagnética

Em S: $\vec{E} = \vec{E}_0 \operatorname{sen}(kx - \omega t)$

Em S': $\vec{E}' = \vec{E}_0' \operatorname{sen}(k'x' - \omega' t')$

De acordo com a transf. de Lorentz é de se esperar que $\lambda \neq \lambda'$ e $T \neq T'$.

No entanto, a fase, que dá o número de cristas de onda deve ser conservada.

$$\Rightarrow kx - \omega t = k'x' - \omega' t'$$

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

$$\Rightarrow k'\gamma(x - vt) - \omega'\gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) = \left(k'\gamma + \omega'\gamma\frac{v}{c^2}\right)x - \left(k'\gamma v + \omega'\gamma\right)t$$

$$\Rightarrow \omega = k'\gamma v + \omega'\gamma \qquad \text{Mas } c = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega'}{k'} \Rightarrow k' = \frac{\omega'}{c}$$

$$\omega = \frac{\omega'}{c}\gamma v + \omega'\gamma \Rightarrow \omega = \gamma\omega'\left(1 + \frac{v}{c}\right) \qquad \text{se } \frac{v}{c} = \beta$$

$$\omega = \omega'\frac{(1+\beta)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \omega'\frac{(1+\beta)}{\sqrt{(1+\beta)(1-\beta)}} = \omega'\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

$$\Rightarrow \omega' = \omega\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$$

$\beta > 0 \Rightarrow v > 0$ afastando

$\beta < 0 \Rightarrow v < 0$ aproximando.

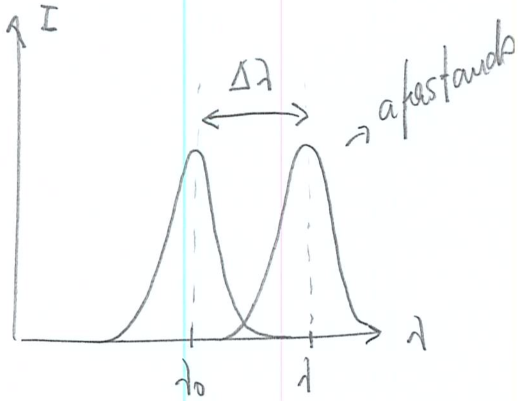
$$\boxed{f' = f_0\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}}$$

$\Rightarrow$ Isso pode ser medido e podemos saber se estrelas estão se afastando ou se aproximando da terra.

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \quad f' = \frac{c}{\lambda'} \qquad f_0 = f'\frac{(1+\beta)}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \text{se } \beta \ll 1 \Rightarrow \omega_0 \simeq \omega'(1+\beta)$$

$$\frac{1}{\lambda_0} = \frac{1}{\lambda'}(1+\beta) \Rightarrow \frac{v}{c} = \frac{\lambda'}{\lambda_0} - 1 \Rightarrow v = \left(\frac{\lambda' - \lambda_0}{\lambda_0}\right)c \qquad \lambda' - \lambda_0 = \Delta\lambda \Rightarrow \text{mudança em } \lambda$$

$$\boxed{v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}c}$$



$\Delta\lambda > 0 \Rightarrow v > 0$ afastando $\Rightarrow$ vermelho

$\Delta\lambda < 0 \Rightarrow v < 0$ aproximando $\Rightarrow$ azul