Física Moderna

Introdução Histórica:

- Final do Século XIX:

• Dinâmica de Newton;

• Teorias da Eletricidade/Magnetismo Unificadas:

LEIS DE MAXWELL + COMPROVAÇÃO POR HERTZ;

LORENTZ DESCOBRIU → TRANSFORMADA DE LORENTZ

"LEIS DE MAXWELL PODEM SER EMPREGADAS PARA QUALQUER SISTEMA INERCIAL"

• Termodinâmica e Teoria Cinética

Explicam grande variedade de fenômenos

BASE DA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Física Moderna

Introdução Histórica:

ALGUNS RESULTADOS NÃO EXPLICADOS:

- Experimentos para estudar o meio por onde se transmitem ondas Eletromagnéticas (E.M.) → NECESSITAM DE NOVAS TEORIAS.

NOVAS TEORIAS:

1. RELATIVIDADE RESTRITA: EINSTEIN

Tempo, distância e massa são relativos;

Velocidade da luz é constante;

2. MECÂNICA QUÂNTICA: Planck, Bohr, De Broglie, Heisenberg, Schrodinger, J.J. Thomson, Millikan, Rutherford....

Posteriormente: Física Atômica, Física Nuclear e de Estado Sólido

BASE DA REVOLUÇÃO DA SOCIEDADE DE INFORMAÇÕES

Física Moderna

- RELATIVIDADE;
- TEORIA CINÉTICA DA MATÉRIA;
- QUÂNTICA;
- PROPRIEDADES DOS ÁTOMOS;
- NÚCLEOS DOS ÁTOMOS E SUAS PARTÍCULAS;
- MOLÉCULAS;
- SÓLIDOS;
- ORIGEM E EVOLUÇÃO DO UNIVERSO.

BASE DA NANOTECNOLOGIA:

nm = 10^{-9} m $\rightarrow \lambda \rightarrow$ medido em nm;
Luz vísivel $\rightarrow \lambda \rightarrow$ 400 – 700 nm;
Átomo $\rightarrow \approx$ 0.1 nm

Sistema de Referência Universal - ÉTER

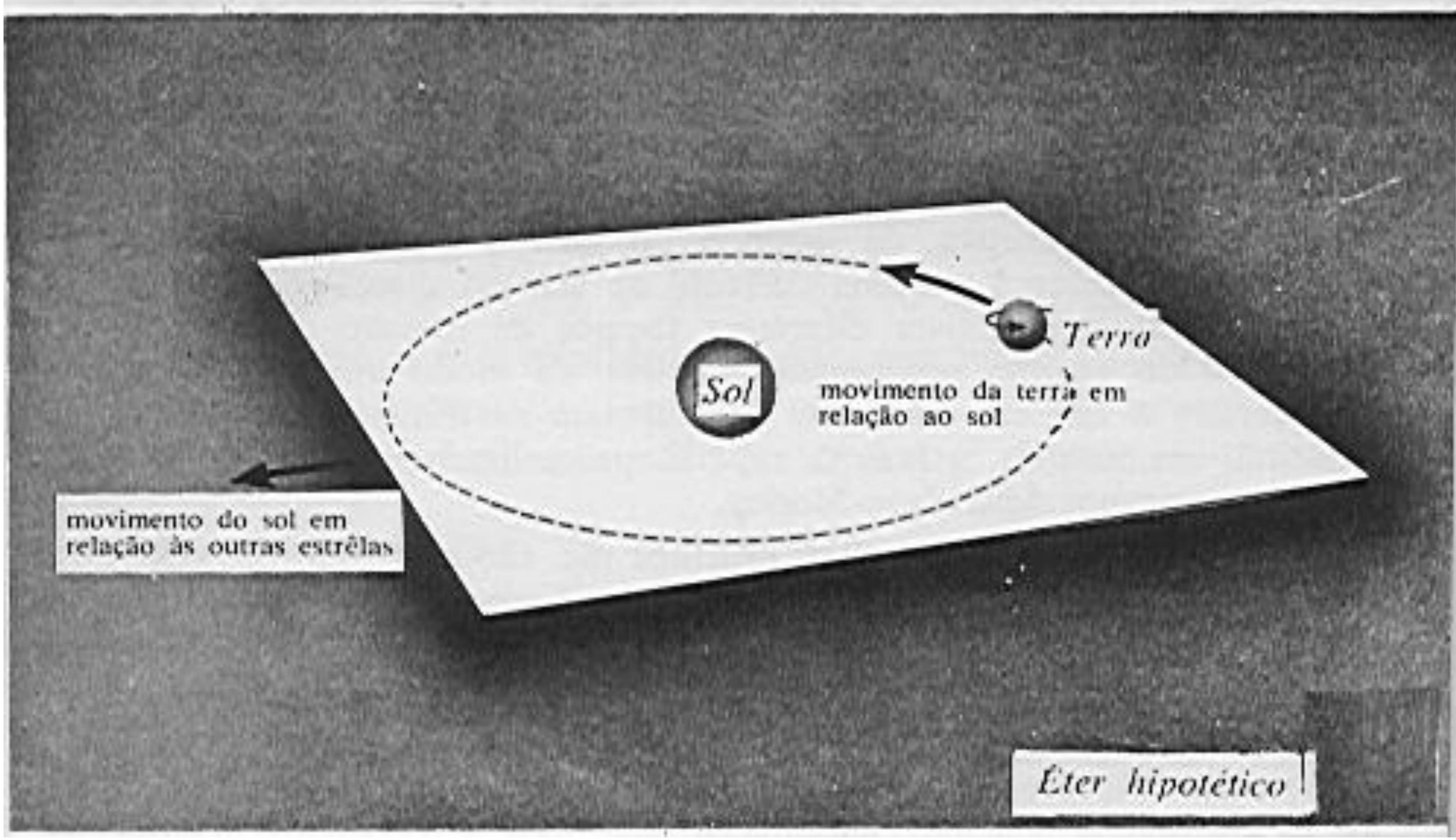
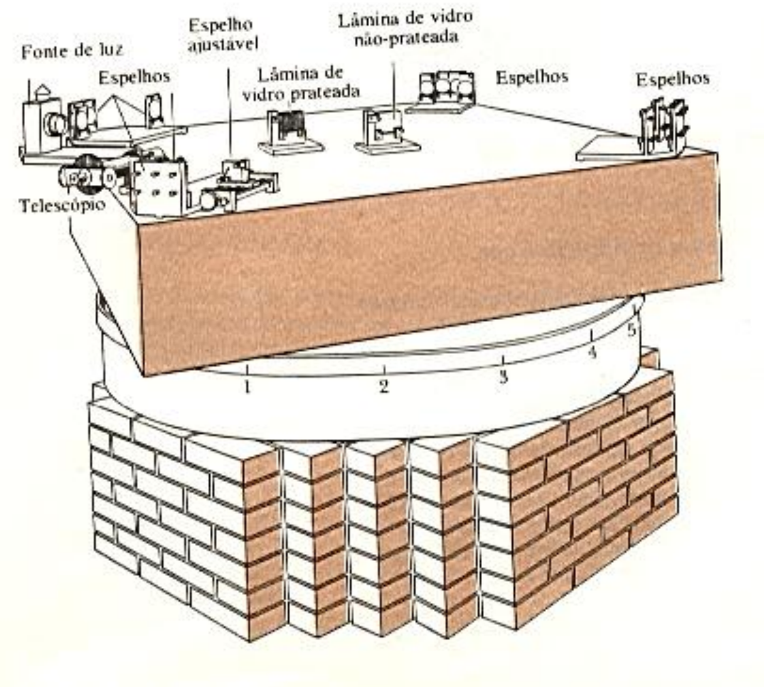


FIGURA 1-4. *Movimentos da terra através de um éter hipotético.*

INTERFERÔMETRO DE MICHELSON e MOSLEY

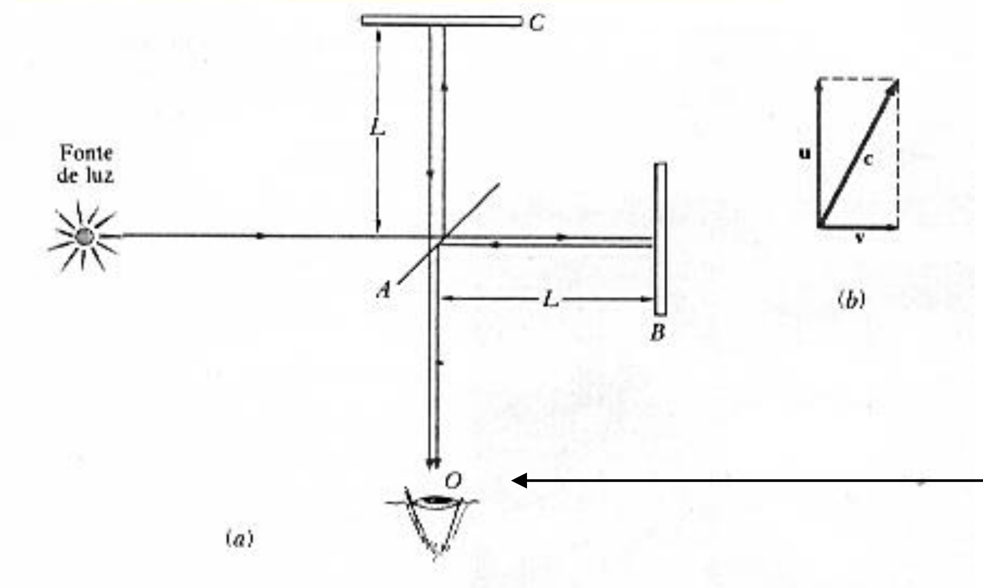


Usado para medir a velocidade do éter v, onde:

c é a velocidade da luz no éter

e

u é a velocidade da luz em relação ao interferômetro



Franjas de interferências construtivas e destrutivas no anteparo O

Postulados de Einstein:

1. O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE: As leis da física são idênticas em todos sistemas inerciais;
2. A CONSTÂNCIA DA VELOCIDADE DA LUZ: A velocidade da luz tem o mesmo valor c em todos os sistemas inerciais.

Do postulado 1 tem-se que: não é possível determinar o sistema de referência universal.

Do postulado 2 tem-se que: o resultado do experimento de Michelson e Mosley está correto.

Consequências dos postulados:

Dilatação do tempo:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Contração do espaço:

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

DILATAÇÃO DO TEMPO

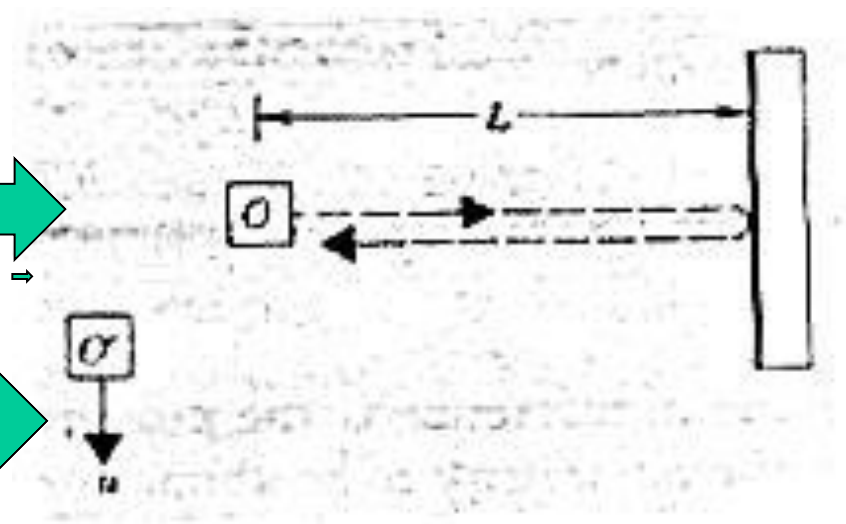
Tempo de ida e de volta do feixe para percorrer a distância L é $2\Delta t$, pois $L = c\Delta t$.

Observador O:

Envia e recebe luz que é refletida pelo espelho

Observador O´:

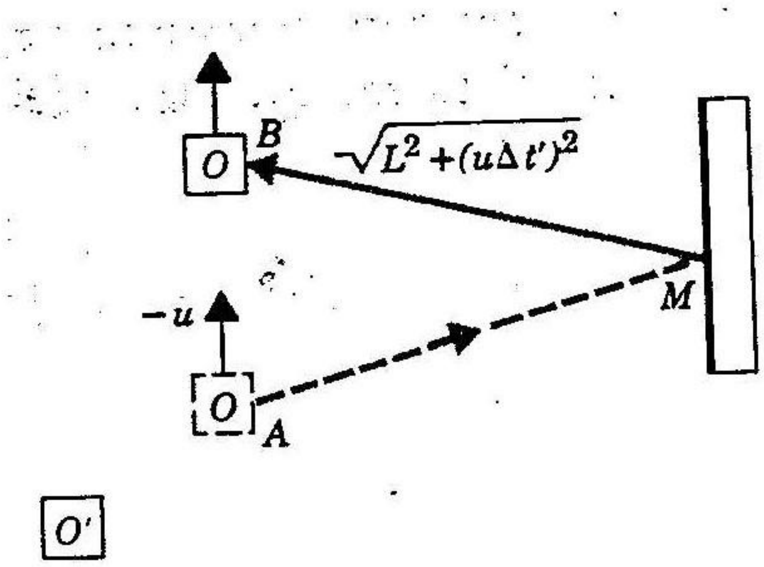
Está em movimento com velocidade u



DILATAÇÃO DO TEMPO

Observador O´:

Vê o feixe de luz como mostrado ao lado



- Para **O´→ O** se move com velocidade –u e a luz é emitida num ponto A e recebida num ponto B após 2Δt´

- A distância AB = 2uΔt´

- A distância AMB $= 2\sqrt{L^2 + (u\Delta t')^2}$

  é percorrida pela luz em 2Δt´

DILATAÇÃO DO TEMPO

Observador O: mede **velocidade = c**

•Por Galileu →**Δt=Δt´**

Observador O´: mede **velocidade** $= \sqrt{c^2 + u^2}$

•Por Einstein →Δt≠Δt´ e ambos observadores medem velocidade = c

Para **O** → $c = \frac{2L}{2\Delta t}$

Para O´ → $c = \frac{2\sqrt{L^2 + (u\Delta t')^2}}{2\Delta t'}$

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

EFEITO DA DILATAÇÃO DO TEMPO

Considere um evento de duração Δt e observador O fixo com relação a este evento, que mede o intervalo Δt:

DENOMINADO TEMPO PRÓPRIO

O observador O´ movendo com velocidade u em relação à O, mede $\Delta t' > \Delta t$ para o mesmo evento, independente da direção da velocidade $\vec{u}$

CONTRAÇÃO DO COMPRIMENTO:

Considere o caso a seguir:

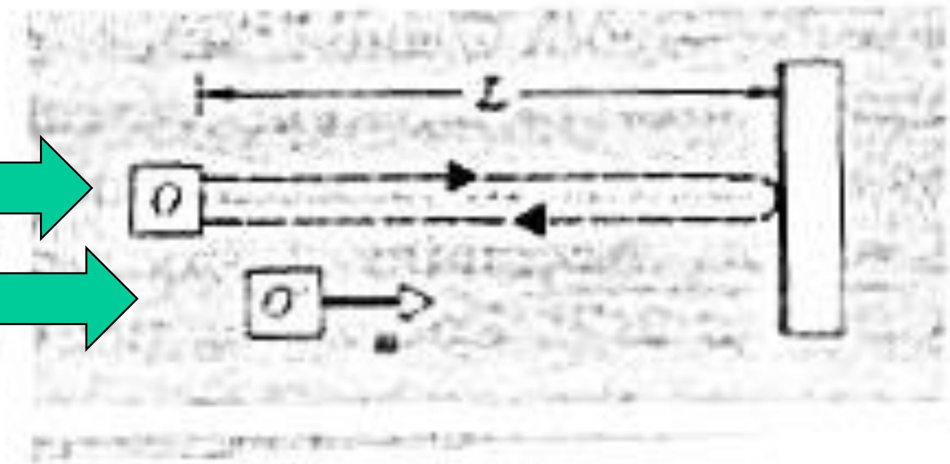
Observador O:

Envia e recebe luz que é refletida pelo espelho

Observador O´:

Está em movimento com velocidade u

Visto por O:



CONTRAÇÃO DO COMPRIMENTO:

Para observador O´ a distância de O até o espelho é L´

Em $\Delta t_1{}'$ o feixe alcança o espelho

$\downarrow$

que se deslocou de $u\Delta t_1{}'$

$\downarrow$

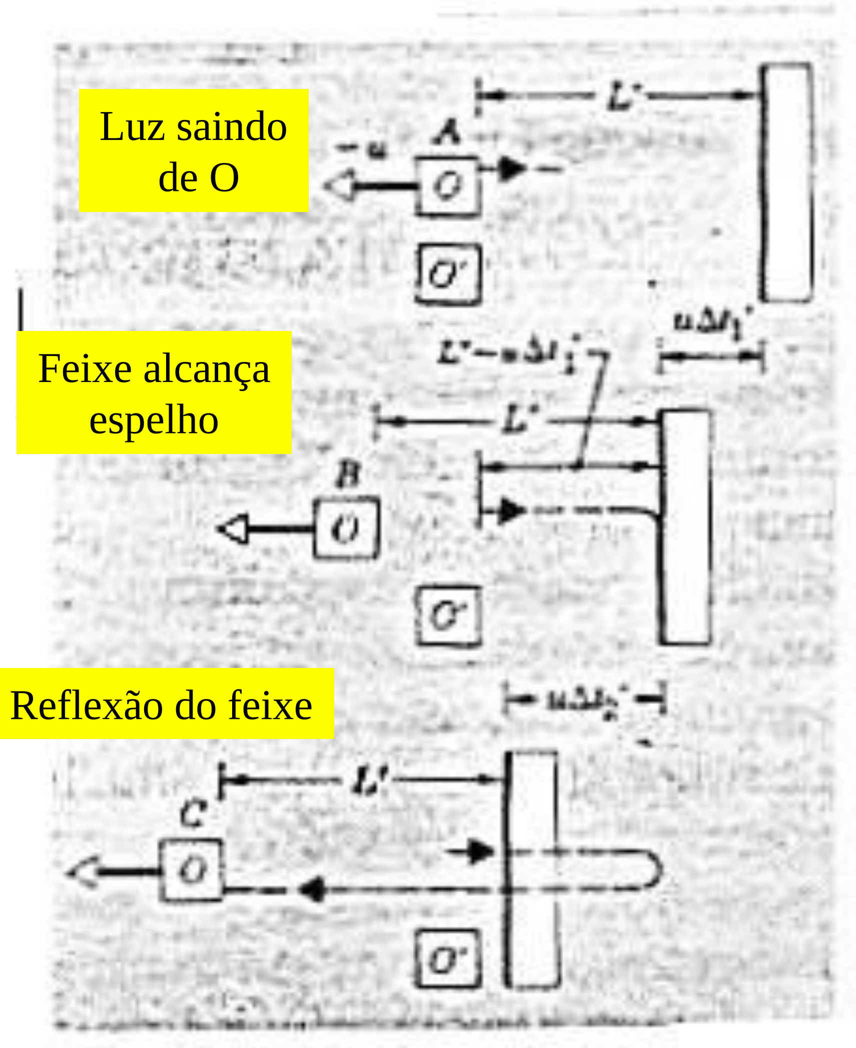
$$c\Delta t_1{}' = L' - u\Delta t_1{}'$$

Na reflexão do feixe
O observador O se deslocou de $u\Delta t_2{}'$

$\downarrow$

$$c\Delta t_2{}' = L' + u\Delta t_2{}'$$

Visto por O´:



CONTRAÇÃO DO COMPRIMENTO:

Seja $\Delta t' = \Delta t_1' + \Delta t_2' \rightarrow$ tempo total de ida e de volta

$$\Delta t' = \frac{L'}{c+u} + \frac{L'}{c-u} = L'\frac{2c}{c^2-u^2}$$

Tem-se para o observador O: $\Delta t = \dfrac{2L}{c}$

Tem-se para o observador O´ $\rightarrow$ $\Delta t' = \dfrac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ EFEITO DA DILATAÇÃO DO TEMPO

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \frac{2L/c}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = L'\frac{2c}{c^2-u^2} = \frac{L'}{c}\frac{2}{(1-\frac{u^2}{c^2})}$$

$$\frac{2L/c}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \frac{2L'/c}{(1-\frac{u^2}{c^2})} \rightarrow L' = L\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

EFEITO DA CONTRAÇÃO DO COMPRIMENTO

L´observado por O´ é menor que L observado por O

CONTRAÇÃO DO COMPRIMENTO:

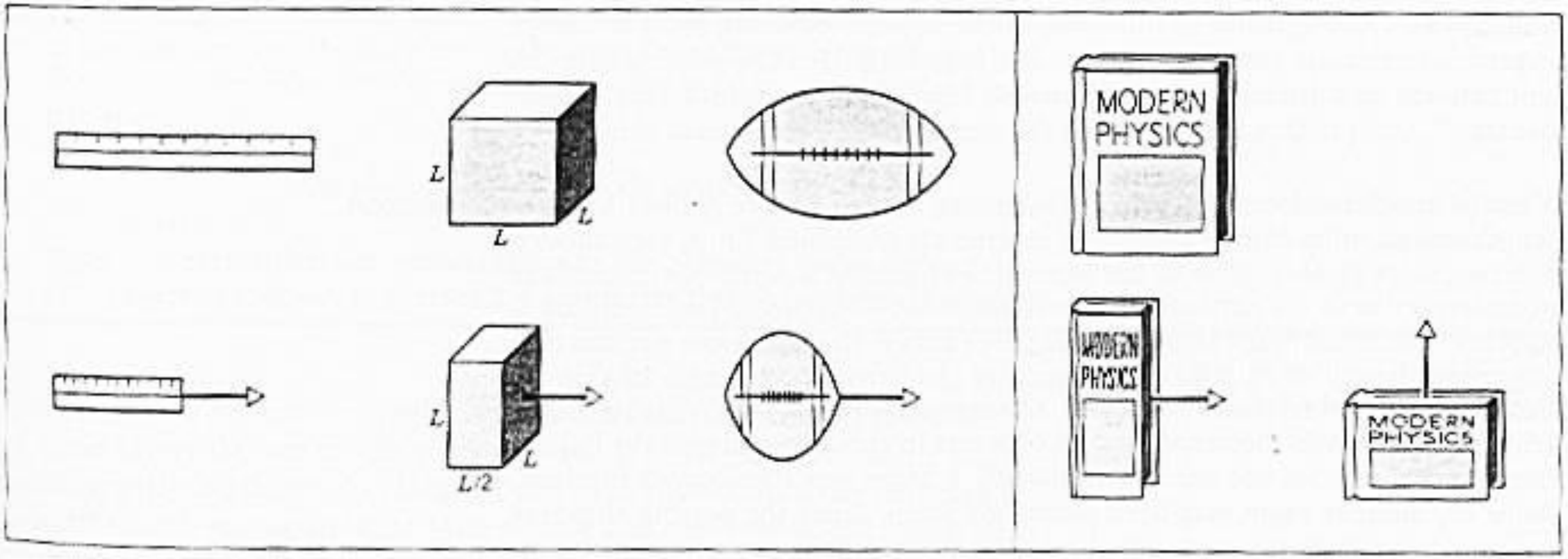


FIGURE 2.7 Some length-contracted objects. Notice that the shortening occurs only in the direction of motion.

$$\frac{2L/c}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \frac{2L'/c}{(1-\frac{u^2}{c^2})} \rightarrow L' = L\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

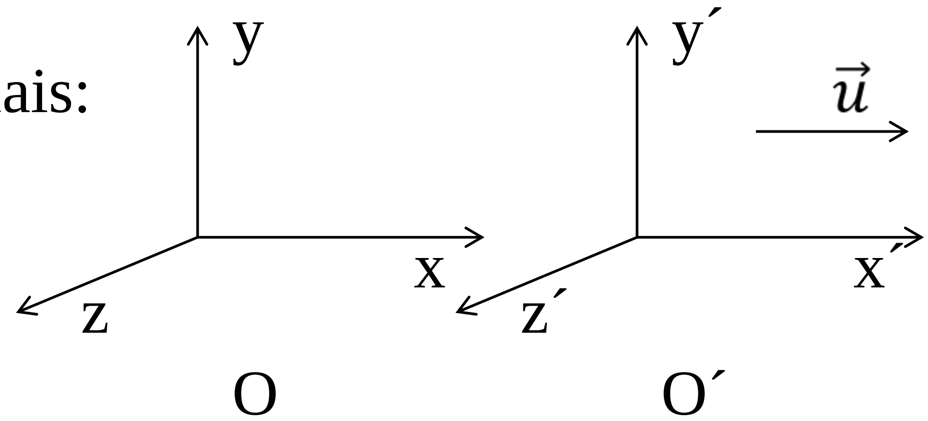
EFEITO DA CONTRAÇÃO DO COMPRIMENTO

L´observado por O´ é menor que L observado por O

TRANSFORMADA DE LAPLACE

Transformadas entre referenciais:

- Galileu – para u << c;
- Lorentz é geral:



$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/_{c^2}}}$$

y´= y;

z´= z;

$$t' = \frac{t - (\frac{u}{c^2})x}{\sqrt{1 - u^2/_{c^2}}}$$

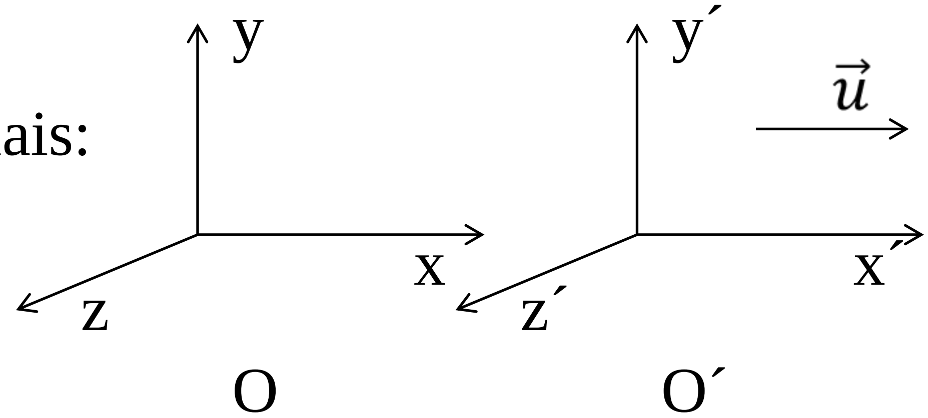
Relações para velocidades:

$$v_{x'} = \frac{v_x - u}{1 - v_x(u/_{c^2})} \; ;$$

$$v_{y'} = \frac{v_y \sqrt{1 - (u^2/_{c^2})}}{1 - v_x(u/_{c^2})} \; ;$$

$$v_{z'} = \frac{v_z \sqrt{1 - (u^2/_{c^2})}}{1 - v_x(u/_{c^2})}$$

Transformadas entre referenciais:
- Galileu – para u << c;
- Lorentz é geral:



$$y' = y \rightarrow dy' = dy \quad \text{e} \quad t' = \frac{t - \left(\frac{u}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - {u^2}/{c^2}}} \rightarrow dt' = \frac{dt - \left(\frac{u}{c^2}\right)dx}{\sqrt{1 - {u^2}/{c^2}}}$$

$$\frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{\dfrac{dt - \left(\frac{u}{c^2}\right)dx}{\sqrt{1 - {u^2}/{c^2}}}} \rightarrow \quad v_{y'} = \frac{v_y \sqrt{1 - ({u^2}/{c^2})}}{1 - v_x({u}/{c^2})}$$

Dinâmica Relativística

Com os dois postulados de Einstein, conceito absoluto de L e t e conceito clássico de velocidade relativa não valem!

- E os conceitos dinâmicos valem? $p = mv$? $K = mv^2/2$? $F = ma$?

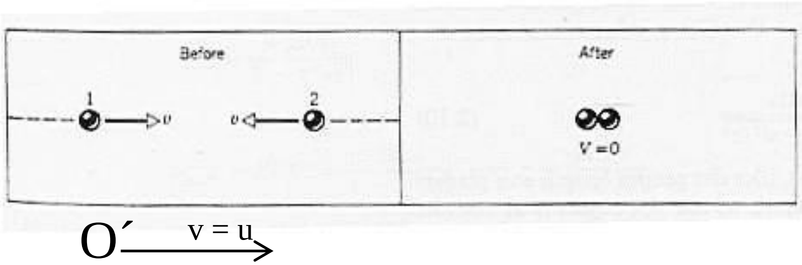
- Aplicando força F a uma massa m por longo tempo:

$$a = F/m \; ; \; v = v_o + at \rightarrow v > c \; ?$$

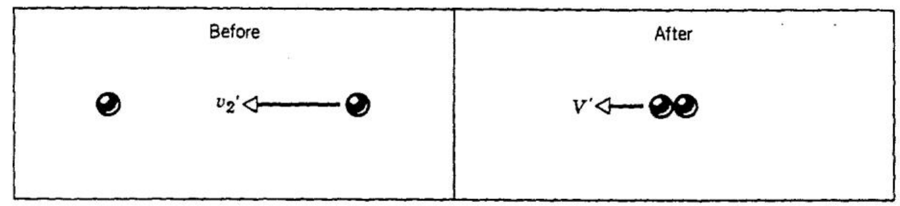
Dinâmica Relativística

Seja o problema:

Observador O:



Observador O´:



Para observador O:

$p_{in} = m_1v_1 + m_2v_2 \quad = mv - mv = 0$

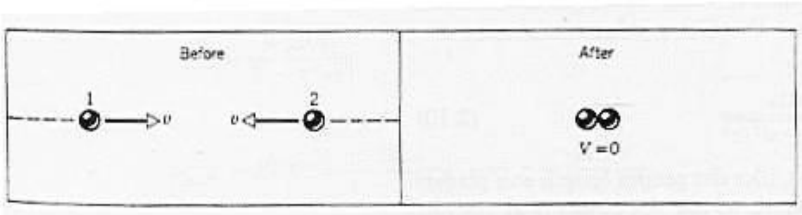
$p_{fin} = 2mv = 0$

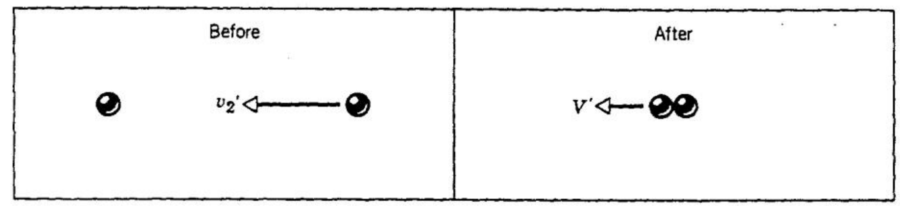
Para observado O vale a lei da conservação do momento

Dinâmica Relativística

Seja o problema:

Observador O: Observador O´:





O´ $\xrightarrow{v = u}$

Para observador O:

$p_{in} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad = mv - mv = 0$

$p_{fin} = 2mv = 0$

Para observado O vale a lei da conservação do momento

Para observador O´ usando a transformada de Lorentz:

$$v_1{}' = \frac{v_1 - u}{1 - v_1\left(\frac{u}{c^2}\right)} = \frac{v \quad - v}{1 - v \quad \left(\frac{v}{c^2}\right)} = \frac{0}{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

Pois $v_1 = v$; $u = v$

$$v_2{}' = \frac{v_2 - u}{1 - v_2\left(\frac{u}{c^2}\right)} = \frac{-v \quad - v}{1 - (-v)\left(\frac{v}{c^2}\right)} = \frac{-2v}{1 + \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

Pois $v_2 = -v$; $u = v$

Antes da colisão

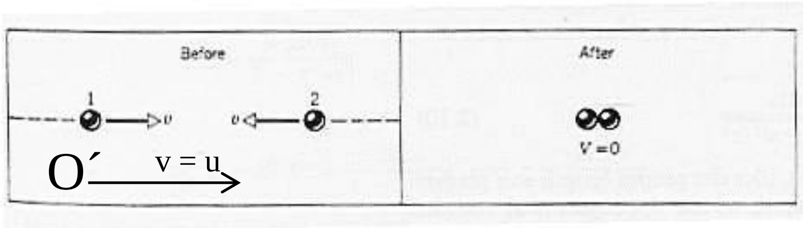
depois da colisão

$$v' = \frac{v \quad - u}{1 - v\left(\frac{u}{c^2}\right)} = \frac{0 - v}{1 - (0)\left(\frac{v}{c^2}\right)} = \frac{-v}{1 - 0} = -v$$

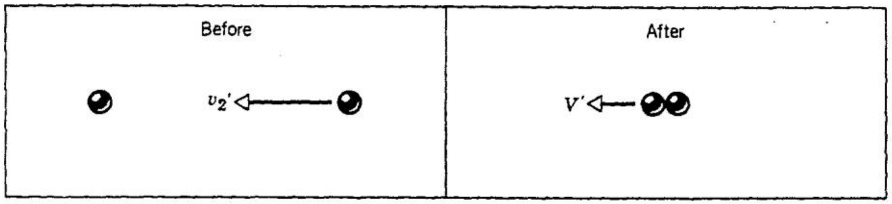
Dinâmica Relativística

Seja o problema:

Observador O:



Observador O´:



Para observador O´:

$$p'_{in} = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad = m.0 - m\,\frac{-2v}{1+\left(\frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{-2mv}{1+\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

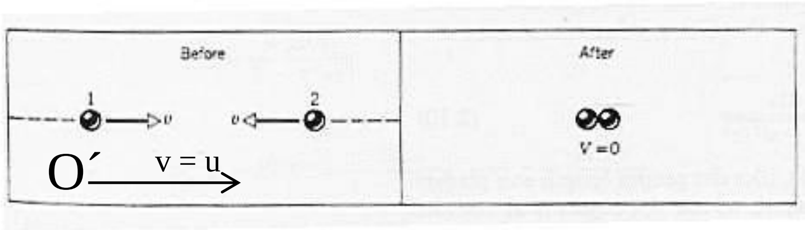
$$p'_{fin} = 2mv' = -2mv$$

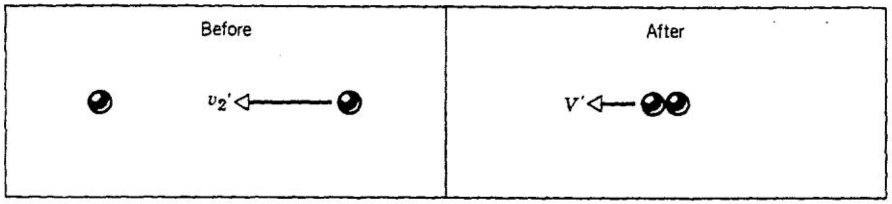
Para observado O´ vale a lei da conservação do momento

$\therefore\ p'_{in} \neq p'_{fin}$ ⇨ Não é razoável ⇨ Erro ! ⇨ Deve estar na massa m

Dinâmica Relativística

Seja o problema:

Observador O: 

Observador O´: 

Para observado O´ vale a lei da conservação do momento

Para observador O´:

$$p'_{in} = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad = m.0 - m\,\frac{-2v}{1+(\frac{v^2}{c^2})} = \frac{-2mv}{1+(\frac{v^2}{c^2})}$$

$$p'_{fin} = 2mv' = -2mv$$

$\therefore\ p'_{in} \neq p'_{fin}$ ⟹ Não é razoável ⟹ Erro ! ⟹ Deve estar na massa m

Em analogia a L e T, propõe-se um aumento da massa relativística:

$$\boxed{\mathbf{m} = \frac{mo}{\sqrt{1-(\frac{u^2}{c^2})}}}$$

onde: mo é a massa de repouso

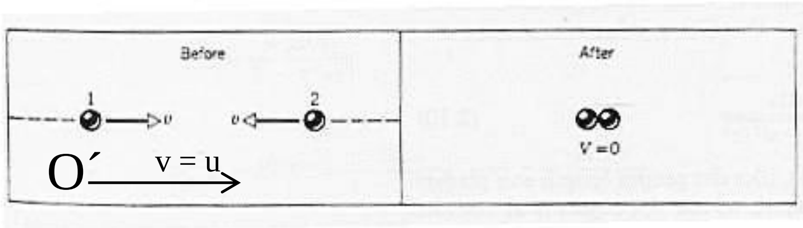
Nota: $\frac{u}{c} = \sqrt{1 - (mo^2/m^2)}$

Para mo = 0 → u = c

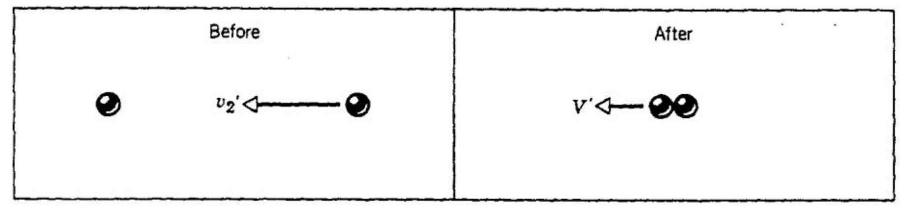
Dinâmica Relativística

Seja o problema:

Observador O:



Observador O´:



Em analogia a L e T, propõe-se um aumento da massa relativística:

$$\boxed{\mathbf{m} = \frac{mo}{\sqrt{1-(\frac{u^2}{c^2})}}}$$

onde: mo é a massa de repouso

Nota: $\frac{u}{c} = \sqrt{1 - (mo^2/m^2)}$

Para mo = 0 → u = c

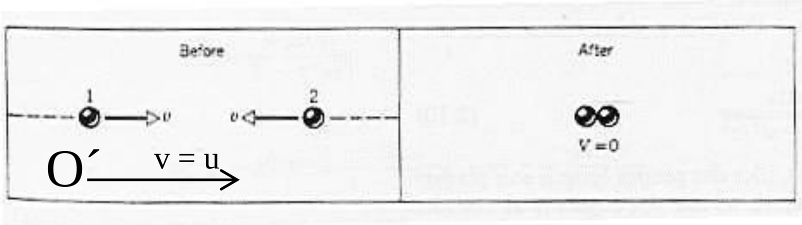
Resolve o problema para a = F/m que resultaria em v > c, pois quando

Velocidade ↑→ massa ↑ → aceleração ↓ → v < c !

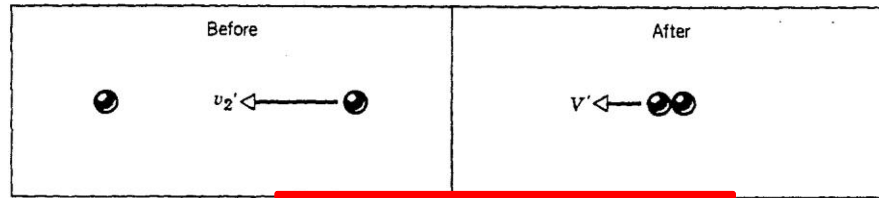
Dinâmica Relativística

Seja o problema:

Observador O:



Observador O´:



∴ a colisão, usando a massa relativística: $$\boxed{\mathbf{m} = \frac{mo}{\sqrt{1-(\frac{u^2}{c^2})}}}$$

Para O:

Antes: $$\boxed{\mathbf{m_1} = \frac{mo}{\sqrt{1-(\frac{v^2}{c^2})}} = \mathbf{m_2}}$$

Pois $v_1 = v$; $v_2 = -v$.

Depois: $$\boxed{\mathbf{M} = \mathbf{m_1} + \mathbf{m_2} = \frac{2mo}{\sqrt{1-(\frac{v^2}{c^2})}} = \mathbf{Mo}}$$

Nota: observador em repouso

Para observador O:

$p_{in} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \;\; = mv - mv = 0$

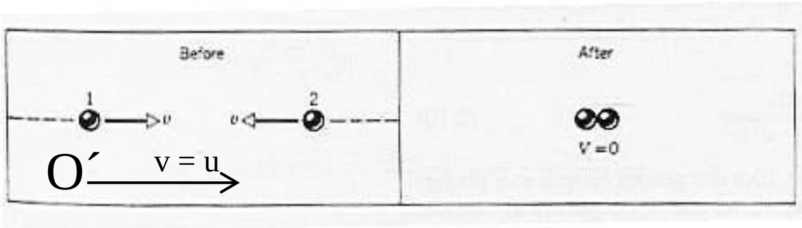
$p_{fin} = Mov = 0$

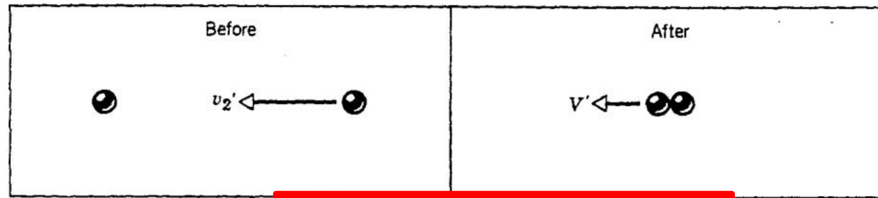
Para observado O vale a lei da conservação do momento

Dinâmica Relativística

Seja o problema:

Observador O: Observador O´:





∴ a colisão, usando a massa relativística:

$$\boxed{\mathbf{m} = \frac{mo}{\sqrt{1 - (\frac{u^2}{c^2})}}}$$

Para O´:

Antes:

$$\boxed{\mathbf{m'_1 = mo \quad e \quad m'_2} = \frac{mo}{\sqrt{1 - (\frac{1}{c^2})(\frac{-2v}{1 + (\frac{v^2}{c^2})})^2}} = \mathbf{mo}(\frac{1 + v^2/c^2}{1 - v^2/c^2})}$$

$$\text{Pois } v'_1 = 0;\ v'_2 = \frac{-2v}{1 + (\frac{v^2}{c^2})}$$

Depois:

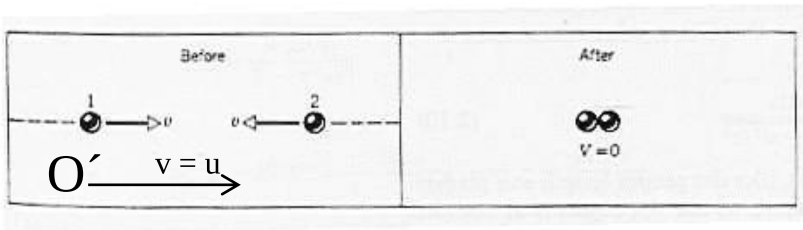
$$\boxed{\mathbf{M'} = \frac{Mo}{\sqrt{1 - (\frac{v^2}{c^2})}} = \frac{2mo}{1 - v^2/c^2}}$$

Pois v´ = -v; $\mathbf{Mo} = \frac{2mo}{\sqrt{1 - (\frac{v^2}{c^2})}}$

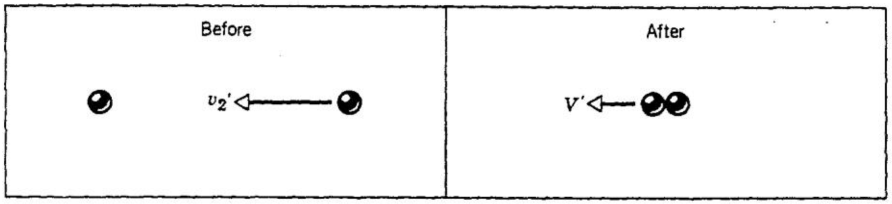
Dinâmica Relativística

Seja o problema:

Observador O:



Observador O´:



Para observador O´:

$$p'_{in} = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad = mo.0 + mo. \left(\frac{1+v^2/c^2}{1-v^2/c^2}\right) \frac{-2v}{1+\left(\frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{-2mov}{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$p'_{fin} = M'v' = \frac{2mo}{1-v^2/c^2}\ (\text{-}v) = = \frac{-2mov}{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$\therefore\ p'_{in} = p'_{fin}$ ⇒ É razoável ⇒ Correto !

A definição de massa relativística resulta em conservação do momento linear para qualquer referencial

MOMENTO RELATIVÍSTICO

$$\boxed{\mathbf{p= m.v} = \frac{\boldsymbol{mo.v}}{\sqrt{\mathbf{1}-(\frac{\boldsymbol{v^2}}{\boldsymbol{c^2}})}}}$$

ENERGIA CINÉTICA RELATIVÍSTICA

$\Delta K = K_{FINAL} - K_{INICIAL} = \int F dx$ → Se $K_{INICIAL}=0$

K $= \int F dx$ e como $F = \frac{dp}{dt} \rightarrow K = \int \left(\frac{dp}{dt}\right) dx = \int dp \frac{dx}{dt} = \int v dp$

Integrando-se por partes: $K = \int v dp = pv - \int_{v=0}^{v=v} p dv$

$$K = \int pv - \int_{v=0}^{v=v} p dv = \frac{\boldsymbol{mo.v^2}}{\sqrt{\mathbf{1} - (\frac{\boldsymbol{v^2}}{\boldsymbol{c^2}})}} - \int_{v=0}^{v=v} \frac{\boldsymbol{mo.v.dv}}{\sqrt{\mathbf{1} - (\frac{\boldsymbol{v^2}}{\boldsymbol{c^2}})}}$$

$$\boxed{\boldsymbol{K} = \frac{\boldsymbol{mo.v^2}}{\sqrt{\mathbf{1}-(\frac{\boldsymbol{v^2}}{\boldsymbol{c^2}})}} - \boldsymbol{mo.c^2}\sqrt{\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{v^2}}{\boldsymbol{c^2}}} - \boldsymbol{mo.c^2} = \boldsymbol{m.c^2} - \boldsymbol{mo.c^2}}$$

MOMENTO RELATIVÍSTICO

$$\boxed{\mathbf{p= m.v} = \frac{\boldsymbol{mo.v}}{\sqrt{\mathbf{1} - (\frac{\boldsymbol{v^2}}{\boldsymbol{c^2}})}}}$$

ENERGIA CINÉTICA RELATIVÍSTICA

$$\boldsymbol{K} = \frac{\boldsymbol{mo.v^2}}{\sqrt{\mathbf{1} - (\frac{\boldsymbol{v^2}}{\boldsymbol{c^2}})}} - \boldsymbol{mo.c^2}\sqrt{\mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{v^2}}{\boldsymbol{c^2}}} - \boldsymbol{mo.c^2} = \boldsymbol{m.c^2} - \boldsymbol{mo.c^2}$$

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{m.c^2} - \boldsymbol{mo.c^2} = \mathrm{mo}.c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1\right) = \mathrm{E} - \mathrm{Eo}$$

Se $\frac{v^2}{c^2} << 1 \rightarrow$ por aproximação: $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \sim 1 + \frac{1}{2}\,(v^2/c^2)$

$$K \sim mo.c^2(1 + \frac{1}{2}\,(v^2/c^2)) - mo.c^2 = \frac{1}{2} mo.v^2$$

Newtoniana

MOMENTO RELATIVÍSTICO

$$\boxed{\mathbf{p= m.v} = \frac{\boldsymbol{mo.v}}{\sqrt{\mathbf{1} - (\frac{\boldsymbol{v^2}}{\boldsymbol{c^2}})}}}$$

ENERGIA RELATIVÍSTICA em movimento

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{m}.\boldsymbol{c^2} = \mathrm{mo}.\,c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)\text{e}\ \ \mathbf{Eo} = \boldsymbol{mo}.\boldsymbol{c^2}$$

Energia e massa são equivalentes:

Ganho ou perda de energia é equivalente ao ganho ou perda de massa

ENERGIA CINÉTICA RELATIVÍSTICA

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{m}.\boldsymbol{c^2} - \boldsymbol{mo}.\boldsymbol{c^2} = \mathrm{mo}.\,c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right) = \mathrm{E} - \mathrm{Eo}$$