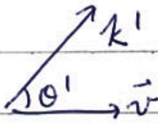
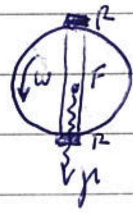
ainda, dado que



$$tg\,\theta' = \frac{k_y'}{k_x'} = \frac{k_y}{\gamma(k_x - \beta k_0)} = \frac{k\,sen\,\theta}{\gamma(k\cos\theta - \beta k)} \Rightarrow \boxed{tg\,\theta' = \frac{sen\,\theta}{\gamma(\cos\theta - \beta)}}$$

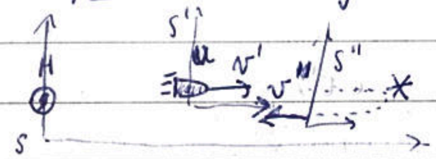
o experimento de Kündig (1962)



F: fonte, R: receptor

ω >> 1 2º efeito Mössbauer

6) O paradoxo dos gêmeos



H e U são gêmeos idênticos

quem fica mais velho?

U acha que H está em movimento

a Terra e a estrela estão no ref. S

ref. S' move-se com $v' = +0,8c$ } $\gamma = 5/3$

ref. S'' move-se com $v'' = -0,8c$

a nave de U acelera de 0 a v', desacelera a zero, a v'' depois desacelera a zero quando encontra H.

viagem de ida $\Delta t = 5a$, viagem de volta $\Delta t = 5a$

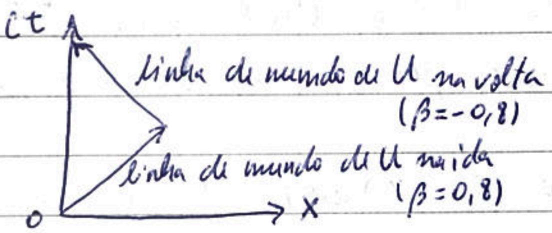
o tempo de U (próprio): $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\gamma} = \frac{5}{5/3} = 3a$

então $2\Delta t = 10a$, $2\Delta t' = 6a$ $(\Delta t > \Delta t')$

Se considerarmos ao contrário: $\Delta t = \frac{3}{\gamma} = \frac{3}{5/3} = 1,8a \Rightarrow 2\Delta t = 3,6a$

(H em movimento) $(\Delta t < \Delta t'?)$

porém H não muda de referencial, mas U muda



mas $\Delta s^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 = c^2\Delta t'^2 - \cancel{\Delta x'^2} = c^2\tau^2 \Rightarrow$

$$\left(\frac{\Delta s}{c}\right)^2 = \Delta t^2 - \left(\frac{\Delta x}{c}\right)^2 = \tau^2 \Rightarrow \Delta t^2 = \tau^2 + \left(\frac{\Delta x}{c}\right)^2 > \tau^2$$

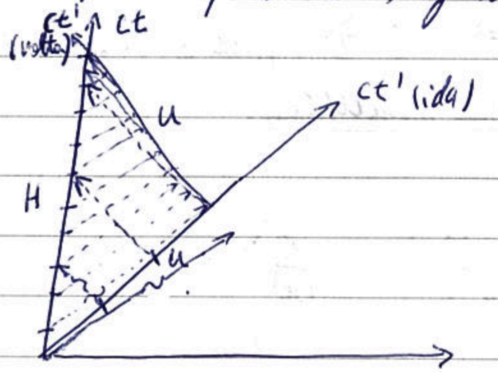
então, se para U : $\tau = 3a$ e $\Delta x = v\Delta t = 0{,}8c\Delta t \Rightarrow$

para H : $\Delta t^2 = 3^2 + 0{,}8^2 c^2 \Delta t^2 / c^2 \Rightarrow$

$$\Rightarrow 0{,}36\,\Delta t^2 = 3^2 \Rightarrow \Delta t = \frac{3}{0{,}6} = 5a$$

não podemos tratar a situação inversa pela teoria da relatividade especial, pois U não é um ref. inercial.

ex 1-14) um pulso de luz de cada um 1 vez por ano (no seu ref.)



no afastamento:

$$\frac{f}{f_0} = \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} = \sqrt{\frac{1-0{,}8}{1+0{,}8}} = \frac{1}{3}$$

na aproximação

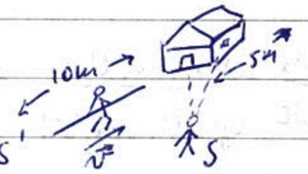
$$\frac{f}{f_0} = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{1+0{,}8}{1-0{,}8}} = 3$$

no 1º ano: $x_u = 0{,}8c \Rightarrow x_u(t) = 0{,}8c + 0{,}8ct$ $\Big\}$ $x_u = x_l \Rightarrow 0{,}8c + 0{,}8ct = ct$

luz: $x_l = ct$ $\qquad t = 0{,}8/0{,}2 = 4a$

$4a + 1a = 5a = \Delta t$

O paradoxo da vara e do celeiro



para a vara caber: $L = L_p/2 \Rightarrow$

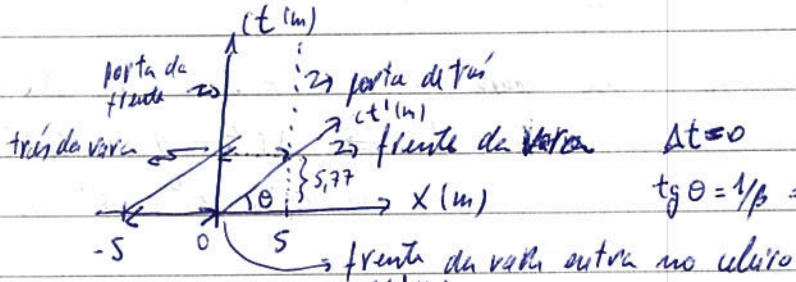
$$\Rightarrow \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = 2 \Rightarrow \frac{v^2}{c^2} = 1 - \frac{1}{4} = 0{,}75$$

$$\Rightarrow v = 0{,}866c$$

mas no ref. do corredor o celeiro está contraído de $L = L_p/\gamma = 2{,}5m$ (?)

2 eventos: a passagem da frente/trás da vara pela porta da frente/trás do celeiro em S e em S'

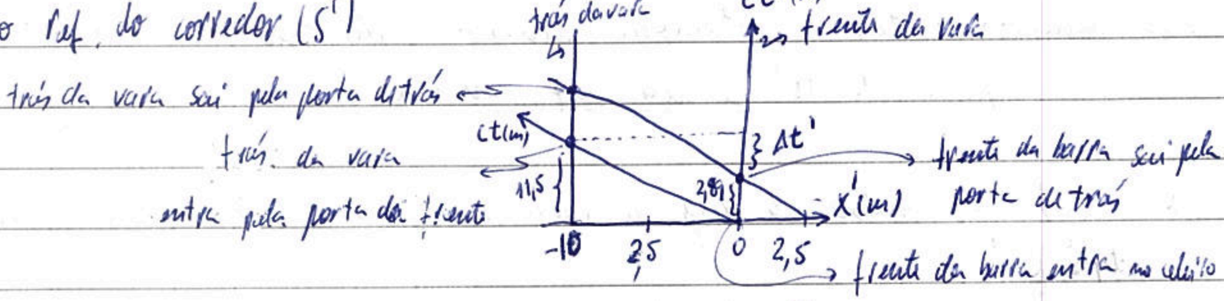
no ref. do fazendeiro (S)



$\Delta t = 0$

$tg\,\theta = 1/\beta \Rightarrow \theta = 49,1°$

no ref. do corredor (S')



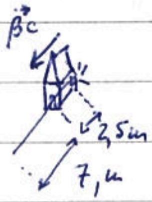
$\Delta t' \neq 0$: eventos não simultâneos

Se a parede de trás for dura, S vê:

e o choque levaria $\Delta t = \frac{10\,m}{3 \cdot 10^8\,s} = 3,33 \cdot 10^{-8}\,s$

para chegar à parte de trás da vara

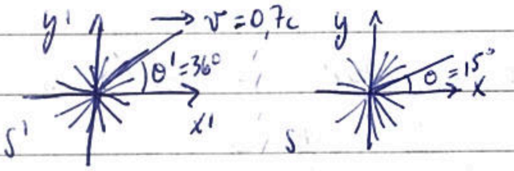
mas S' vê



e o celeiro leva $\Delta t' = \frac{7,5}{0,866 \cdot 3 \cdot 10^8} = 2,89 \cdot 10^{-8}\,s < \Delta t$

dá tempo!

O efeito farol: a velocidade da luz é a mesma, mas a direção não



(isotrópica)

mas $\cos\theta = \frac{\Delta x}{c\Delta t} = \frac{\gamma(\Delta x' + v\Delta t')}{c\gamma(\Delta t' + v\Delta x'/c^2)} =$

$= \frac{\Delta x'/\Delta t' + v}{c\left(1 + \frac{v}{c^2}\Delta x'/\Delta t'\right)} = \frac{(\Delta x'/c\Delta t') + v/c}{1 + \frac{v}{c}(\Delta x'/c\Delta t')} \Rightarrow$

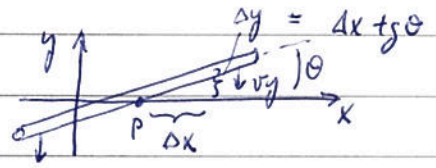
$\frac{\Delta x'}{c\Delta t'} = \frac{\Delta x'}{\Delta(ct')} = \cos\theta'$; $\frac{\Delta x}{\Delta(ct)} = \cos\theta$

$$\Rightarrow \boxed{\cos\theta = \frac{\cos\theta' + \beta}{1 + \beta\cos\theta'}}$$

se $\theta' = \pm\frac{\pi}{2} \rightarrow \cos\theta' = 0$! $\cos\theta = \beta \Rightarrow \beta = 0,5 \Rightarrow \theta = \pm 60°$ $\quad \beta = 0,99 \Rightarrow \theta = \pm 8,1°, \ldots$

Velocidades superluminais

paradoxo da tesoura

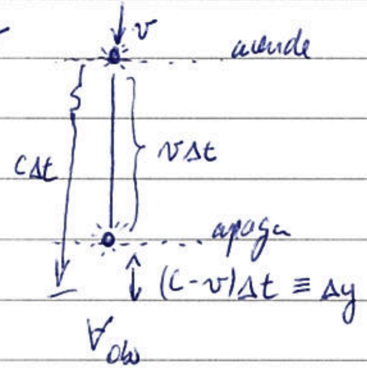


$v_y = \Delta y/\Delta t$

$v_P = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta y/v_y} = \frac{v_y \cancel{\Delta x}}{\cancel{\Delta x}\, tg\theta} = \frac{v_y}{tg\theta}$, se $v_y \propto c$ e $tg\theta \to 0 \Rightarrow v_P > c$

mas P é um ponto geométrico, não é uma partícula com massa

meteorito queimando na atmosfera:



intervalo de tempo entre acender e apagar no olho:

$\Delta t_o = \frac{\Delta y}{c} = \frac{\Delta t(c-v)}{c} = \Delta t(1-\beta)$

velocidade visual aparente:

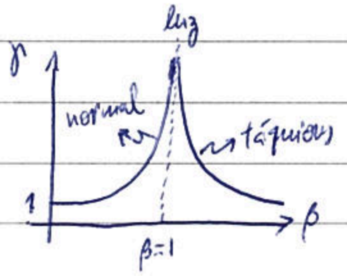
$v_a = \frac{v\Delta t}{\Delta t_o} = \frac{v\cancel{\Delta t}}{\cancel{\Delta t}(1-\beta)} = \frac{\beta c}{1-\beta}$

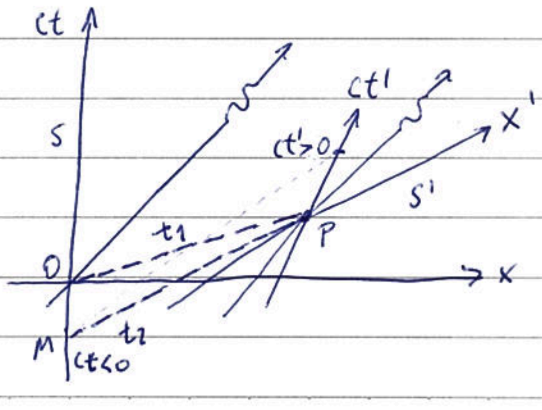
se $\beta = 0,5$: $v_a = c$

se $\beta > 0,5$: $v_a > c$

ex: M87

Táquions





/ /