Física IV - P1 RM 2,80

* Interferência

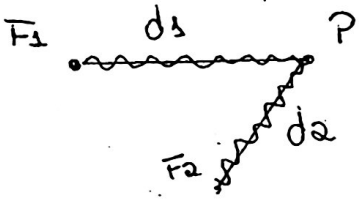
→ Princípio da superposição de Ondas:

"Quando duas ou mais ondas se superpõem, o deslocamento resultante em qualquer ponto em um dado instante pode ser determinado somando-se os deslocamentos instantâneos de cada onda como se ela estivesse sozinha."

Ou seja, dado duas ondas $y_1(x,t)$ e $y_2(x,t)$, quando elas se superpõem, a onda resultante em x_0 e t_0 é dada por:

$$y_R(x_0,t_0) = y_1(x_0,t_0) + y_2(x_0,t_0)$$

→ Interferência para dois caminhos diferentes



Haverá <u>diferença de fase</u>.

Existem dois casos:

• Interferência Construtiva

As ondas chegam em fase, com seus máximos e mínimos sincronizados e a amplitude resultante vai ser a soma das duas amplitudes.

Quando isso acontece?

$$d_2 - d_1 = m\lambda \quad \text{para } m = (0; \pm 1; \pm 2; \ldots)$$

Ou seja, quando a diferença entre d_1 e d_2 é igual a um múltiplo inteiro m de comprimento de onda λ.

• Interferência Destrutiva

Ocorre diferença de fase. Neste caso, a amplitude resultante será a diferença das amplitudes de cada onda.

Quando isso acontece?

$$d_2 - d_1 = (m + 1/2)\lambda \quad \text{para } m = (0; \pm 1; \pm 2; \ldots)$$

A diferença de fase é dada por:

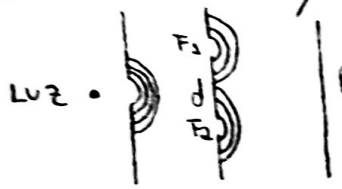
$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{d_2 - d_1}{\lambda}$$

$\Delta\phi = m \cdot 2\pi \rightarrow$ Construtiva

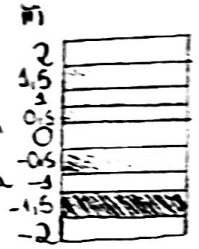
$\Delta\phi = (2m+1)\pi \rightarrow$ destrutiva

→ Interferência por Duas Fendas Parciais

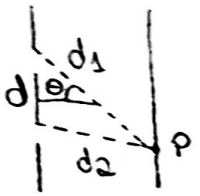
• O experimento de Young



→ Imagem formada



"Franjas de interferência"



$d \operatorname{sen}\theta = m\lambda$ → construtiva

$d \operatorname{sen}\theta = (m + 1/2)\lambda$ → destrutiva

$|d_2 - d_1| = d \operatorname{sen}\theta$

• Distância angular entre máximos e mínimos

$$\Delta\theta = \frac{(m_2 - m_1)\lambda}{d}$$

Para máximos e mínimos adjacentes: $\Delta\theta = \frac{\lambda}{d}$

• Distância entre máximos e mínimos

$$y_{máx} = \frac{Rm\lambda}{d} \qquad y_{mín} = \frac{R(m+1/2)\lambda}{d} \qquad \underbrace{\Delta y = \frac{R\lambda}{d}}_{\text{adjacentes}}$$

R → dist. da fenda até a tela

→ Interferência em Diferentes meios

A velocidade da onda é dada por: $v = \lambda f$

① índice de refração do meio é dado por: $n = \frac{c}{v}$ (c: velocidade da luz no vácuo)

Temos:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda f} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

Ou seja, utilizaremos as mesmas fórmulas com o novo $\underline{\underline{\lambda}}$!

→ Intensidade das Franjas de interferência

No meio de cada franja brilhante, a interferência é construtiva, e na escura, destrutiva. Mas de uma clara para uma escura, o brilho varia aos poucos. Esse brilho é a intensidade de luz. A intensidade segue a fórmula:

$$I_P = 4 I_0 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \qquad \phi = \frac{2\pi d \operatorname{sen}\theta}{\lambda}$$

I_0 → intensidade da luz incidente

ϕ → diferença de fase

$I = 4I_0$ → intensidade da franja brilhante central

Obs: Para ângulos pequenos

$$\phi = \frac{2\pi d y}{R\lambda}$$

→ Interferência com múltiplas Fendas pontuais

A intensidade resultante de uma interferência com $\underline{n}$ fontes luminosas é:

$$I = I_0 \left[\frac{\operatorname{sen}\left(\frac{n\phi}{2}\right)}{\operatorname{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right]^2$$

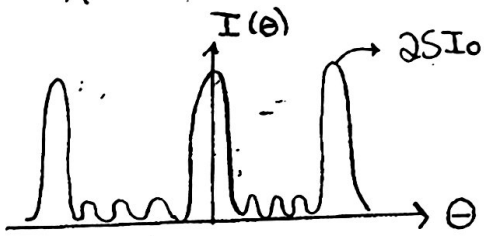
I_0 → intensidade da luz incidente

$$\phi = \frac{2\pi d \operatorname{sen}\theta}{\lambda}$$

Graficamente:

$n=2$

$n=5$



Máximos maiores → máximos principais

Máximos menores → máximos secundários

Para n fendas: $n-2$ máximos secundários

$n-1$ mínimos entre cada par de máx princ.

A altura de cada máximo é: N^2

Os mínimos ocorrem quando: $\phi_m = m \cdot \frac{2\pi}{n}$

→ Interferência por Meio de Propagação

Os meios pelos quais as ondas eletromagnéticas se propagam podem tirá-las de fase. Isso ocorre devido a refração, ou seja, a mudança de velocidade no meio.

Lembrando: $\lambda_{meio} = \frac{\lambda_0}{n_{meio}}$

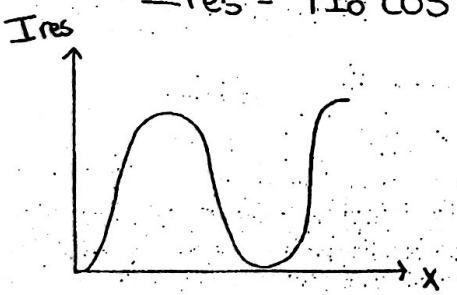
A diferença de fase em uma mudança de meio é:

$$\bar{\phi} = (n_1 - n_2) \cdot \frac{\overset{\text{espessura}}{L}}{\lambda_0} \cdot 2\pi$$

Construtiva → múltiplo de λ Destrutiva → múltiplo de $0{,}5\lambda$

Análise gráfica da intensidade resultante:

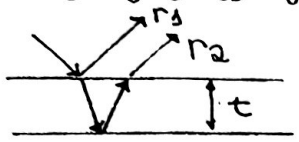
$$I_{res} = 4I_0 \cos^2\left(\underbrace{\frac{\phi}{2}}_{x}\right)$$



- Pontos de Máximo Totalmente construtiva
- Pontos de mínimo Totalmente destrutiva

→ Interferência em Filmes Finos

Exemplos de filmes finos: bolha de sabão



Ocorre mudança de fase, e os dois raios sofrem uma interferência que depende dessa mudança

A mudança de fase ocorre devido ao caminho percorrido e a reflexão:

Se o raio entra perpendicular: $\phi = \phi_{caminho} \pm \phi_{reflexão}$

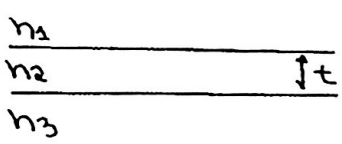
$$\phi = \frac{2t \cdot n_{filme} \cdot 2\pi}{\lambda_0} + \underbrace{\frac{2\pi}{2}}_{(*)}$$

Neste caso, as condições de interferência construtiva e destrutiva <u>se</u> <u>invertem</u>! (Devido à (*))

Se o raio entra com um ângulo θ:

$$\phi = \frac{2t\, n_{filme}\, 2\pi \cos\theta}{\lambda_0} + \frac{2\pi}{2}$$

→ Filmes finos em diferentes meios



Se $n_3 > n_2 > n_1$ ou $n_1 > n_2 > n_3$:

Construtiva: $m\lambda_0 = 2t \cdot n_2$

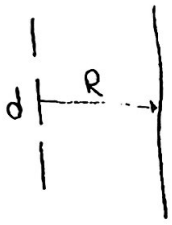
destrutiva: $(m + 1/2)\lambda_0 = 2t \cdot n_2$

Caso contrário: construtiva: $(m + 1/2)\lambda_0 = 2t \cdot n_2$

destrutiva: $m\lambda_0 = 2t \cdot n_2$

Lista - Interferência

35.9)



$d = 0{,}45\,mm$
$R = 75\,cm$
$\lambda = 500\,nm$

Segunda franja escura: $m=2$

$$y_{mín} = \frac{75\cdot 10^{-2}\cdot 2\cdot 500\cdot 10^{-9}}{0{,}45\cdot 10^{-3}} = 1{,}67\,mm$$

Terceira franja escura $m=3$

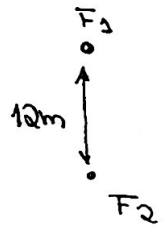
$$y_{mín} = \frac{75\cdot 10^{-2}\cdot 3\cdot 500\cdot 10^{-9}}{0{,}45\cdot 10^{-3}} = 2{,}5\,mm$$

$\Delta y = 2{,}5 - 1{,}67 = 0{,}83\,mm$ //

35.11) $d = 0{,}46\,mm$
$R = 2{,}2\,m$
$\Delta y = 2{,}82\,mm$

$$\Delta y = \frac{R\lambda}{d} \rightarrow \lambda = \frac{2{,}82\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}46\cdot 10^{-3}}{2{,}2} = 589{,}6\,nm$$ //

35.18) $f = 107{,}9\,MHz$



a) $v = \lambda f$ $\quad v = c = 3\cdot 10^8\,m/s$

$$\lambda = \frac{3\cdot 10^8}{107{,}9\cdot 10^6} = 2{,}78\,m$$

Intensidade máxima → construtiva

$d\,sen\theta = m\lambda \qquad m = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots$

↳ $\theta = \pm 13{,}4°, \pm 27{,}6° \ldots$ //

b) Intensidade 0 → destrutiva

$d\,sen\theta = (m + 1/2)\lambda \rightarrow \theta = \pm 6{,}66°, \pm 20{,}4°, \ldots$ //

35.23) $d = 0{,}26\,mm$
$R = 0{,}7\,m$
$\lambda = 660\,nm$
$I(\theta = 0) = I_0$

a) $m = 0$ destrutivo

$d\,sen\theta = (m + 1/2)\lambda$

↳ $sen\theta = 1{,}27\cdot 10^{-3} \rightarrow \theta = 1{,}27\cdot 10^{-3}$

$$y = \frac{0{,}7\cdot(0 + 1/2)\cdot 660\cdot 10^{-9}}{0{,}26\cdot 10^{-3}} = 0{,}8884\,mm$$ //

b) $I = \frac{I_0}{2} \Rightarrow \frac{I_0}{2} = I_0 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \rightarrow \frac{\phi}{2} = \frac{\pi}{4}$ $\quad \phi = \frac{2\pi d y}{R\lambda} \rightarrow y = \frac{R\lambda}{4d} = \boxed{0{,}444\,m}$

$\phi = \frac{\pi}{2}$

35.27) $n_1 = 1{,}42$ $\quad n_{ar} = 1$
$n_2 = 1{,}52$
$\lambda = 650\,nm$

$(m + \frac{1}{2})\lambda = 2t n_1$

Destrutiva: $\phi = (m + 1/2)\lambda$
$m = 0$

$t = 114{,}4\,nm$ //

$n_{ar} < n_1 < n_2$

35.32) $n_{ar} = 1$, $n_2 = 1{,}85$, $n_3 = 1{,}52$ } inverter construtiva e destrutiva

$\lambda_0 = 550nm$

a) Construtiva $m=0$

$(m+1/2)\lambda_0 = 2t \cdot n_2$

$t = 74{,}3nm$ //

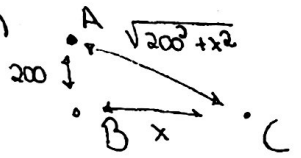
b) $m = 1 \rightarrow t = 223nm$ //

35.36) franja escura → destrutiva $\lambda = 480nm$ $n = 1{,}33$

$m\lambda_0 = 2t \cdot n_2$

$t = 180{,}45nm$ //

35.44)



$\lambda = \frac{c}{f} = 51{,}7m$

destrutiva → $d_2 - d_1 = (m+1/2)\lambda$

$\sqrt{200^2+x^2} - x = (m+1/2) \cdot 51{,}7m$

$m=3 \rightarrow x = 20m$ //

$m=3$ pois é a menor distância de B.

35.52) $\lambda_1 = 700nm$ Construtiva $(m=3)$

$d\,sen\theta = m \cdot \lambda_1 = 2100nm$

(*) Observe que nem d e nem θ são necessários.

Destrutiva: $d\,sen\theta = (m+1/2) \cdot \lambda_2$

$m=3 \rightarrow \lambda_2 = 600nm$ //

$m=4 \rightarrow \lambda_2 = 467nm$ //

35.54) $2t = (m_1 + 1/2)\lambda_1 = (m_2 + 1/2)\lambda_2$ (*) $m_2 = m_1 - 1$ (**)

$m_1 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} = 8 \rightarrow t = 1334nm$ //

(**) em (*)

35.58) a) Considerando que λ da luz visível: $400nm \leq \lambda \leq 700$.

$2t = (m+1/2)\lambda$ no petróleo $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$

$2t = (m+1/2)\frac{\lambda_0}{n} \rightarrow \lambda_0 = \frac{1102}{m+1/2}$ Para luz visível, $m = 4$

$\lambda_0 = 441nm$ //

b) $2t = m\lambda = m\frac{\lambda_0}{n}$

$\lambda_0 = \frac{2tn}{m} = \frac{1102}{m}$, Para luz visível, $m = 2$

$\lambda_0 = 551nm$ //

Difração

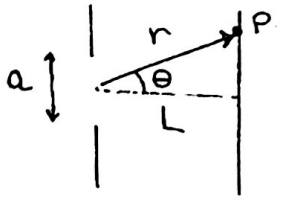
Quando a luz atinge um obstáculo que possui abertura, ela se espalha e age como se fizesse uma curva. (Princípio de Huygens)

É um fenômeno puramente ondulatório.

Difração de Fresnel → quando a parede está muito próxima, onde o resultado acaba se parecendo com o objeto iluminado.

Difração de Fraunhofer → quando a parede está longe, onde o resultado parece mais com a interferência por duas fendas

→ Difração em Fenda simples



Os pontos de mínimos de interferência serão dados por:

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{m\lambda}{a} \qquad (m = \pm 1, \pm 2, \ldots)$$

→ Posição das franjas na difração por uma fenda

$$y_m = \frac{Lm\lambda}{a} \qquad \Delta y_m = \frac{L(m_2 - m_1)\lambda}{a} \qquad \Delta y_m = \frac{L\lambda}{a}$$

↓ Da franja brilhante central até a escura

↓ Entre franjas

↓ adjacentes

L = dist. até a parede

→ Intensidade das franjas

$$I_p = I_{cen} \left(\frac{\operatorname{sen}(\phi/2)}{\phi/2}\right)^2 \qquad \phi = \frac{2\pi a \operatorname{sen}\theta}{\lambda}$$

onde I_{cen} = intensidade da franja central (ou I_0, intensidade da luz incidente)

ϕ = diferença de fase (Igual a interferência!)

→ Difração por uma fenda circular

Para orifícios circulares, teremos vários anéis claros e escuros circundando um disco central (disco de Airy)

$$\underbrace{\operatorname{sen}\theta = \frac{1{,}22\,\lambda}{D}}_{\text{desvio angular do primeiro anel escuro em relação ao centro do círculo}} \qquad \underbrace{\theta = \frac{1{,}22\,\lambda}{D}}_{\text{ângulos pequenos}} \qquad \underbrace{r = \frac{R \cdot 1{,}22 \cdot \lambda}{D}}_{\text{raio do primeiro anel escuro}}$$

D → diâmetro do orifício R → distância até o anteparo

→ Poder de Resolução e critério de Rayleigh

① quanto podemos distinguir dois pontos próximos é o que chamamos de poder de resolução do olho.

Quando os picos de difração são muito próximos, não conseguimos dizer que são dois picos, ao invés de um.

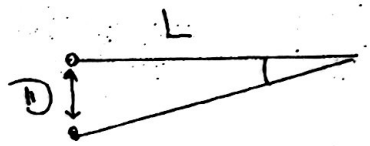
Chega uma hora que podemos distinguir os dois com certa confiança. Isso é dado pelo critério de Rayleigh:

"Dois objetos começam a poder ser distinguidos entre si quando a distância deles é tal que o máximo de difração de um coincida com o mínimo do outro."

Como nosso olho possui abertura circular, o menor ângulo necessário para distinguir dois pontos é:

$$\theta = \frac{1{,}22\,\lambda}{d}$$

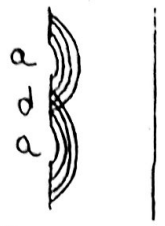
A distância entre os pontos é:

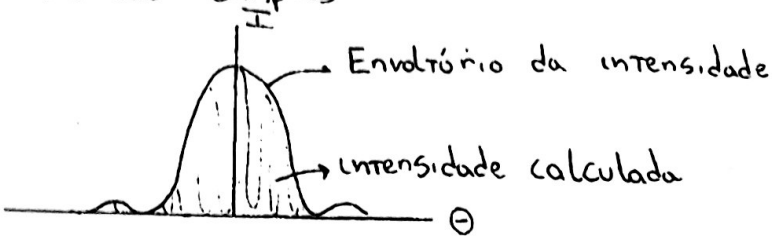


$$D = \frac{1{,}22 \cdot \lambda \cdot L}{d}$$

d = diâmetro da pupila

Difração por duas Fendas simples





Relembrando critérios:

Máximos de interferência: $d\,\text{sen}\theta = m\lambda$

Mínimos de interferência: $d\,\text{sen}\theta = (m+1/2)\lambda$

Mínimos de difração (envoltória): $\text{sen}\theta = \frac{m\lambda}{a}$

Para ângulos pequenos:

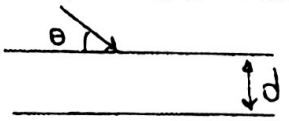
$$y_{máx} = \frac{Rm\lambda}{d}$$

$$y_{mín} = \frac{R(m+1/2)\lambda}{d}$$

$$y_m = \frac{Lm\lambda}{a}$$

No gráfico: alguns máximos de interferência não vão aparecer, pois eles podem coincidir com os mínimos da envoltória.

→ Difração de raios X em cristais



Interferência construtiva

$2d\,\text{sen}\theta = m\lambda$ → Lei de Bragg

Lista Difração

36.18) a) $\text{sen}\theta = \frac{\lambda}{2a}$ $\quad \phi = \frac{2\pi a\,\text{sen}\theta}{\lambda} = \frac{2\pi a}{\lambda}\cdot\frac{\lambda}{2a} = \pi$ //

$I = I_0\left(\frac{\text{sen}(\phi/2)}{\phi/2}\right)^2 \rightarrow I = I_0(2/\pi)^2 \rightarrow I = \frac{4I_0}{\pi^2}$ //

b) $\text{sen}\theta = \frac{\lambda}{a}$ $\quad \phi = \frac{2\pi a\,\text{sen}\theta}{\lambda} = \frac{2\pi a}{\lambda}\cdot\frac{\lambda}{a} = 2\pi$ // $\quad I = 0$ //

c) $\text{sen}\theta = \frac{3\lambda}{2a}$ $\quad \phi = \frac{2\pi a\,\text{sen}\theta}{\lambda} = \frac{2\pi a}{\lambda}\cdot\frac{3\lambda}{2a} = 3\pi$ // $\quad I = \frac{4I_0}{9\pi^2}$ //

36.21) a) $d\,\text{sen}\theta = m\lambda$ $\quad \phi = \frac{2\pi\cdot a\cdot\text{sen}\theta}{\lambda} = \frac{2\pi a}{\lambda}\cdot\frac{3\lambda}{d} = 2\pi\left(\frac{3a}{d}\right)$

$\text{sen}\theta = \frac{3\lambda}{d}$

$m = 3 \rightarrow I = 0$ $\quad I = 0 \Leftrightarrow \frac{\text{sen}(\phi/2)}{\phi/2} = 0 \rightarrow \phi = 2\pi$

$$2\pi = 2\pi\left(\frac{3a}{d}\right) \rightarrow \boxed{\frac{d}{a} = 3}$$

b) Segundo mínimo $\rightarrow \phi = 4\pi$

$$\phi = \frac{2\pi a \operatorname{sen}\theta}{\lambda} = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \frac{m\lambda}{d} = 2\pi m\left(\frac{a}{d}\right) = \frac{2}{3}\pi m \rightarrow 4\pi = \frac{2\pi m}{3} \qquad m = 6$$

$m = 3 \rightarrow 1^\circ$ mínimo

$m = 4$

$m = 5$ } Portanto, 2 franjas.

$m = 6 \rightarrow 2^\circ$ mínimo

36.36) a) $n \cdot m = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \rightarrow n = \frac{656{,}45 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 0{,}18 \cdot 10^{-9}} = 1820$ fendas

b) $500 \frac{\text{fendas}}{\text{mm}} = 500\,000 \frac{\text{fendas}}{\text{m}}$ $\quad \theta = \operatorname{arcsen}\left(\frac{m\lambda}{d}\right) = 41{,}0297^\circ$ // hidrogênio

↳ $41{,}016^\circ$ // deutério

36.62) $2d \operatorname{sen}\theta = m\lambda$

a) $m = 1 \rightarrow \theta = 12{,}8^\circ$ $\qquad m = 2 \rightarrow \theta = 26{,}3^\circ$ (só substituir)

b) $d = \frac{a}{\sqrt{2}} \rightarrow \theta = \operatorname{arcsen}\left(\frac{\sqrt{2}\, m\lambda}{2a}\right) \rightarrow m = 1 \quad \theta = 18{,}3 \ldots$

36.72) a) $\operatorname{sen}\theta = \frac{1{,}22\lambda}{D}$ $\qquad \theta \approx 0 \Rightarrow \operatorname{sen}\theta \approx \frac{\Delta x}{R}$ (tamanho dos detalhes) (dist. até a Terra)

$$R = \frac{D\Delta x}{1{,}22\lambda} = 1{,}23 \cdot 10^{17}\,\text{m} = 13{,}1 \text{ anos luz //}$$

b) $\Delta x = \frac{1{,}22\lambda R}{D} = 4{,}84 \cdot 10^{8}\,\text{km}$ //

c) $\Delta x = 1130\,\text{km}$

$$\frac{\Delta x}{D} = \frac{1130}{1{,}38 \cdot 10^{5}} = 8{,}19 \cdot 10^{-3} \text{ //}$$

* Relatividade

→ Princípios da relatividade

• Coordenadas espaço-temporais

Evento = algo que acontece. Um observador pode atribuir 4 coordenadas a um evento, três espaciais (x, y, z) e uma temporal (t). Dois observadores, em referenciais inerciais diferentes, irão atribuir coordenadas espaço-temporais diferentes para o mesmo evento.

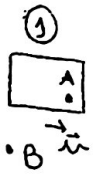
• Simultaneidade

Dois observadores situados em referenciais diferentes, em geral, não concordam quanto à simultaneidade de dois eventos. Portanto, a simultaneidade é um conceito relativo.

→ Relatividade do <u>Tempo</u>

• Dilatação do tempo

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \qquad \beta = \frac{u}{c}$$



Δt → tempo medido por B

Δt_0 → tempo medido por A

u → velocidade do trem

ou $\Delta t = \gamma \Delta t_0$ onde $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$ (Fator de Lorentz)

$\gamma > 1$ SEMPRE

→ Relatividade das <u>distâncias</u>

$$L = L_0 \sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

L_0 → comprimento próprio (medido por A)

L → comprimento medido por B

ou $L = \frac{L_0}{\gamma}$

• Parâmetro de Velocidades

$\beta = \frac{u}{c}$, então $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

→ Transformação de Lorentz

• Para o <u>espaço</u> e <u>tempo</u>

Referencial S (repouso) e S' (em movimento com velocidade u)

$S \rightarrow (x, y, z, t)$ $\qquad$ $S' \rightarrow (x', y', z', t')$

Qual a relação entre os dois sistemas de coordenadas?

S(repouso) → S'(movimento)

$$x' = \gamma(x - ut)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{ux}{c^2}\right)$$

S'(movimento) → S(repouso)

$$x = \gamma(x' + ut')$$
$$y = y'$$
$$z = z'$$
$$t = \gamma\left(t' + \frac{ux'}{c^2}\right)$$

→ Transformação de Lorentz para a velocidade:

S(repouso) → S'(movimento)

$$v_x' = \frac{v_x - u}{1 - \frac{uv_x}{c^2}}$$

$$v_y' = \frac{v_y}{\gamma\left(1 - \frac{uv_x}{c^2}\right)}$$

$$v_z' = \frac{v_z}{\gamma\left(1 - \frac{uv_x}{c^2}\right)}$$

S'(movimento) → S(repouso)

$$v_x = \frac{v_x' + u}{1 + \frac{uv_x'}{c^2}}$$

$$v_y = \frac{v_y'}{\gamma\left(1 + \frac{uv_x'}{c^2}\right)}$$

$$v_z = \frac{v_z'}{\gamma\left(1 + \frac{uv_x'}{c^2}\right)}$$

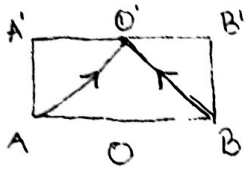
Obs: ~~Não é recomendado tacar o foda-se e estudar só por aqui!!!~~

Estude o caderno do ~~Polishare~~ Politecnicos também!

Melion Sito

sta - Relatividade

37.1)



Para o observador no trem, os raios chegam no mesmo tempo.

Para o obs. fora do trem, o raio de A tem uma distância maior para percorrer que o B, então, ele concluirá que o raio A atinge o solo primeiro, pois o A começa antes do B.

37.5) a) $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)^2}} \Rightarrow \Delta t = \gamma \Delta t_0 \rightarrow 1 - \frac{u^2}{c^2} = \left(\frac{\Delta t_0}{\Delta t}\right)^2$

$\Delta t_0 = 2{,}6 \cdot 10^{-8}$

$\Delta t = 4{,}2 \cdot 10^{-7}$

$\frac{u}{c} = 0{,}998$ //

b) $d = u \Delta t$ $\quad u = 0{,}988c$

$d = 126m$ //

37.7) $\Delta t_0 = \Delta t \sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)^2} = 365 \text{ dias} \cdot \sqrt{1-\left(\frac{4{,}8 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8}\right)^2} = 364{,}95 \text{ dias}$

Δt_0 da espaçonave é menor.

37.8) a) O da espaçonave $\Delta t_0 = 12 \cdot 10^{-3} s$

b) $u = c\sqrt{1-\left(\frac{\Delta t_0}{\Delta t}\right)^2} \rightarrow u = 0{,}998c$ //

37.11) a) $d = vt = 3 \cdot 10^8 \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-6} = 660m$ //

37.13) a) $L_0 = 3600m$ $\quad L = L_0\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}} \rightarrow L = 3568m$ //

b) $\Delta t_0 = \frac{L_0}{u} = \frac{3600}{4 \cdot 10^7} = 9 \cdot 10^{-5} s$ // $\quad$ c) $\Delta t = \frac{L}{u} = \frac{3568}{4 \cdot 10^7} = 8{,}92 \cdot 10^{-5} s$ //

34.16) a) $u = 0{,}8c$ $\quad \gamma = 1{,}667$ (substituir $u = 0{,}8c$)

$x = \gamma(x' + ut')$ $\quad x' = 0$ $\quad t' = 5s$

$x = 1{,}667 \cdot 0{,}8 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 5 = 2 \cdot 10^9 m$ // $\quad t = \gamma\left(t' + \frac{ux'}{c^2}\right) = 8{,}33s$ //

b) $\Delta t_0 = 5s$ é o tempo próprio $\therefore \Delta t = \gamma \Delta t_0 = 8{,}33s$ //

c) $8{,}33s \cdot 0{,}8 \cdot c = 2 \cdot 10^9 m$ //

37.19) $V_x' = -0{,}95c$ $\quad V_x = \dfrac{V_x' + u}{1 + \dfrac{uV_x'}{c^2}} = -0{,}784c$ //

$u = 0{,}650c$

37.22) a) $V' = 0{,}7c$ $\quad V = \dfrac{V' + u}{1 + \dfrac{uV'}{c^2}} = 0{,}859c$ //

$u = 0{,}4c$

b) $t = \dfrac{8 \cdot 10^6}{0{,}859c} = 31\,s$ //

37.25) a) Efeito Doppler → não cai!

b)

37.26) Efeito Doppler

37.54) $\Delta t = 4h = 1{,}44 \cdot 10^4\,s$ $\quad u = 250$

$\Delta t_0 = \Delta t\sqrt{1 - \dfrac{u^2}{c^2}} \simeq \Delta t\left(1 - \dfrac{u^2}{2c^2}\right) \Rightarrow \Delta t - \Delta t_0 = 5 \cdot 10^{-9}\,s$ //