



Formulário

CONSTANTES NUMÉRICAS

$\mu_0 = 1 \times 10^{-6}$ H/m; $\varepsilon_0 = (1/9) \times 10^{-10}$ F/m; $c = 3 \times 10^8$ m/s; $h = 6 \times 10^{-34}$ J · s;
 $h = 3 \times 10^{-15}$ eV · s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV · nm; $e = 2 \times 10^{-19}$ C; 1 eV =
 2×10^{-19} J; 1 J = 5×10^{18} eV; $m_p c^2 = 1000$ MeV; $m_e c^2 = 0,5$ MeV; $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m;
 1 nm = 10^{-9} m; $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m; 1 pm = 10^{-12} m; 1 GeV = 10^3 MeV = 10^9 eV;
 $\lambda_c = 1,8$ pm; $E_1 = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_0 a_0} = -25$ eV; $a_0 = \frac{\hbar^2 \varepsilon_0}{\pi m_e e^2} = (9/\pi) \times 10^{-11}$ m; $\sin(30^\circ) = 1/2$;
 $\sin(45^\circ) = \sqrt{2}/2$; $\sin(60^\circ) = \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

$\text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; $\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; $\text{div } \mathbf{B} = 0$; $\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$;
 $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \times \mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0 E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$;
 $I = I_0 \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2 \left[\frac{\sin(N\phi/2)}{N\sin(\phi/2)} \right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta)$;
 $\sin(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; $\sin(\theta_m^{(d)}) = (m + n/N)(\lambda/d)$; $\sin(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$;
 $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1,22\lambda}{D}$; $\langle \sin^2 \theta \rangle = 1/2$; $E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$; $\frac{u}{c} = \frac{pc}{E}$;
 $E = K + m_0 c^2 = \gamma m_0 c^2$; $p = \gamma m_0 u$; $\gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$; $x = \gamma(x' + ut')$;
 $t = \gamma(t' + \frac{ux'}{c^2})$; $v_x = \frac{v'_x + u}{1 + (v'_x u)/c^2}$; $v_y = \frac{v'_y}{\gamma(1 + (v'_x u)/c^2)}$; $p_x = \gamma(p'_x + uE'/c^2)$;
 $E = \gamma(E' + up'_x)$; $p_y = p'_y$; $\lambda_2 - \lambda_1 = \left(\frac{h}{mc} \right) (1 - \cos \theta) = \lambda_c (1 - \cos \theta)$;
 $f = f_0 \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$; $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$; $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$; $L_n = n\hbar$; $r_n = n^2 a_0$; $E_n = \frac{E_1}{n^2}$;
 $E_n = n^2 \hbar^2 / (8mL^2)$; $eV_0 = hf - w$; $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + U(x,t) \Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$;
 $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u(x)}{dx^2} + U(x)u(x) = Eu(x)$; $k_1 = \sqrt{2mE}/\hbar$; $k_2 = \sqrt{2m|E - V|}/\hbar$;
 $R = (\sqrt{E} - \sqrt{E - V})^2 / (\sqrt{E} + \sqrt{E - V})^2$; $T = 1 - R$;
 $\langle x \rangle = (2k_2)^{-1} = \hbar / \sqrt{8m(E - V)}$; $T = [1 + (\frac{V^2}{4E(E - V)}) \sin^2(k_2 L)]^{-1}$; $T = [1 + (\frac{V^2}{4E(E - V)}) \sinh^2(k_2 L)]^{-1}$, $T \simeq \frac{16E(V - E)}{V^2} \exp[-\sqrt{8m(V - E)}L/\hbar]$.

1. Num espalhamento Compton de um fóton por uma partícula livre em repouso, o fóton é espalhado de 45° em relação à trajetória retilínea inicial do fóton incidente. Considere o comprimento de onda inicial do fóton λ enquanto o comprimento de onda do fóton espalhado vale 3λ . Determine a massa de repouso da partícula.

(a) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{2 - \sqrt{3}}{2} \right)$

(b) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{1}{2} \right)$

~~(c) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{2 - \sqrt{2}}{4} \right)$~~

(d) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{3 - \sqrt{2}}{4} \right)$

(e) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{1 - \sqrt{2}}{3} \right)$

2. Um feixe de luz monocromático incide sobre uma fenda simples de largura $a = 0,8$ mm. Em uma tela plana que está a 4 m de distância do anteparo plano que contém a fenda, observa-se que a franja central tem 4,0 mm de largura. Com base nesses dados, determine o comprimento de onda da luz incidente:

~~(a) 400 nm~~

(b) 800 nm

(c) 200 nm

(d) 300 nm

(e) 600 nm

3. Uma partícula de massa m se encontra dentro de uma caixa de potencial infinito e pode ser encontrada entre $0 < x < L$. A função de onda da partícula é dada pelo segundo estado excitado. Uma posição cuja a densidade de probabilidade de encontrar a partícula é nula vale:

~~(a) $x = L/3$~~

(b) $x = L/2$

(c) $x = L/4$

(d) $x = 3L/4$

4. Em relação a um referencial inercial de laboratório L , um fóton de um pulso eletromagnético colide elasticamente com uma partícula de massa de repouso $3m$. Antes da colisão, o fóton possui momento linear $+(3mc)\hat{x}$ enquanto a partícula se move ao longo do eixo x com velocidade negativa e energia total $\sqrt{18}mc^2$. Após a colisão, o fóton é espalhado para o ângulo $\theta = 90^\circ$, em relação à sua trajetória inicial. Qual o vetor momento linear total do sistema após a colisão?

(a) $\vec{p} = -(3mc)\hat{x}$

(b) $\vec{p} = (6mc)\hat{x}$

(c) $\vec{p} = -(2mc)\hat{x}$

~~(d)~~ $\vec{p} = \vec{0}$

(e) $\vec{p} = (4mc)\hat{y}$

5. Uma onda plana senoidal possui os seguintes campos elétrico e magnético, respectivamente, $\vec{E} = E_0[(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}] \cos(kz + \omega t)$ e $\vec{B} = B_0[(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}] \cos(kz + \omega t)$. A direção de polarização e o sentido de propagação dessa onda são dados, respectivamente, pelos vetores unitários:

(a) A onda não é polarizada linearmente.

(b) $(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}$ e $\hat{k}$

(c) $(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}$ e $-\hat{k}$

(d) $(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}$ e $\hat{k}$

~~(e)~~ $(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}$ e $-\hat{k}$

6. Em um experimento de dupla fenda de Young, duas fendas paralelas com 3 mm de distância uma da outra são iluminadas coerentemente com luz verde (500 nm) e com luz violeta (400 nm). Determine a menor distância, em relação ao máximo central na tela, para que a interferência construtiva ocorra para ambas as cores simultaneamente. Considere que a tela de observação está a 2 m do plano das fendas.

(a) 0,02 mm

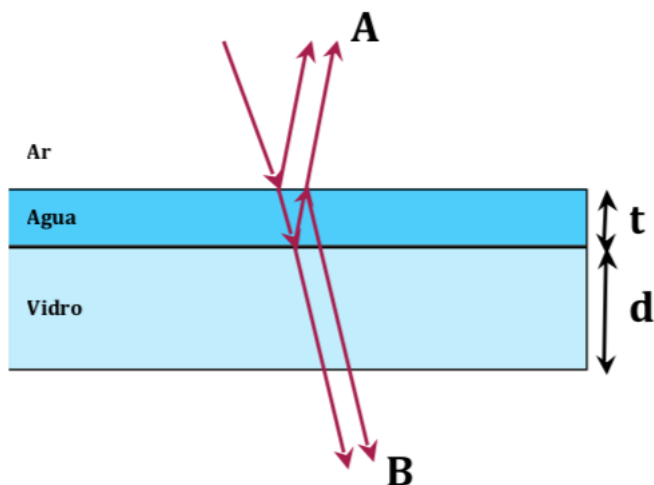
(b) 2,67 mm

~~(c)~~ 1,33 mm

(d) 0,17 mm

(e) 1,00 mm

7. Um feixe de luz monocromático possui frequência de $0,5 \times 10^{15}$ Hz, parte do ar e incide quase perpendicularmente em um filete de água, de espessura t , conforme a figura. Os índices de refração dos materiais são $n_{ar} = 1$ (ar), $n_{água} = 1,2$ (água) e $n_{vidro} = 1,5$ (vidro). A espessura do vidro vale $d = 3$ cm e a figura está fora de escala. Determine o menor valor não nulo para a espessura do filete de água t para que os feixes em A interfiram destrutivamente.



- (a) 150 nm
(b) 100 nm
(c) 300 nm
(d) 255 nm
(e) 125 nm

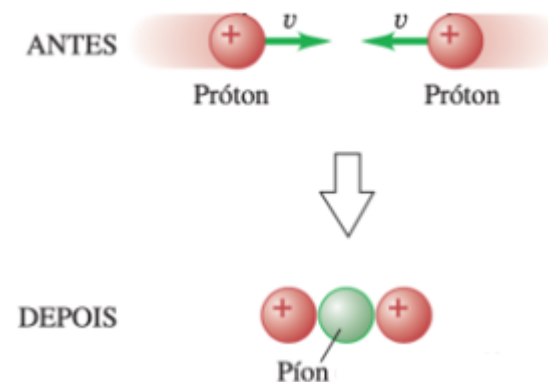
Seção 2. Questões discursivas ($1 \times 2,6 + 1 \times 2,5 = 5,1$)

1. [2,6 pontos]

Dois prótons (cada um com massa m_p) estão se movendo inicialmente com velocidades de módulos iguais e sentidos opostos. Depois da colisão eles continuam a existir, porém ocorre a produção de um pión neutro de massa m_π . Supondo que todas as três partículas permanecem em

repouso depois da colisão, determine, em função dos dados do problema e de constantes fundamentais da natureza:

- (a) O fator de Lorentz γ associado a cada próton antes da colisão.
(b) Calcule a energia cinética de cada próton antes da colisão.



2. [2,5 pontos]

Um feixe de luz monocromática incide normalmente sobre um anteparo com duas fendas paralelas e idênticas, cada uma com largura $a = 1,0 \mu\text{m}$, separadas por uma distância $d = 3,0 \mu\text{m}$. As fendas e a região entre o anteparo e a tela estão imersas em um meio homogêneo e transparente com índice de refração $n = 1,5$. A luz transmitida pelas fendas atinge uma tela colocada a uma distância $L = 10,0$ cm do anteparo. Observa-se que a distância entre os primeiros mínimos laterais no padrão de intensidade (decorrentes da difração por fenda única) é de 10 cm na tela.

- (a) Determine o comprimento de onda da luz.
(b) Determine o comprimento de onda dessa onda eletromagnética no vácuo.
(c) Com base nos dados obtidos, determine quantos máximos de interferência se encontram entre os dois primeiros mínimos de difração (isto é, dentro do envelope principal de difração).



Formulário

CONSTANTES NUMÉRICAS

$\mu_0 = 1 \times 10^{-6}$ H/m; $\varepsilon_0 = (1/9) \times 10^{-10}$ F/m; $c = 3 \times 10^8$ m/s; $h = 6 \times 10^{-34}$ J · s;
 $h = 3 \times 10^{-15}$ eV · s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV · nm; $e = 2 \times 10^{-19}$ C; 1 eV =
 2×10^{-19} J; 1 J = 5×10^{18} eV; $m_p c^2 = 1000$ MeV; $m_e c^2 = 0,5$ MeV; $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m;
 1 nm = 10^{-9} m; $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m; 1 pm = 10^{-12} m; 1 GeV = 10^3 MeV = 10^9 eV;
 $\lambda_c = 1,8$ pm; $E_1 = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_0 a_0} = -25$ eV; $a_0 = \frac{\hbar^2 \varepsilon_0}{\pi m_e e^2} = (9/\pi) \times 10^{-11}$ m; $\sin(30^\circ) = 1/2$;
 $\sin(45^\circ) = \sqrt{2}/2$; $\sin(60^\circ) = \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

$\text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; $\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; $\text{div } \mathbf{B} = 0$; $\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$;
 $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \times \mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0 E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$;
 $I = I_0 \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2 \left[\frac{\sin(N\phi/2)}{N\sin(\phi/2)} \right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta)$;
 $\sin(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; $\sin(\theta_m^{(d)}) = (m + n/N)(\lambda/d)$; $\sin(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$;
 $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1,22\lambda}{D}$; $\langle \sin^2 \theta \rangle = 1/2$; $E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$; $\frac{u}{c} = \frac{pc}{E}$;
 $E = K + m_0 c^2 = \gamma m_0 c^2$; $p = \gamma m_0 u$; $\gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$; $x = \gamma(x' + ut')$;
 $t = \gamma(t' + \frac{ux'}{c^2})$; $v_x = \frac{v'_x + u}{1 + (v'_x u)/c^2}$; $v_y = \frac{v'_y}{\gamma(1 + (v'_x u)/c^2)}$; $p_x = \gamma(p'_x + uE'/c^2)$;
 $E = \gamma(E' + up'_x)$; $p_y = p'_y$; $\lambda_2 - \lambda_1 = \left(\frac{h}{mc} \right) (1 - \cos \theta) = \lambda_c (1 - \cos \theta)$;
 $f = f_0 \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$; $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$; $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$; $L_n = n\hbar$; $r_n = n^2 a_0$; $E_n = \frac{E_1}{n^2}$;
 $E_n = n^2 \hbar^2 / (8mL^2)$; $eV_0 = hf - w$; $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + U(x,t) \Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$;
 $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u(x)}{dx^2} + U(x)u(x) = Eu(x)$; $k_1 = \sqrt{2mE}/\hbar$; $k_2 = \sqrt{2m|E - V|}/\hbar$;
 $R = (\sqrt{E} - \sqrt{E - V})^2 / (\sqrt{E} + \sqrt{E - V})^2$; $T = 1 - R$;
 $\langle x \rangle = (2k_2)^{-1} = \hbar / \sqrt{8m(E - V)}$; $T = [1 + (\frac{V^2}{4E(E - V)}) \sin^2(k_2 L)]^{-1}$; $T = [1 + (\frac{V^2}{4E(V - E)}) \sinh^2(k_2 L)]^{-1}$, $T \simeq \frac{16E(V - E)}{V^2} \exp[-\sqrt{8m(V - E)}L/\hbar]$.

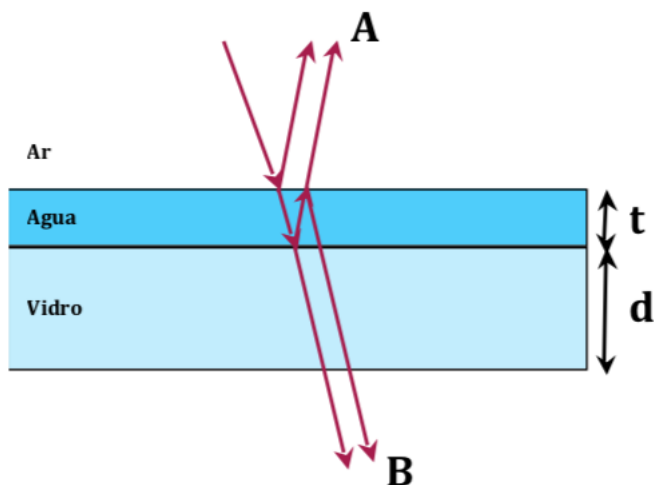
1. Uma partícula de massa m se encontra dentro de uma caixa de potencial infinito e pode ser encontrada entre $0 < x < L$. A função de onda da partícula é dada pelo segundo estado excitado. Uma posição cuja a densidade de probabilidade de encontrar a partícula é nula vale:

- ~~(a)~~ $x = L/3$
(b) $x = L/2$
(c) $x = L/4$
(d) $x = 3L/4$

2. Uma onda plana senoidal possui os seguintes campos elétrico e magnético, respectivamente, $\vec{E} = E_0[(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}] \cos(kz + \omega t)$ e $\vec{B} = B_0[(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}] \cos(kz + \omega t)$. A direção de polarização e o sentido de propagação dessa onda são dados, respectivamente, pelos vetores unitários:

- (a) A onda não é polarizada linearmente.
(b) $(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}$ e $\hat{k}$
(c) $(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}$ e $-\hat{k}$
(d) $(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}$ e $\hat{k}$
~~(e)~~ $(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}$ e $-\hat{k}$

3. Um feixe de luz monocromático possui frequência de $0,5 \times 10^{15}$ Hz, parte do ar e incide quase perpendicularmente em um filete de água, de espessura t , conforme a figura. Os índices de refração dos materiais são $n_{ar} = 1$ (ar), $n_{água} = 1,2$ (água) e $n_{vidro} = 1,5$ (vidro). A espessura do vidro vale $d = 3$ cm e a figura está fora de escala. Determine o menor valor não nulo para a espessura do filete de água t para que os feixes em A interfiram destrutivamente.



- (a) 150 nm
- (b) 100 nm
- (c) 300 nm
- (d) 255 nm
- ~~(e) 125 nm~~

4. Num espalhamento Compton de um fóton por uma partícula livre em repouso, o fóton é espalhado de 45° em relação à trajetória retilínea inicial do fóton incidente. Considere o comprimento de onda inicial do fóton λ enquanto o comprimento de onda do fóton espalhado vale 3λ . Determine a massa de repouso da partícula.

- (a) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{2-\sqrt{3}}{2} \right)$
- (b) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{1}{2} \right)$
- ~~(c) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{2-\sqrt{2}}{4} \right)$~~
- (d) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{3-\sqrt{2}}{4} \right)$
- (e) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{1-\sqrt{2}}{3} \right)$

5. Um feixe de luz monocromático incide sobre uma fenda simples de largura $a = 0,8$ mm. Em uma tela plana que está a 4 m de distância do anteparo plano que contém a fenda, observa-se que a franja central tem 4,0 mm de largura. Com base nesses dados, determine o comprimento de onda da luz incidente:

- ~~(a) 400 nm~~
- (b) 800 nm
- (c) 200 nm
- (d) 300 nm
- (e) 600 nm

6. Em um experimento de dupla fenda de Young, duas fendas paralelas com 3 mm de distância uma da outra são iluminadas coerentemente com luz verde (500 nm) e com luz violeta (400 nm). Determine a menor distância, em relação ao máximo central na tela, para que a interferência construtiva ocorra para ambas as cores simultaneamente. Considere que a tela de observação está a 2 m do plano das fendas.

- (a) 0,02 mm
- (b) 2,67 mm
- ~~(c) 1,33 mm~~
- (d) 0,17 mm
- (e) 1,00 mm

7. Em relação a um referencial inercial de laboratório L , um fóton de um pulso eletromagnético colide elasticamente com uma partícula de massa de repouso $3m$. Antes da colisão, o fóton possui momento linear $+(3mc)\hat{x}$ enquanto a partícula se move ao longo do eixo x com velocidade negativa e energia total $\sqrt{18}mc^2$. Após a colisão, o fóton é espalhado para o ângulo $\theta = 90^\circ$, em relação à sua trajetória inicial. Qual o vetor momento linear total do sistema após a colisão?

- (a) $\vec{p} = -(3mc)\hat{x}$
- (b) $\vec{p} = (6mc)\hat{x}$
- (c) $\vec{p} = -(2mc)\hat{x}$
- ~~(d) $\vec{p} = \vec{0}$~~
- (e) $\vec{p} = (4mc)\hat{y}$

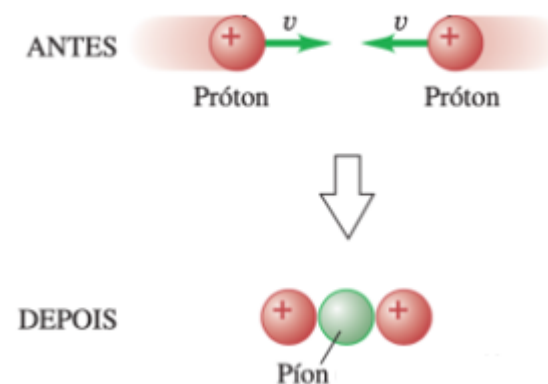
Seção 2. Questões discursivas ($1 \times 2,6 + 1 \times 2,5 = 5,1$)

1. [2,6 pontos]

Dois prótons (cada um com massa m_p) estão se movendo inicialmente com velocidades de módulos iguais e sentidos opostos. Depois da colisão eles continuam a existir, porém ocorre a produção de um pión neutro de massa m_π . Supondo que todas as três partículas permanecem em

repouso depois da colisão, determine, em função dos dados do problema e de constantes fundamentais da natureza:

- (a) O fator de Lorentz γ associado a cada próton antes da colisão.
- (b) Calcule a energia cinética de cada próton antes da colisão.



2. [2,5 pontos]

Um feixe de luz monocromática incide normalmente sobre um anteparo com duas fendas paralelas e idênticas, cada uma com largura $a = 1,0 \mu\text{m}$, separadas por uma distância $d = 3,0 \mu\text{m}$. As fendas e a região entre o anteparo e a tela estão imersas em um meio homogêneo e transparente com índice de refração $n = 1,5$. A luz transmitida pelas fendas atinge uma tela colocada a uma distância $L = 10,0 \text{ cm}$ do anteparo. Observa-se que a distância entre os primeiros mínimos laterais no padrão de intensidade (decorrentes da difração por fenda única) é de 10 cm na tela.

- (a) Determine o comprimento de onda da luz.
- (b) Determine o comprimento de onda dessa onda eletromagnética no vácuo.
- (c) Com base nos dados obtidos, determine quantos máximos de interferência se encontram entre os dois primeiros mínimos de difração (isto é, dentro do envelope principal de difração).



Formulário

CONSTANTES NUMÉRICAS

$\mu_0 = 1 \times 10^{-6}$ H/m; $\varepsilon_0 = (1/9) \times 10^{-10}$ F/m; $c = 3 \times 10^8$ m/s; $h = 6 \times 10^{-34}$ J · s;
 $h = 3 \times 10^{-15}$ eV · s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV · nm; $e = 2 \times 10^{-19}$ C; 1 eV =
 2×10^{-19} J; 1 J = 5×10^{18} eV; $m_p c^2 = 1000$ MeV; $m_e c^2 = 0,5$ MeV; $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m;
 1 nm = 10^{-9} m; $1 \text{Å} = 10^{-10}$ m; 1 pm = 10^{-12} m; 1 GeV = 10^3 MeV = 10^9 eV;
 $\lambda_c = 1,8$ pm; $E_1 = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_0 a_0} = -25$ eV; $a_0 = \frac{h^2 \varepsilon_0}{\pi m_e e^2} = (9/\pi) \times 10^{-11}$ m; $\sin(30^\circ) = 1/2$;
 $\sin(45^\circ) = \sqrt{2}/2$; $\sin(60^\circ) = \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

$\text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; $\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; $\text{div } \mathbf{B} = 0$; $\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$;
 $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \times \mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0 E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$;
 $I = I_0 \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2 \left[\frac{\sin(N\phi/2)}{N\sin(\phi/2)} \right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta)$;
 $\sin(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; $\sin(\theta_m^{(d)}) = (m + n/N)(\lambda/d)$; $\sin(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$;
 $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1,22\lambda}{D}$; $\langle \sin^2 \theta \rangle = 1/2$; $E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$; $\frac{u}{c} = \frac{pc}{E}$;
 $E = K + m_0 c^2 = \gamma m_0 c^2$; $p = \gamma m_0 u$; $\gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$; $x = \gamma(x' + ut')$;
 $t = \gamma(t' + \frac{ux'}{c^2})$; $v_x = \frac{v'_x + u}{1 + (v'_x u)/c^2}$; $v_y = \frac{v'_y}{\gamma(1 + (v'_x u)/c^2)}$; $p_x = \gamma(p'_x + uE'/c^2)$;
 $E = \gamma(E' + up'_x)$; $p_y = p'_y$; $\lambda_2 - \lambda_1 = \left(\frac{h}{mc}\right)(1 - \cos \theta) = \lambda_c(1 - \cos \theta)$;
 $f = f_0 \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$; $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$; $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$; $L_n = n\hbar$; $r_n = n^2 a_0$; $E_n = \frac{E_1}{n^2}$;
 $E_n = n^2 \hbar^2/(8mL^2)$; $eV_0 = hf - w$; $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + U(x,t)\Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$;
 $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u(x)}{dx^2} + U(x)u(x) = Eu(x)$; $k_1 = \sqrt{2mE}/\hbar$; $k_2 = \sqrt{2m|E - V|}/\hbar$;
 $R = (\sqrt{E} - \sqrt{E - V})^2/(\sqrt{E} + \sqrt{E - V})^2$; $T = 1 - R$;
 $\langle x \rangle = (2k_2)^{-1} = \hbar/\sqrt{8m(E - V)}$; $T = [1 + (\frac{V^2}{4E(E - V)})\sin^2(k_2 L)]^{-1}$;
 $T = [1 + (\frac{V^2}{4E(E - V)})\text{senh}^2(k_2 L)]^{-1}$, $T \simeq \frac{16E(V - E)}{V^2} \exp[-\sqrt{8m(V - E)}L/\hbar]$.

1. Uma partícula de massa m se encontra dentro de uma caixa de potencial infinito e pode ser encontrada entre $0 < x < L$. A função de onda da partícula é dada pelo segundo estado excitado. Uma posição cuja a densidade de probabilidade de encontrar a partícula é nula vale:

- ~~(a)~~ $x = L/3$
(b) $x = L/2$
(c) $x = L/4$
(d) $x = 3L/4$

2. Num espalhamento Compton de um fóton por uma partícula livre em repouso, o fóton é espalhado de 45° em relação à trajetória retilínea inicial do fóton incidente. Considere o comprimento de onda inicial do fóton λ enquanto o comprimento de onda do fóton espalhado vale 3λ . Determine a massa de repouso da partícula.

- (a) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{2 - \sqrt{3}}{2} \right)$
(b) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{1}{2} \right)$
~~(c)~~ $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{2 - \sqrt{2}}{4} \right)$
(d) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{3 - \sqrt{2}}{4} \right)$
(e) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{1 - \sqrt{2}}{3} \right)$

3. Uma onda plana senoidal possui os seguintes campos elétrico e magnético, respectivamente, $\vec{E} = E_0[(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}] \cos(kz + \omega t)$ e $\vec{B} = B_0[(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}] \cos(kz + \omega t)$. A direção de polarização e o sentido de propagação dessa onda são dados, respectivamente, pelos vetores unitários:

- (a) A onda não é polarizada linearmente.
(b) $(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}$ e $\hat{k}$
(c) $(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}$ e $-\hat{k}$
(d) $(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}$ e $\hat{k}$
~~(e)~~ $(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}$ e $-\hat{k}$

4. Um feixe de luz monocromático incide sobre uma fenda simples de largura $a = 0,8$ mm. Em uma tela plana que está a 4 m de distância do anteparo plano que contém a fenda, observa-se que a franja central tem 4,0 mm de largura. Com base nesses dados, determine o comprimento de onda da luz incidente:

- ~~(a)~~ 400 nm
- (b) 800 nm
- (c) 200 nm
- (d) 300 nm
- (e) 600 nm

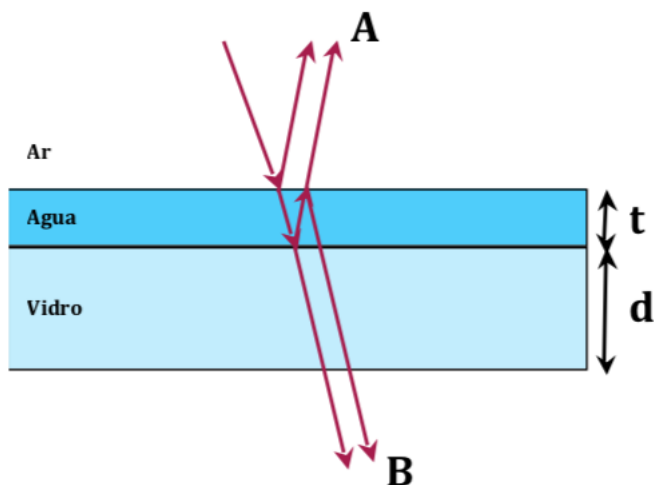
5. Em relação a um referencial inercial de laboratório L , um fóton de um pulso eletromagnético colide elasticamente com uma partícula de massa de repouso $3m$. Antes da colisão, o fóton possui momento linear $+(3mc)\hat{x}$ enquanto a partícula se move ao longo do eixo x com velocidade negativa e energia total $\sqrt{18}mc^2$. Após a colisão, o fóton é espalhado para o ângulo $\theta = 90^\circ$, em relação à sua trajetória inicial. Qual o vetor momento linear total do sistema após a colisão?

- (a) $\vec{p} = -(3mc)\hat{x}$
- (b) $\vec{p} = (6mc)\hat{x}$
- (c) $\vec{p} = -(2mc)\hat{x}$
- ~~(d)~~ $\vec{p} = \vec{0}$
- (e) $\vec{p} = (4mc)\hat{y}$

6. Em um experimento de dupla fenda de Young, duas fendas paralelas com 3 mm de distância uma da outra são iluminadas coerentemente com luz verde (500 nm) e com luz violeta (400 nm). Determine a menor distância, em relação ao máximo central na tela, para que a interferência construtiva ocorra para ambas as cores simultaneamente. Considere que a tela de observação está a 2 m do plano das fendas.

- (a) 0,02 mm
- (b) 2,67 mm
- ~~(c)~~ 1,33 mm
- (d) 0,17 mm
- (e) 1,00 mm

7. Um feixe de luz monocromático possui frequência de $0,5 \times 10^{15}$ Hz, parte do ar e incide quase perpendicularmente em um filete de água, de espessura t , conforme a figura. Os índices de refração dos materiais são $n_{ar} = 1$ (ar), $n_{água} = 1,2$ (água) e $n_{vidro} = 1,5$ (vidro). A espessura do vidro vale $d = 3$ cm e a figura está fora de escala. Determine o menor valor não nulo para a espessura do filete de água t para que os feixes em A interfiram destrutivamente.



- (a) 150 nm
- (b) 100 nm
- (c) 300 nm
- (d) 255 nm
- ~~(e) 125 nm~~

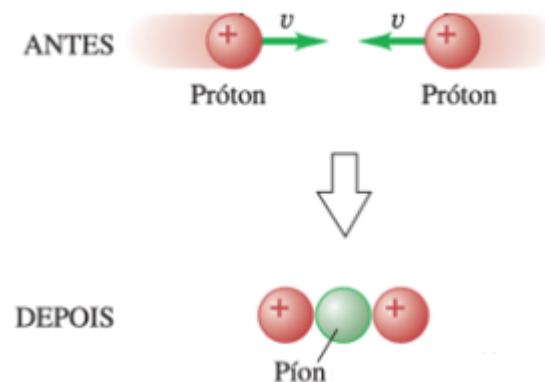
Seção 2. Questões discursivas ($1 \times 2,6 + 1 \times 2,5 = 5,1$)

1. [2,6 pontos]

Dois prótons (cada um com massa m_p) estão se movendo inicialmente com velocidades de módulos iguais e sentidos opostos. Depois da colisão eles continuam a existir, porém ocorre a produção de um pión neutro de massa m_π . Supondo que todas as três partículas permanecem em

repouso depois da colisão, determine, em função dos dados do problema e de constantes fundamentais da natureza:

- (a) O fator de Lorentz γ associado a cada próton antes da colisão.
- (b) Calcule a energia cinética de cada próton antes da colisão.



2. [2,5 pontos]

Um feixe de luz monocromática incide normalmente sobre um anteparo com duas fendas paralelas e idênticas, cada uma com largura $a = 1,0 \mu\text{m}$, separadas por uma distância $d = 3,0 \mu\text{m}$. As fendas e a região entre o anteparo e a tela estão imersas em um meio homogêneo e transparente com índice de refração $n = 1,5$. A luz transmitida pelas fendas atinge uma tela colocada a uma distância $L = 10,0$ cm do anteparo. Observa-se que a distância entre os primeiros mínimos laterais no padrão de intensidade (decorrentes da difração por fenda única) é de 10 cm na tela.

- (a) Determine o comprimento de onda da luz.
- (b) Determine o comprimento de onda dessa onda eletromagnética no vácuo.
- (c) Com base nos dados obtidos, determine quantos máximos de interferência se encontram entre os dois primeiros mínimos de difração (isto é, dentro do envelope principal de difração).



Formulário

CONSTANTES NUMÉRICAS

$\mu_0 = 1 \times 10^{-6}$ H/m; $\varepsilon_0 = (1/9) \times 10^{-10}$ F/m; $c = 3 \times 10^8$ m/s; $h = 6 \times 10^{-34}$ J · s;
 $h = 3 \times 10^{-15}$ eV · s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV · nm; $e = 2 \times 10^{-19}$ C; 1 eV =
 2×10^{-19} J; 1 J = 5×10^{18} eV; $m_p c^2 = 1000$ MeV; $m_e c^2 = 0,5$ MeV; $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m;
 1 nm = 10^{-9} m; $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m; 1 pm = 10^{-12} m; 1 GeV = 10^3 MeV = 10^9 eV;
 $\lambda_c = 1,8$ pm; $E_1 = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_0 a_0} = -25$ eV; $a_0 = \frac{\hbar^2 \varepsilon_0}{\pi m_e e^2} = (9/\pi) \times 10^{-11}$ m; $\sin(30^\circ) = 1/2$;
 $\sin(45^\circ) = \sqrt{2}/2$; $\sin(60^\circ) = \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

$\text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; $\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; $\text{div } \mathbf{B} = 0$; $\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$;
 $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \times \mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0 E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$;
 $I = I_0 \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2 \left[\frac{\sin(N\phi/2)}{N\sin(\phi/2)} \right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta)$;
 $\sin(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; $\sin(\theta_m^{(d)}) = (m + n/N)(\lambda/d)$; $\sin(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$;
 $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1,22\lambda}{D}$; $\langle \sin^2 \theta \rangle = 1/2$; $E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$; $\frac{u}{c} = \frac{pc}{E}$;
 $E = K + m_0 c^2 = \gamma m_0 c^2$; $p = \gamma m_0 u$; $\gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$; $x = \gamma(x' + ut')$;
 $t = \gamma(t' + \frac{ux'}{c^2})$; $v_x = \frac{v'_x + u}{1 + (v'_x u)/c^2}$; $v_y = \frac{v'_y}{\gamma(1 + (v'_x u)/c^2)}$; $p_x = \gamma(p'_x + uE'/c^2)$;
 $E = \gamma(E' + up'_x)$; $p_y = p'_y$; $\lambda_2 - \lambda_1 = \left(\frac{h}{mc} \right) (1 - \cos \theta) = \lambda_c (1 - \cos \theta)$;
 $f = f_0 \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$; $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$; $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$; $L_n = n\hbar$; $r_n = n^2 a_0$; $E_n = \frac{E_1}{n^2}$;
 $E_n = n^2 \hbar^2 / (8mL^2)$; $eV_0 = hf - w$; $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + U(x,t) \Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$;
 $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u(x)}{dx^2} + U(x)u(x) = Eu(x)$; $k_1 = \sqrt{2mE}/\hbar$; $k_2 = \sqrt{2m|E - V|}/\hbar$;
 $R = (\sqrt{E} - \sqrt{E - V})^2 / (\sqrt{E} + \sqrt{E - V})^2$; $T = 1 - R$;
 $\langle x \rangle = (2k_2)^{-1} = \hbar / \sqrt{8m(E - V)}$; $T = [1 + (\frac{V^2}{4E(E - V)}) \sin^2(k_2 L)]^{-1}$; $T = [1 + (\frac{V^2}{4E(V - E)}) \sinh^2(k_2 L)]^{-1}$, $T \simeq \frac{16E(V - E)}{V^2} \exp[-\sqrt{8m(V - E)}L/\hbar]$.

1. Em um experimento de dupla fenda de Young, duas fendas paralelas com 3 mm de distância uma da outra são iluminadas coerentemente com luz verde (500 nm) e com luz violeta (400 nm). Determine a menor distância, em relação ao máximo central na tela, para que a interferência construtiva ocorra para ambas as cores simultaneamente. Considere que a tela de observação está a 2 m do plano das fendas.

- (a) 0,02 mm
(b) 2,67 mm
~~(c) 1,33 mm~~
(d) 0,17 mm
(e) 1,00 mm

2. Um feixe de luz monocromático incide sobre uma fenda simples de largura $a = 0,8$ mm. Em uma tela plana que está a 4 m de distância do anteparo plano que contém a fenda, observa-se que a franja central tem 4,0 mm de largura. Com base nesses dados, determine o comprimento de onda da luz incidente:

- ~~(a) 400 nm~~
(b) 800 nm
(c) 200 nm
(d) 300 nm
(e) 600 nm

3. Uma partícula de massa m se encontra dentro de uma caixa de potencial infinito e pode ser encontrada entre $0 < x < L$. A função de onda da partícula é dada pelo segundo estado excitado. Uma posição cuja a densidade de probabilidade de encontrar a partícula é nula vale:

- ~~(a) $x = L/3$~~
(b) $x = L/2$
(c) $x = L/4$
(d) $x = 3L/4$

4. Em relação a um referencial inercial de laboratório L , um fóton de um pulso eletromagnético colide elasticamente com uma partícula de massa de repouso $3m$. Antes da colisão, o fóton possui momento linear $+(3mc)\hat{x}$ enquanto a partícula se move ao longo do eixo x com velocidade negativa e energia total $\sqrt{18}mc^2$. Após a colisão, o fóton é espalhado para o ângulo $\theta = 90^\circ$, em relação à sua trajetória inicial. Qual o vetor momento linear total do sistema após a colisão?

(a) $\vec{p} = -(3mc)\hat{x}$

(b) $\vec{p} = (6mc)\hat{x}$

(c) $\vec{p} = -(2mc)\hat{x}$

~~(d) $\vec{p} = \vec{0}$~~

(e) $\vec{p} = (4mc)\hat{y}$

5. Uma onda plana senoidal possui os seguintes campos elétrico e magnético, respectivamente, $\vec{E} = E_0[(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}] \cos(kz + \omega t)$ e $\vec{B} = B_0[(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}] \cos(kz + \omega t)$. A direção de polarização e o sentido de propagação dessa onda são dados, respectivamente, pelos vetores unitários:

(a) A onda não é polarizada linearmente.

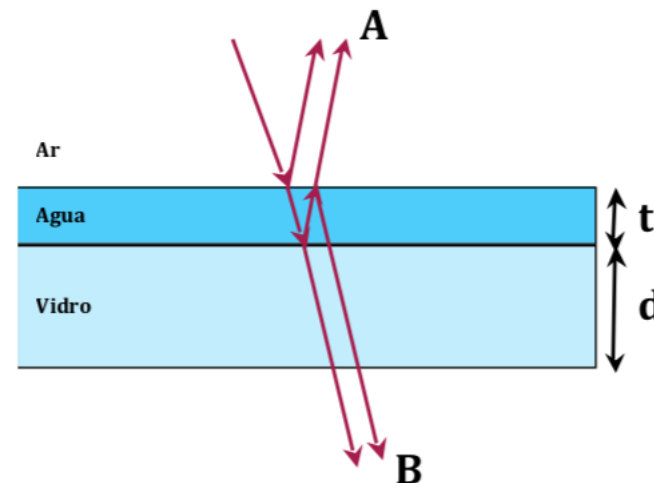
(b) $(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}$ e $\hat{k}$

(c) $(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}$ e $-\hat{k}$

(d) $(2\hat{i} - \hat{j})/\sqrt{5}$ e $\hat{k}$

~~(e) $(\hat{i} + 2\hat{j})/\sqrt{5}$ e $-\hat{k}$~~

6. Um feixe de luz monocromático possui frequência de $0,5 \times 10^{15}$ Hz, parte do ar e incide quase perpendicularmente em um filete de água, de espessura t , conforme a figura. Os índices de refração dos materiais são $n_{ar} = 1$ (ar), $n_{água} = 1,2$ (água) e $n_{vidro} = 1,5$ (vidro). A espessura do vidro vale $d = 3$ cm e a figura está fora de escala. Determine o menor valor não nulo para a espessura do filete de água t para que os feixes em A interfiram destrutivamente.



(a) 150 nm

(b) 100 nm

(c) 300 nm

(d) 255 nm

~~(e) 125 nm~~

7. Num espalhamento Compton de um fóton por uma partícula livre em repouso, o fóton é espalhado de 45° em relação à trajetória retilínea inicial do fóton incidente. Considere o comprimento de onda inicial do fóton λ enquanto o comprimento de onda do fóton espalhado vale 3λ . Determine a massa de repouso da partícula.

(a) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{2-\sqrt{3}}{2} \right)$

(b) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{1}{2} \right)$

~~(c) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{2-\sqrt{2}}{4} \right)$~~

(d) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{3-\sqrt{2}}{4} \right)$

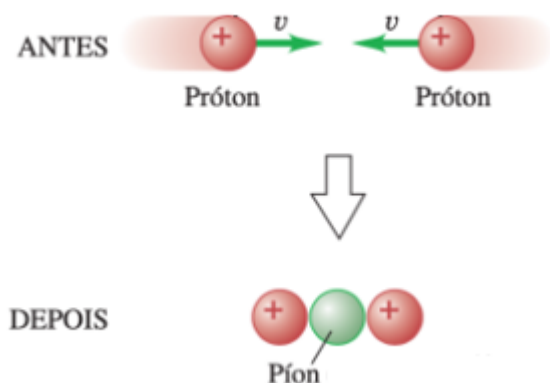
(e) $m_0 = \frac{h}{\lambda c} \left(\frac{1-\sqrt{2}}{3} \right)$

Seção 2. Questões discursivas ($1 \times 2,6 + 1 \times 2,5 = 5,1$)

1. [2,6 pontos]

Dois prótons (cada um com massa m_p) estão se movendo inicialmente com velocidades de módulos iguais e sentidos opostos. Depois da colisão eles continuam a existir, porém ocorre a produção de um pión neutro de massa m_π . Supondo que todas as três partículas permanecem em repouso depois da colisão, determine, em função dos dados do problema e de constantes fundamentais da natureza:

- (a) O fator de Lorentz γ associado a cada próton antes da colisão.
 (b) Calcule a energia cinética de cada próton antes da colisão.



2. [2,5 pontos]

Um feixe de luz monocromática incide normalmente sobre um anteparo com duas fendas paralelas e idênticas, cada uma com largura $a = 1,0 \mu\text{m}$, separadas por uma distância $d = 3,0 \mu\text{m}$. As fendas e a região entre o anteparo e a tela estão imersas em um meio homogêneo e transparente com índice de refração $n = 1,5$. A luz transmitida pelas fendas atinge uma tela colocada a uma distância $L = 10,0 \text{ cm}$ do anteparo. Observa-se que a distância entre os primeiros mínimos laterais no padrão de intensidade (decorrentes da difração por fenda única) é de 10 cm na tela.

- (a) Determine o comprimento de onda da luz.
 (b) Determine o comprimento de onda dessa onda eletromagnética no vácuo.
 (c) Com base nos dados obtidos, determine quantos máximos de interferência se encontram entre os dois primeiros mínimos de difração (isto é, dentro do envelope principal de difração).

$$1) \quad m_p \xrightarrow{u} 2u$$

(a) γ de cada próton antes da colisão

O momento total é zero e a energia deve ser conservada

$$E_{\text{antes}} = E_{\text{depois}}$$

$$E_{\text{antes}} = m_p c^2 \gamma + m_p c^2 \gamma = 2 m_p c^2 \gamma \quad \left| \quad \begin{aligned} 2 m_p c^2 \gamma &= 2 m_p c^2 + m_\pi c^2 \\ 2 m_p \gamma &= 2 m_p + m_\pi \end{aligned} \right.$$

$$E_{\text{depois}} = 2 m_p c^2 + m_\pi c^2$$

$$\Rightarrow \boxed{\gamma = 1 + \frac{m_\pi}{2 m_p}}$$

(b) Energia crítica de cada próton antes da colisão

$$\text{Temos} \quad E = K + m_p c^2 \Rightarrow K = E - m_p c^2$$

$$K = m_p c^2 \gamma - m_p c^2 = m_p c^2 (\gamma - 1)$$

$$K = m_p c^2 (\gamma - 1)$$

$$K = m_p c^2 \left(1 + \frac{m_\pi}{2 m_p} - 1 \right)$$

$$\Rightarrow \boxed{K = \frac{m_\pi c^2}{2}}$$

2)

$$a = 10^{-6} \text{ m}$$

$$d = 3 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$n = 1,5$$

$$L = 0,1 \text{ m}$$

$$a) \quad y_m = \frac{n \lambda L}{a}$$

$$\rightarrow 0,05 = \frac{\lambda \cdot 0,1}{10^{-6}} \rightarrow \lambda = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda = 500 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$b) \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n} \rightarrow \lambda_0 = \lambda n$$

$$\lambda_0 = 500 \times 10^{-9} \times 1,5$$

$$\lambda_0 = 750 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$c) \quad d \sin \theta = m_i \lambda$$

$$a \sin \theta = m_d \lambda$$

$\rightarrow$

$$\frac{d}{a} = \frac{m_i}{m_d}$$

$$\text{Com } \frac{m_i}{m_d} = 1 \rightarrow$$



$$m_i = \frac{d}{a} = \frac{3 \times 10^{-6}}{10^{-6}}$$

$$m_i = 3$$

$$R: 2 + 2 + 1 = 5 \text{ máximas}$$