Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto de Física
Física IV-A – 2024/1 – P1- 13/05/2024
VERSÃO: A

Formulário

CONSTANTES NUMÉRICAS

$\mu_0 = 1\times10^{-6}$ H/m; $\varepsilon_0 = (1/9)\times10^{-10}$ F/m; $c = 3\times10^{8}$ m/s; $h = 6\times10^{-34}$ J $\cdot$ s; $h = 3\times10^{-15}$ eV$\cdot$ s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV$\cdot$ nm; $e = 2\times10^{-19}$ C; 1 eV $= 2\times10^{-19}$ J; 1 J $= 5\times10^{18}$ eV; $m_p c^2 = 1000$ MeV; $m_e c^2 = 0{,}5$ MeV; 1μm $= 10^{-6}$ m; 1 nm $= 10^{-9}$ m; 1 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; $a_0 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m_e e^2} = (9/\pi)\times10^{-11}$ m; $\mathrm{sen}(30^\circ) = 1/2$; $\mathrm{sen}(45^\circ) = \sqrt{2}/2$; $\mathrm{sen}(60^\circ) = \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

$\mathrm{div}\,\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; $\mathrm{rot}\,\mathbf{E} = -\dfrac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; $\mathrm{div}\,\mathbf{B} = 0$; $\mathrm{rot}\,\mathbf{B} = \mu_0\left(\mathbf{J} + \varepsilon_0\dfrac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right)$; $\mathbf{S} = \mathbf{E}\times\mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0\mathbf{E}\times\mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0 E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$; $I = I_0\left[\frac{\mathrm{sen}\,(\beta/2)}{\beta/2}\right]^2\left[\frac{\mathrm{sen}\,(N\phi/2)}{\mathrm{sen}(\phi/2)}\right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}a\,\mathrm{sen}(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}d\,\mathrm{sen}(\theta)$; $\mathrm{sen}(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; $\mathrm{sen}(\theta_m^{(d)}) = (m + n/N)(\lambda/d)$; $\mathrm{sen}(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$; $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1{,}22\lambda}{D}$; $\langle \mathrm{sen}^2\theta\rangle = 1/2$; $\langle \cos^2\theta\rangle = 1/2$; .

Seção 1. Questões objetivas (6×0,7 = 4,2 pontos)

1. Suponha uma onda eletromagnética monocromática de comprimento de onda λ que se desloca no sentido negativo do eixo Ox cujo campo elétrico é dado por $\vec{E}(x,t) = \hat{y}E_{max}\cos(\mathrm{kx} + \omega\mathrm{t})$. Após a reflexão desta onda na superfície de um condutor colocado sobre o plano yz, ocorre superposição desta onda incidente com a onda refletida, gerando uma onda estacionária. O menor valor de x **diferente de zero** que corresponde a um plano nodal de $\vec{E}$, isto é, um plano para o qual $\vec{E} = 0$, é dado por:

   (a) λ
   (b) $\lambda/2$
   (c) $3\lambda/2$
   (d) 4λ
   (e) $\lambda/4$

2. As paredes de uma bolha de sabão têm aproximadamente o mesmo índice de refração da água ($n \approx 1,3$). Há ar dentro e fora da bolha. Qual é o comprimento de onda (no ar) da luz visível que é mais fortemente refletida de um ponto da bolha de sabão que tem espessura da parede igual a $300\,nm$?

   (a) $400\,nm \le \lambda < 450\,nm$
   (b) $450\,nm \le \lambda < 500\,nm$
   (c) $500\,nm \le \lambda < 550\,nm$
   (d) $550\,nm \le \lambda < 600\,nm$
   (e) $600\,nm \le \lambda < 650\,nm$

3. Dois polarizadores, P1 e P2, estão alinhados um à frente do outro. Os ângulos do eixo de transmissão da radiação de P1 e P2 são, respectivamente, 60^o e 30^o, em relação à linha vertical. Um terceiro polarizador com eixo de transmissão na direção vertical é posicionado atrás de P2. Se a luz solar incide em P1 com intensidade I_0, qual a intensidade final do feixe de luz após atravessar P3?

   (a) $3I_0/4$
   (b) 0
   (c) $9I_0/16$
   (d) $9I_0/32$

4. Uma onda eletromagnética plana que se propaga no vácuo no sentido positivo do eixo x tem componentes $E_x = E_y = 0$ e $E_z = 3,0\,\mathrm{sen}(2\pi \mathrm{x} - \mathrm{t})\mathrm{V/m}$. Qual das alternativas abaixo indica corretamente o comprimento de onda, a amplitude B_0 do campo magnético e sua direção quando o campo elétrico associado à onda aponta no sentido positivo do eixo z?

   (a) $\lambda = 1$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{y}$
   (b) $\lambda = 2$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{z}$
   (c) $\lambda = 1$ m; $B_0 = 3,0$ T; $-\hat{x}$
   (d) $\lambda = 3$ m; $B_0 = 3,0$ T; $-\hat{y}$
   (e) $\lambda = 3$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{y}$

5. Em um experimento sobre reflexão e refração com luz linearmente polarizada incidindo numa superfície plana de vidro, verifica-se que a luz incidente é totalmente refratada quando posicionada no ângulo $\theta = 56^o$, formado com a direção normal à superfície do vidro. Podemos dizer que:

   (a) A polarização da onda incidente é paralela à superfície da interface entre os dois meios.
   (b) A luz refratada é elipticamente polarizada.
   (c) A luz refratada é circularmente polarizada.
   (d) A polarização incidente é paralela ao plano de incidência da luz.

6. Suponha que você ilumina duas fendas finas com luz coerente monocromática no ar e encontra o primeiro mínimo de interferência num ângulo α acima do máximo central. Você então repete o experimento com as fendas imersas em um líquido transparente e encontra o primeiro mínimo de interferência agora em um ângulo $0,65\,\alpha$ acima do máximo central. Considerando pequenos ângulos, qual é o índice de refração do líquido?

   (a) $1,48 \leq n < 1,52$
   (b) $1,52 \leq n < 1,56$
   (c) $1,56 \leq n < 1,60$
   (d) $1,60 \leq n < 1,64$

Seção 2. Questões VF (2×0,8 = 1,6 pontos). Questões discursivas (1× 2,0 + 1× 2,2 = 4,2)

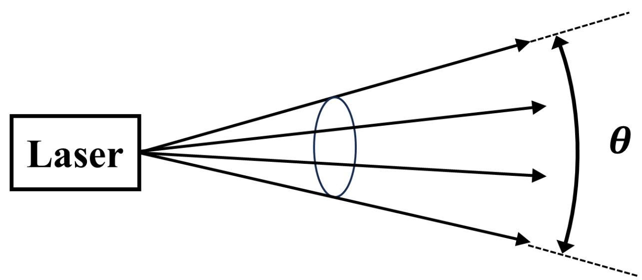
1. [1,6 pontos] Avalie as afirmativas abaixo e diga se são verdadeiras V, ou falsas F. Todas as respostas devem apresentar justificativas.

   Resposta: [0,2 ponto]; justificativa: [0,6 ponto].

   [(a)] [0,8 ponto] Ao incidir numa placa de vidro de espessura d, fazendo um ângulo θ com a direção normal, um raio luminoso propagando no ar sofre uma translação, sem alterar a sua inclinação ao sair da placa.

   [(b)] [0,8 ponto] Onda plana monocromática de comprimento de onda $\lambda = 0,5\,\mu m$ ilumina uma rede de difração contendo $N = 800\,\mathrm{linhas/mm}$. Apenas dois máximos de difração são observados à esquerda do máximo central.

2. [2,0 pontos]
   Considere um laser de hélio-neônio cuja potência é P. O feixe é cônico com ângulo de divergência $\theta = 0,1\,rad$, conforme mostrado na figura abaixo. Considere $\theta \ll 1$.



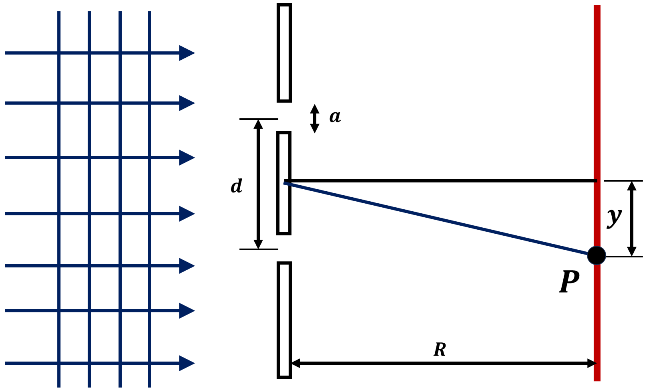
   Suponha que um anteparo circular de superfície totalmente refletora e diâmetro D é posicionado a uma distância D da saída do laser, perpendicularmente ao eixo do cone de luz e com o centro sobre o eixo.

   (a) [0,6 ponto] Considerando que a intensidade I do laser é uniforme, encontre uma expressão para I a uma distância D da saída do laser.

   (b) [0,6 ponto] Encontre uma expressão para a pressão de radiação p_r exercida pelo feixe à distância D da saída do laser.

   (c) [0,8 ponto] Encontre uma expressão para o módulo da força F média exercida pelo feixe sobre o anteparo.

3. [2,2 pontos]
   Considere o padrão de difração formado pela passagem de uma onda



plana monocromática por duas fendas de largura a separadas por uma distância d, num anteparo localizado a uma distância R das fendas, tal que $R \gg a$ e $R \gg d$, como mostrado na figura abaixo.

(a) [0,6 ponto] Para quais valores de y são observados os mínimos de difração?

(b) [0,6 ponto] Para quais valores de y são observados os máximos de interferência?

(c) [1,0 ponto] Qual é a razão entre a largura e a distância entre as fendas (a/d) de modo que o quarto máximo de interferência à direita do máximo central coincida com o primeiro mínimo de difração? Faça um esboço do padrão de intensidade observado no anteparo em função de y.

4.

Gabarito para Versão $\boxed{\text{A}}$

Seção 1. Questões objetivas (6×0,7 = 4,2 pontos)

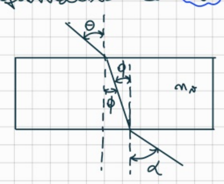
1. (b)
2. (c)
3. (d)
4. (a)
5. (d)
6. (b)

Seção 2. Questões VF (2×0,8 = 1,6 pontos). Questões discursivas (1× 2,0 + 1× 2,2 = 4,2)

1. **Resolução:**

(a)

A afirmativa é V.



Temos:

$n_{ar} \operatorname{sen}\theta = n_v \operatorname{sen}\phi$

$n_v \operatorname{sen}\phi = n_{ar} \operatorname{sen}\alpha$

juntando as duas equações:

$\cancel{n_{ar}} \operatorname{sen}\theta = \cancel{n_{ar}} \operatorname{sen}\alpha$

$\operatorname{sen}\theta = \operatorname{sen}\alpha$

$\theta = \alpha$

O feixe é desviado sem alterar sua inclinação.

(b)

A afirmativa é V.

Temos que, para uma rede de difração os máximos são dados por:

$d \operatorname{sen}\theta = m\lambda$, $m = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$

Assim:

$d \operatorname{sen}\frac{\pi}{2} \geq m_{max}\lambda$

$m_{max} \leq \frac{d}{\lambda}$,

onde m_{max} é a maior ordem de um máximo observado com a rede de difração.

Temos também que:

1 linha → d

N linhas → 1 mm

$d = \frac{1}{N}$ mm

$d = \frac{1}{800}$ mm

$d = \frac{1}{8} \times 10^{-2} \times 10^{-3}$ m

$d = \frac{1}{8} \times 10^{-5}$ m

Assim:

$m_{max} \leq \frac{\frac{1}{8} \times 10^{-5}\,m}{0{,}5 \times 10^{-6}\,m}$

$m_{max} \leq \frac{1}{4} \times 10$

$m_{max} \leq 2{,}5$

■

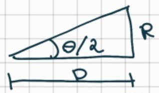
2. **Resolução:**

(a)

(b)

(c)

a) A uma distância D da saída do laser o raio R do feixe é dado por:



$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{R}{D} \; ; \quad R = D\tan\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

assim:

$$I = \frac{P}{\pi R^2} = \frac{P}{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$I = \frac{P}{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

p/ $\theta << 1$

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cong \left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{0,1}{2} \text{ rad}$$

$$I = \frac{P}{\pi D^2 \times \left(\frac{0,1}{2}\right)^2}$$

$$I = \frac{400\,P}{\pi D^2}$$

■

3. **Resolução:**
   (a)
   (b)
   (c)
   ■

4. **Resolução:**

b) A pressão de radiação no anteparo totalmente refletor é dada por:

$$P_r = \frac{2I}{c},$$

$$P_r = \frac{800\,P}{\pi D^2 c}$$

c) A distância D da saída do laser o raio do feixe é:

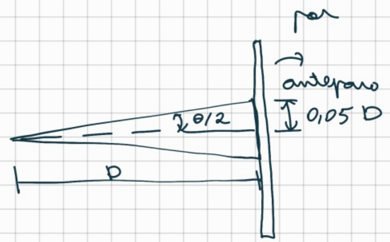
$$R = D\tan\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

para $\theta << 1$;

$$R = D\frac{\theta}{2} = \left(\frac{0,1}{2}\right)D = 0{,}05D$$

A força média exercida pelo feixe é dada

$$F = P_r\,A$$



Como a área do anteparo é maior que a área do feixe à distância D da saída do laser,

$$F = P_r\,\pi R^2$$

$$F = \frac{2P}{c\,\cancel{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}} \cdot \cancel{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$F = \frac{2P}{c}$$

a) Os mínimos de difração são observados p/ :

$$a \operatorname{sen} \theta_m = m \lambda$$

$$m = \{\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\}$$

$$a \frac{y_m}{R} = m\lambda$$

$$y_m = m \left(\frac{\lambda R}{a}\right)$$

$$m = \{\pm 1, \pm 2, \dots\}$$

b) Os máximos de interferência são observados para :

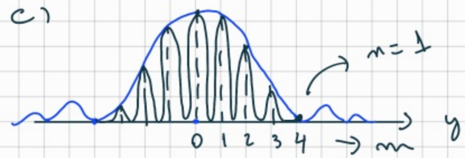
$$d \operatorname{sen} \theta_m = m \lambda \; ; \; m = \{0, \pm 1, \dots\}$$

$$\boxed{d \frac{y_m}{R} = m\lambda}$$

$$y_m = m \left(\frac{R\lambda}{d}\right)$$

$$m = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$$

c)



Para que o 4º máximo de interferência (m=4) coincida com o primeiro mínimo de difração devemos ter:

$$y_{m=4} = y_{m=1}$$

$$4\left(\frac{\cancel{R}\cancel{\lambda}}{d}\right) = \cancel{\lambda}\left(\frac{\cancel{R}}{a}\right)$$

ou seja: $d = 4a$

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto de Física
Física IV-A – 2024/1 – P1- 13/05/2024
VERSÃO: B

Formulário

CONSTANTES NUMÉRICAS

$\mu_0 = 1\times10^{-6}$ H/m; $\varepsilon_0 = (1/9)\times10^{-10}$ F/m; $c = 3\times10^8$ m/s; $h = 6\times10^{-34}$ J · s; $h = 3\times10^{-15}$ eV· s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV· nm; $e = 2\times10^{-19}$ C; 1 eV = 2×10^{-19} J; 1 J = 5×10^{18} eV; $m_pc^2 = 1000$ MeV; $m_ec^2 = 0{,}5$ MeV; 1μm = 10^{-6} m; 1 nm = 10^{-9} m; 1 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; $a_0 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m_e e^2} = (9/\pi)\times10^{-11}$ m; $\mathrm{sen}(30^\circ) = 1/2$; $\mathrm{sen}(45^\circ) = \sqrt{2}/2$; $\mathrm{sen}(60^\circ) = \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

$\mathrm{div}\,\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; $\mathrm{rot}\,\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; $\mathrm{div}\,\mathbf{B} = 0$; $\mathrm{rot}\,\mathbf{B} = \mu_0\left(\mathbf{J} + \varepsilon_0\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right)$; $\mathbf{S} = \mathbf{E}\times\mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0\mathbf{E}\times\mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$; $I = I_0\left[\frac{\mathrm{sen}\,(\beta/2)}{\beta/2}\right]^2\left[\frac{\mathrm{sen}\,(N\phi/2)}{\mathrm{sen}(\phi/2)}\right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}a\mathrm{sen}(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}d\mathrm{sen}(\theta)$; $\mathrm{sen}(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; $\mathrm{sen}(\theta_m^{(d)}) = (m + n/N)(\lambda/d)$; $\mathrm{sen}(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$; $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1{,}22\lambda}{D}$; $\langle \mathrm{sen}^2\theta\rangle = 1/2$; $\langle \cos^2\theta\rangle = 1/2$; .

Seção 1. Questões objetivas (6×0,7 = 4,2 pontos)

1. Suponha que você ilumina duas fendas finas com luz coerente monocromática no ar e encontra o primeiro mínimo de interferência num ângulo α acima do máximo central. Você então repete o experimento com as fendas imersas em um líquido transparente e encontra o primeiro mínimo de interferência agora em um ângulo $0,65\,\alpha$ acima do máximo central. Considerando pequenos ângulos, qual é o índice de refração do líquido?

   (a) $1,48 \le n < 1,52$
   (b) $1,52 \le n < 1,56$
   (c) $1,56 \le n < 1,60$
   (d) $1,60 \le n < 1,64$

2. As paredes de uma bolha de sabão têm aproximadamente o mesmo índice de refração da água ($n \approx 1,3$). Há ar dentro e fora da bolha. Qual é o comprimento de onda (no ar) da luz visível que é mais fortemente refletida de um ponto da bolha de sabão que tem espessura da parede igual a $300\,nm$?

   (a) $400\,nm \le \lambda < 450\,nm$
   (b) $450\,nm \le \lambda < 500\,nm$
   (c) $500\,nm \le \lambda < 550\,nm$
   (d) $550\,nm \le \lambda < 600\,nm$
   (e) $600\,nm \le \lambda < 650\,nm$

3. Uma onda eletromagnética plana que se propaga no vácuo no sentido positivo do eixo x tem componentes $E_x = E_y = 0$ e $E_z = 3,0\,\mathrm{sen}(2\pi\mathrm{x} - \mathrm{t})$V/m. Qual das alternativas abaixo indica corretamente o comprimento de onda, a amplitude B_0 do campo magnético e sua direção quando o campo elétrico associado à onda aponta no sentido positivo do eixo z?

   (a) $\lambda = 1$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{y}$
   (b) $\lambda = 2$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{z}$
   (c) $\lambda = 1$ m; $B_0 = 3,0$ T; $-\hat{x}$
   (d) $\lambda = 3$ m; $B_0 = 3,0$ T; $-\hat{y}$
   (e) $\lambda = 3$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{y}$

4. Em um experimento sobre reflexão e refração com luz linearmente polarizada incidindo numa superfície plana de vidro, verifica-se que a luz incidente é totalmente refratada quando posicionada no ângulo $\theta = 56^o$, formado com a direção normal à superfície do vidro. Podemos dizer que:

   (a) A polarização da onda incidente é paralela à superfície da interface entre os dois meios.
   (b) A luz refratada é elipticamente polarizada.
   (c) A luz refratada é circularmente polarizada.
   (d) A polarização incidente é paralela ao plano de incidência da luz.

5. Suponha uma onda eletromagnética monocromática de comprimento de onda λ que se desloca no sentido negativo do eixo Ox cujo campo elétrico é dado por $\vec{E}(x,t) = \hat{y}E_{max}\cos(\mathrm{kx} + \omega \mathrm{t})$. Após a reflexão desta onda na superfície de um condutor colocado sobre o plano yz, ocorre superposição desta onda incidente com a onda refletida, gerando uma onda estacionária. O menor valor de x **diferente de zero** que corresponde a um plano nodal de $\vec{E}$, isto é, um plano para o qual $\vec{E} = 0$, é dado por:

   (a) λ
   (b) $\lambda/2$
   (c) $3\lambda/2$
   (d) 4λ
   (e) $\lambda/4$

6. Dois polarizadores, P1 e P2, estão alinhados um à frente do outro. Os ângulos do eixo de transmissão da radiação de P1 e P2 são, respectivamente, 60^o e 30^o, em relação à linha vertical. Um terceiro polarizador com eixo de transmissão na direção vertical é posicionado atrás de P2. Se a luz solar incide em P1 com intensidade I_0, qual a intensidade final do feixe de luz após atravessar P3?

   (a) $3I_0/4$
   (b) 0
   (c) $9I_0/16$
   (d) $9I_0/32$

Seção 2. Questões VF (2×0,8 = 1,6 pontos). Questões discursivas (1× 2,0 + 1× 2,2 = 4,2)

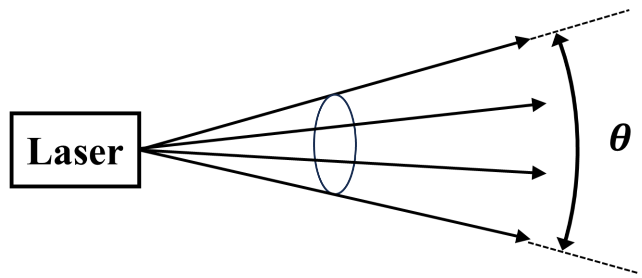
1. [1,6 pontos] Avalie as afirmativas abaixo e diga se são verdadeiras V, ou falsas F. Todas as respostas devem apresentar justificativas.

   Resposta: [0,2 ponto]; justificativa: [0,6 ponto].

   [(a)] [0,8 ponto] Ao incidir numa placa de vidro de espessura d, fazendo um ângulo θ com a direção normal, um raio luminoso propagando no ar sofre uma translação, sem alterar a sua inclinação ao sair da placa.

   [(b)] [0,8 ponto] Onda plana monocromática de comprimento de onda $\lambda = 0,5\,\mu m$ ilumina uma rede de difração contendo $N = 800\,$linhas/mm. Apenas dois máximos de difração são observados à esquerda do máximo central.

2. [2,0 pontos]
   Considere um laser de hélio-neônio cuja potência é P. O feixe é cônico com ângulo de divergência $\theta = 0,1\,rad$, conforme mostrado na figura abaixo. Considere $\theta \ll 1$.



   Suponha que um anteparo circular de superfície totalmente refletora e diâmetro D é posicionado a uma distância D da saída do laser, perpendicularmente ao eixo do cone de luz e com o centro sobre o eixo.

   (a) [0,6 ponto] Considerando que a intensidade I do laser é uniforme, encontre uma expressão para I a uma distância D da saída do laser.

   (b) [0,6 ponto] Encontre uma expressão para a pressão de radiação p_r exercida pelo feixe à distância D da saída do laser.

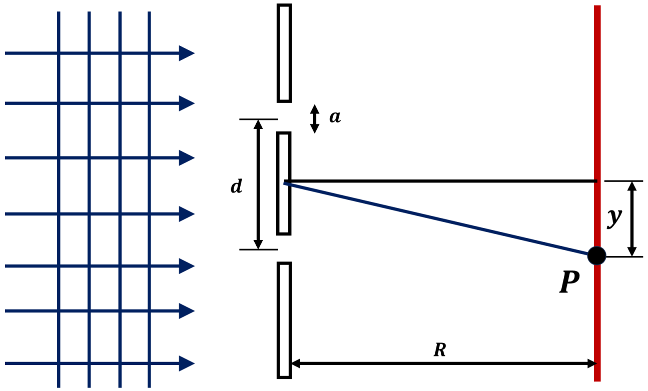
   (c) [0,8 ponto] Encontre uma expressão para o módulo da força F média exercida pelo feixe sobre o anteparo.

3. [2,2 pontos]
   Considere o padrão de difração formado pela passagem de uma onda plana monocromática por duas fendas de largura a separadas por uma distância d, num anteparo localizado a uma distância R das fendas, tal que $R \gg a$ e $R \gg d$, como mostrado na figura abaixo.

   (a) [0,6 ponto] Para quais valores de y são observados os mínimos de difração?

   (b) [0,6 ponto] Para quais valores de y são observados os máximos de interferência?

   (c) [1,0 ponto] Qual é a razão entre a largura e a distância entre as fendas (a/d) de modo que o quarto máximo de interferência à direita do máximo central coincida com o primeiro mínimo de difração? Faça um esboço do padrão de intensidade observado no anteparo em função de y.



4.

Gabarito para Versão $\boxed{\text{B}}$

Seção 1. Questões objetivas (6×0,7 = 4,2 pontos)

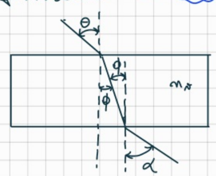
1. (b)
2. (c)
3. (a)
4. (d)
5. (b)
6. (d)

Seção 2. Questões VF (2×0,8 = 1,6 pontos). Questões discursivas (1× 2,0 + 1× 2,2 = 4,2)

1. **Resolução:**

(a)

A afirmativa é V.



Temos:

$n_{ar} \operatorname{sen}\theta = n_v \operatorname{sen}\phi$

$n_v \operatorname{sen}\phi = n_{ar} \operatorname{sen}\alpha$

juntando as duas equações:

$\cancel{n_{ar}} \operatorname{sen}\theta = \cancel{n_{ar}} \operatorname{sen}\alpha$

$\operatorname{sen}\theta = \operatorname{sen}\alpha$

$\theta = \alpha$

O feixe é desviado sem alterar sua inclinação.

(b)

A afirmativa é V.

Temos que, para uma rede de difração os máximos são dados por:

$d \operatorname{sen}\theta = m\lambda$, $m = \{0, \pm 1, \pm 2, ...\}$

Assim:

$d \operatorname{sen}\frac{\pi}{2} \geq m_{max}\lambda$

$m_{max} \leq \frac{d}{\lambda}$,

onde m_{max} é a maior ordem de um máximo observado com a rede de difração.

Temos também que:

1 linha $\rightarrow d$

N linhas $\rightarrow$ 1 mm

$d = \frac{1}{N}$ mm m^{-1}

$d = \frac{1}{800}$ mm m^{-1}

$d = \frac{1}{8} \times 10^{-2} \times 10^{-3}$ m

$d = \frac{1}{8} \times 10^{-5}$ m .

Assim:

$m_{max} \leq \frac{1}{8} \frac{\times 10^{-5} \text{ m}}{0{,}5 \times 10^{-6} \text{ m}}$

$m_{max} \leq \frac{1}{4} \times 10$

$m_{max} \leq 2{,}5$

■

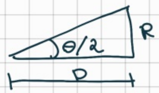
2. **Resolução:**

(a)

(b)

(c)

a) A uma distância D da saída do laser o raio R do feixe é dado por:



$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{R}{D}$; $R = D\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$,

assim:

$$I = \frac{P}{\pi R^2} = \frac{P}{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$I = \frac{P}{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

p/ $\theta << 1$

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cong \left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{0,1}{2} \text{ rad}$$

$$I = \frac{P}{\pi D^2} \times \left(\frac{0,1}{2}\right)^2$$

$$I = \frac{400 P}{\pi D^2}$$

■

3. **Resolução:**
   (a)
   (b)
   (c)
   ■

4. **Resolução:**

b) A pressão de radiação no anteparo totalmente refletor é dada por:

$$p_r = \frac{2I}{c},$$

$$p_r = \frac{800 P}{\pi D^2 c}$$

c) A distância D da saída do laser o raio do feixe é:

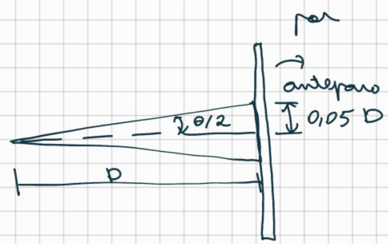
$$R = D\tan\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

para $\theta << 1$;

$$R = D\frac{\theta}{2} = \left(\frac{0,1}{2}\right)D = 0,05D$$

A força média exercida pelo feixe é dada

$$F = p_r A$$



Como a área do anteparo é maior que a área do feixe à distância D da saída do laser,

$$F = p_r \pi R^2$$

$$F = \frac{2P}{c\cancel{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}} \cdot \cancel{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$F = \frac{2P}{c}$$

a) Os mínimos de difração são observados p/ :

$$a \operatorname{sen} \theta_m = n \lambda$$

$$n = \{ \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \}$$

$$a \frac{y_n}{R} = n\lambda$$

$$y_n = n \left(\frac{\lambda R}{a}\right)$$

$$n = \{ \pm 1, \pm 2, \dots \}$$

b) Os máximos de interferência são observados para :

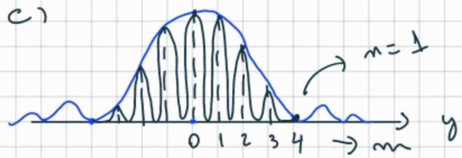
$$d \operatorname{sen} \theta_m = m \lambda \ ; \ m = \{0, \pm 1, \dots\}$$

$$d \frac{y_m}{R} = m\lambda$$

$$y_m = m \left(\frac{R\lambda}{d}\right)$$

$$m = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$$

c)



Para que o 4º máximo de interferência (m = 4) coincida com o primeiro mínimo de difração devemos ter:

$$y_{m=4} = y_{n=1}$$

$$4\left(\frac{\cancel{R}\cancel{\lambda}}{d}\right) = \cancel{\lambda}\left(\frac{\cancel{R}}{a}\right)$$

ou seja: $d = 4a$

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto de Física
Física IV-A – 2024/1 – P1- 13/05/2024
VERSÃO: $\boxed{\text{C}}$

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 $\cdot$ s; $h = 3 \times 10^{-15}$ eV$\cdot$ s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV$\cdot$ nm; $e = 2 \times 10^{-19}$ C; 1 eV $= 2 \times 10^{-19}$ J; 1 J $= 5 \times 10^{18}$ eV; $m_p c^2 = 1000$ MeV; $m_e c^2 = 0{,}5$ MeV; 1μm $= 10^{-6}$ m; 1 nm $= 10^{-9}$ m; 1 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; sen(30°) $= 1/2$; sen(45°) $= \sqrt{2}/2$; sen(60°) $= \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

div $\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; rot $\mathbf{E} = -\dfrac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; div $\mathbf{B} = 0$; rot $\mathbf{B} = \mu_0\left(\mathbf{J} + \varepsilon_0 \dfrac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right)$; $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \times \mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0 E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$; $I = I_0 \left[\frac{\text{sen }(\beta/2)}{\beta/2}\right]^2 \left[\frac{\text{sen }(N\phi/2)}{\text{sen}(\phi/2)}\right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \text{sen}(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \text{sen}(\theta)$; $\text{sen}(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; $\text{sen}(\theta_m^{(d)}) = (m + n/N)(\lambda/d)$; $\text{sen}(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$; $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1{,}22\lambda}{D}$; $\langle \text{sen}^2\theta \rangle = 1/2$; $\langle \cos^2\theta \rangle = 1/2$; .

Seção 1. Questões objetivas (6×0,7 = 4,2 pontos)

1. Em um experimento sobre reflexão e refração com luz linearmente polarizada incidindo numa superfície plana de vidro, verifica-se que a luz incidente é totalmente refratada quando posicionada no ângulo $\theta = 56^o$, formado com a direção normal à superfície do vidro. Podemos dizer que:

   (a) A polarização da onda incidente é paralela à superfície da interface entre os dois meios.

   (b) A luz refratada é elipticamente polarizada.

   (c) A luz refratada é circularmente polarizada.

   (d) A polarização incidente é paralela ao plano de incidência da luz.

2. Suponha uma onda eletromagnética monocromática de comprimento de onda λ que se desloca no sentido negativo do eixo Ox cujo campo elétrico é dado por $\vec{E}(x,t) = \hat{y}E_{max}\cos(\text{kx} + \omega\text{t})$. Após a reflexão desta onda na superfície de um condutor colocado sobre o plano yz, ocorre superposição desta onda incidente com a onda refletida, gerando uma onda estacionária. O menor valor de x **diferente de zero** que corresponde a um plano nodal de $\vec{E}$, isto é, um plano para o qual $\vec{E} = 0$, é dado por:

   (a) λ

   (b) $\lambda/2$

   (c) $3\lambda/2$

   (d) 4λ

   (e) $\lambda/4$

3. Suponha que você ilumina duas fendas finas com luz coerente monocromática no ar e encontra o primeiro mínimo de interferência num ângulo α acima do máximo central. Você então repete o experimento com as fendas imersas em um líquido transparente e encontra o primeiro mínimo de interferência agora em um ângulo $0,65\,\alpha$ acima do máximo central. Considerando pequenos ângulos, qual é o índice de refração do líquido?

   (a) $1,48 \leq n < 1,52$

   (b) $1,52 \leq n < 1,56$

   (c) $1,56 \leq n < 1,60$

   (d) $1,60 \leq n < 1,64$

4. Uma onda eletromagnética plana que se propaga no vácuo no sentido positivo do eixo x tem componentes $E_x = E_y = 0$ e $E_z = 3,0\,\text{sen}(2\pi\text{x} - \text{t})\text{V/m}$. Qual das alternativas abaixo indica corretamente o comprimento de onda, a amplitude B_0 do campo magnético e sua direção quando o campo elétrico associado à onda aponta no sentido positivo do eixo z?

(a) $\lambda = 1$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{y}$

(b) $\lambda = 2$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{z}$

(c) $\lambda = 1$ m; $B_0 = 3,0$ T; $-\hat{x}$

(d) $\lambda = 3$ m; $B_0 = 3,0$ T; $-\hat{y}$

(e) $\lambda = 3$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{y}$

5. As paredes de uma bolha de sabão têm aproximadamente o mesmo índice de refração da água ($n \approx 1,3$). Há ar dentro e fora da bolha. Qual é o comprimento de onda (no ar) da luz visível que é mais fortemente refletida de um ponto da bolha de sabão que tem espessura da parede igual a $300\,nm$?

(a) $400\,nm \le \lambda < 450\,nm$

(b) $450\,nm \le \lambda < 500\,nm$

(c) $500\,nm \le \lambda < 550\,nm$

(d) $550\,nm \le \lambda < 600\,nm$

(e) $600\,nm \le \lambda < 650\,nm$

6. Dois polarizadores, P1 e P2, estão alinhados um à frente do outro. Os ângulos do eixo de transmissão da radiação de P1 e P2 são, respectivamente, 60^o e 30^o, em relação à linha vertical. Um terceiro polarizador com eixo de transmissão na direção vertical é posicionado atrás de P2. Se a luz solar incide em P1 com intensidade I_0, qual a intensidade final do feixe de luz após atravessar P3?

(a) $3I_0/4$

(b) 0

(c) $9I_0/16$

(d) $9I_0/32$

Seção 2. Questões VF (2×0,8 = 1,6 pontos). Questões discursivas (1× 2,0 + 1× 2,2 = 4,2)

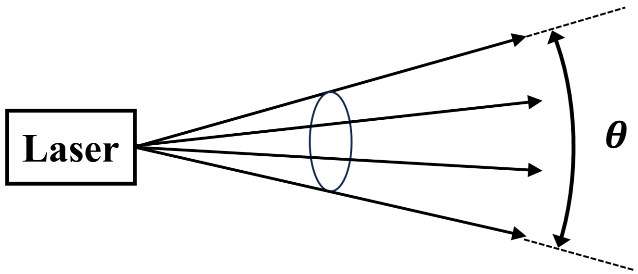
1. [1,6 pontos] Avalie as afirmativas abaixo e diga se são verdadeiras V, ou falsas F. Todas as respostas devem apresentar justificativas.

   Resposta: [0,2 ponto]; justificativa: [0,6 ponto].

   [(a)] [0,8 ponto] Ao incidir numa placa de vidro de espessura d, fazendo um ângulo θ com a direção normal, um raio luminoso propagando no ar sofre uma translação, sem alterar a sua inclinação ao sair da placa.

   [(b)] [0,8 ponto] Onda plana monocromática de comprimento de onda $\lambda = 0,5\,\mu m$ ilumina uma rede de difração contendo $N = 800\,\text{linhas/mm}$. Apenas dois máximos de difração são observados à esquerda do máximo central.

2. [2,0 pontos]
   Considere um laser de hélio-neônio cuja potência é P. O feixe é cônico com ângulo de divergência $\theta = 0,1\,rad$, conforme mostrado na figura abaixo. Considere $\theta \ll 1$.



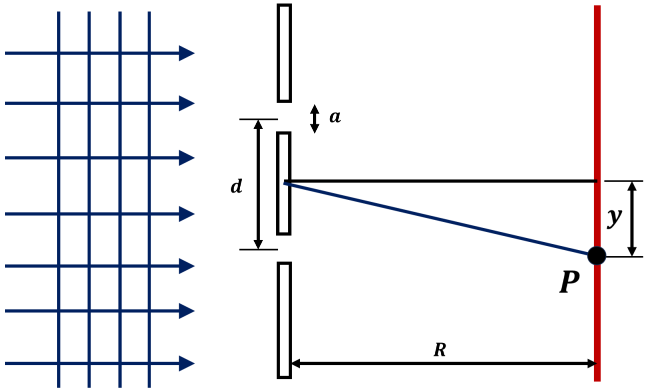
   Suponha que um anteparo circular de superfície totalmente refletora e diâmetro D é posicionado a uma distância D da saída do laser, perpendicularmente ao eixo do cone de luz e com o centro sobre o eixo.

   (a) [0,6 ponto] Considerando que a intensidade I do laser é uniforme, encontre uma expressão para I a uma distância D da saída do laser.

   (b) [0,6 ponto] Encontre uma expressão para a pressão de radiação p_r exercida pelo feixe à distância D da saída do laser.

   (c) [0,8 ponto] Encontre uma expressão para o módulo da força F média exercida pelo feixe sobre o anteparo.

3. [2,2 pontos]
   Considere o padrão de difração formado pela passagem de uma onda



plana monocromática por duas fendas de largura a separadas por uma distância d, num anteparo localizado a uma distância R das fendas, tal que $R \gg a$ e $R \gg d$, como mostrado na figura abaixo.

(a) [0,6 ponto] Para quais valores de y são observados os mínimos de difração?

(b) [0,6 ponto] Para quais valores de y são observados os máximos de interferência?

(c) [1,0 ponto] Qual é a razão entre a largura e a distância entre as fendas (a/d) de modo que o quarto máximo de interferência à direita do máximo central coincida com o primeiro mínimo de difração? Faça um esboço do padrão de intensidade observado no anteparo em função de y.

4.

Gabarito para Versão $\boxed{\text{C}}$

Seção 1. Questões objetivas (6×0,7 = 4,2 pontos)

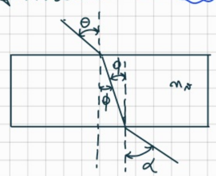
1. (d)
2. (b)
3. (b)
4. (a)
5. (c)
6. (d)

Seção 2. Questões VF (2×0,8 = 1,6 pontos). Questões discursivas (1× 2,0 + 1× 2,2 = 4,2)

1. **Resolução:**

   (a)

   A afirmativa é V.

   Temos:

   $n_{ar} \operatorname{sen} \theta = n_v \operatorname{sen} \phi$

   $n_v \operatorname{sen} \phi = n_{ar} \operatorname{sen} \alpha$

   juntando as duas equações:

   $\cancel{n_{ar}} \operatorname{sen} \theta = \cancel{n_{ar}} \operatorname{sen} \alpha$

   $\operatorname{sen} \theta = \operatorname{sen} \alpha$

   $\theta = \alpha$

   O feixe é desviado sem alterar sua inclinação.

   (b)

   A afirmativa é V.

   Temos que, para uma rede de difração os máximos são dados por:

   $d \operatorname{sen} \theta = m \lambda \quad , \quad m = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$

   Assim:

   $d \operatorname{sen} \frac{\pi}{2} \geq m_{max} \lambda$

   $m_{max} \leq \frac{d}{\lambda}$,

   onde m_{max} é a maior ordem de um máximo observado com a rede de difração.

   Temos também que:

   1 linha → d

   N linhas → 1 mm

   $d = \frac{1}{N} \ mm^{-1}$

   $d = \frac{1}{800} \ mm^{-1}$

   $d = \frac{1}{8} \times 10^{-2} \times 10^{-3} \ m$

   $d = \frac{1}{8} \times 10^{-5} \ m$.

   Assim:

   $m_{max} \leq \frac{1}{8} \frac{\times 10^{-5} \ m}{0{,}5 \times 10^{-6} \ m}$

   $m_{max} \leq \frac{1}{4} \times 10$

   $m_{max} \leq 2{,}5$

   ■

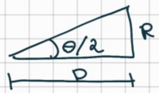
2. **Resolução:**

   (a)

   (b)

   (c)

a) A uma distância D da saída do laser o raio R do feixe é dado por:



$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{R}{D} \; ; \; R = D\tan\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

assim:

$$I = \frac{P}{\pi R^2} = \frac{P}{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$I = \frac{P}{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

p/ $\theta << 1$

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cong \left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{0,1}{2} \text{ rad}$$

$$I = \frac{P}{\pi D^2 \times \left(\frac{0,1}{2}\right)^2}$$

$$I = \frac{400\,P}{\pi D^2}$$

■

3. **Resolução:**
   (a)
   (b)
   (c)
   ■

4. **Resolução:**

b) A pressão de radiação no anteparo totalmente refletor é dada por:

$$P_r = \frac{2I}{c} ,$$

$$P_r = \frac{800\,P}{\pi D^2 c}$$

c) A distância D da saída do laser o raio do feixe é:

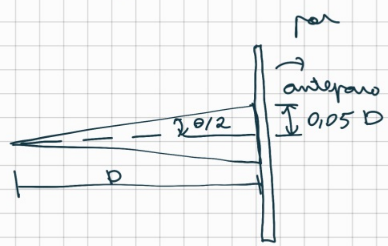
$$R = D\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) ,$$

para $\theta << 1$;

$$R = D\frac{\theta}{2} = \left(\frac{0,1}{2}\right)D = 0,05D$$

A força média exercida pelo feixe é dada

$$F = P_r\, A$$



Como a área do anteparo é maior que a área do feixe à distância D da saída do laser,

$$F = P_r\, \pi R^2$$

$$F = \frac{2P}{c\,\cancel{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}} \cdot \cancel{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$F = \frac{2P}{c}$$

a) Os mínimos de difração são observados p/ :

$$a \operatorname{sen}\theta_m = n\lambda$$

$$n = \{\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\}$$

$$a \frac{y_n}{R} = n\lambda$$

$$y_n = n\left(\frac{\lambda R}{a}\right)$$

$$n = \{\pm 1, \pm 2, \dots\}$$

b) Os máximos de interferência são observados para :

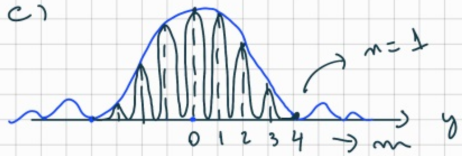
$$d \operatorname{sen}\theta_m = m\lambda \; ; \; m = \{0, \pm 1, \dots\}$$

$$d \frac{y_m}{R} = m\lambda$$

$$y_m = m\left(\frac{R\lambda}{d}\right)$$

$$m = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$$

c)



Para que o 4º máximo de interferência (m = 4) coincida com o primeiro mínimo de difração devemos ter:

$$y_{m=4} = y_{n=1}$$

$$4\left(\frac{\cancel{R}\cancel{\lambda}}{d}\right) = \cancel{\lambda}\left(\frac{\cancel{R}}{a}\right)$$

ou seja: $d = 4a$

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto de Física
Física IV-A – 2024/1 – P1- 13/05/2024
VERSÃO: D

Formulário

CONSTANTES NUMÉRICAS

$\mu_0 = 1\times10^{-6}$ H/m; $\varepsilon_0 = (1/9)\times10^{-10}$ F/m; $c = 3\times10^8$ m/s; $h = 6\times10^{-34}$ J $\cdot$ s; $h = 3\times10^{-15}$ eV$\cdot$ s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV$\cdot$ nm; $e = 2\times10^{-19}$ C; 1 eV $= 2\times10^{-19}$ J; 1 J $= 5\times10^{18}$ eV; $m_pc^2 = 1000$ MeV; $m_ec^2 = 0{,}5$ MeV; 1μm $= 10^{-6}$ m; 1 nm $= 10^{-9}$ m; 1 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; $a_0 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m_e e^2} = (9/\pi)\times10^{-11}$ m; sen$(30^\circ) = 1/2$; sen$(45^\circ) = \sqrt{2}/2$; sen$(60^\circ) = \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

div $\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; rot $\mathbf{E} = -\dfrac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; div $\mathbf{B} = 0$; rot $\mathbf{B} = \mu_0\left(\mathbf{J} + \varepsilon_0\dfrac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right)$; $\mathbf{S} = \mathbf{E}\times\mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0\mathbf{E}\times\mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0 E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$; $I = I_0\left[\frac{\text{sen }(\beta/2)}{\beta/2}\right]^2\left[\frac{\text{sen }(N\phi/2)}{\text{sen}(\phi/2)}\right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}a\,\text{sen}(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}d\,\text{sen}(\theta)$; $\text{sen}(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; $\text{sen}(\theta_m^{(d)}) = (m + n/N)(\lambda/d)$; $\text{sen}(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$; $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1{,}22\lambda}{D}$; $\langle\text{sen}^2\theta\rangle = 1/2$; $\langle\cos^2\theta\rangle = 1/2$; .

Seção 1. Questões objetivas (6×0,7 = 4,2 pontos)

1. As paredes de uma bolha de sabão têm aproximadamente o mesmo índice de refração da água ($n \approx 1,3$). Há ar dentro e fora da bolha. Qual é o comprimento de onda (no ar) da luz visível que é mais fortemente refletida de um ponto da bolha de sabão que tem espessura da parede igual a $300\,nm$?

   (a) $400\,nm \leq \lambda < 450\,nm$
   (b) $450\,nm \leq \lambda < 500\,nm$
   (c) $500\,nm \leq \lambda < 550\,nm$
   (d) $550\,nm \leq \lambda < 600\,nm$
   (e) $600\,nm \leq \lambda < 650\,nm$

2. Suponha que você ilumina duas fendas finas com luz coerente monocromática no ar e encontra o primeiro mínimo de interferência num ângulo α acima do máximo central. Você então repete o experimento com as fendas imersas em um líquido transparente e encontra o primeiro mínimo de interferência agora em um ângulo $0,65\,\alpha$ acima do máximo central. Considerando pequenos ângulos, qual é o índice de refração do líquido?

   (a) $1,48 \leq n < 1,52$
   (b) $1,52 \leq n < 1,56$
   (c) $1,56 \leq n < 1,60$
   (d) $1,60 \leq n < 1,64$

3. Dois polarizadores, P1 e P2, estão alinhados um à frente do outro. Os ângulos do eixo de transmissão da radiação de P1 e P2 são, respectivamente, 60^o e 30^o, em relação à linha vertical. Um terceiro polarizador com eixo de transmissão na direção vertical é posicionado atrás de P2. Se a luz solar incide em P1 com intensidade I_0, qual a intensidade final do feixe de luz após atravessar P3?

   (a) $3I_0/4$
   (b) 0
   (c) $9I_0/16$
   (d) $9I_0/32$

4. Uma onda eletromagnética plana que se propaga no vácuo no sentido positivo do eixo x tem componentes $E_x = E_y = 0$ e $E_z = 3,0\,\text{sen}(2\pi\text{x} - \text{t})$V/m. Qual das alternativas abaixo indica corretamente o comprimento de onda, a amplitude B_0 do campo magnético e sua direção quando o campo elétrico associado à onda aponta no sentido positivo do eixo z?

   (a) $\lambda = 1$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{y}$
   (b) $\lambda = 2$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{z}$
   (c) $\lambda = 1$ m; $B_0 = 3,0$ T; $-\hat{x}$
   (d) $\lambda = 3$ m; $B_0 = 3,0$ T; $-\hat{y}$
   (e) $\lambda = 3$ m; $B_0 = 10^{-8}$ T; $-\hat{y}$

5. Suponha uma onda eletromagnética monocromática de comprimento de onda λ que se desloca no sentido negativo do eixo Ox cujo campo elétrico é dado por $\vec{E}(x,t) = \hat{y}E_{max}\cos(\mathrm{kx} + \omega \mathrm{t})$. Após a reflexão desta onda na superfície de um condutor colocado sobre o plano yz, ocorre superposição desta onda incidente com a onda refletida, gerando uma onda estacionária. O menor valor de x **diferente de zero** que corresponde a um plano nodal de $\vec{E}$, isto é, um plano para o qual $\vec{E} = 0$, é dado por:

   (a) λ
   (b) $\lambda/2$
   (c) $3\lambda/2$
   (d) 4λ
   (e) $\lambda/4$

6. Em um experimento sobre reflexão e refração com luz linearmente polarizada incidindo numa superfície plana de vidro, verifica-se que a luz incidente é totalmente refratada quando posicionada no ângulo $\theta = 56^o$, formado com a direção normal à superfície do vidro. Podemos dizer que:

   (a) A polarização da onda incidente é paralela à superfície da interface entre os dois meios.
   (b) A luz refratada é elipticamente polarizada.
   (c) A luz refratada é circularmente polarizada.
   (d) A polarização incidente é paralela ao plano de incidência da luz.

Seção 2. Questões VF (2×0,8 = 1,6 pontos). Questões discursivas (1× 2,0 + 1× 2,2 = 4,2)

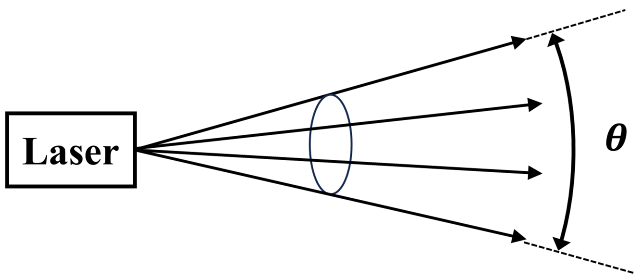
1. [1,6 pontos] Avalie as afirmativas abaixo e diga se são verdadeiras V, ou falsas F. Todas as respostas devem apresentar justificativas.

   Resposta: [0,2 ponto]; justificativa: [0,6 ponto].

   [(a)] [0,8 ponto] Ao incidir numa placa de vidro de espessura d, fazendo um ângulo θ com a direção normal, um raio luminoso propagando no ar sofre uma translação, sem alterar a sua inclinação ao sair da placa.

   [(b)] [0,8 ponto] Onda plana monocromática de comprimento de onda $\lambda = 0,5\,\mu m$ ilumina uma rede de difração contendo $N = 800\,\text{linhas/mm}$. Apenas dois máximos de difração são observados à esquerda do máximo central.

2. [2,0 pontos]
   Considere um laser de hélio-neônio cuja potência é P. O feixe é cônico com ângulo de divergência $\theta = 0,1\,rad$, conforme mostrado na figura abaixo. Considere $\theta \ll 1$.



   Suponha que um anteparo circular de superfície totalmente refletora e diâmetro D é posicionado a uma distância D da saída do laser, perpendicularmente ao eixo do cone de luz e com o centro sobre o eixo.

   (a) [0,6 ponto] Considerando que a intensidade I do laser é uniforme, encontre uma expressão para I a uma distância D da saída do laser.

   (b) [0,6 ponto] Encontre uma expressão para a pressão de radiação p_r exercida pelo feixe à distância D da saída do laser.

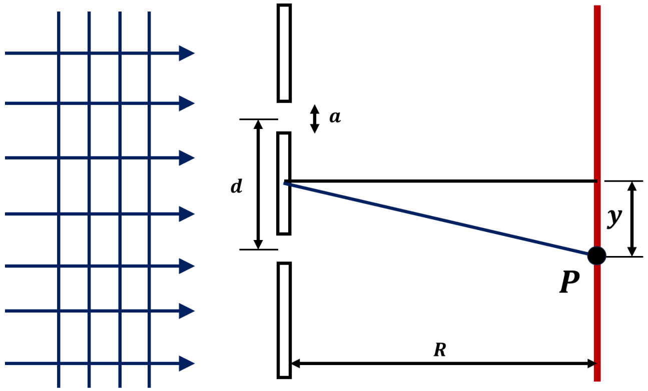
   (c) [0,8 ponto] Encontre uma expressão para o módulo da força F média exercida pelo feixe sobre o anteparo.

3. [2,2 pontos]
   Considere o padrão de difração formado pela passagem de uma onda plana monocromática por duas fendas de largura a separadas por uma distância d, num anteparo localizado a uma distância R das fendas, tal que $R \gg a$ e $R \gg d$, como mostrado na figura abaixo.

   (a) [0,6 ponto] Para quais valores de y são observados os mínimos de difração?

   (b) [0,6 ponto] Para quais valores de y são observados os máximos de interferência?

   (c) [1,0 ponto] Qual é a razão entre a largura e a distância entre as fendas (a/d) de modo que o quarto máximo de interferência à direita do máximo central coincida com o primeiro mínimo de difração? Faça um esboço do padrão de intensidade observado no anteparo em função de y.



4.

Gabarito para Versão $\boxed{\text{D}}$

Seção 1. Questões objetivas (6×0,7 = 4,2 pontos)

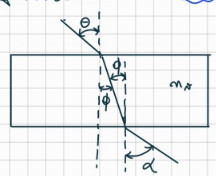
1. (c)
2. (b)
3. (d)
4. (a)
5. (b)
6. (d)

Seção 2. Questões VF (2×0,8 = 1,6 pontos). Questões discursivas (1× 2,0 + 1× 2,2 = 4,2)

1. **Resolução:**

(a)

A afirmativa é V.



Temos:

$n_{ar} \operatorname{sen}\theta = n_v \operatorname{sen}\phi$

$n_v \operatorname{sen}\phi = n_{ar} \operatorname{sen}\alpha$

igualando as duas equações:

$\cancel{n_{ar}} \operatorname{sen}\theta = \cancel{n_{ar}} \operatorname{sen}\alpha$

$\operatorname{sen}\theta = \operatorname{sen}\alpha$

$\theta = \alpha$

O feixe é desviado sem alterar sua inclinação.

(b)

A afirmativa é V.

Temos que, para uma rede de difração os máximos são dados por:

$d \operatorname{sen}\theta = m\lambda$, $m = \{0, \pm 1, \pm 2, \ldots\}$

Assim:

$d \operatorname{sen}\frac{\pi}{2} \geq m_{max}\lambda$

$m_{max} \leq \frac{d}{\lambda}$,

onde m_{max} é a maior ordem de um máximo observado com a rede de difração.

Temos também que:

1 linha → d

N linhas → 1 mm

$d = \frac{1}{N}$ mm^{-1}

$d = \frac{1}{800}$ mm^{-1}

$d = \frac{1}{8} \times 10^{-2} \times 10^{-3}$ m

$d = \frac{1}{8} \times 10^{-5}$ m.

Assim:

$m_{max} \leq \frac{1}{8} \frac{\times 10^{-5}\,m}{0{,}5 \times 10^{-6}\,m}$

$m_{max} \leq \frac{1}{4} \times 10$

$m_{max} \leq 2{,}5$

■

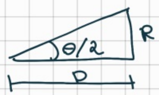
2. **Resolução:**

(a)

(b)

(c)

a) A uma distância D da saída do laser o raio R do feixe é dado por:



$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{R}{D}$; $R = D\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$,

assim:

$$I = \frac{P}{\pi R^2} = \frac{P}{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$I = \frac{P}{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

p/ $\theta << 1$

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cong \left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{0,1}{2} \text{ rad}$$

$$I = \frac{P}{\pi D^2} \times \left(\frac{0,1}{2}\right)^2$$

$$I = \frac{400\,P}{\pi D^2}$$

■

3. **Resolução:**
   (a)
   (b)
   (c)
   ■

4. **Resolução:**

b) A pressão de radiação no anteparo totalmente refletor é dada por:

$$p_r = \frac{2I}{c} ,$$

$$p_r = \frac{800\,P}{\pi D^2 c}$$

c) A distância D da saída do laser o raio do feixe é:

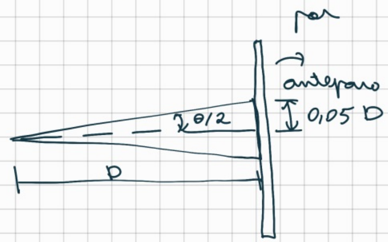
$$R = D\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) ,$$

para $\theta << 1$;

$$R = D\frac{\theta}{2} = \left(\frac{0,1}{2}\right)D = 0,05D$$

A força média exercida pelo feixe é dada

$$F = p_r\, A$$



Como a área do anteparo é maior que a área do feixe à distância D da saída do laser,

$$F = p_r\, \pi R^2$$

$$F = \frac{2P}{c\,\cancel{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}} \cdot \cancel{\pi D^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$F = \frac{2P}{c}$$

a) Os mínimos de difração são observados p/ :

$$a \operatorname{sen} \theta_m = n \lambda$$

$$n = \{\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\}$$

$$a \frac{Y_n}{R} = n\lambda$$

$$Y_n = n \left(\frac{\lambda R}{a}\right)$$

$$n = \{\pm 1, \pm 2, \dots\}$$

b) Os máximos de interferência são observados para :

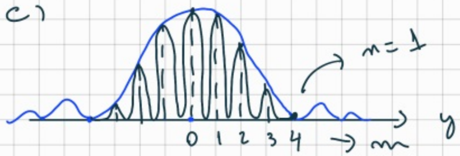
$$d \operatorname{sen} \theta_m = m \lambda \; ; \; m = \{0, \pm 1, \dots\}$$

$$\boxed{d \frac{Y_m}{R} = m\lambda}$$

$$Y_m = m \left(\frac{R\lambda}{d}\right)$$

$$m = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$$

c)



Para que o 4º máximo de interferência (m = 4) coincida com o primeiro mínimo de difração devemos ter:

$$Y_{m=4} = Y_{n=1}$$

$$4 \left(\frac{\cancel{R}\cancel{\lambda}}{d}\right) = \cancel{\lambda}\left(\frac{\cancel{R}}{a}\right)$$

ou seja: $d = 4a$