



Segunda Lista de Exercícios – 2025-2

Temas: Ondas e Óptica Ondulatória

Os problemas 3 e 6 devem ser entregues até o dia 18/7.

Questões:

Q1 – Um cabo de aço é formado por duas partes com seções de áreas transversais de áreas diferentes A_1 e A_2 . Uma onda senoidal progressiva é enviada pelo cabo, partindo da extremidade da parte mais fina do cabo. O que acontecerá quando a onda encontrar a interface entre A_1 e A_2 ? Como serão alteradas: a velocidade; a frequência e o comprimento de onda?

Q2 – Em um dia de ventania, uma criança ouve do lado de fora a campainha escolar tocar. Se o vento estiver soprando em direção a criança vindo da campainha, ele vai alterar a frequência, o comprimento de onda ou a velocidade do som ouvido pela criança?

Q3 - Em um padrão de difração de fenda única, há um máximo central claro cercado por sucessivos máximos de ordem superiores mais fracos. Finalmente, bem distante do máximo central, não se observam mais máximos. Isso ocorre porque os máximos restantes são muito fracos? Ou porque há um limite superior para o número de máximos que pode ser observado, não importando o quão bom sejam os olhos do observador para uma dada fenda e fonte de luz?

Q4 – Um par de óculos escuros para sol é mantido em frente a uma tela plana (ligada) de um computador, com as lentes paralelas a tela. Quando elas são giradas, em relação a um eixo perpendicular à tela, nota-se que a intensidade da luz proveniente da tela, e que atravessa as lentes, varia. Por quê?

Q5 – Um apontador laser vermelho incide sobre uma grade de difração produzindo um padrão de difração sobre uma tela atrás da grade. Se o apontador laser vermelho for substituído pelo verde, os pontos claros verdes sobre a tela estarão mais próximos uns dos outros ou mais afastados em relação aos pontos produzidos pelo vermelho?

Q6 – As equações de Maxwell e as leis de Newton do movimento são mutuamente inconsistentes; o grande edifício da física clássica é fatalmente falho? Explique a razão da inconsistência. [*Dica: Isso está relacionado às descobertas da física moderna.*]

**Problemas:**

1 - Duas ondas transversais de mesma frequência $f = 100$ Hz são produzidas em um fio de aço de 1mm de diâmetro e densidade 8 g/cm^2 , submetido a uma tensão $T = 500$ N. As ondas são dadas por:

$$y_1(x, t) = A \cos\left(kx - \omega t + \frac{\pi}{6}\right) \quad \text{e} \quad y_2(x, t) = 2A \sin(\omega t - kx)$$

onde $A = 2\text{mm}$

- Escreva a expressão da onda harmônica progressiva resultante da superposição destas duas ondas.
- Calcule a intensidade da resultante.
- Se fizermos variar a diferença de fase entre as duas, qual é a razão entre os valores máximos e mínimos possíveis da intensidade resultante.

2 - Dois carros (1 e 2) trafegam em sentidos opostos numa estrada, com velocidades de magnitudes v_1 e v_2 . O carro 1 trafega contra o vento, que tem velocidade V . Ao avistar o carro 2, o motorista do carro 1 pressiona sua buzina de frequência f_0 . A velocidade do som no ar parado é v_{som} . Qual é a frequência f do som da buzina percebida pelo motorista do carro 2? Com que frequência f' ela é ouvida pelo motorista de um carro 3 que trafega no mesmo sentido que o carro 1 e com a mesma velocidade? *Dica: responda primeiro à Q2 para entender o que está envolvido neste problema.*

3 - Mostre que se pode obter o efeito Doppler (não relativístico) a partir da transformação de Galileu. Considere uma onda sonora harmônica em uma dimensão, para uma fonte sonora em repouso no meio, de frequência f_0 . Escreva a expressão da onda num ponto x no instante t , no referencial S do meio. Considere, agora, um observador que se desloca com velocidade u em relação a S , na direção x . Relacione x com a coordenada x' do observador no referencial S' que se desloca com ele. Substitua na expressão da onda e interprete o resultado.

4 - A radiação eletromagnética é formada por ondas. Há mais de um século, os cientistas pensavam que, como outras ondas, a luz precisava de um meio (chamado Éter) que sustentasse sua propagação. O vidro, com uma massa específica $\beta = 2500 \text{ kg/m}^3$, também sustenta a propagação da luz. Qual seria o módulo de elasticidade do vidro a fim de suportar a propagação de ondas luminosas com uma velocidade $v = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$. Compare este valor com o valor real do módulo de



elasticidade do vidro de janela, que é de $2,0 \times 10^{10} \text{ N/m}$. Quais as conclusões que você pode chegar a partir dos resultados obtidos?

5 - Vamos imaginar que velocidade com que a energia é transmitida por uma onda eletromagnética não seja c , mas sim \vec{v} e que a relação entre a densidade de energia eletromagnética

$$U = U_E + U_B = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

e o vetor de Poyting

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

seja $\vec{S} = U\vec{v}$. Mostre que:

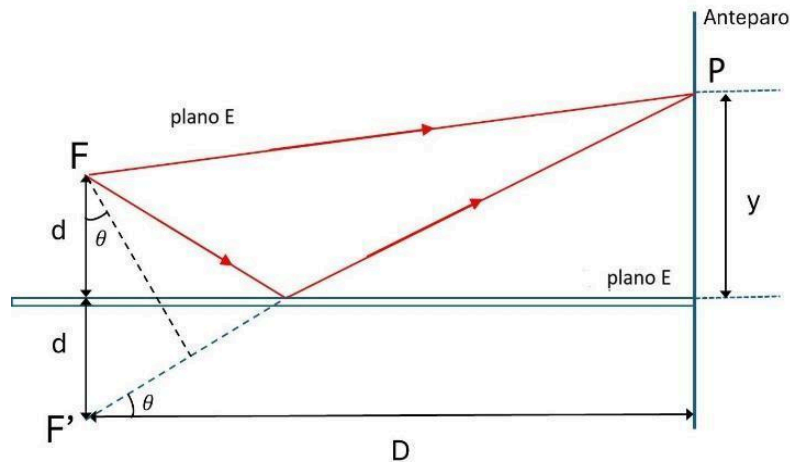
$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)U^2 = (U_E - U_B)^2 + \frac{\epsilon_0}{\mu_0} (\vec{E} \cdot \vec{B})^2$$

Daí conclua que $v \leq c$ e que só pode ser $v = c$ quando as densidades de energia elétrica e magnética são iguais e \vec{E} é perpendicular a \vec{B} , exatamente como acontece numa onda plana.

O interessante deste exercício é que questões que iremos encontrar depois na relatividade restrita, como a impossibilidade de propagação de qualquer partícula ou sinal com velocidade maior que a da luz, aparecem dentro do eletromagnetismo, mesmo sem precisarmos apelar para os postulados da Relatividade.

Sugestão: use que $(\vec{a} \times \vec{b})^2 + (\vec{a} \cdot \vec{b})^2 = |\vec{a}|^2 |\vec{b}|^2$.

6 - A experiência do espelho de Lloyd é mostrada na figura abaixo, na qual observa-se num anteparo a interferência construtiva entre o raio de luz (de comprimento de onda λ) que parte diretamente da fonte puntiforme (**F**) atingindo o ponto **P** e um raio de luz que após refletir na superfície do espelho plano também atinge o mesmo ponto **P**. A distância de **F** ao plano do espelho é **d** e a distância entre a fonte e o anteparo é **D**, com $D \gg d$.



- a. Mostre que, ao se considerar a imagem especular de F' , pode-se calcular essa interferência de modo similar ao caso da fenda dupla (observe na figura), com uma fase adicional de π para a luz que reflete no espelho, obtendo interferência construtiva na condição dada por:

$$\text{sen}\theta = \frac{\lambda}{4d} (2m - 1)$$

onde $m = 1, 2, 3 \dots$ representa a ordem da interferência.

- b. Determine a distância (aproximada) para y , onde ocorre o primeiro máximo (não central) em função de λ , d e D .

7 - Chama-se eixo de um filtro de polarização (polarizador ou analisador) a direção de vibração para a qual a transmissão é máxima. Um par de filtros tem seus eixos cruzados (perpendiculares), de modo que bloqueia a luz incidente. Coloca-se agora um terceiro filtro entre os dois, com seu eixo formando um ângulo de θ com o eixo do primeiro filtro. Se luz natural de intensidade I_0 incide sobre esse sistema, qual é a intensidade da luz transmitida?

8 – Para explicar as cores das manchas de óleo no asfalto molhado, considere uma camada de óleo, de índice de refração 1,5, boiando sobre a água (o asfalto absorve a luz transmitida através do óleo e da água). Suponha que a espessura da camada de óleo é igual ao comprimento de onda λ_1 da luz violeta no ar, e que se observa a luz refletida na incidência perpendicular:

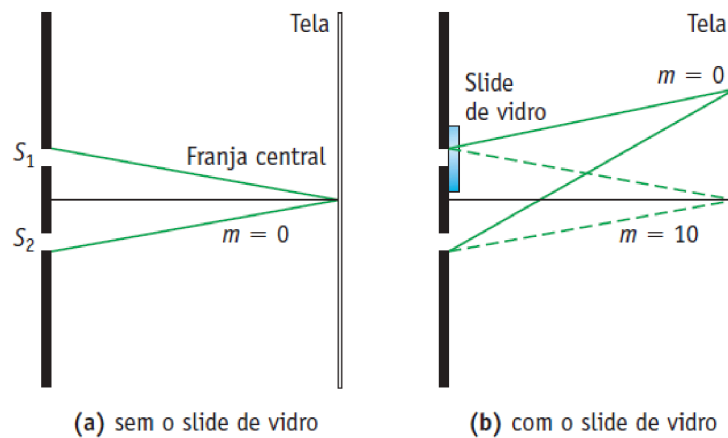
- a. Mostre que há um mínimo de reflexão para luz ultravioleta.
b. O comprimento de onda λ_2 da luz vermelha é aproximadamente o dobro: $\lambda_2 \approx 2\lambda_1$. Mostre que para luz vermelha há um máximo de reflexão.



9 – Há ar do lado de dentro e de fora de uma bolha de sabão. Qual é a menor espessura da parede desta bolha, cujo índice de refração é $n = 1,420$, que aparecerá escura se for iluminada com luz de 500 nm ?

10 – Luz branca é irradiada sobre uma camada muito fina de mica ($n = 1,57$), e acima da camada de mica, máximos de interferência para dois comprimento de onda (e nenhum outro entre) são vistos: um no azul, 480 nm , e outro no amarelo, 560 nm . Qual é a espessura da camada de mica?

11 - Em um experimento de fenda dupla, um laser He-Ne com luz de comprimento de onda de 633 nm produz um padrão de interferência sobre uma tela colocada a alguma distância das fendas. Quando uma das fendas é coberta por um *slide* (lâmina) de vidro delgado de espessura de $12 \mu\text{m}$, a franja central se desloca para o local que era ocupado pela décima franja escura (veja figura abaixo). Qual o índice de refração do vidro?



12 – A estabilidade térmica de um interferômetro de Michelson pode ser melhorada colocando o equipamento submerso na água. Considere um interferômetro que está submerso em água, medindo a luz de uma fonte monocromática que está no ar. Se o espelho móvel é deslocado de $d = 0,200 \text{ mm}$, $N = 800$ franjas passam pela tela. Qual é o comprimento de onda original (no ar) da luz monocromática?

13 - Nas instalações do Observatório de Ondas Gravitacionais Interferométricas a Laser (LIGO) nos Estados Unidos, feixes lasers de comprimento de onda de $550,0 \text{ nm}$ viajam ao longo de trajetórias de 4.000 km de comprimento. Cada laser se reflete ao longo do



seu caminho e volta 100 vezes antes de os feixes serem combinados e comparados. Se uma onda gravitacional aumenta o comprimento em um dos caminhos e diminui no outro, cada por 1 parte em 10^{21} , qual será a diferença de fase resultante entre os dois raios?