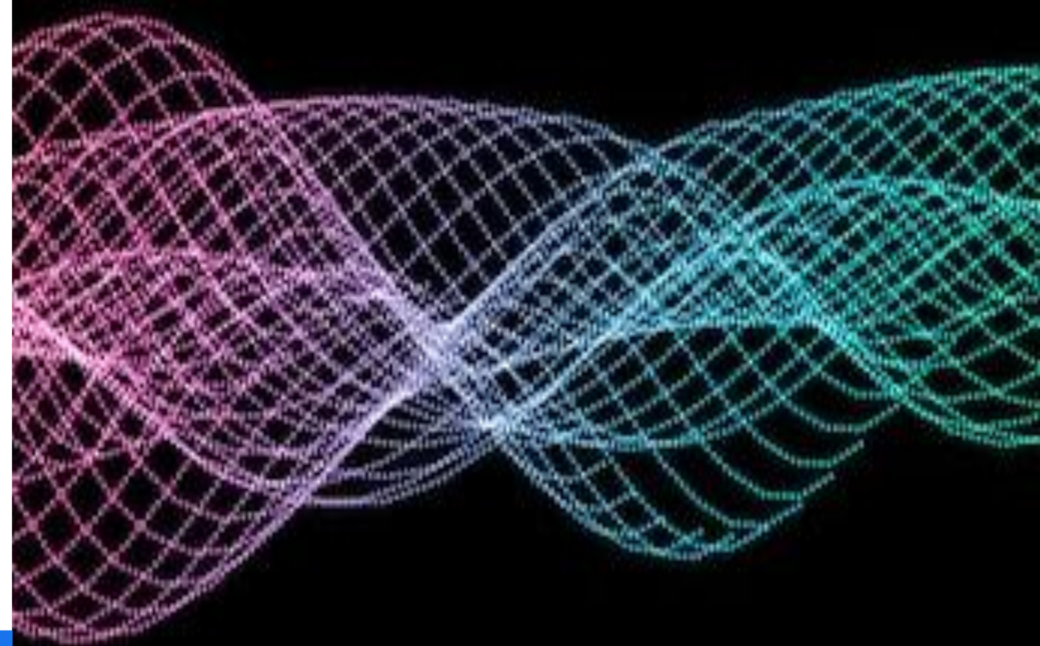
INTERFERÊNCIA

FÍSICA IV. ONDAS

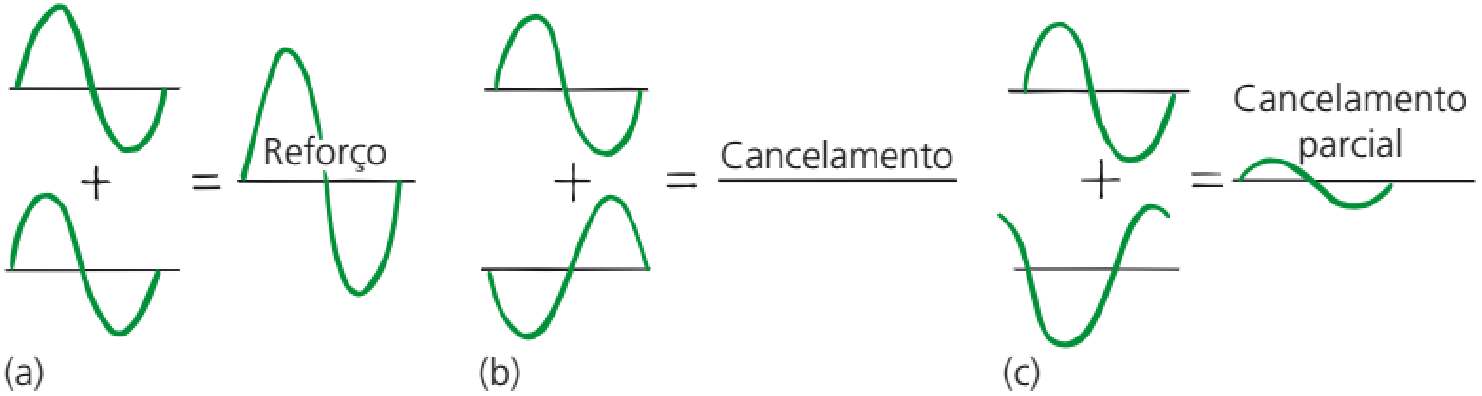
Profa. Dra. Luz Stefany Murcia-Correa

luz.m.correa@unesp.br



SUPERPOSIÇÃO E INTERFERÊNCIA

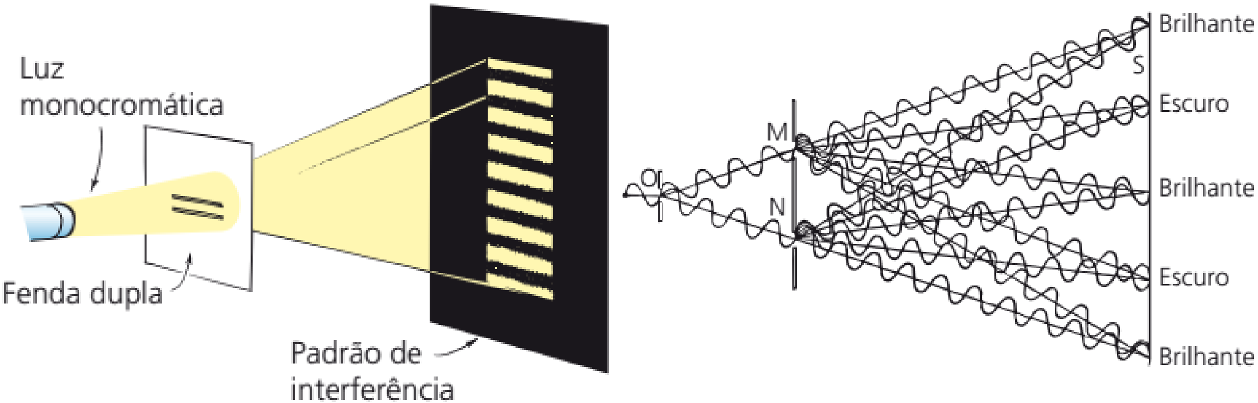
Quando duas ondas interagem, a amplitude da onda resultante é a soma das amplitudes das duas ondas individuais. Este é o princípio da **superposição**. Esse fenômeno geralmente é descrito como **interferência.**



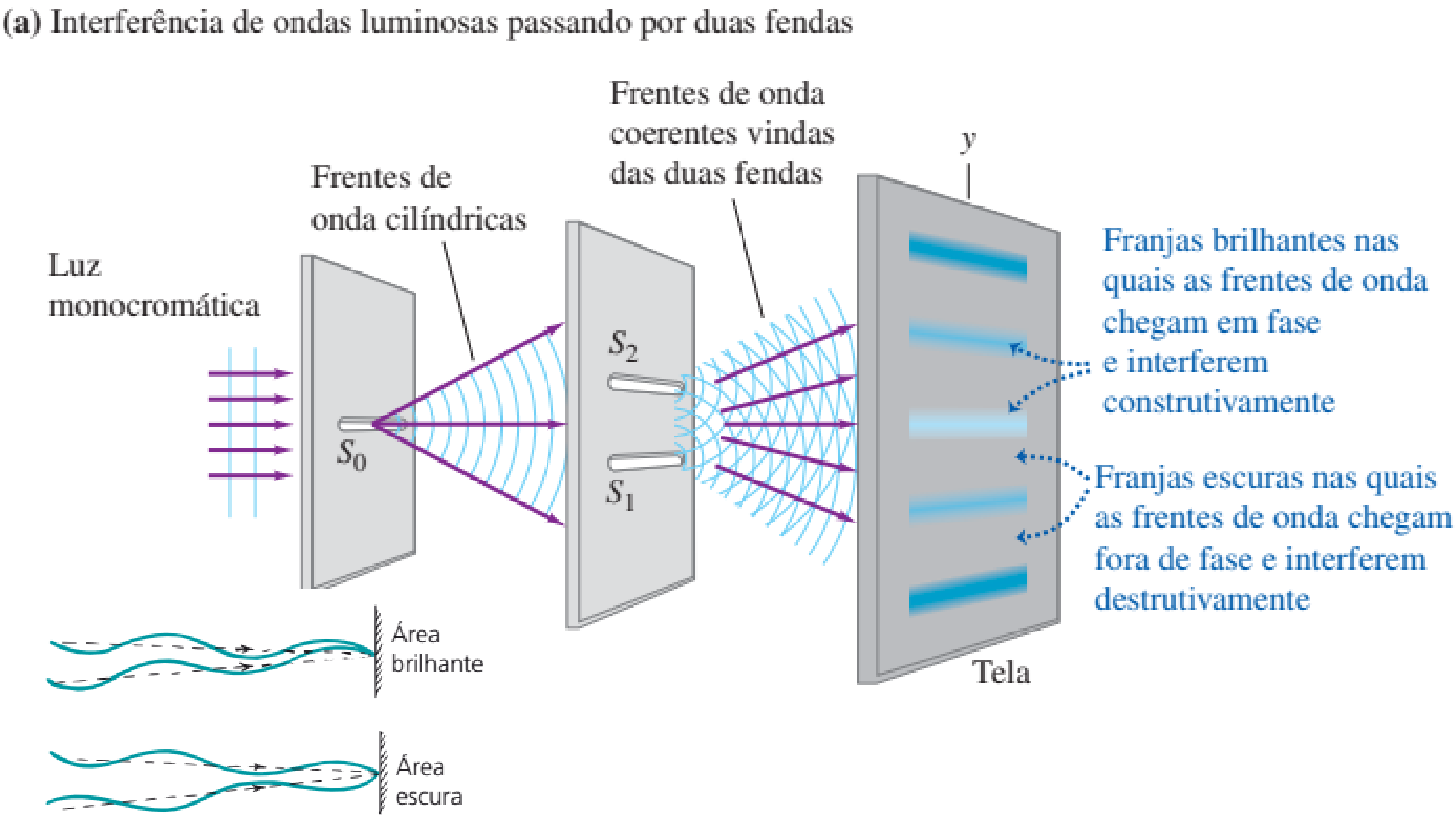
O que acontece com as fontes luminosas?

Os raios solares observados quando um feixe de luz solar entra por uma janela são produzidos pelo espalhamento de partículas de poeira existentes no ar.

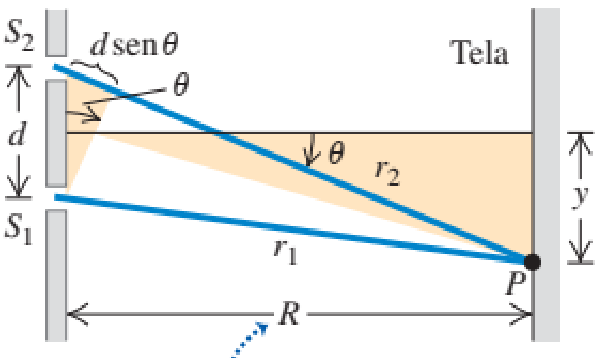
EXPERIMENTO DE YOUNG: “INTERFERÊNCIA DA LUZ”



Sabemos que as ondas luminosas produzem franjas em um *experimento de interferência de dupla fenda de Young*, mas o que determina a posição das franjas?

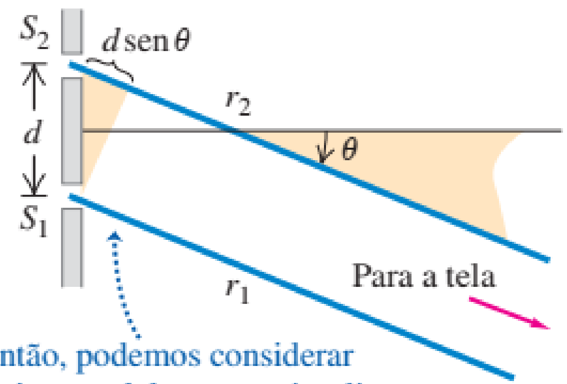


(b) Geometria real (vista de lado).



Em situações reais, a distância R até a tela costuma ser muito maior que a distância d entre as fendas...

(c) Geometria aproximada



... então, podemos considerar os raios paralelos, o que implica que a diferença entre os caminhos é simplesmente $r_2 - r_1 = d\,\text{sen}\,\theta$.

$$\boxed{r_2 - r_1 = d\ \text{sen}\ \theta}$$

"determina se as duas ondas estão em fase quando chegam ao ponto P."

A diferença de fase entre duas ondas pode mudar se as ondas percorrerem distâncias diferentes.

$$\boxed{r_2 - r_1 = \Delta L = d \sin\theta}$$ (Diferença de percurso)

Interferência Construtiva:

$$\boxed{d\ \text{sen}\ \theta_{\text{claro}} = m\lambda \qquad m = 0,\ \pm 1,\ \pm 2, \ldots}$$

Interferência Destrutiva:

$$\boxed{d\ \text{sen}\ \theta_{\text{escuro}} = (m + \tfrac{1}{2})\lambda \qquad m = 0,\ \pm 1,\ \pm 2, \ldots}$$

Posições Angulares das franjas

$$\boxed{y_{claro} = R\frac{m\lambda}{d}} \qquad \boxed{y_{escuro} = R\frac{\left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda}{d}} \Bigg\}$$

Posições lineares das franjas (ângulos pequenos)

EXEMPLO:

Uma tela de visualização está separada de uma fenda dupla por 4,80 m. A distância entre as duas fendas é de 0,0300 mm. Uma luz monocromática está direcionada no sentido da fenda dupla e forma um padrão de interferência na tela. A primeira onda escura está a 4,50 cm da linha de centro na tela.

(A) Determine o comprimento de onda da luz. (B) Calcule a distância entre as franjas claras adjacentes.

y= 4,50 cm

D=R=L=4,80 cm

(A)

$$\lambda = \frac{y_{\text{escuro}}\, d}{(m+\frac{1}{2})L} = \frac{(4,50\times 10^{-2}\,\text{m})(3,00\times 10^{-5}\,\text{m})}{(0+\frac{1}{2})(4,80\ \text{m})}$$

$$= 5,62\times 10^{-7}\,\text{m} = \boxed{562\ \text{nm}}$$

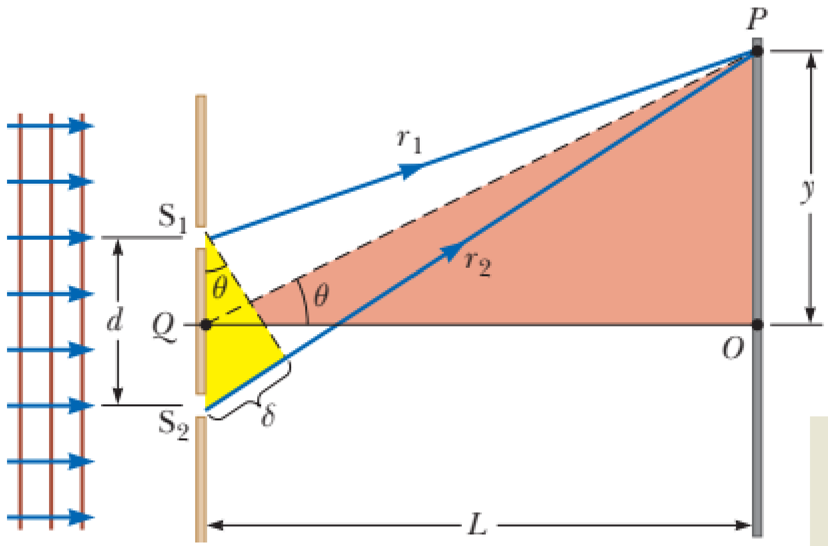
(B)

$$y_{claro} = L\,\frac{\lambda}{d} = 4,80\,\text{m}\left(\frac{5,62\times 10^{-7}\,\text{m}}{3,00\times 10^{-5}\,\text{m}}\right)$$

$$= 9,00\times 10^{-2}\,\text{m} = \boxed{9,00\ \text{cm}}$$

EXEMPLO:

Uma fonte emite luz visível de dois comprimentos de onda: λ= 430 nm e λ' = 510 nm. Ela é utilizada em um experimento de interferência de fenda dupla no qual L = 1,50 m e d = 0,0250 mm. Encontre a distância de separação entre a franja clara de terceira ordem para os dois comprimentos de onda.



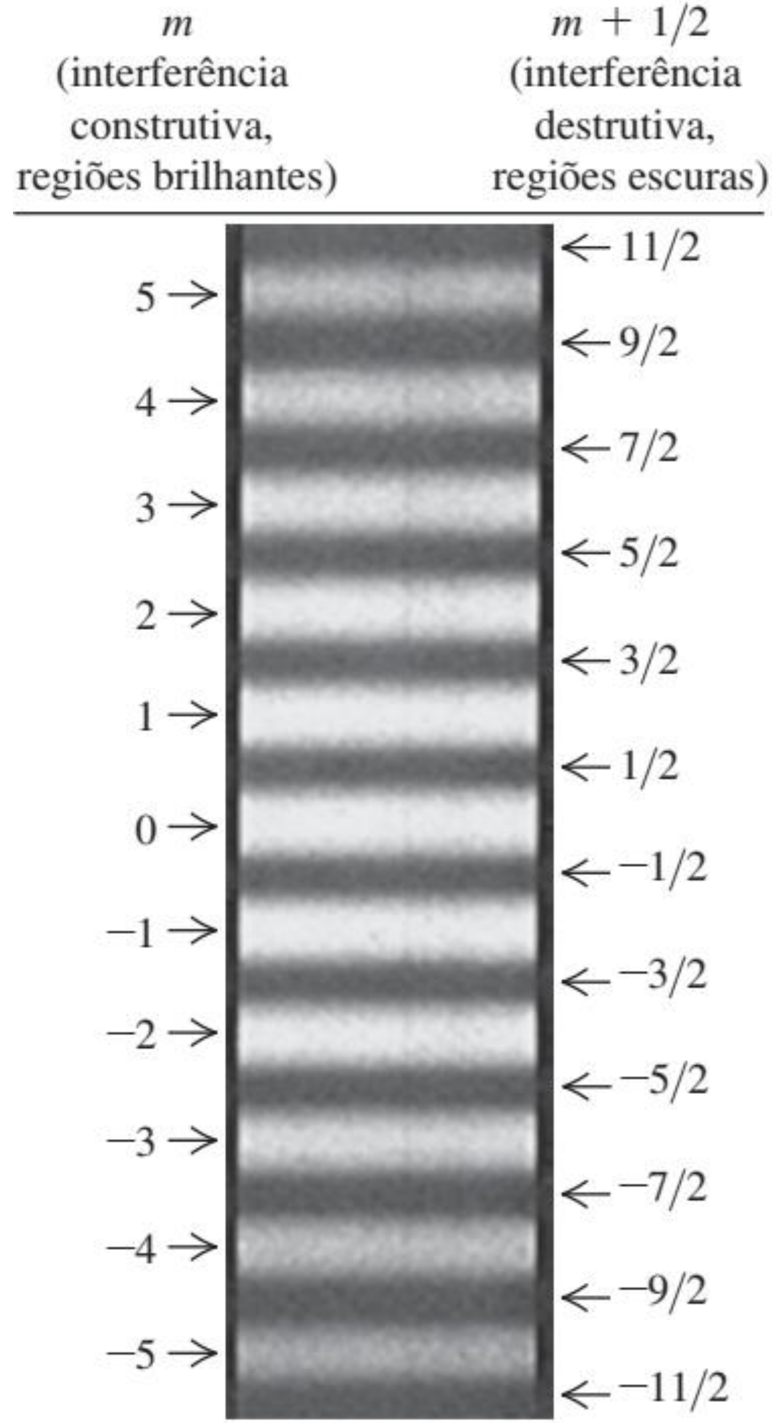
$$\Delta y = y'_{\text{claro}} - y_{\text{claro}}$$

$$= L\,\frac{m\lambda'}{d} - L\,\frac{m\lambda}{d} = \frac{Lm}{d}\,(\lambda' - \lambda)$$

$$\Delta y = \frac{(1,50\ \text{m})(3)}{0,0250 \times 10^{-3}\,\text{m}}\,(510 \times 10^{-9}\text{m} - 430 \times 10^{-9}\text{m})$$

$$= 0,0144\ \text{m} = \boxed{1,44\ \text{cm}}$$

Fotografia das franjas de interferência produzidas sobre uma tela na experiência de Young da dupla fenda. O centro da figura é uma franja brilhante correspondente a m=0; esse ponto na tela é equidistante das duas fendas.

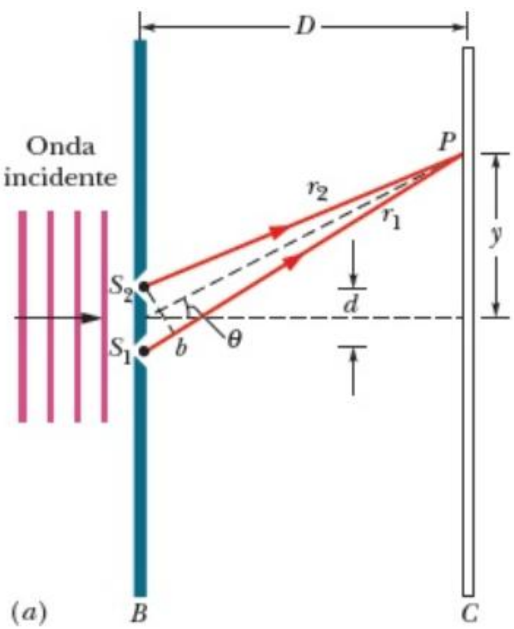


INTENSIDADE DAS FRANJAS DE INTERFERÊNCIA

Como determinar a intensidade em *qualquer* ponto sobre a tela?

As ondas luminosas estão em fase quando deixam as fendas, mas vamos supor que não estão em fase ao chegarem ao ponto P. Nesse caso, as componentes do campo elétrico das duas ondas que chegam ao ponto P da figura são dadas por:

$$E_1 = E_0 \operatorname{sen} \omega t \quad \text{e} \quad E_2 = E_0 \operatorname{sen} (\omega t + \phi)$$



$$E_P = E_1 + E_2 = E_0[\operatorname{sen} \omega t + \operatorname{sen} (\omega t + \phi)]$$

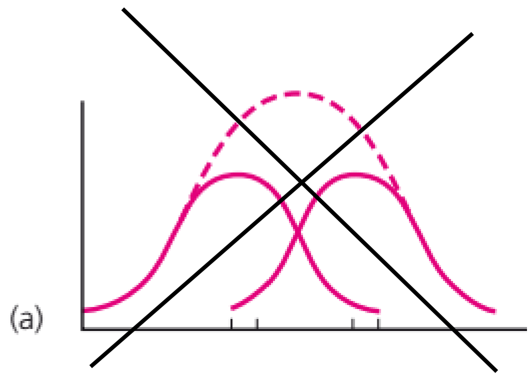
$$E_P = 2E_0 \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

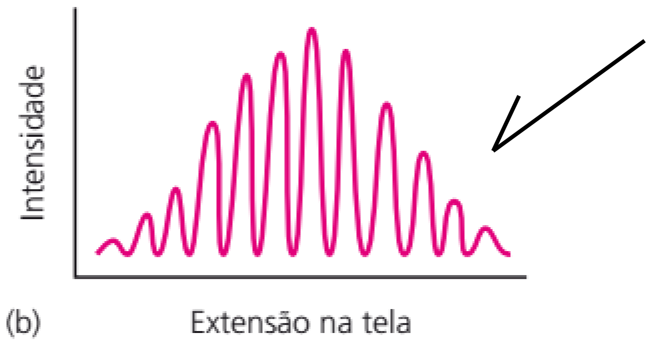
Intensidade da luz no ponto *P*: Lembre que *"a intensidade de uma onda é proporcional ao quadrado do módulo do campo elétrico resultante naquele ponto".*

$$I \propto E_P^2 = 4E_0^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \operatorname{sen}^2\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right) \longrightarrow \boxed{I = 4I_0 cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}$$

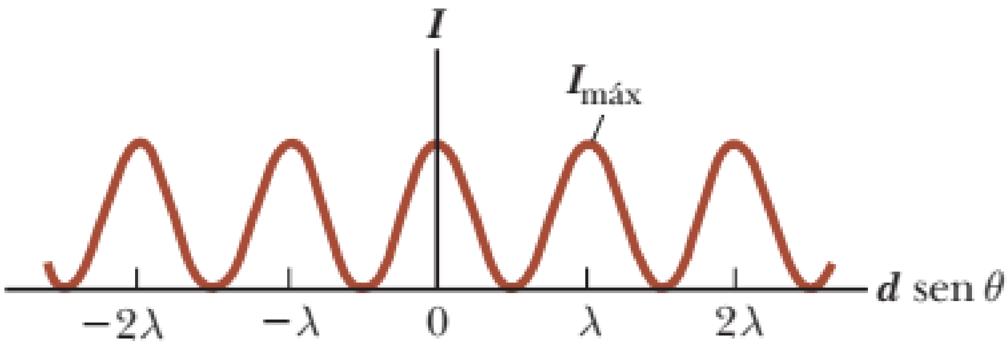
Intensidade da luz no ponto *P*:

Onde, $\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} sen\theta$ $\longrightarrow$ $\boxed{I = I_{max} cos^2\left(\frac{\pi d sen\theta}{\lambda}\right)}$



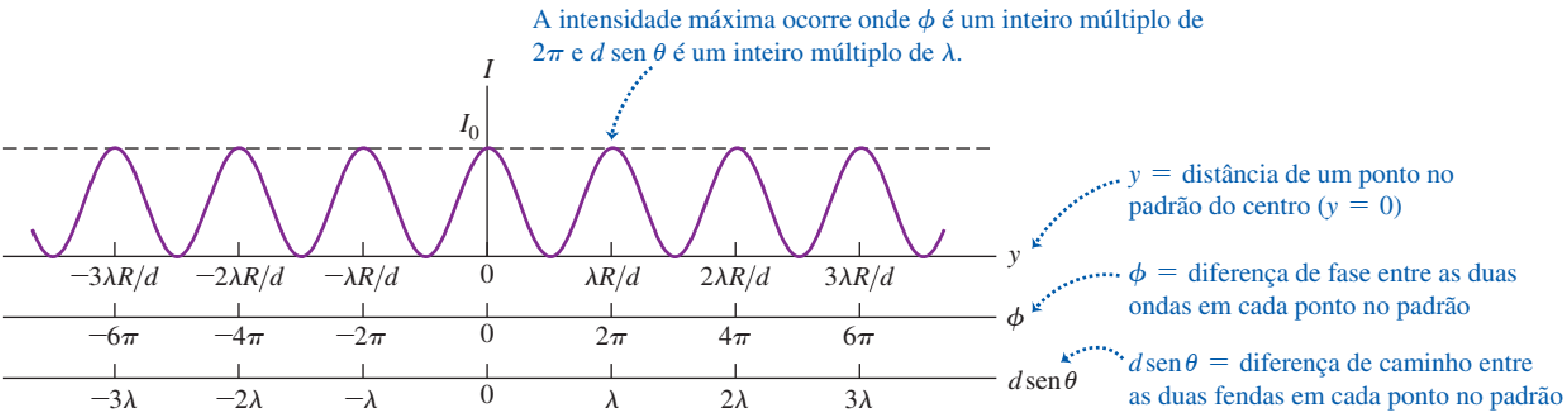


A luz difratada em cada uma das duas fendas não forma uma superposição de intensidades como sugerido em (a). O padrão de intensidade produzido, devido à interferência, tem o aspecto mostrado em (b).



Intensidade de luz *versus* $d$senθ para um padrão de interferência de fenda dupla quando a tela encontra-se distante das duas fendas ($L \gg d$).

Distribuição das intensidades no padrão de interferência de duas fendas idênticas.



Diferença de fase e diferença de caminho:

Sabemos que ϕ é proporcional à diferença entre os caminhos das ondas desde as fontes até o ponto P. Quando a diferença de caminho é igual a um comprimento de onda, a diferença de fase é igual a um ciclo, e $\phi = 2\pi\,rad = 360°$.

Ou seja, a razão entre a diferença de fase ϕ e 2π é igual à razão entre a diferença de caminho $r_2 - r_1$ e λ:

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$$

$$\underbrace{\phi}_{\text{Diferença de fase na interferência de duas fontes}} = \frac{2\pi}{\underbrace{\lambda}_{\text{Comprimento de onda}}}\overbrace{(\underbrace{r_2}_{\text{Distância da fonte 2}} - \underbrace{r_1}_{\text{Distância da fonte 1}})}^{\text{Diferença de caminho}} = \overbrace{k}^{\text{Número de onda } = 2\pi/\lambda}(r_2 - r_1)$$

EXEMPLO:

INTERFERÊNCIA PRODUZIDA POR UMA ESTAÇÃO DE RÁDIO

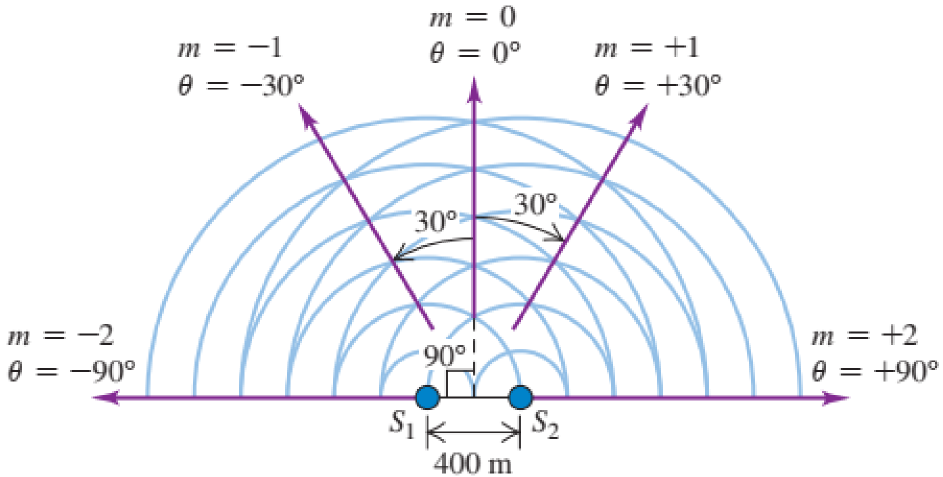
Geralmente é desejável orientar a energia irradiada por uma emissora de rádio em determinadas direções em vez de produzir uma radiação uniforme em todas as direções. Diversos pares de antenas alinhadas ao longo de uma linha reta costumam ser usados para obter a configuração da radiação desejada. Como exemplo, considere uma estação de rádio que opera com duas antenas idênticas, com dipolos verticais que oscilam em fases, separadas por uma distância de 400 m, operando com frequência de 1.500 kHz = $1{,}5 \times 10^6$ Hz (nas vizinhanças da parte superior da banda de rádio AM). Para distâncias muito maiores que 400 m, em que direções a intensidade da radiação transmitida torna-se máxima?

$$d = 400\ m$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = 200\ m$$

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{m\lambda}{d} = \frac{m\,(200\ \text{m})}{400\ \text{m}} = \frac{m}{2}$$

$$\theta = 0,\ \pm 30°,\ \pm 90°$$



Duas antenas de rádio que emitem ondas em fase. Cada seta indica uma direção para a qual a intensidade da radiação torna-se máxima. As ondas emitidas do lado inferior das fontes não são representadas.

EXEMPLO: DUAS ANTENAS TRANSMISSORAS DIRECIONAIS

Suponha que a distância entre as duas antenas de rádio mostradas na Figura 35.8 seja reduzida a apenas 10,0 m e que a frequência das ondas irradiadas aumente para $f = 60{,}0$ MHz. A uma distância de 700 m do ponto intermediário entre as antenas e na direção $\theta = 0$ (veja a Figura 35.8), a intensidade é dada por $I_0 = 0{,}020\ \mathrm{W/m^2}$. A essa mesma distância, determine: (a) a intensidade na direção $\theta = 4{,}0°$; (b) a direção próxima de $\theta = 0$ para a qual a intensidade é $I_0/2$ e (c) as direções em que a intensidade é igual a zero.

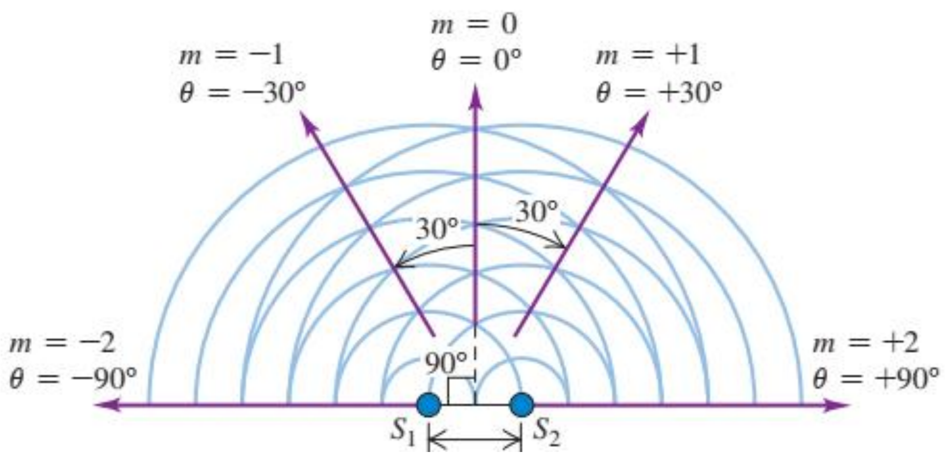
$$\lambda = \frac{c}{f} = 5\ m$$

$$d = 10\ m$$

$$\frac{d}{\lambda} = 2$$

$$\boxed{I = I_{\text{máx}} \cos^2\left(\frac{\pi d \operatorname{sen}\theta}{\lambda}\right)}$$

$$I = I_{max} cos^2(2\pi\ rad\ sen\theta)$$



$(a)\ \theta = 4°,\ I = 0{,}0016$ W/m^2

$$(b)\ I = I_{max}/2 \longrightarrow cos\theta = \pm\frac{1}{\sqrt{2}}$$

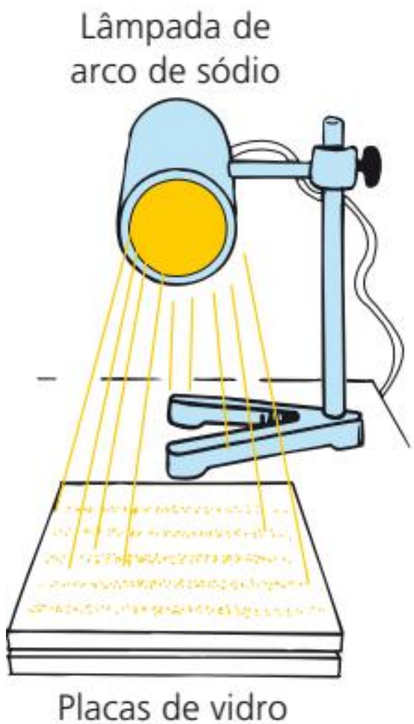
$$cos^{-1}\left(\pm\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = \pm\frac{\pi}{4}$$

$$2\pi sen\theta = \frac{\pi}{4} \rightarrow \theta = \pm 7{,}2°$$

$$(c)\ \cos[(2\pi\ rad\ )sen\theta] = 0$$

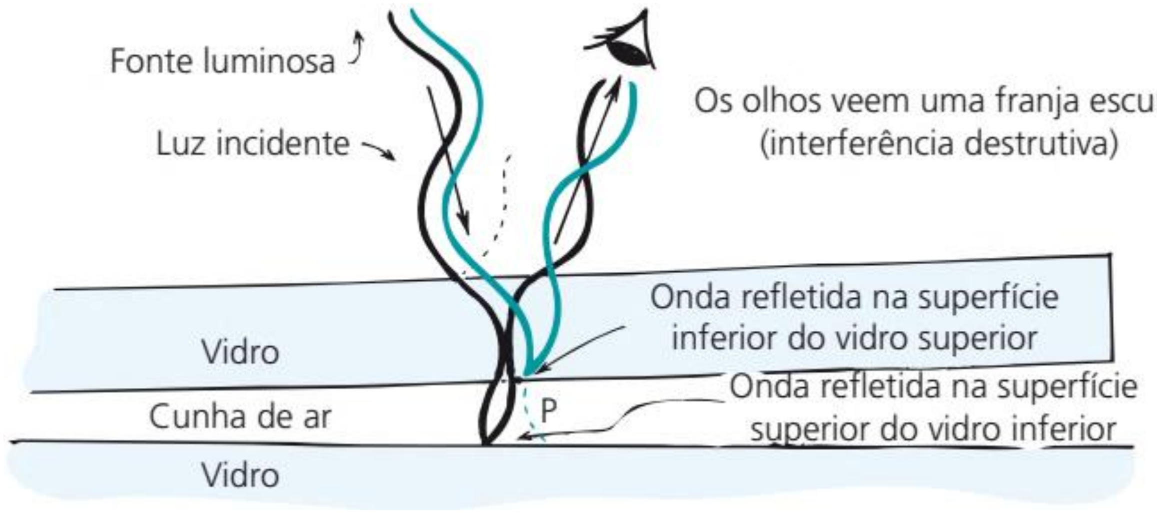
$$2\pi sen\theta = \pm\frac{\pi}{2}, \pm\frac{3\pi}{2} \longrightarrow \theta = \pm 14{,}5°; \pm 48{,}6°$$

INTERFERÊNCIA EM FILMES FINOS

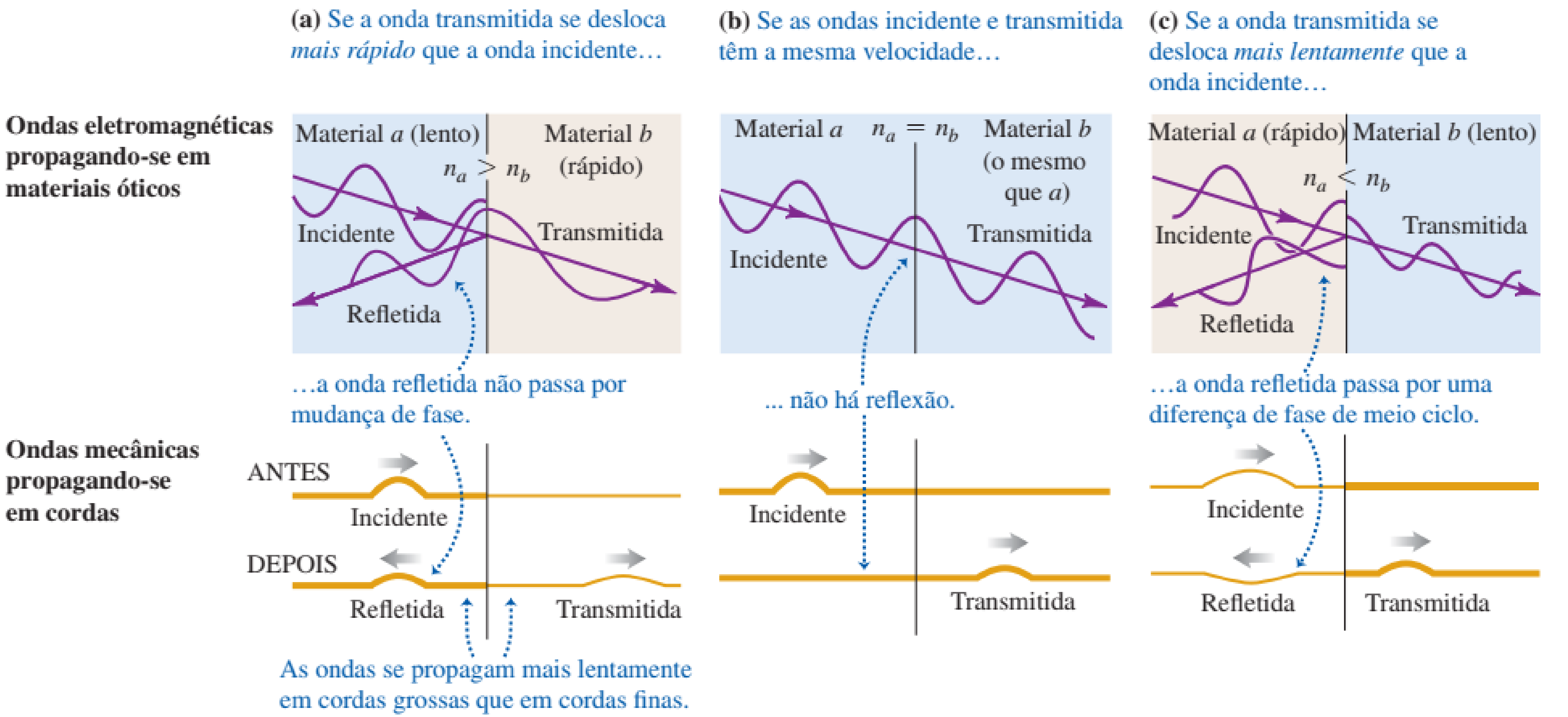


Outra maneira de produzir franjas de interferência é por meio da reflexão da luz nas superfícies inferior e superior de uma película delgada.

As franjas de interferência produzidas quando a luz monocromática é refletida em duas placas de vidro, com uma região em forma de cunha cheia de ar situada entre elas.



A reflexão que ocorre nas superfícies inferior e superior de uma "película delgada de ar".



Reflexão construtiva

$$2t = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \ldots)$$

(De películas finas, sem diferença de fase)

Espessura da película   Comprimento de onda

Reflexão destrutiva

$$2t = \left(m + \tfrac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \ldots)$$

Reflexão construtiva

$$2t = \left(m + \tfrac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \ldots)$$

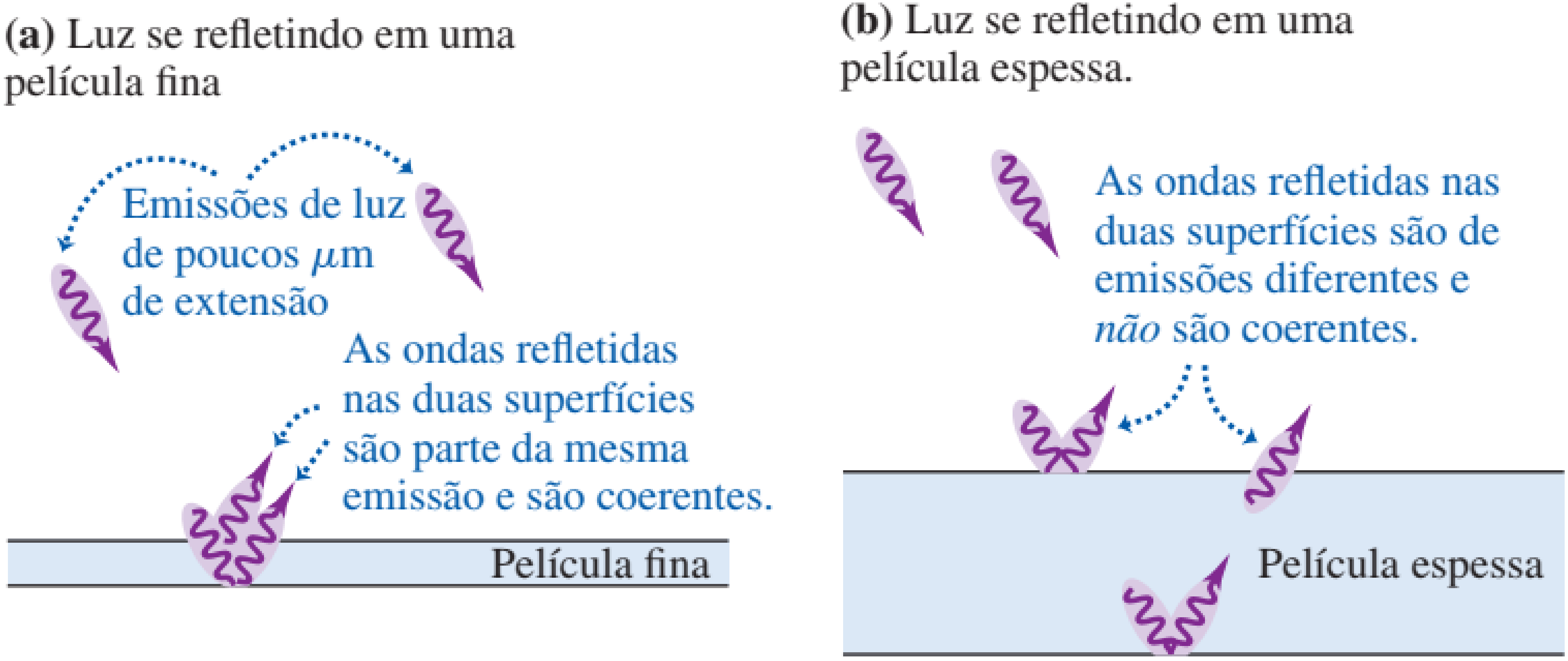
(De películas finas, com diferença de fase de meio ciclo)

Espessura da película   Comprimento de onda

Reflexão destrutiva

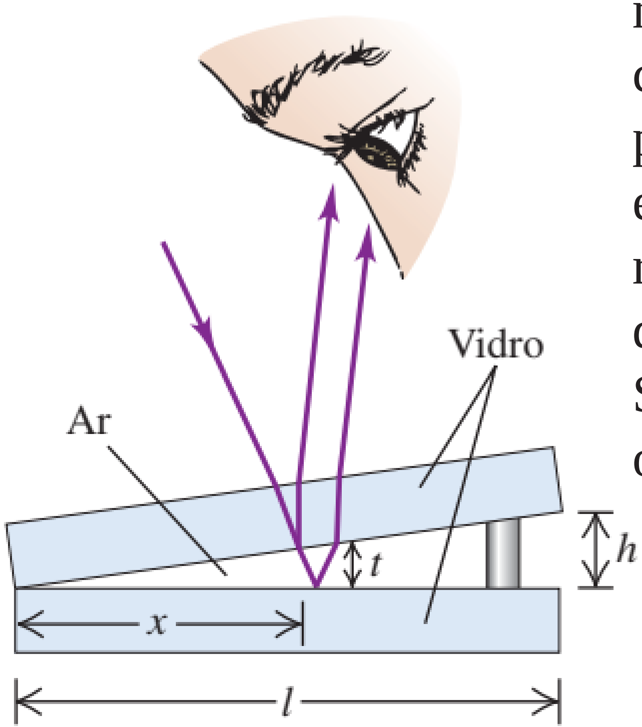
$$2t = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \ldots)$$

(a) A luz que se reflete em uma película fina produz um padrão de interferência estacionário, mas (b) a luz que se reflete em uma película espessa, não.



EXEMPLO:

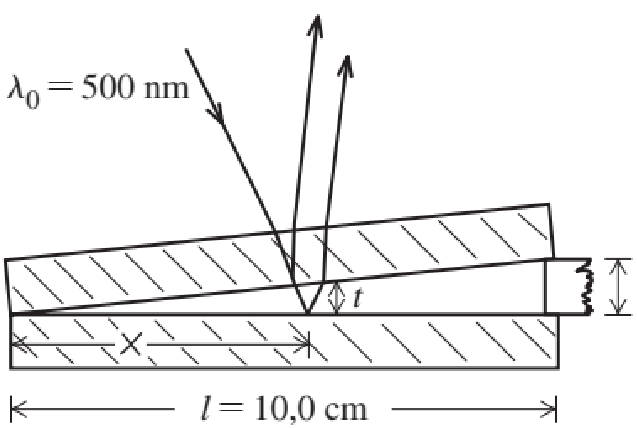
Suponha que as duas placas de vidro da figura sejam duas lâminas de 10 cm de comprimento de um microscópio. Em uma das extremidades elas estão em contato; na outra estão separadas por uma folha de papel com espessura de 0,0200 mm. Qual é o espaçamento das franjas de interferência vistas por reflexão? A franja vista por reflexão ao longo da linha de contato entre as placas é brilhante ou escura? Suponha luz monocromática com um comprimento de onda no ar $\lambda = \lambda_0 = 500$ nm



$$2t = m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2\ldots) \qquad \frac{t}{x} = \frac{h}{l}$$

$$\frac{2xh}{l} = m\lambda_0$$

$$x = m\frac{l\lambda_0}{2h} = m\frac{(0{,}100\ \text{m})(500 \times 10^{-9}\ \text{m})}{(2)(0{,}0200 \times 10^{-3}\ \text{m})} = m\,(1{,}25\ \text{mm})$$



REFERENCIAS

- Halliday, D.; Resnick, R. e Krane, K.S. Física IV. Rio de Janeiro: LTC, 1996.
- Serway, R. A. (2004). *Princípios de física*. Cengage.
- Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D., Freedman, R. A., & Ford, A. L. (2004). *Física universitaria* (Vol. 1, pp. 311-313). Pearson.