

Física IV

**Figuras de Interferência e
Experiência da Dupla Fenda
de Young**

Prof. Dr. Lucas Barboza Sarno da Silva

A luz – uma onda eletromagnética

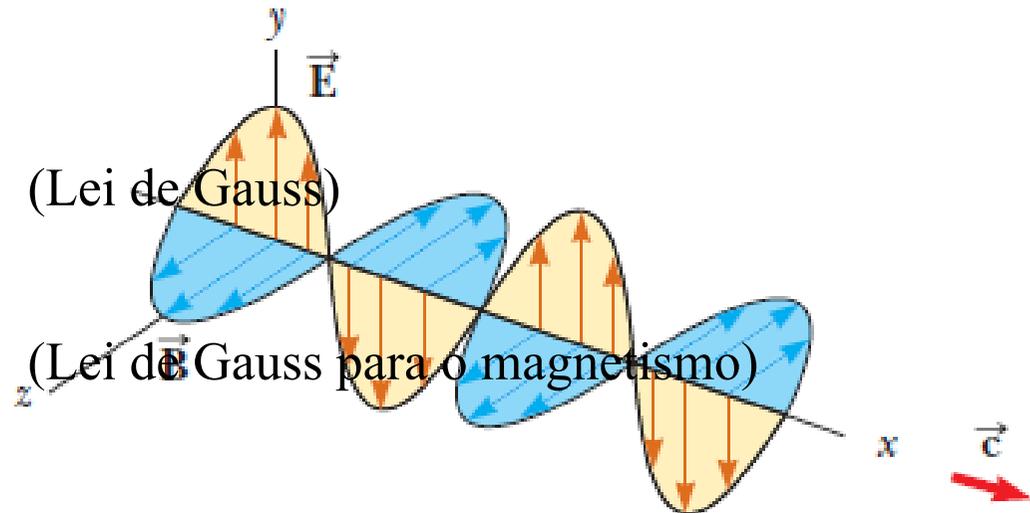
Equações de Maxwell

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$



(Lei de Gauss)

(Lei de Gauss para o magnetismo)

(Lei de Faraday)

Velocidade da luz:
(Lei de Ampère)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

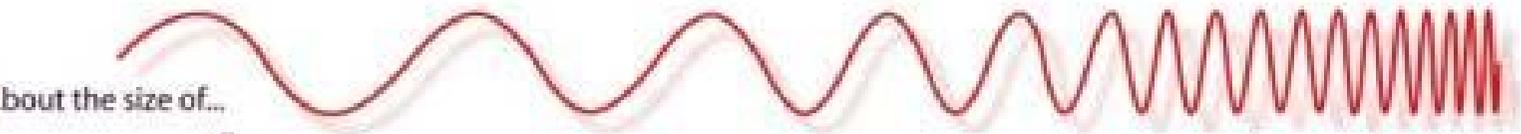
Penetrates Earth Atmosphere?



Wavelength (meters)



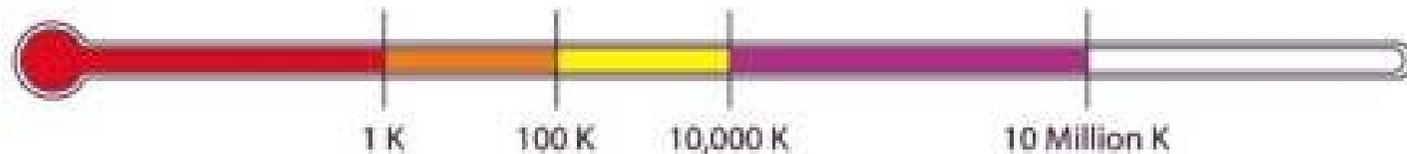
About the size of...



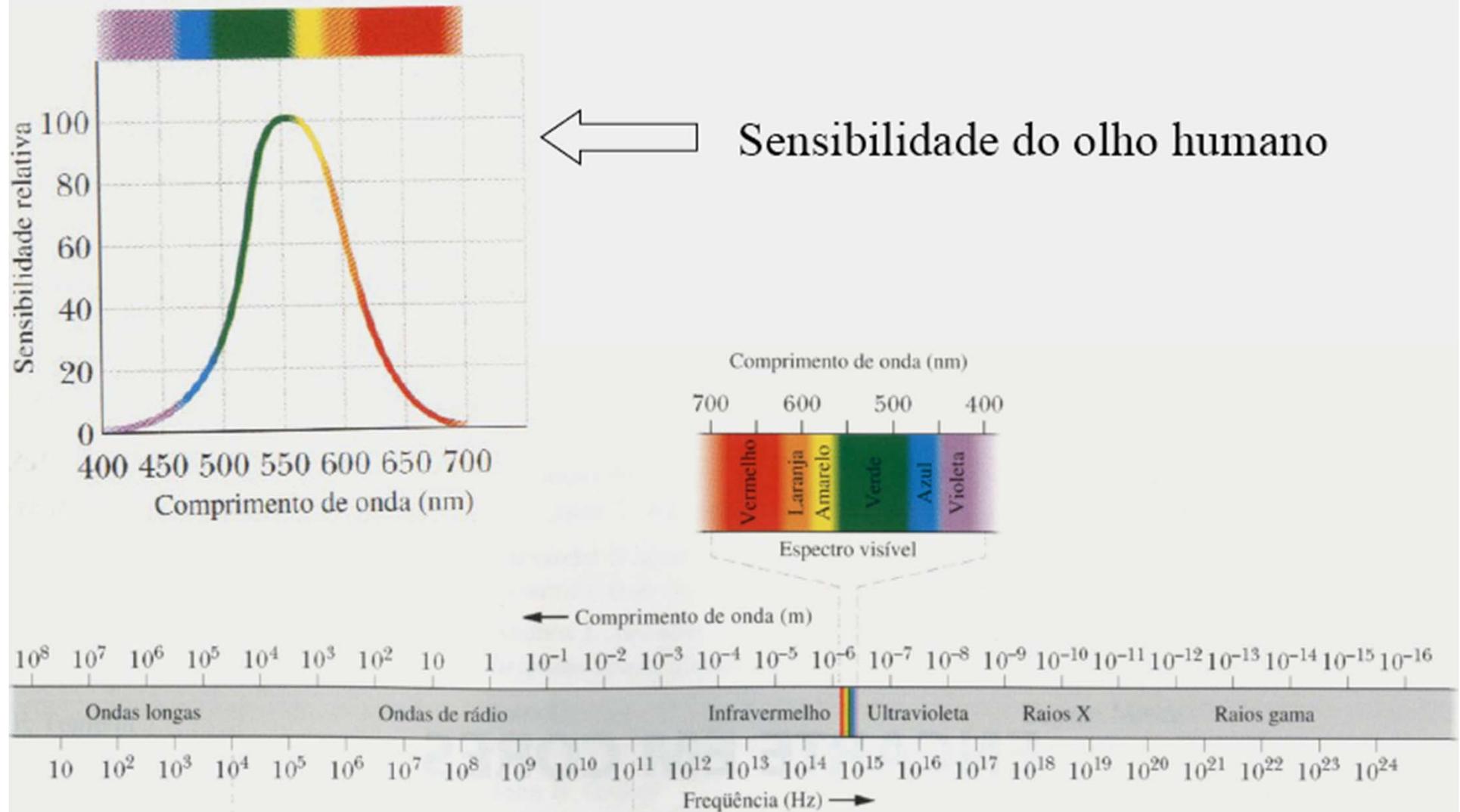
Frequency (Hz)



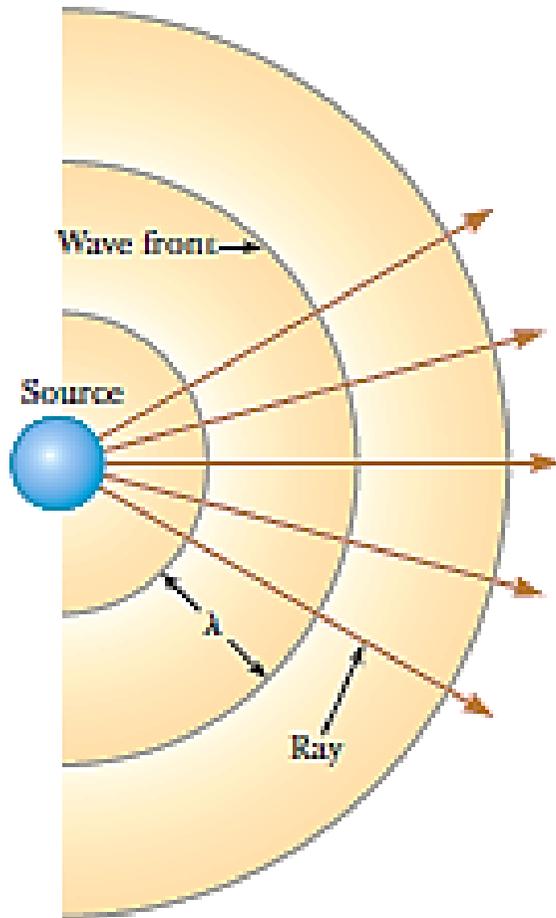
Temperature of bodies emitting the wavelength (K)



Ondas eletromagnéticas

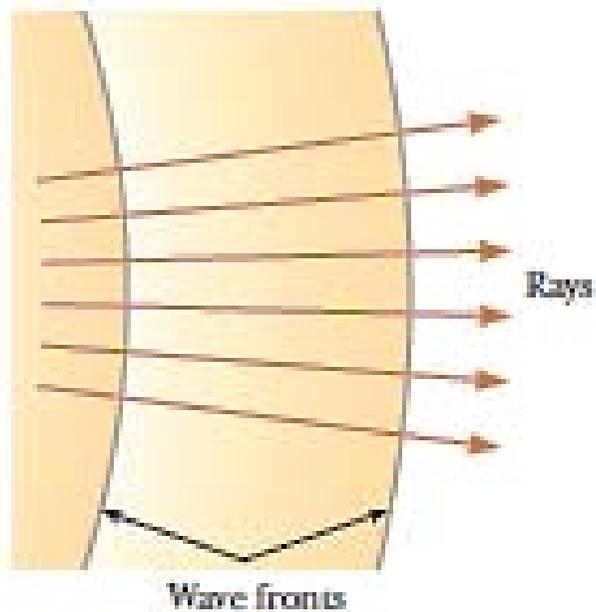


Ondas esféricas e ondas planas



- **Representação:** arcos circulares concêntricos à fonte
- Cada arco representa uma superfície onde a fase da onda é uma constante. Essa superfície é a frente de fase, ou **frente de onda**.
- A distância entre frentes de fase adjacentes é igual ao **comprimento de onda λ** .
- As retas radiais que saem da fonte são os **raios**.

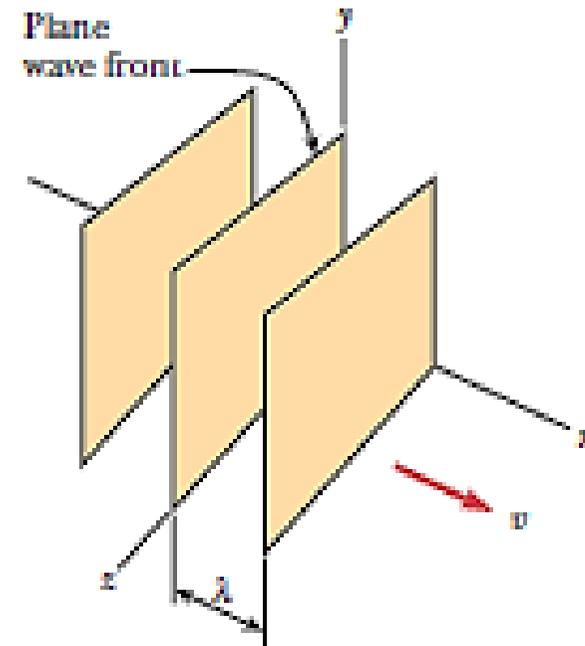
Ondas esféricas e ondas planas



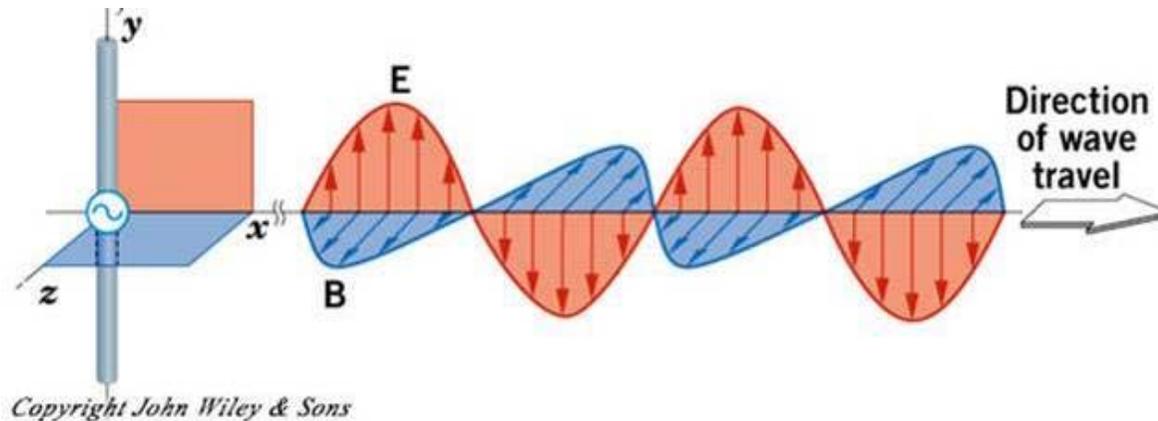
Pequena parte das frentes de onda a grande distância da fonte.

- Raios quase paralelos
- Frentes de onda quase planas

Frente de onda plana



Ondas eletromagnéticas planas



- E e B propagam-se em fase.
- E e B são mutuamente perpendiculares.
- $E \times B$ aponta na direção de propagação

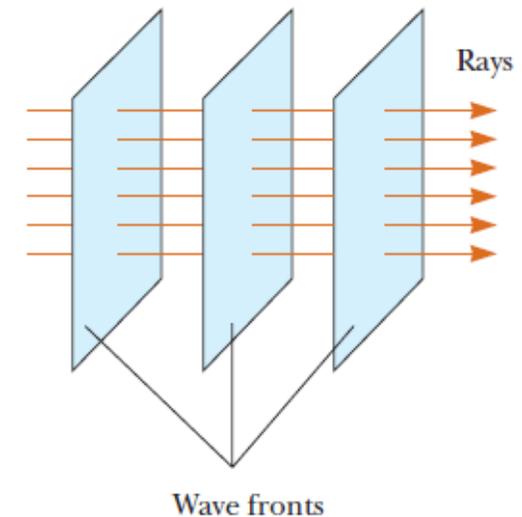
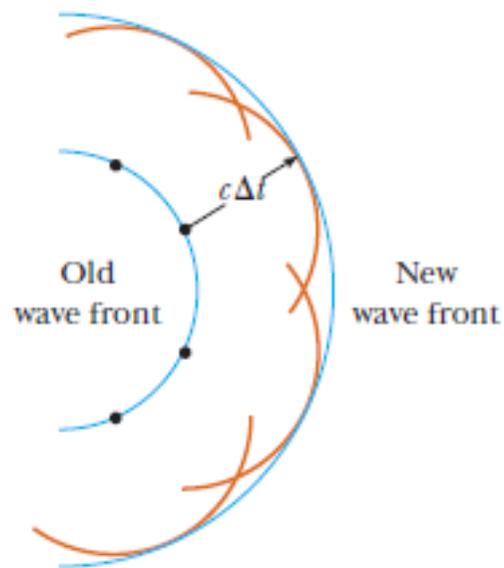


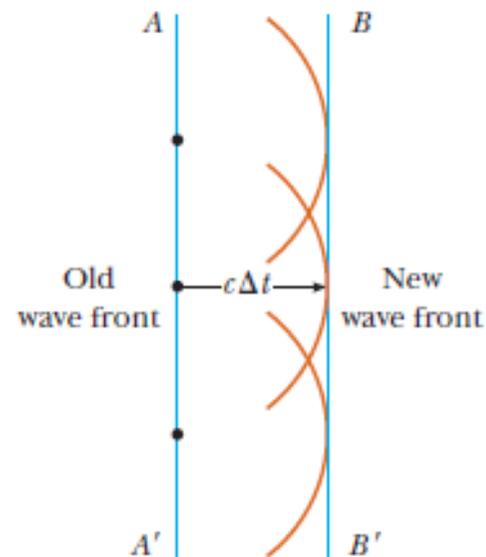
Figure 22.1 A plane wave traveling to the right. Note that the rays, corresponding to the direction of wave motion, are straight lines perpendicular to the wave fronts.

Princípio de Huygens

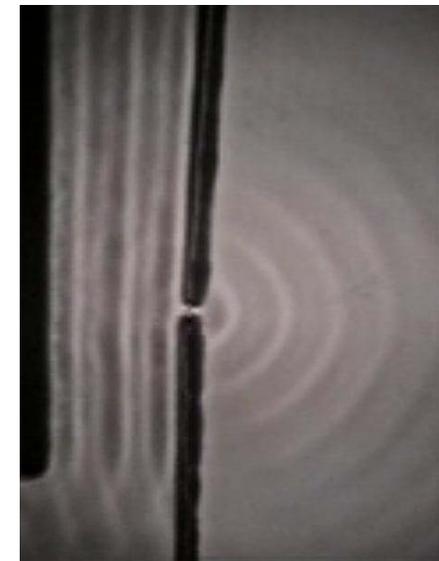
“Todos os pontos de uma certa frente de onda são fontes puntiformes de ondas esféricas secundárias, pequeninas ondas, que se propagam para frente com velocidade característica das ondas do meio. Depois de um certo intervalo de tempo, a nova posição da frente de onda é a superfície tangente a todas essas pequeninas ondas”.



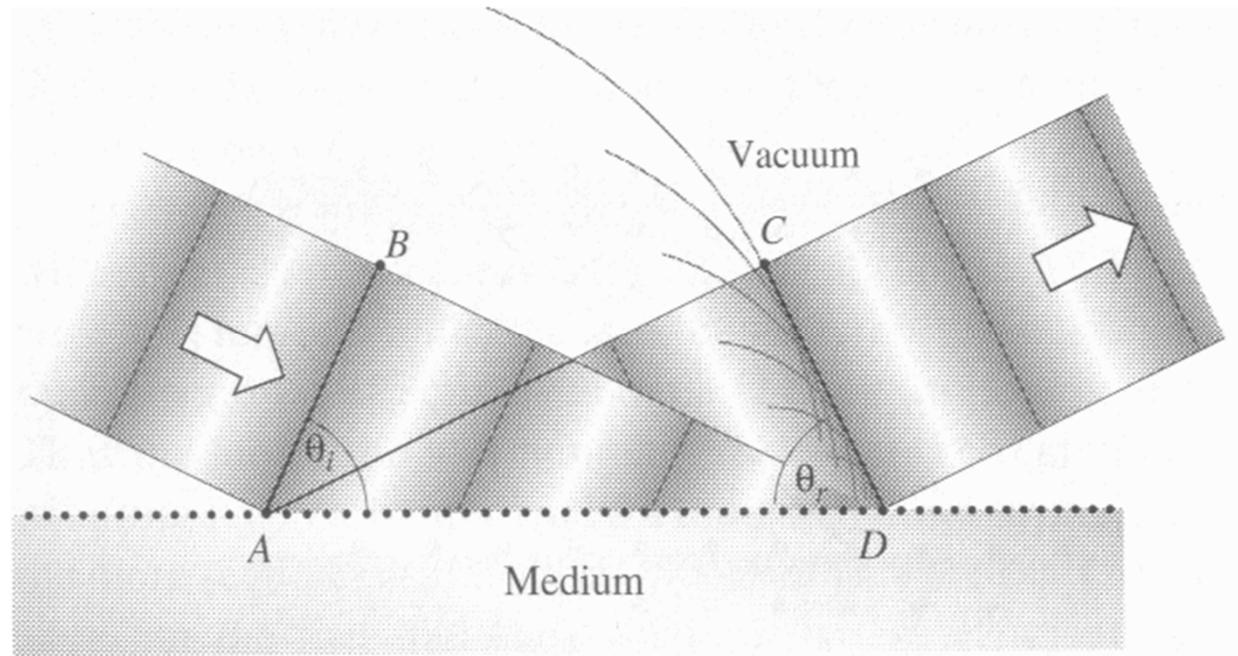
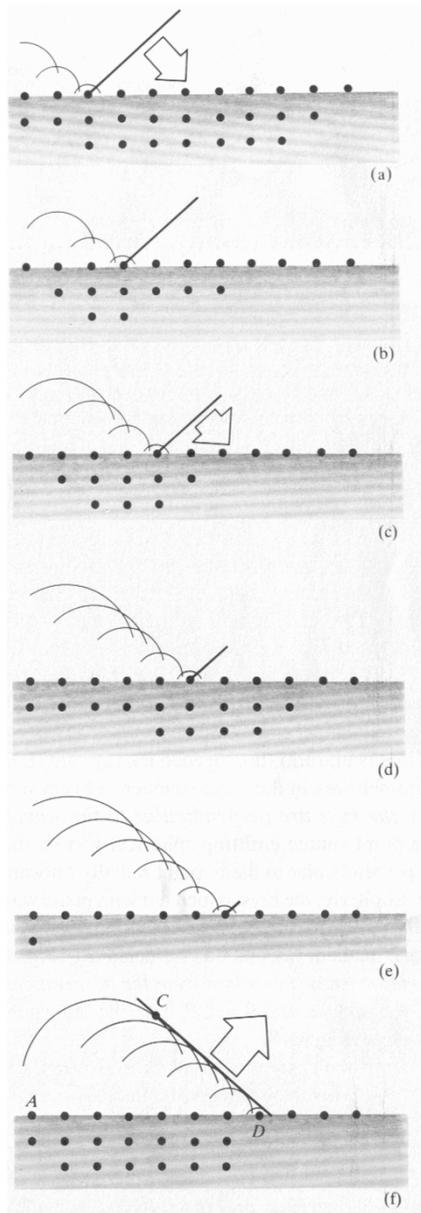
Onda esférica



Onda se propagando p/ direita



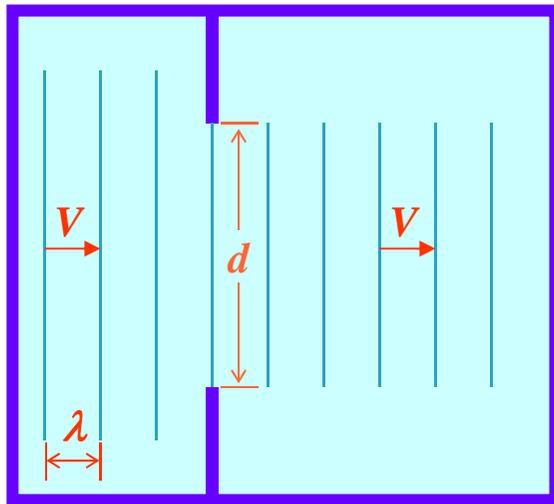
Tanque de ondas



Verificamos que na **reflexão**: $\theta_i = \theta_r$

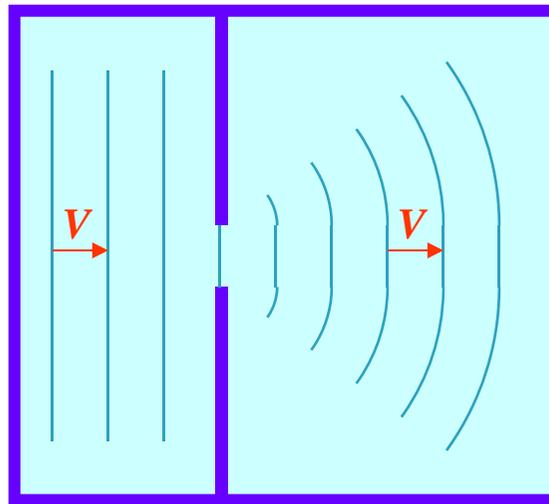
Difração em uma fenda

$$\lambda \ll d$$



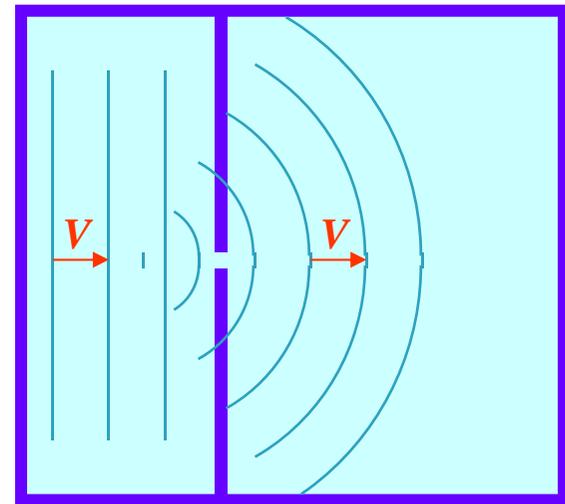
Não ocorre difração

$$\lambda \cong d$$



Ocorre difração

$$\lambda \gg d$$

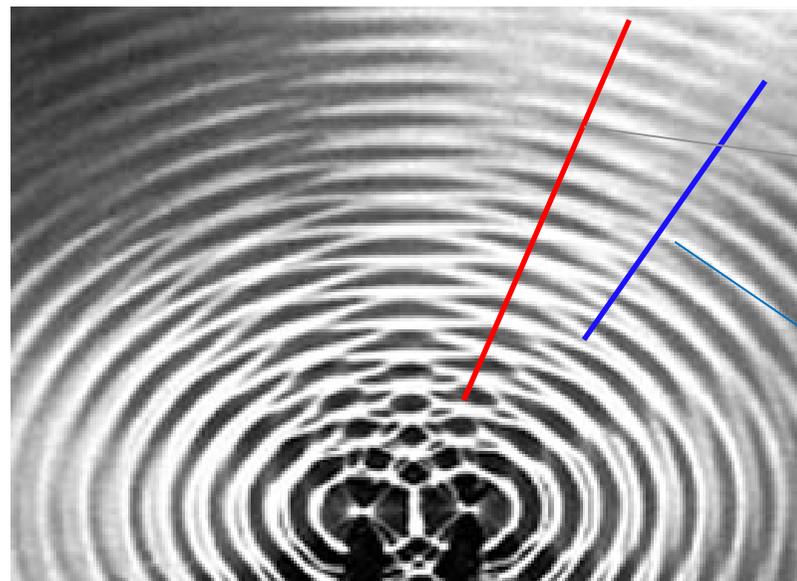


Ocorre difração acentuada

Interferência de duas ondas

Interferência: é quando ondas distintas, de mesmas características, geradas a partir de duas fontes, se sobrepõem em um ponto do espaço, a intensidade da onda resultante naquele ponto pode ser maior ou menor que a intensidade de qualquer uma das duas ondas.

A interferência pode ser tanto **construtiva** quanto **destrutiva** dependendo da fase relativa entre as duas ondas

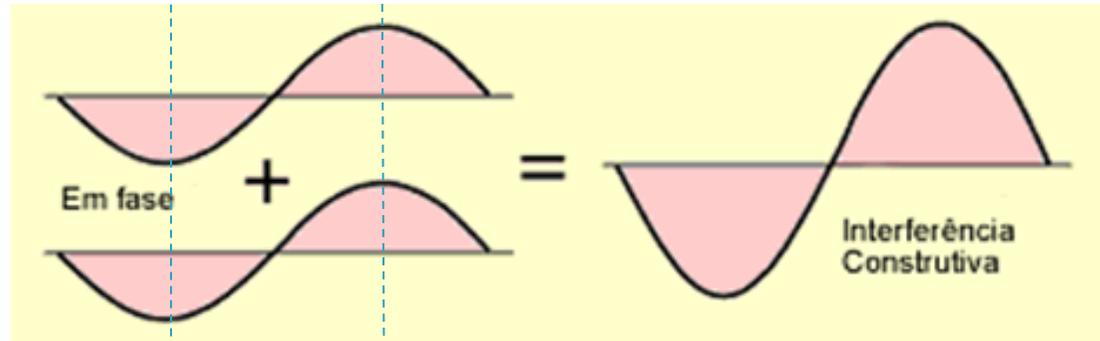


→ Interferência construtiva

→ Interferência destrutiva

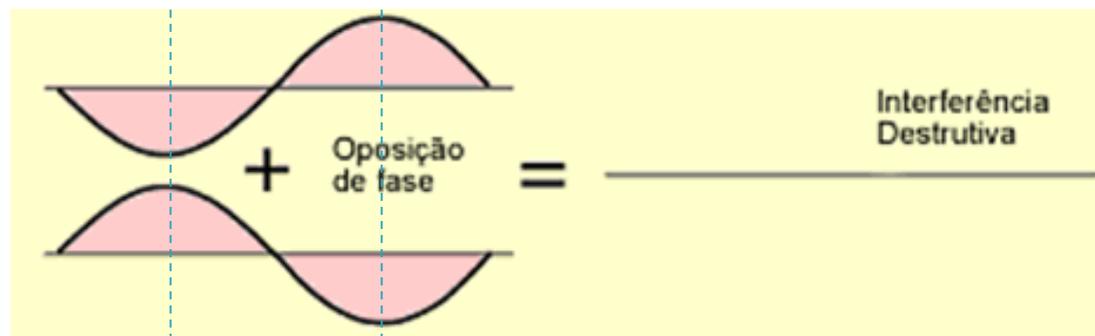
Interferência Construtiva:

Diferença de fase (em radianos) de duas ondas é de $0, 2\pi, 4\pi, \dots$



Interferência Destrutiva:

Diferença de fase (em radianos) de duas ondas é de $\pi, 3\pi, 5\pi, \dots$, ou seja, fora de fase 180° .



Não são fáceis de observar os efeitos da interferência das ondas luminosas em virtude dos curtos comprimentos de ondas que estão envolvidos (entre cerca $4 \cdot 10^{-7}$ m até cerca de $7 \cdot 10^{-7}$ m). Para se observar a interferência continuada das ondas luminosas é necessário cumprir as seguintes condições:

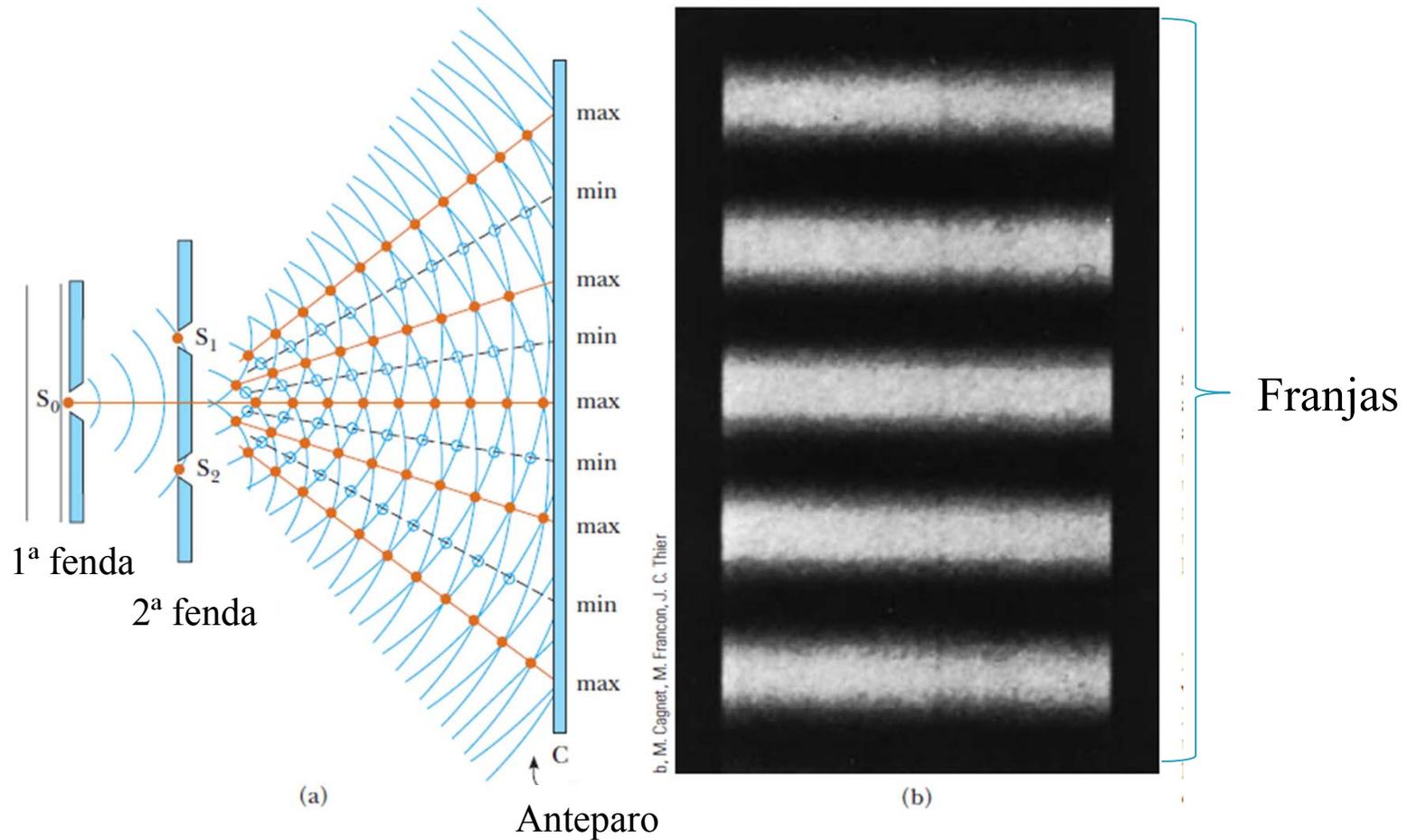
- As fontes devem ser **coerente**, isto é, deve manter uma relação de fase constante, uma com a outra.

Exemplo: Dois alto-falantes lado a lado, alimentados pelo mesmo amplificador.

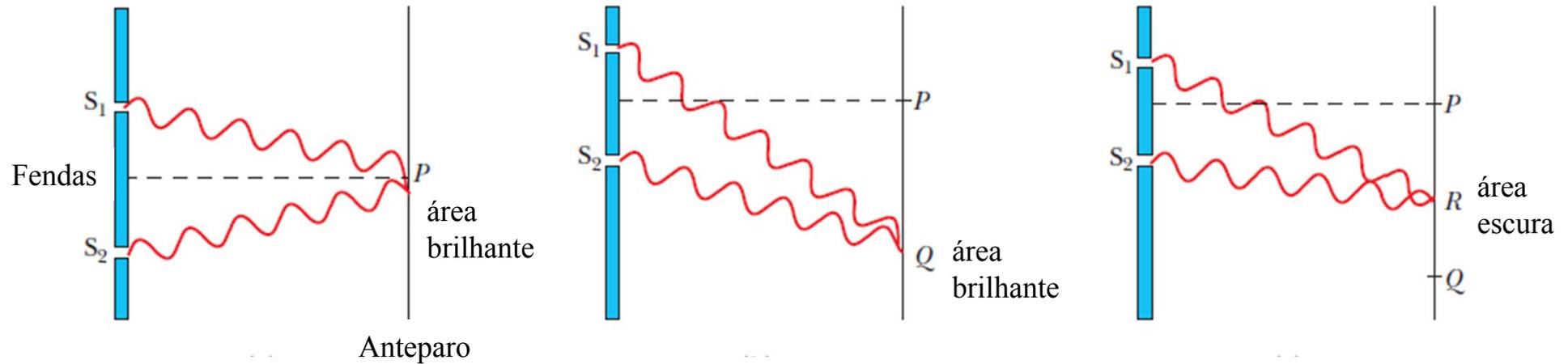
- As fontes devem ser **monocromáticas**, isto é, emitem um único comprimento de onda.
- O **princípio da superposição** deve ser aplicável.

Experiência da dupla fenda de Young

Thomas Young, em 1801



Uma forma qualitativa de se observar a experiência de Young

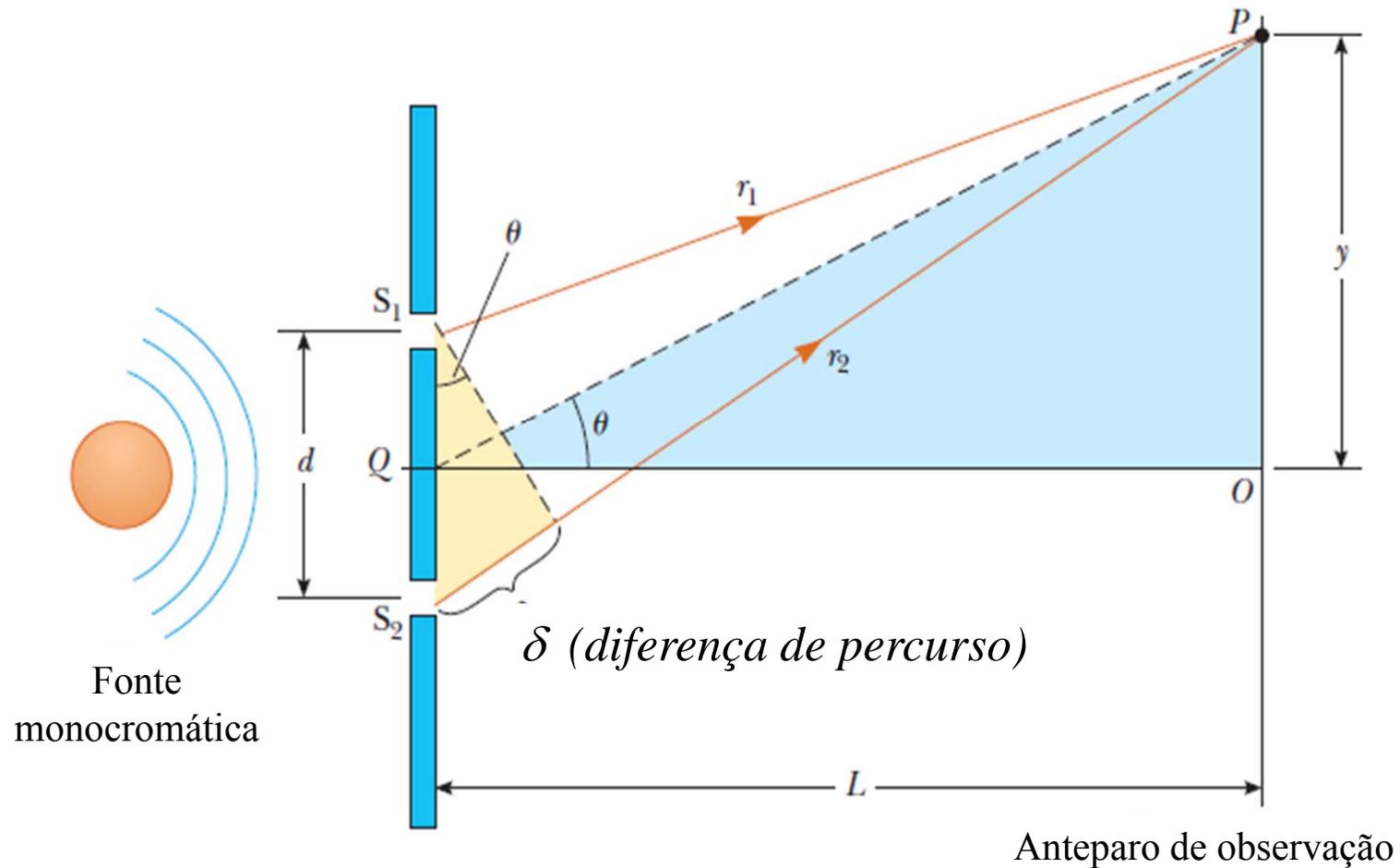


Interferência
Construtiva

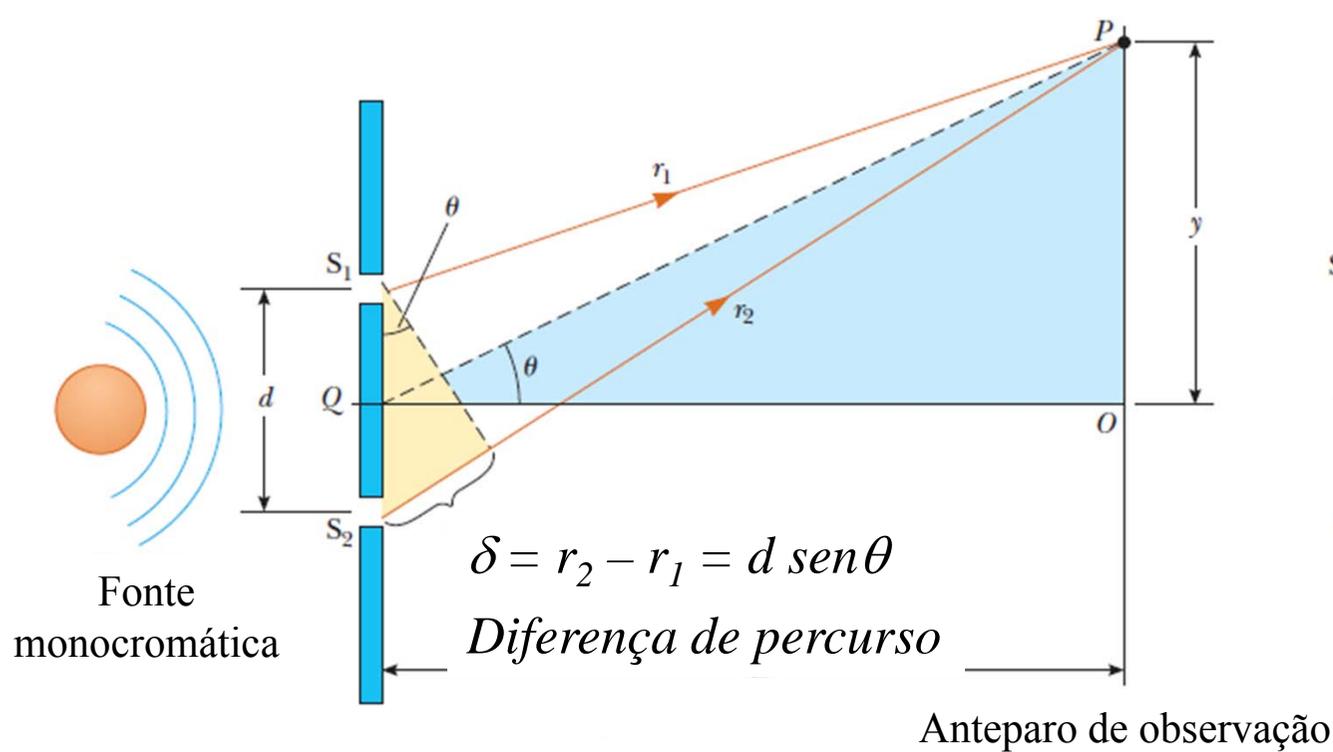
Interferência
Construtiva

Interferência
Destrutiva

Uma forma quantitativa de se observar a experiência de Young



$p/L \gg d \Rightarrow r_1$ e r_2 paralelos



Diferença de percurso:

Interferência Construtiva:

$$\delta = d \text{ sen } \theta = m\lambda$$

Interferência Destrutiva:

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

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

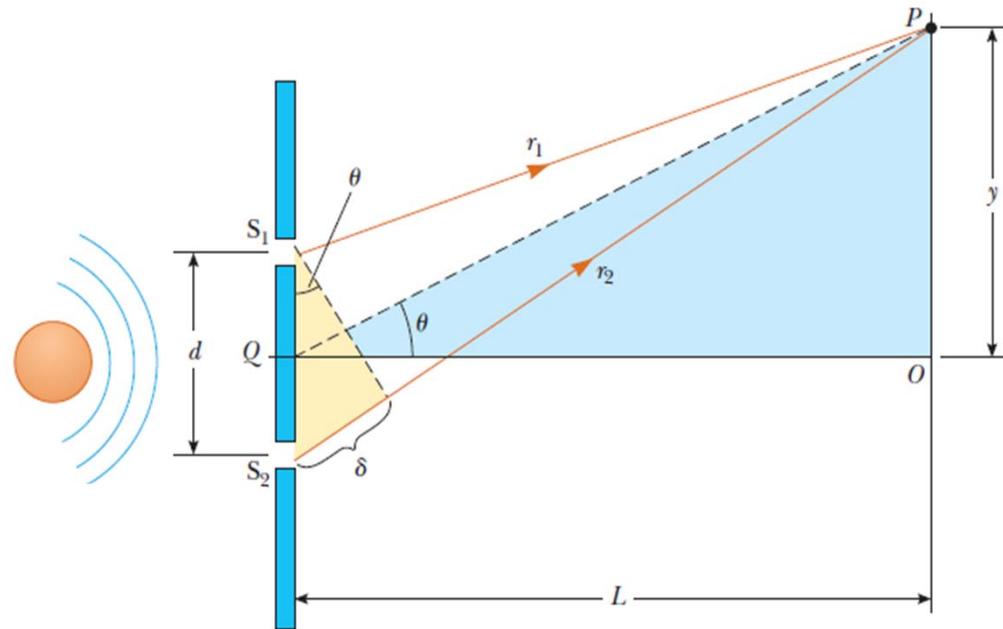
ordem da franja

$$p/L \gg d$$

Então, θ é pequeno

O triângulo OPQ

$$\text{sen } \theta \cong \tan \theta = \frac{y}{L}$$



Interferência Construtiva:

$$\delta = d \text{ sen } \theta = m\lambda$$

$$y_{\text{bril}} = \frac{\lambda L}{d} m$$

Interferência Destrutiva:

$$\delta = d \text{ sen } \theta = (m + 1/2)\lambda$$

$$y_{\text{esc}} = \frac{\lambda L}{d} (m + 1/2)$$

Exemplo 1:

A medida do comprimento de onda da luz de uma fonte

A distância entre um anteparo de observação e uma dupla fenda iluminada é 1,2 m. A distância entre as duas fendas é 0,03 mm. Uma franja brilhante, de segunda ordem ($m = 2$), está a 4,5 cm da linha central.

- (a) Determine o comprimento de onda da luz.
- (b) Calcular a distâncias entre as franjas brilhantes adjacentes.

Exemplo 2:

A distância entre as franjas brilhantes

Uma fonte de luz emite luz de dois comprimentos de onda na região do visível, dados por $\lambda = 430 \text{ nm}$ e $\lambda' = 510 \text{ nm}$. A fonte é usada numa experiência de dupla fenda na qual $L = 1,5 \text{ m}$ e $d = 0,025 \text{ mm}$. Achar a separação entre as franjas brilhantes de terceira ordem correspondente a esses comprimentos de onda.

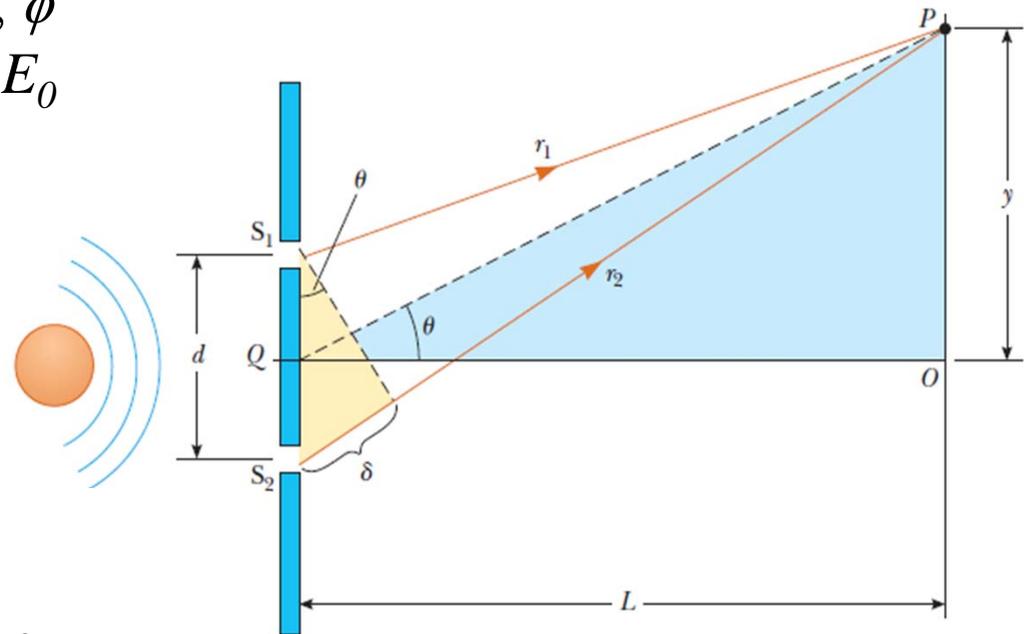
Distribuição de intensidade na figura de interferência

Coerente:

- mesma frequência angular, ω
- diferença de fase constante, ϕ
- mesma amplitude de onda, E_0

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1 = E_0 \text{sen} \omega t \\ E_2 = E_0 \text{sen}(\omega t + \phi) \end{array} \right.$$

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



$$\left\{ \begin{array}{l} E_1 = E_0 \text{sen} \omega t \\ E_2 = E_0 \text{sen}(\omega t + \phi) \end{array} \right.$$

Princípio da superposição: $E_p = E_1 + E_2 = E_0 [\text{sen} \omega t + \text{sen}(\omega t + \phi)]$

Identidade trigonométrica: $\text{sen}A + \text{sen}B = 2\text{sen}\left(\frac{A+B}{2}\right)\cos\left(\frac{A-B}{2}\right)$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \omega t + \phi \\ B = \omega t \end{array} \right.$$

Função de onda no ponto P: $E_p = 2E_0 \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\text{sen}\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right)$

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

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

Máximos de intensidade: $\frac{\phi}{2} = m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots$

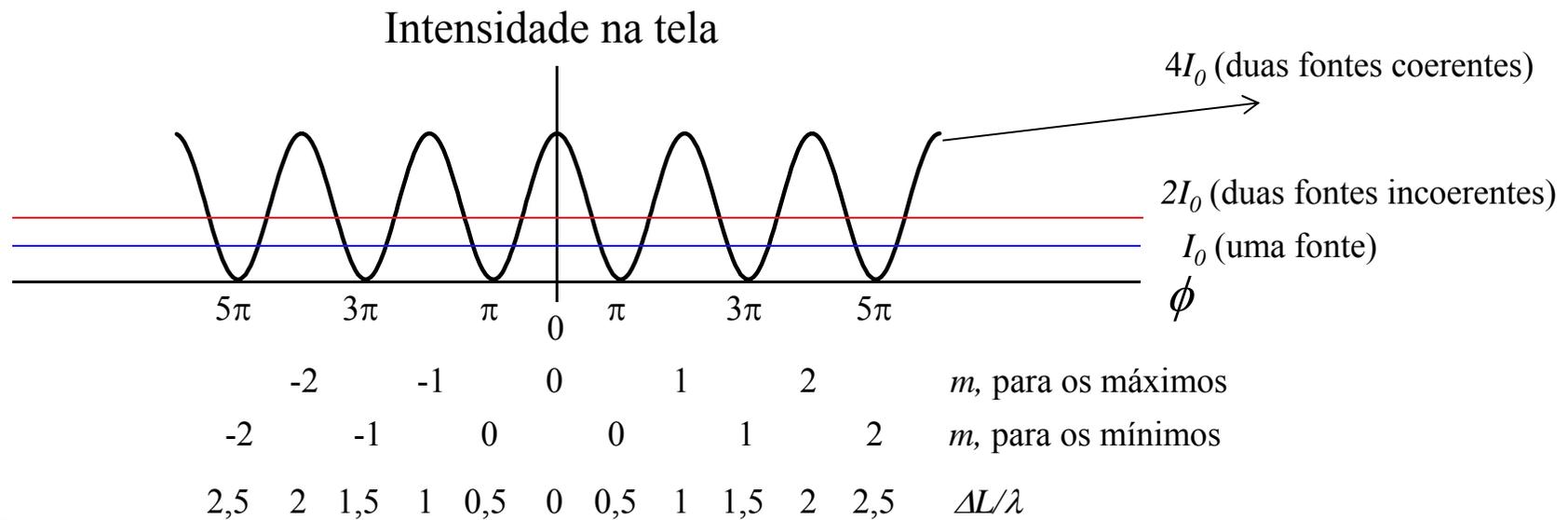
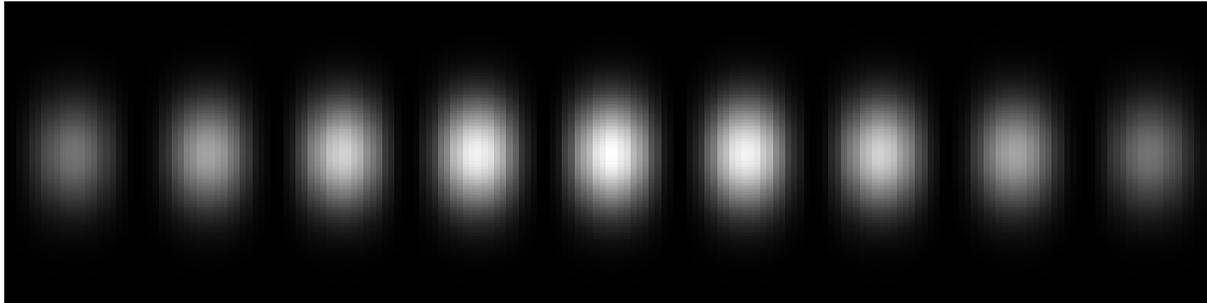
$$2m\pi = \frac{2\pi}{\lambda} d \text{sen} \theta \quad \longrightarrow \quad \boxed{d \text{sen} \theta = m\lambda} \quad \checkmark$$

Mínimos de intensidade: $\frac{\phi}{2} = (m + 1/2)\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots$

$$2\left(m + \frac{1}{2}\right)\pi = \frac{2\pi}{\lambda} d \text{sen} \theta \quad \longrightarrow \quad \boxed{d \text{sen} \theta = (m + 1/2)\lambda} \quad \checkmark$$

Intensidade: $I \propto E^2$

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)$$



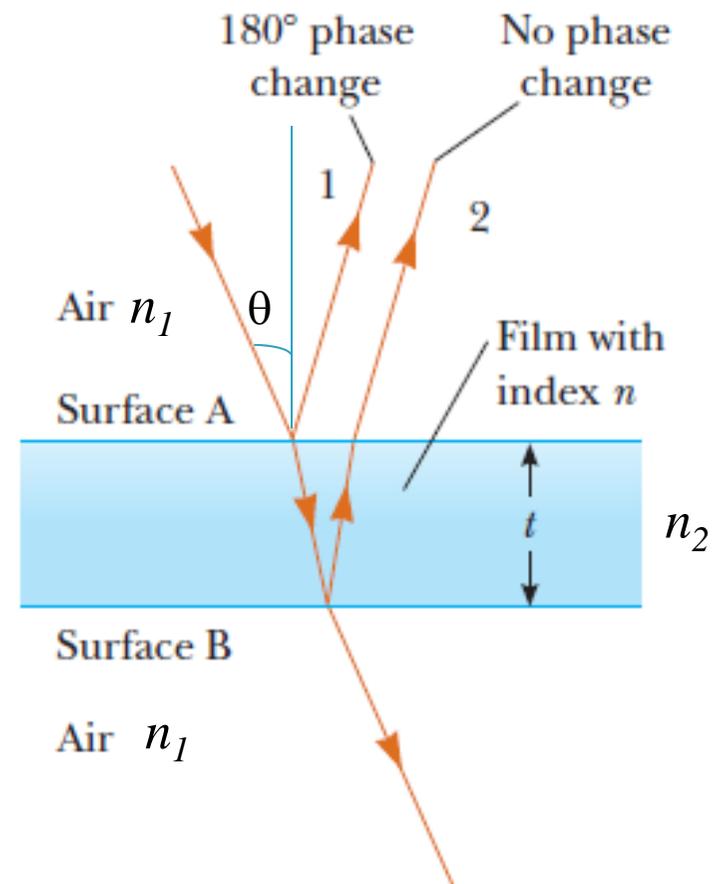
Interferência em filmes finos

A luz que incidente em um filme fino apresenta efeitos de interferência associadas à diferença de caminho óptico dentro do filme.

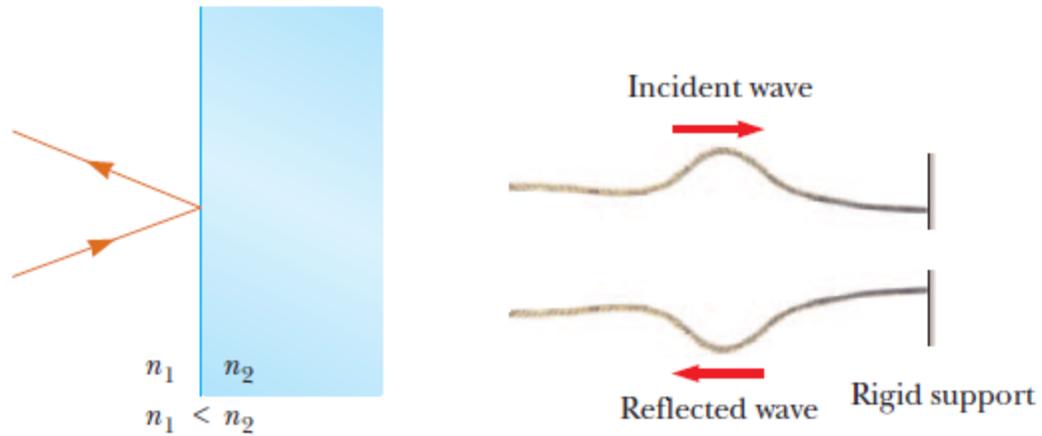
Considere: $\theta \approx 0$ e $n_2 > n_1$

Fato:

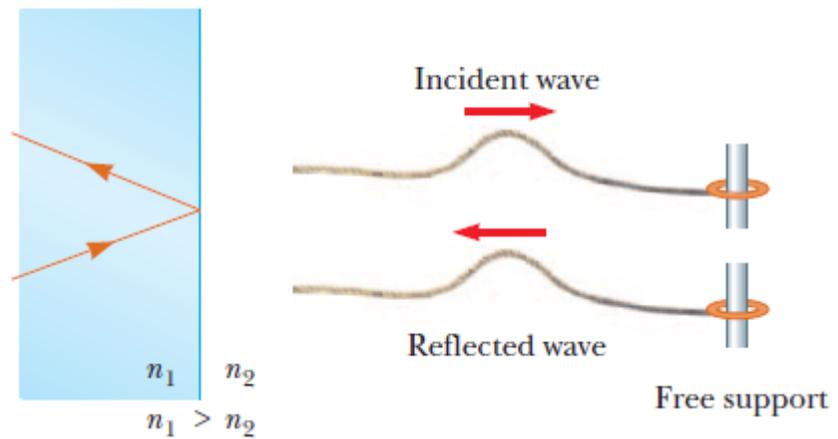
1. Incidência de 1 para 2, onde $n_2 > n_1$, o raio refletido tem defasagem de 180° e o refratado está em fase com o incidente.
2. Incidência de 1 para 2, onde $n_2 < n_1$, o raio refletido não tem defasagem.



Mudança de fase de 180°



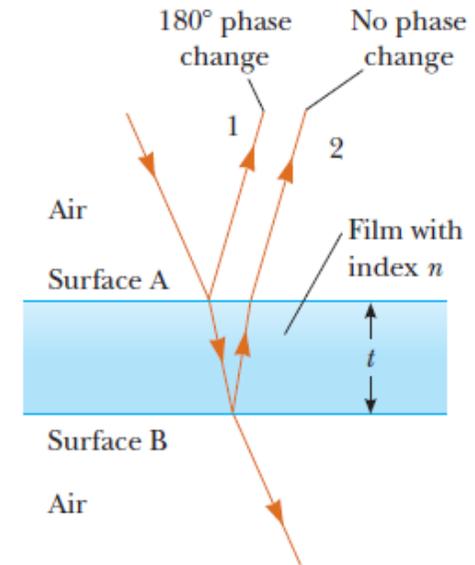
A mudança de fase é igual a 0°



Raio 1: $\phi = 180^\circ$ e $\delta = \lambda/2$

Raio 2: $\phi = 0^\circ$ e $\delta = 2t$

Interferência construtiva: $2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_2$
 $m = 0, 1, 2, \dots$

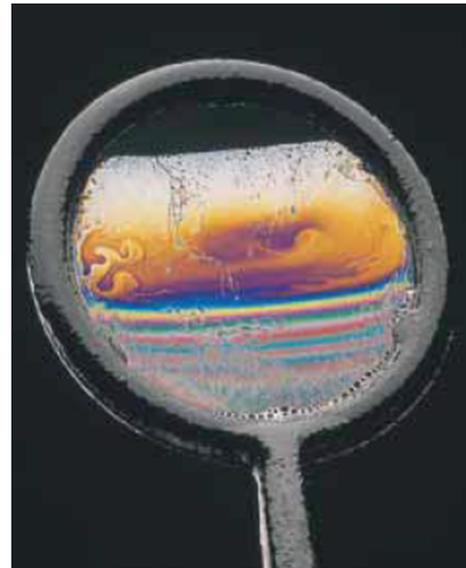


$\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2 = \lambda$ onde, λ é o comprimento de onda da luz no vácuo

$$2t \frac{n_2}{n_1} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_1 \quad \text{ou} \quad 2tn_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Interferência destrutiva: $2t = m\lambda_2$

$$2t \frac{n_2}{n_1} = m\lambda_1 \quad \text{ou} \quad 2tn_2 = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots$$



Exemplo 3:

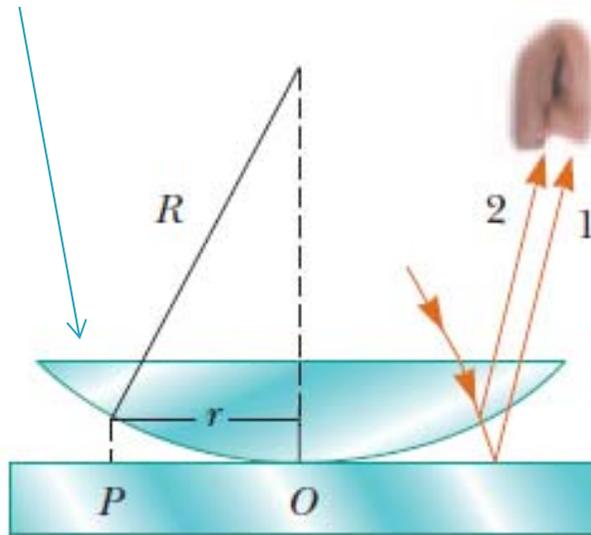
Interferência numa bolha de sabão.

(a) Calcular a espessura mínima de uma película de bolha de sabão ($n = 1,33$) que provocará interferência construtiva na luz refletida, se a película for iluminada com luz de comprimento de onda, no vácuo, igual a 600 nm.

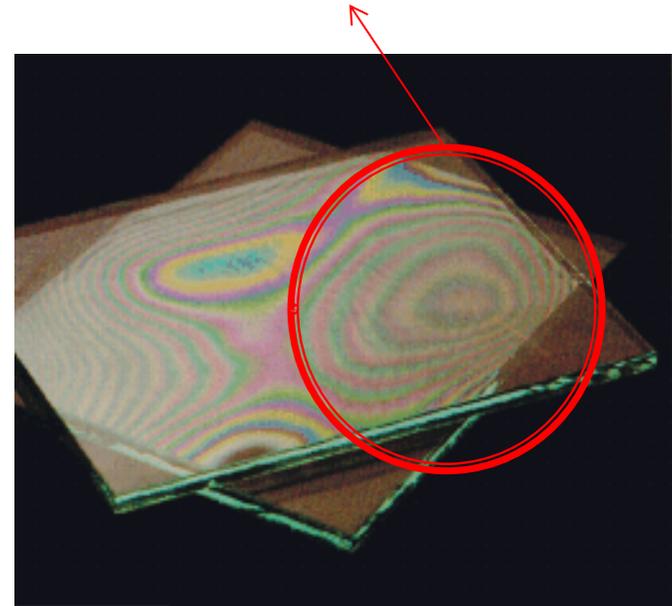
(b) Quais outras espessuras que provocarão interferência construtiva?

ANÉIS DE NEWTON

Lente plano-convexa

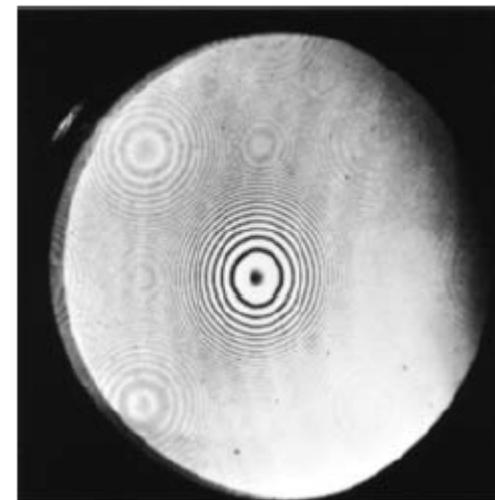
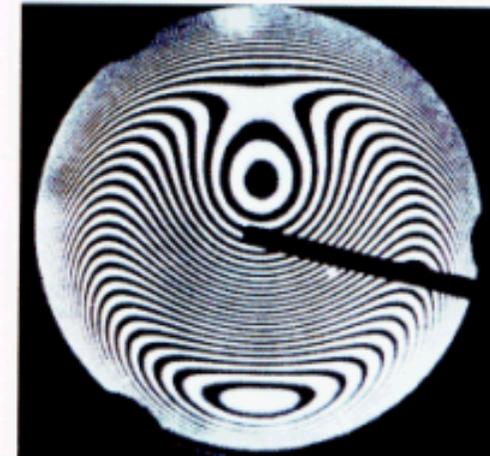
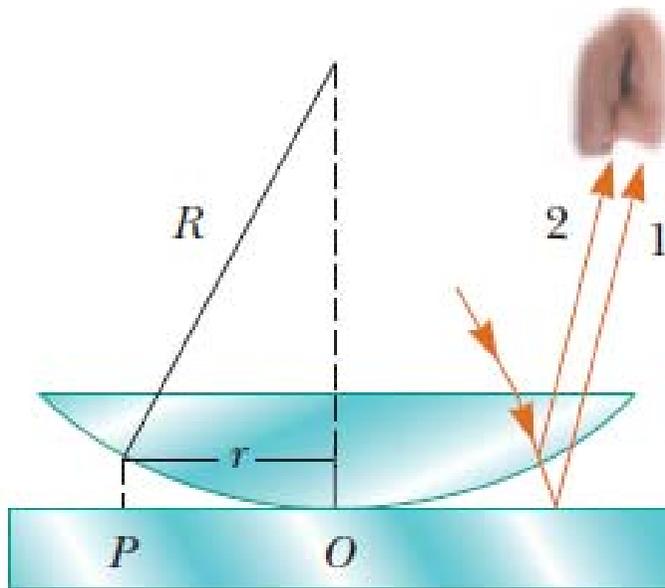


Anéis de Newton



Anéis escuros:
$$r \approx \sqrt{\frac{m\lambda R}{n}}$$

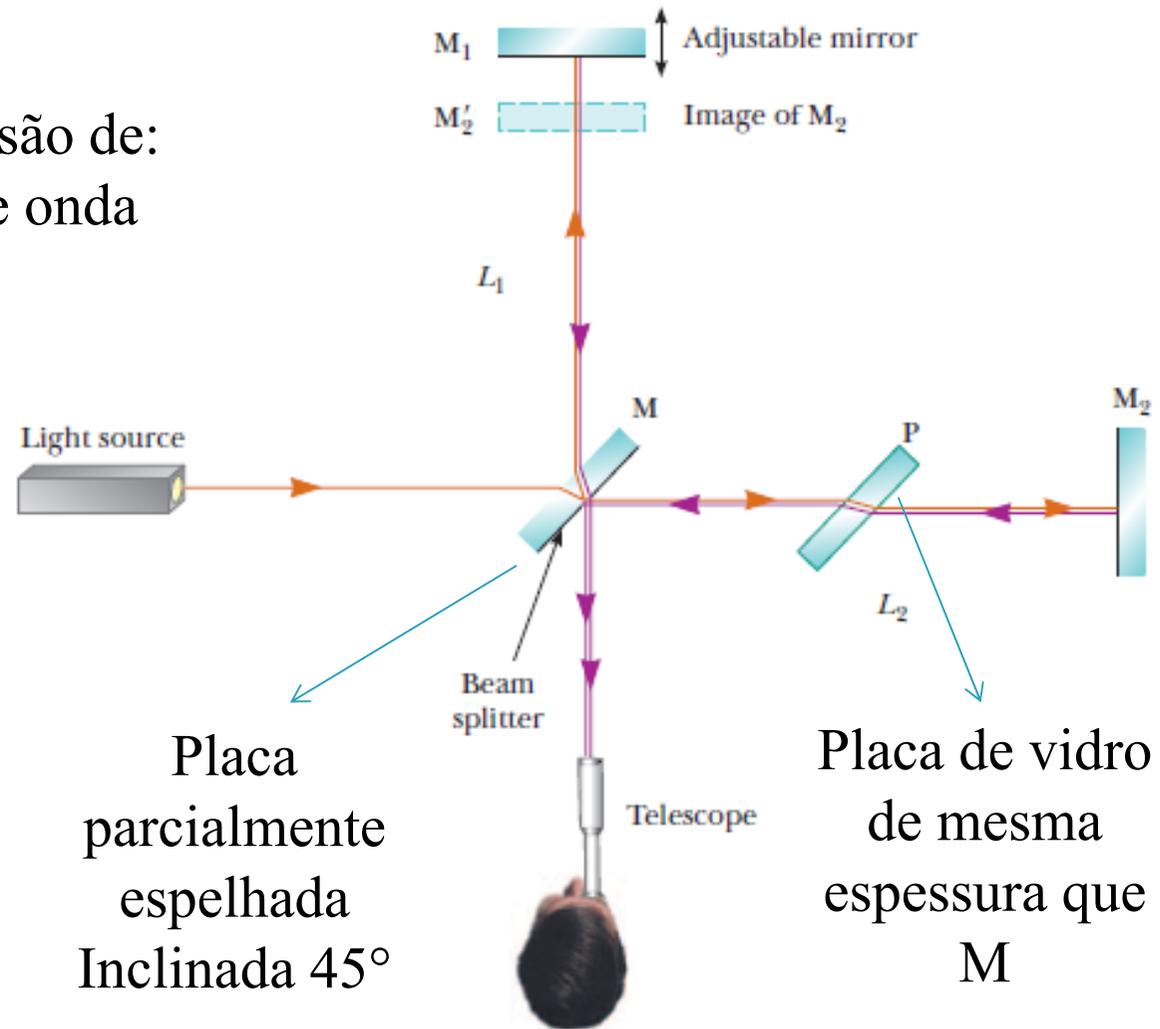
Polimento de lentes ópticas



Interferômetro de Michelson

Medições de precisão de:

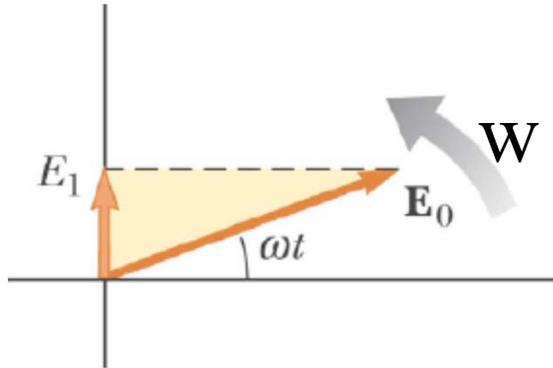
- comprimento de onda
- distâncias



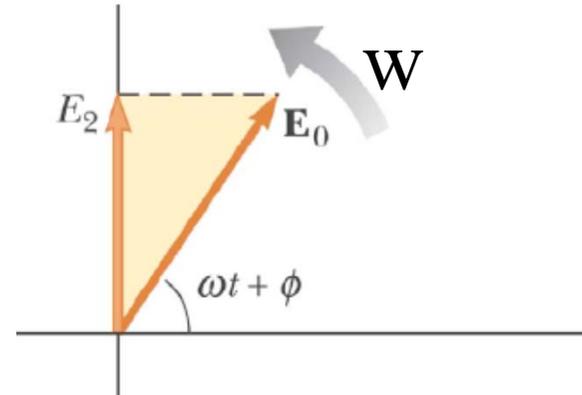
Anexos

Combinação de campos pelo método dos fasores

$$E_1 = E_0 \text{sen} \omega t$$

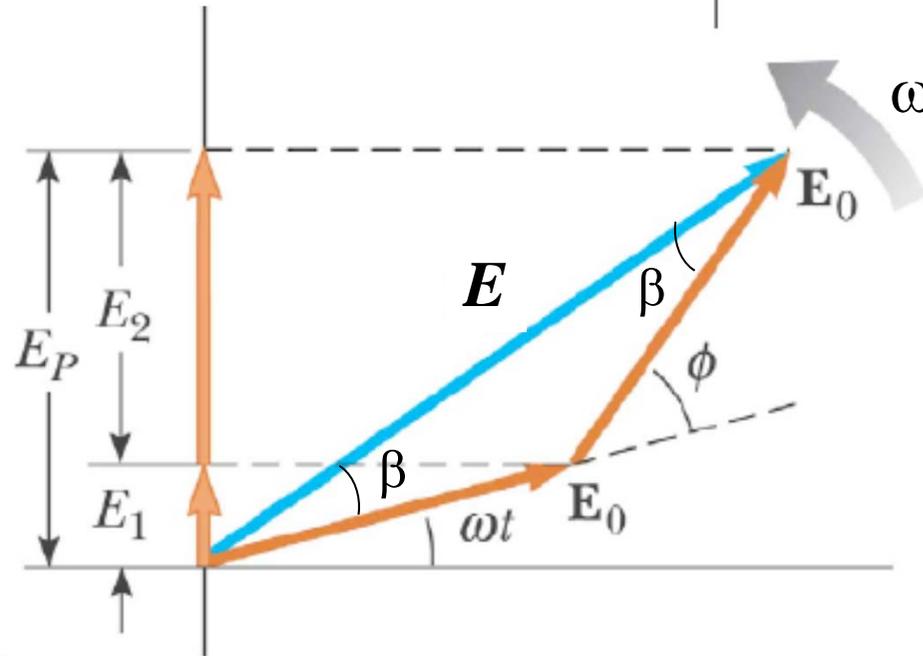


$$E_2 = E_0 \text{sen}(\omega t + \phi)$$



+

=



Usar fasores !!!

