

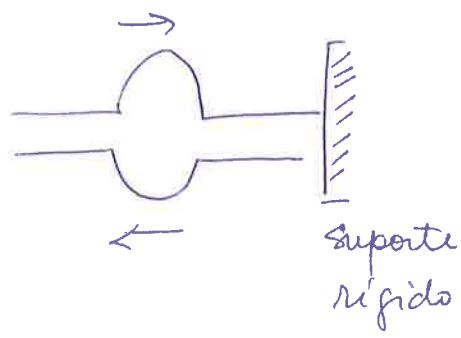
* Mudança de fase em virtude de reflexões

3ª AULA

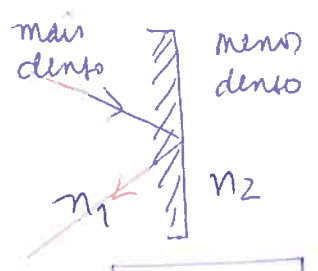
1



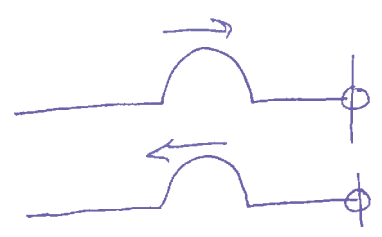
$$n_1 < n_2$$



Ha' uma inversão de fase (180°)



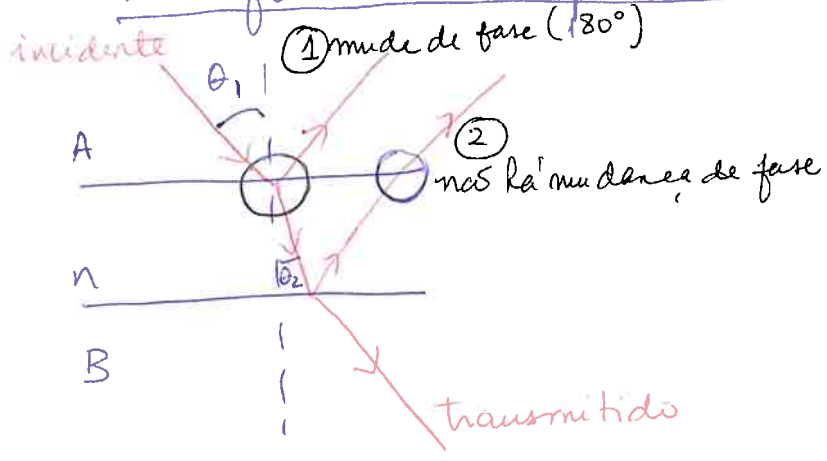
$$n_1 > n_2$$



Nas ha' inversões de fase
(prova: leis de Maxwell \Rightarrow fora do escopo)

* Interferência em películas delgadas

Comumente observadas
* Cores nas bolhas de sabão
* Camadas finas de óleo



$$n_A \sin \theta_1 = n \sin \theta_2$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n}{n_A}$$

Se $n > n_A \Rightarrow \theta_1 > \theta_2$ (se aproximado da normal)

A interferência se deve à combinação dos raios refletidos nas interfaces superior e inferior.

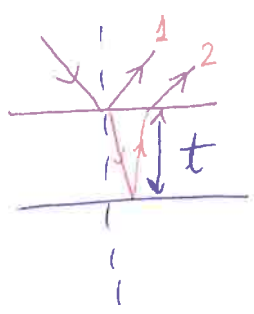
- ① $n_1 \rightarrow n_2 \Rightarrow n_1 > n_2$ (nao ha' mudança de fase)
- $n_1 \rightarrow n_2 \Rightarrow n_1 < n_2$ (ha' mudança de fase de 180°)

② $\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$ onde $\lambda \equiv$ comprimento de onda da luz no vácuo
meio qualquer

Aplicar essas regras !!

$$n = \frac{c}{v} = \frac{c}{\lambda_n f} \Rightarrow \lambda_n = \frac{\lambda}{n}$$

1



O raio 1 tem 1 diferença de fase de 180° em relação ao raio 2. (2)

Diferença de percurso de $\frac{\lambda_n}{2}$

O raio 2 percorre uma distância extra $= 2t$ (incidência normal)

Se $2t = \frac{\lambda_n}{2} \Rightarrow$ os raios 1 e 2 se recombinam em fase \Rightarrow Interferência construtiva

* Condição de interferência construtiva:

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_n \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

↑ ↑ ↑
mudança de 180°

diferença de percurso óptico

Como $\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \Rightarrow 2t = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{n}$

$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$

Interferência construtiva

* Condição de interferência destrutiva:

$$2t = m \lambda_n \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \Rightarrow \text{(continua defasada de } 180^\circ \text{ nas reflexões)}$$

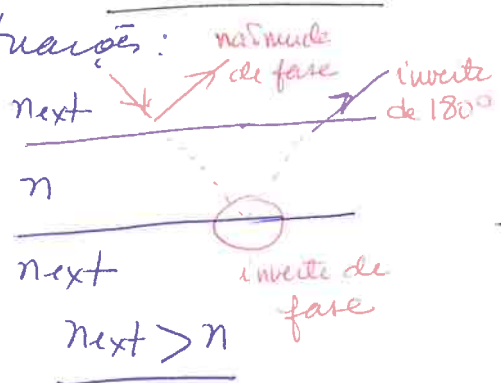
$$2t = m \frac{\lambda}{n} \Rightarrow$$

$2nt = m \lambda$

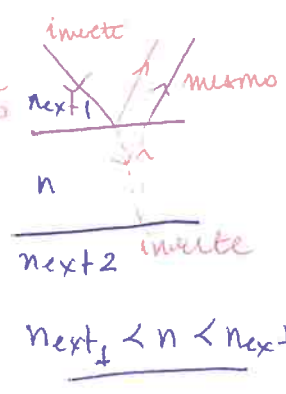
Interferência destrutiva

* Outras situações:

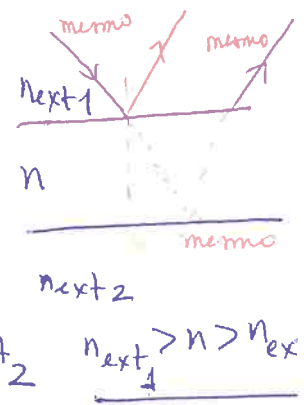
next
n
next
Caso estudado
next < n



Ficam trocadas as condições acima

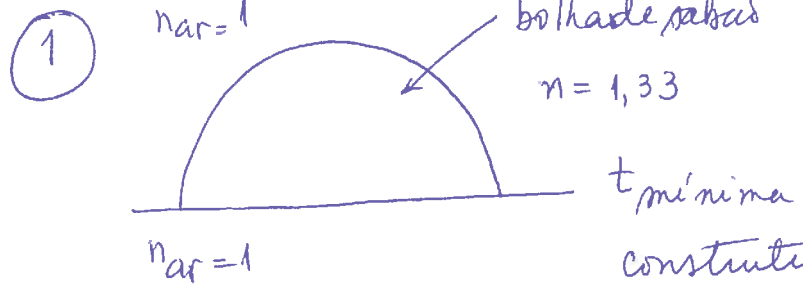


mude de fase



mudança de fase é nul

* Exemplos :



Bolha de sabão

$t_{\text{mínima}}$ para provocar interferência construtiva na luz refletida a 600nm (laranja)

Interferência construtiva: $2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$

mínimo $\Rightarrow t_{\text{min}} \Rightarrow m=0 \Rightarrow 2nt_{\text{min}} = \frac{\lambda}{2}$

$2 \times 1,33 \times t_{\text{min}} = \frac{600}{2} \Rightarrow t_{\text{min}} = \frac{600}{4 \times 1,33} = 113 \text{ nm}$

Quais as outras espessuras que provocaram interferência construtiva:

$2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda \Rightarrow m=1 \Rightarrow 2nt_1 = \frac{3}{2}\lambda \Rightarrow t_1 = \frac{3 \times 600}{4 \times 1,33} = 338 \text{ nm}$ (uv)

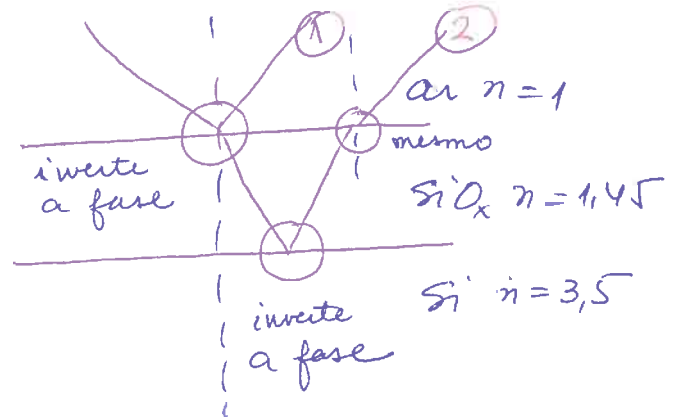
$m=2 \Rightarrow 2nt_2 = \frac{5}{2}\lambda \Rightarrow t_2 = \frac{5 \times 600}{4 \times 1,33} = 564 \text{ nm}$ (amarelo)

$m=3 \Rightarrow 2nt_3 = \frac{7}{2}\lambda \Rightarrow t_3 = \frac{7 \times 600}{4 \times 1,33} = 789 \text{ nm}$ (vermelho)

2) Revestimentos anti-refletores para células solares

Oxido de silício $n_{\text{SiO}_2} = 1,45$

silício $n_{\text{Si}} = 3,5$



Determinar a espessura mínima de película que produzirá menor reflexão num comprimento de onda de 550nm (parte central do espectro visível) (verde)

Queremos os raios 1 e 2 em interferência destrutiva

Os dois raios sofrem mudança de fase de 180° . A mudança total de fases é outra.

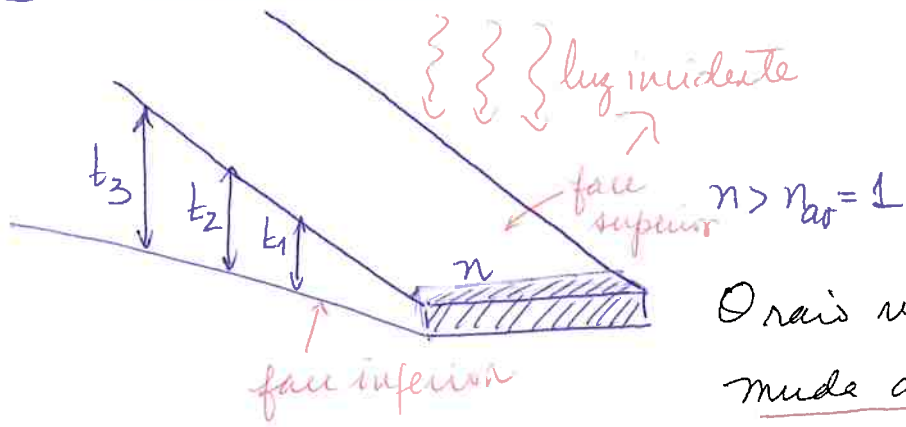
Interferência destrutiva $2nt = \frac{\lambda}{2}$
 $m=1$

ou $2t = \frac{\lambda n}{2} \Rightarrow t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{550}{4 \times 1,45}$

$t = 94,8 \text{ nm}$

3) Película em forma de curva

(4)



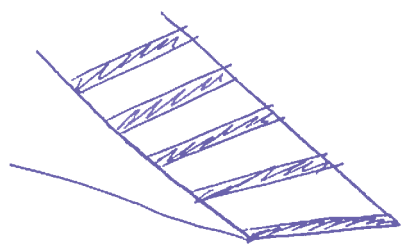
Na base da curva ocorre uma inversão de fase de 180° (franjas escuras)

O raio refletido na face superior muda de fase e o raio refletido na face inferior nes muda de fase.

Franjas escuras : $2nt = m\lambda$ (destrutiva) }

Franjas claras (brilhantes) : $2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$ (constitutiva) }

$$\left\{ \begin{array}{l} t_1 = \frac{\lambda}{2n} \quad (m=1) \\ t_2 = \frac{\lambda}{n} \quad (m=2) \\ t_3 = \frac{3\lambda}{2n} \quad (m=3) \\ t_0 = \frac{\lambda}{4n} \quad (m=0) \\ t_1 = \frac{3\lambda}{4n} \quad (m=1) \\ t_2 = \frac{5\lambda}{4n} \quad (m=2) \\ \dots \end{array} \right.$$



Anéis de Newton \Rightarrow polimento de lentes (outro método de observar interferência de onda de luz)

Transparência 1

* O interferômetro de Michelson Transparência 2

- Divide o feixe de luz em 2 partes
- Partes se recombinaem depois de percorrer \neq s percursos mede-se L_1 e L_2 e λ com precisas.

trajetos diferentes
- Parafuso com roca micrométrica \Rightarrow Se H_1 desloca-se de $\frac{\lambda}{4}$ o percurso altera de $\frac{\lambda}{2}$ \Rightarrow interferência construtiva e destrutiva $\Rightarrow n\frac{\lambda}{4} \equiv q\frac{\lambda}{2}$ andou.

* A luz que passa através de uma pequena abertura se espalha em diferentes direções. Fenômeno de difração (5)
(nes se vê uma imagem nítida da abertura)

Ondas sonoras, ondas de água também se propagam em torno dos obstáculos. Fenômeno de difração

Fontes ondulatórias coerentes guardam uma relaç de fase constante

* Ondas eletromagnéticas: ondas transversais $\Rightarrow \vec{E}, \vec{B}$ e \vec{k} \perp a \vec{v}
Luz polarizada \Rightarrow vibraç direcional de \vec{E}
Luz normal (comum) \Rightarrow não é polarizada $\Rightarrow \vec{E}$ vibra em todas as direções \perp a \vec{k}

* Caso em que as fendas $\gg \lambda$
(experiência de Young de fenda dupla)
as ondas não interferem

* Caso em que as fendas têm dimensões $\sim \lambda$
 \Rightarrow interferência \Rightarrow Prova de natureza ondulatória da luz

* A difração é o afastamento da luz em relação à reta de propagação inicial Transparência T7

* Classificação dos fenômenos de difração Transparência T8

- ① Difração de Fraunhofer \Rightarrow raios que interferem nas \perp a \vec{k} .
- ② Difração de Fresnel \Rightarrow raios que interferem nas \perp a \vec{k} .

* Difração de Fraunhofer
- Tela de observação longe da abertura (ou)
- lente convergente para focalizar os raios \perp sobre a tela.
- $\theta = 0$ (franja brilhante)

* Difração de Fresnel

(6)

- Tela de observação a uma distância finita da fenda e nelas usa lente para focalizar os raios paralelamente.
 - Complicado de analisar quantitativamente.
- (Vamos nos limitar a estudar a difração de Fraunhofer)

* Difração em uma fenda simples

Transparência T8

Princípio de Huygens: cada segmento da fenda atua como se fosse uma fonte de ondas. A luz que vem de um segmento da fenda pode interferir com a luz de outros segmentos. A intensidade depende da direção θ .

* Intensidade na figura de difração de uma fenda simples

Usar fasores para determinar a distribuição de intensidades

- A fenda é dividida num grande número de pequenas zonas de largura Δy . Cada zona contribui ΔE para a amplitude do campo elétrico em P

Transparência T9

- As ondas têm uma diferença de fase $\Delta\beta$ correspondente à diferença de percurso $\Delta y \sin\theta$. Arzaf

$$\frac{\Delta\beta}{2\pi} = \frac{\Delta y \sin\theta}{\lambda} \Rightarrow \Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta y \sin\theta$$

permite calcular a diferença de fase total:

(a) $\theta = 0 \Rightarrow$ todos os fasores estão alinhados $E_0 = N \Delta E$

(b) $\theta > 0$, mas pequeno $\Rightarrow \beta = N \Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin\theta$

T8

(c) $\beta = 2\pi \Rightarrow \sin\theta = \frac{\lambda}{a} \Rightarrow$ concorda com o resultado anterior. mínimo

(d) $\beta = 3\pi \Rightarrow$ segundo máximo $(360^\circ + 180^\circ) = (540^\circ)$

$\beta = 4\pi \Rightarrow$ segundo mínimo $(720^\circ = 4\pi \text{ rad}) \Rightarrow \sin\theta = \frac{2\lambda}{a}$

* Intensidade

- Δy se toma infinitesimal $\rightarrow dy$
- N tende a infinito $\rightarrow N \rightarrow \infty$

Transparência T10

* A sequência de fasores se torna uma curva arredondada

Para um certo ângulo $\theta \Rightarrow E_\theta \equiv$ amplitude da onda sobre a tela

$E_0 \equiv$ comprimento de cada

$E_0 \equiv$ comprimento do arco

* Temos pelo triângulo: $\text{sen } \frac{\beta}{2} = \frac{E_\theta/2}{R} \Rightarrow E_\theta = 2R \text{sen} \left(\frac{\beta}{2} \right)$

* Comprimento do arco: $E_0 = R\beta \Rightarrow E_\theta = \frac{2E_0}{\beta} \text{sen} \left(\frac{\beta}{2} \right)$

$$E_\theta = E_0 \left[\frac{\text{sen}(\beta/2)}{(\beta/2)} \right]$$

* Intensidade $\propto E_\theta^2 \Rightarrow I_\theta = I_0 \left[\frac{\text{sen}(\beta/2)}{(\beta/2)} \right]^2$

$$I_\theta = I_0 \left[\frac{\text{sen}(\pi a \text{sen} \theta / \lambda)}{(\pi a \text{sen} \theta / \lambda)} \right]^2$$

* Os mínimos ocorrem quando $\frac{\pi a \text{sen} \theta}{\lambda} = m\pi$

$$\left| \frac{\text{sen} \theta = \frac{m\lambda}{a}}{a} \right| \begin{cases} m = \pm 1 \\ m = \pm 2 \\ m = \pm 3 \dots \end{cases}$$

* Resolução de fenda simples e de aberturas circulares

- Se S_1 e $S_2 \Rightarrow$ há superposição das figuras de difração de S_1 e S_2 Transparência T11

- Para decidir quando duas imagens estão resolvidas:

Critério de Rayleigh

Quando o máximo central de uma imagem se superpõe ao primeiro mínimo de outra imagem, as duas imagens estão minimamente resolvidas → limite de resolução

Transparência T11

* Primeiro mínimo de uma fenda de difração

$$a \sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

$$a \approx \lambda \Rightarrow \text{pequeno } \theta \approx \theta \Rightarrow \theta_m \approx \frac{\lambda}{a}$$

$$a \equiv \text{largura de fenda}$$

O ângulo subtendido pelas duas fontes deve ser no máximo $\frac{\lambda}{a}$

* Para aberturas circulares

$$\theta_m = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

$$D \equiv \text{diâmetro da abertura}$$

↳ análise complicada

* Resolução do olho

$D_{\text{pupila}} = 2 \text{ mm}$
 $\lambda_{\text{ar}} = 500 \text{ nm (verde)}$
 $n_{\text{olho}} = 1,33$

$$\frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{olho}}} = \frac{\lambda_{\text{olho}}}{\lambda_{\text{ar}}} \Rightarrow \lambda_{\text{olho}} = \frac{\lambda_{\text{ar}}}{n_{\text{olho}}} = \frac{500}{1,33} = 376 \text{ nm}$$

$$\theta_m = \frac{1,22 \times 376 \times 10^{-9}}{2 \times 10^{-3}} = 0,0131^\circ$$

2 fontes a 25 cm = L
do olho

Fio de cabelo $\equiv d$

$$\theta_m \approx \frac{d}{L}$$

$$\frac{d}{57 \mu\text{m}}$$

* Rede de difração

Dispositivo para analisar fontes luminosas, contendo por um grande número de fendas paralelas igualmente espaçadas. (espaço entre as linhas gravadas → fenda) → Metalização sobre vidro

- rede com 5000 linhas $d = \frac{1}{5000 \text{ cm}^{-1}} = 2 \times 10^{-4} \text{ cm}$ (espaçamentos)

Transparência T12

* As fendas atuam como fontes de onda \Rightarrow
as ondas que partem das fendas têm a mesma fase.

* A diferença de percurso entre quaisquer duas fendas adjacentes \equiv $|d \sin \theta|$

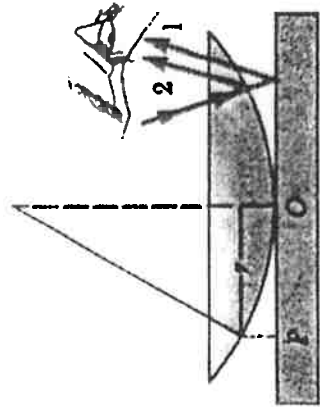
* Interferência construtiva (linha brilhante, máximos)

$$|d \sin \theta = m \lambda| \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

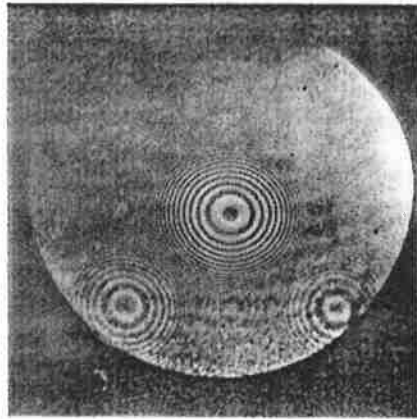
\rightarrow pode-se determinar λ se conhecemos d e θ
 $m \equiv$ ordem de difração.

* Todos os comprimentos de onda são observados em $\theta = 0$
(máximo de ordem zero)

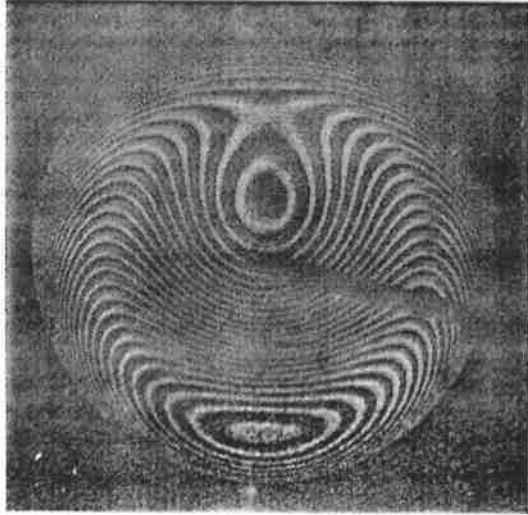
* A distribuição de intensidade é tal que os máximos são bastante nítidos e as regiões escuras são largas (Telescópio é uma medida de várias ordens)



(a)



(b)



(c)

Fig. 37.19 (a) A combinação aos raios refletidos pela placa de vidro e pela superfície curva da lente gera uma figura de interferência conhecida como anéis de Newton. (b) Foto de anéis de Newton. (Cortesia de Bausch and Lomb Optical Co.) (c) A figura de interferência assimétrica indica imperfeições na lente. (Do Physical Science Study Committee, *College Physics*, Lexington, Mass., Heath, 1968)

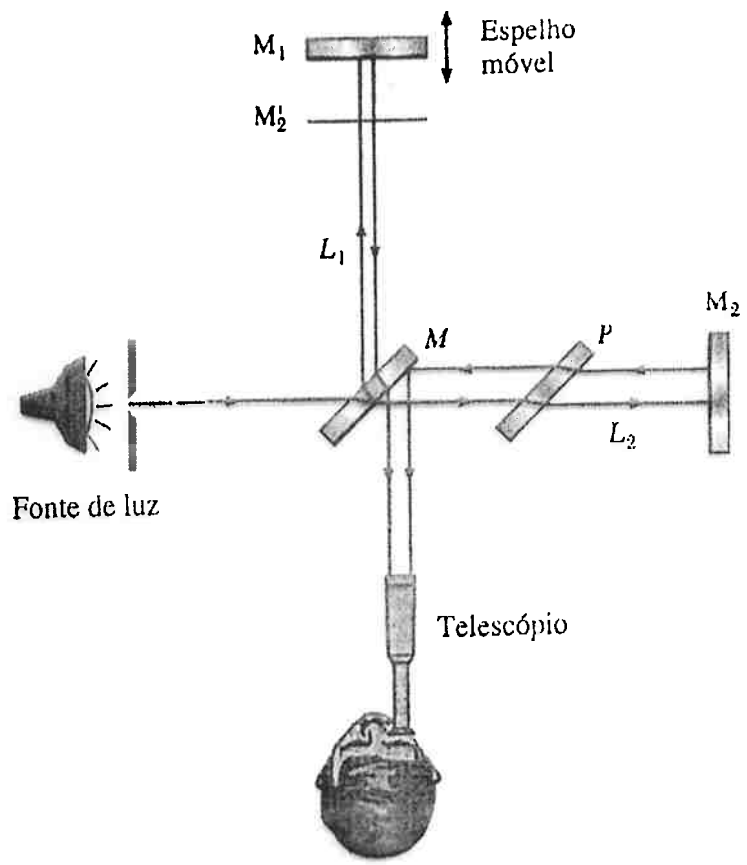
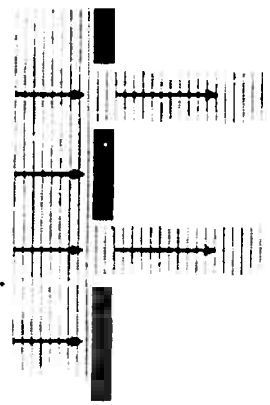


Fig. 37.20 Diagrama do interferômetro de Michelson. Um único feixe é dividido em dois por uma placa parcialmente espelhada M . A diferença de percurso entre os dois raios pode variar pela posição do espelho móvel M_1 .

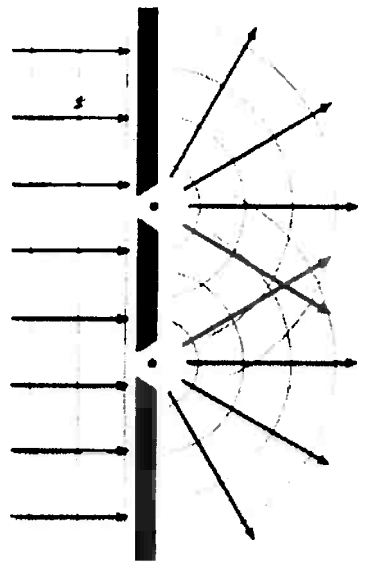
(1)

7



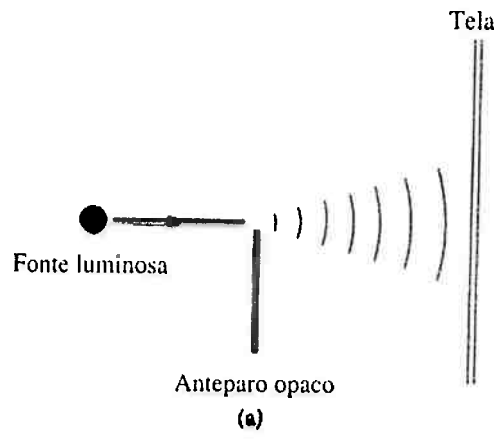
(a)

⇒ NÃO HÁ INTERFERÊNCIA

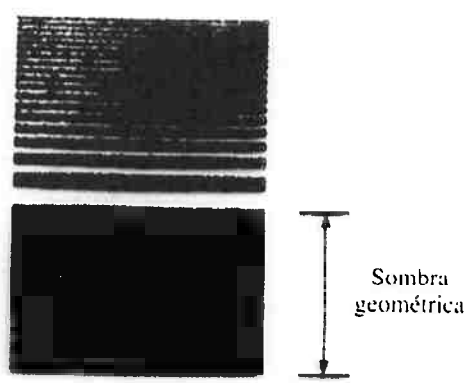


(b)

⇒ AS ONDAS AO PASSAREM PELAS FENDAS SE SUPERPÕEM E FORMAM FRANJAS DE INTERFERÊNCIA



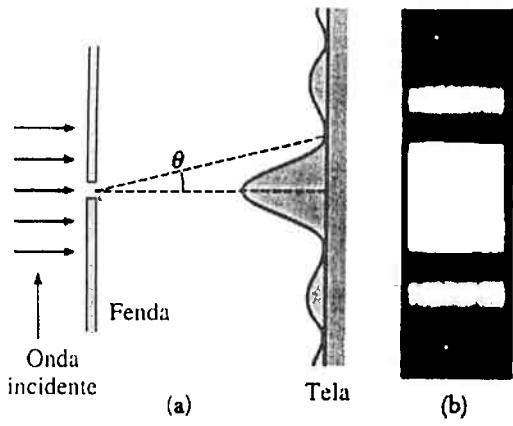
(a)



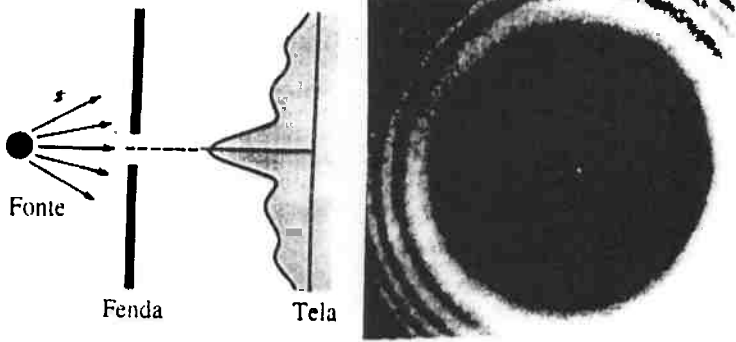
(b)

A LUZ SE DESVIA AO PASSAR PELO ANTEPARO

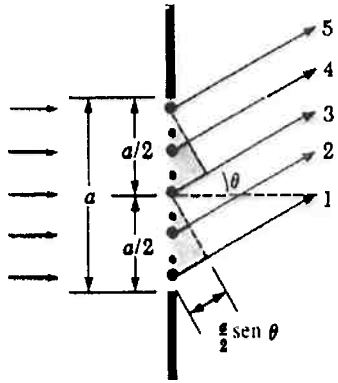
⇒ FRANJAS DE INTERFERÊNCIA



⇒ Difração de Fraunhofer

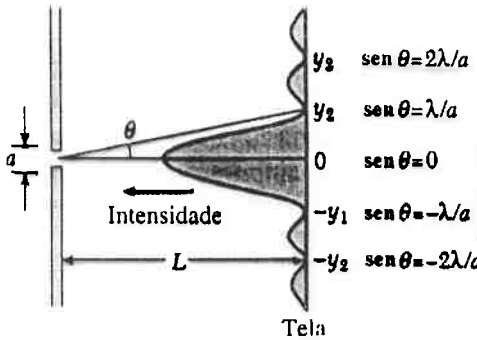


⇒ Difração de Fresnel



⇒ Difração num fendo simple

Se a diferença de percurso for exatamente
meio comprimento de onda ($\lambda/2$), as duas
 ondas se cancelam (diferença de fase de 180°)



Interferência destrutiva (metade de cima da
 fenda e metade de baixo da
 fenda)

2 partes: $\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$
 4 partes: $\frac{a}{4} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$

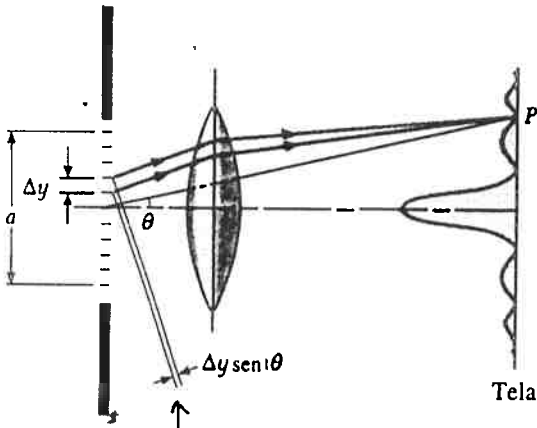
$$\boxed{\sin \theta = m \frac{\lambda}{a}} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

Ondas provenientes das 2 metades cuja
 distância de origem e 1 metade do
 tamanho de fenda estas defasadas de 180°

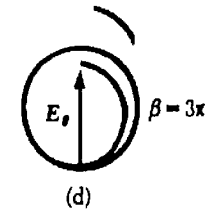
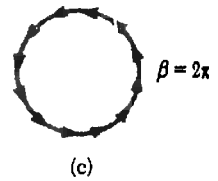
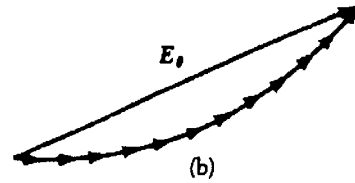
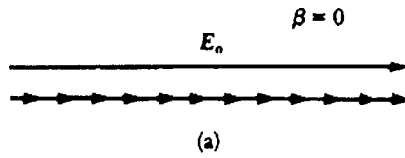
INTENSIDADE NA FIGURA DE DIFRAÇÃO

3

79



diferença de percurso $\Delta y \sin \theta$
 que uma diferença de fase
 $\Delta \beta$.



(a) $\theta = 0 \Rightarrow$ as ondas de cada zona
 estão em fase.

$$E_0 = N \Delta E$$

(b) $E_\theta \Rightarrow$ soma vetorial das
 amplitudes elementares
 $E_\theta < E_0$

$$\beta = N \Delta \beta = \frac{2\pi}{\lambda} N \Delta y \sin \theta$$

\Downarrow

largura do fenda

(c) θ aumenta $\Rightarrow E_\theta = 0$
 \Downarrow (soma vetorial nula)
primeiro mínimo observado
na tela.

$$\beta = 2\pi = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$$

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

(d) espirala!!

Mínimos:

$$\sin \theta = \pm m \frac{\lambda}{a}$$

$m = 1, 2, 3, \dots$

INTENSIDADE

T10

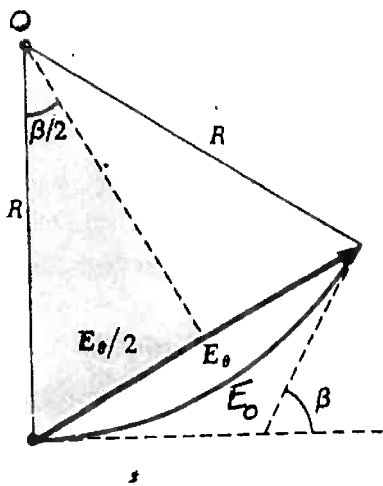


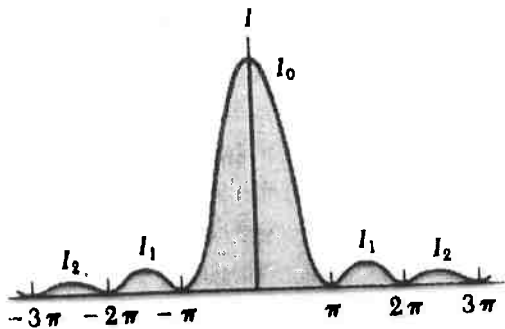
Diagrama de fasores

$\Rightarrow N \rightarrow \varnothing$ fontes coerentes

$$\text{Arco} = E_0$$

$$\text{Corda} = E_\theta$$

Gráfico de intensidade I vs. $\beta/2$



$$I_\theta = I_0 \left[\frac{\text{sen}(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2$$

a) $\rightarrow \beta/2$



\Rightarrow figura de difração de Fraunhofer numa fenda simples.

Intensidade Relativa dos Máximos:

$$\frac{\beta}{2} \sim \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \frac{7\pi}{2}, \dots$$

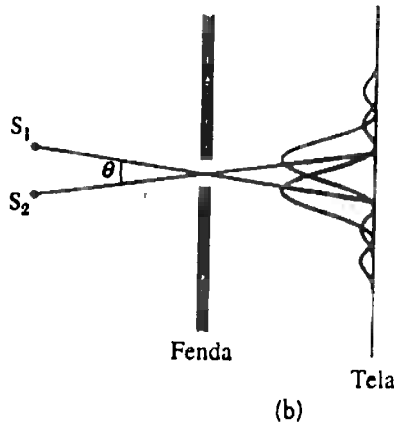
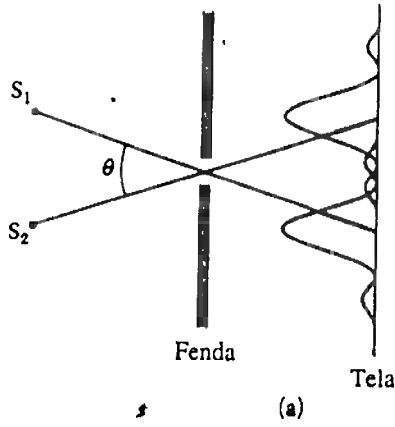
$$\frac{I_1}{I_0} = \left[\frac{\text{sen}(3\pi/2)}{3\pi/2} \right]^2 = 0,045 \quad (4,5\% \text{ de força central!})$$

$$\frac{I_2}{I_0} = \left[\frac{\text{sen}(5\pi/2)}{5\pi/2} \right]^2 = 0,016 \quad (1,6\% \text{ de força central!})$$

RESOLUÇÃO DE FENDAS SIMPLES E DE ABERTURAS CIRCULARES

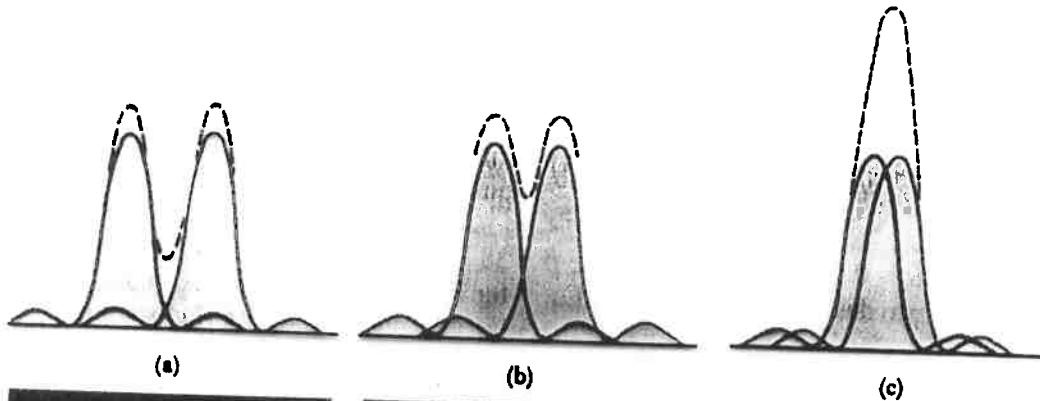
(c)

T11



(a) O ângulo θ é grande e as figuras de difração são distintas.

(b) O ângulo θ é pequeno e as figuras de difração se sobrepõem.



(a) resolvida

(b) minimamente resolvida

(c) não resolvida

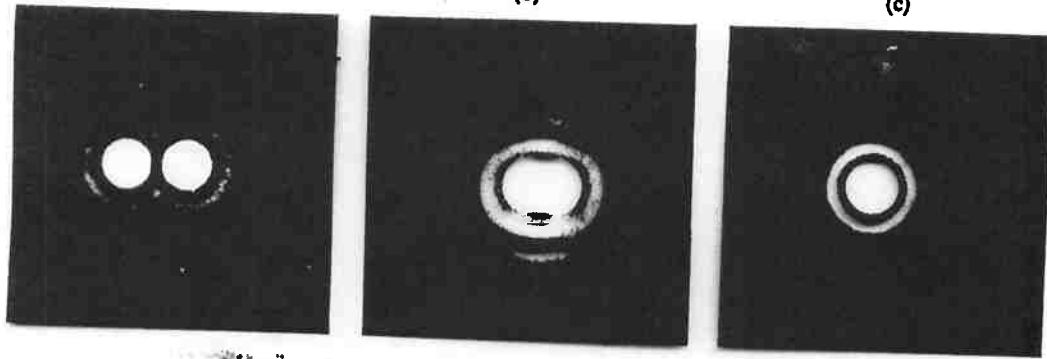
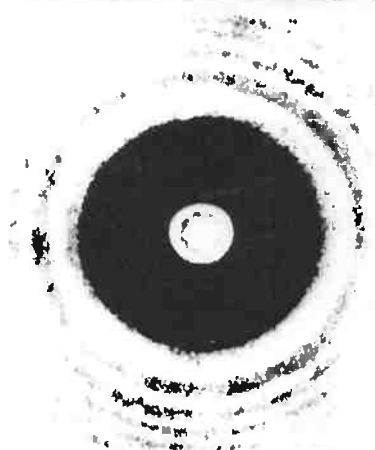


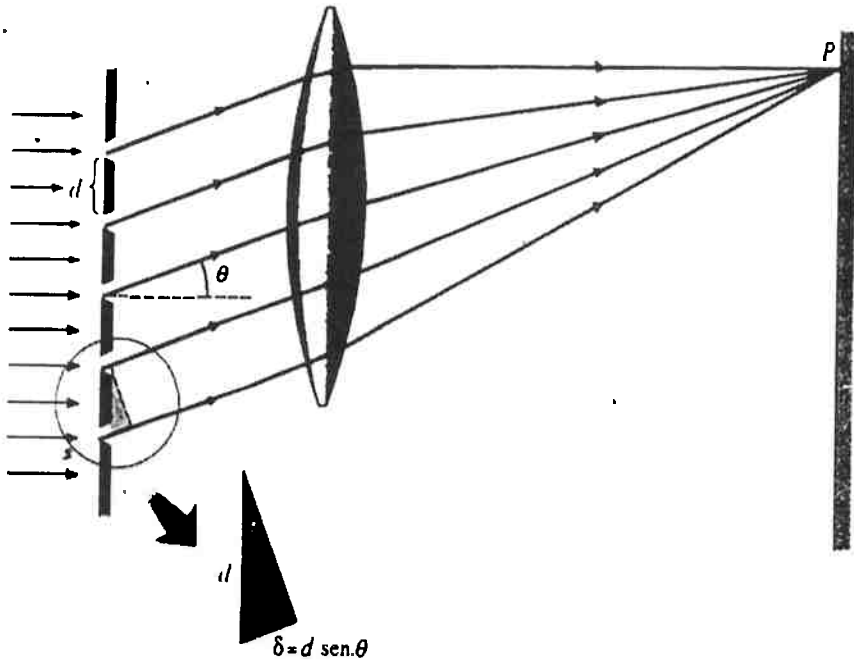
Figura de difração de Fraunhofer de uma abertura circular



REDE DE DIFRAÇÃO

(6)

T12

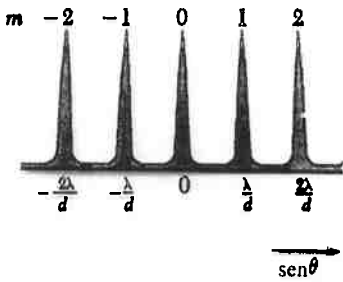


Rede:

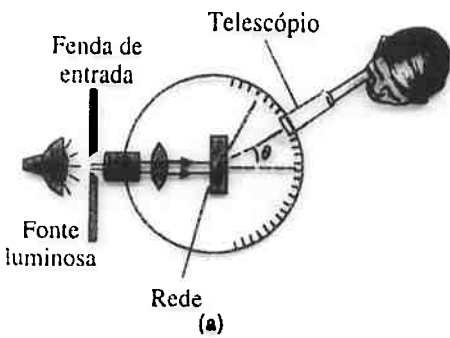
Separação entre as fendas \Rightarrow d

Separação de percursos entre as fendas

$$\underline{\underline{\delta = d \text{ sen } \theta}}$$



Distribuição de intensidades



Espectrômetro de rede

Poder de resolução de uma rede de difração

$$\lambda \approx \lambda_2 \approx \lambda_1$$

$$R = \frac{\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\lambda}{\Delta \lambda}$$

$$R = Nm \begin{cases} m = \text{ordem do espectro} \\ \text{maior } m \Rightarrow \text{maior } R \end{cases}$$

Podem-se mostrar: N linhas da rede