

Ondas - 2010

Interferência

Profa. Ana Barros

1^o Semestre 2011

Interferência

- Princípio de Huygens
- A Lei da Refração
- Difração
- O Experimento de Young
- Intensidade das Franjas de Interferência
- Interferência em Filmes Finos
- O Interferômetro de Michelson

Interferência

Luz solar (branca)



composta (cores)

Arco-íris



↓
refração

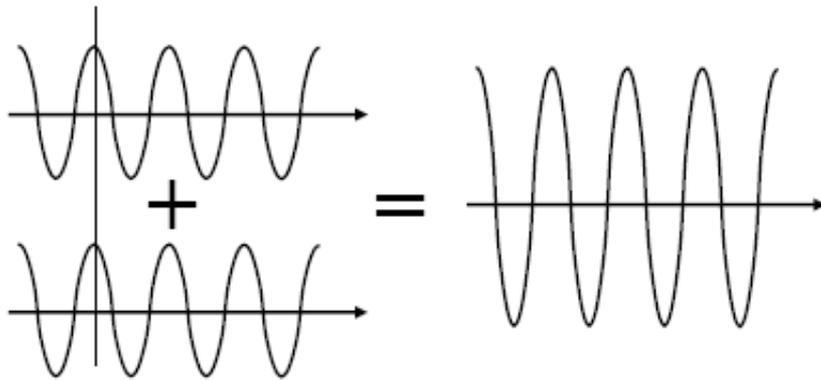


Bolha de sabão

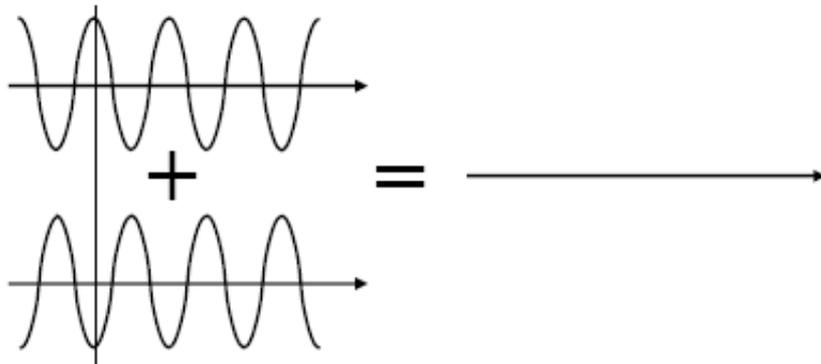


↓
interferência

Interferência \Rightarrow superposição



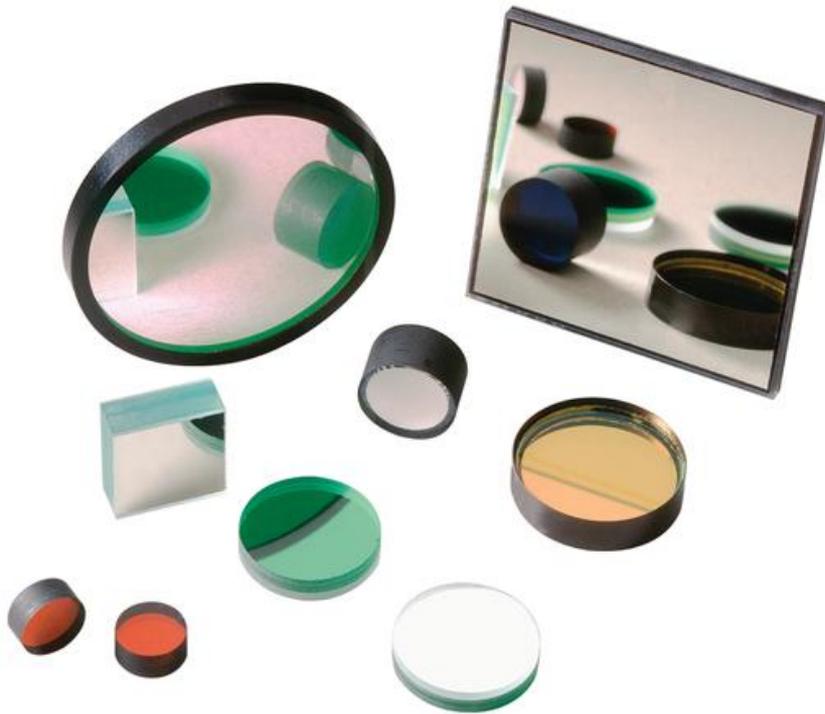
construtiva



destrutiva

Óptica ondulatória

Aplicações



Filmes anti-reflexivos para lentes,
espelhos dielétricos, filtros de
interferência, etc



Princípio de Huygens

Christiaan Huygens (1629-1695), físico holandês, apresentou a primeira teoria ondulatória da luz em 1678.

Teoria mais simples que a Teoria de Maxwell, permite a explicação das leis de reflexão e refração em termos de ondas e define índice de refração.

Construtor de telescópios, em 1655 detectou a primeira lua de Saturno.

Criador do primeiro relógio de pêndulo, patenteado em 1656 seguindo proposta de Galileu.

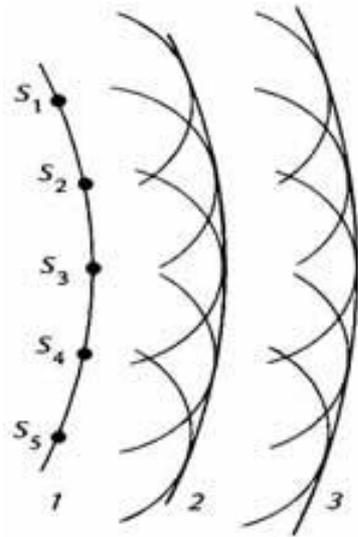
A luz como uma onda



Christian Huygens (1678) →

teoria ondulatória

Princípio de Huygens:



Frente de onda



Fontes pontuais



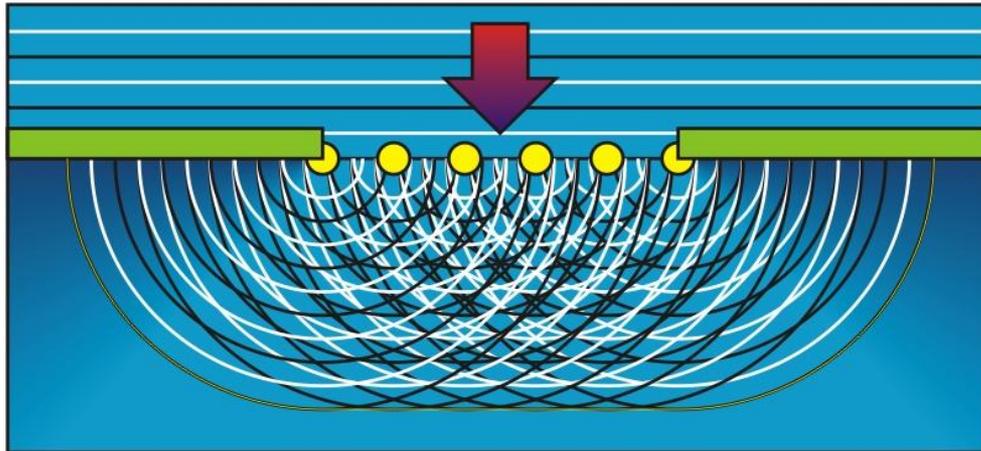
Nova frente (tangente)

Princípio de Huygens

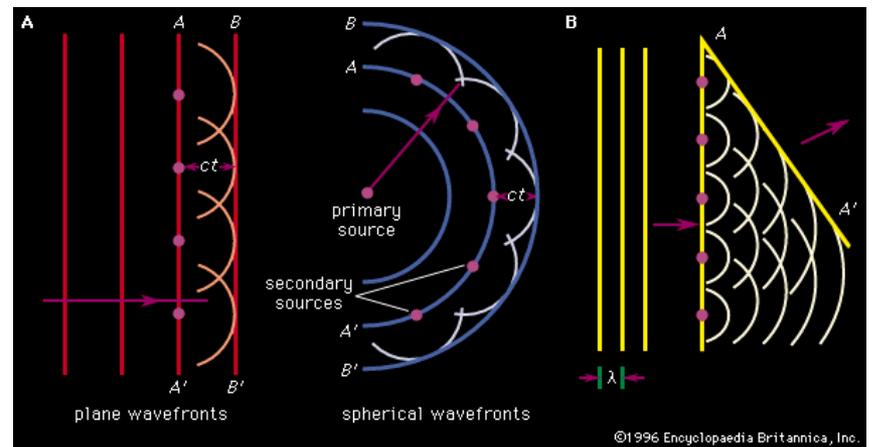
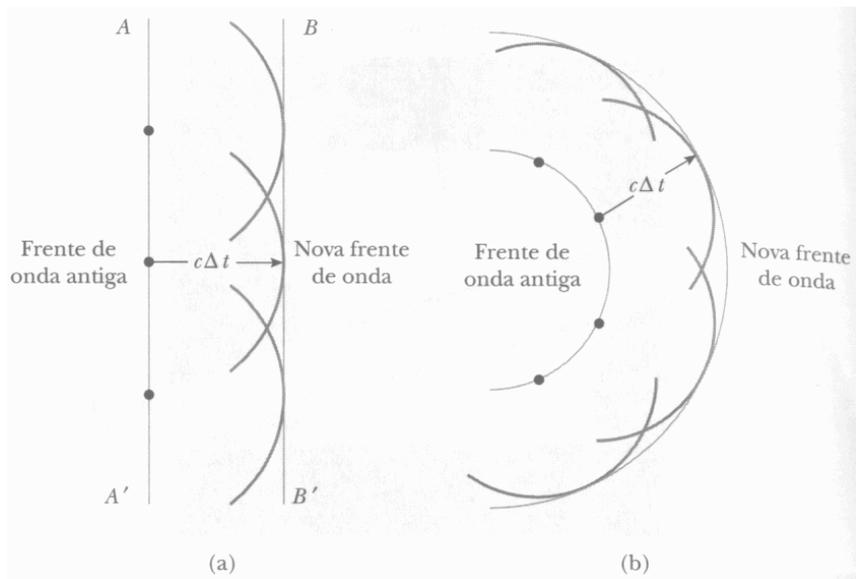
Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como **fontes pontuais** para ondas secundárias.

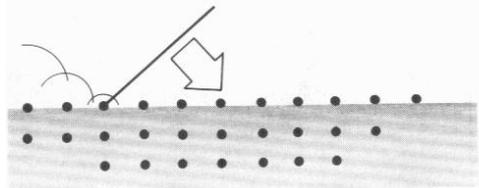
Depois de um intervalo de tempo t , a nova posição da frente onda é dada por uma superfície tangente a estas ondas secundárias.

<http://id.mind.net/~zona/mstm/physics/waves/propagation/huygens3.html>

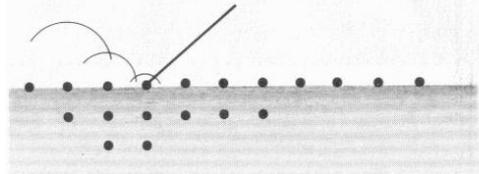


<http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl>

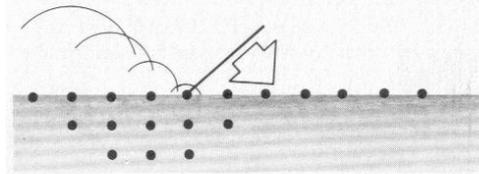




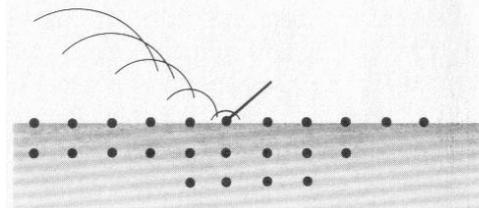
(a)



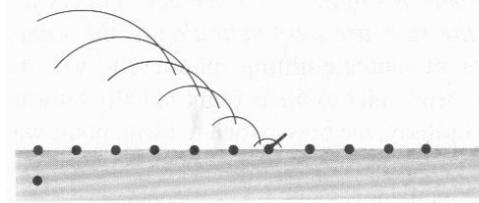
(b)



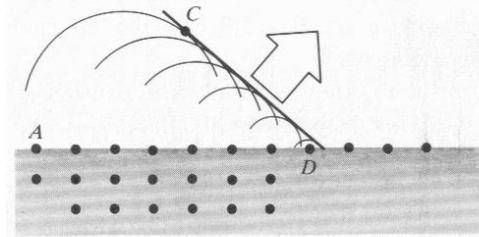
(c)



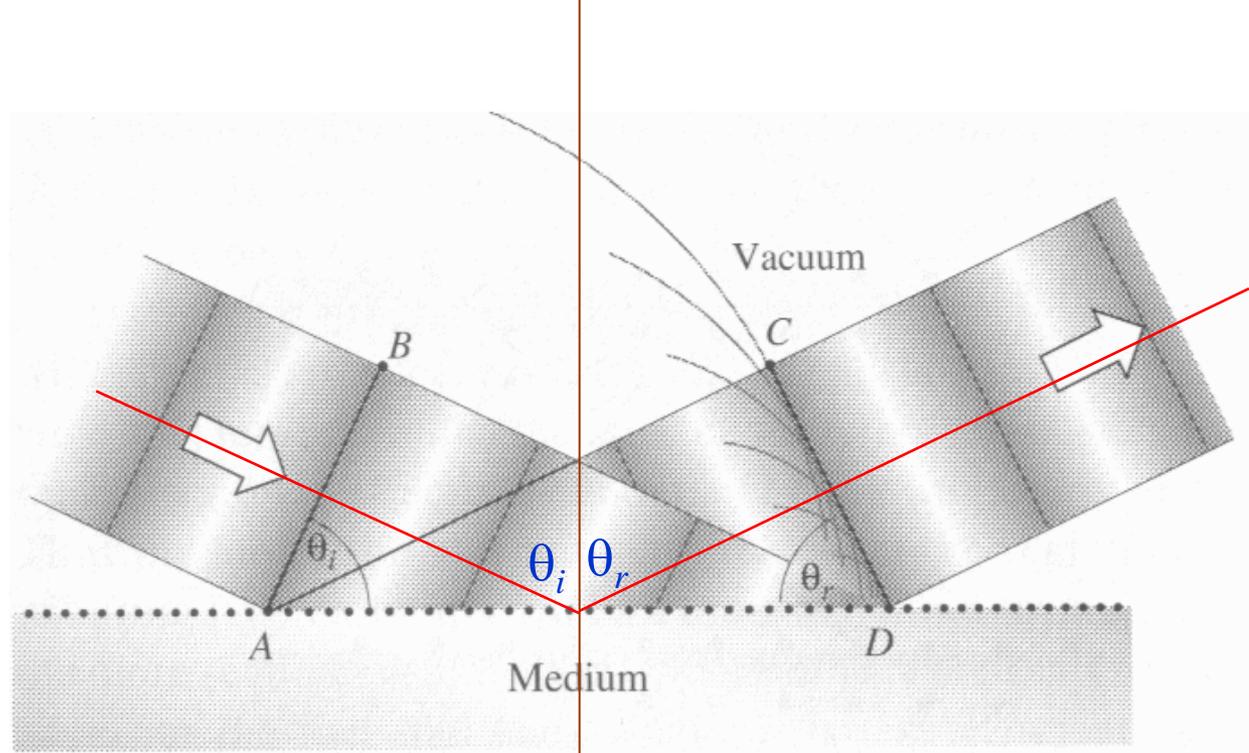
(d)



(e)



(f)



Verificamos que na reflexão especular:

$$\theta_i = \theta_r$$

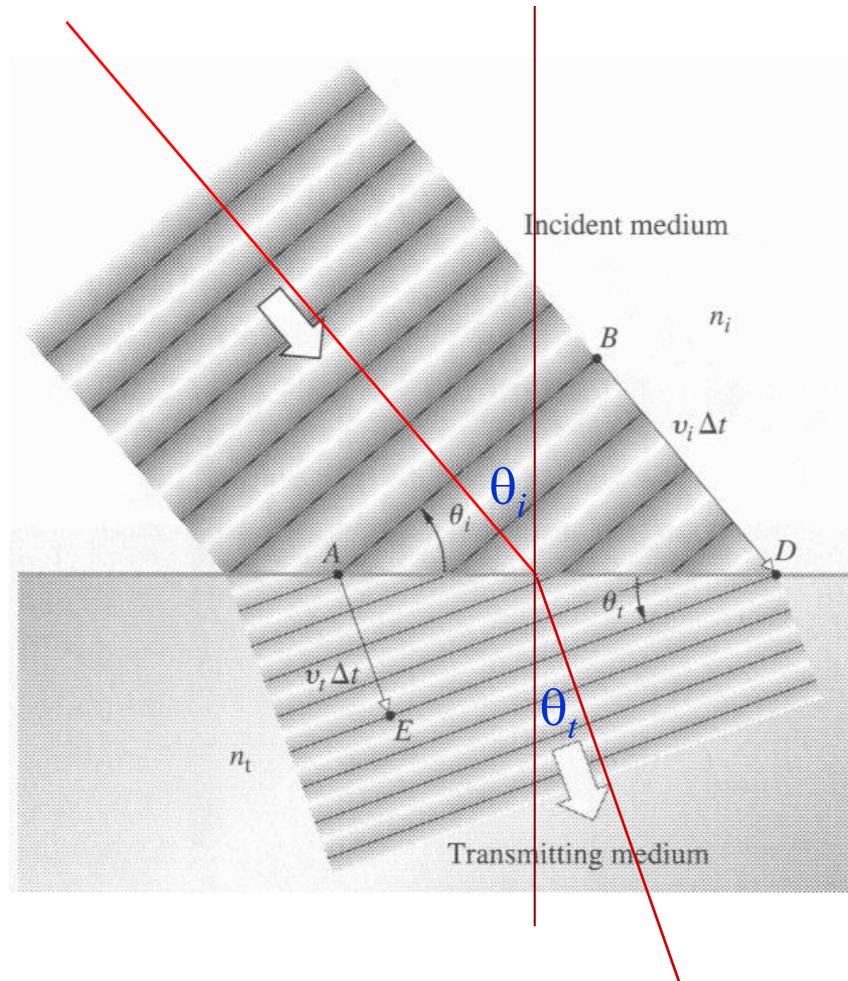
Refração e Lei de Snell

Verificamos a *Lei de Snell*:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

onde

$$n_i \equiv \frac{c}{v_i}$$



Frequência e Comprimento de Onda na Refração

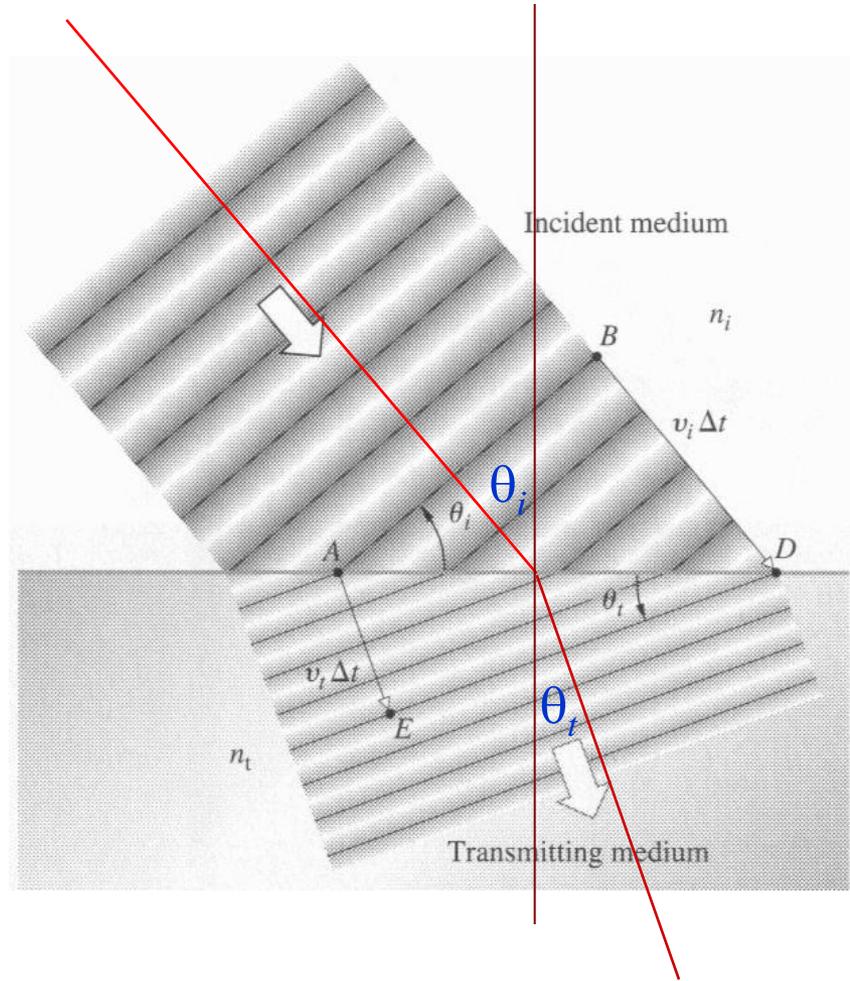
Temos:

$$\frac{n_i}{n_t} = \frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{v_i \Delta t / AD}{v_t \Delta t / AD} = \frac{4\lambda_t / AD}{4\lambda_i / AD}$$

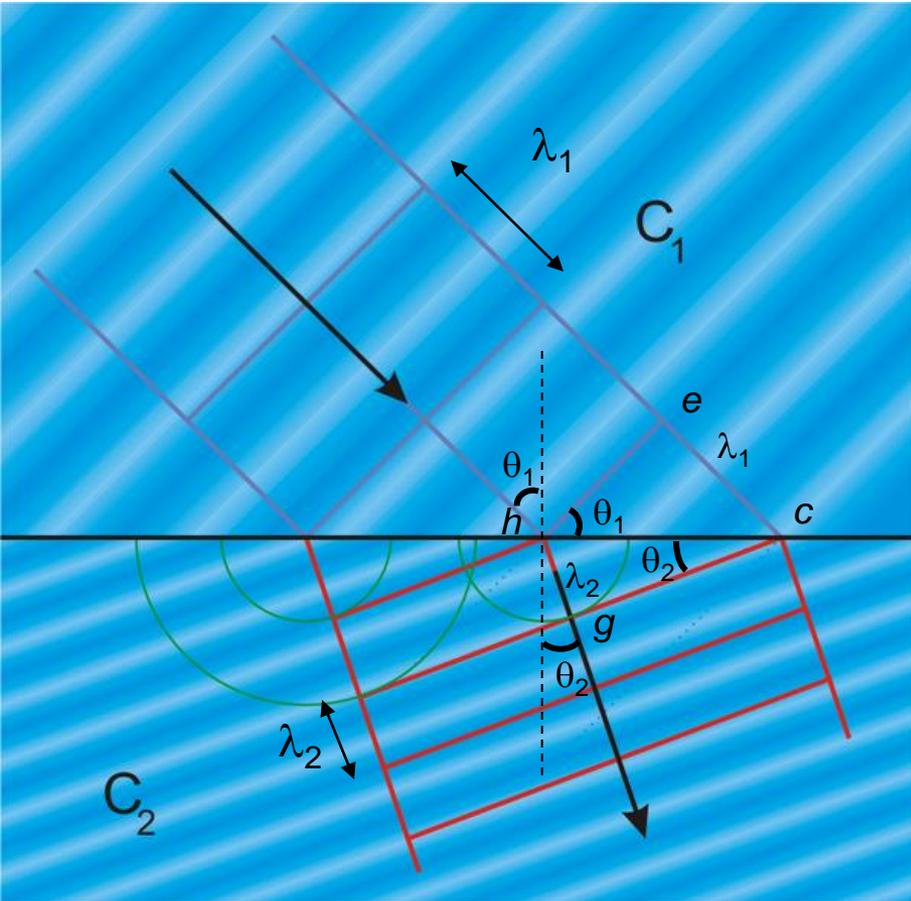
logo: $\lambda_t = \frac{n_i}{n_t} \lambda_i$

se $n_i = 1$ (vácuo):

$$\lambda_t = \frac{\lambda}{n_t}$$



A lei da refração



$$\Delta t_1 = \Delta t_2$$

$$\frac{\lambda_1}{v_1} = \frac{\lambda_2}{v_2} \Rightarrow \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{\lambda_1}{hc}$$

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{\lambda_2}{hc}$$

$$\Rightarrow \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

A lei da refração

Definição índice de refração:

$$n = \frac{c}{v}$$

Nosso caso:

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad n_2 = \frac{c}{v_2}$$

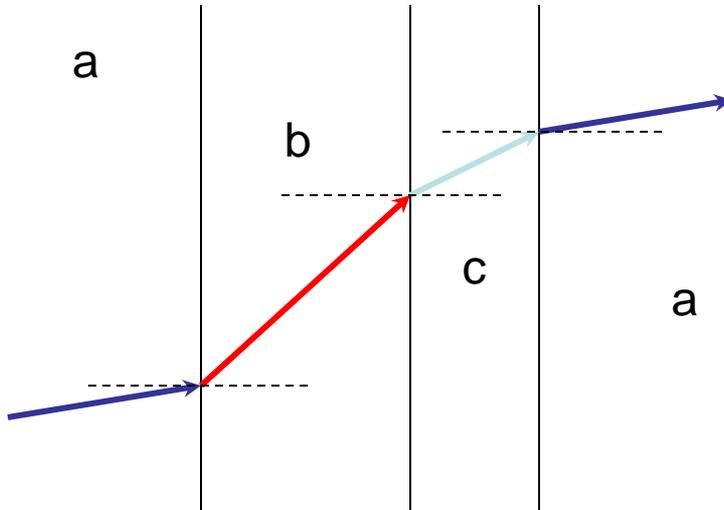
$$\Rightarrow \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{ou} \quad n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

Lei de Snell

Verificação

Já estudado anteriormente!!

A figura abaixo mostra um raio de luz monocromática atravessando um material inicial (a), materiais intermediários (b) e (c) e voltando a atravessar um material a. Coloque os materiais na ordem das velocidades com que a luz se propaga em seu interior, da maior velocidade para a menor.



Quanto a frequência (f) :

$$\frac{f_t}{f_i} = \frac{v_t / \lambda_t}{v_i / \lambda_i}$$

Como ela se comporta em 2 meios?

Quanto a frequência (f) :

$$\frac{f_t}{f_i} = \frac{v_t / \lambda_t}{v_i / \lambda_i} = \frac{v_t \lambda_i}{v_i \lambda_t} = \left(\frac{c/n_t}{c/n_i} \right) \left(\frac{\lambda / n_i}{\lambda / n_t} \right) = \frac{n_i}{n_t} \frac{n_t}{n_i} = 1$$

Ela é a mesma, no meio material e no vácuo.

Comprimento de onda e índice de refração

Veloc. varia \longrightarrow λ varia

veloc. \longleftrightarrow n

$$\frac{\lambda_1}{v_1} = \frac{\lambda_2}{v_2} \Rightarrow \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \lambda_n = \lambda \frac{v}{c} = \frac{\lambda}{n}$$

E a frequência?

Comprimento de onda e índice de refração

Veloc. varia \longrightarrow λ varia

veloc. \longleftrightarrow n

$$\frac{\lambda_1}{v_1} = \frac{\lambda_2}{v_2} \Rightarrow \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \lambda_n = \lambda \frac{v}{c} = \frac{\lambda}{n}$$

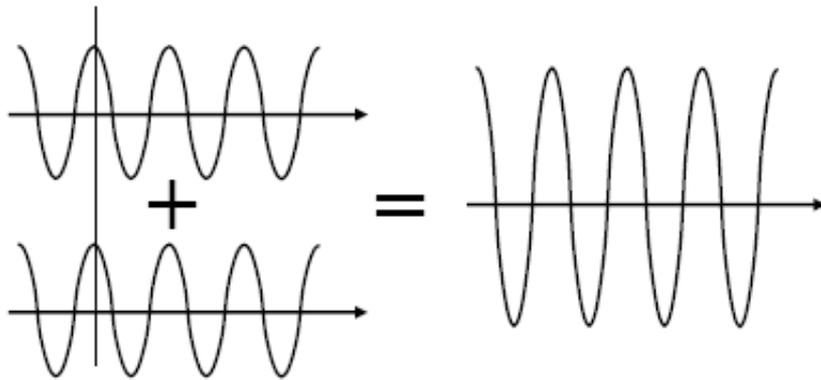
E a frequência?

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

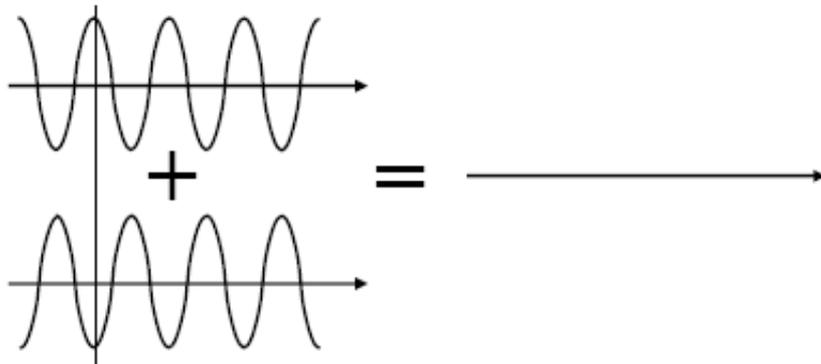
não muda!

Relembrando:

Interferência \Rightarrow superposição



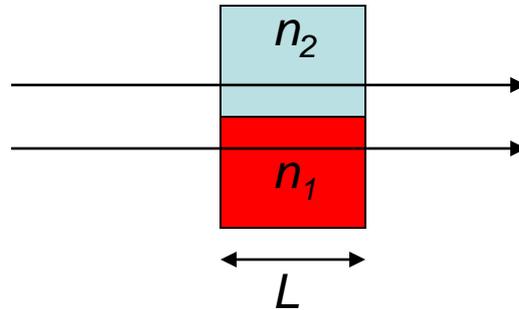
construtiva



destrutiva

Depende da fase
dif. caminhos ópticos \Rightarrow dif. de fase

Diferença de caminho óptico

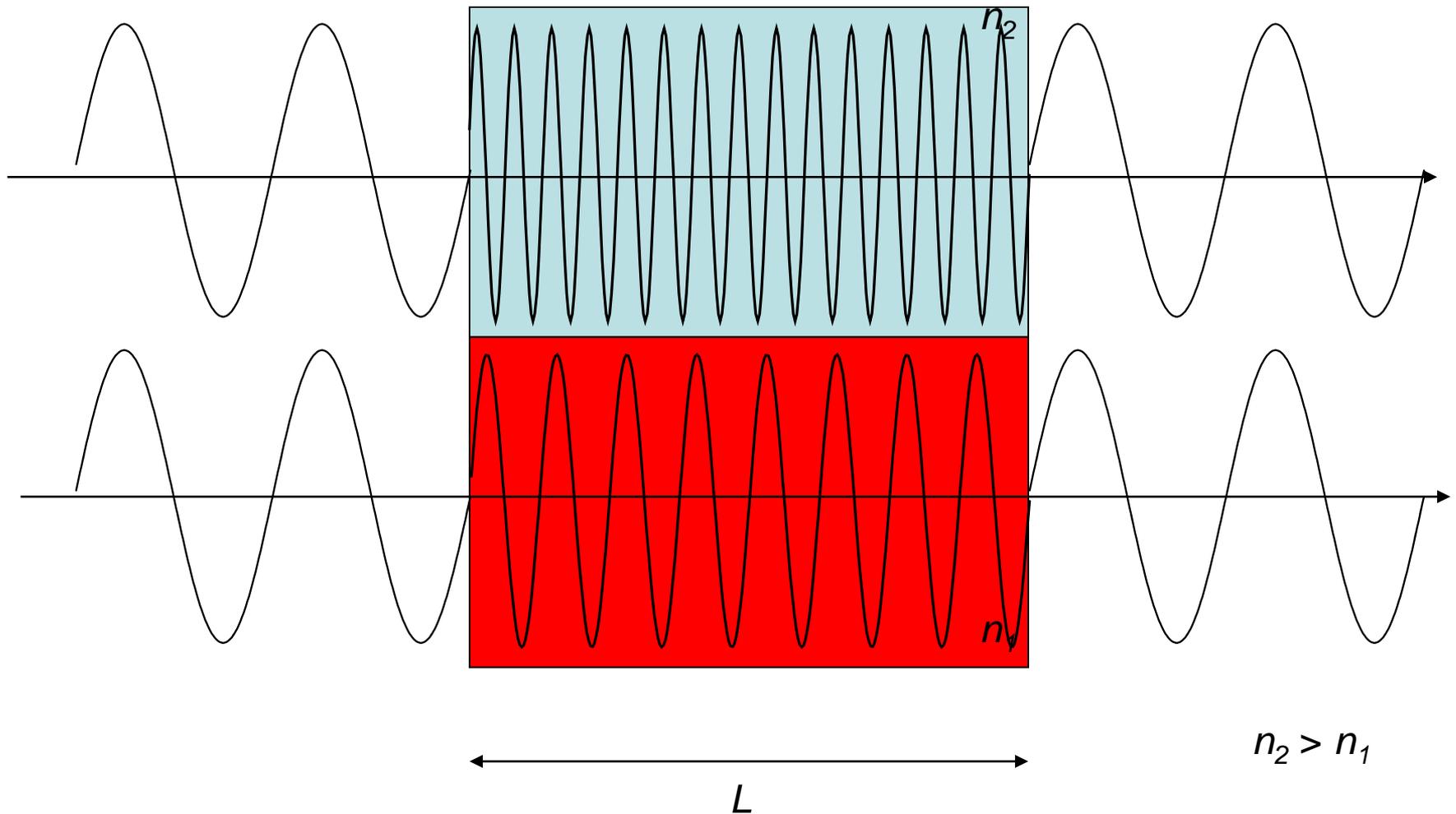


$N \rightarrow$ número de λ no meio

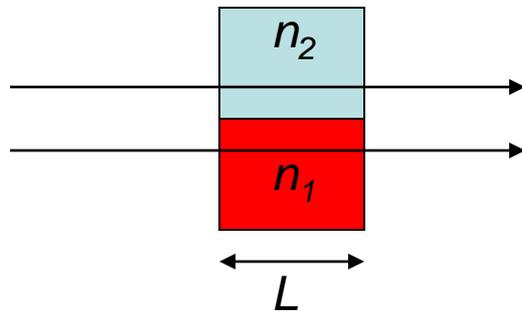
$$\lambda_n = \lambda \frac{v}{c} = \frac{\lambda}{n}$$

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{L}{\lambda_{n_1}} = \frac{Ln_1}{\lambda} \\ N_2 &= \frac{L}{\lambda_{n_2}} = \frac{Ln_2}{\lambda} \end{aligned} \right\} N_2 - N_1 = \frac{L}{\lambda} (n_2 - n_1)$$

Diferença de caminho óptico



Diferença de caminho óptico



$$N_{1(2)} = \frac{L}{\lambda_{n_{1(2)}}} = \frac{Ln_{1(2)}}{\lambda}$$

$N \rightarrow$ número de λ no meio

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{L}{\lambda_{n_1}} = \frac{Ln_1}{\lambda} \\ N_2 &= \frac{L}{\lambda_{n_2}} = \frac{Ln_2}{\lambda} \end{aligned} \right\} N_2 - N_1 = \frac{L}{\lambda}(n_2 - n_1)$$

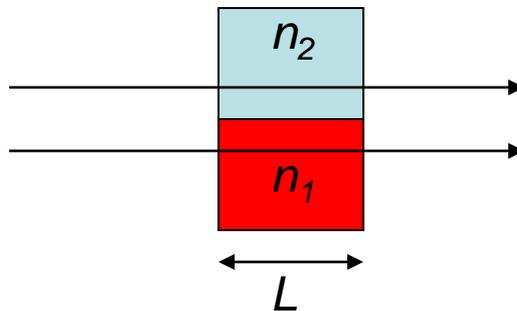
$N_2 - N_1 = \text{semi-inteiro} \rightarrow$ Destrutiva (π)

$N_2 - N_1 = \text{inteiro} \rightarrow$ Construtiva (2π)

Verificação

Para casa!!

As ondas luminosas dos raios da figura abaixo têm o mesmo comprimento de onda e estão inicialmente em fase. (a) Se o material de cima comporta 7,60 comprimentos de onda e o material de baixo comporta 5,50 comprimentos de onda, qual é o material com maior índice de refração? (b) Se os raios luminosos forem levemente convergentes, de modo que as ondas se encontrem em uma tela distante, a interferência produzirá um ponto muito claro, um ponto moderadamente claro, um ponto moderadamente escuro ou um ponto escuro?



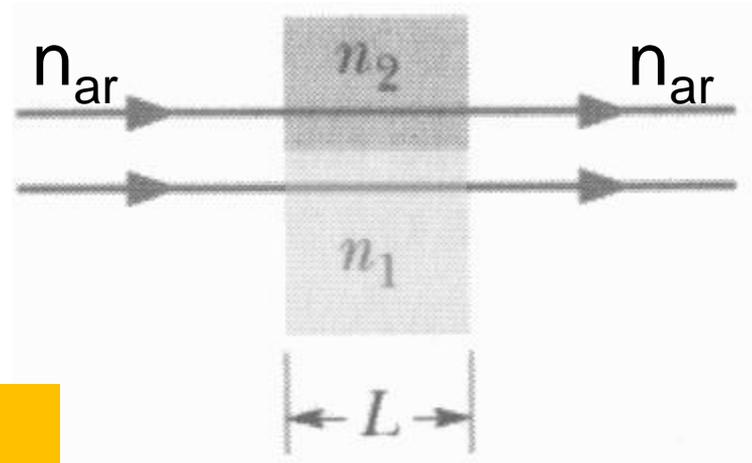
Recordando !!

Os números de comprimentos de onda nos meios 1 e 2 são dados por:

$$N_{1(2)} = \frac{L}{\lambda_{n_{1(2)}}} = \frac{Ln_{1(2)}}{\lambda}$$

logo

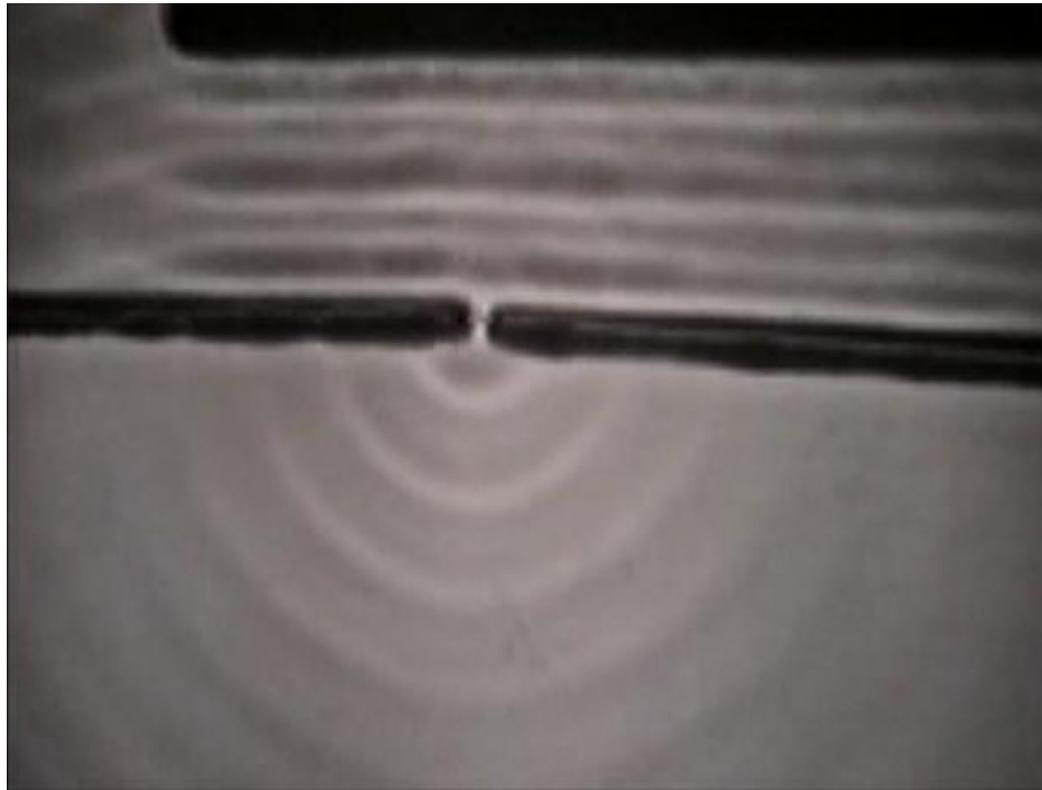
$$N_2 - N_1 = \frac{L}{\lambda} (n_2 - n_1)$$



Diferença de fase efetiva, em *rad*:

$$\Delta f = \text{parte decimal de } |N_2 - N_1|$$

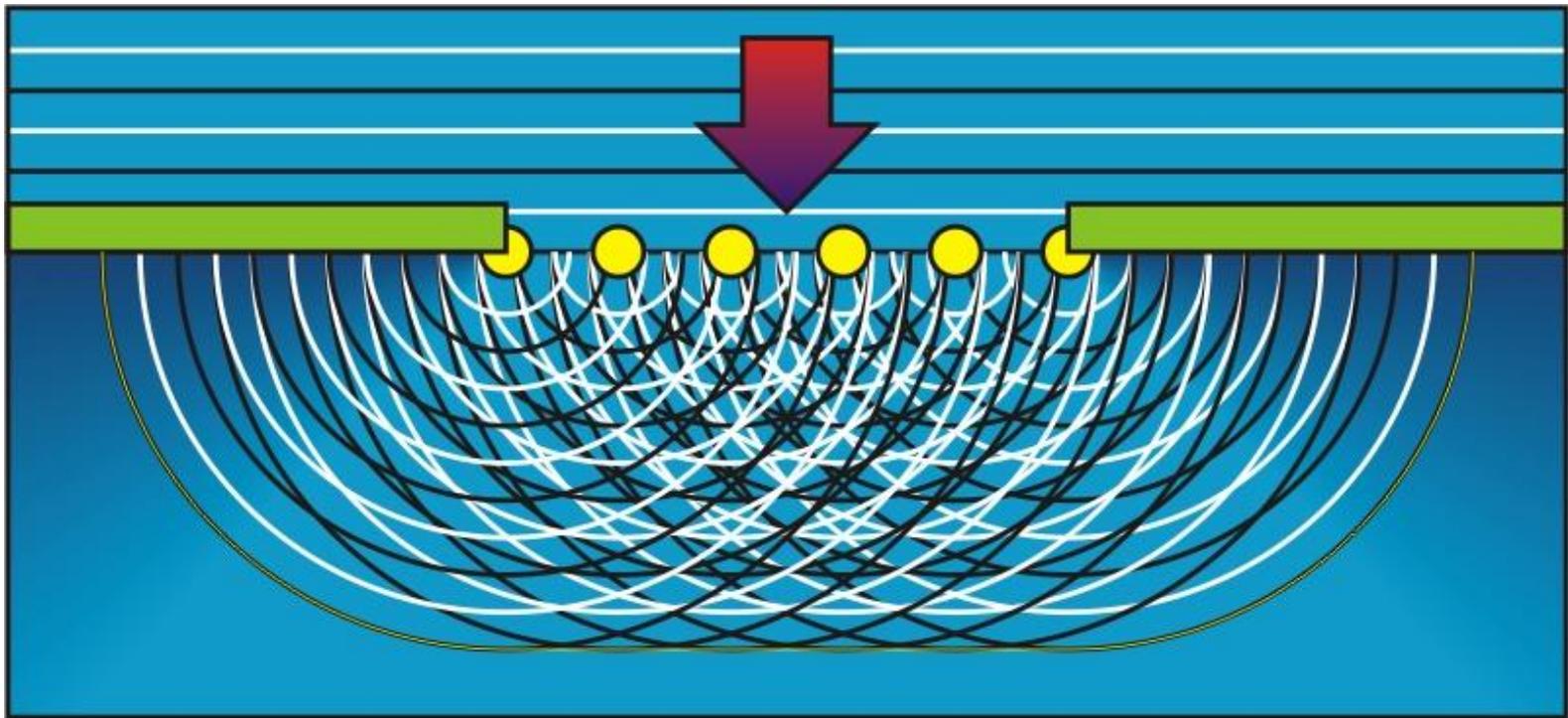
Difração



onda + obstáculo = difração

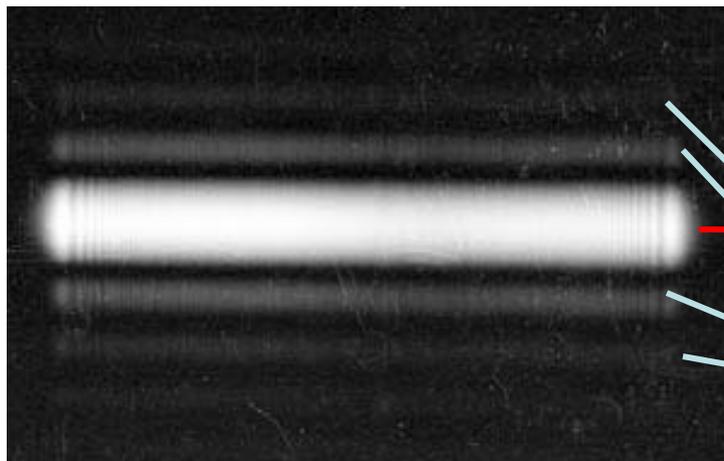
Sem distinção entre interferência e difração

Pelo princípio de Huygens



Difração e a teoria ondulatória da luz

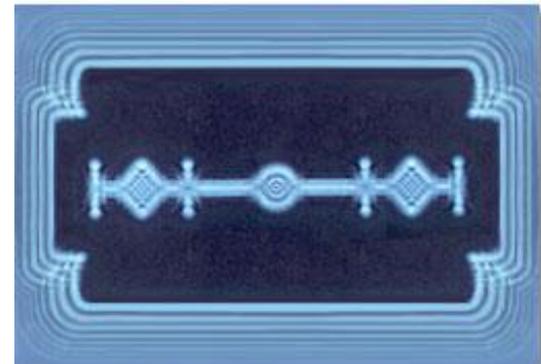
Difração por uma fenda



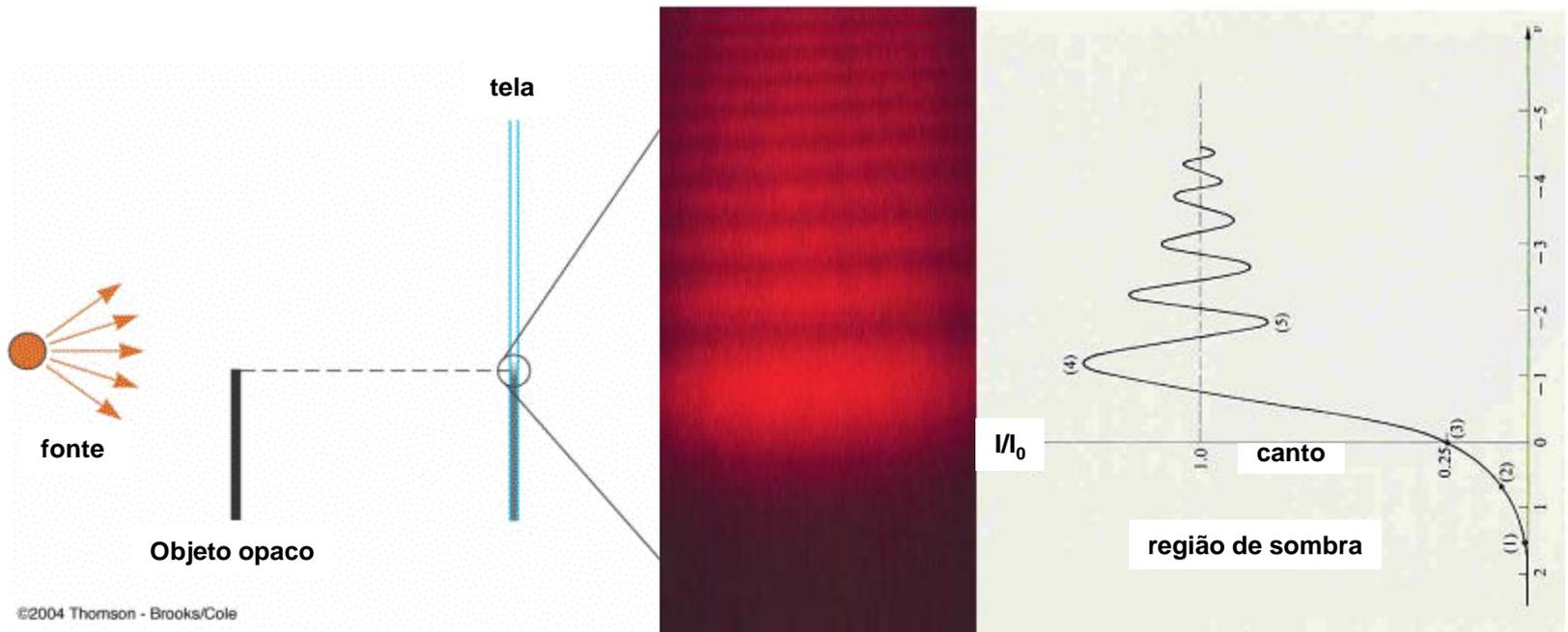
máximo central

máximos secundários ou laterais

Iluminação monocromática



Difração e a teoria ondulatória da luz



Luz na sombra ou sombra na luz!

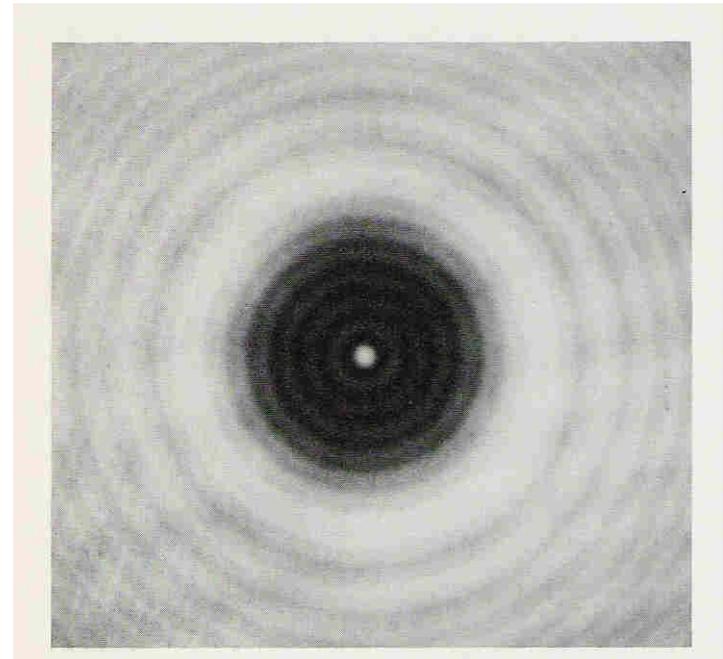
Séc. XVII – Francesco Grimaldi – “diffractio” – desvio da luz a partir de sua propagação retilínea

O ponto claro de Fresnel



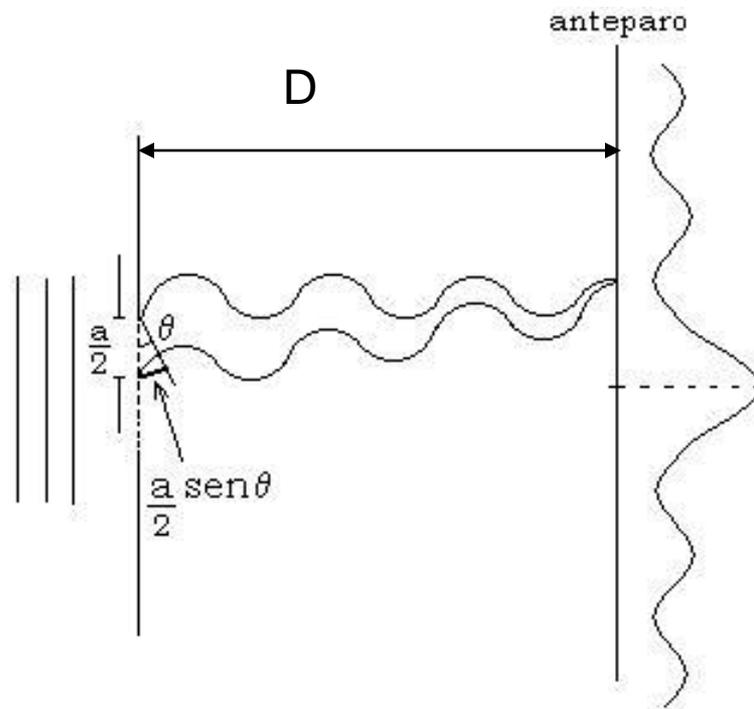
Bildarchiv FVT

Augustin Jean Fresnel
1819

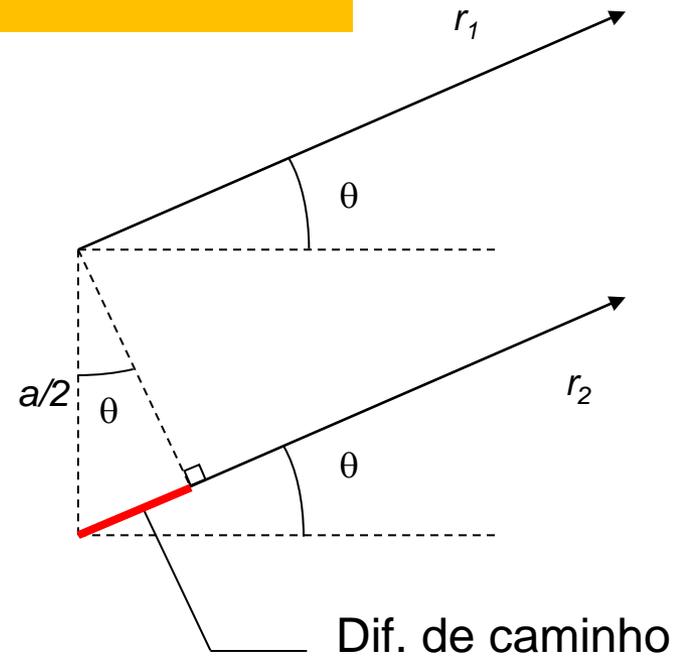


Também pto. Poisson ou Arago

Difração por uma fenda: posições dos mínimos

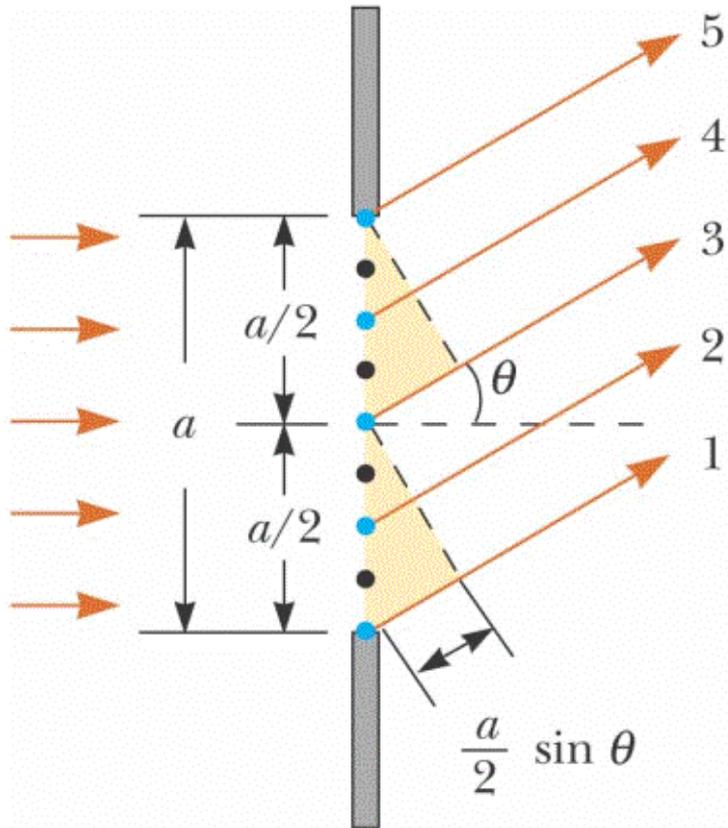


Supondo $D \gg a$



Intensidade $\propto \Delta L$

$$\Delta L = a/2 \text{ sen } \theta$$



©2004 Thomson - Brooks/Cole

5 e 3⁻ (destrutiva):

$$\frac{a}{2} \text{sen } \theta = \frac{\lambda}{2}$$

3⁺ e 1 (destrutiva):

$$\frac{a}{2} \text{sen } \theta = \frac{\lambda}{2}$$

5 e 4⁻ (destrutiva):

$$\frac{a}{4} \text{sen } \theta = \frac{\lambda}{2}$$

...

1o. min.

2o. min.

$$\Rightarrow a \text{sen } \theta = m \lambda \quad , \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

(min. – fr. escuras)

Verificação

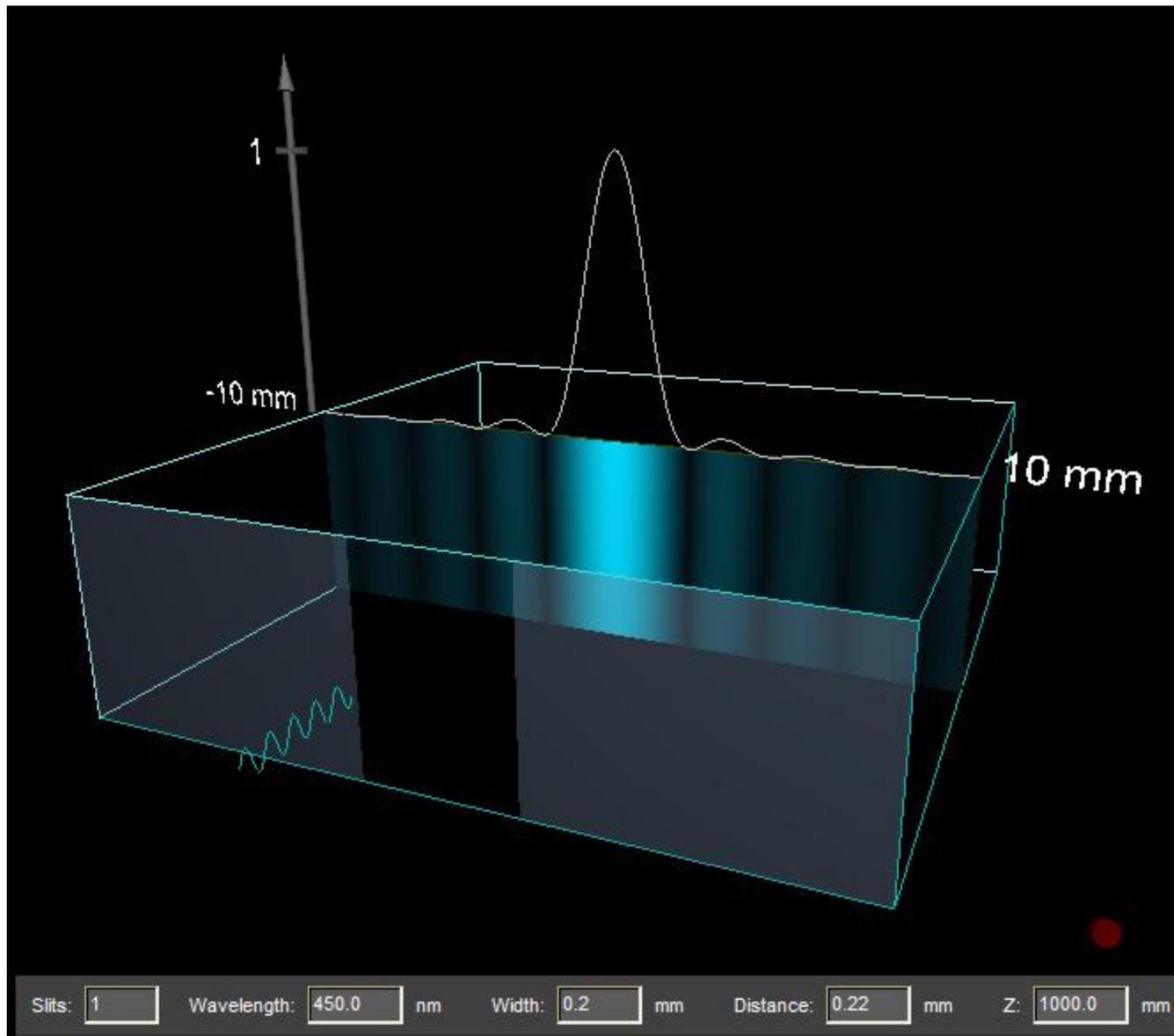
Produzimos uma figura de difração em uma tela iluminando uma fenda longa e estreita com luz azul.

A figura se dilata (os máximos e mínimos se afastam do centro) ou se contrai (os máximos e mínimos se aproximam do centro) quando:

- (a) substituímos a luz azul por uma luz amarela ou
- (b) diminuímos a largura da fenda?

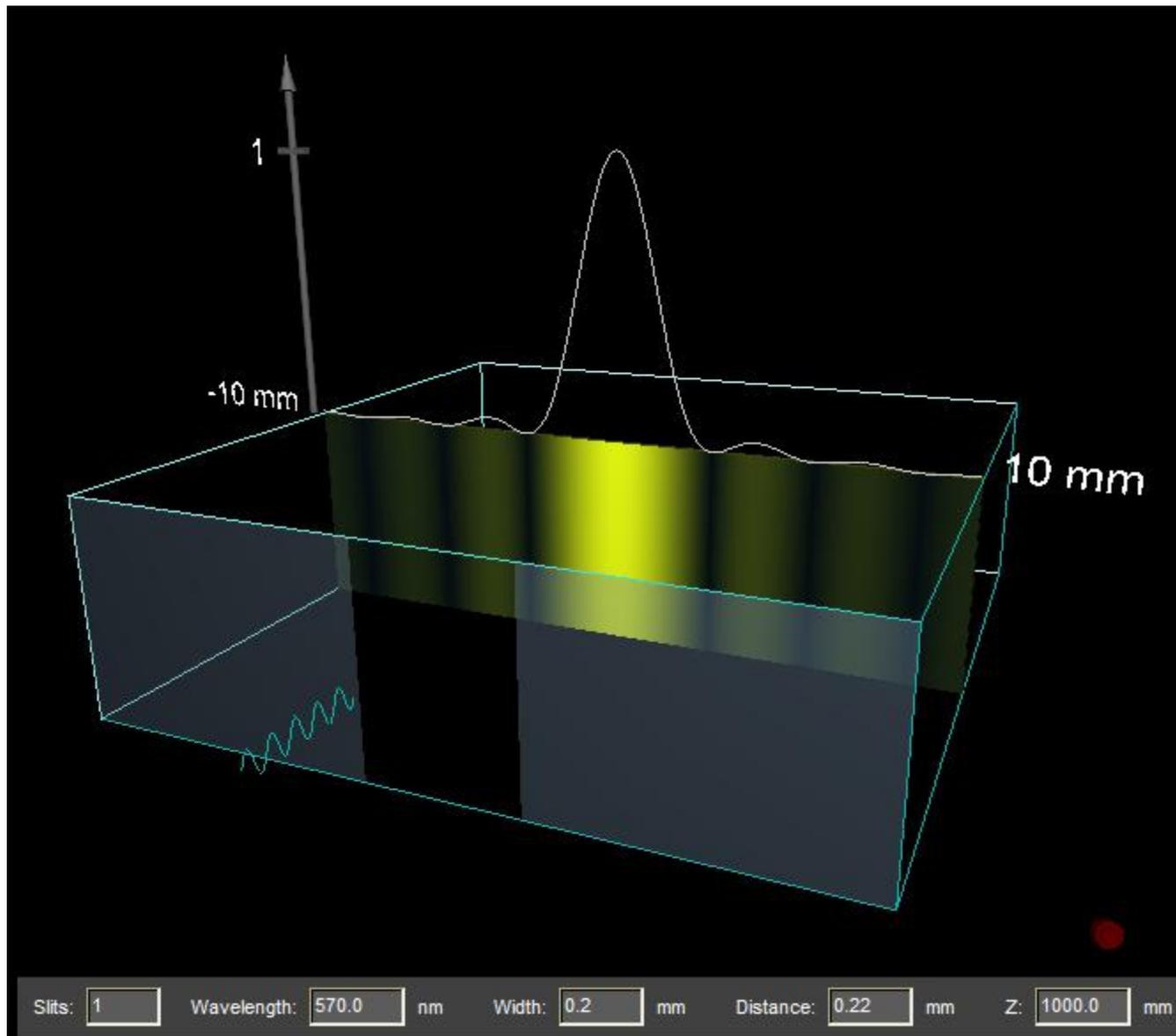
$$\Rightarrow a \sin \theta = m \lambda \quad , \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

(a)



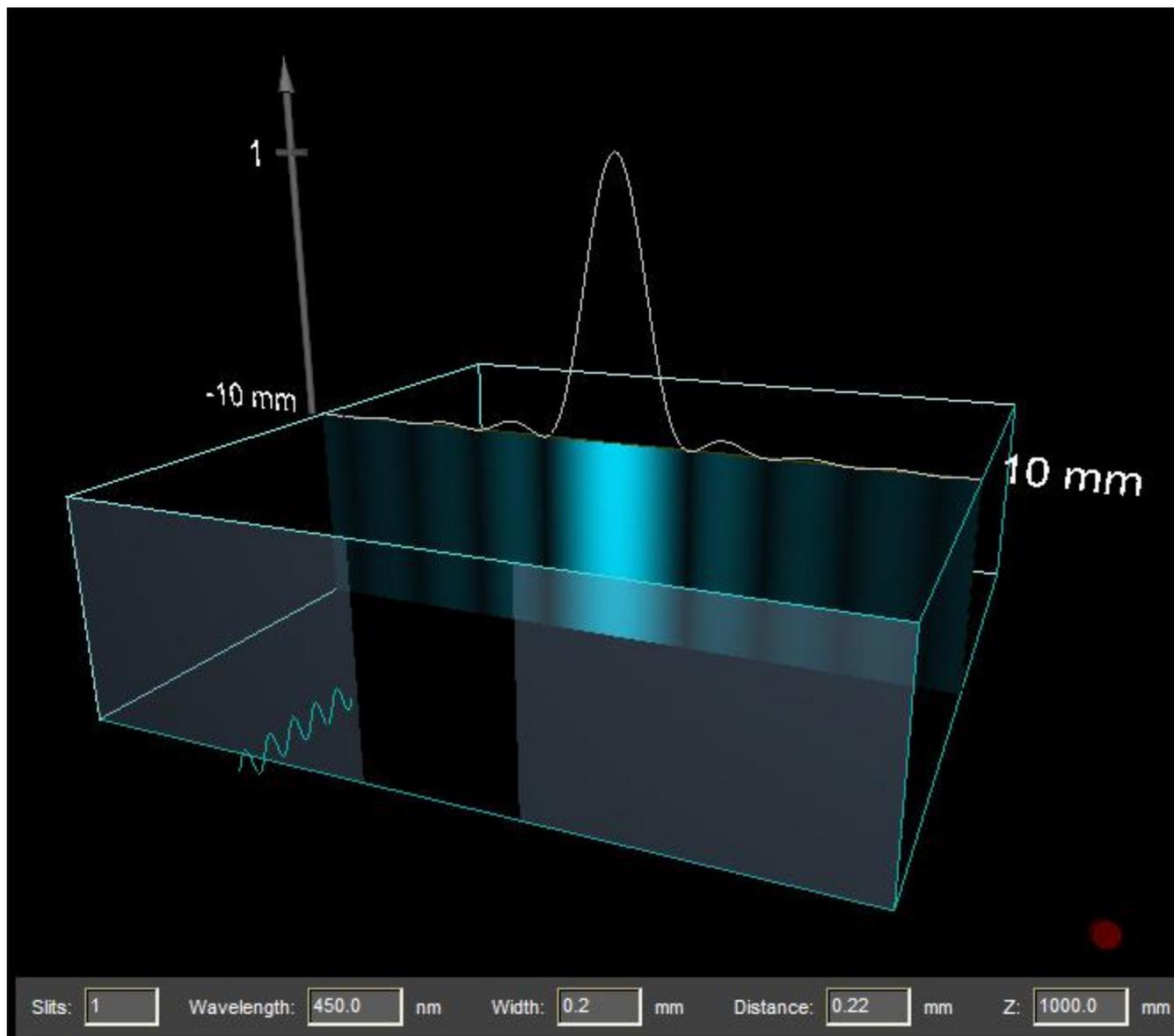
λ

(a)



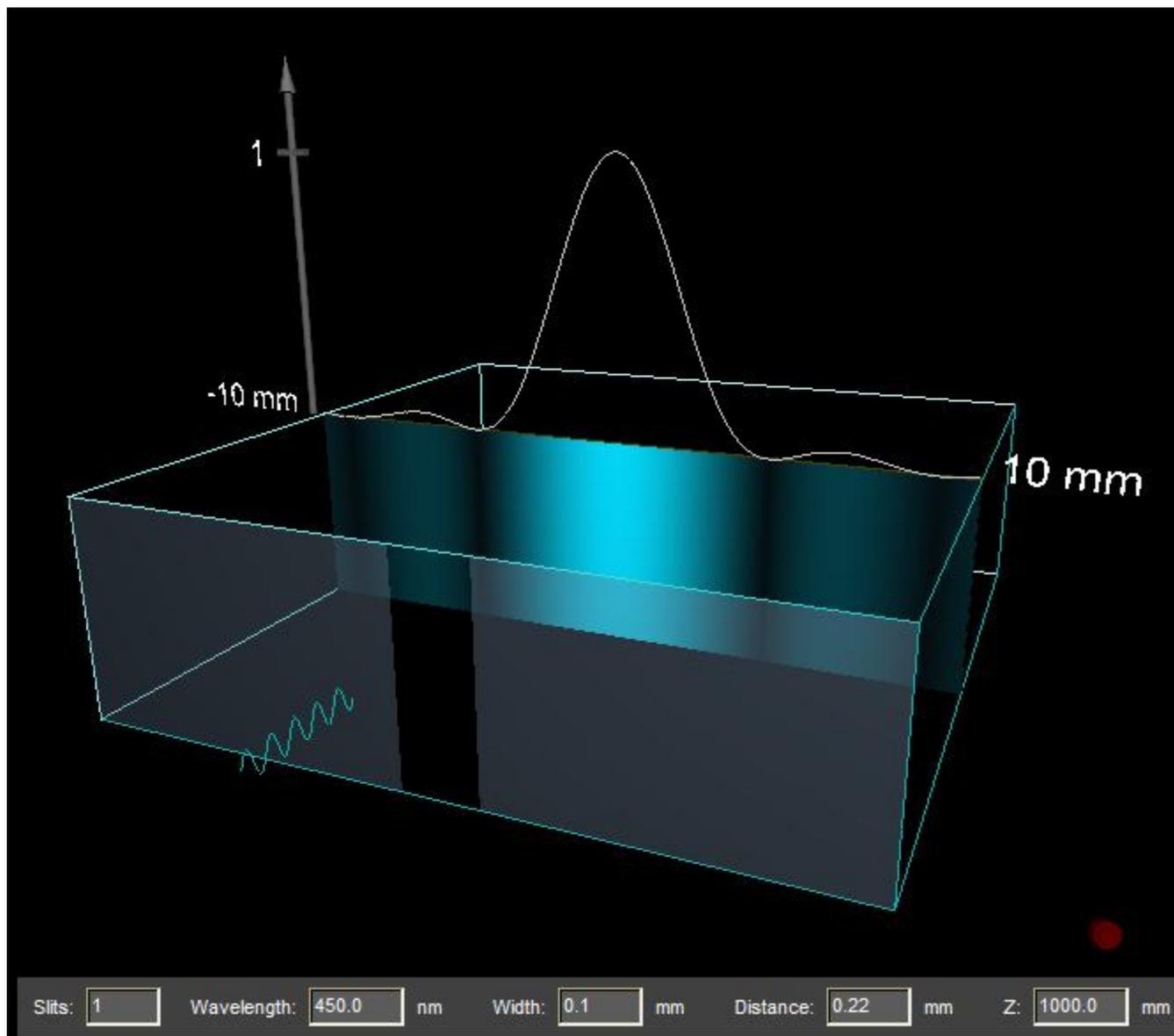
λ

(b)



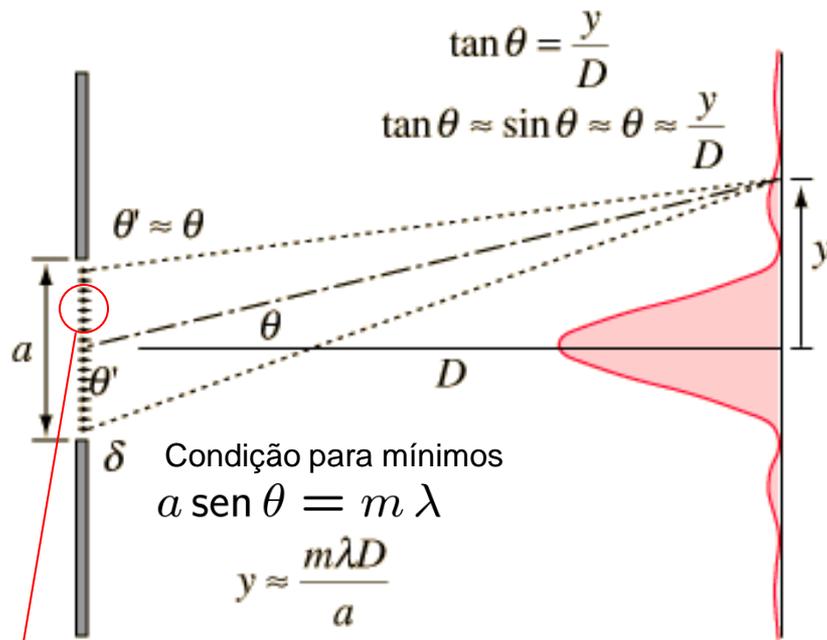
↑
a

(b)



a

Determinação da intensidade da luz difratada por uma fenda – método qualitativo



$$\Delta \phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) (\Delta x \sin \theta)$$

diferença de fase ondas 2arias.

dif. de dist. percorrida

Pto. P \Rightarrow amplitudes ΔE

Fasores

N regiões Δx
 Cada: ondas secund. Huygens

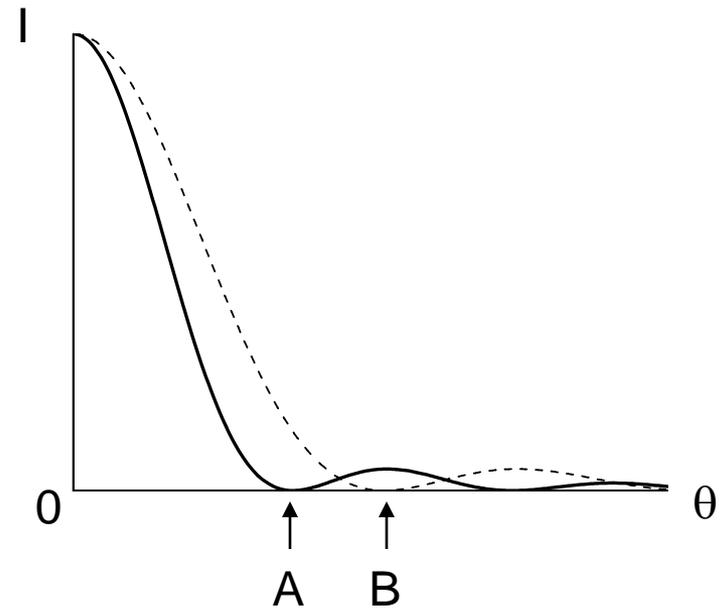
Verificação

Dois comprimentos de onda, 650 e 430 nm, são usados separadamente em um experimento de difração por uma fenda.

A figura mostra os resultados na forma de gráficos da intensidade I em função do ângulo θ para as duas figuras de difração.

Se os dois comprimentos de onda forem usados simultaneamente, que cor será vista na figura de difração resultante

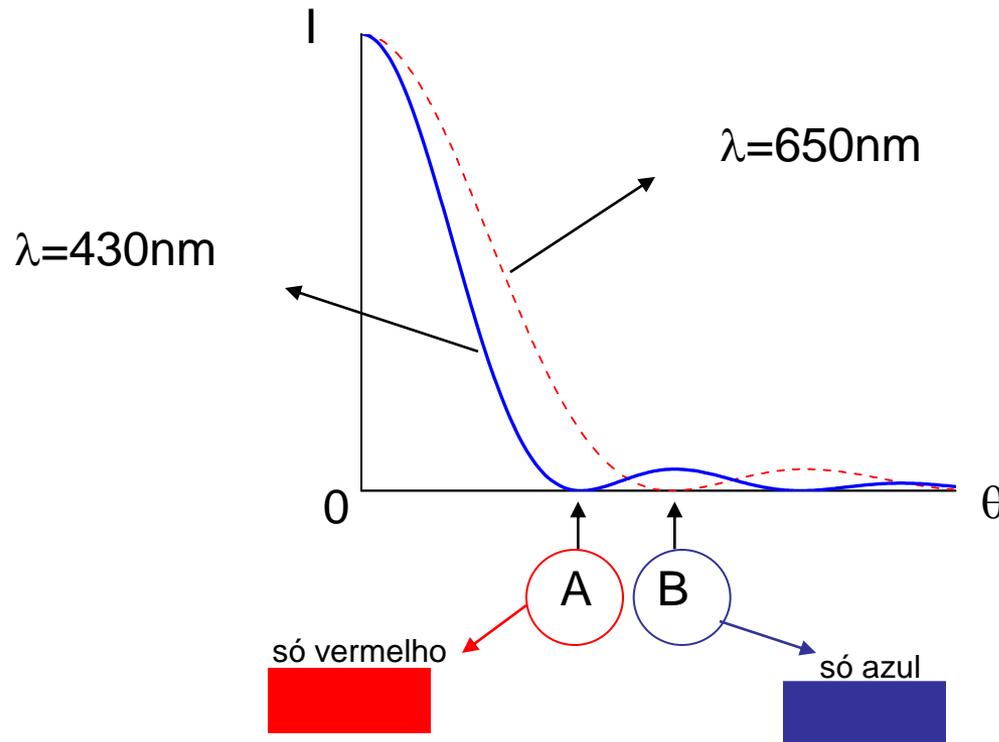
(a) para o ângulo A e (b) para o ângulo B?



Lembrando:

$$a \sin \theta = m\lambda \quad , \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{min. - fr. escuras})$$

Portanto:



Exercícios e Problemas

Uma luz monocromática com um comprimento de onda de 538 nm incide em uma fenda com uma largura de 0,025 mm.

A distância entre a fenda e a tela é de 3,5 m. Considere um ponto na tela a 1,1 cm do máximo central.

- (a) Calcule o valor de θ neste ponto (ângulo entre a reta ligando o ponto central da fenda à tela e a reta ligando o ponto central da fenda ao ponto em questão na tela).
- (b) Calcule o valor de α .
- (c) Calcule a razão entre a intensidade neste ponto e a intensidade no máximo central.

a)

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{1,1 \times 10^{-2}}{3,5} \right) = 0,0031428 \text{ rad}$$

b)

$$\alpha = \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) a \operatorname{sen} \theta = \frac{\pi(0,025 \times 10^{-3})}{(538 \times 10^{-9})} \operatorname{sen} (0,0031428) = 0,459 \text{ rad}$$

c)

$$\frac{I(\theta)}{I_m} = \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\alpha} \right)^2 = 0,932$$