

Física 3

(1/2015)

Teoria Ondulatória

Aula 21

Carlos Eduardo Souza (Cadu)
carlooseduardosouza@id.uff.br

Site: cursos.if.uff.br/fisica3-0115/

Cap 22: Ótica Ondulatória

TC1 - Qual das seguintes afirmativas **não** é verdadeira para ondas eletromagnéticas?

- A) Elas consistem de mudanças dos campos elétrico e magnético.
- B) Elas transportam energia.
- C) Elas transportam momento.
- D) Elas viajam a diferentes velocidades no vácuo, dependendo da frequência.

Teste Online

1º questão - Segundo o Randall, autor do nosso livro texto, Newton não poderia dizer que a luz era composta de corpúsculos caso ele tivesse visto o resultado de um experimento em que a luz passa através de uma fenda muito estreita. Por que?

Estudante 1: “Quando uma onda passa por uma fenda, a onda tenta ocupar todo o espaço atrás da fenda. A luz, já não realiza esse fenômeno, pois após passar por uma fenda fica bem definida a parte luminosa e a sombra.”

Estudante 2: “Porque a imagem que fica do outro lado da fenda não é do mesmo tamanho da fenda, o que deveria ocorrer caso a luz fosse composta de corpúsculos.”

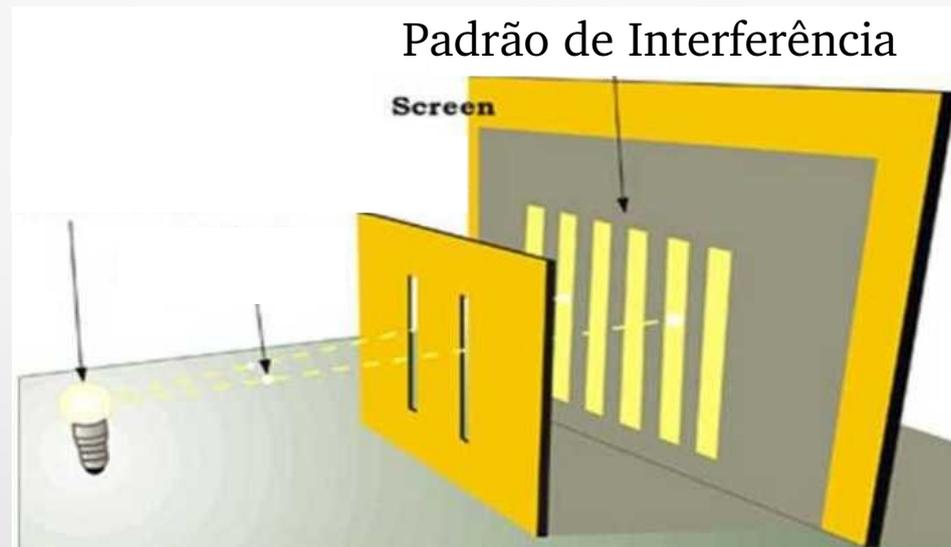
Cap 22: Ótica Ondulatória

Existem vários modelos para a descrição da luz. A luz se comporta de maneira distinta em diferentes situações, e, em última análise, precisamos de três modelos diferentes.

- Modelo Ondulatório
- Modelo Corpuscular
- Modelo de fótons

Cap 22: Ótica Ondulatória

A natureza ondulatória da luz só foi evidenciada em 1801, em um experimento que produziu interferência entre duas ondas luminosas. Esse Experimento foi realizado por Thomas Young e desde então, ficou conhecido como o Experimento da Fenda Dupla de Young.

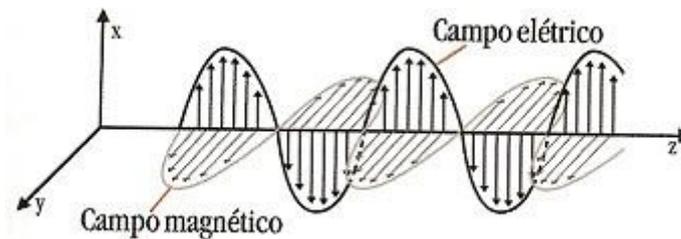


Cap 22: Ótica Ondulatória

Se a luz é uma onda, o que ondula?

Cap 22: Ótica Ondulatória

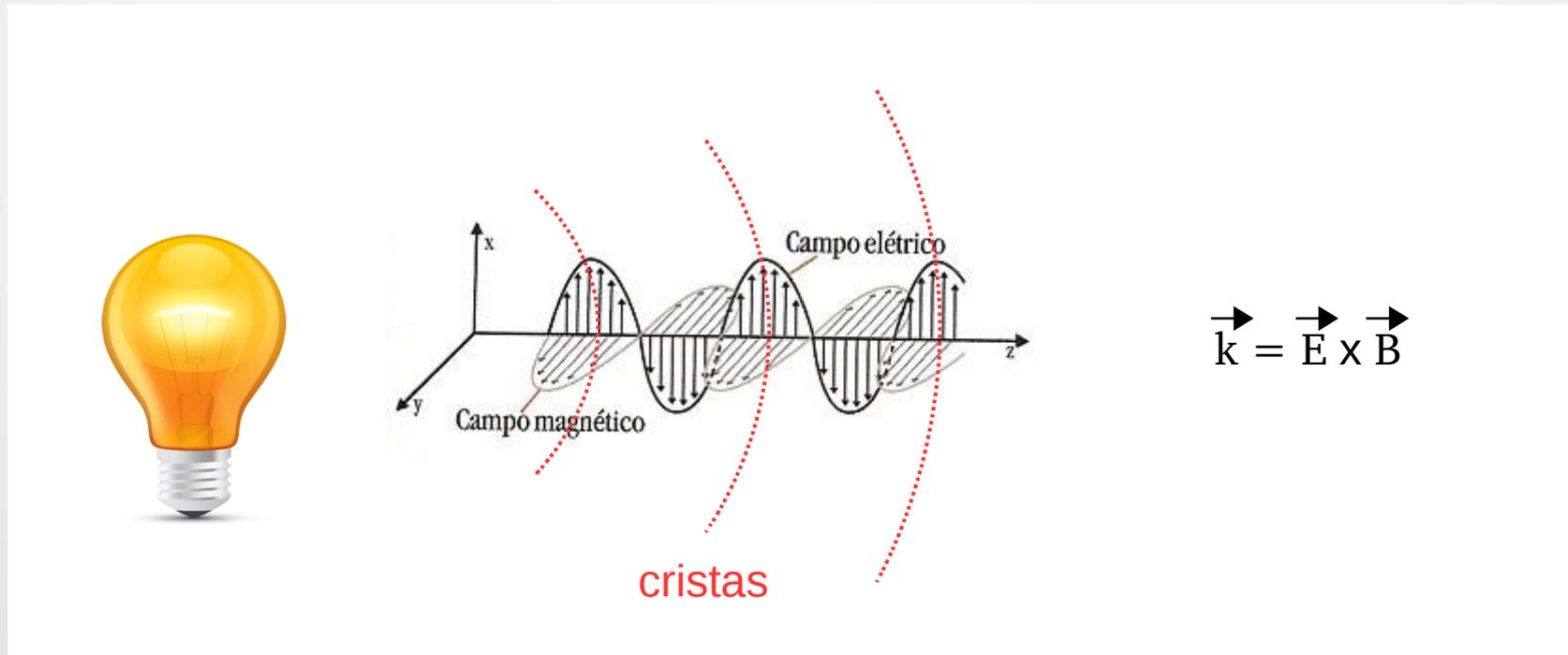
Os Campos Eletromagnéticos ondulam



$$\vec{k} = \vec{E} \times \vec{B}$$

Cap 22: Ótica Ondulatória

Os Campos Eletromagnéticos ondulam



Cap 22: Ótica Ondulatória

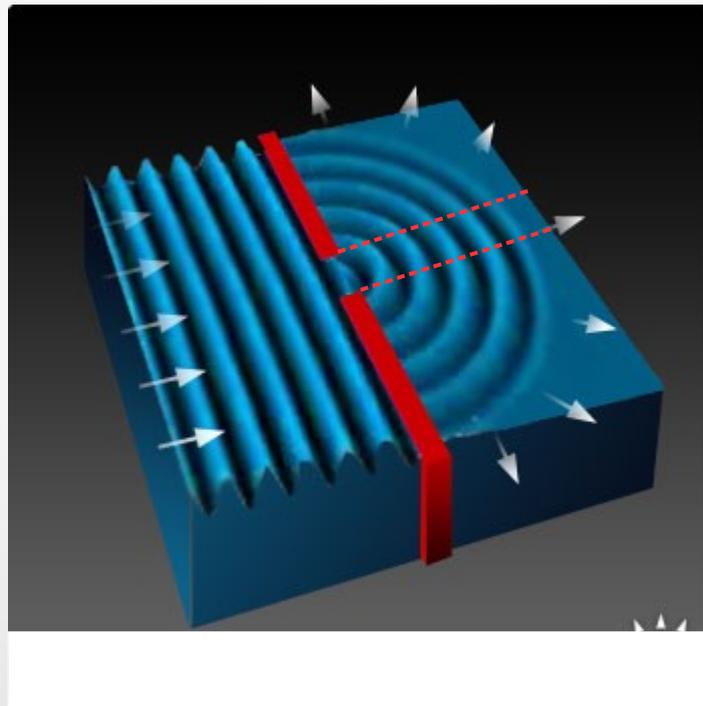
Se a luz fosse descrita apenas por partículas (raios), apenas uma imagem nítida da abertura (contorno do objeto) seria observada(o)...



Cap 22: Ótica Ondulatória

- **Difração – um fenômeno ondulatório**

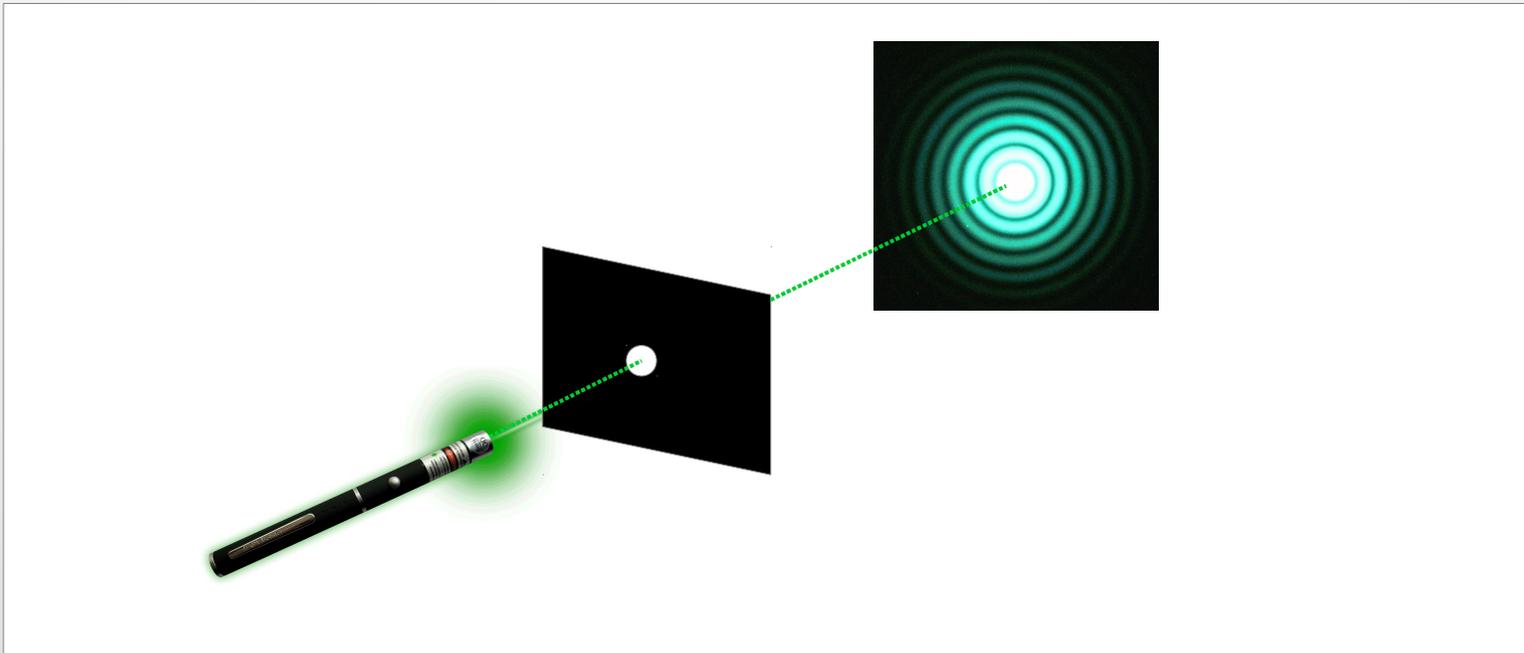
A onda se propaga para partes situadas atrás do orifício



Cap 22: Ótica Ondulatória

- **Difração – um fenômeno ondulatório**

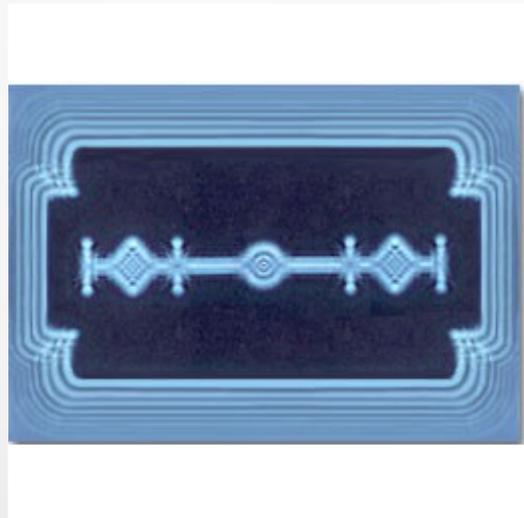
A luz se propaga para partes situadas atrás do orifício que não seriam iluminadas caso a luz não fosse uma onda.



Cap 22: Ótica Ondulatória

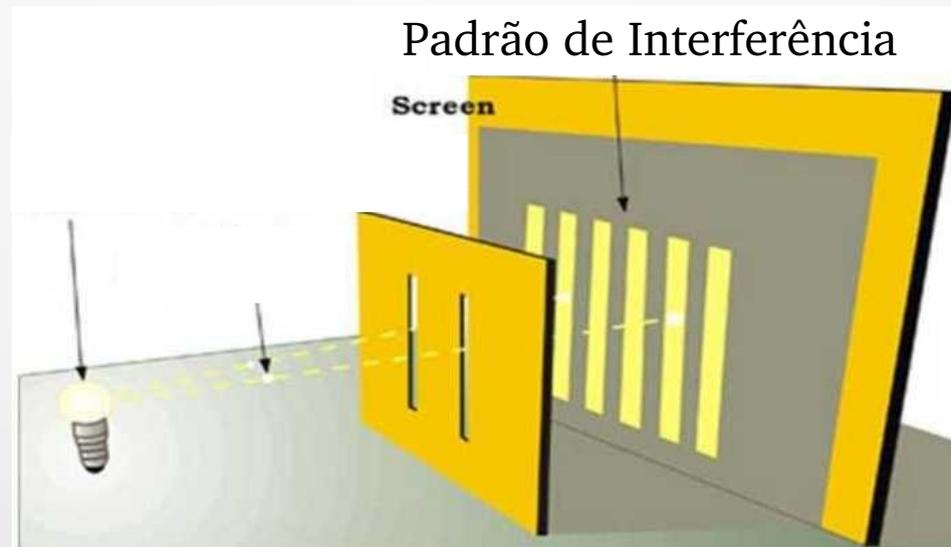
- **Difração – um fenômeno ondulatório**

A luz se propaga para partes situadas atrás do objeto opaco



Cap 22: Ótica Ondulatória

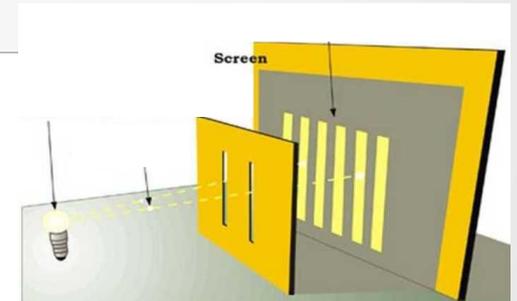
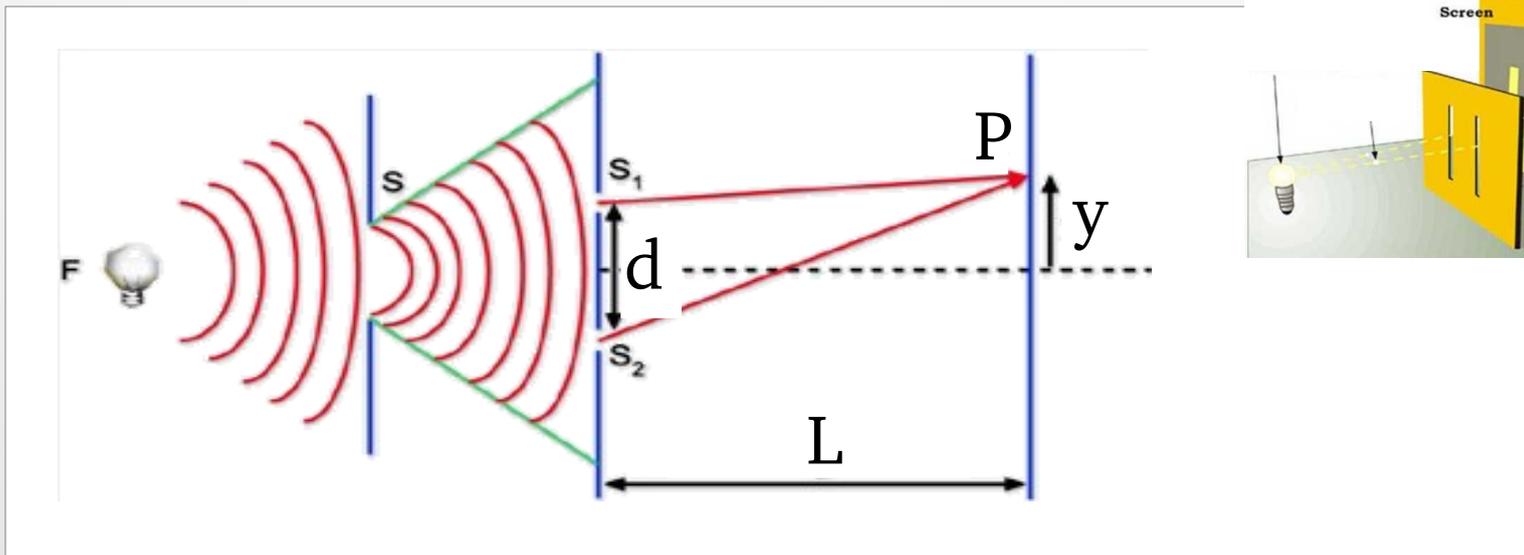
- Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young



Cap 22: Ótica Ondulatória

• Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

Esquematicamente

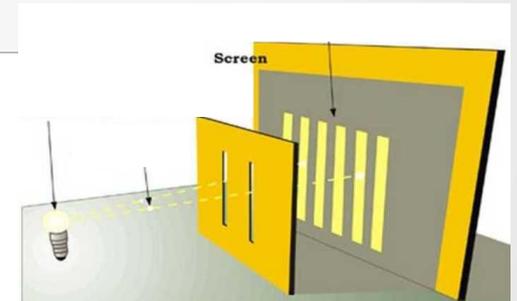
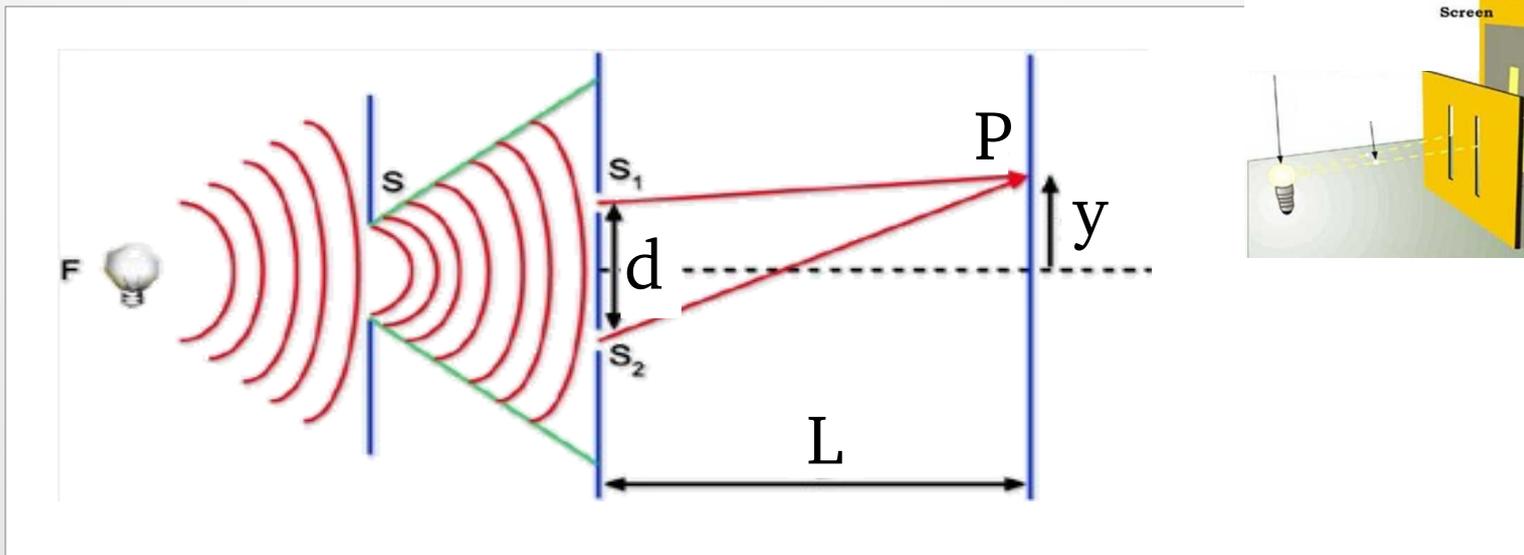


No ponto P ocorre interferência construtiva ou destrutiva?

Cap 22: Ótica Ondulatória

• Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

Esquematicamente

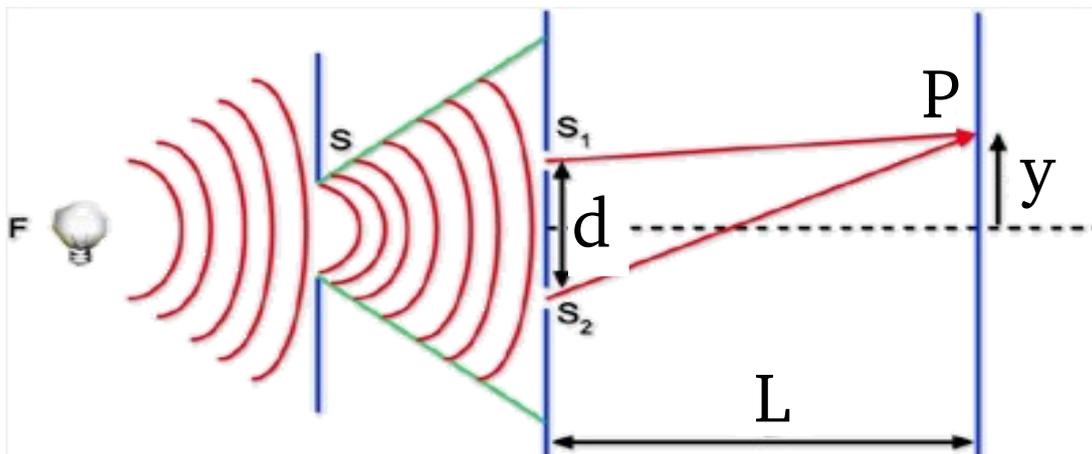


No ponto P ocorre interferência construtiva ou destrutiva?

Cap 22: Ótica Ondulatória

• Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

Esquematicamente

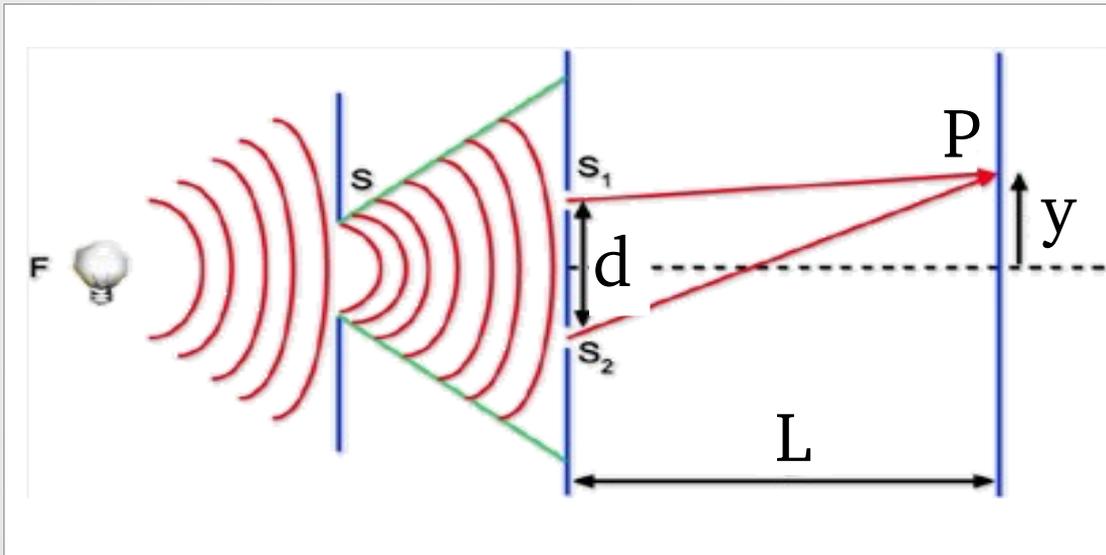


Interferência construtiva

$$d \operatorname{sen}(\theta) = m\lambda$$

$$\downarrow$$
$$y = m \frac{\lambda L}{d}$$

Cap 22: Ótica Ondulatória



Interferência construtiva

$$d \operatorname{sen}(\theta) = m\lambda$$



$$y = m \frac{\lambda L}{d}$$

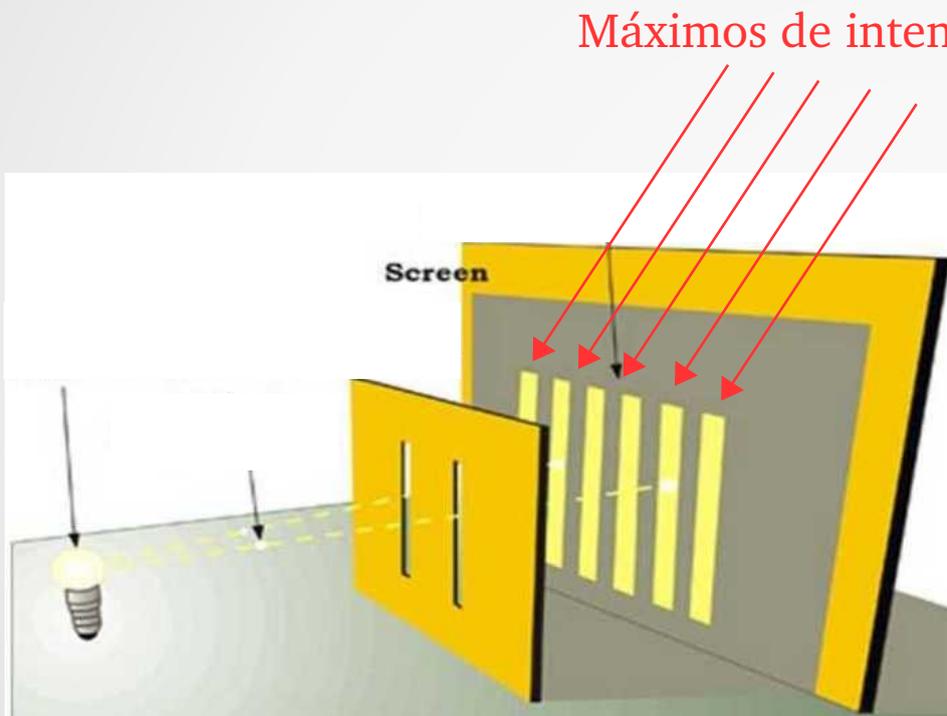
Interferência destrutiva

$$d \operatorname{sen}(\theta) = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$



$$y = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda L}{d}$$

Cap 22: Ótica Ondulatória



$$y = m \frac{\lambda L}{d}$$

* As franjas são igualmente espaçadas

Teste Online

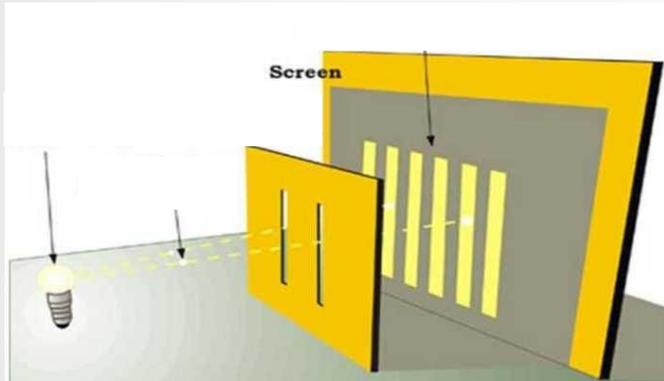
4º questão - De acordo com a expressão 22.14, as intensidades das franjas brilhantes no anteparo não deveriam variar (perder o brilho) ao se afastarem do máximo central. Contudo, diferente disso, quanto mais distante do máximo central se localiza a franja, menos intensa ela é. Por que ocorre essa queda na intensidade?

Estudante 1: “Porque quanto mais distante do centro menor é a amplitude e para haver conservação da energia luminosa, conforme a distância do máximo central aumenta, diminui a intensidade da luz incidente.”

Estudante 2: “Porque não ocorre apenas interferência construtiva entre as duas ondas, também ocorre a interferência destrutiva.”

Cap 22: Ótica Ondulatória

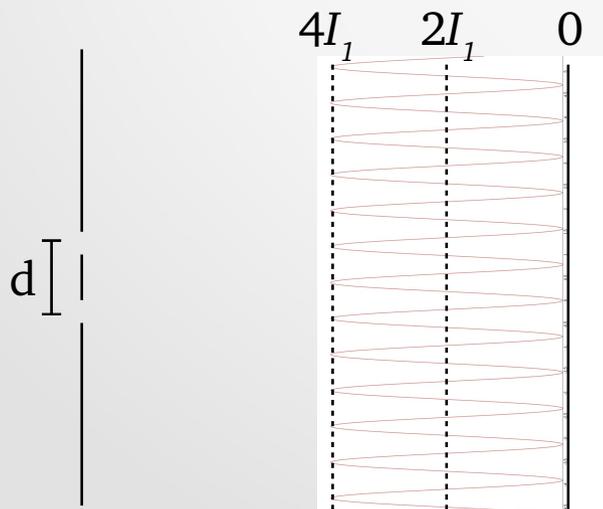
Distribuição de intensidade no anteparo



$$y(r, t) = 2A \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \text{sen}(k\bar{r} - \omega t + \Delta\phi)$$



$$I = 4I_1 \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L} y\right)$$



Cap 22: Ótica Ondulatória

TC2 - O que acontece com as franjas de interferência em um experimento de fenda dupla se a tela de visualização for aproximada?

- A) Elas se tornam mais claras, porém nada mais é alterado.
- B) Elas se tornam mais claras e se aproximam.
- C) Elas se tornam mais claras e se afastam.
- D) Elas enfraquecem e desaparecem.

Cap 22: Ótica Ondulatória

TC3 - Em um experimento de fenda dupla, se a separação entre as fendas aumenta, o que acontece com o padrão de interferência observado em uma tela?

- A) Os máximos de intensidade permanecem nas mesmas posições.
- B) Os mínimos de intensidade se aproximam.
- C) Os máximos e os mínimos de intensidade permanecem nas mesmas posições.
- D) Os máximos de intensidade se afastam.

Cap 22: Ótica Ondulatória

Rede de Difração

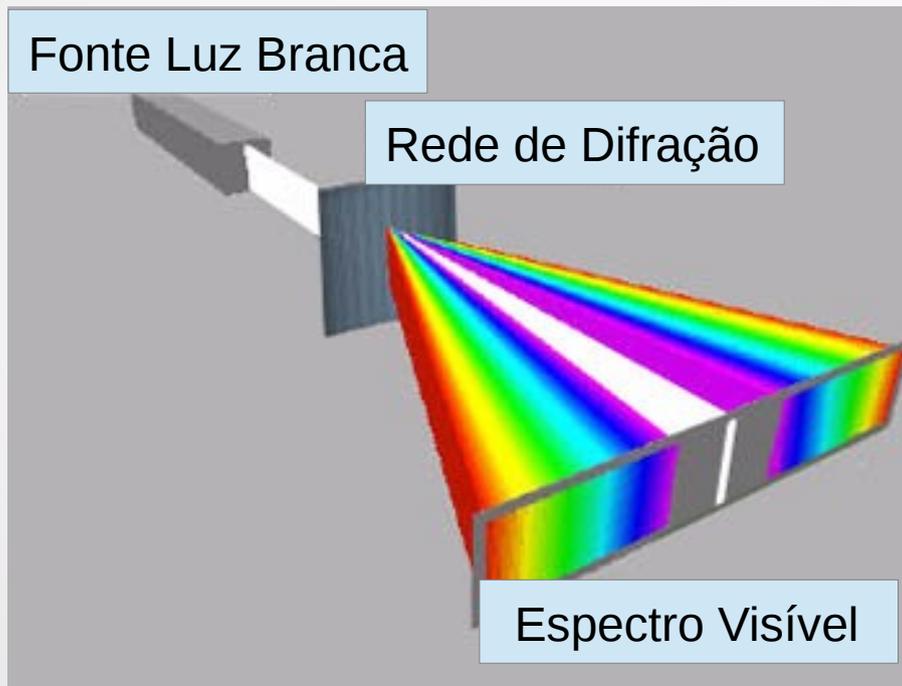
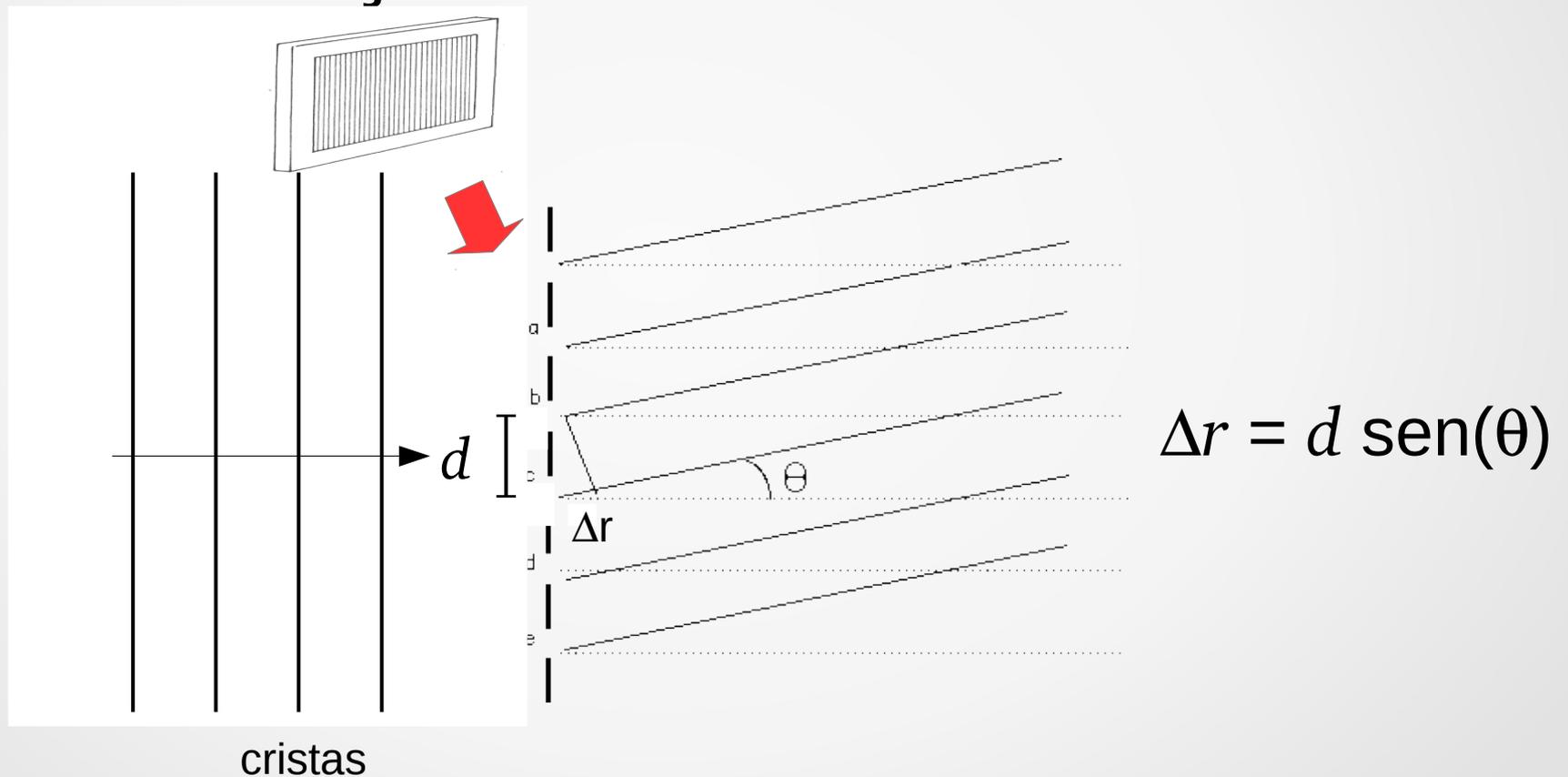


Fig.: Uma rede de difração separando a luz branca.

A rede de difração é um dispositivo ótico que separa a luz de acordo com o seu comprimento de onda.

Cap 22: Ótica Ondulatória

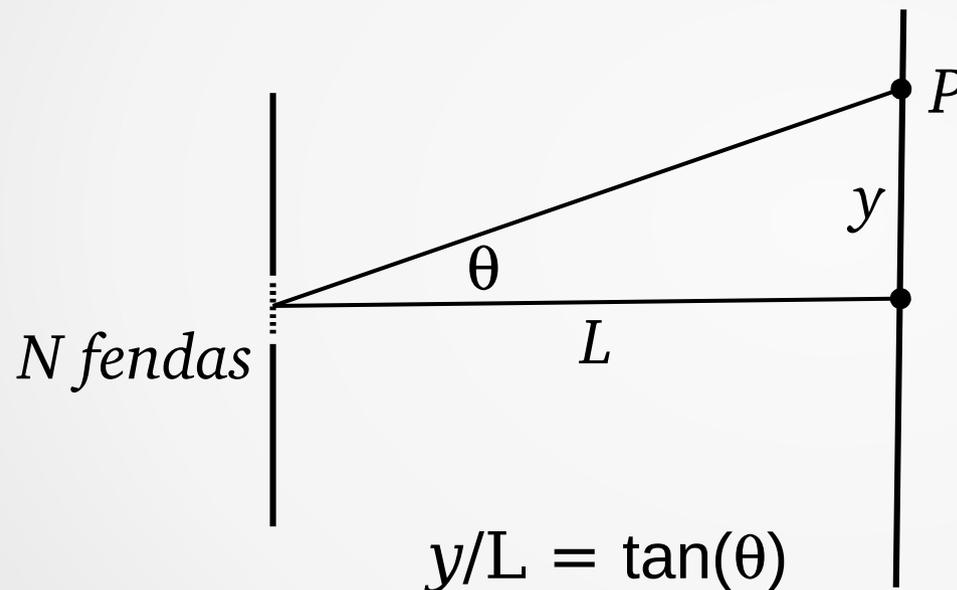
Rede de Difração



A onda proveniente de cada fenda percorre uma distância extra Δr .

Cap 22: Ótica Ondulatória

Rede de Difração



Se $\Delta r = m\lambda$, $m=0,1,2,\dots$
(Interferência Construtiva)



$$d \sin(\theta) = m\lambda$$

Nas Redes de Difração, θ não é pequeno, de forma que

~~$\tan(\theta) \approx \sin(\theta) \approx \theta$~~

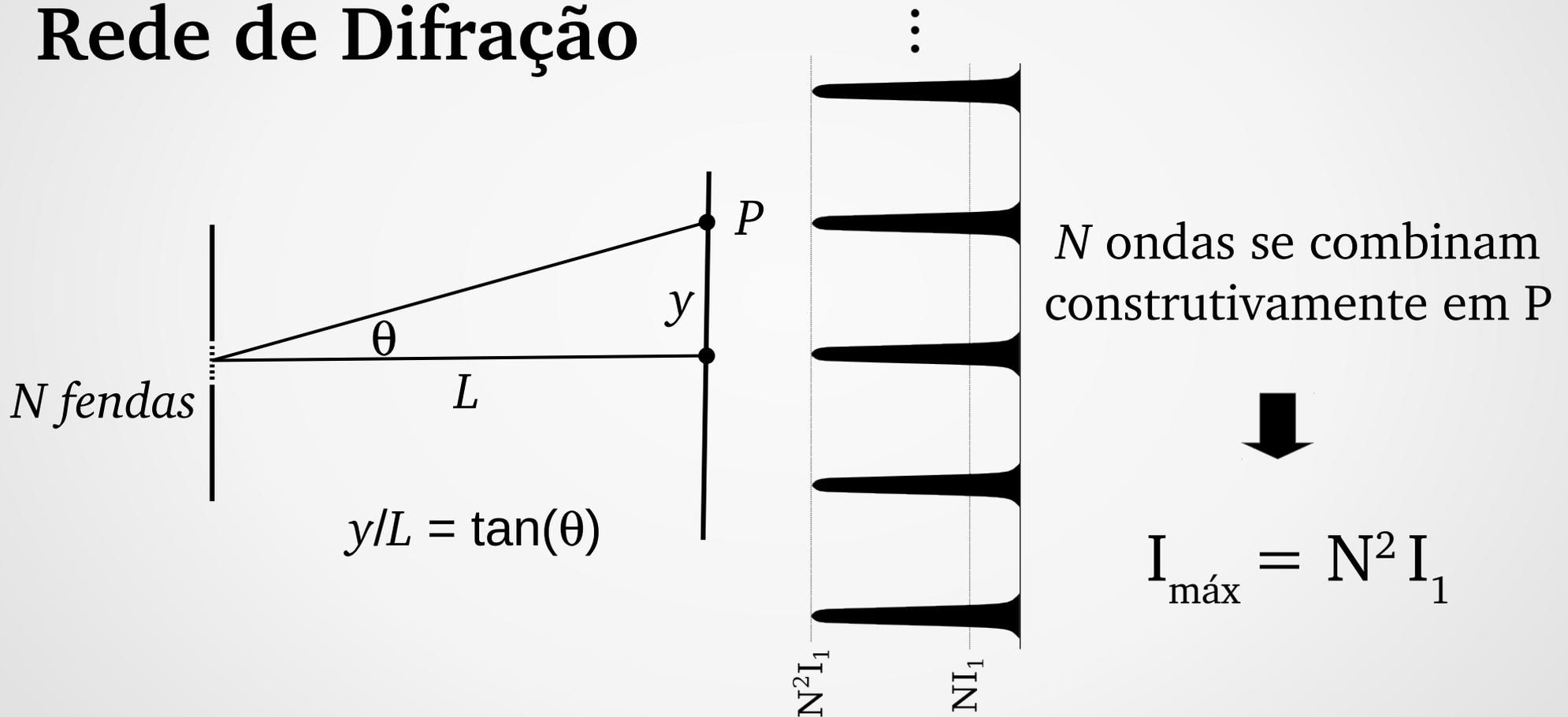
Cap 22: Ótica Ondulatória

TC4 - O que acontece com o perfil de interferência de um sistema de múltiplas fendas quando adicionamos mais fendas de mesmo espaçamento?

- A) As franjas se afastam e se tornam mais largas.
- B) As franjas se aproximam e se tornam mais largas, diminuindo a nitidez.
- C) As franjas se tornam mais estreitas.
- D) As franjas não mudam de posição e largura.

Cap 22: Ótica Ondulatória

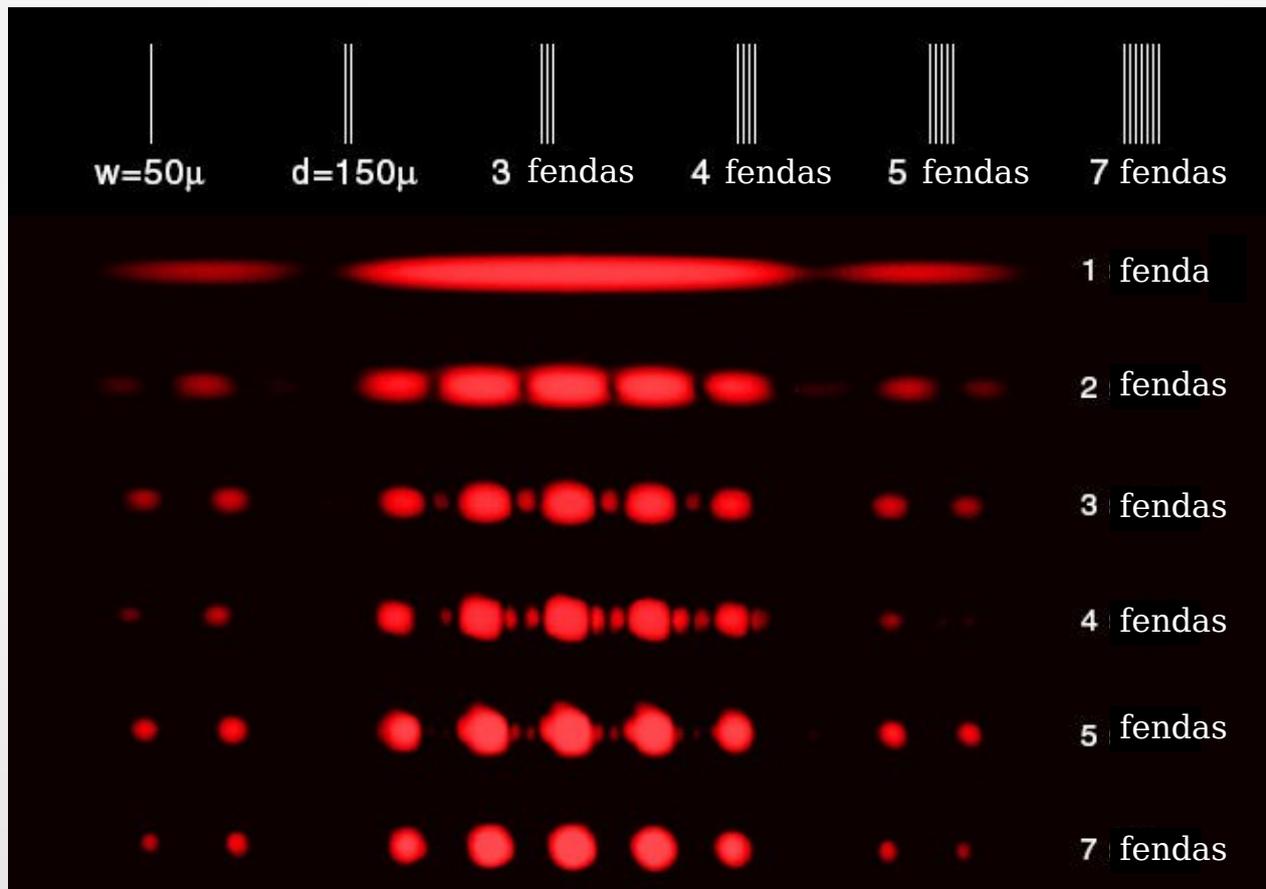
Rede de Difração



$$\theta_m = \arcsen\left(m \frac{\lambda}{d}\right) < 90^\circ$$

Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração e Interferência: dois fenômenos complementares



Cap 22: Ótica Ondulatória

Rede de Difração

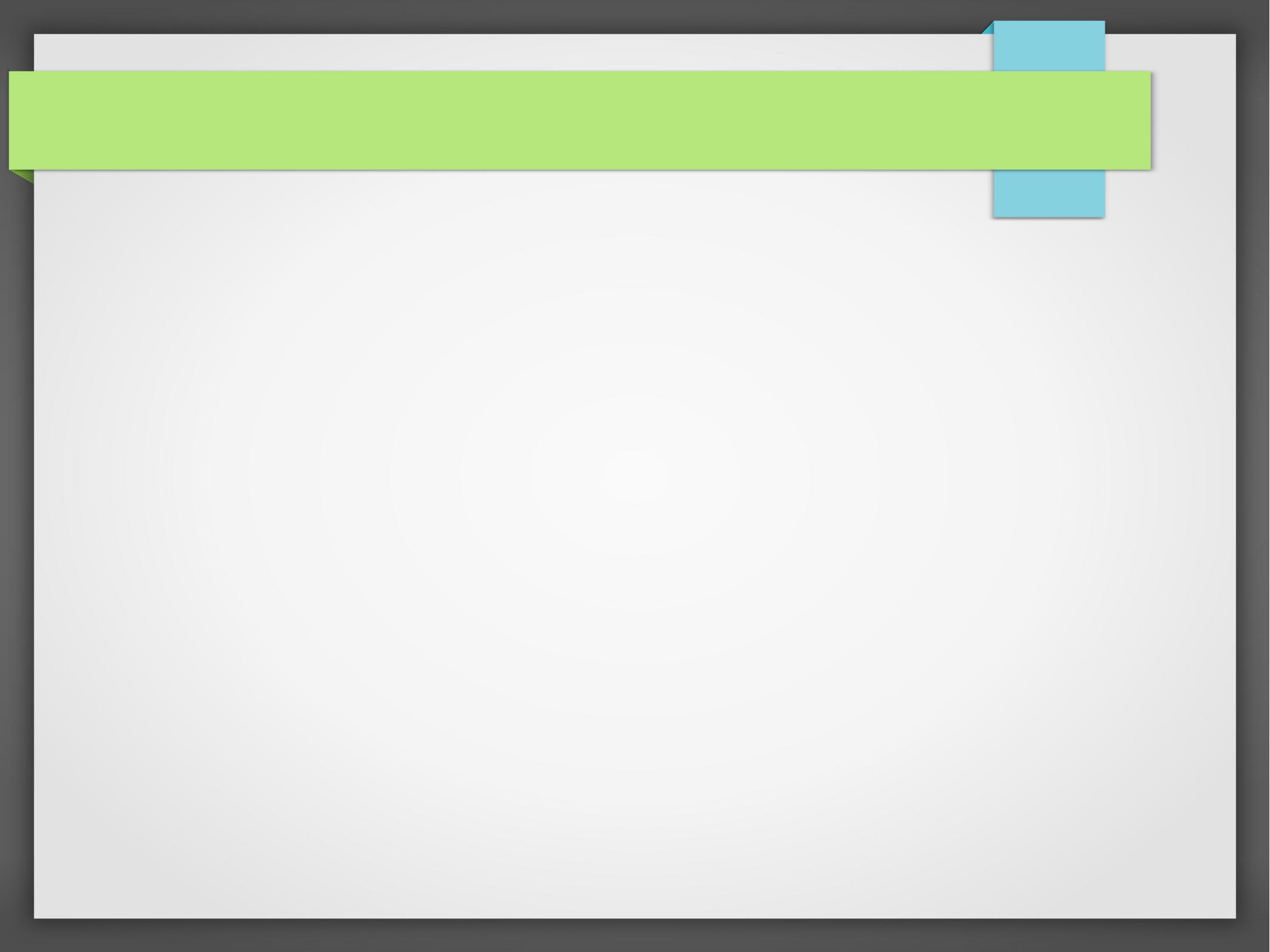
As redes de difração são geralmente utilizadas para medições dos comprimentos de onda (λ) da luz.

Denomina-se ESPECTROSCOPIA a ciência de medir λ de emissões atômicas e moleculares.

Cap 22: Ótica Ondulatória

TC5 - Se luz branca incide em uma rede de difração:

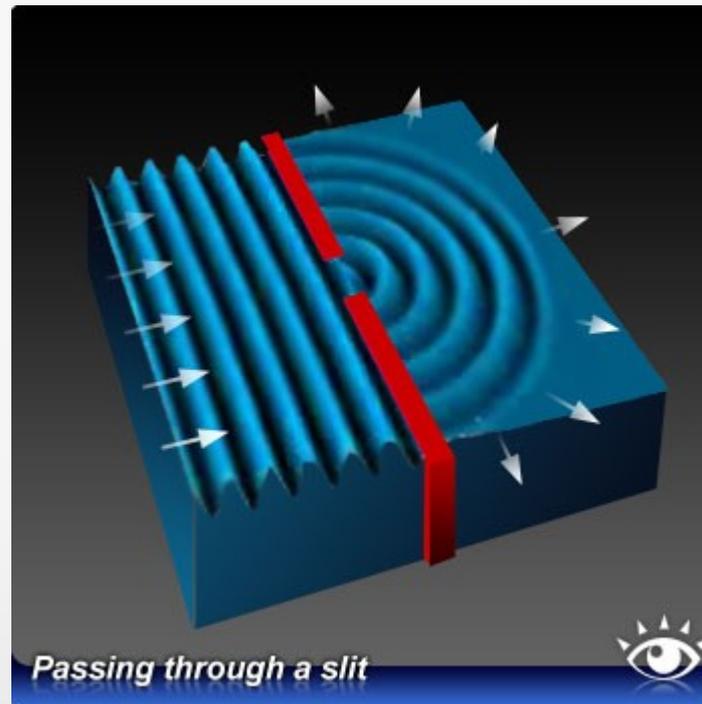
- A) As linhas referentes a primeira ordem da radiação visível nunca sobrepõe às linhas referentes a segunda ordem.
- B) Parte das linhas referentes a primeira ordem da radiação visível sempre sobrepõe às linhas referentes a segunda ordem.
- C) Considerando apenas a radiação visível, parte das franjas de primeira e segunda ordem podem se recobrir, dependendo da relação entre a separação entre as fendas e o comprimento de onda.
- D) Considerando apenas a radiação visível, parte das franjas de primeira e segunda ordem podem se recobrir, dependendo do valor da separação entre as fendas.



Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração em Fenda Simples

→ Desvio da trajetória retilínea de uma onda quando parte dela é obstruída de alguma forma.

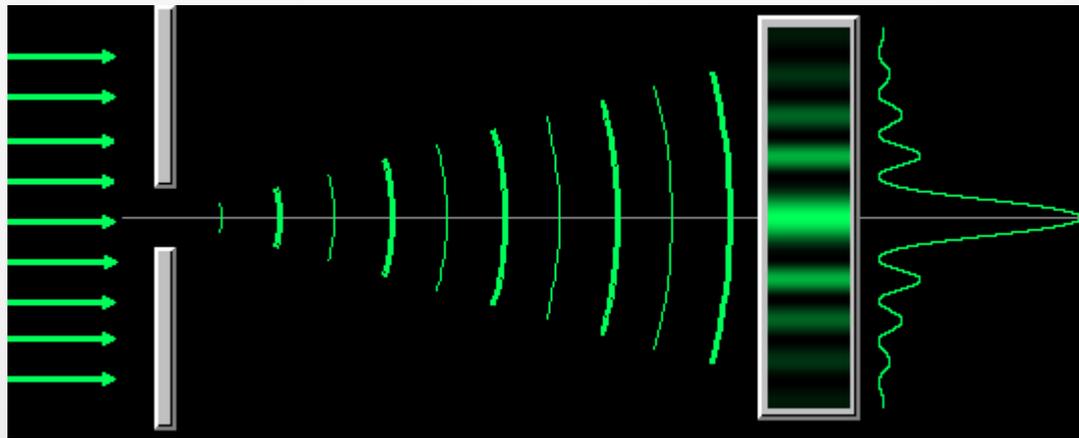


Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração em Fenda Simples

→ Desvio da trajetória retilínea de uma onda quando parte dela é obstruída de alguma forma.

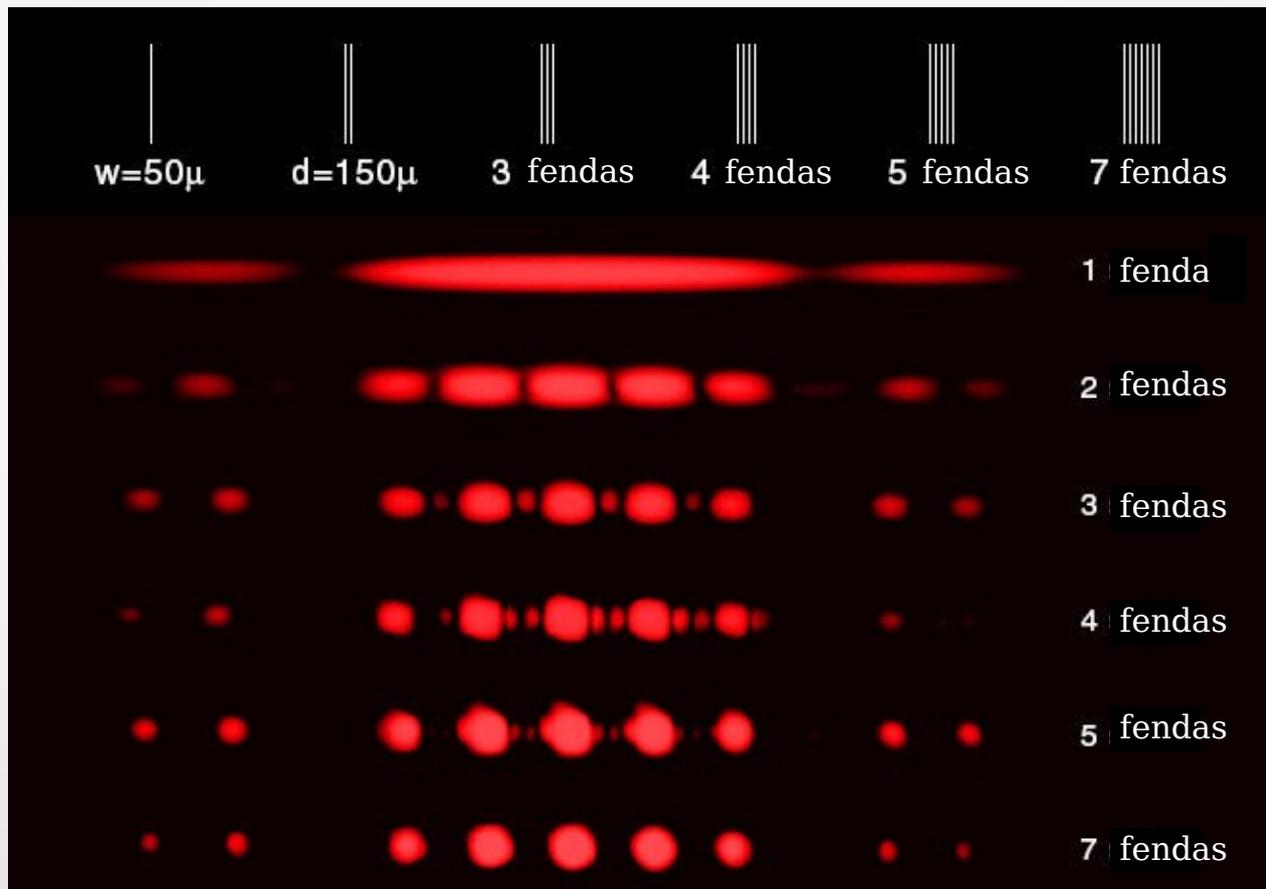
Um laser difratando em uma fenda estreita



A intensidade no anteparo é uma função do ângulo

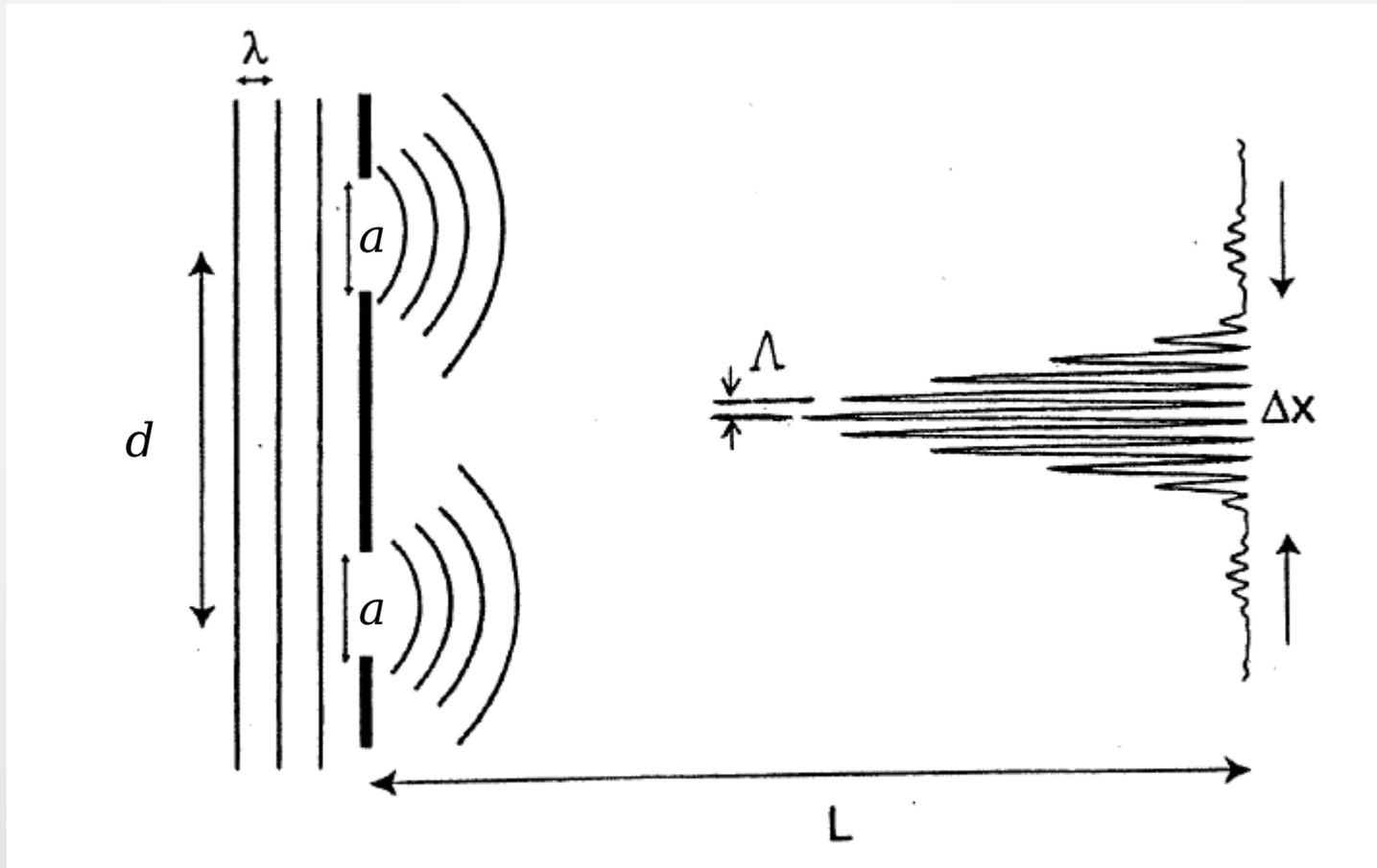
Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração e Interferência: dois fenômenos complementares



Cap 22: Ótica Ondulatória

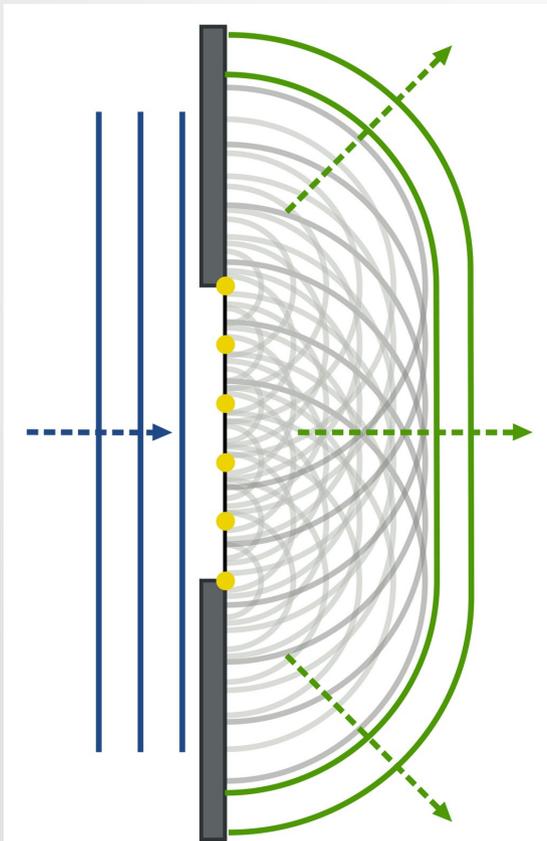
Difração e Interferência: dois fenômenos complementares



Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração Voltando ao caso de Difração em Fenda Simples...

Determinação dos ângulos de intensidade mínima.



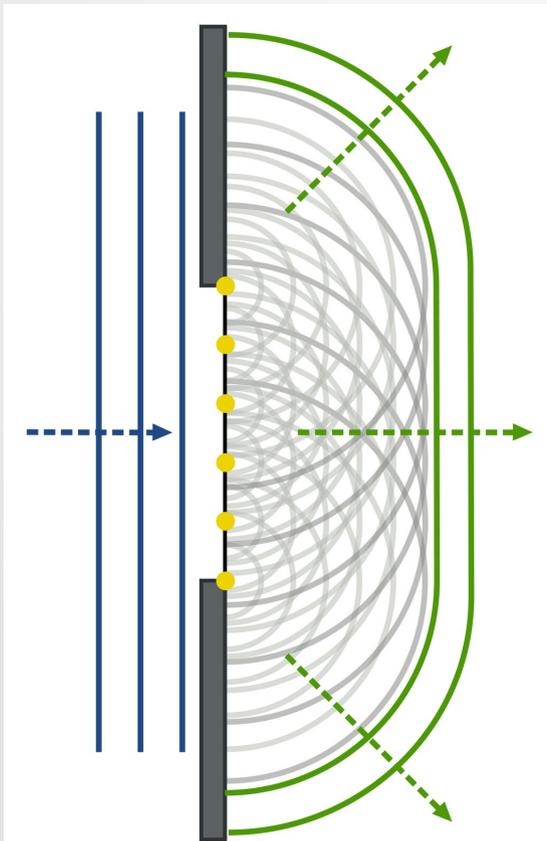
Princípio de Huygens

- cada ponto da crista é uma fonte.
- O formato da onda num instante posterior é dado pela linha que tangencia todas as frentes de ondas emitidas pelos emissores secundários.

Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração Voltando ao caso de Difração em Fenda Simples...

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.

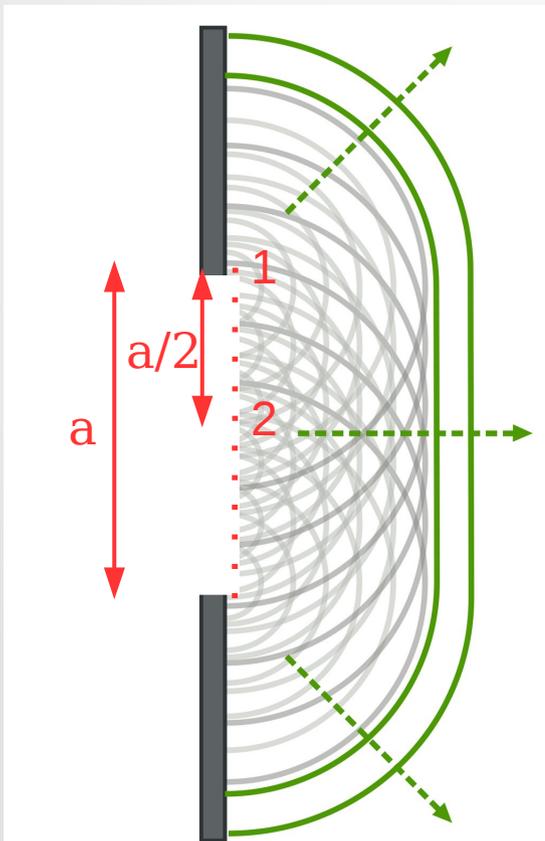


- As ondulações provenientes de cada emissor se superpõe produzindo o padrão de interferência observado na tela.
- As ondas que se propagam na direção horizontal percorrem o mesmo caminho, de forma que no centro da tela ocorre uma interferência construtiva.

Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração: Voltando ao caso de Dif. em Fenda Simples...

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.



- Nos pontos fora do centro a situação muda.

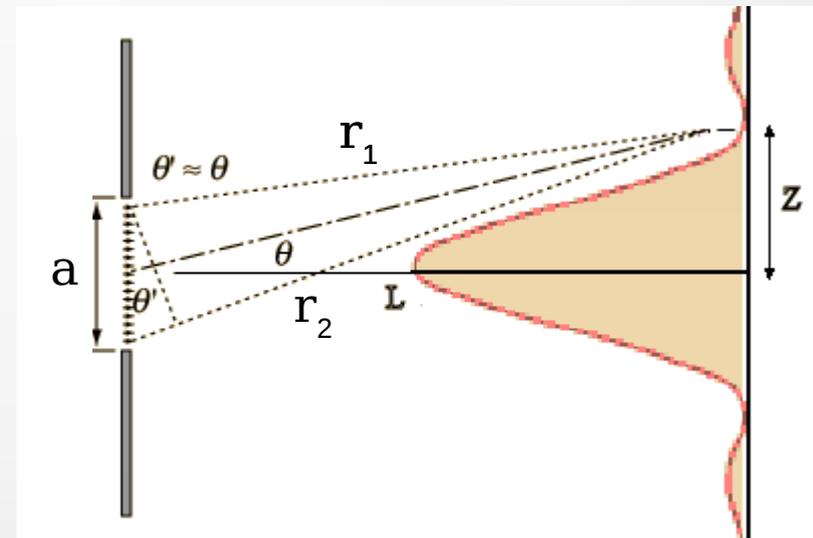
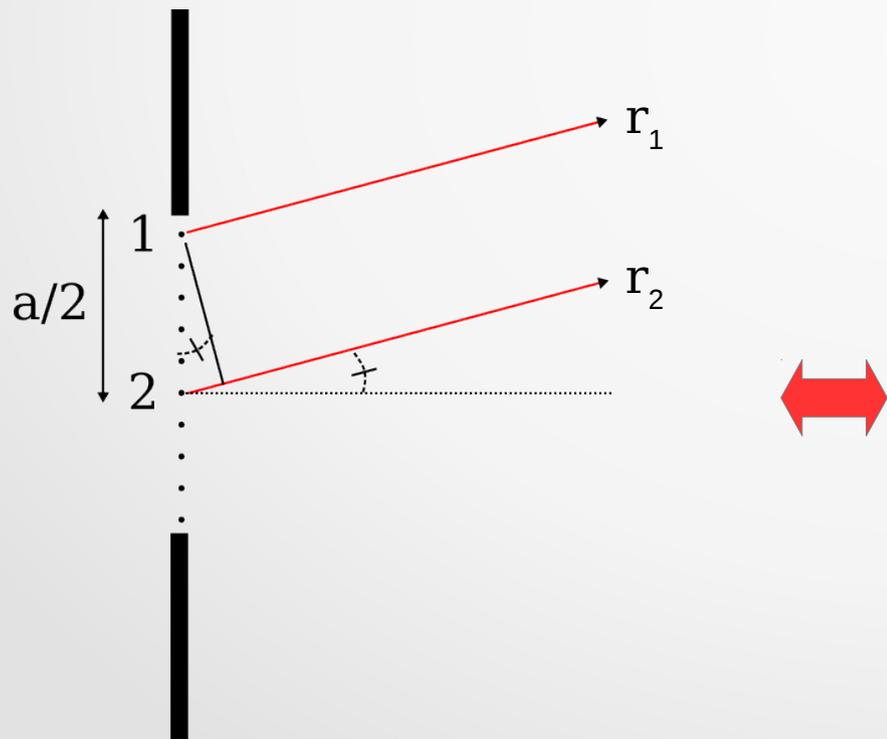
Uma possibilidade para localização do mínimo é que as ondulações provenientes de dois emissores localizados em 1 e 2 interfiram destrutivamente num ponto do anteparo. Neste caso, temos ainda que as ondulações provenientes de todos os pares de emissores separados de $a/2$ também interferem destrutivamente...

Ver próximo slide!

Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração: Voltando ao caso de Difração em Fenda Simples...

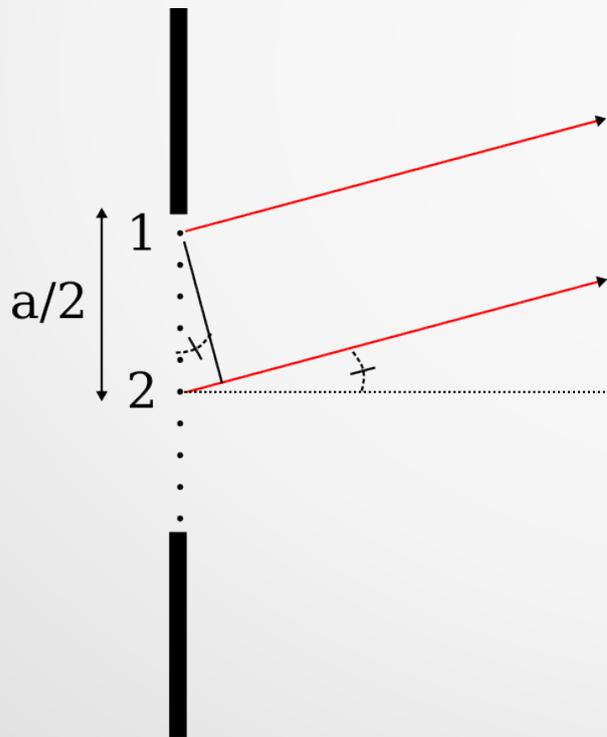
Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.



Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração: Voltando ao caso de Dif. em Fenda Simples...

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.

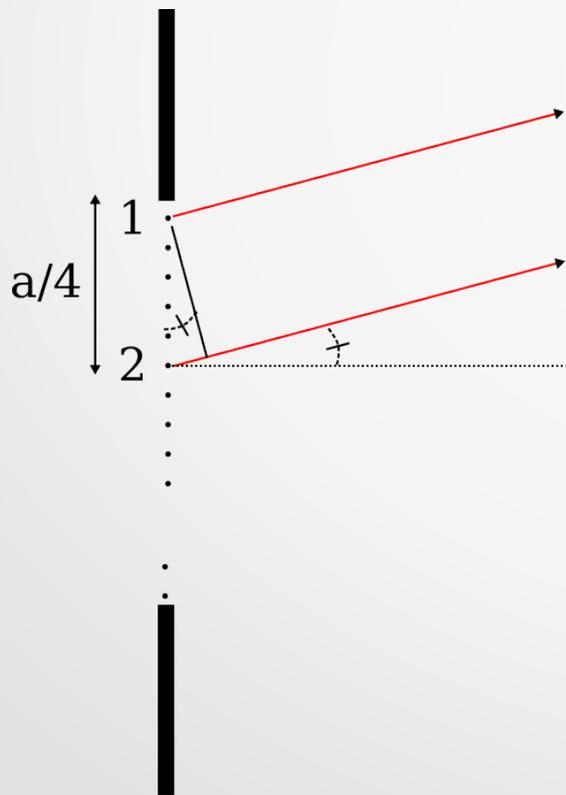


$$\Delta r_{12} = (a/2) \times \text{sen}(\theta) = \lambda/2$$

Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração: Voltando ao caso de Dif. em Fenda Simples...

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.



$$\Delta r_{12} = (a/4) \times \text{sen}(\theta) = \lambda/2$$

Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração: Voltando ao caso de Dif. em Fenda Simples...

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.

Generalizando este procedimento

$$a \sin(\theta_p) = p\lambda$$

$p=1,2,3\dots$



p = ordem do mínimo de difração

Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração: Voltando ao caso de Dif. em Fenda Simples...

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.

Quando $\theta \ll 1 \rightarrow \text{sen}(\theta) \approx \theta$

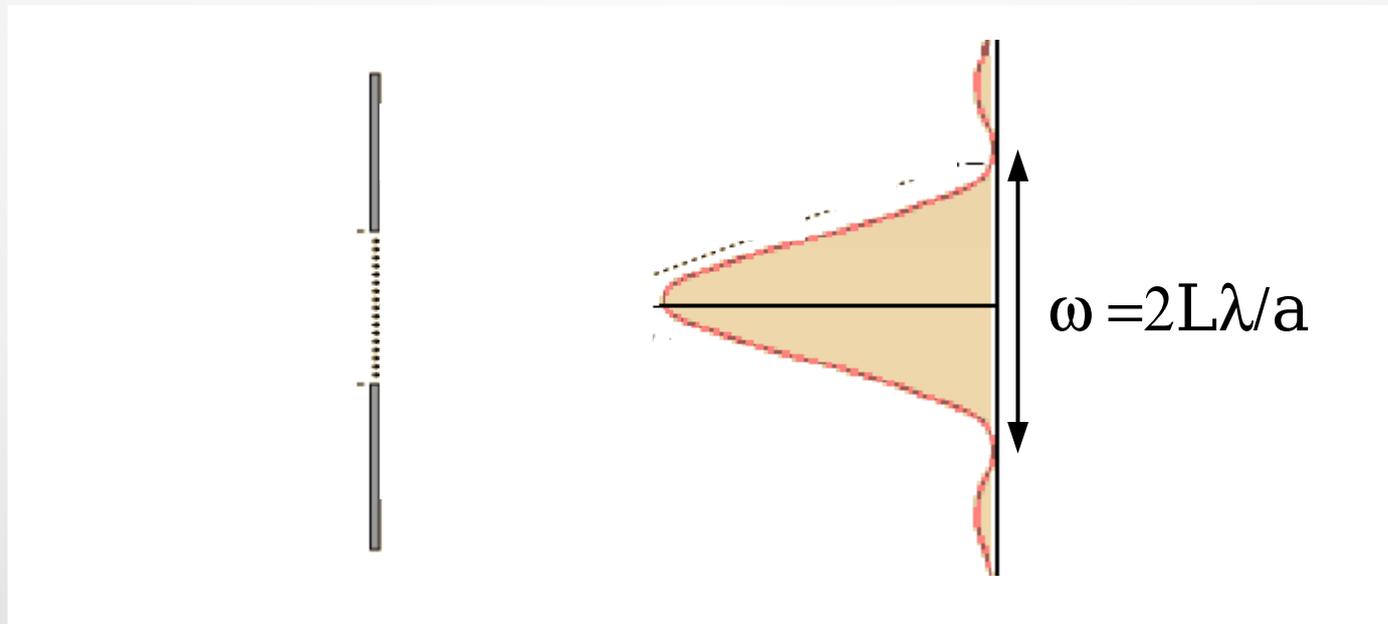
$$a \sin \theta_p \approx p\lambda$$

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

Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração: Voltando ao caso de Dif. em Fenda Simples...

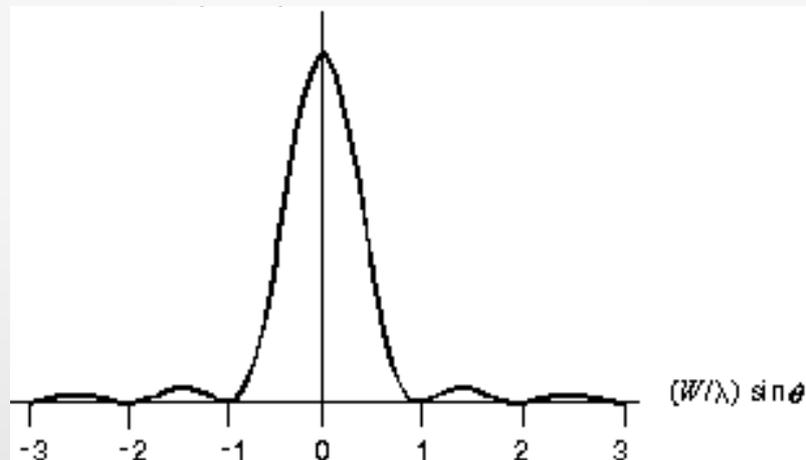
A Largura do Padrão de Difração



Teste Conceitual

Luz com comprimento de onda λ incide normalmente em um dispositivo óptico plano. O padrão de intensidade mostrado na figura abaixo é o padrão observado em uma tela de observação posicionada bem distante do dispositivo (q é o ângulo medido com a normal ao dispositivo). O dispositivo pode ser:

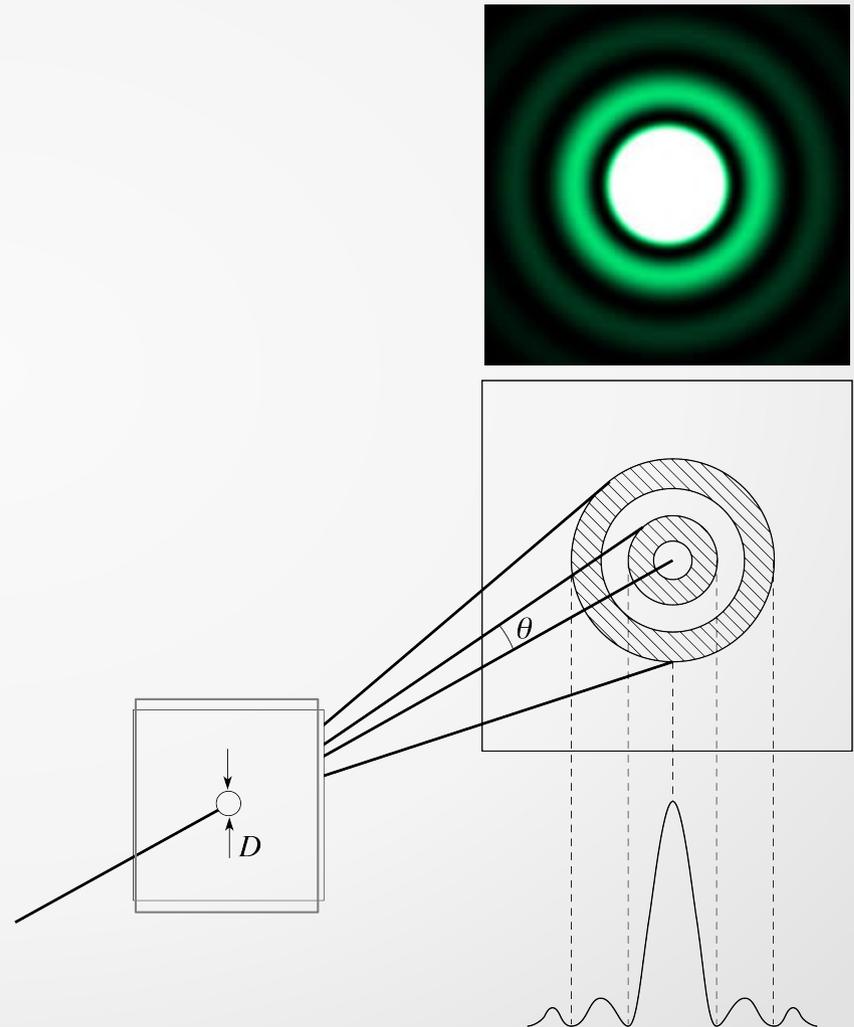
- A) uma fenda simples de largura W
- B) uma fenda simples de largura $2W$
- C) duas fendas paralelas separadas por W
- D) duas fendas paralelas separadas por $2W$



Cap 22: Ótica Ondulatória

Difração em orifício circular

$$\rightarrow \theta_1 = 1,22 \lambda/D$$



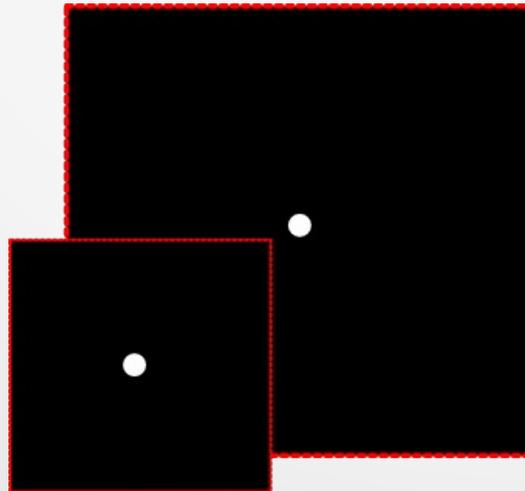
Cap 22: Ótica Ondulatória

Eu sempre observo a difração quando a luz passa por um orifício circular?

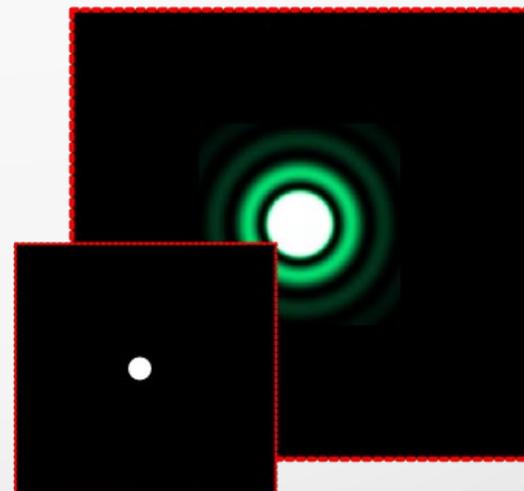
Cap 22: Ótica Ondulatória

Eu sempre observo a difração quando a luz passa por um orifício circular? → **NÃO**

Ótica Geométrica



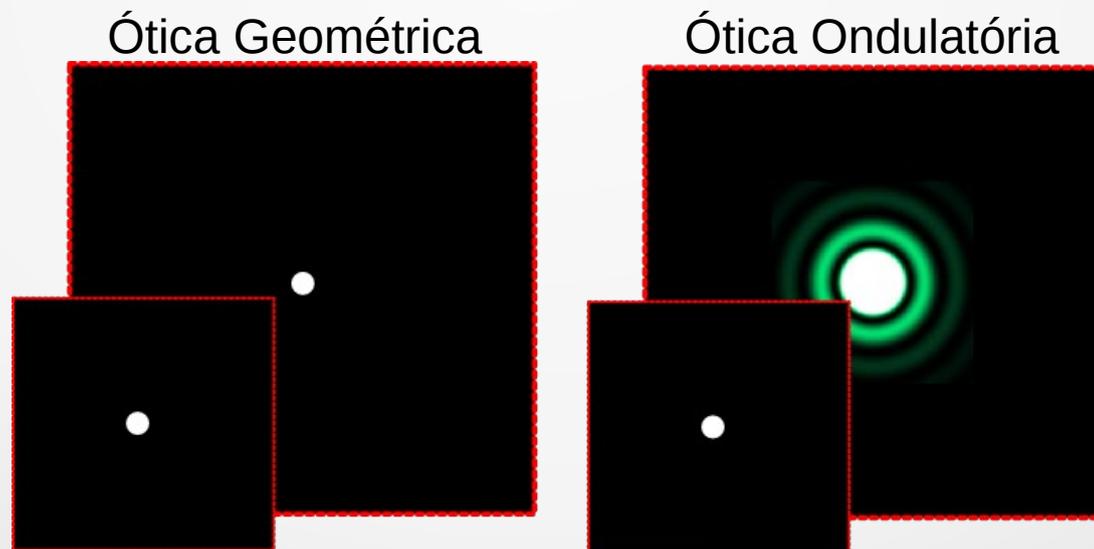
Ótica Ondulatória



Cap 22: Ótica Ondulatória

Se o espalhamento for:

- < D , utilizamos o modelo de ótica geométrica
- > D , utilizamos o modelo de ótica ondulatória



Cap 22: Ótica Ondulatória

Teste Conceitual – 2

Em um experimento de difração em fenda simples, a largura da fenda através da qual a luz passa é reduzida. O que acontece com a largura do máximo central?

- A) Permanece inalterada
- B) Torna mais estreita
- C) Torna mais larga
- D) O comportamento depende do comprimento de onda da luz.

Cap 22: Ótica Ondulatória

Teste Conceitual – 2

Em um experimento de difração em fenda simples, a largura da fenda através da qual a luz passa é reduzida. O que acontece com a largura do máximo central?

- A) Permanece inalterada
- B) Torna mais estreita
- C) **Torna mais larga**
- D) O comportamento depende do comprimento de onda da luz.

Cap 22: Ótica Ondulatória

Teste Conceitual – 3

O padrão de difração de um experimento com uma fenda simples é formado em uma tela distante. Assumindo que os ângulos envolvidos são pequenos, por qual fator a largura do máximo central mudará se a largura da fenda for dobrada?

- A) $\frac{1}{4}$ - Ele reduzirá a um quarto do tamanho original
- B) $\frac{1}{2}$ - Ele reduzirá a metade do tamanho original
- C) 2 - Ele dobrará
- D) 4 - Ele quadruplicará

Cap 22: Ótica Ondulatória

Teste Conceitual – 3

O padrão de difração de um experimento com uma fenda simples é formado em uma tela distante. Assumindo que os ângulos envolvidos são pequenos, por qual fator a largura do máximo central mudará se a largura da fenda for dobrada?

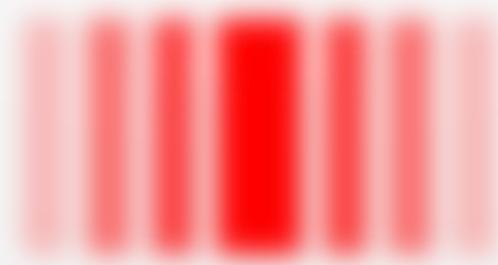
- A) $\frac{1}{4}$ - Ele reduzirá a um quarto do tamanho original
- B) $\frac{1}{2}$ - **Ele reduzirá a metade do tamanho original**
- C) 2 - Ele dobrará
- D) 4 - Ele quadruplicará

Cap 22: Ótica Ondulatória

Teste Conceitual - 4

A figura mostra a intensidade de luz na tela de visualização atrás de uma fenda simples de largura a . O comprimento de onda da luz é λ . Podemos concluir que:

- A) $\lambda < a$
- B) $\lambda > a$
- C) $\lambda = a$
- D) não se pode determinar nenhuma relação entre λ e a .

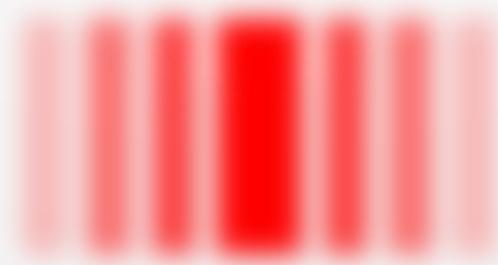


Cap 22: Ótica Ondulatória

Teste Conceitual - 4

A figura mostra a intensidade de luz na tela de visualização atrás de uma fenda simples de largura a . O comprimento de onda da luz é λ . Podemos concluir que:

- A) $\lambda < a$
- B) $\lambda > a$
- C) $\lambda = a$
- D) não se pode determinar nenhuma relação entre λ e a .

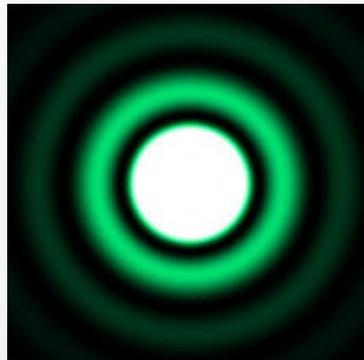


Cap 22: Ótica Ondulatória

Teste Conceitual - 5

A figura mostra a intensidade de luz na tela de visualização atrás de uma abertura circular. Se o diâmetro da abertura aumentar:

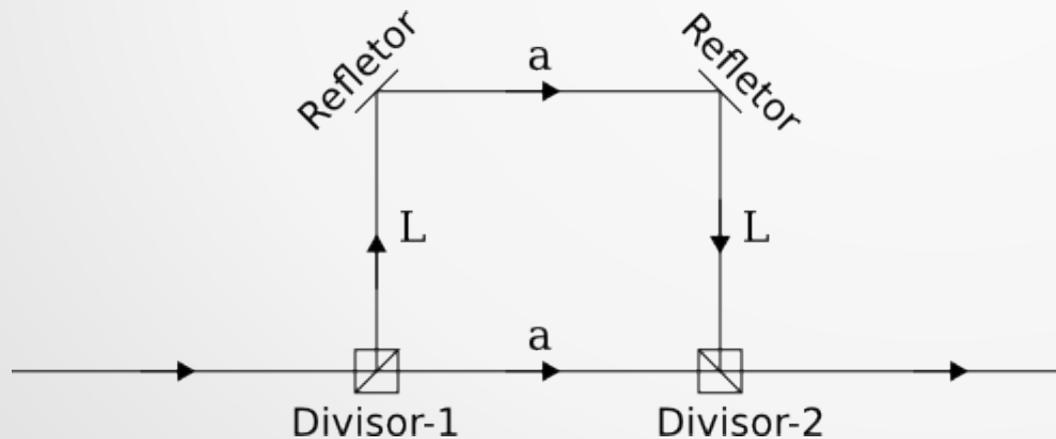
- A) o diâmetro do máximo central aumenta.
- B) o diâmetro do máximo central diminui.
- C) nada acontece com o diâmetro do máximo central.
- D) os diâmetros dos anéis escuros aumentam.



Cap 22: Ótica Ondulatória

Interferômetros:

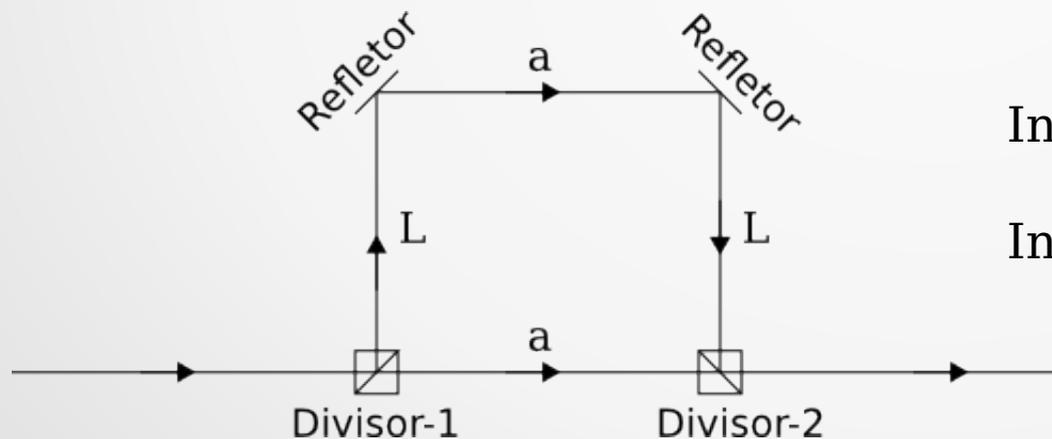
Dispositivos utilizados para medidas ultraprecisas e para o controle do fluxo de luz



Cap 22: Ótica Ondulatória

Interferômetros:

Dispositivos utilizados para medidas ultraprecisas e para o controle do fluxo de luz



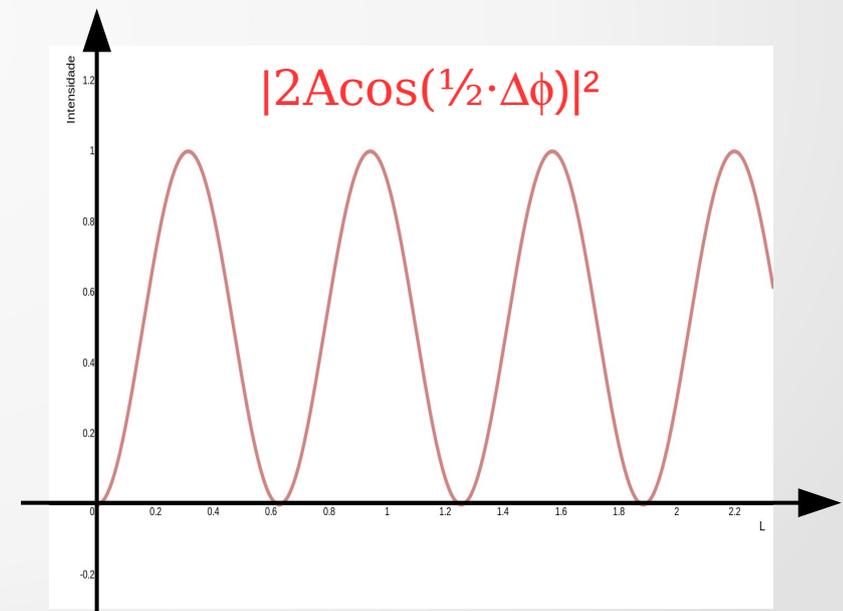
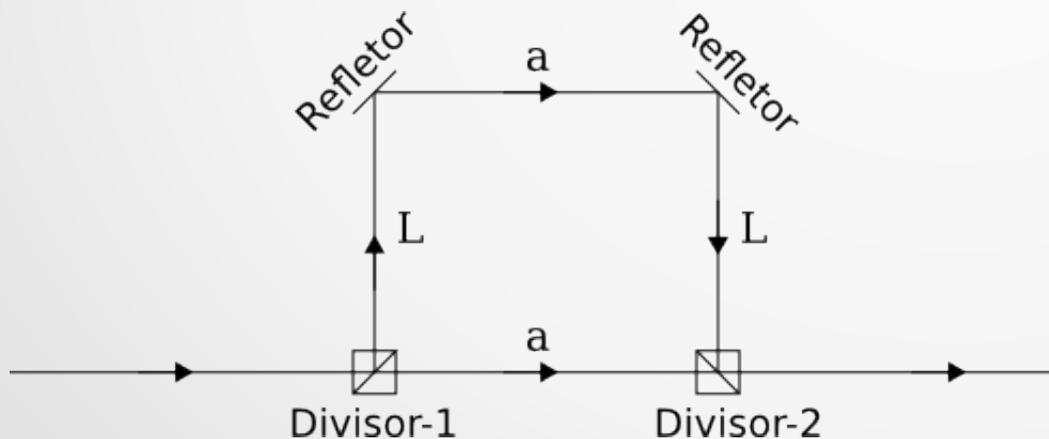
$$\begin{aligned} \text{Int. Construtiva:} & \left\{ \begin{array}{l} 2L = m\lambda \\ 2L = (m + \frac{1}{2})\lambda \end{array} \right. \\ \text{Int. Destrutiva:} & \left\{ \begin{array}{l} 2L = m\lambda \\ 2L = (m + \frac{1}{2})\lambda \end{array} \right. \end{aligned}$$

$(m=0, 1, 2, \dots)$

Cap 22: Ótica Ondulatória

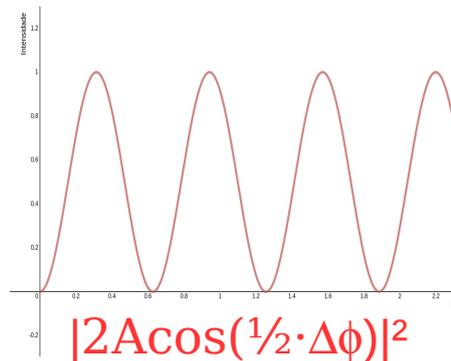
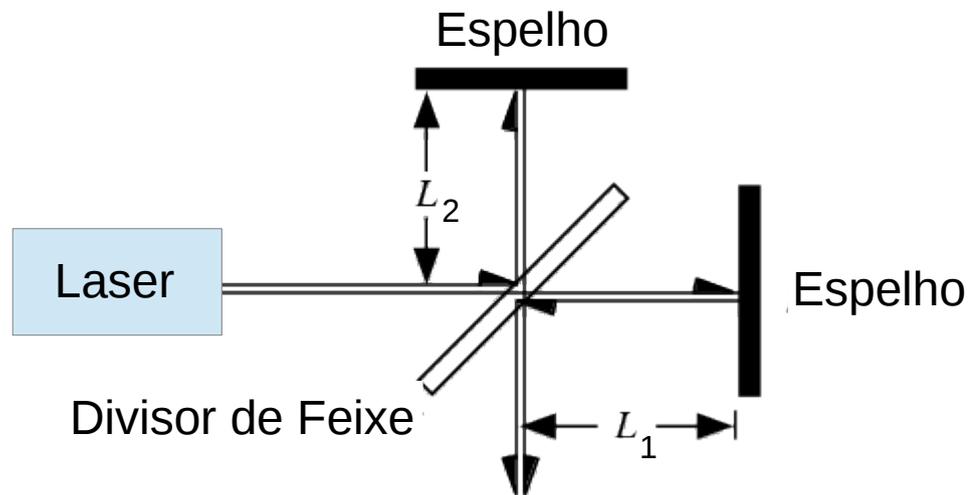
Interferômetros:

Dispositivos utilizados para medidas ultraprecisas e para o controle do fluxo de luz



Cap 22: Ótica Ondulatória

Interferômetro de Michelson

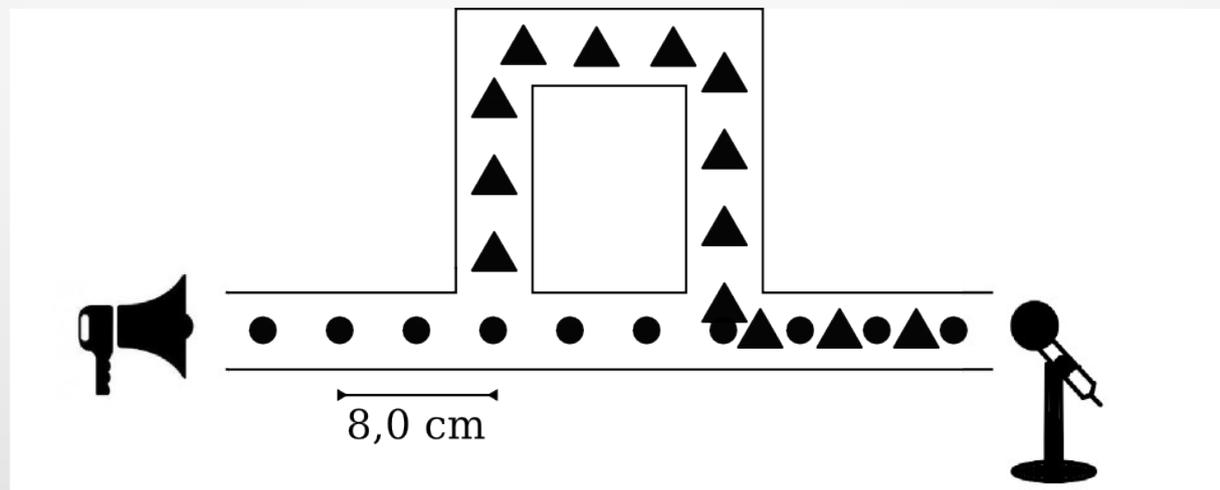


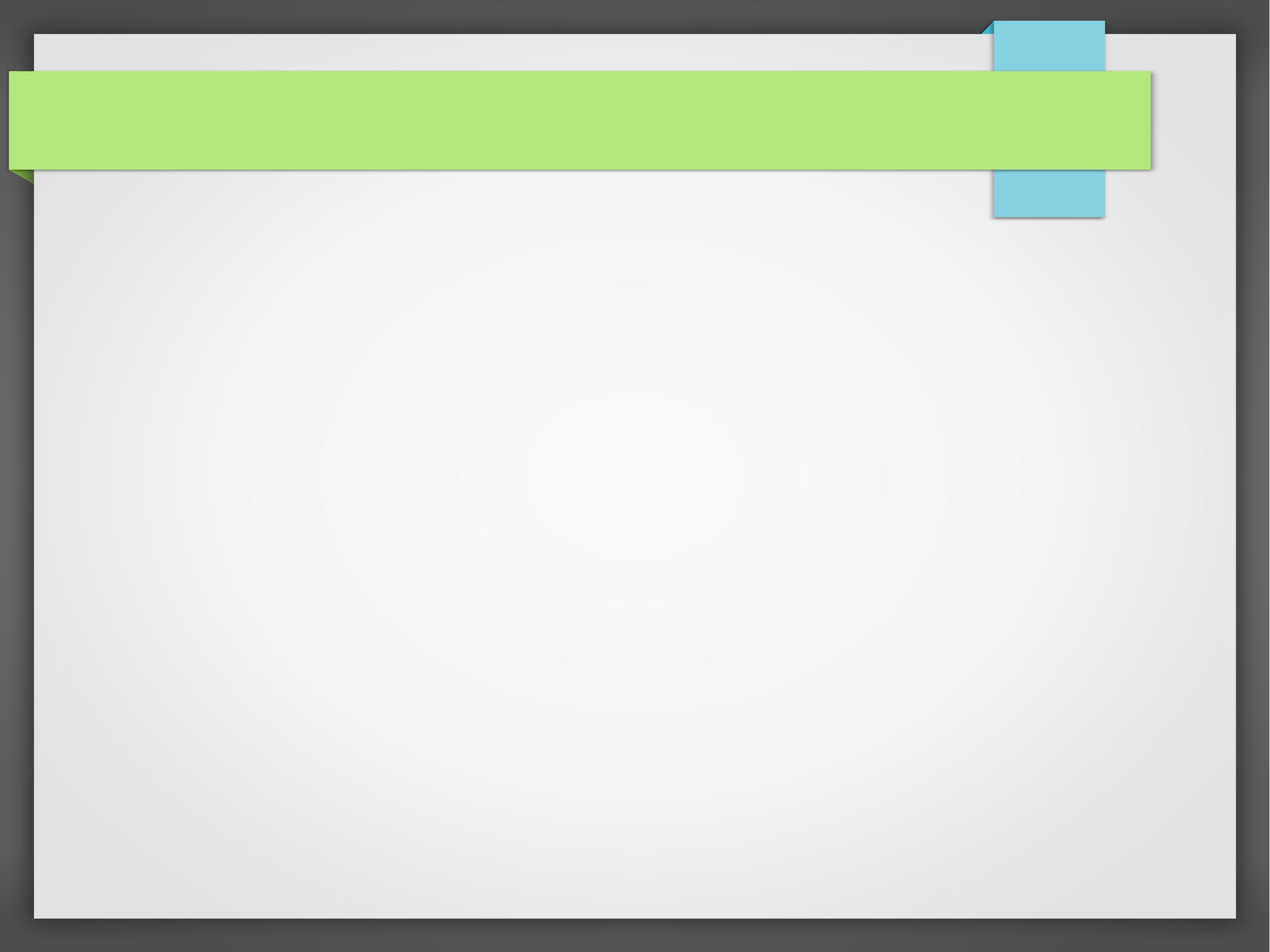
Cap 22: Ótica Ondulatória

Teste Conceitual - 7

A Figura mostra um tubo no qual se propagam ondas sonoras com $\lambda=4\text{cm}$ da esquerda para direita. A onda se divide na primeira junção e se recombina na segunda. Os pontos e os triângulos indicam as posições das cristas das ondas em $t=0\text{s}$ – bem como um diagrama de frentes de ondas muito simples.

- A) a intensidade registrada pelo microfone é máxima - interferência construtiva
- B) a intensidade registrada pelo microfone é nula - interferência destrutiva
- C) a intensidade registrada pelo microfone é metade da intensidade original.
- D) a intensidade registrada pelo microfone é $\frac{1}{4}$ da intensidade original.





Cap 22: Ótica Ondulatória

Teste Conceitual - 6

Um Interferômetro de Michelson é ajustado para mostrar interferência construtiva quando a luz tem comprimento de onda λ . Se o comprimento de onda for alterado para $\lambda/2$,

- A) a intensidade transmitida pelo interferômetro será máxima - interferência construtiva
- B) a intensidade transmitida pelo interferômetro será nula - interferência destrutiva
- C) a intensidade transmitida pelo interferômetro será reduzida a metade.
- D) a intensidade transmitida pelo interferômetro será reduzida a $1/4$.