

## ***Cap. 22: Óptica Ondulatória***

### ***Difração e Interferência de ondas***

# Modelos para a luz

Diferentes **modelos** são comumente utilizados para descrever a luz

Até o início do séc XX, dois modelos 'clássicos' eram utilizados, cada um em situações distintas

- **Modelo de raios:** luz como 'corpúsculos' se propagando em linha reta

Evidência: **Sombras** produzem uma imagem nítida do contorno de objetos iluminados

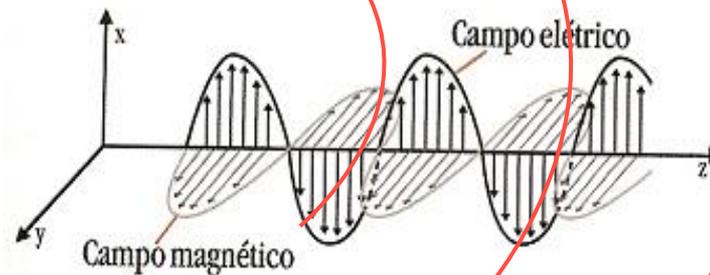


# Modelos para a luz

Diferentes **modelos** são comumente utilizados para descrever a luz

Até o início do séc XX, dois modelos 'clássicos' eram utilizados, cada um em situações distintas

- **Modelo Ondulatório:** luz como uma onda eletromagnética



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

cristas

**Evidência:** experimentos de difração / interferência envolvendo luz; teoria eletromagnética

# Modelos para a luz

Diferentes **modelos** são comumente utilizados para descrever a luz

No séc XX descobriu-se que a realidade exige uma descrição mais complexa:

- **Modelo de fótons:** luz como uma entidade quântica, composta de unidades que possuem características tanto de partículas como de ondas

Evidências: muitos efeitos que só serão discutidos em Fis IV / Fis Moderna e além! (Efeito fotoelétrico, efeito Compton, criação de partículas materiais a partir de luz...)

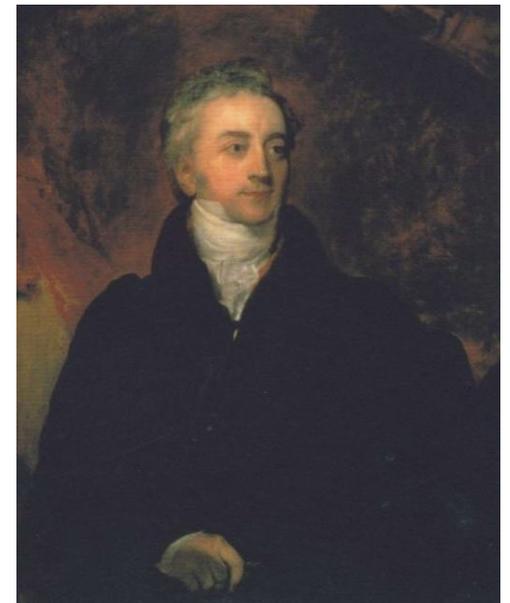
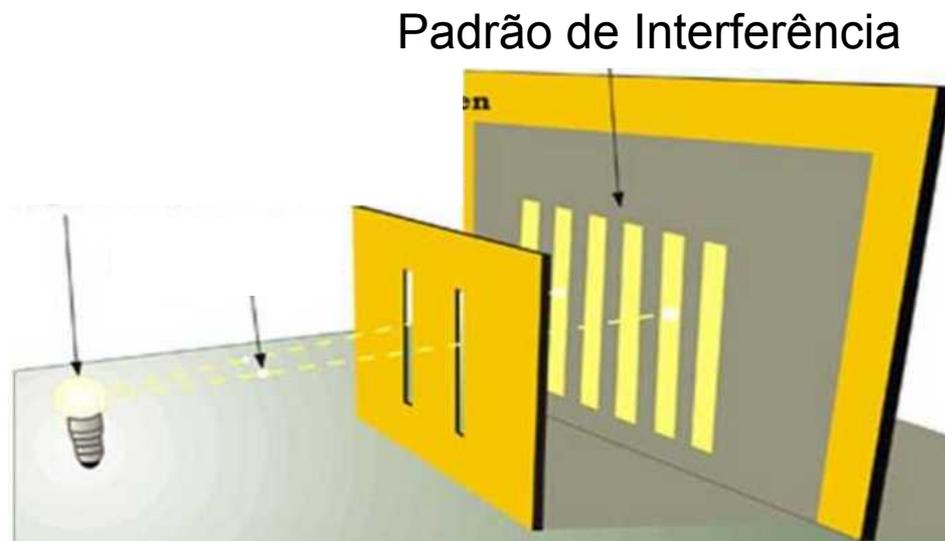
O modelo de fótons explica todos os fenômenos conhecidos envolvendo a luz, e se reduz aos outros dois em limites apropriados

Mesmo assim, os modelos clássicos continuam extremamente úteis dentro dos seus respectivos domínios de validade

# Ótica Ondulatória

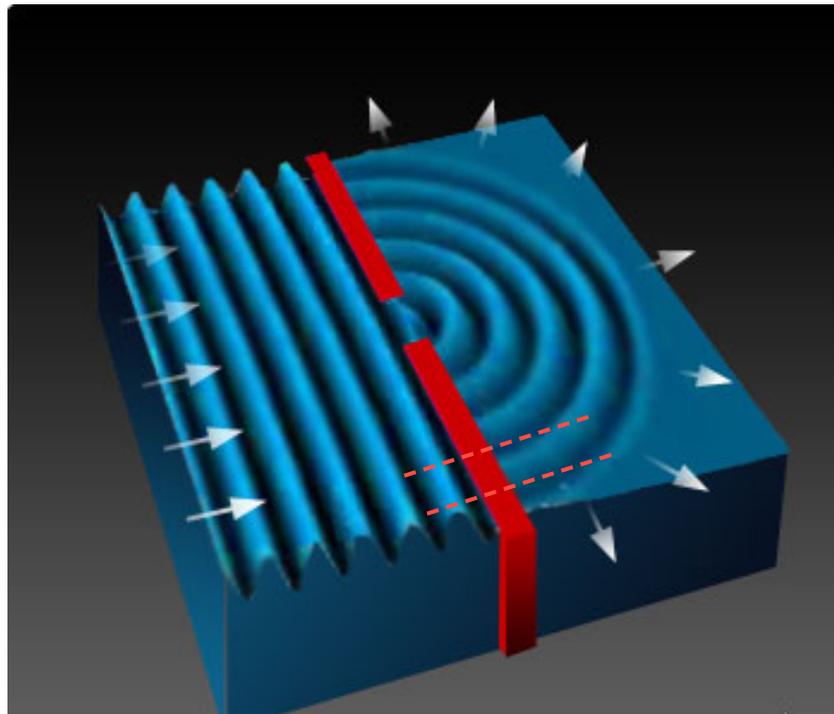
**1801:** Thomas Young realiza um experimento que evidencia a natureza ondulatória da luz

O experimento, conhecido como a Fenda Dupla de Young, envolve a interferência de feixes produzidos passando-se luz por um par de frestas finas.



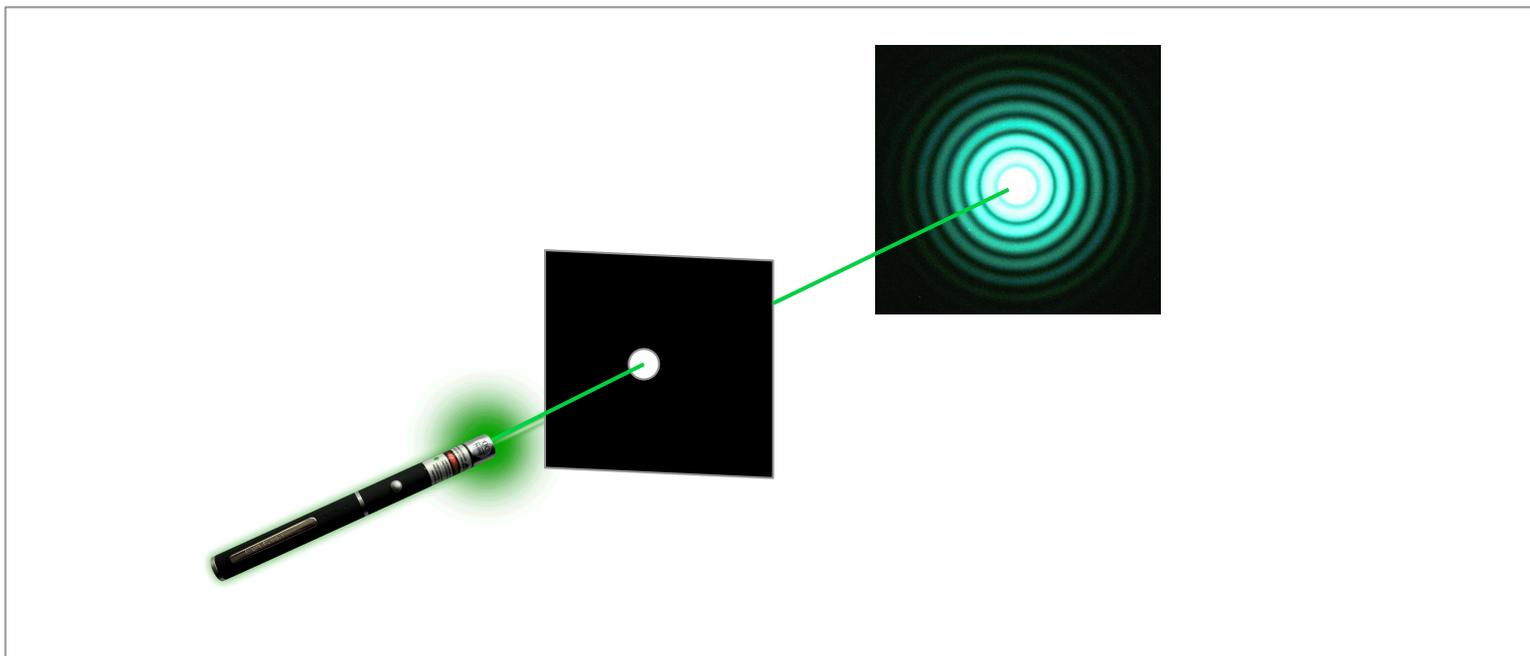
# Difração – um fenômeno ondulatório

Ao atravessar um orifício, uma onda se propaga para regiões que não seriam alcançadas por uma trajetória retilínea



# Difração da luz

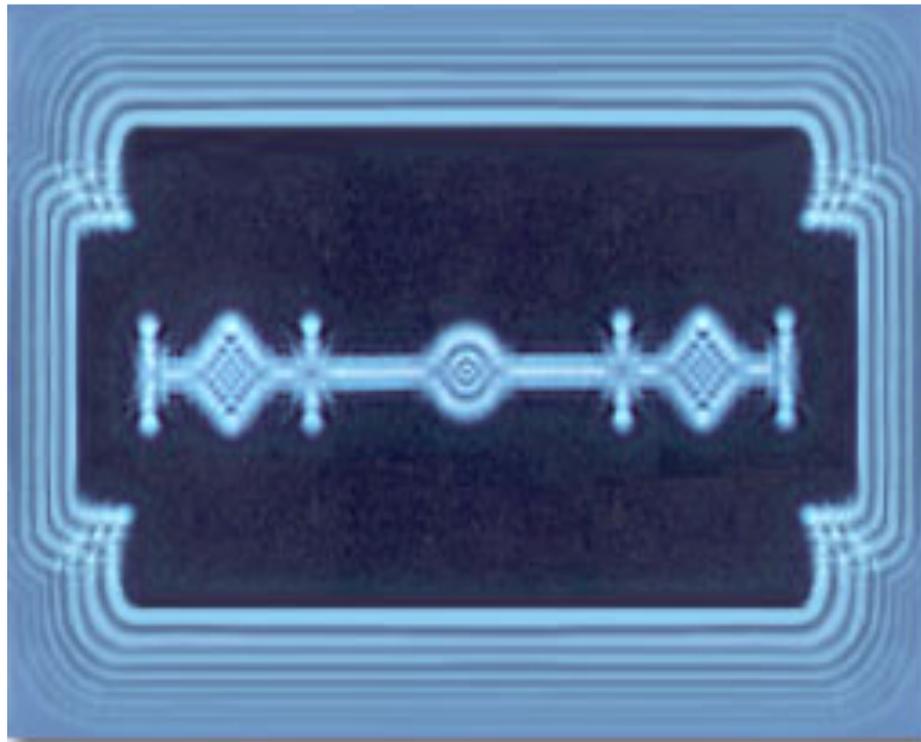
Ao atravessar um orifício, a luz se propaga para regiões que não seriam alcançadas por uma trajetória retilínea



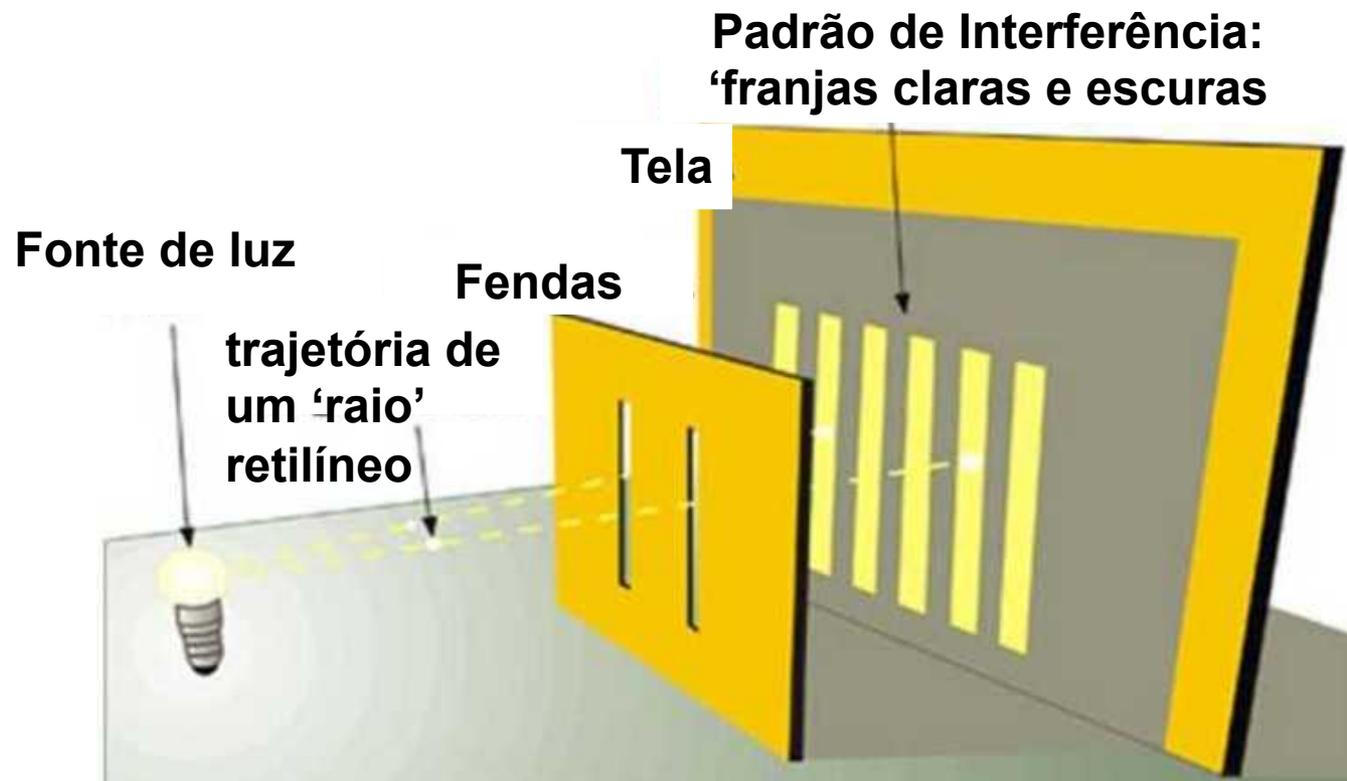
# Difração – um fenômeno ondulatório

A luz se propaga para partes situadas atrás de um objeto opaco

Ex: Difração de luz por uma navalha

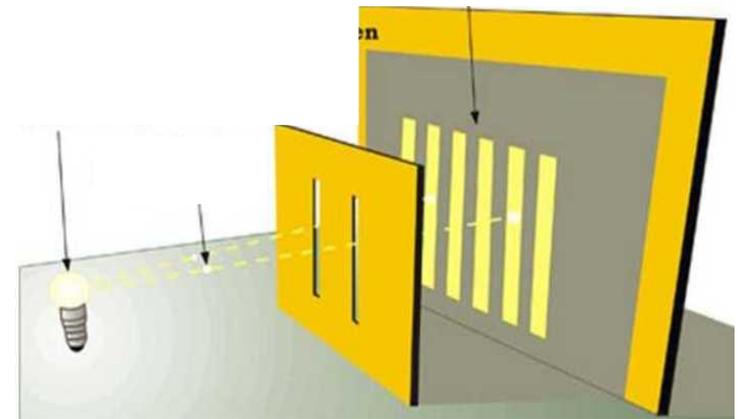
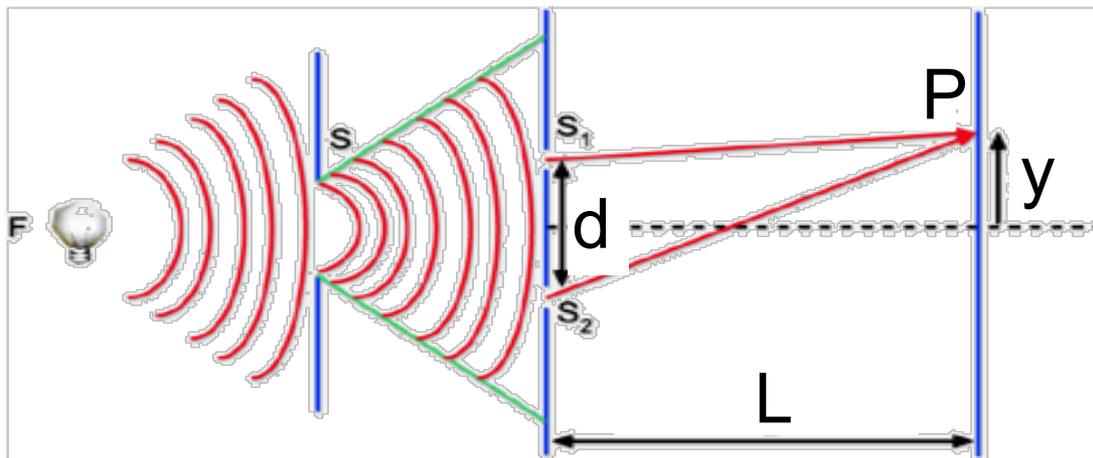


# Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young



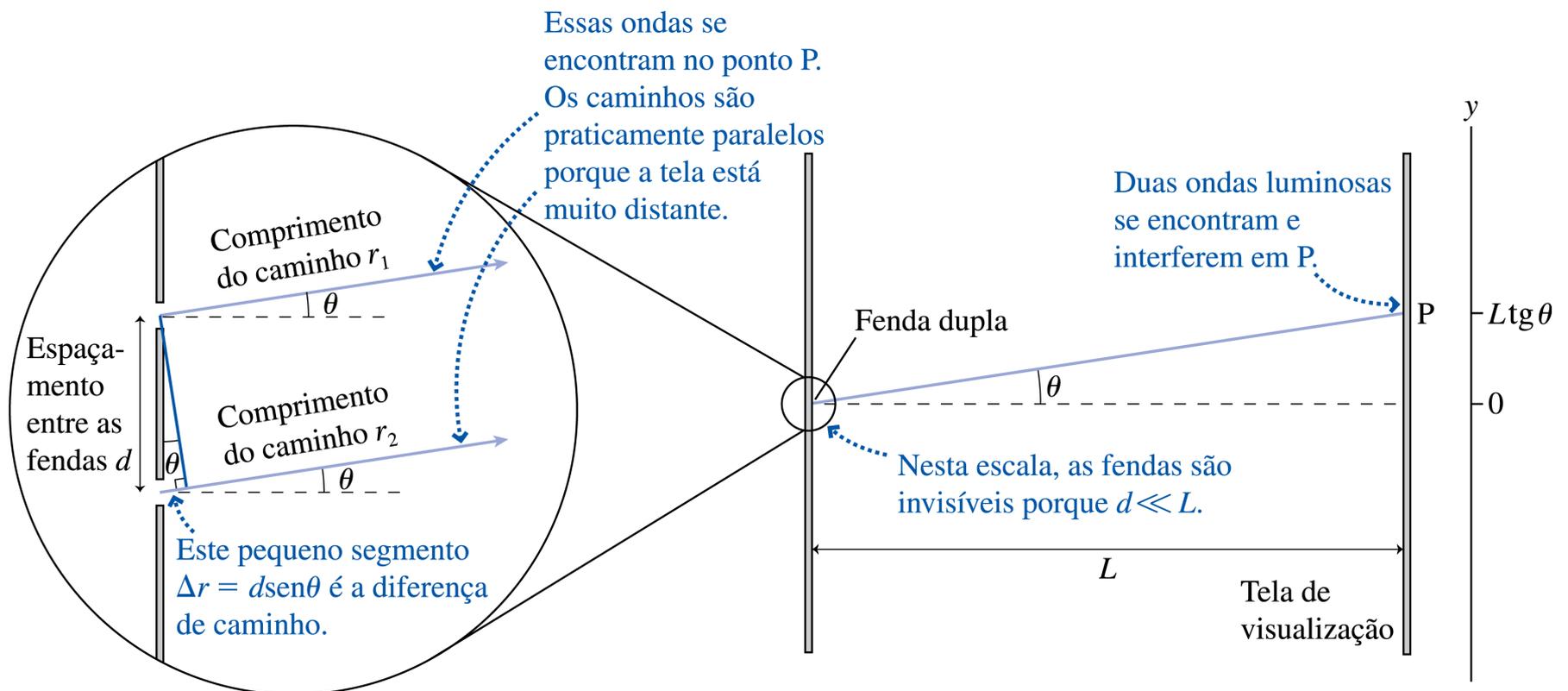
# Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

Qual a condição para ocorrer interferência construtiva ou destrutiva no ponto P?

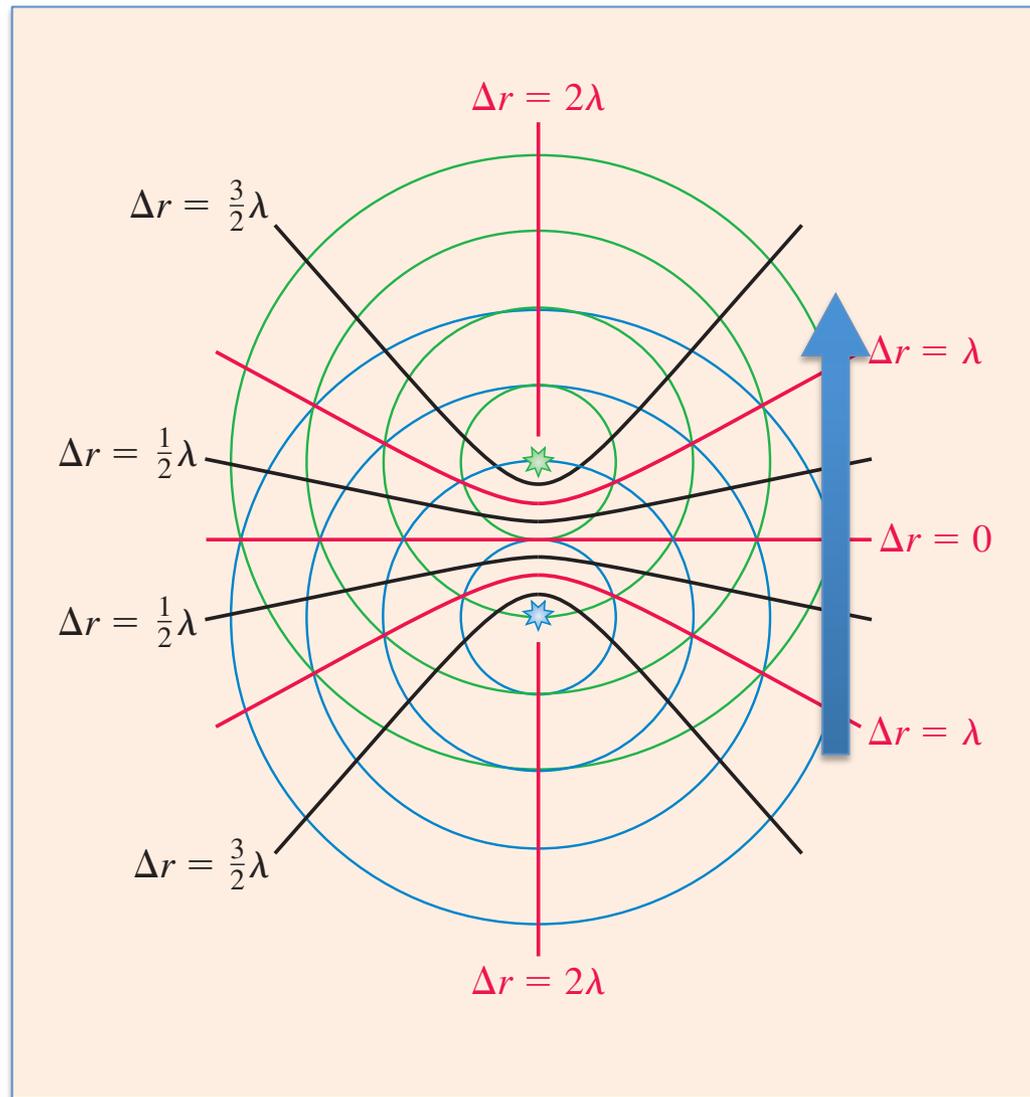


# Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

Qual a condição para ocorrer interferência construtiva ou destrutiva no ponto P?



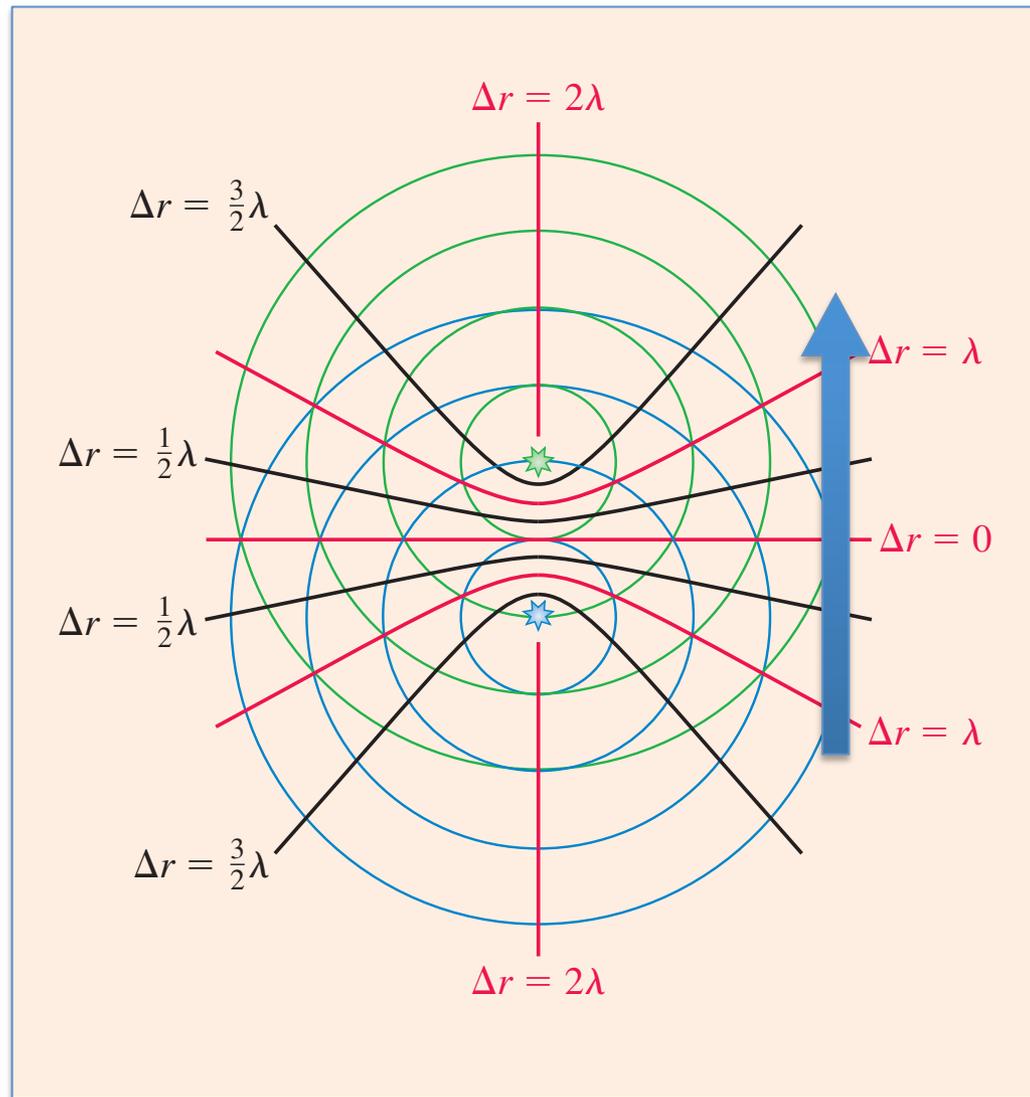
# Interferência entre ondas: caso 2D



Assumindo que se tratam de ondas sonoras, o que uma pessoa que caminha com velocidade cte. ao longo da reta indicada irá perceber?

- A) Um som de frequência constante mas com uma variação periódica no volume
- B) Um som de volume constante mas com uma variação periódica na frequência
- C) Um som de volume e frequência constantes
- D) Um som de volume e frequência variando periodicamente

# Interferência entre ondas: caso 2D

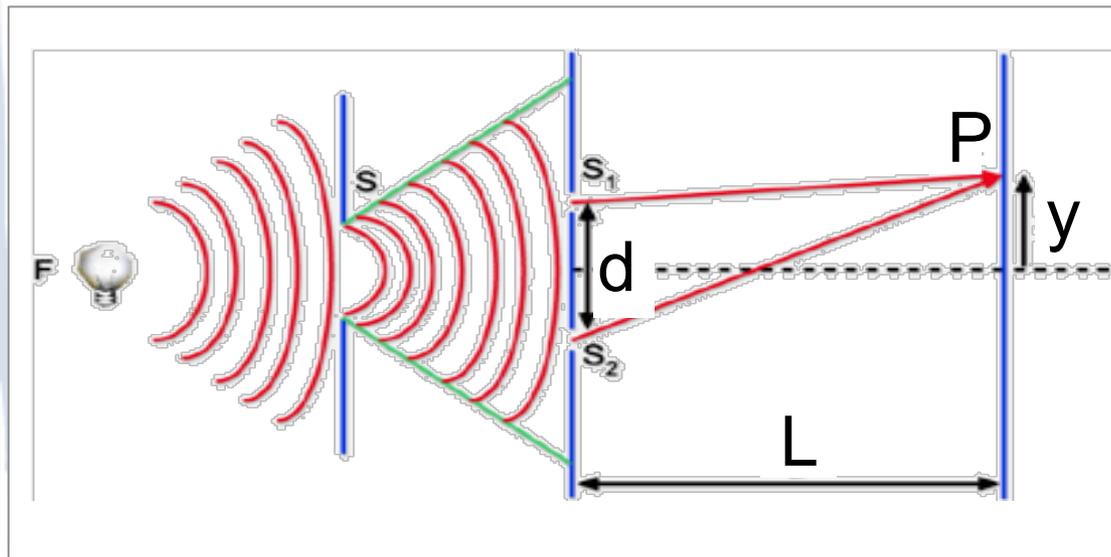


Assumindo que se tratam de ondas sonoras, o que uma pessoa que caminha com velocidade cte. ao longo da reta indicada irá perceber?

- A) Um som de frequência constante mas com uma variação periódica no volume
- B) Um som de volume constante mas com uma variação periódica na frequência
- C) Um som de volume e frequência constantes
- D) Um som de volume e frequência variando periodicamente

# Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

Qual a condição para ocorrer interferência construtiva ou destrutiva no ponto P?



**Interferência construtiva**

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



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

**Interferência destrutiva**

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



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

# Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

**Interferência construtiva**

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



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

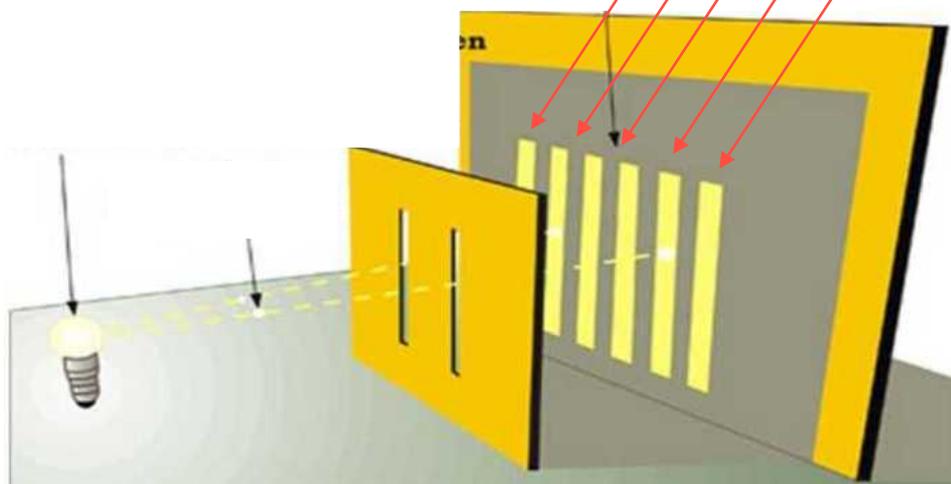
**Interferência destrutiva**

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



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

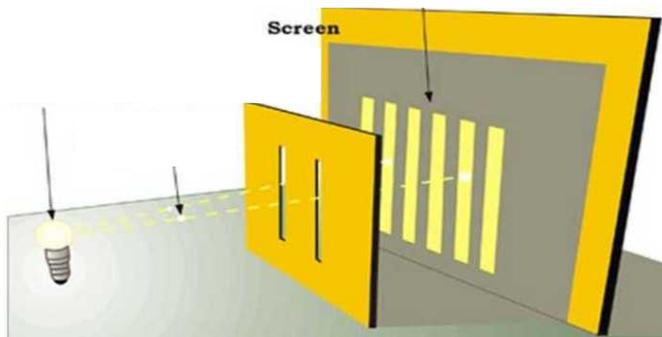
Máximos de intensidade



**Conclusão: franjas igualmente espaçadas de  $\lambda L / d$**

# Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

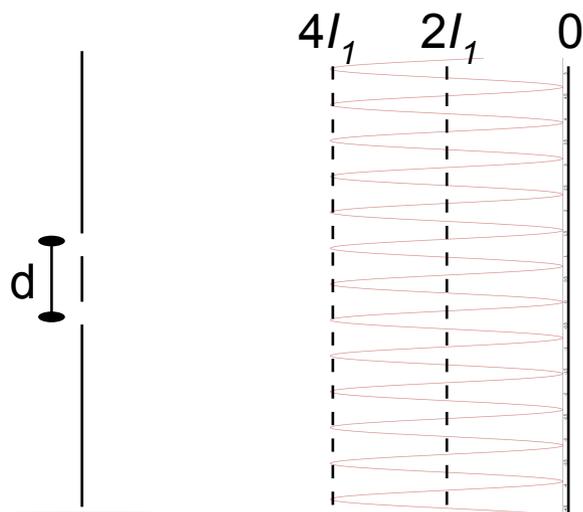
## Distribuição de intensidade no anteparo



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



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



## Teste Conceitual

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 e mínimos de intensidade permanecem nas mesmas posições e ficam mais distintos
- B) Os mínimos de intensidade se aproximam.
- C) Os máximos e mínimos de intensidade permanecem nas mesmas posições e ficam menos distintos
- D) Os máximos de intensidade se afastam.

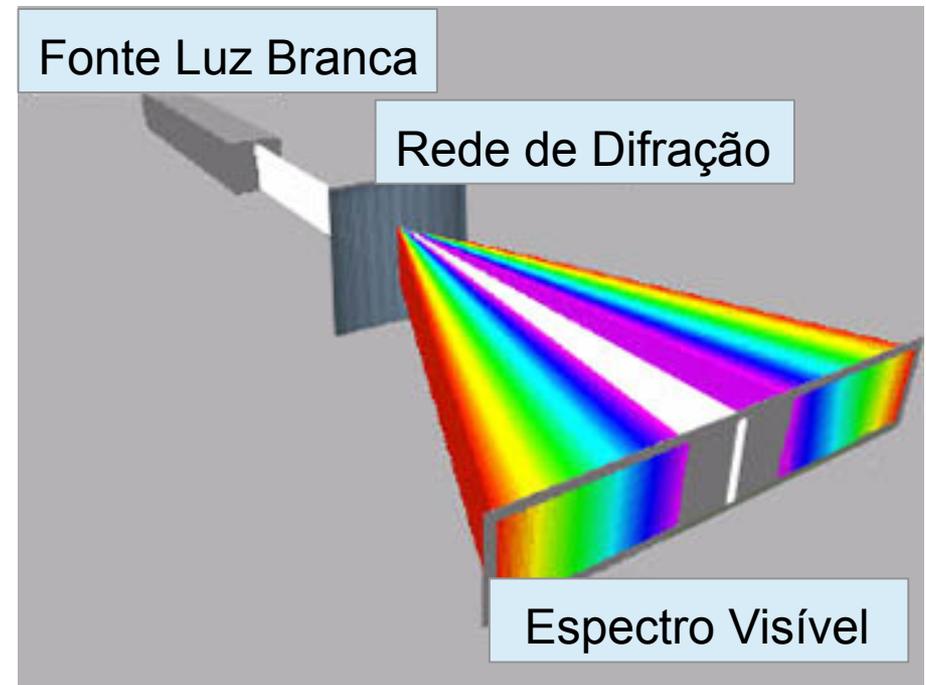
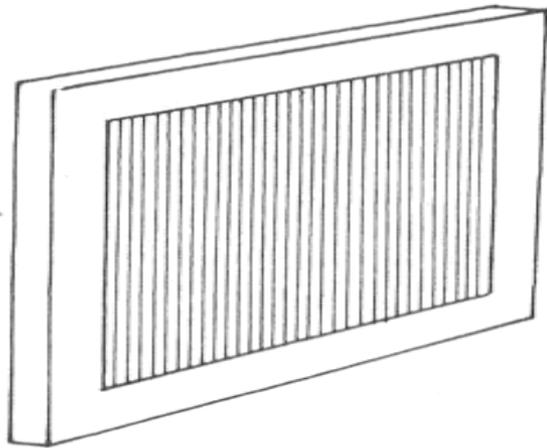
## Teste Conceitual

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 e mínimos de intensidade permanecem nas mesmas posições e ficam mais distintos
- B) Os mínimos de intensidade se aproximam.**
- C) Os máximos e mínimos de intensidade permanecem nas mesmas posições e ficam menos distintos
- D) Os máximos de intensidade se afastam.

# Redes de Difração

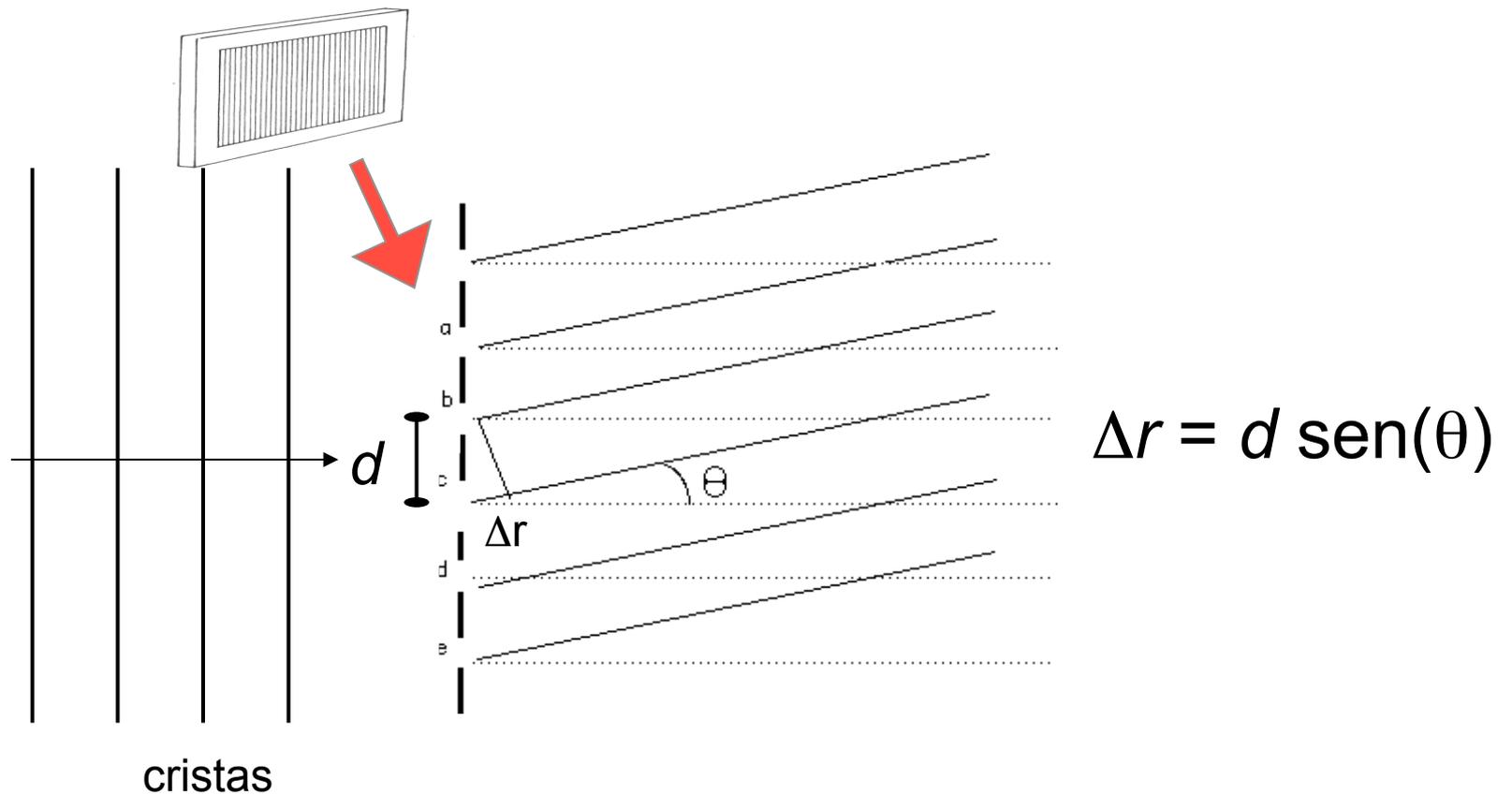
Dispositivo óptico formado por muitas fendas paralelas



Seu efeito é separar a luz de acordo com o comprimento de onda.

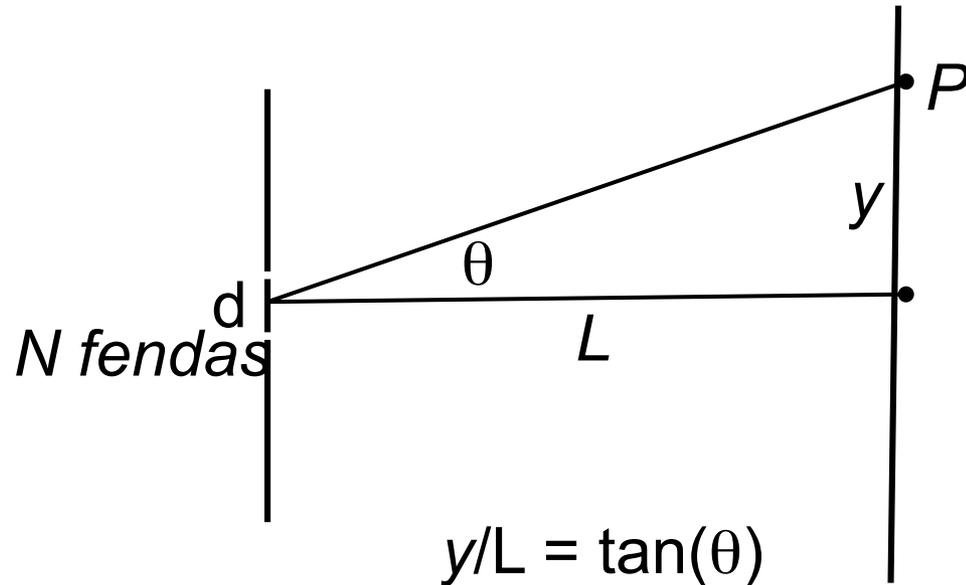
Aplicação: ESPECTROSCOPIA: caracterizar fontes de luz, identificando quais os comprimentos de onda presentes.

# Redes de Difração

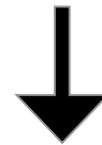


A onda proveniente de cada fenda percorre uma distância extra  $\Delta r$ .

# Redes de Difração



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

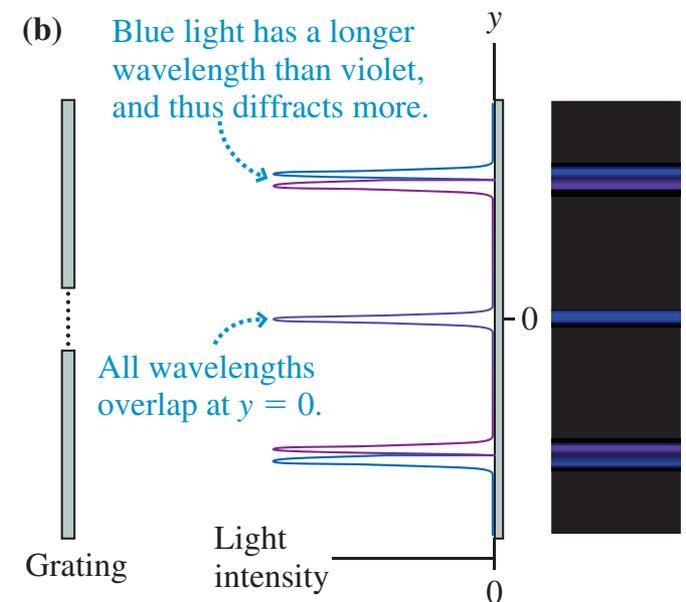
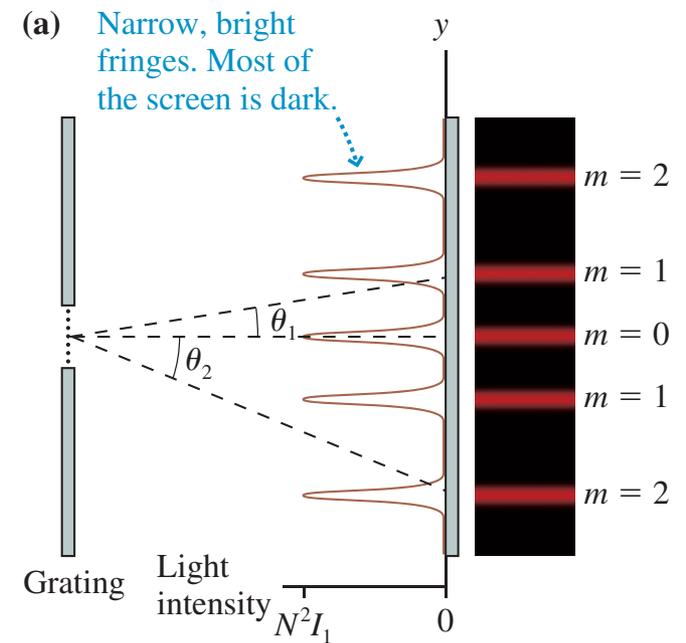
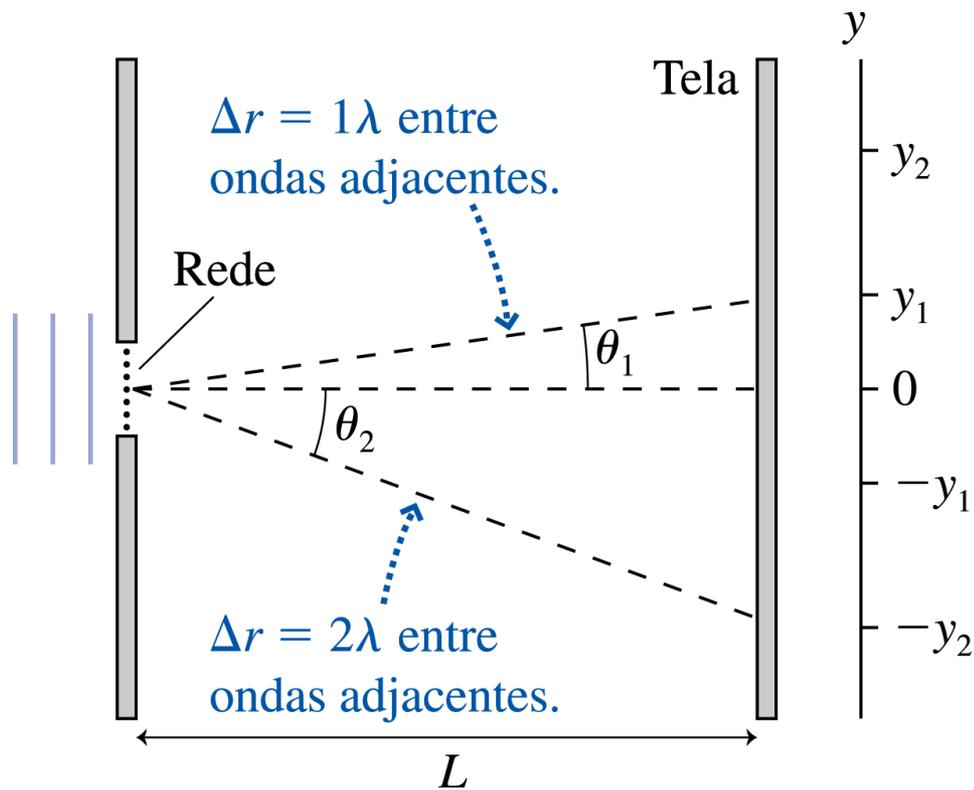


$$d \sin(\theta) = m\lambda$$

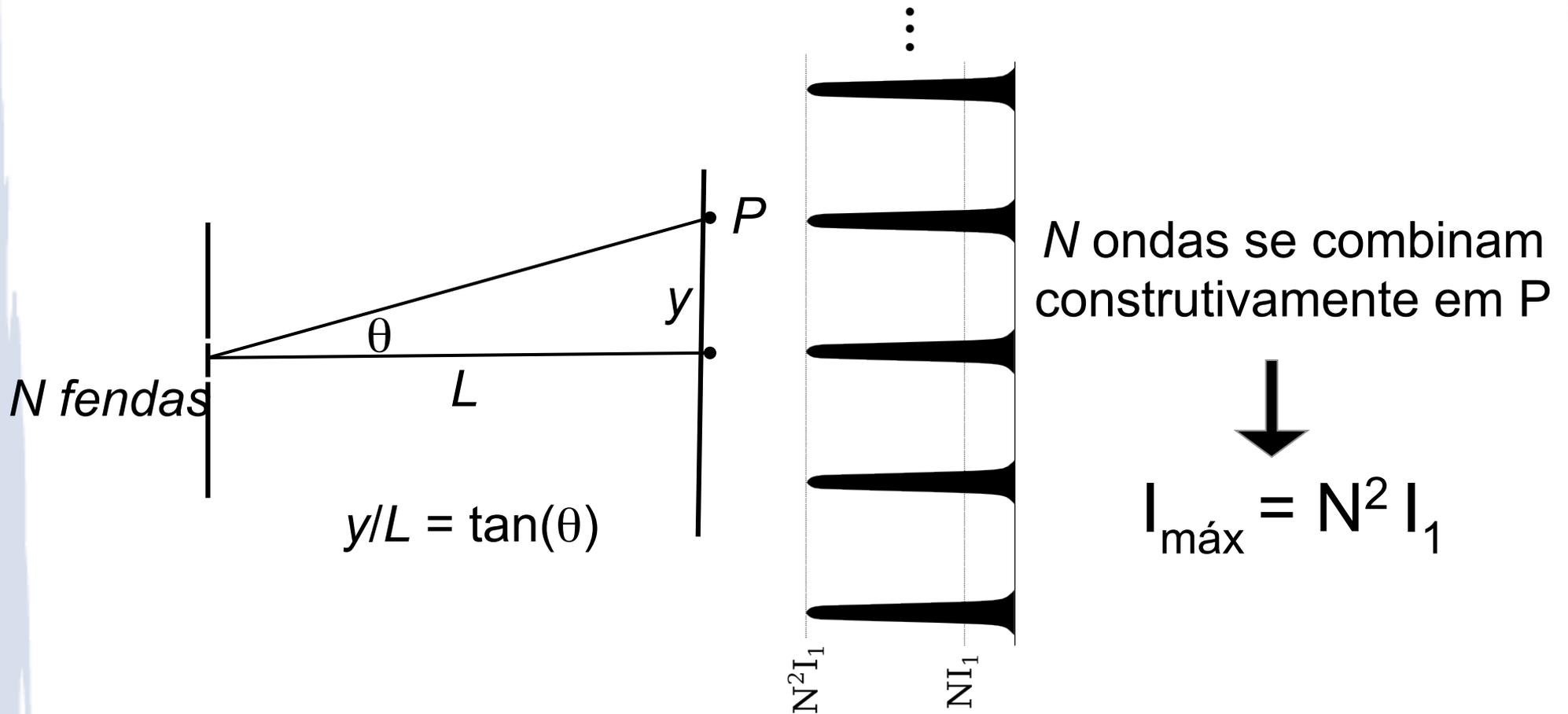
**ATENÇÃO:** nas Redes de Difração  $\theta$  não é pequeno, de forma que

$$\tan(\theta) \neq \sin(\theta) \neq \theta$$

# Redes de Difração



# Redes de Difração



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

## Teste conceitual

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

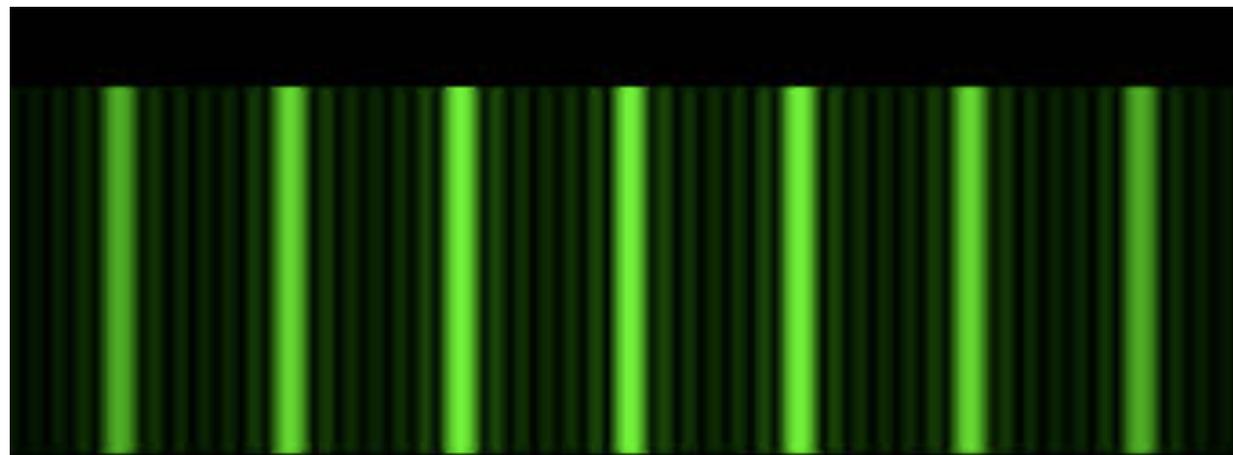
- A) As franjas se afastam e se tornam mais largas.
- B) As franjas se aproximam e se tornam mais largas
- C) As franjas se afastam e se tornam mais estreitas.
- D) As franjas não mudam de posição e largura.

# Teste conceitual

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
- C) As franjas se afastam e se tornam mais estreitas.**
- D) As franjas não mudam de posição e largura.

padrão difratado  
qdo a rede é  
iluminada com  
luz verde



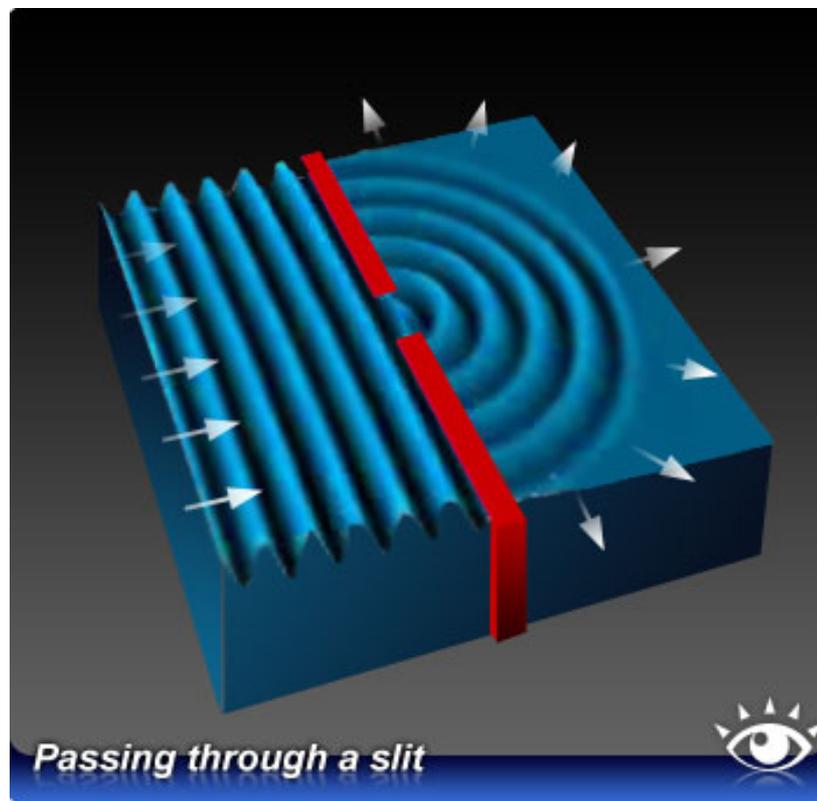
padrão difratado  
qdo a rede é  
iluminada com  
luz branca



ordem de difração    3        2        1        0        1        2        3

# Difração em Fenda Simples

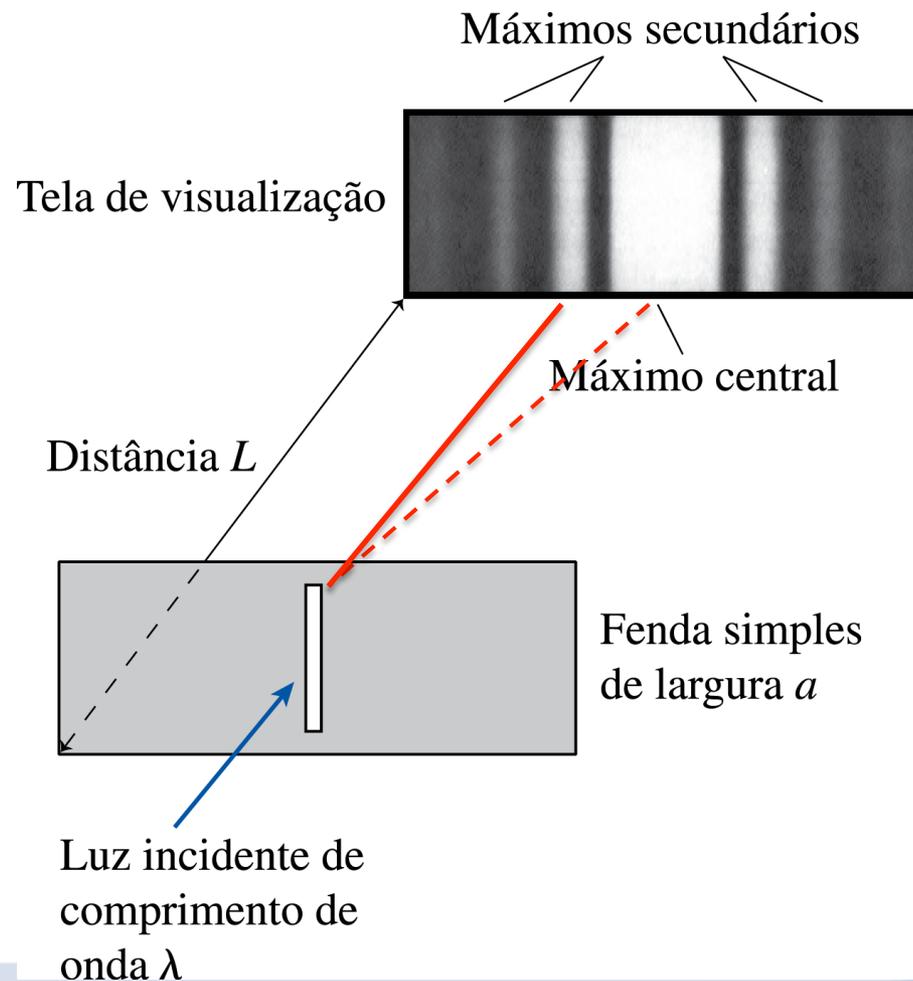
Desvio da trajetória retilínea de uma onda quando parte dela é obstruída de alguma forma.



# Difração em Fenda Simples

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

**Ex: Um laser difratando em uma fenda estreita**



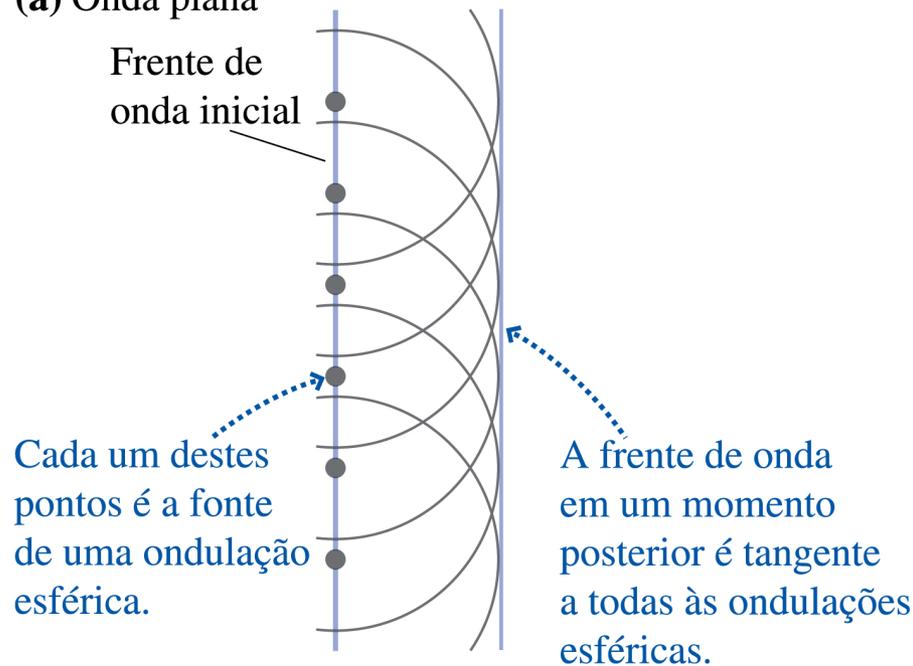
Ao invés de uma simples projeção da fenda, se vê um padrão de máximos e mínimos de intensidade

# Difração em Fenda Simples

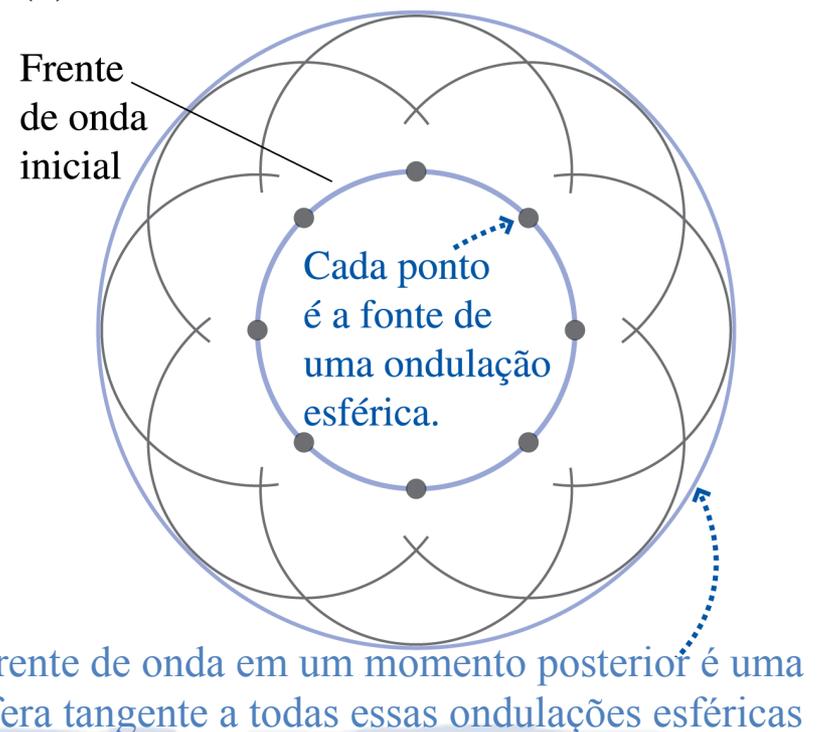
## Análise qualitativa: **Princípio de Huygens**

- cada ponto de uma frente de onda gera uma nova onda esférica.
- O formato da onda total num instante posterior é dado pela linha que tangencia todas essas frentes de ondas esféricas anteriores

(a) Onda plana



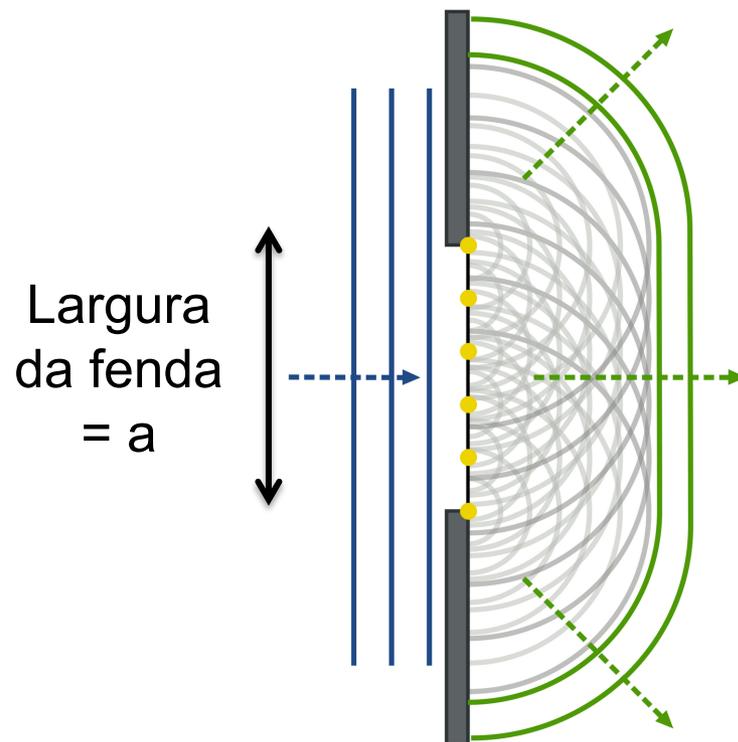
(b) Onda esférica



# Difração em Fenda Simples

## Análise qualitativa: **Princípio de Huygens**

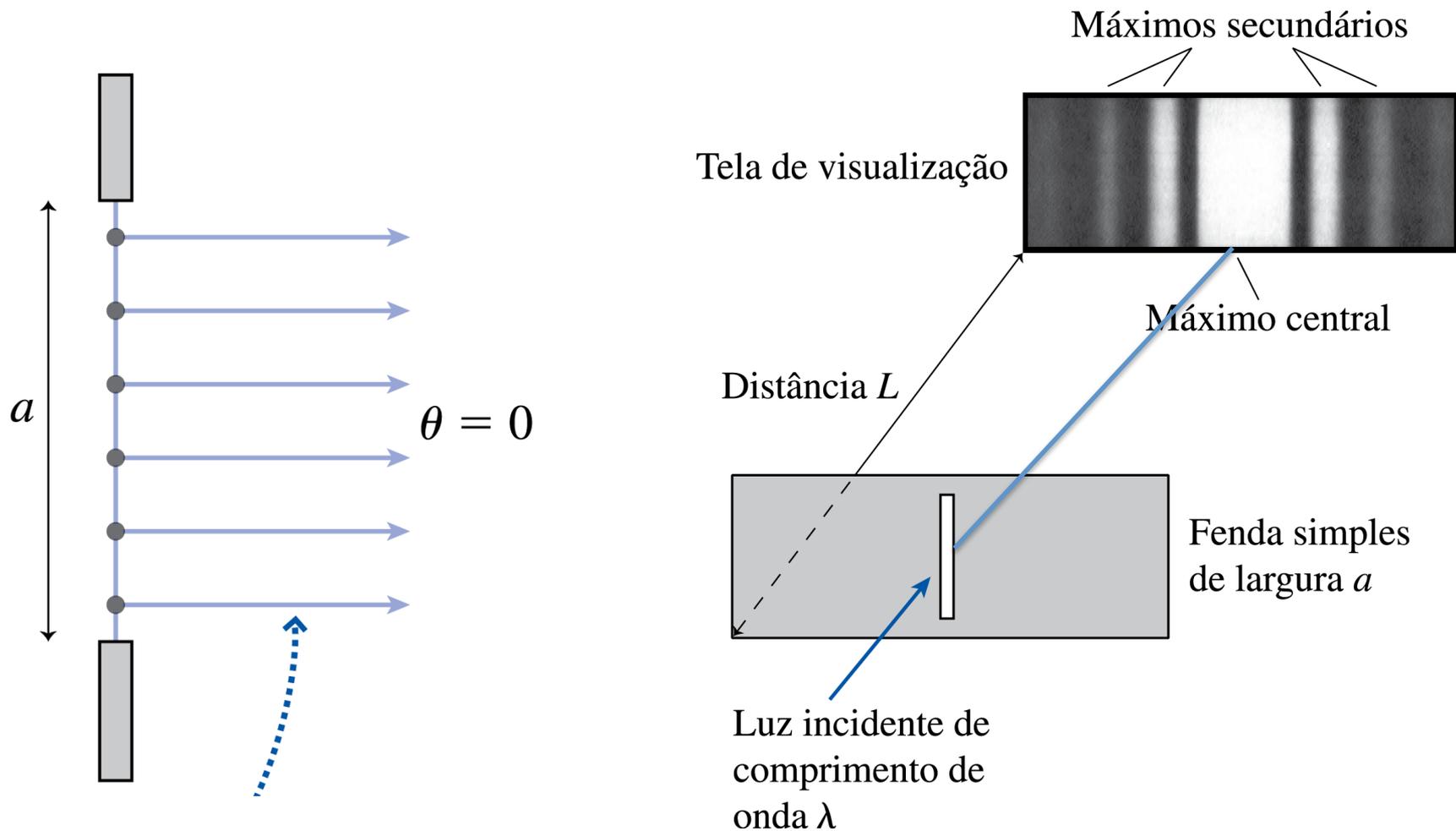
- cada ponto de uma frente de onda gera uma nova onda esférica.
- O formato da onda total num instante posterior é dado pela linha que tangencia todas essas frentes de ondas esféricas anteriores



**Imagem incompleta!**  
**Precisamos analisar ainda a interferência entre todas essas ondas individuais**

# Difração em Fenda Simples

Análise qualitativa: **máximo central**



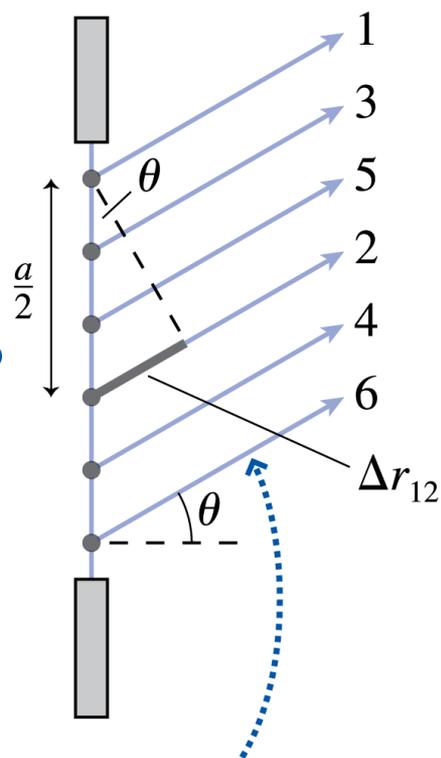
**centro da tela: interferência construtiva**

# Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.

(c)

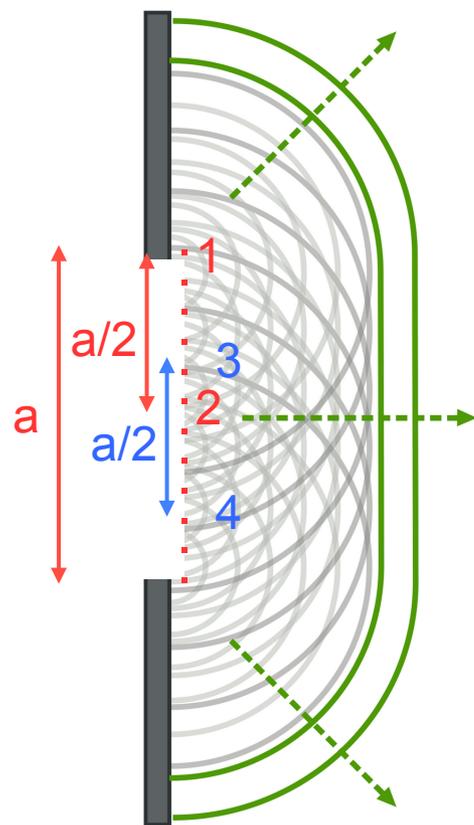
Cada ponto da frente de onda é combinado a outro ponto situado a uma distância de  $a/2$ .



Todas essas ondulações se encontram na tela segundo o ângulo  $\theta$ . A ondulação 2 percorre uma distância  $\Delta r_{12} = (a/2) \sin \theta$  extra em relação à ondulação 1.

# Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.



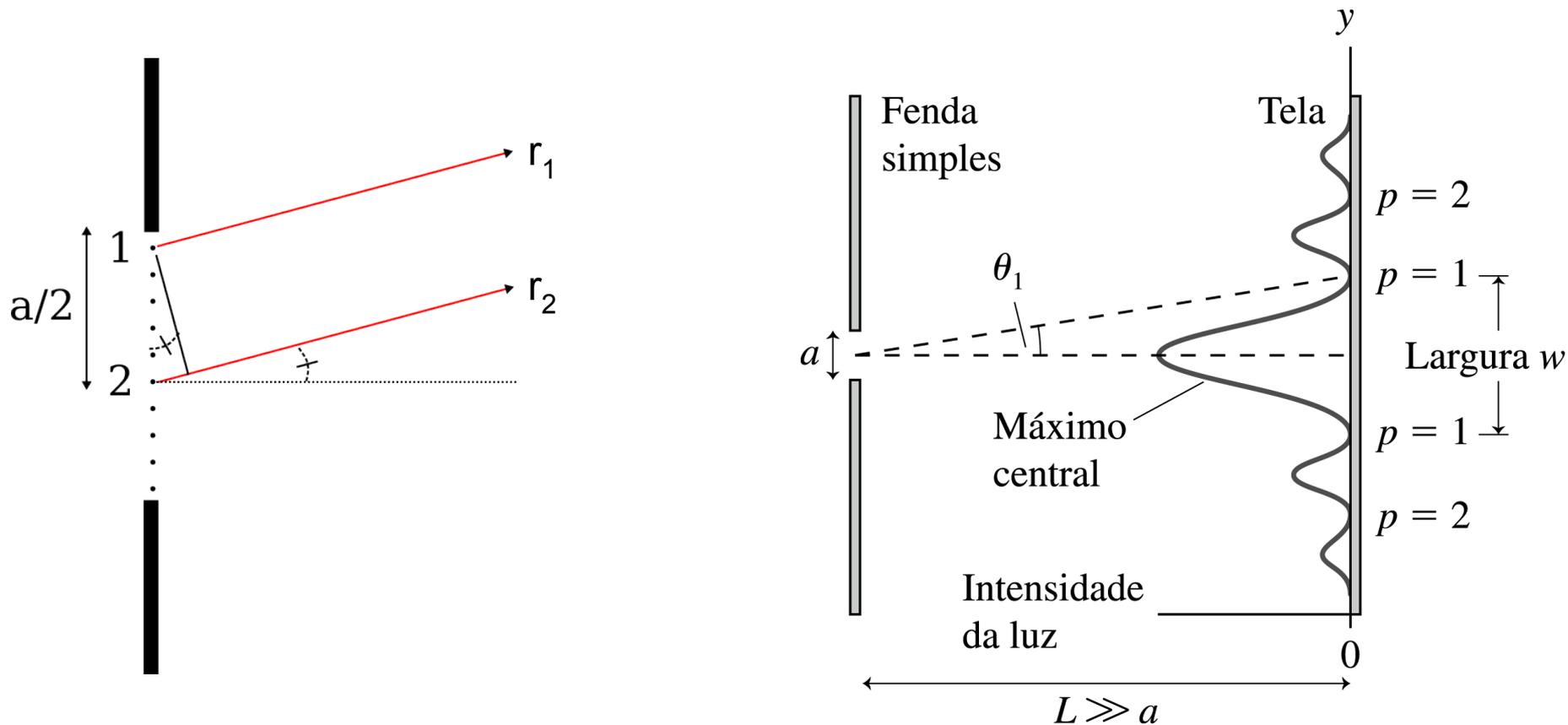
Uma possibilidade:

Qdo as ondulações provenientes de dois emissores localizados em 1 e 2 separados de  $a/2$  interferem destrutivamente num ponto do anteparo.

Nesse caso ondulações provenientes de **todos** os pares de pontos separados de  $a/2$  também interferem destrutivamente...

# Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.

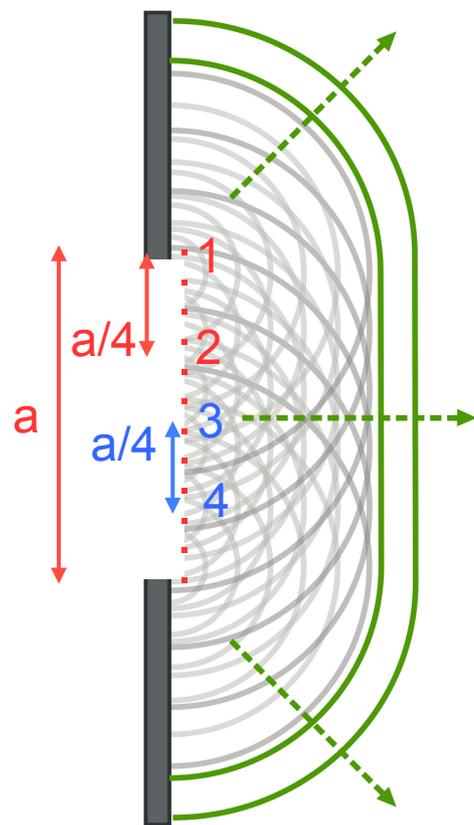


1o mínimo ( $p = 1$ ):  $\Delta r_{12} = (a/2) \cdot \text{sen}(\theta_1) = \lambda/2$

$\text{sen}(\theta_1) = \lambda / a$

# Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.



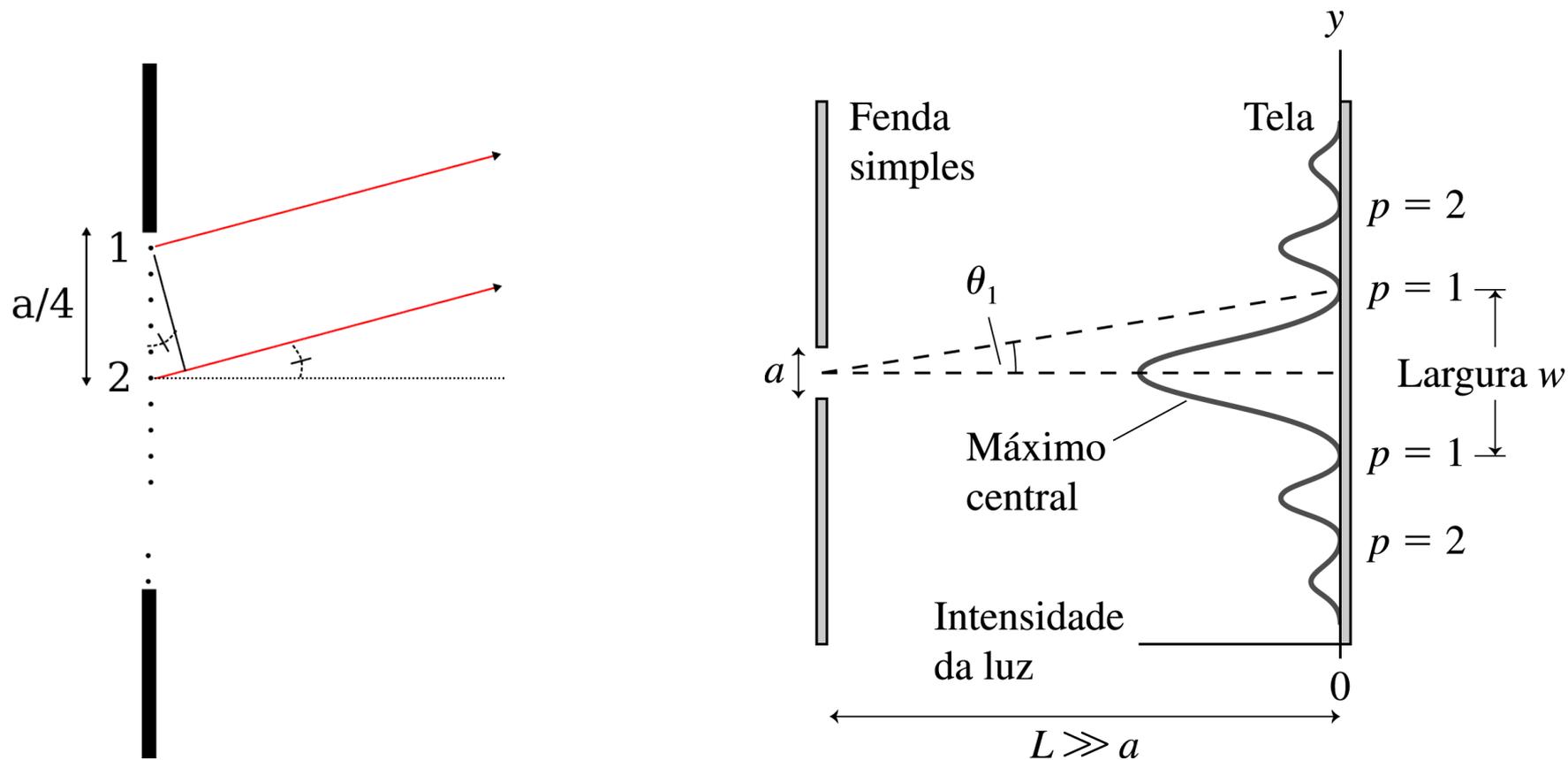
Outra possibilidade:

Qdo as ondulações provenientes de dois emissores localizados em 1 e 2 separados de  $a/4$  interferem destrutivamente num ponto do anteparo.

Nesse caso ondulações provenientes de **todos** os pares de pontos separados de  $a/4$  também interferem destrutivamente...

# Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.

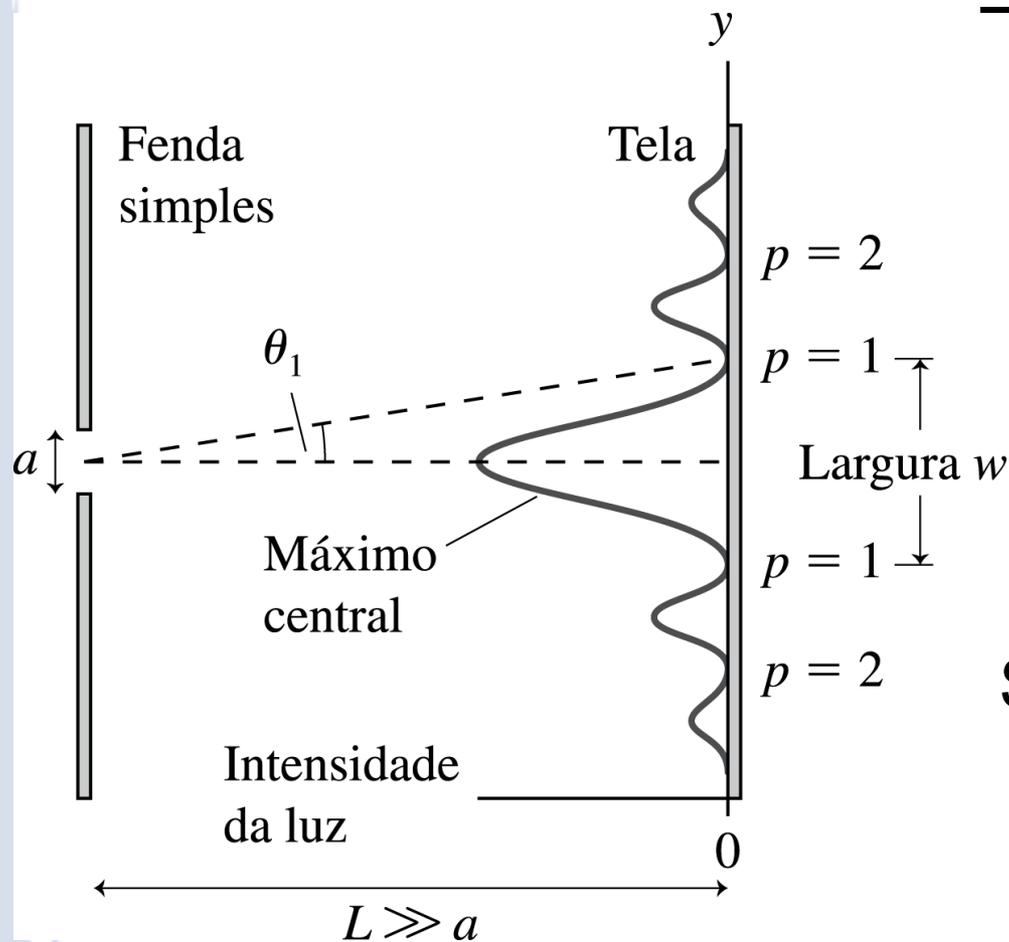


1o mínimo ( $p = 2$ ):  $\Delta r_{12} = (a/4) \cdot \text{sen}(\theta_2) = \lambda/2$

$\text{sen}(\theta_2) = 2\lambda / a$

# Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.



Generalizando este procedimento

$p$ -ésimo mínimo:

$$\Delta r_{12} = (a/2p) \cdot \text{sen}(\theta_2) = \lambda/2$$

$$\text{sen}(\theta_p) = \lambda p / a \quad p=1,2,3\dots$$

$$\text{Se } \theta_p \ll 1 \rightarrow \text{sen}(\theta_p) \approx \text{tg}(\theta_p) \approx \theta_p$$

$$\theta_p = \lambda p / a \rightarrow y_p = \lambda L p / a$$

$p=1,2,3\dots$

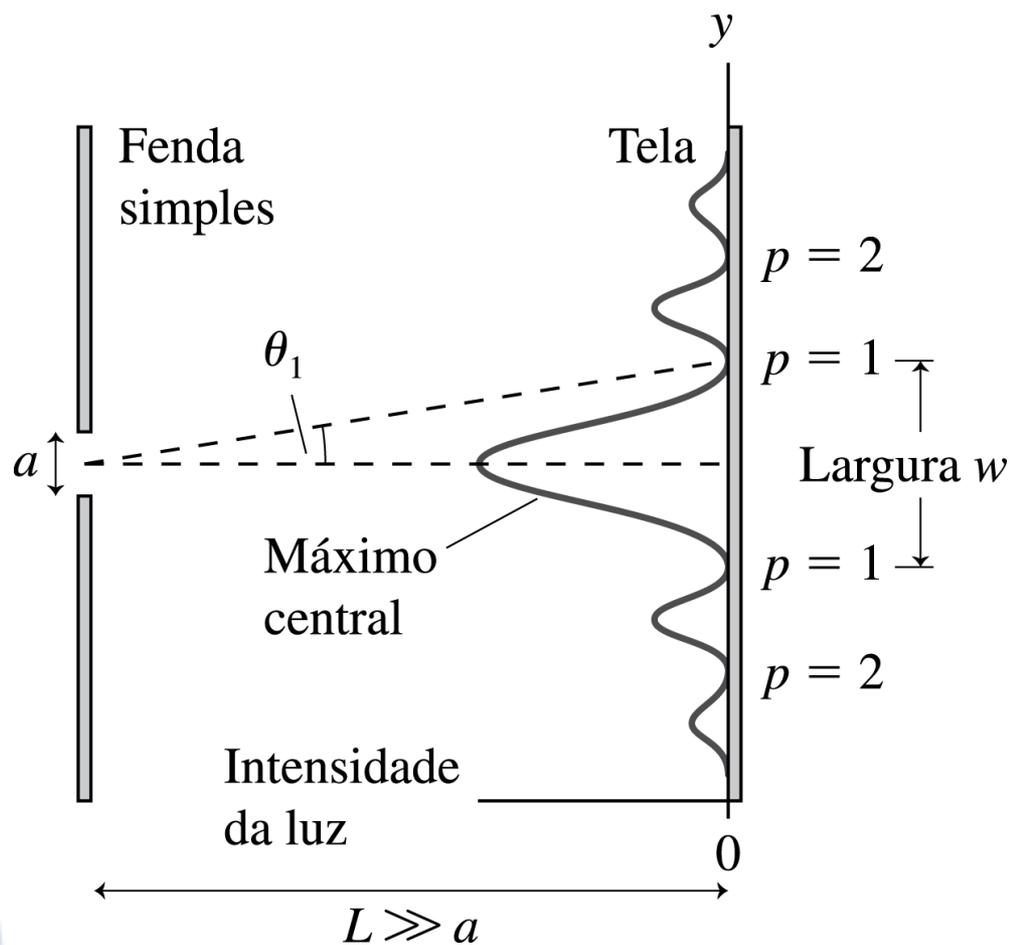
Obs: as posições dos máximos seguem uma regra mais complicada!

# Difração em Fenda Simples

## A Largura do Padrão de Difração

Se  $\theta_p \ll 1$  :

$$y_p = \lambda L p / a$$



$$= 2 L \lambda / a$$

# Teste conceitual

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

# Teste conceitual

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

# Teste Conceitual

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 luz transmitida?

- A) Fica mais concentrada na região que é alcançável em uma linha reta desde a fonte, passando pela fenda.
- B) Fica mais concentrada na região que não é alcançável em uma linha reta desde a fonte, passando pela fenda.
- C) Permanece inalterada
- D) Fica mais fraca, mas sem mudar a concentração relativa entre as várias regiões atrás da fenda.

# Teste Conceitual

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 luz transmitida?

- A) Fica mais concentrada na região que é alcançável em uma linha reta desde a fonte, passando pela fenda.
- B) Fica mais concentrada na região que não é alcançável em uma linha reta desde a fonte, passando pela fenda.**
- C) Permanece inalterada
- D) Fica mais fraca, mas sem mudar a concentração relativa entre as várias regiões atrás da fenda.

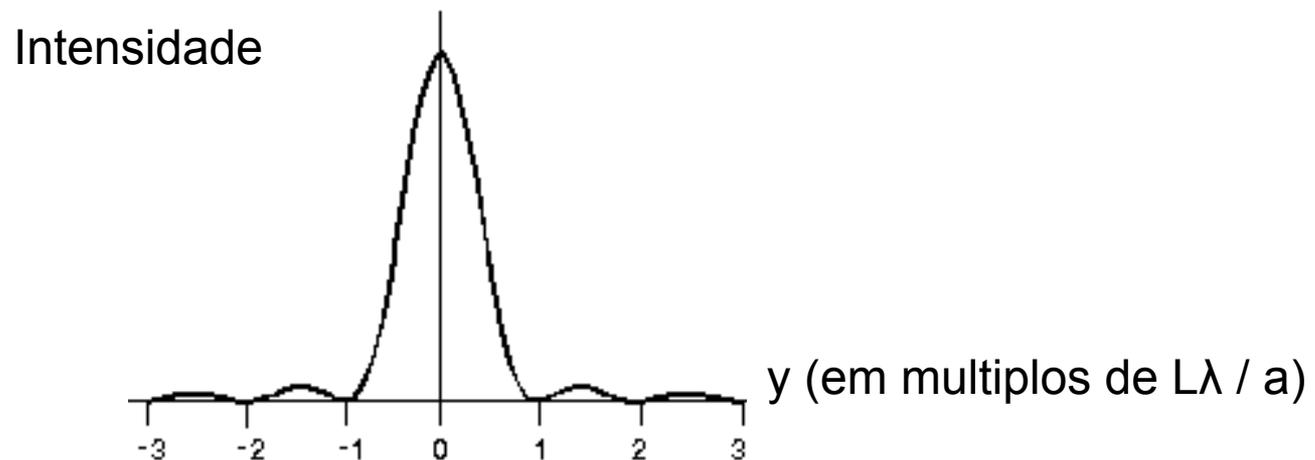
$$w = 2 L \lambda / a$$

quanto mais estreita a abertura, mais largo o máximo central de difração, bem como a separação entre os picos laterais

# Teste Conceitual

Luz com comprimento de onda  $\lambda$  incide normalmente em um dispositivo óptico plano. O padrão de intensidade mostrado na figura abaixo é observado em uma tela de observação posicionada a uma distância  $L$  bem distante do dispositivo. O dispositivo pode ser:

- A) uma fenda simples de largura  $a$
- B) duas fendas paralelas separadas por  $a$
- C) duas fendas paralelas separadas por  $2a$
- D) Há duas respostas corretas

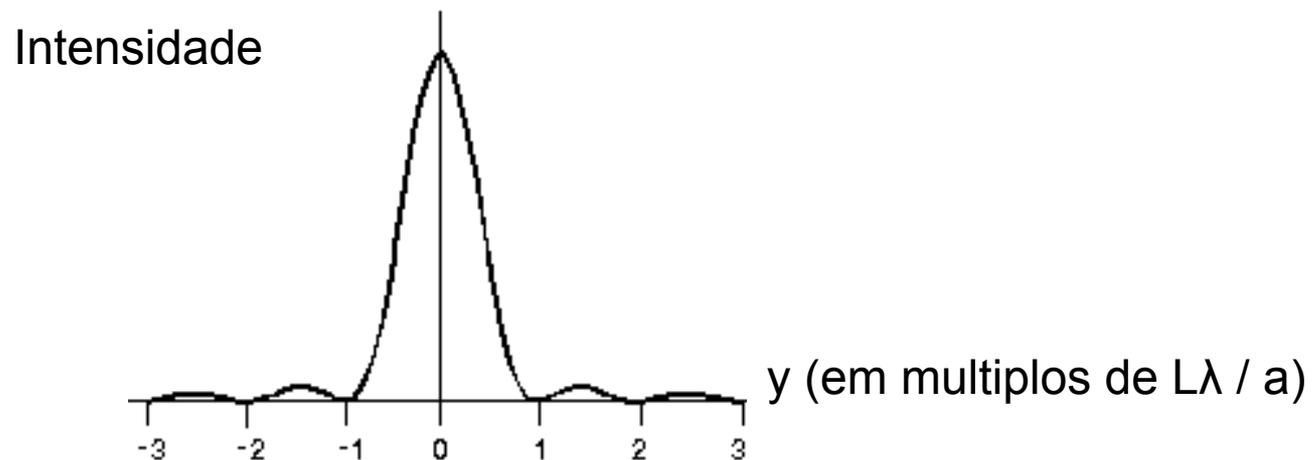


# Teste Conceitual

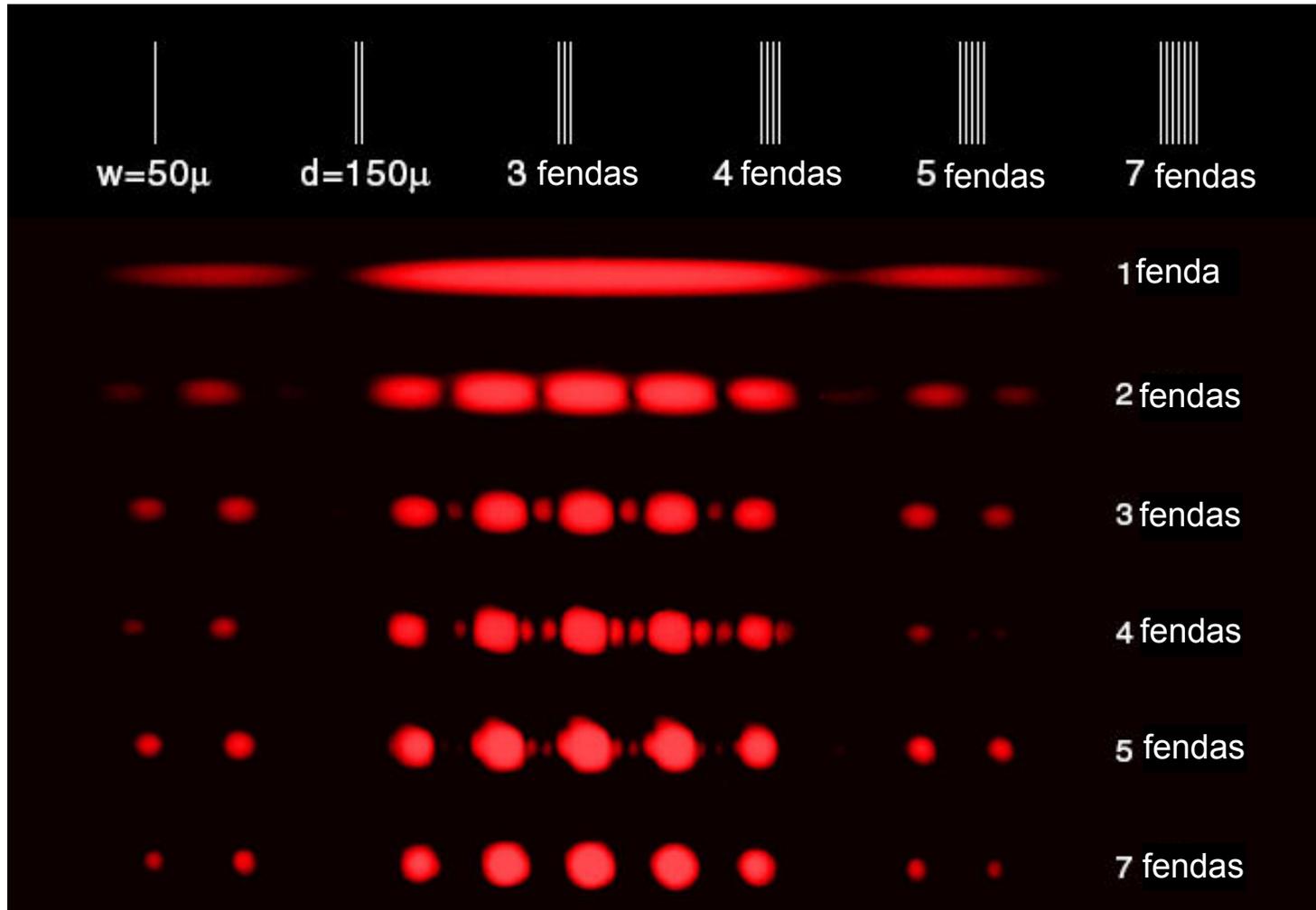
Luz com comprimento de onda  $\lambda$  incide normalmente em um dispositivo óptico plano. O padrão de intensidade mostrado na figura abaixo é observado em uma tela de observação posicionada a uma distância  $L$  bem distante do dispositivo. O dispositivo pode ser:

- A) uma fenda simples de largura  $a$
- B) duas fendas paralelas separadas por  $a$
- C) duas fendas paralelas separadas por  $2a$
- D) Há duas respostas corretas

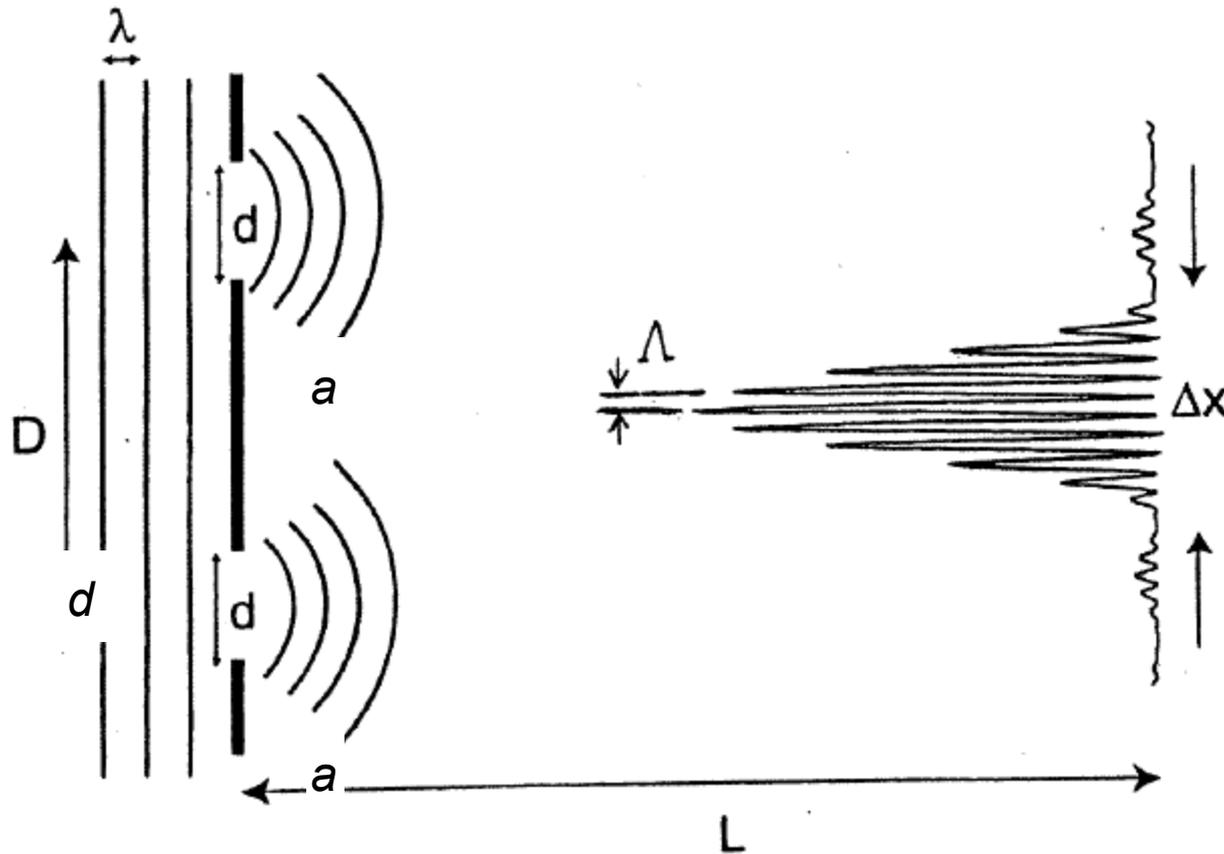
Não confundir!  
Expressões semelhantes para os pontos de **máximo** da interferência de 2 fendas e de **mínimo** de difração



# Obs: Difração e Interferência: dois fenômenos complementares



# Difração e Interferência: dois fenômenos complementares



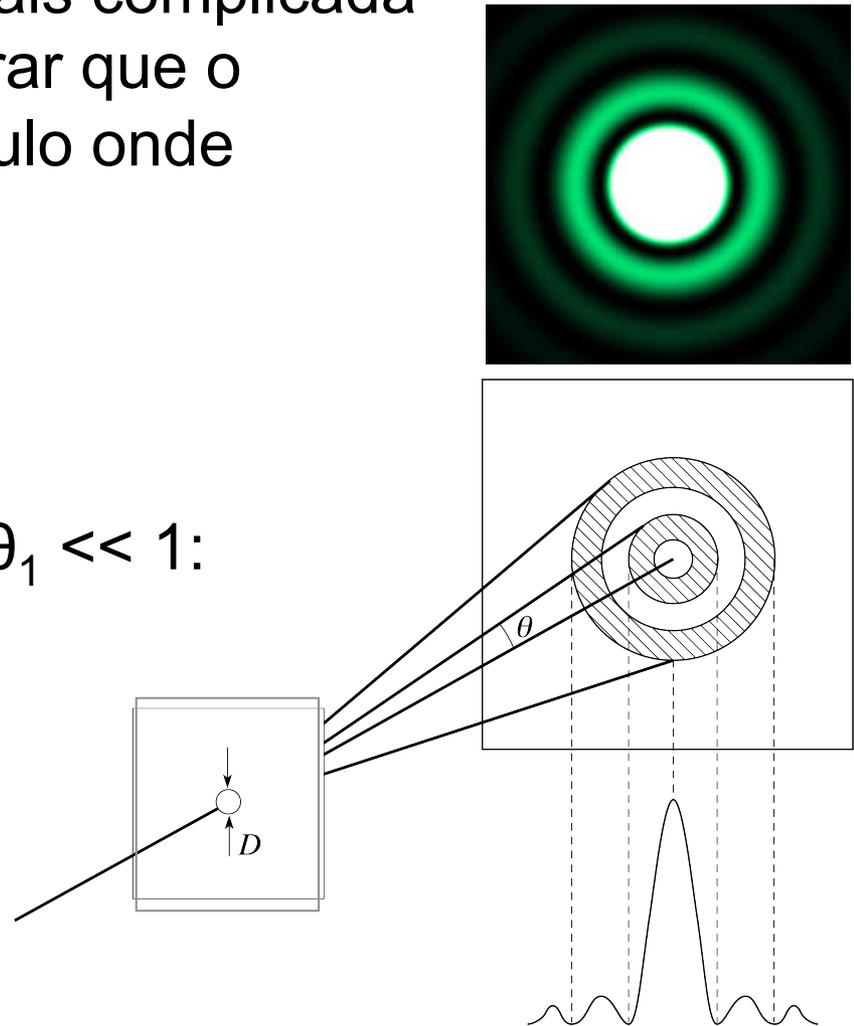
# Difração em orifício circular

Nesse caso a conta é um pouco mais complicada e não faremos aqui, Pode-se mostrar que o primeiro mínimo ocorre para o ângulo onde

$$\text{sen}(\theta_1) = 1,22 \lambda/D$$

Diâmetro do máximo central se  $\theta_1 \ll 1$ :

$$d_1 = 2,44 \lambda L/D$$



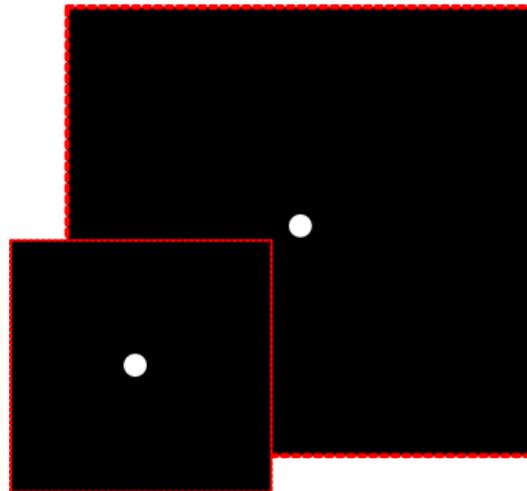
# Cap 22: Ótica Ondulatória

**Quando a luz passa por um orifício circular, sempre se observa a difração?**

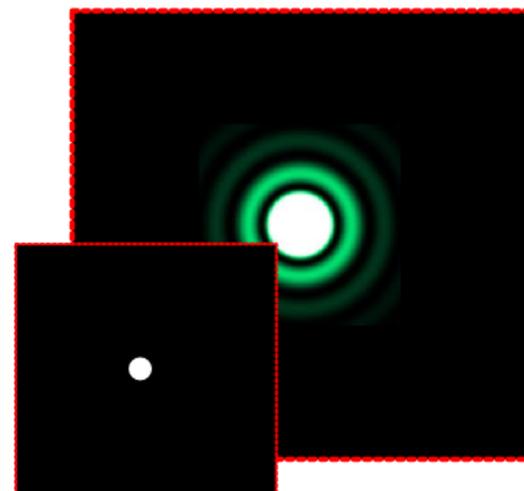
# Cap 22: Ótica Ondulatória

Quando a luz passa por um orifício circular, sempre se observa a difração? → **NÃO**

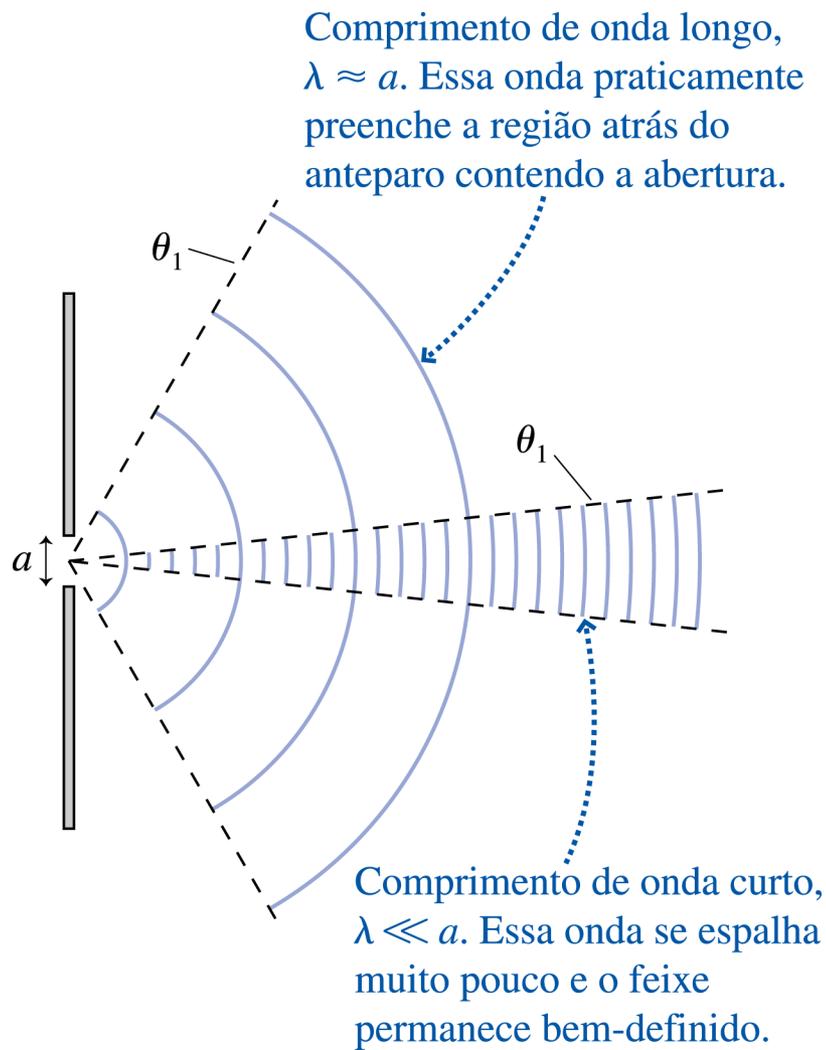
Ótica Geométrica



Ótica Ondulatória



# Cap 22: Ótica Ondulatória

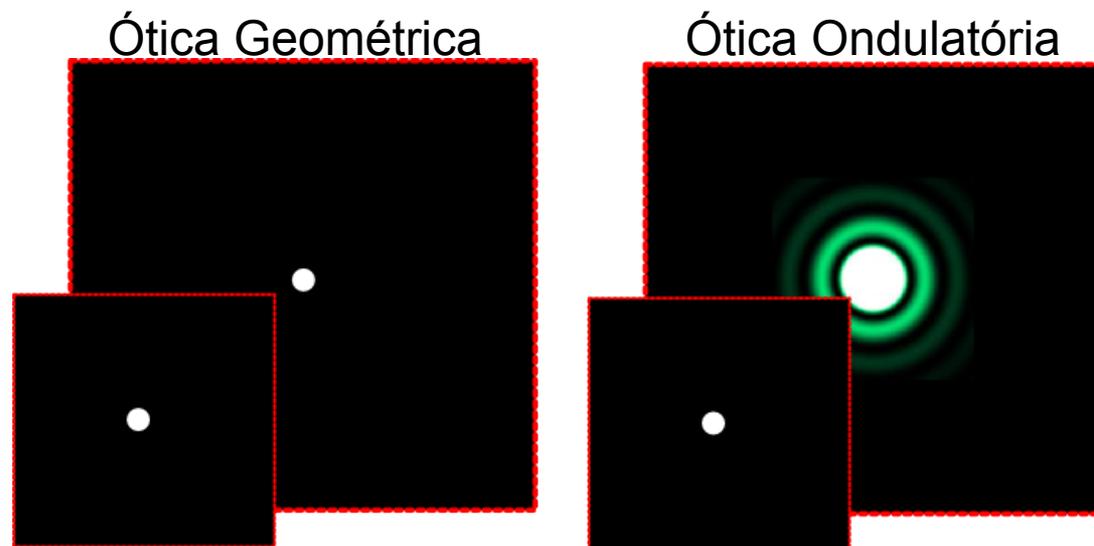


# Cap 22: Ótica Ondulatória

Se o espalhamento for:

<  $D$ , é mais útil utilizar o modelo de ótica geométrica

>  $D$ , é mais útil utilizar o modelo de ótica ondulatória

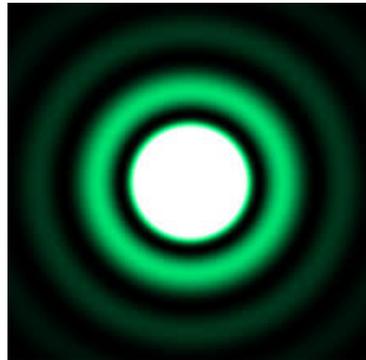


# Cap 22: Ótica Ondulatória

## Teste Conceitual - 5

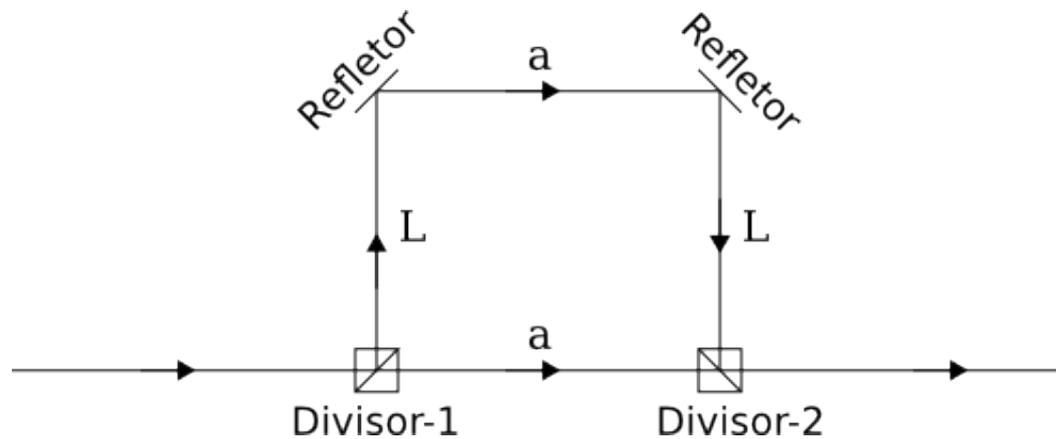
A figura mostra a intensidade de luz na tela de visualização atrás de uma abertura circular. Se o diâmetro da abertura aumentar:

- 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.



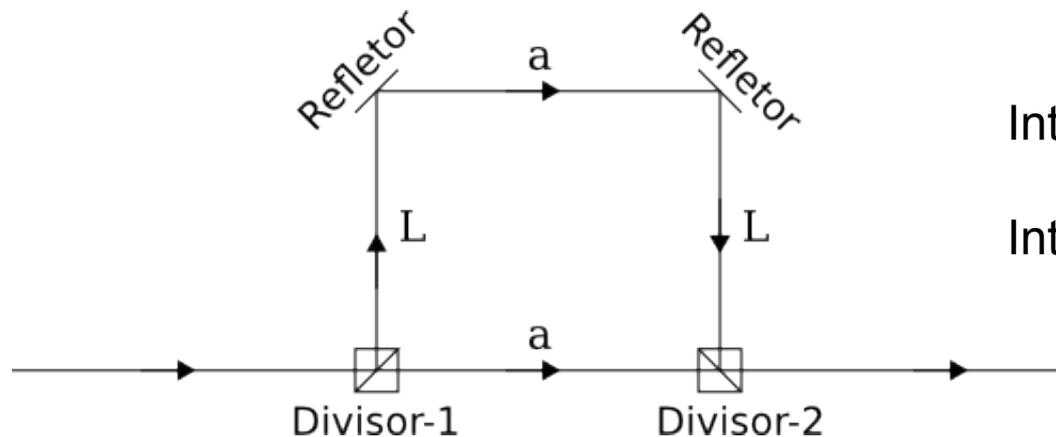
# Interferômetros

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



# Interferômetros:

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



Int. Construtiva:

$$2L = m\lambda$$

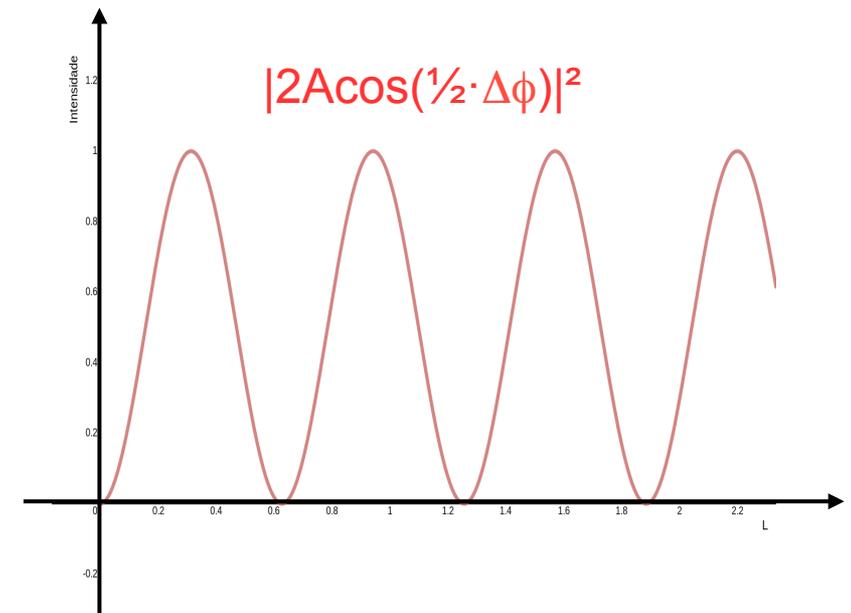
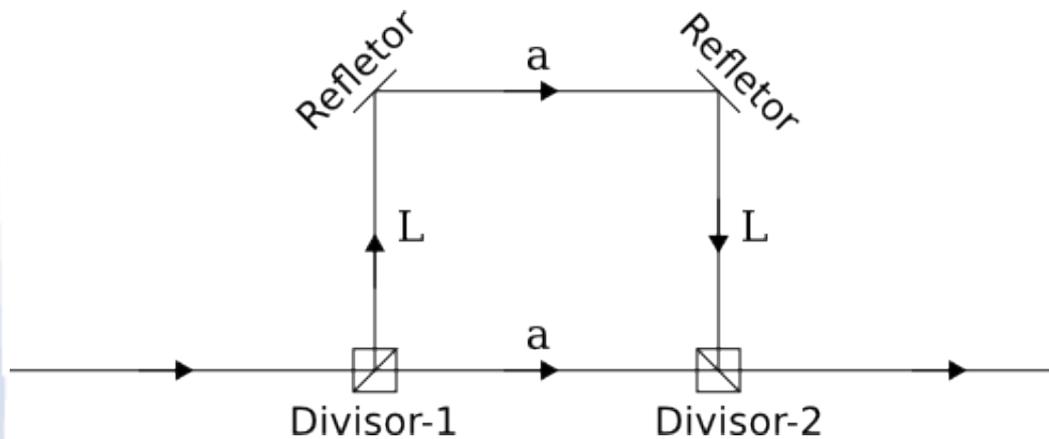
Int. Destrutiva:

$$2L = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

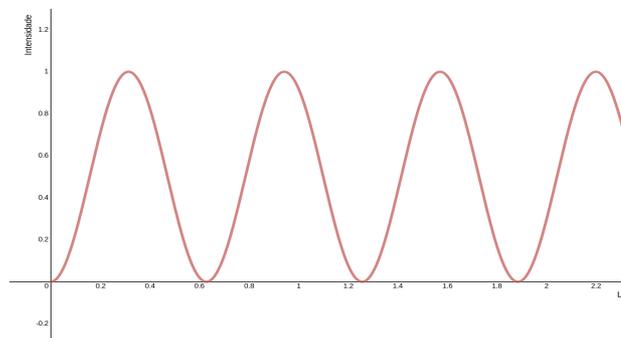
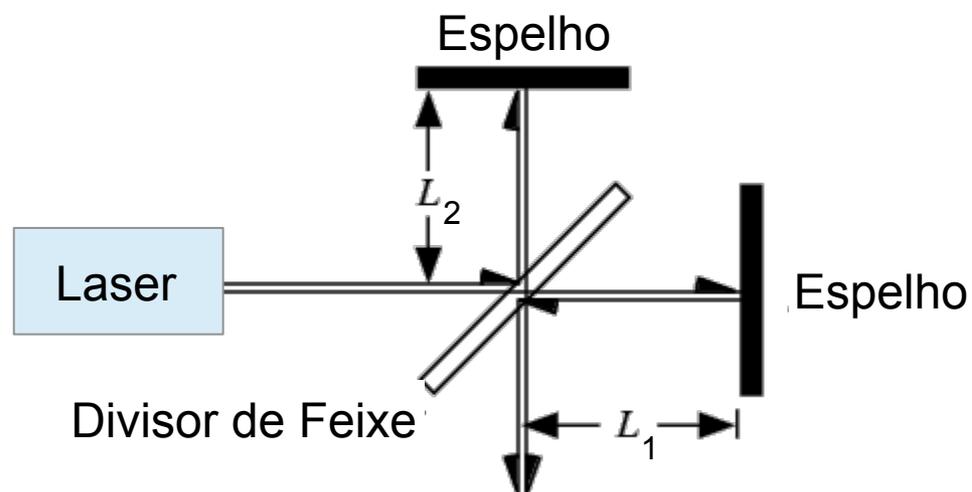
( $m=0,1,2,\dots$ )

# Interferômetros:

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



# Interferômetro de Michelson

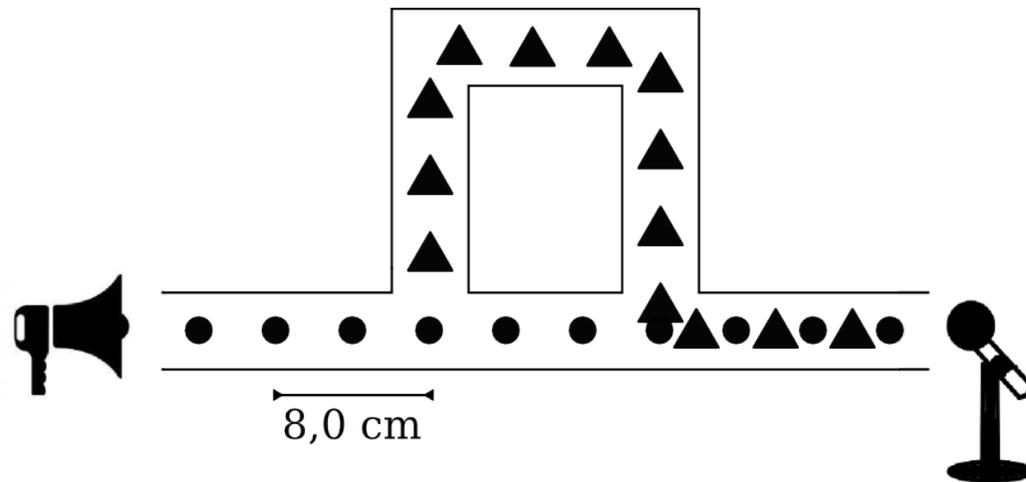


$$|2A \cos(\frac{1}{2} \cdot \Delta\phi)|^2$$

# Teste Conceitual

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.



# Teste Conceitual

Um Interferômetro de Michelson é ajustado para mostrar interferência construtiva quando a luz tem comprimento de onda  $\lambda$ . 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  $\frac{1}{4}$ .

# Teste Conceitual

Um Interferômetro de Michelson é ajustado para mostrar interferência construtiva quando a luz tem comprimento de onda  $\lambda$ . 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  $\frac{1}{4}$ .