

Cap. 22: Óptica Ondulatória

Difração e Interferência de ondas

Teste Conceitual

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.”

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

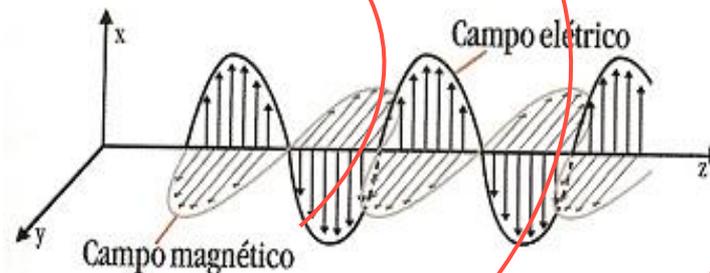


Modelos para a luz

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

Obs: 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...)

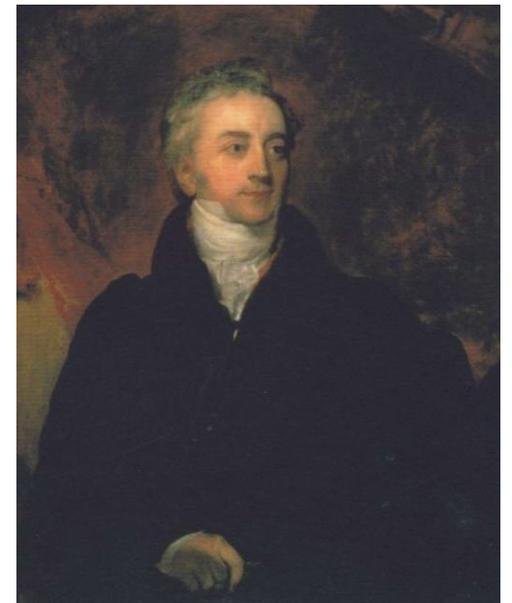
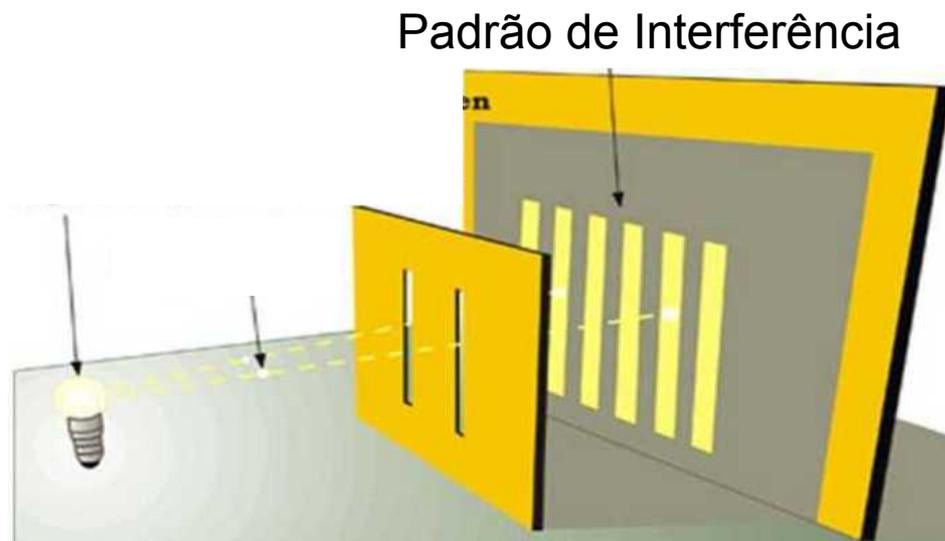
O modelo de fótons explica todos os fenômenos conhecidos envolvendo a luz, e se reduz aos outros dois em limites apropriados

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

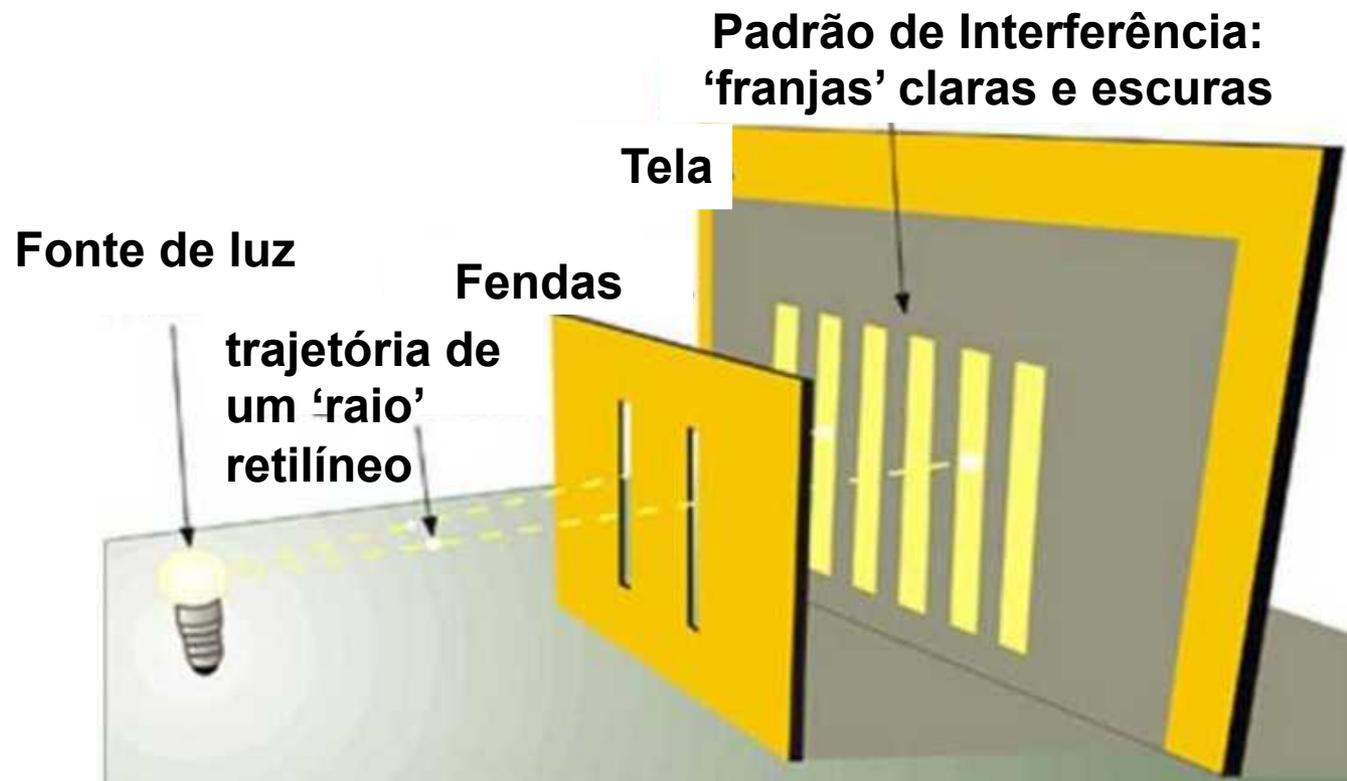
Ótica Ondulatória

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.

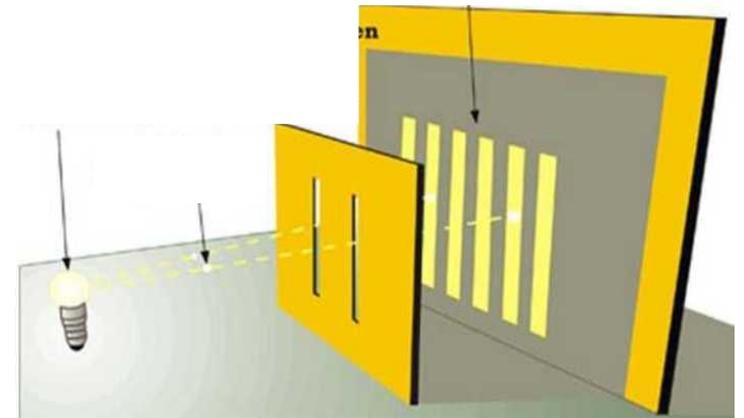
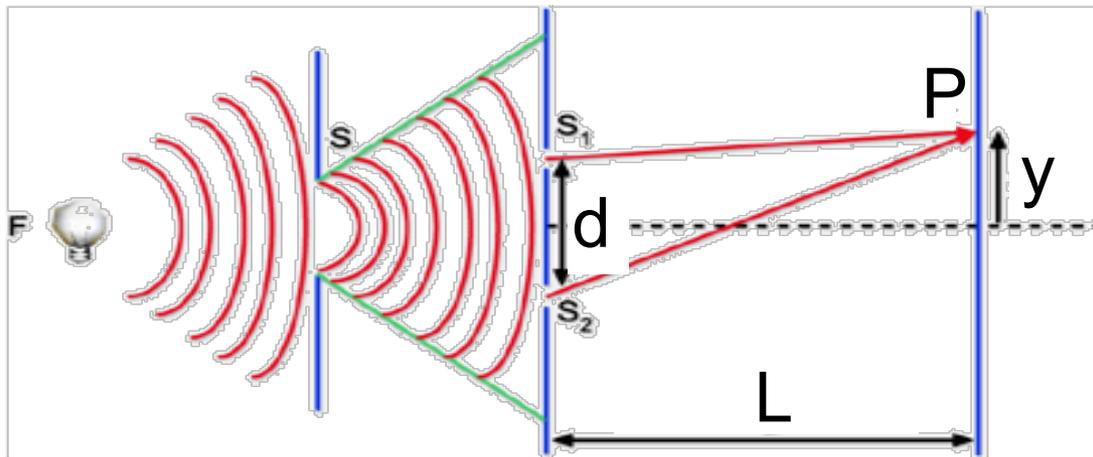


Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

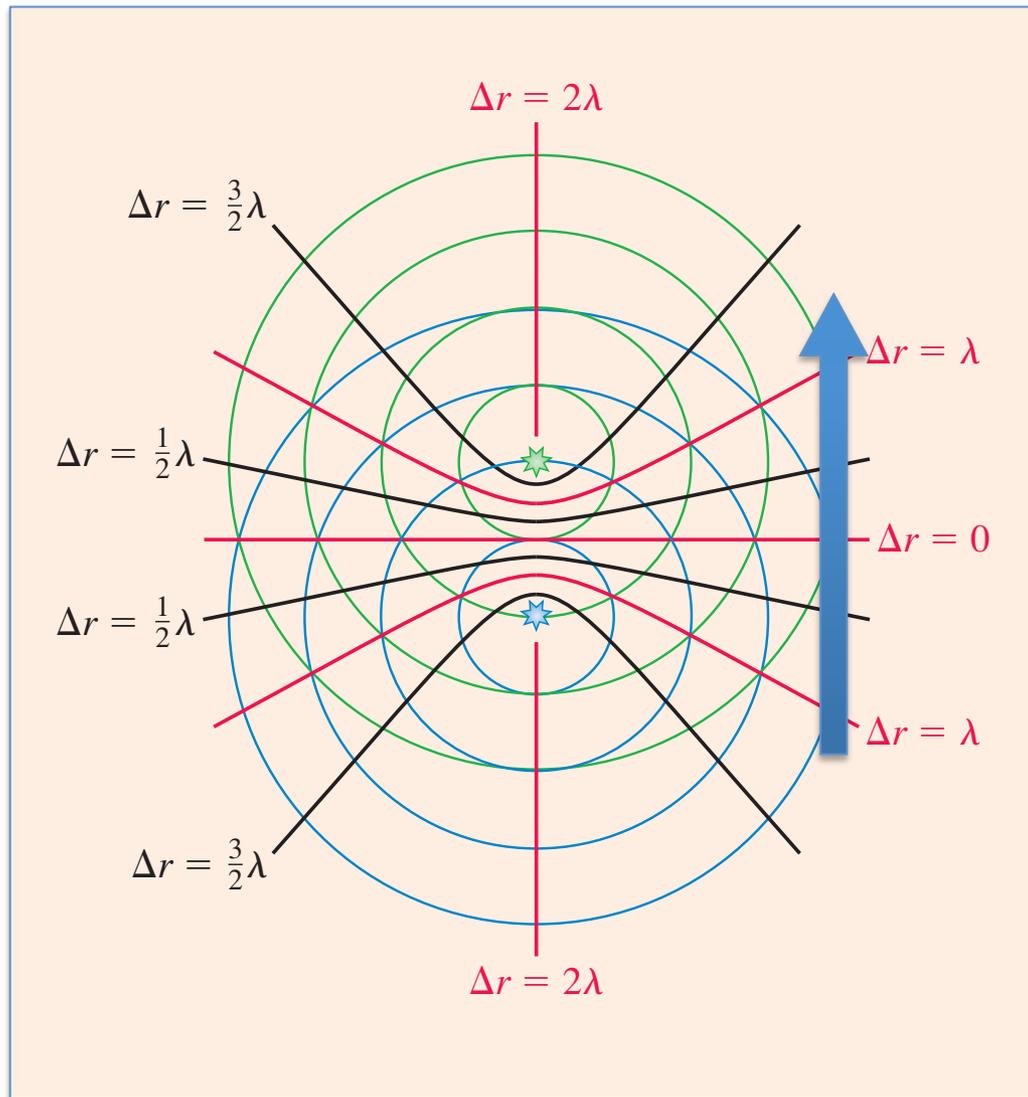


Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

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



Recordando: Interferência entre ondas em 2D

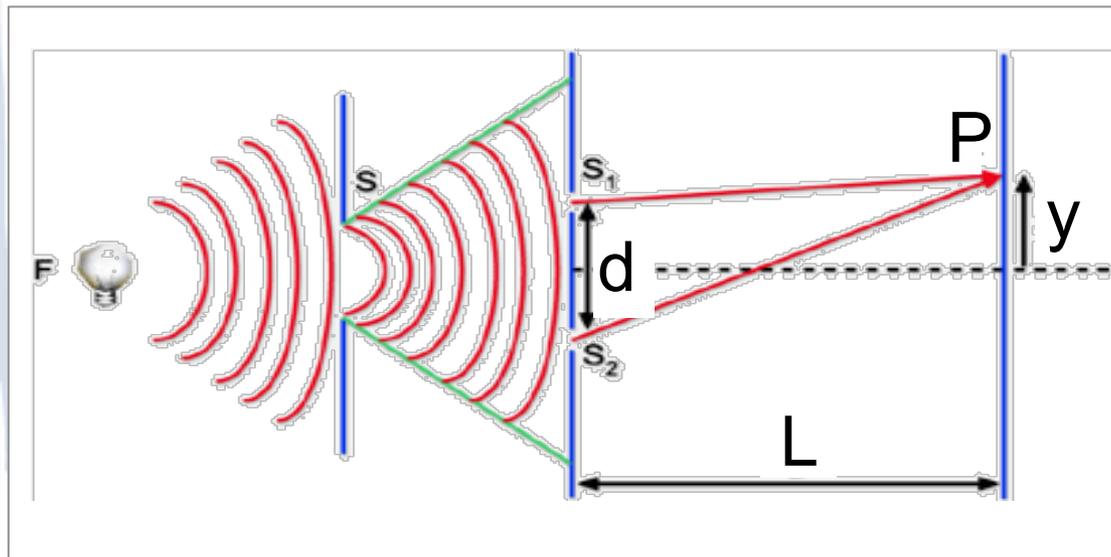


Assumindo que se tratam de ondas sonoras, o que uma pessoa que caminha com velocidade cte. ao longo da reta indicada irá perceber?

- 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

O Experimento da Fenda Dupla de Young

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



Interferência construtiva

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



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

Interferência destrutiva

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



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

O Experimento da Fenda Dupla de Young

Interferência construtiva

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



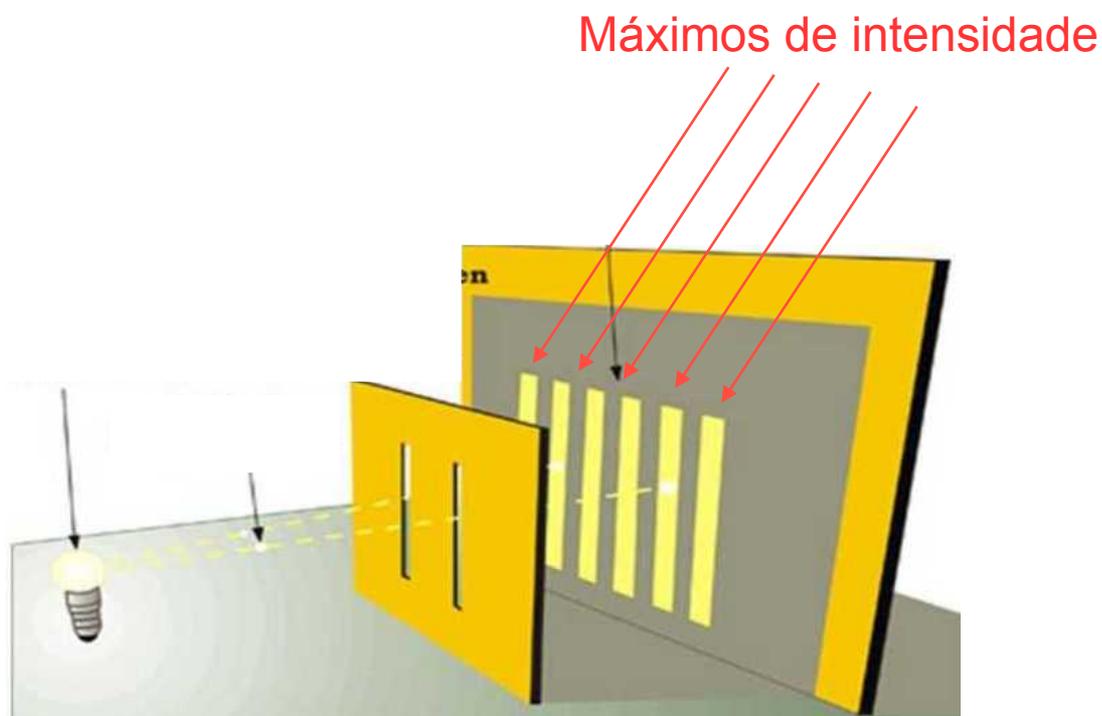
$$y = m \frac{\lambda L}{d}$$

Interferência destrutiva

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



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



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

Teste Conceitual

Levando em conta os parâmetros do experimento que acabamos de fazer, quanto você esperaria que seria, aproximadamente, a separação entre os máximos de intensidade projetados no fundo da sala?

- A. Cerca de 0.1mm
- B. Cerca de 1mm
- C. Cerca de 1cm
- D. Cerca de 10cm

Dado: separação entre as fendas: cerca de 0.25mm

(Estime você mesmo/a o tamanho da sala e o comp. de onda do laser)

Teste Conceitual

Levando em conta os parâmetros do experimento que acabamos de fazer, quanto você esperaria que seria, aproximadamente, a separação entre os máximos de intensidade projetados no fundo da sala?

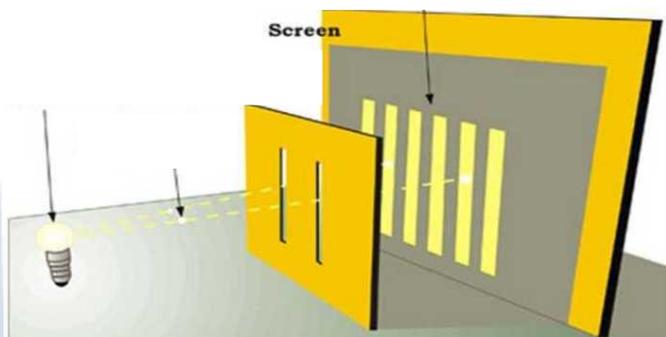
- A. Cerca de 0.1mm
- B. Cerca de 1mm
- C. Cerca de 1cm**
- D. Cerca de 10cm

Dado: separação entre as fendas: cerca de 0.25mm

(Estime você mesmo/a o tamanho da sala e o comp. de onda do laser)

O Experimento da Fenda Dupla de Young

Distribuição de intensidade no anteparo



Amplitude num ponto a uma distância lateral y do centro

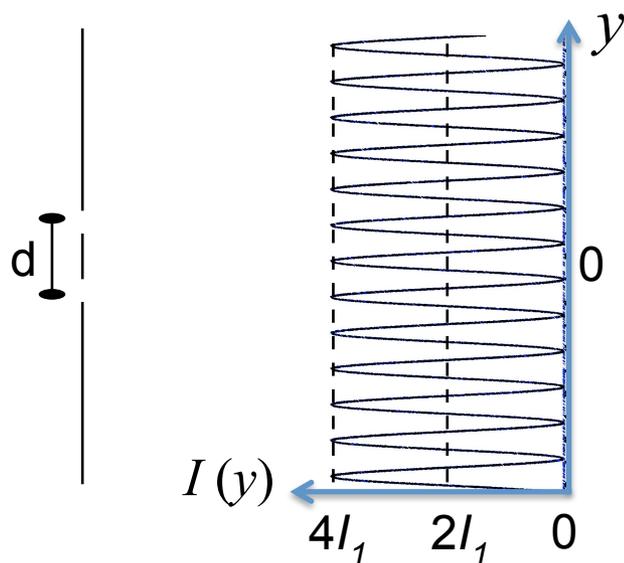
$$D(y, t) = 2A \cos \left(\frac{\Delta\varphi}{2} \right) \text{sen} (k\bar{r} - \omega t + \bar{\phi})$$

onde

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) = \frac{2\pi}{\lambda} d \text{sen} \theta \simeq \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{L} y$$



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



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

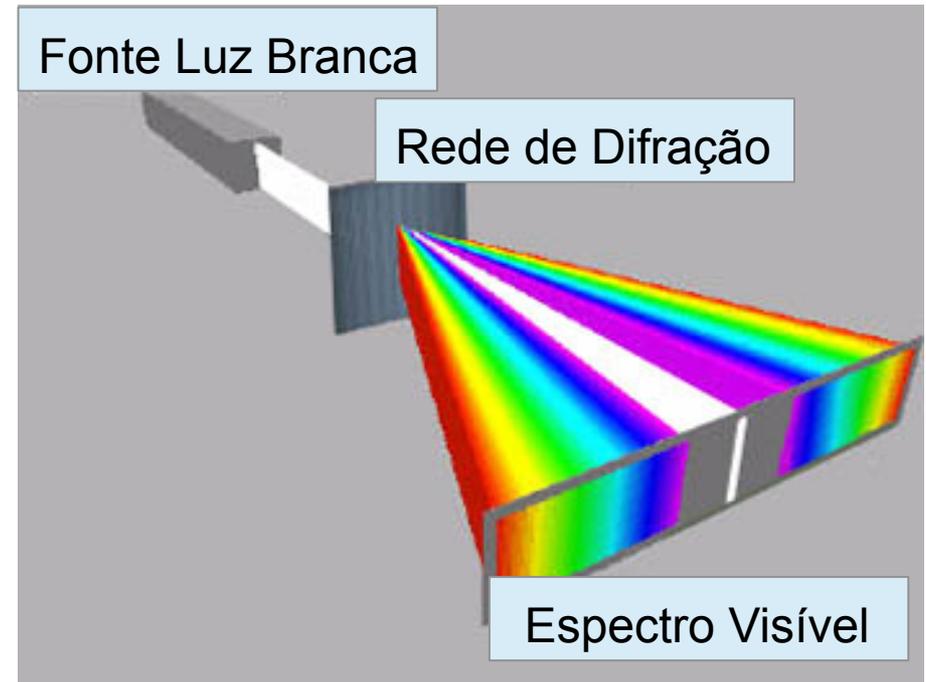
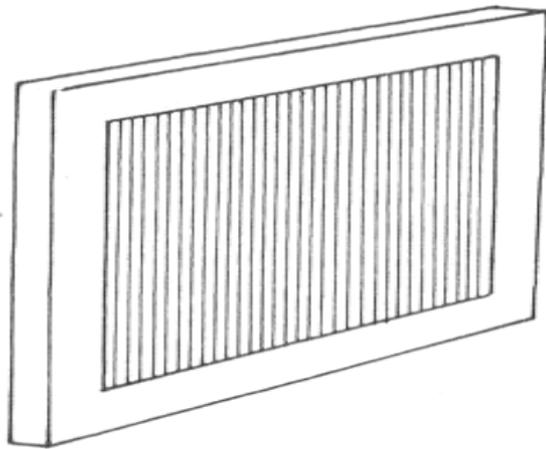
Teste Conceitual

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

Interferência de múltiplas fendas: “Redes de Difração”

Dispositivo ótico formado por muitas fendas paralelas

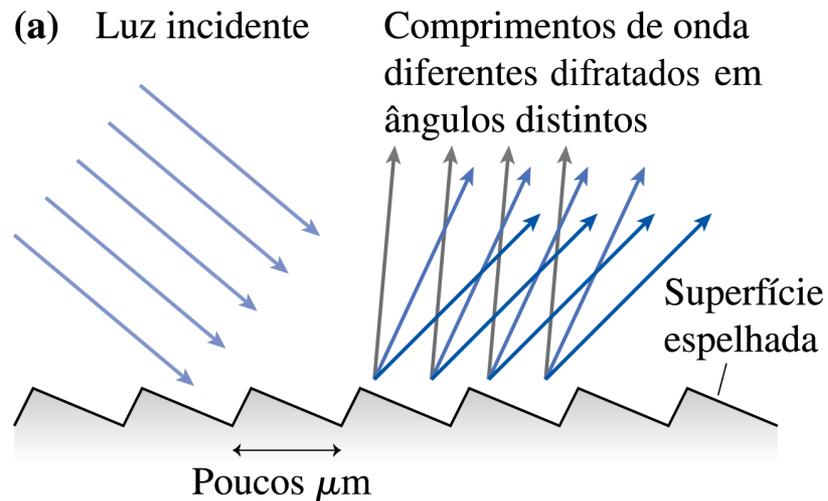


Efeito: separar a luz de acordo com o comprimento de onda (cor).

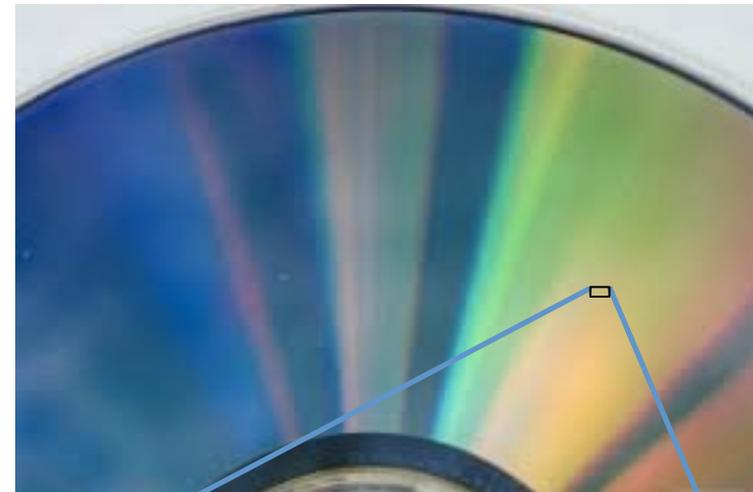
Aplicação: ESPECTROSCOPIA: caracterizar fontes de luz, identificando quais os comprimentos de onda presentes.

Interferência de múltiplas fendas: “Redes de Difração”

Obs: tb é possível se fazer uma ‘rede de difração por reflexão’ (ao invés de transmissão)

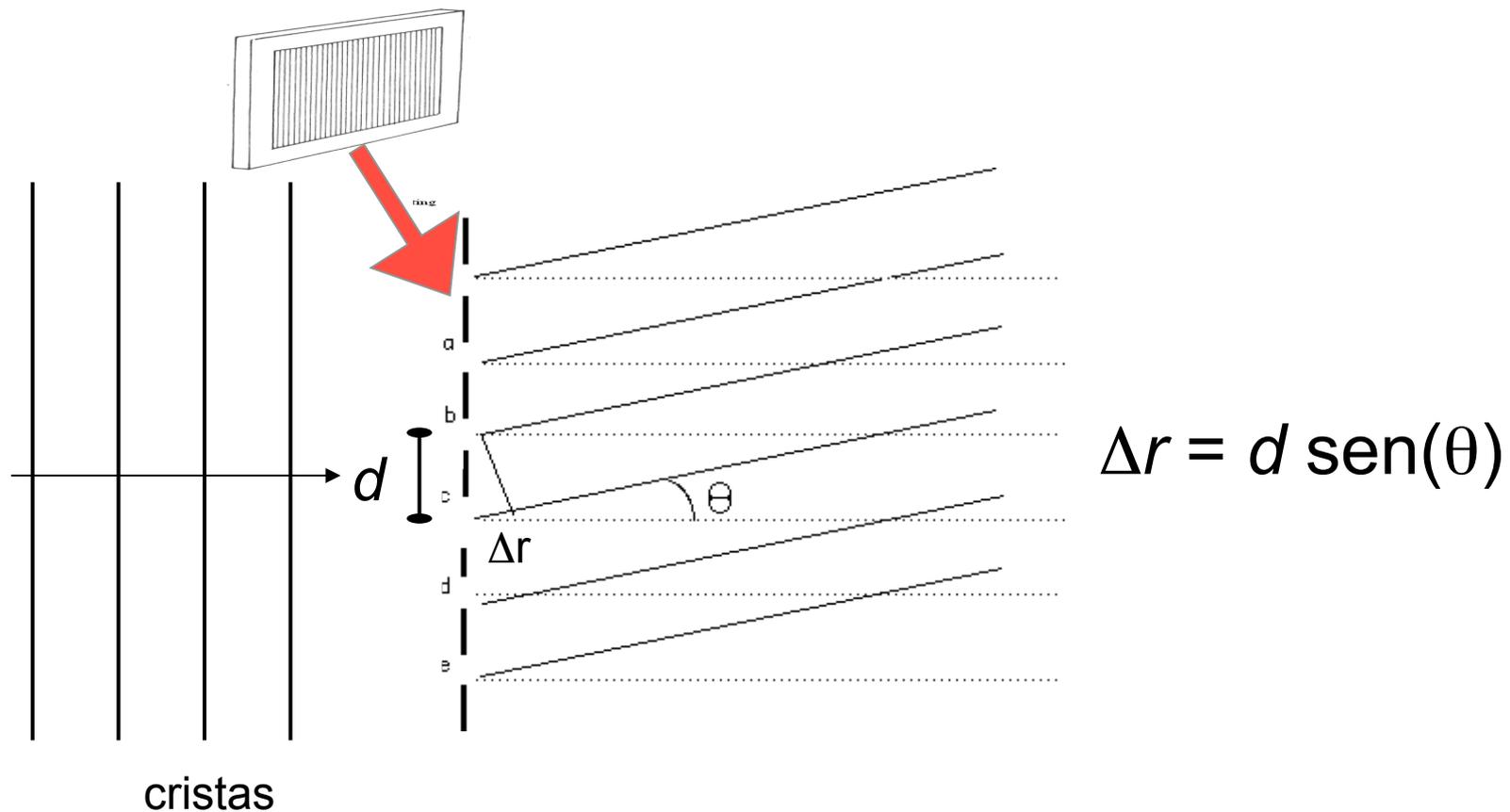


Ex: superfície de um DVD,
penas de certos pássaros



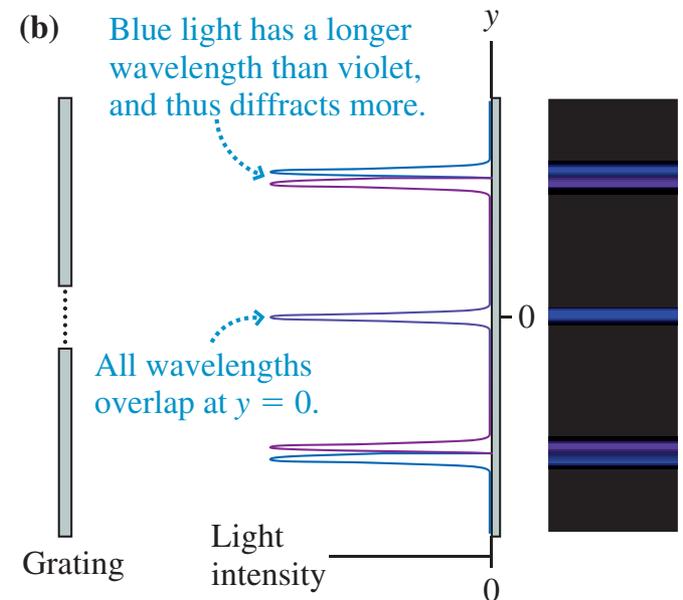
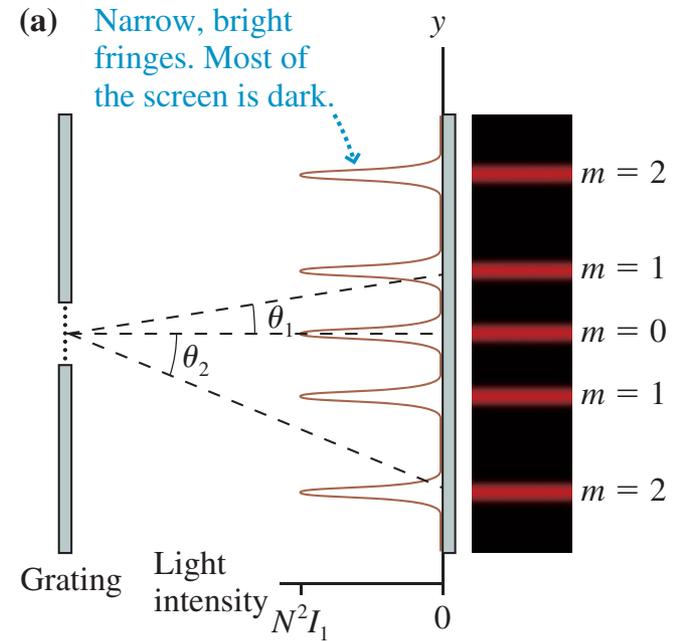
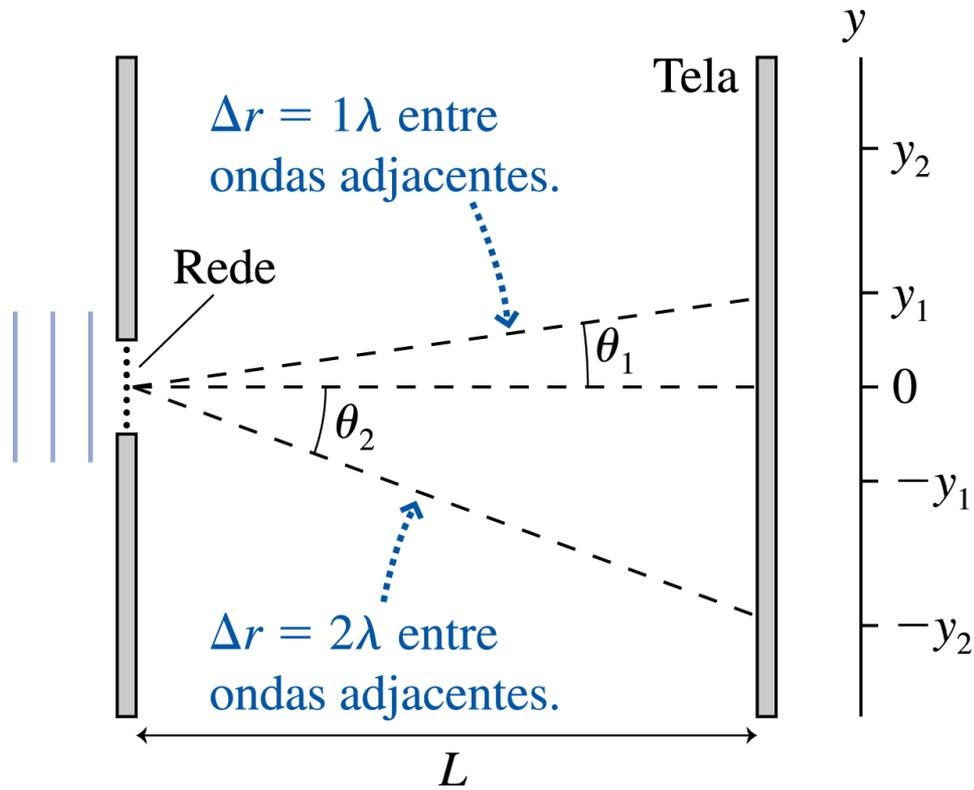
ps micrographs

Redes de Difração - Análise



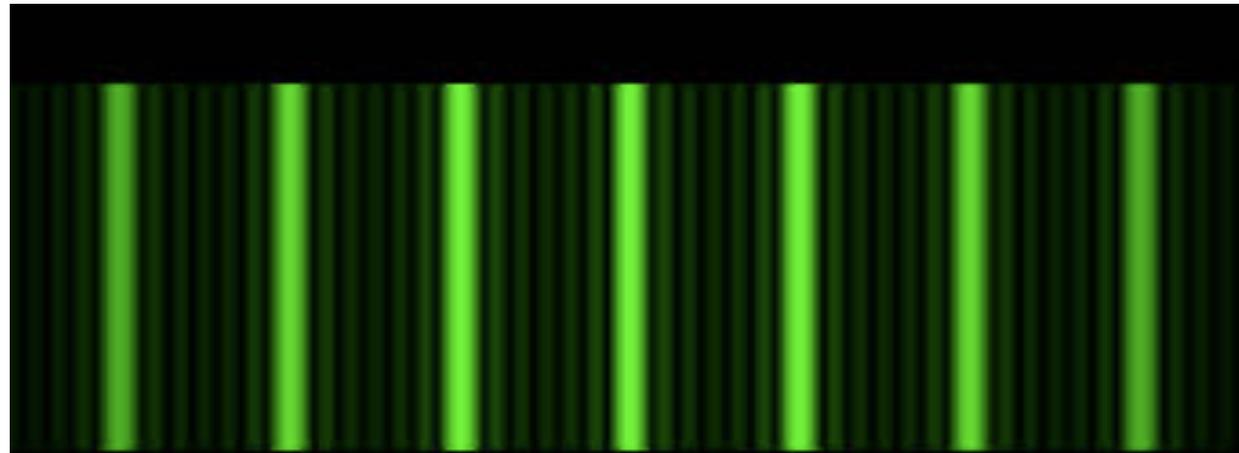
A onda proveniente de cada fenda percorre uma distância extra Δr .

Redes de Difração - Análise

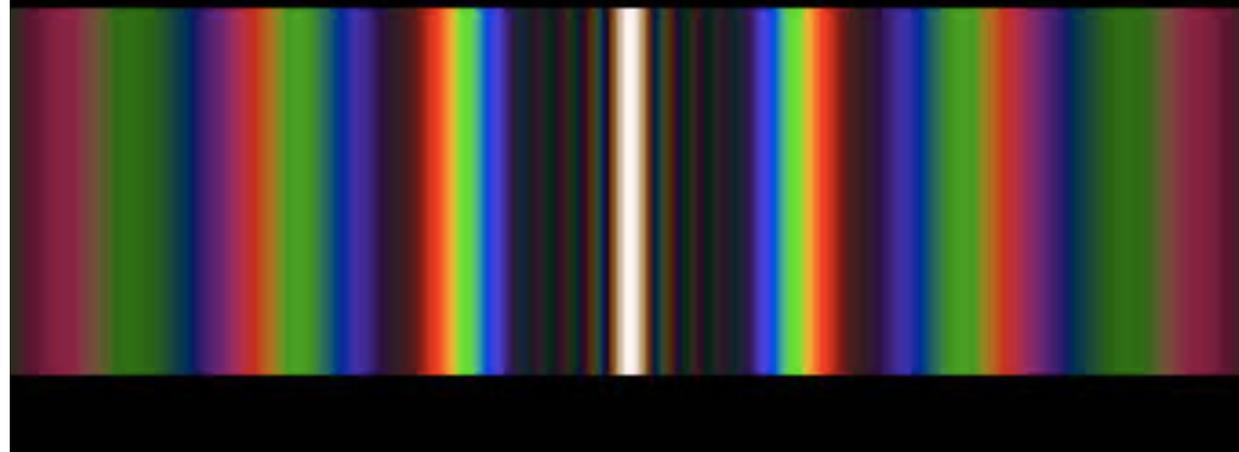


Redes de Difração - Análise

padrão difratado
qdo a rede é
iluminada com
luz verde

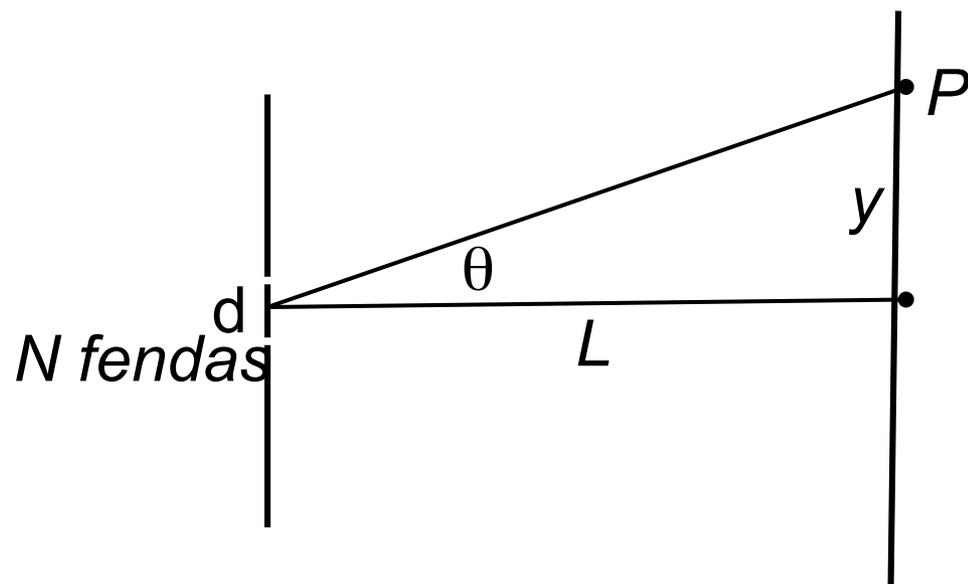


padrão difratado
qdo a rede é
iluminada com
luz branca



ordem de difração 3 2 1 0 1 2 3

Redes de Difração - Análise



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



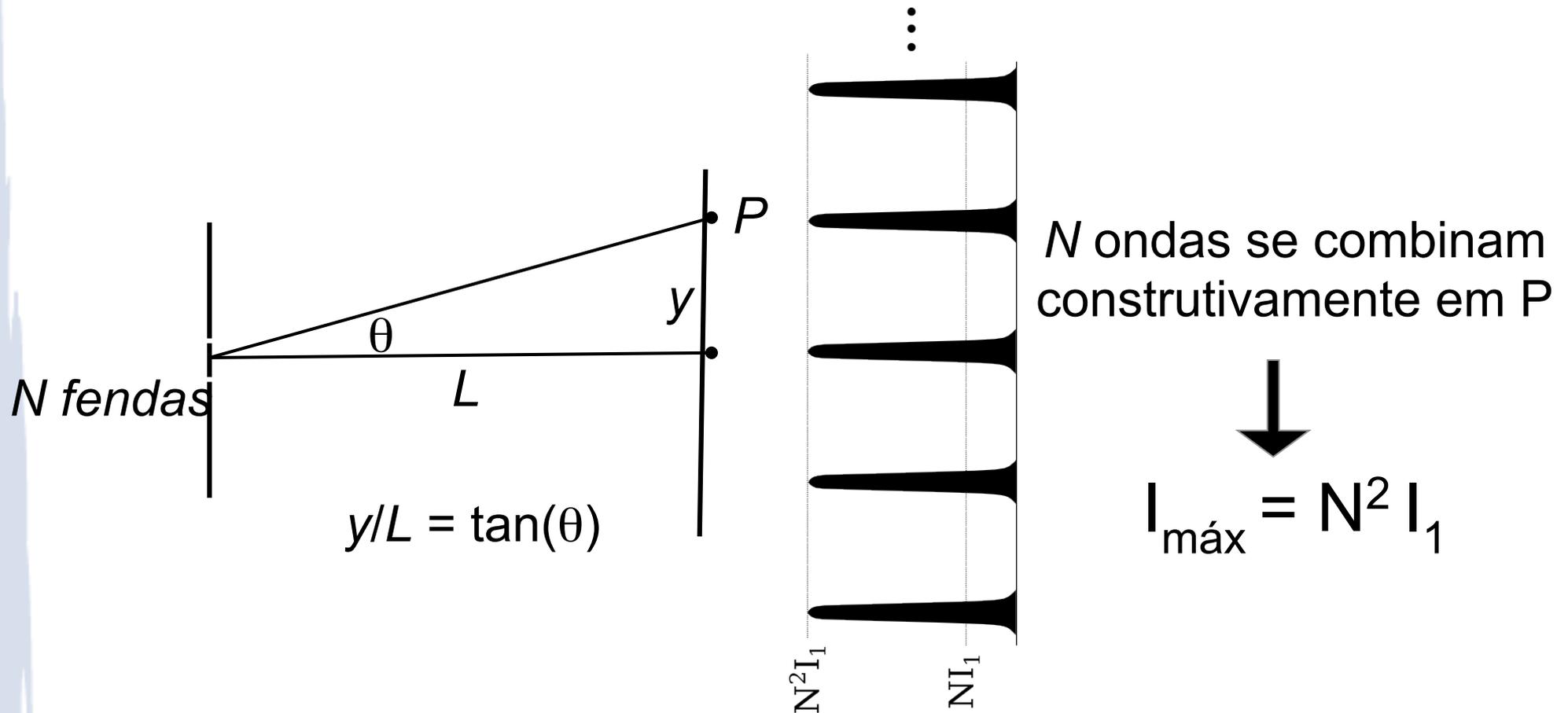
$$d \operatorname{sen}(\theta_m) = m\lambda$$

(ângulo do m -ésimo máximo)

ATENÇÃO: numa rede de difração real, d muitas vezes é só um pouco maior que λ . Nesses casos θ_m **não** precisa ser pequeno. Assim, em geral teremos de considerar $\tan(\theta) \neq \operatorname{sen}(\theta) \neq \theta$

Posição do m -ésimo máximo: $y_m = L \tan(\theta_m)$

Redes de Difração - Análise



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

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

Teste conceitual

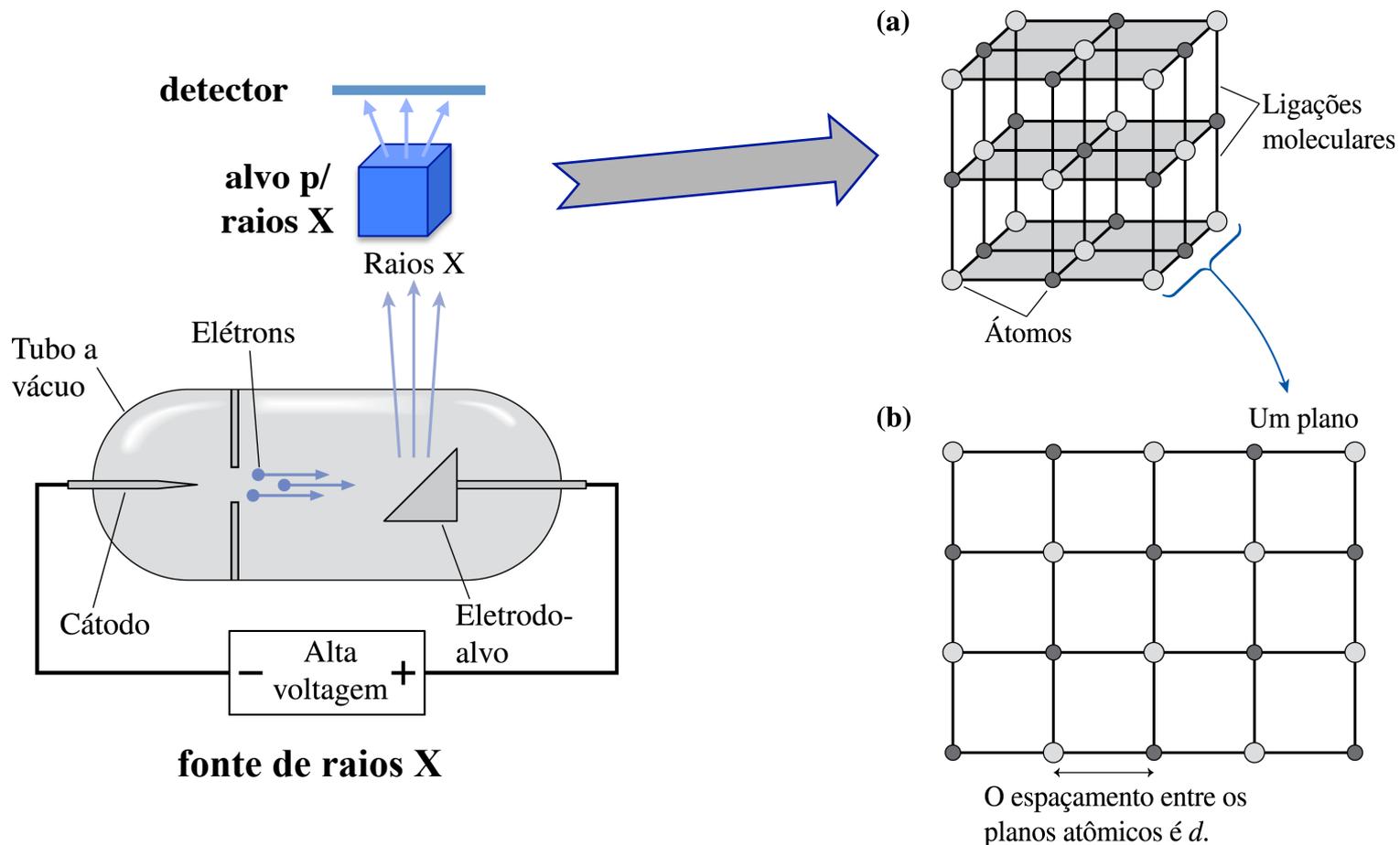
O que acontece com o perfil de interferência de um sistema de múltiplas fendas quando adicionamos mais fendas de mesmo espaçamento?

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

Extra: Difração de raios-X

Raios-X são ondas eletromagnéticas com comprimento de onda numa faixa entre 0.01nm e 10 nm (cerca de 50 a 50000 vezes menores que a luz visível)

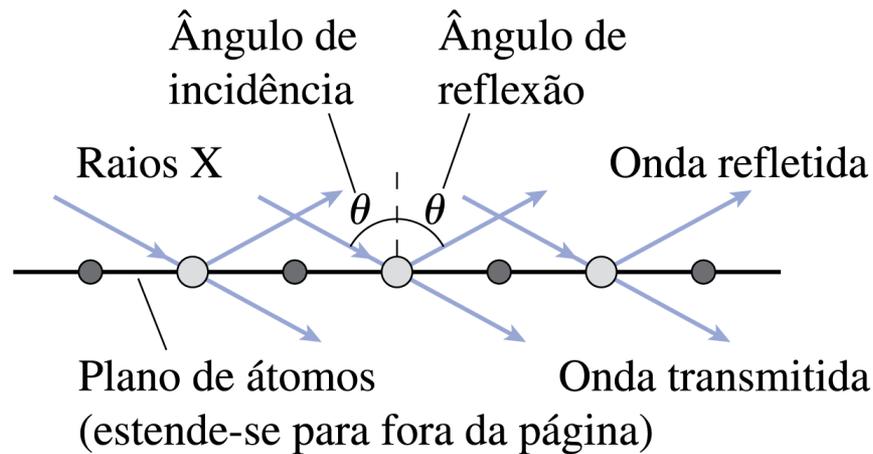
Em 1912, M. von Laue (Nobel de Física 1914) descobriu que raios-X podem ser difratados por 'alvos' de material cristalino (materiais com uma estrutura tridimensional regular).



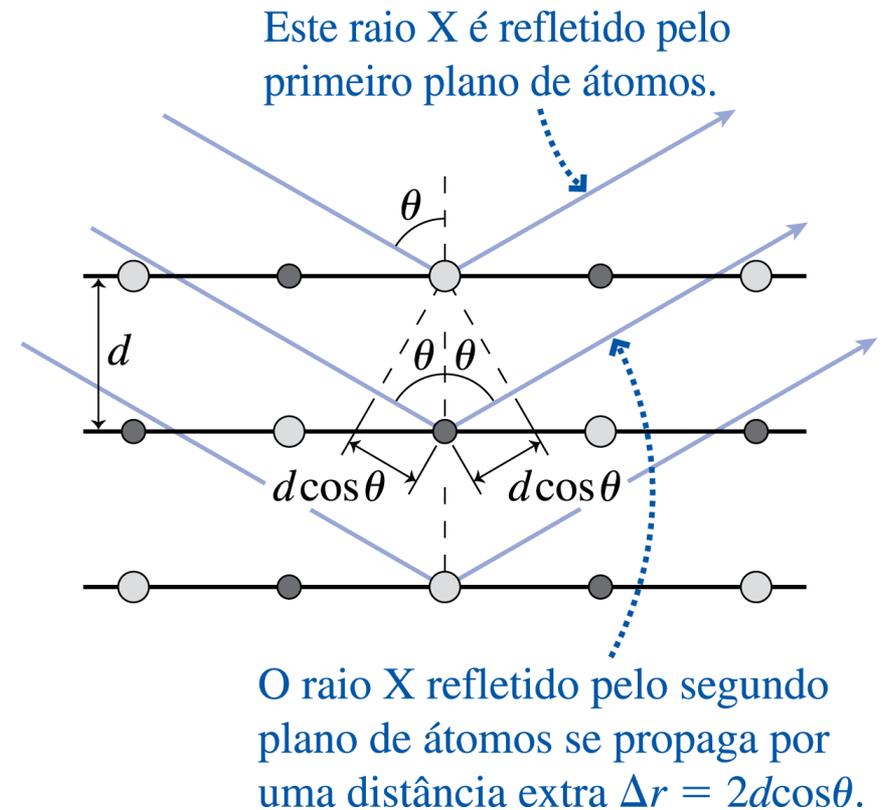
Extra: Difração de raios-X

Em 1913, W. H. Bragg e W. L. Bragg (pai e filho, Nobel de Física 1915) mostraram como calcular o padrão de difração produzido por uma dada estrutura atômica, usando o fato de que **os próprios átomos do material agem como uma rede de difração!**

(a) Os raios X são transmitidos e refletidos em um plano de átomos.



(b) As reflexões provenientes de planos paralelos interferem.

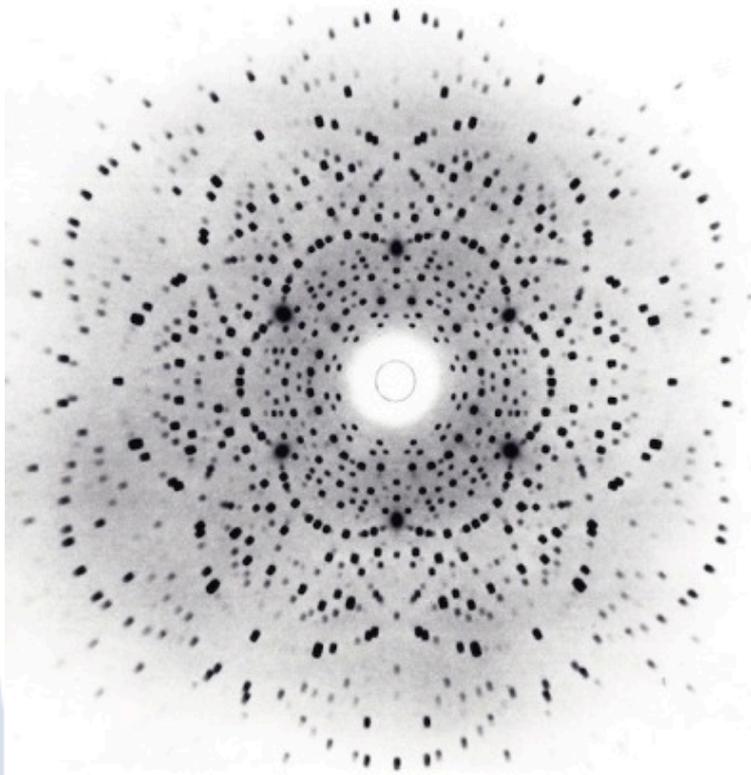


V. cap 25 para mais detalhes!

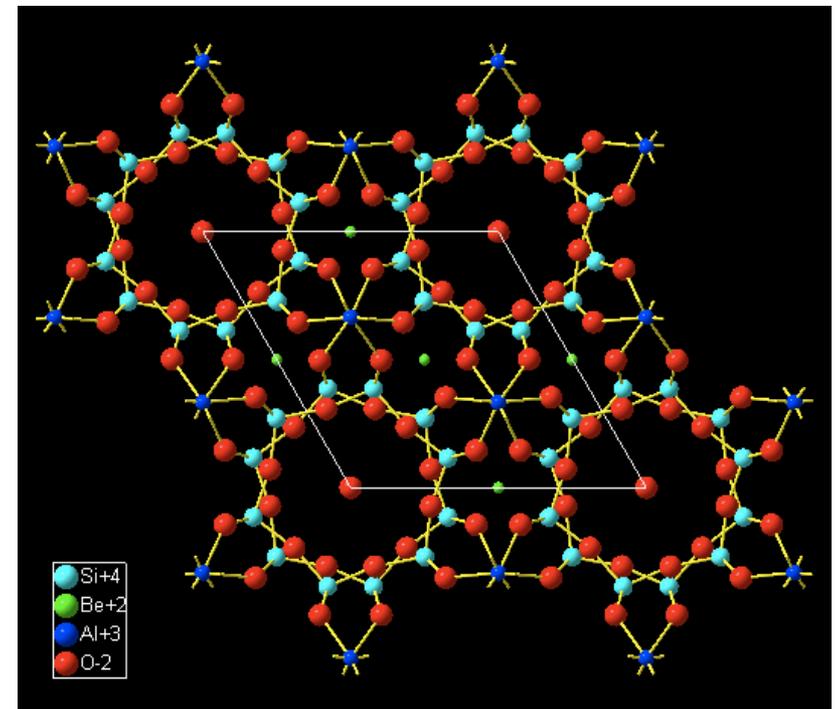
Difração de raios-X

O inverso também é possível: iluminando um cristal com raios-x de comprimento de onda conhecido e analisando o padrão de interferência resultante, é possível **deduzir** a estrutura atômica do material

Ex: padrão difratado por um cristal de Berilo (esmeralda ou água-marinha)



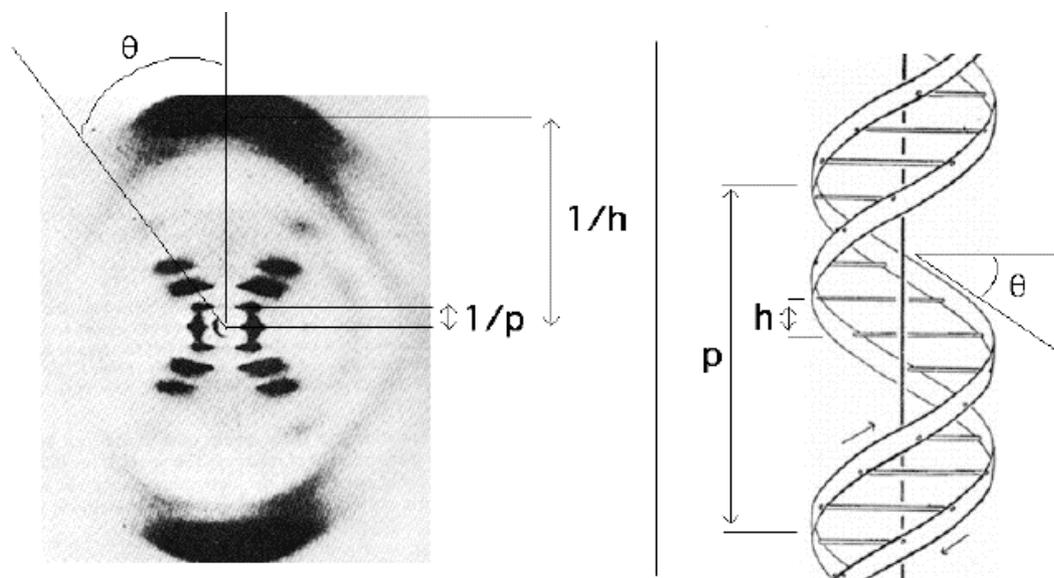
Estrutura atômica deduzida



Fonte: Eastman Kodak, 1965

Fonte: Crystal Impact GbR, <http://www.ccp14.ac.uk/>

Difração de raios-X



Fonte: Tinoco, Sauer & Wang, Physical Chemistry (Prentice-Hall 1978)

Aplicação: identificar a estrutura espacial de biomoléculas complexas

Ex: Dupla hélice do DNA (Watson, Crick, Franklin e Wilkins 1953, Nobel de Medicina de 1962)



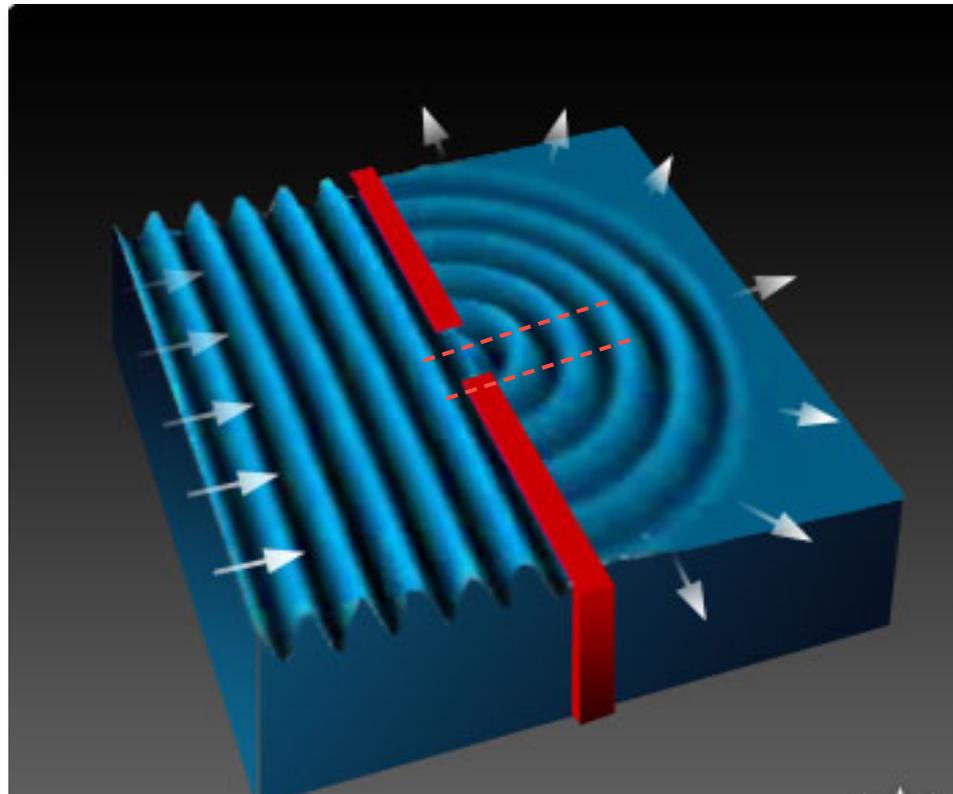
Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), Campinas / SP

Fonte de raios-X mais brilhante do Brasil, usado p/ estudos de metalurgia, biologia, química, materiais....

Difração

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

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

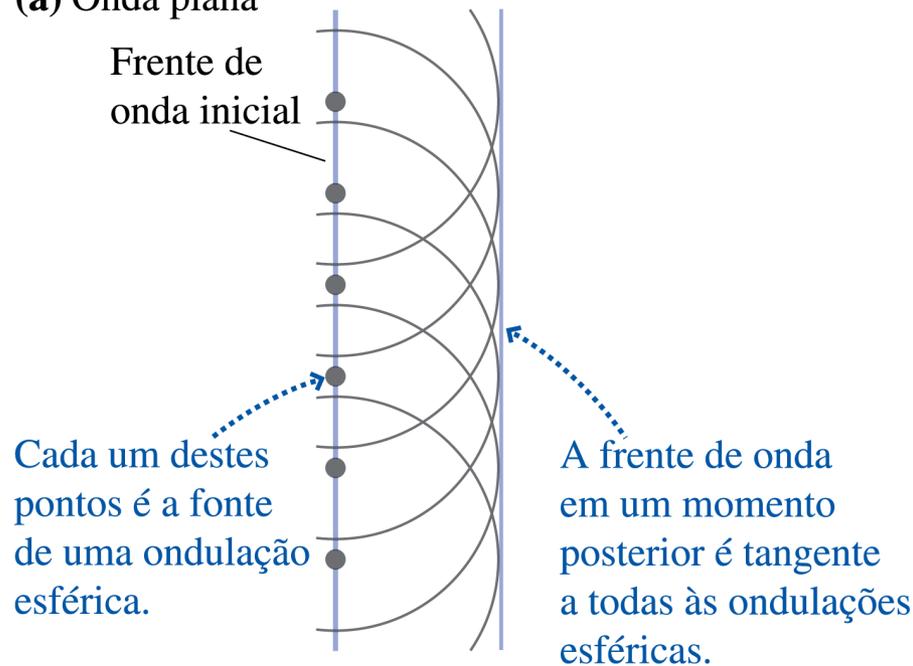


Difração em Fenda Simples

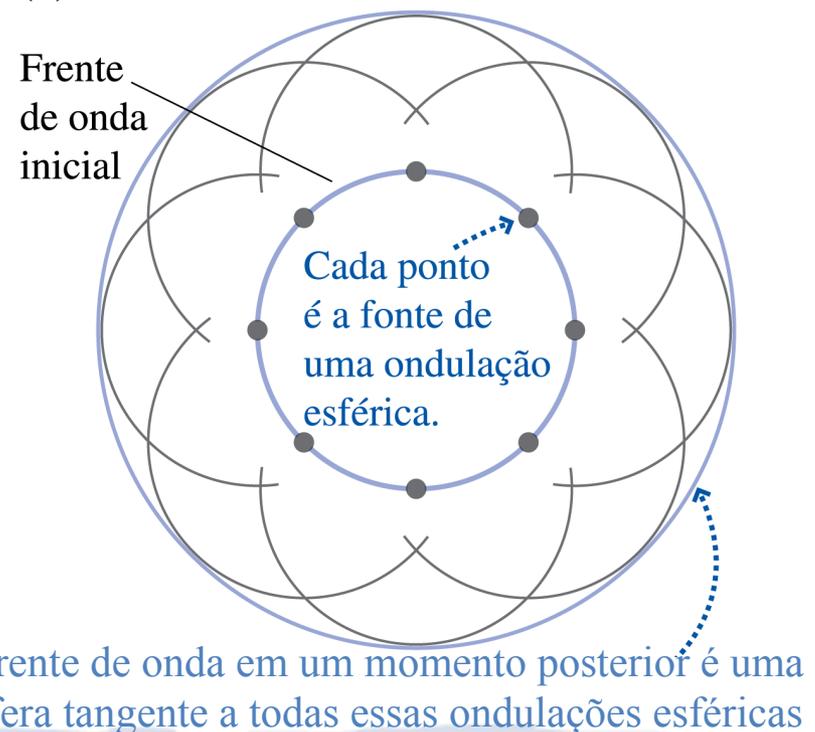
Explicação qualitativa: **Princípio de Huygens (1678)**

- 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



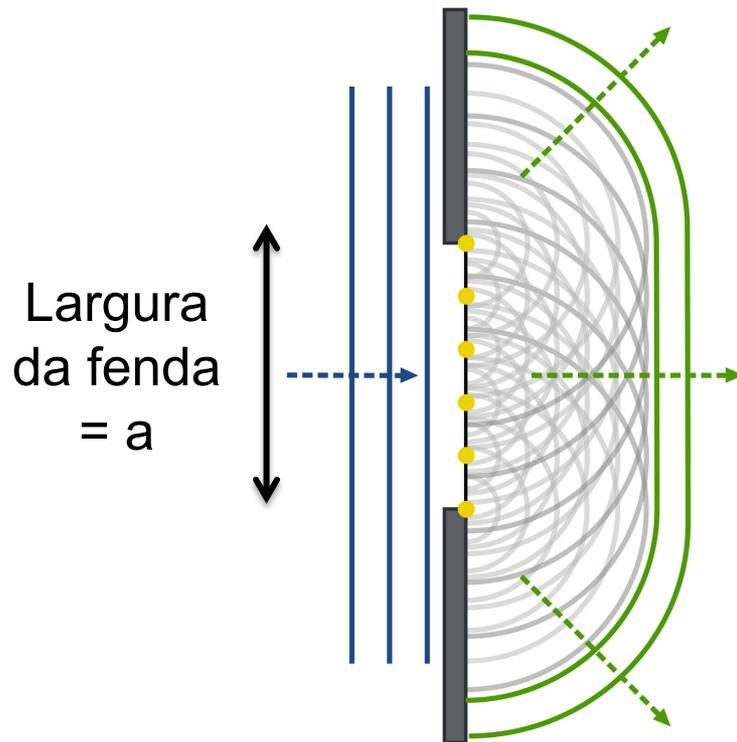
(b) Onda esférica



Difração em Fenda Simples

Explicação qualitativa: **Princípio de Huygens (1678)**

- 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



Porém, atenção. Essa imagem está incompleta!

Precisamos analisar ainda a **interferência** entre todas essas ondas individuais

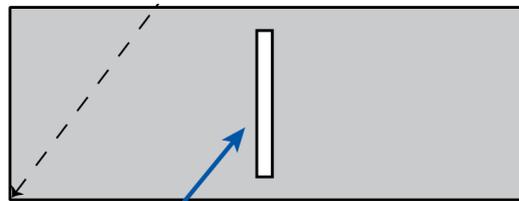
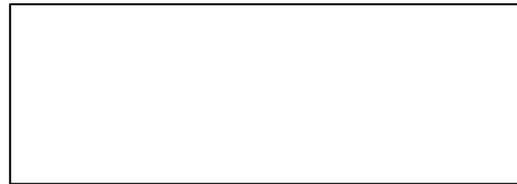
Difração em Fenda Simples

Ex: Um laser difratando em uma fenda estreita

Teste “você leu o livro”?

Que padrão aparece na tela quando passamos luz por uma fenda muito estreita?

Tela de visualização



Fenda simples
de largura a

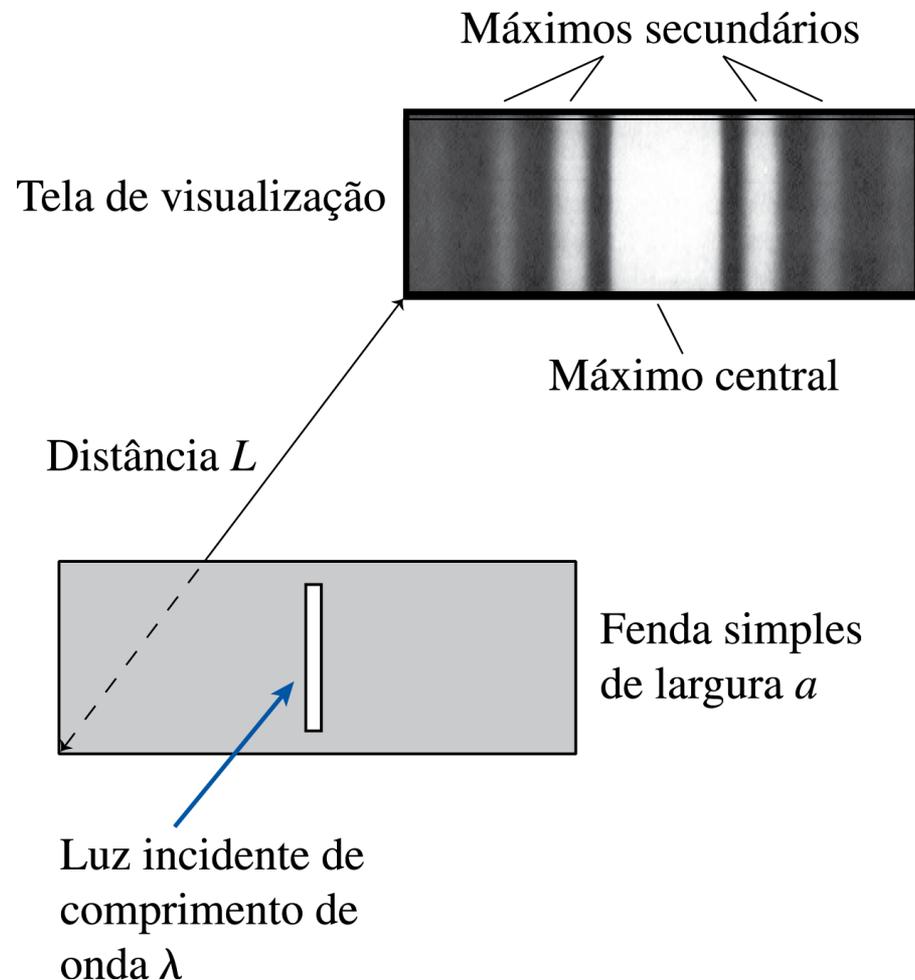
Luz incidente de
comprimento de
onda λ

- A) Uma imagem nítida no centro, com a mesma forma da fenda só que mais larga (ie, uma projeção da fenda).
- B) Uma mancha muito larga, intensa no centro e decaindo continuamente em intensidade para os lados.
- C) Uma mancha larga e intensa no centro, e tb outras manchas mais estreitas e menos intensas para cada lado, separadas por faixas escuras.
- D) Muitas manchas estreitas, igualmente espaçadas, separadas por faixas escuras.

Difração em Fenda Simples

Ex: Um laser difratando em uma fenda estreita

Teste “você leu o livro”?

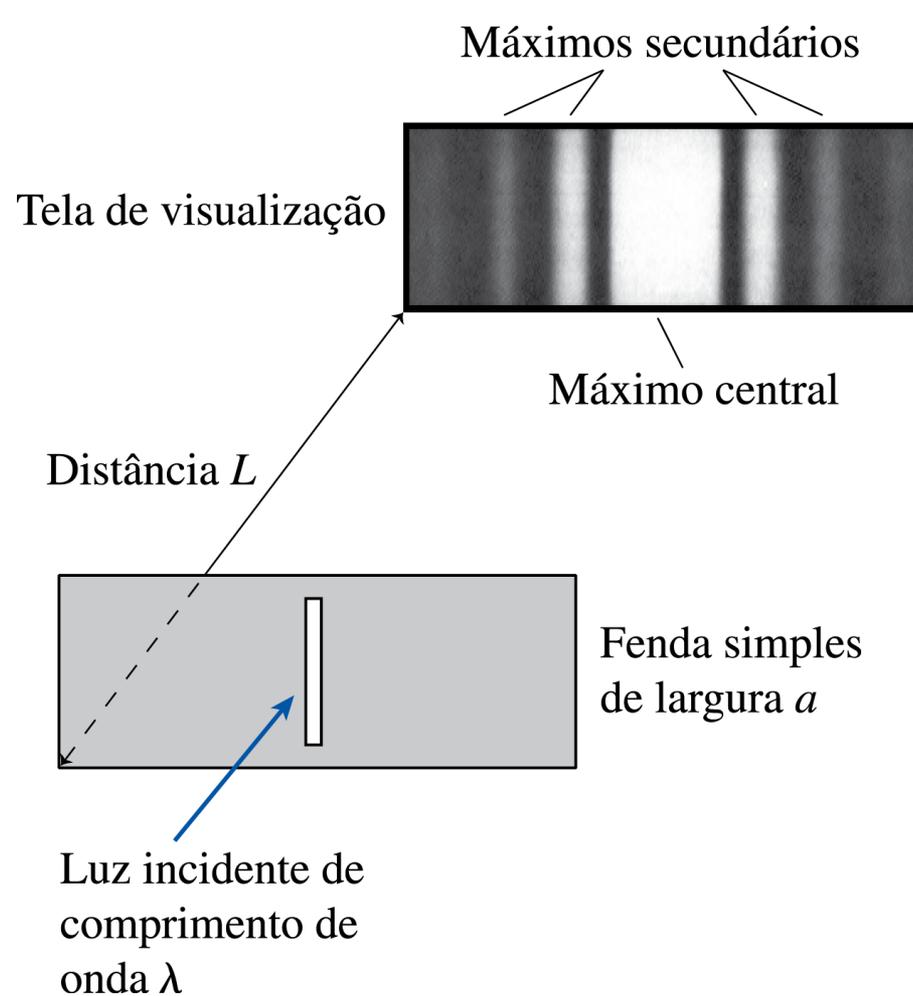


Que padrão aparece na tela quando passamos luz por uma fenda muito estreita?

- A) Uma imagem nítida no centro, com a mesma forma da fenda só que mais larga (ie, uma projeção da fenda).
- B) Uma mancha bem larga, intensa no centro e decaindo continuamente em intensidade para os lados.
- C) Uma mancha larga e intensa no centro, e tb outras manchas mais estreitas e menos intensas para cada lado, separadas por faixas escuras.
- D) Muitas manchas estreitas, igualmente espaçadas, separadas por faixas escuras.

Difração em Fenda Simples

Ex: Um laser difratando em uma fenda estreita



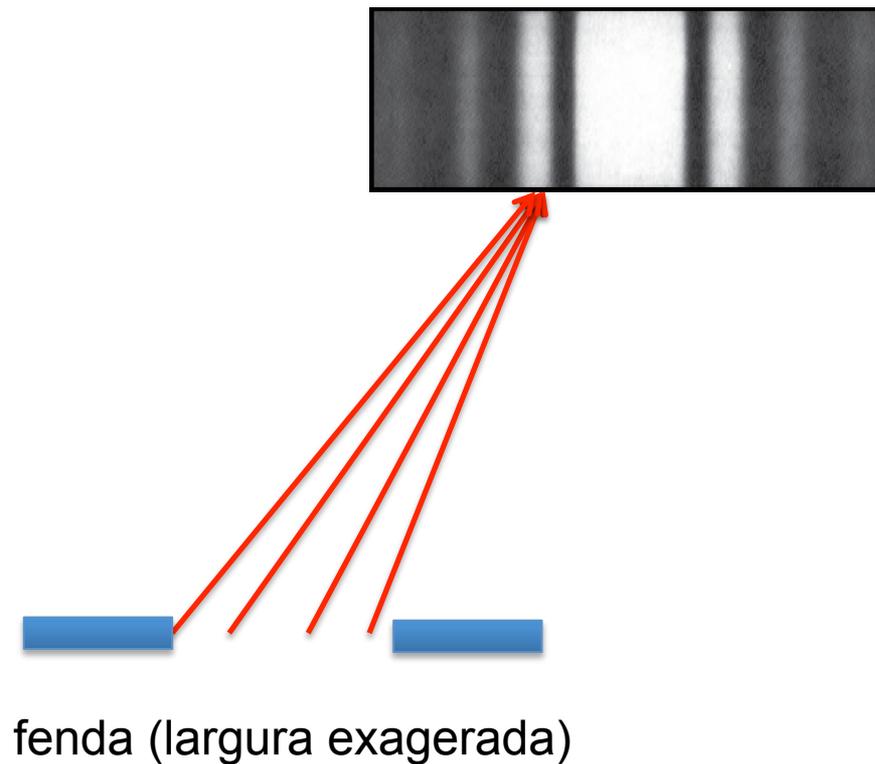
Perguntas

- 1 – se há somente uma fenda, por que aparece esse padrão? O que está interferindo com o que para causá-lo?
- 2 – o que determina a posição das faixas escuras (intensidade mínima)?

Difração em Fenda Simples

Ex: Um laser difratando em uma fenda estreita

Perguntas



1 – se há somente uma fenda, por que aparece esse padrão? O que está interferindo com o que para causá-lo?

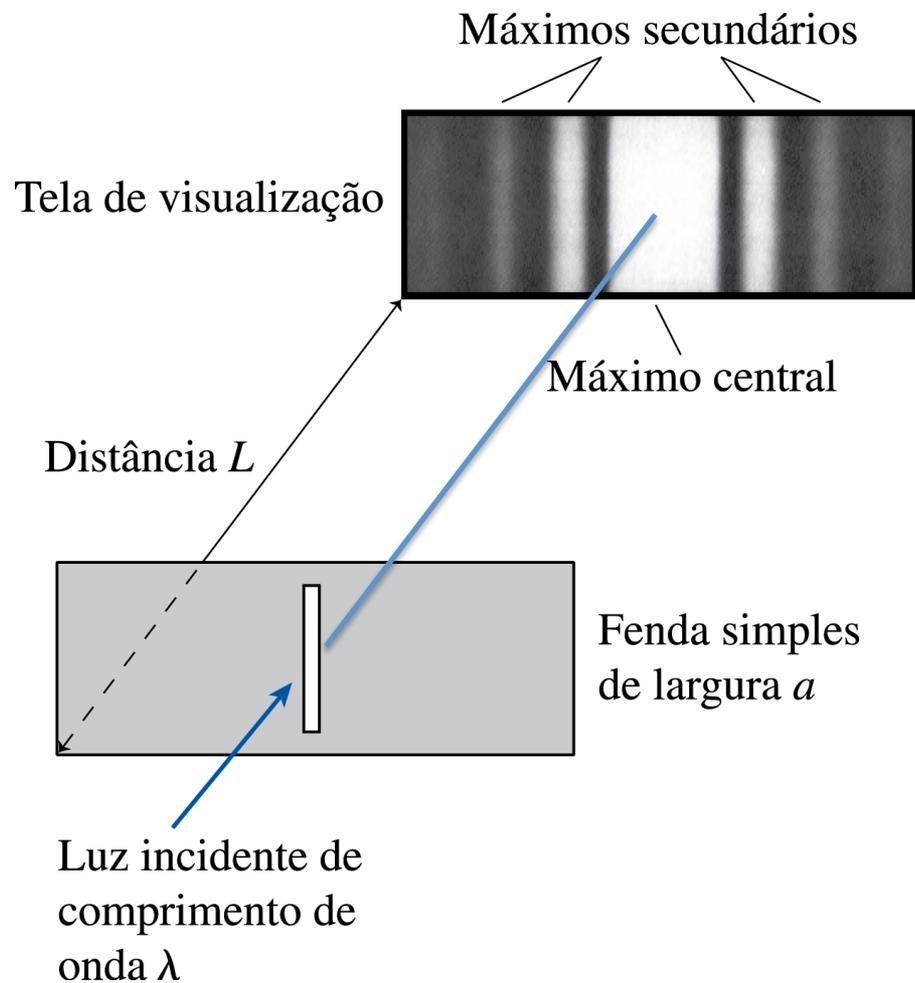
R: a fenda não é uma fonte pontual!

Em cada ponto da tela, a luz que chega vindo de pontos diferentes da fenda percorre caminhos com comprimentos *ligeiramente* diferentes

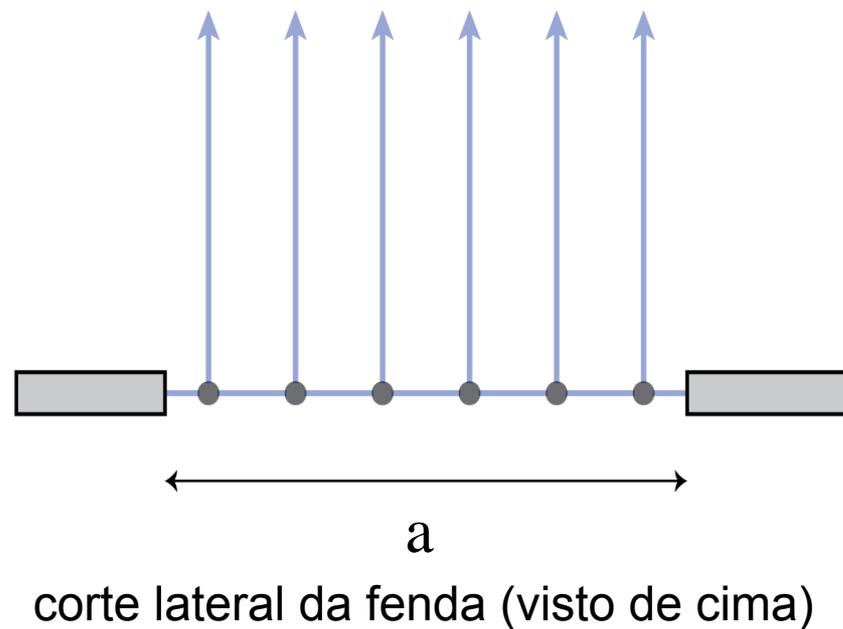
Essa diferença leva a diferenças de fase, portanto a interferência...

Difração em Fenda Simples

Ex: Um laser difratando em uma fenda estreita

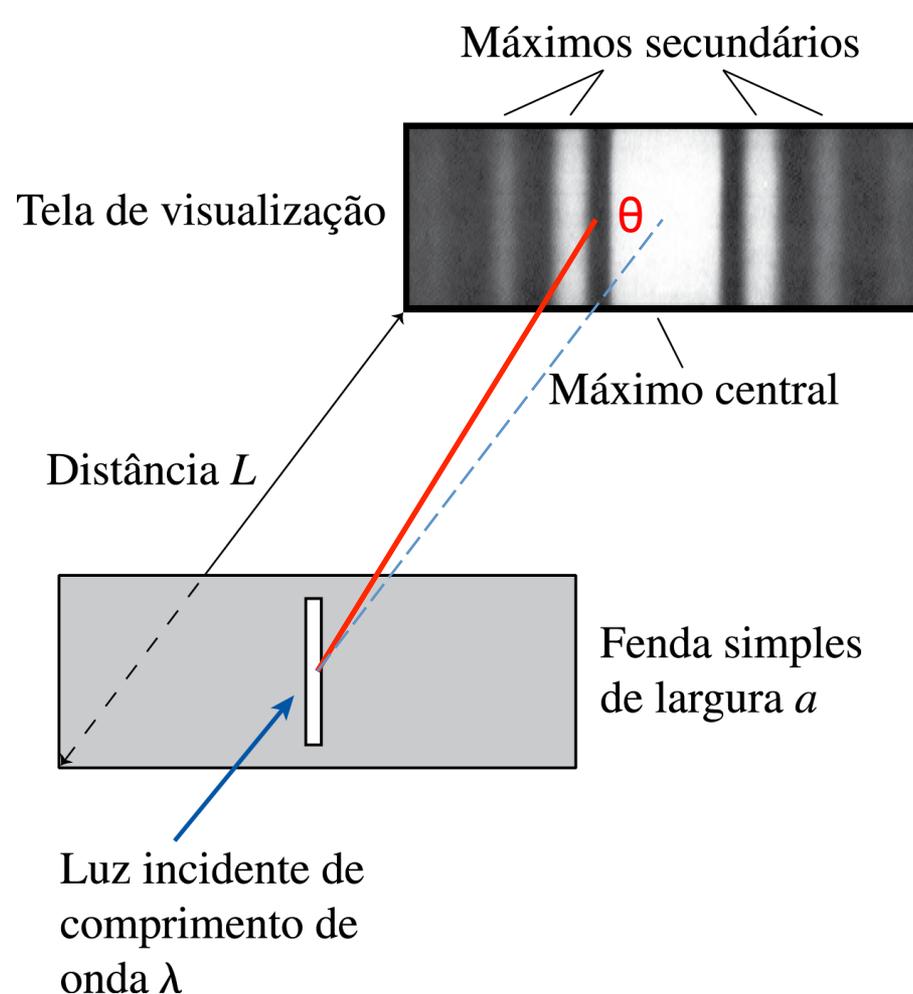


No centro da tela: luz vinda de todos os pontos da fenda percorre praticamente a mesma distância:
interferência construtiva



Difração em Fenda Simples

Ex: Um laser difratando em uma fenda estreita



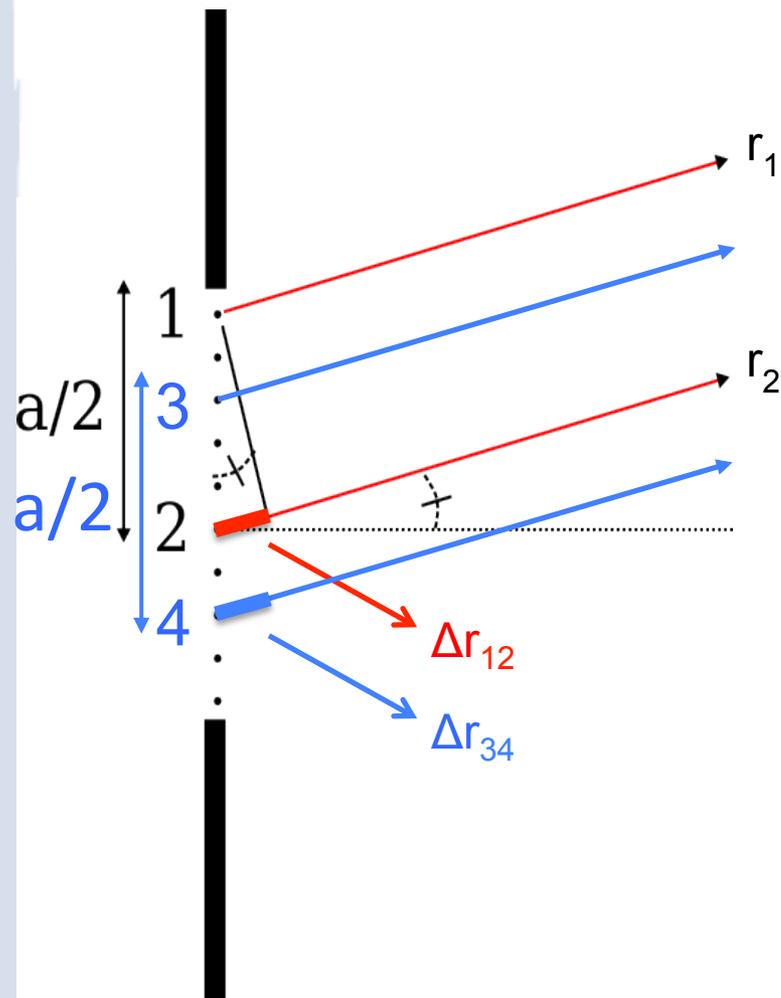
Perguntas

2 – o que determina a posição das faixas escuras (intensidade mínima)?

reformulando: para quais ângulos θ haverá interferência completamente destrutiva entre as ondas vindas de todas as partes da fenda?

Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.



Uma possibilidade para obter intensidade zero num ponto y_1 da tela:

Suponha que, ao chegar em y_1 , as ondas provenientes de emissores nos pontos 1 e 2 da fenda, que são separados de $a/2$, interfiram destrutivamente.

$$[\text{Diferença de caminho } \Delta r_{12} = \lambda / 2]$$

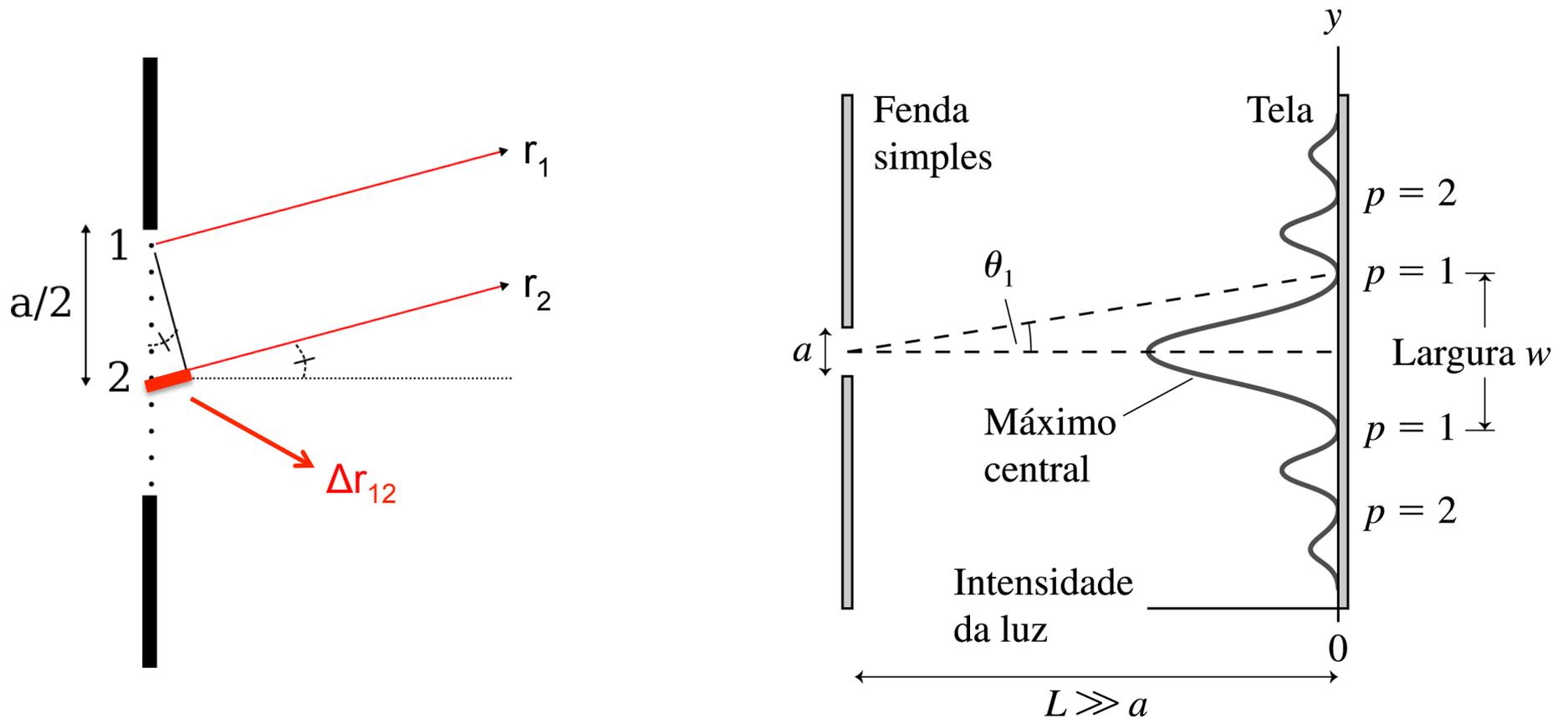
Nesse caso ondas provenientes de **todos** os outros pares de pontos na fenda separados de $a/2$ (como 3 e 4) também vão interferir destrutivamente em y_1

$$(\Delta r_{34} = \Delta r_{12} = \lambda / 2)$$

Como cada ponto na fenda tem um 'par' à distância $a/2$, a intensidade em y_1 será zero!

Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.

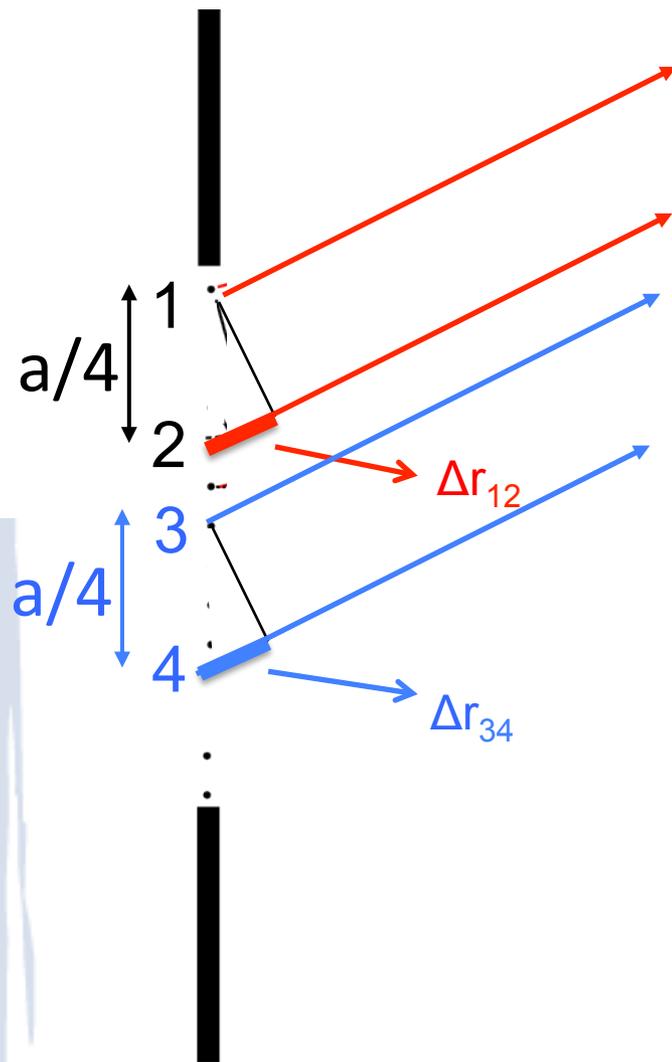


1o mínimo ($p = 1$): $\Delta r_{12} = (a/2) \cdot \text{sen}(\theta_1) = \lambda/2$

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

Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.



Outra possibilidade para obter intensidade zero (em outro ponto y_2) :

Suponha que, ao chegar em y_2 , as ondas provenientes de emissores nos pontos 1 e 2 indicados, que são separados de $a/4$, interfiram destrutivamente.

$$[\text{Diferença de caminho } \Delta r_{12} = \lambda / 2]$$

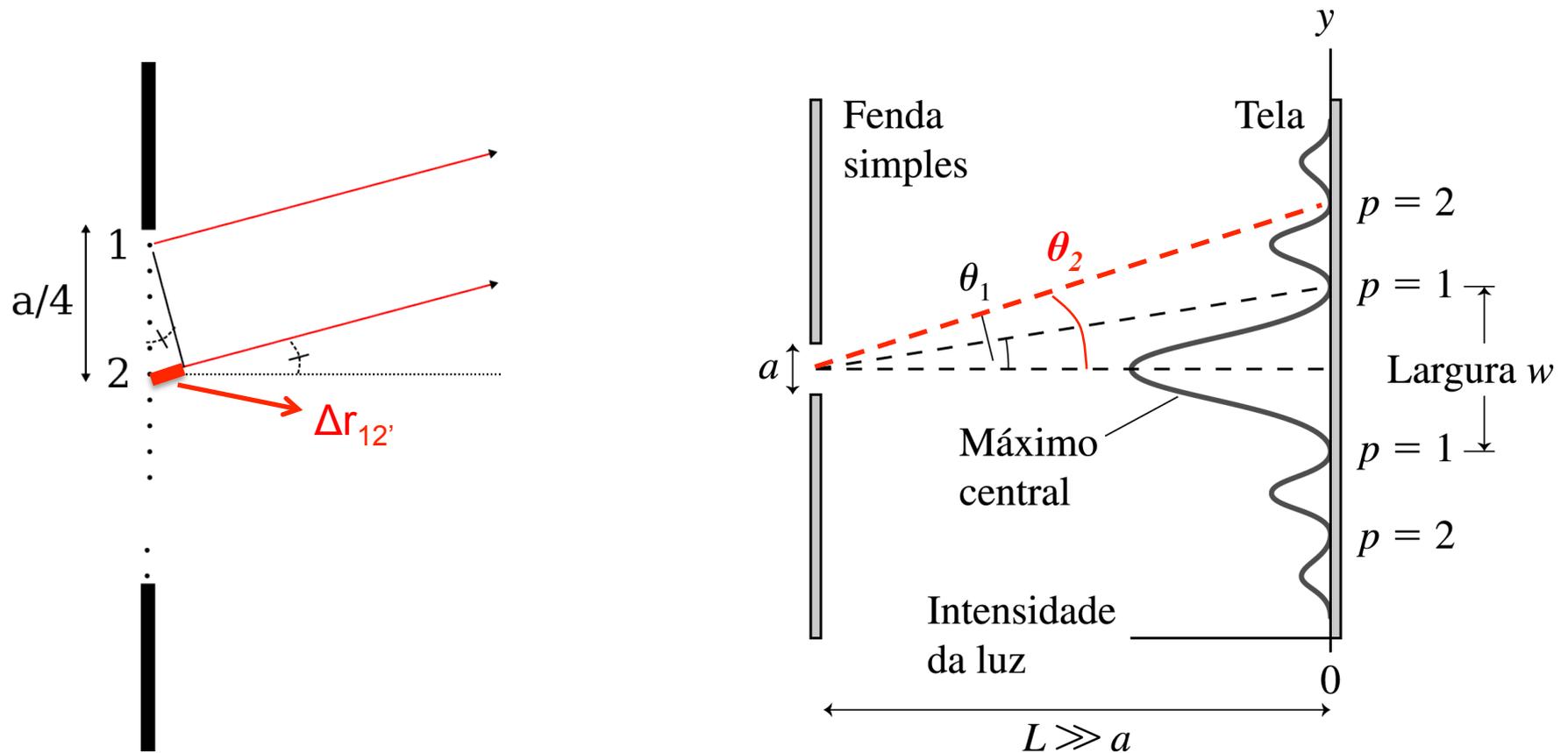
Nesse caso ondas provenientes de **todos** os outros pares de pontos na fenda separados de $a/4$ (como 3 e 4) também vão interferir destrutivamente em y_2

$$(\Delta r_{34} = \Delta r_{12} = \lambda / 2)$$

Como cada ponto na fenda tem um 'par' à distância $a/4$, a intensidade em y_2 será zero!

Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.

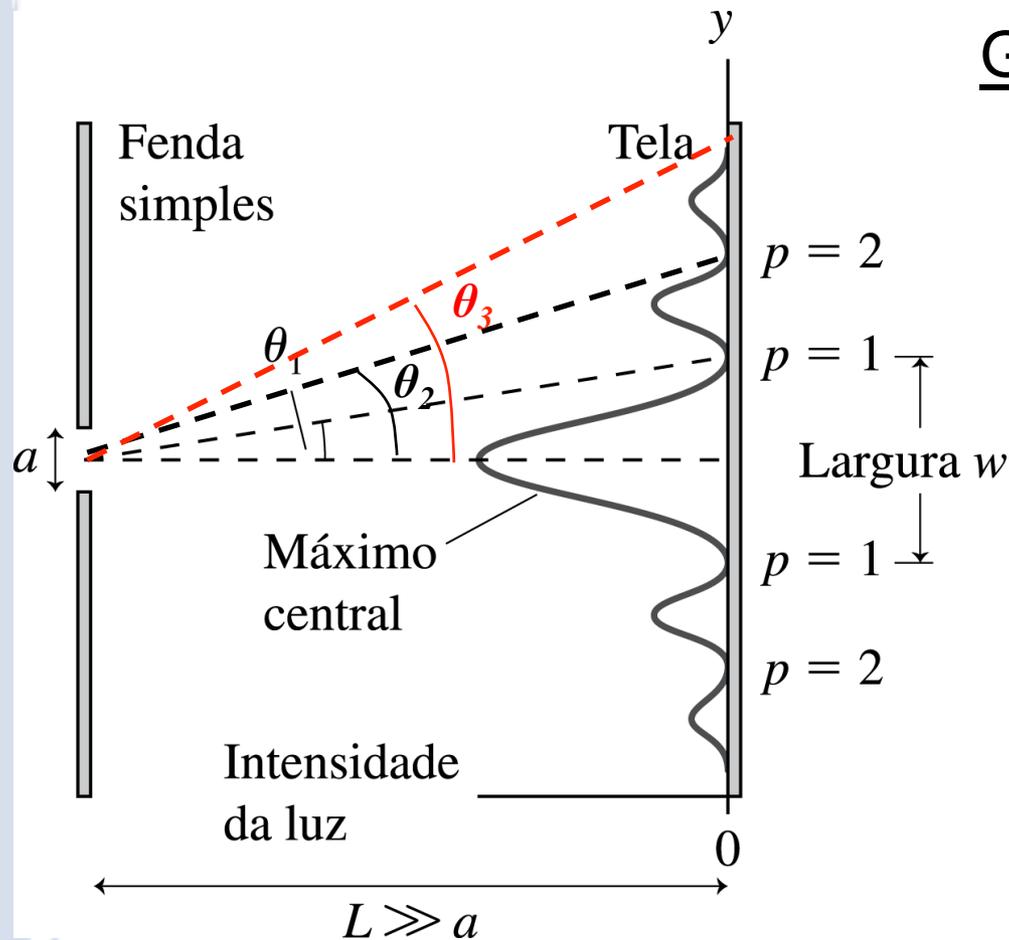


2o mínimo ($p = 2$): $\Delta r_{12} = (a/4) \cdot \text{sen}(\theta_2) = \lambda/2$

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

Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.



Generalizando este procedimento

p -ésimo mínimo:

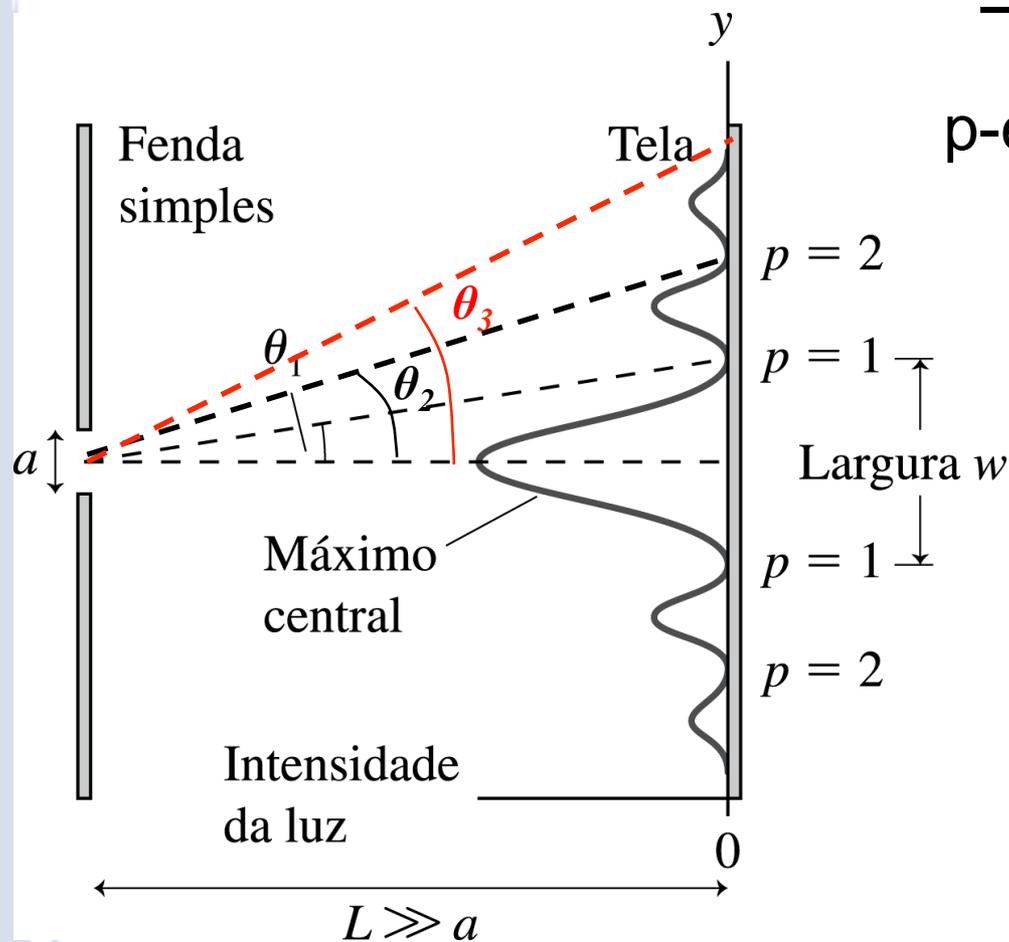
$p=1,2,3\dots$

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

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

Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.



Generalizando este procedimento

p -ésimo mínimo:

$p=1,2,3\dots$

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

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

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

Obs: as posições dos **máximos** seguem uma regra mais complicada (não ficam na posição média entre os mínimos!)

Não vamos analisar aqui...

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 à metade do tamanho original
- C) 2 - Ele dobrará
- D) 4 - Ele quadruplicará

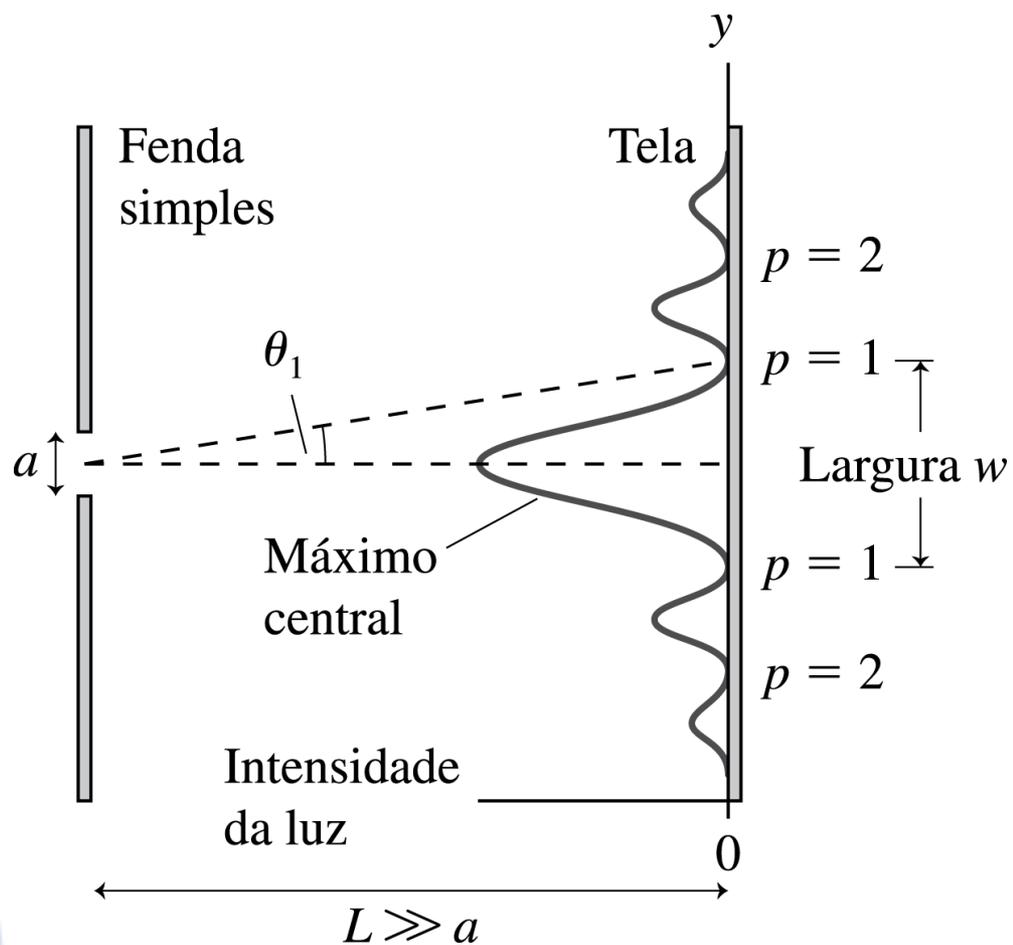
Teste conceitual

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 à metade do tamanho original**
- C) 2 - Ele dobrará
- D) 4 - Ele quadruplicará

Difração em Fenda Simples

A Largura do Padrão de Difração



Se $\theta_1 \ll 1$:

$$y_1 = \lambda L / a$$

$$\text{Largura } w = 2 L \lambda / a$$

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

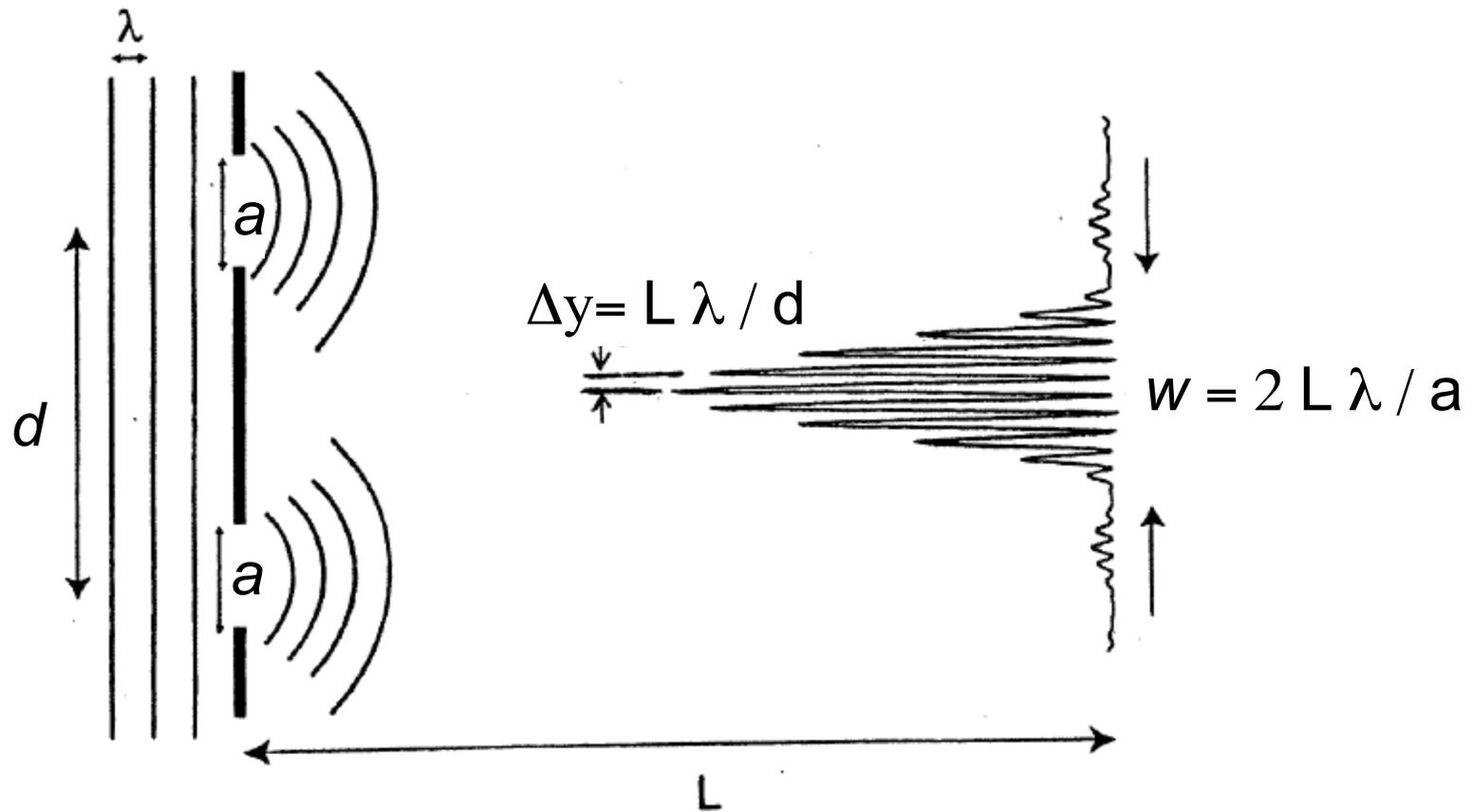
Em um experimento de difração em fenda simples, a largura da fenda através da qual a luz passa é reduzida. O que acontece com a luz transmitida?

- 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

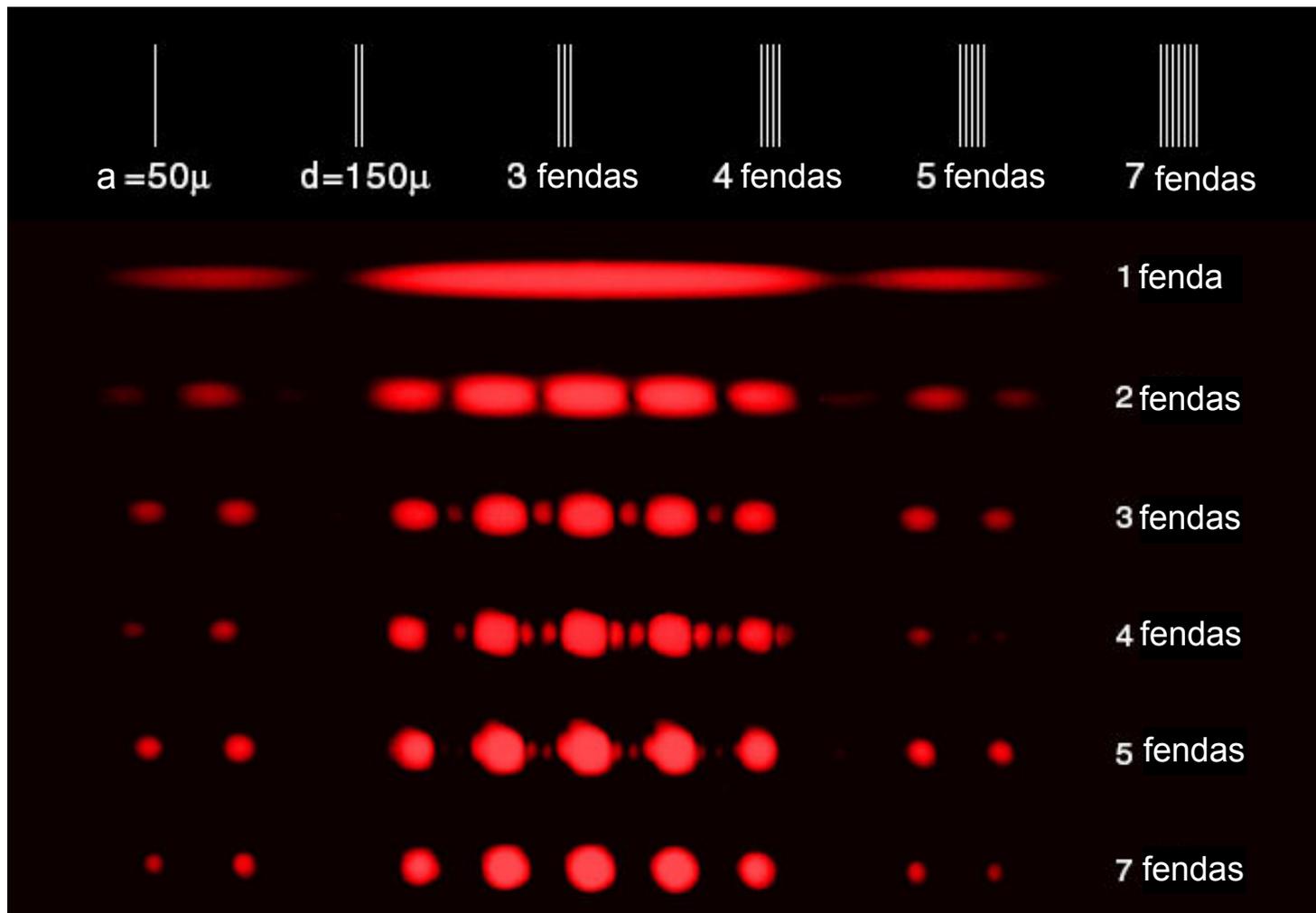
Difração e Interferência: dois fenômenos complementares



Em geral $a < d$, então há muitos picos de interferência dentro do máx. central de difração

→ A difração 'modula' os picos de interferência de duas fendas, fazendo com que não sejam uniformes em brilho

Difração e Interferência: dois fenômenos complementares

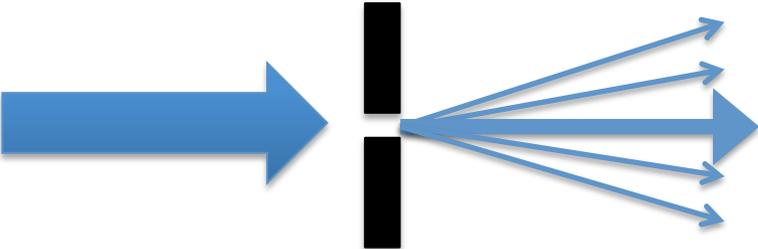


Difração ao redor de obstáculos: princípio de Babinet

Onda sem obstáculos   sem difração!

= superposição de

=

Onda passando por fenda   com difração!

+

+

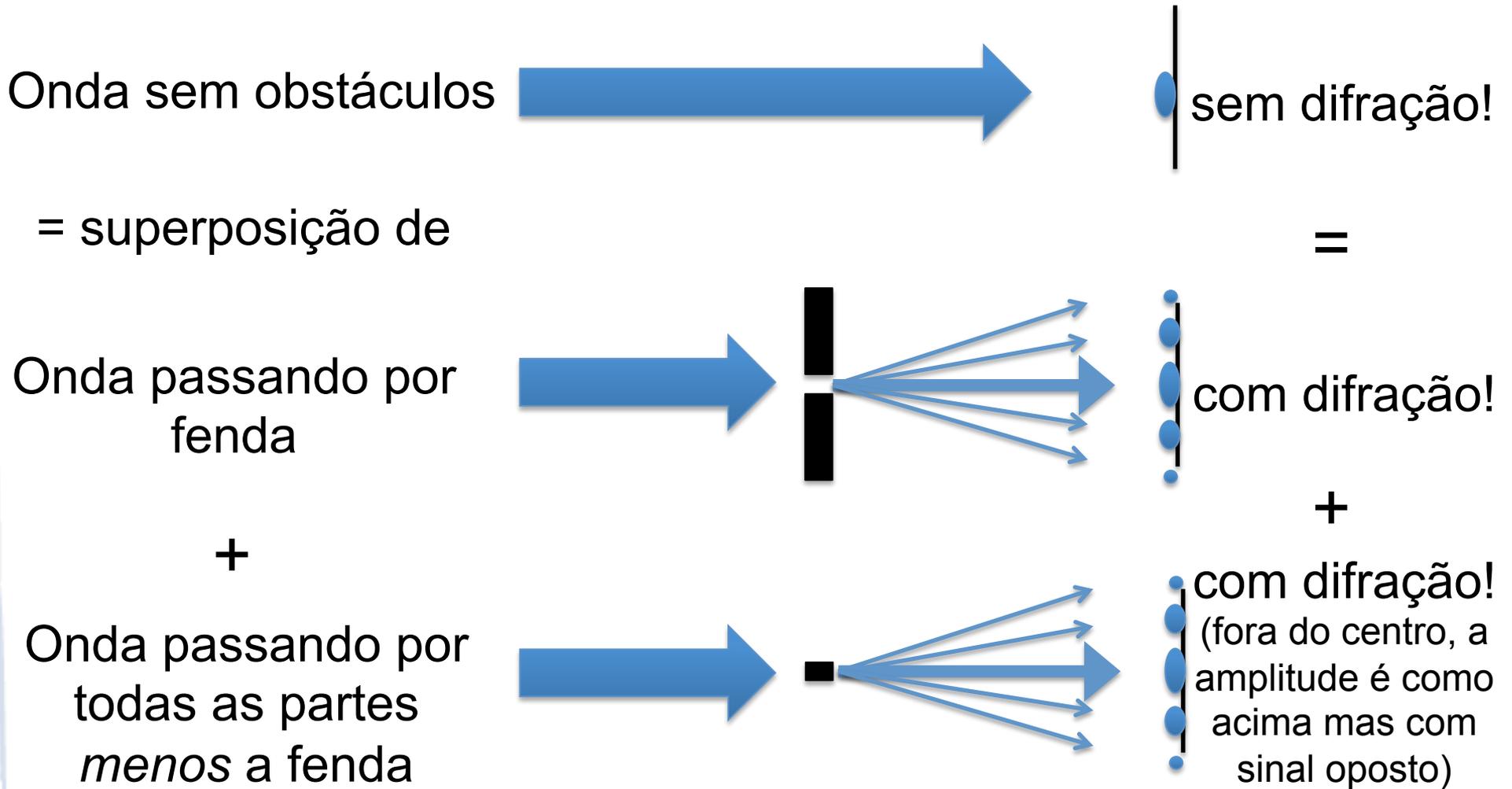
Onda passando por todas as partes *menos* a fenda



??????????

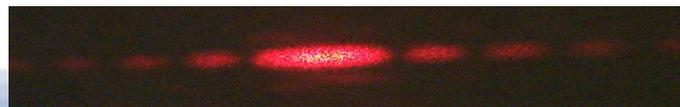
Para reproduzir a onda sem difração, esta onda aqui tem de cancelar exatamente o padrão de difração acima (fora do centro)!

Difração ao redor de obstáculos: princípio de Babinet



Moral: uma onda incidente sobre um obstáculo produz um padrão de difração **idêntico** ao produzido pela sua 'fenda complementar'

Ex: Difração por um fio de cabelo:



Obs: Difração em orifício circular

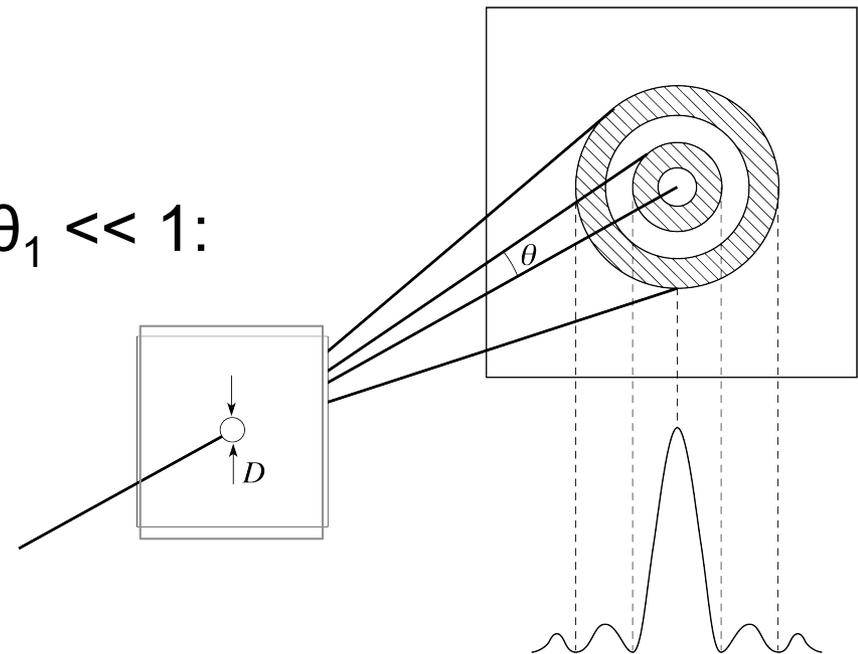
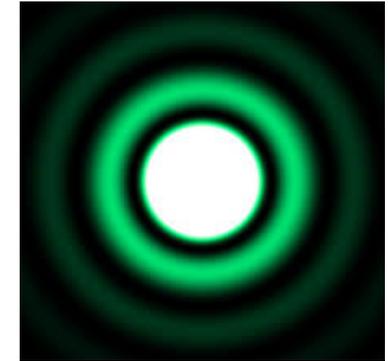
Nesse caso a conta é um pouco mais complicada e não faremos aqui. Pode-se mostrar que, para um orifício de diâmetro D , o padrão de difração é formado por círculos concêntricos.

O primeiro mínimo ocorre para o ângulo onde

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

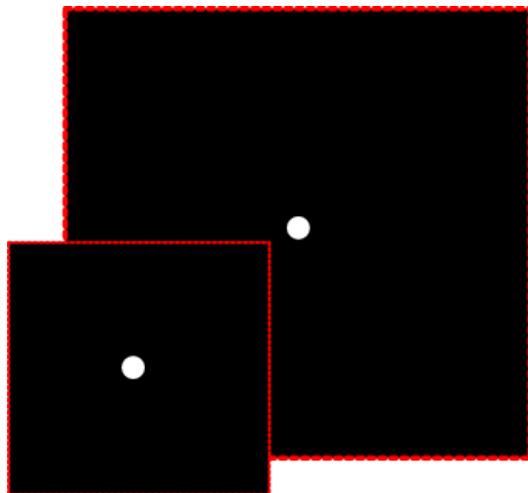
Diâmetro do máximo central se $\theta_1 \ll 1$:

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

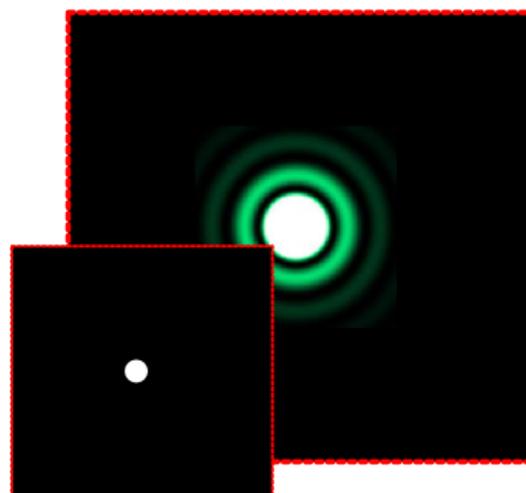


Quando a luz passa por um orifício ou fenda, sempre se observa a difração? → **NÃO**

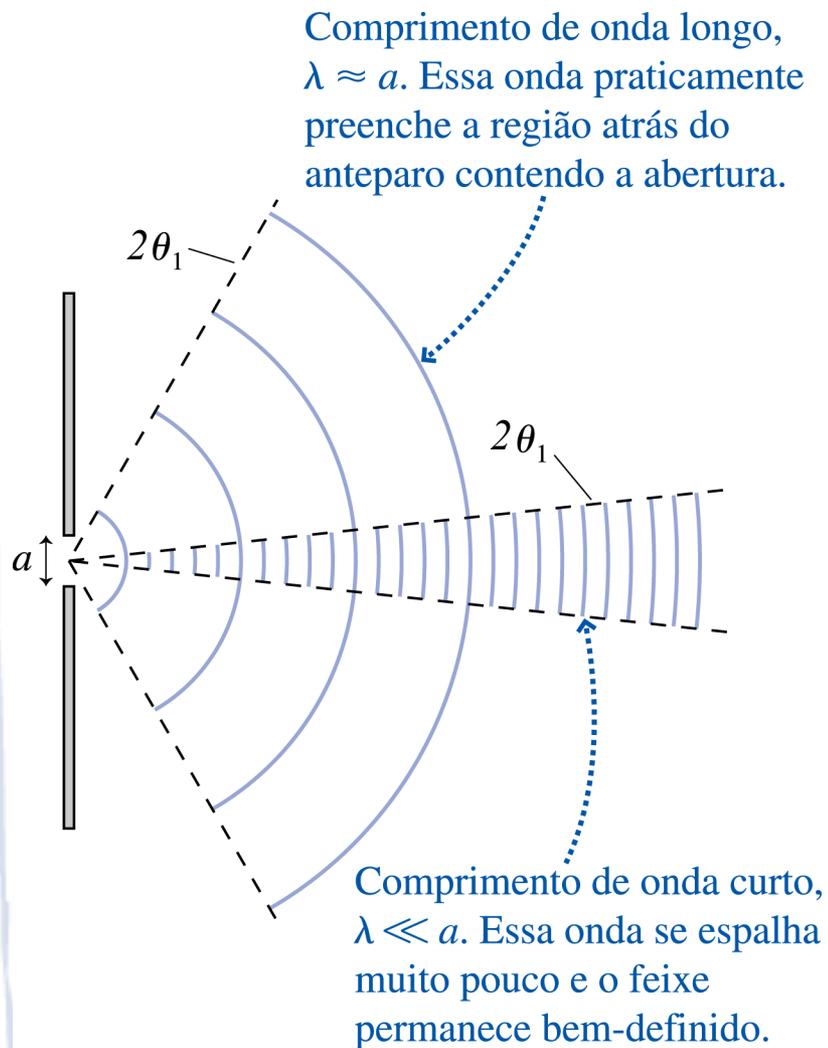
Ótica Geométrica



Ótica Ondulatória



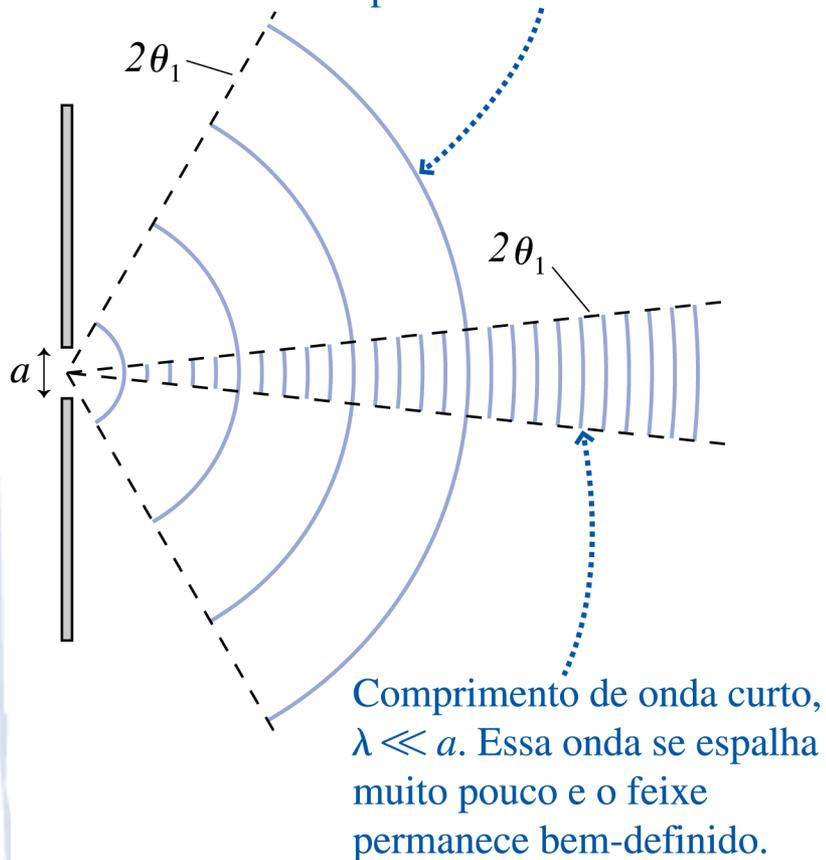
Quando a luz passa por um orifício ou fenda, sempre se observa a difração? → **NÃO** É preciso que a abertura seja nem muito grande, nem muito pequena comparado com o comprimento de onda



- Para fendas muito largas ($\lambda \ll a$), o padrão de difração fica muito estreito (θ_1 pequeno), e acaba 'escondido' pela imagem geométrica da fenda
- Ainda, como os máximos e mínimos de difração ficam estreitos, qualquer pequena imperfeição na fonte já 'borra' o padrão.

Quando a luz passa por um orifício ou fenda, sempre se observa a difração? → NÃO É preciso que a abertura seja nem muito grande, nem muito pequena comparado com o comprimento de onda

Comprimento de onda longo, $\lambda \approx a$. Essa onda praticamente preenche a região atrás do anteparo contendo a abertura.



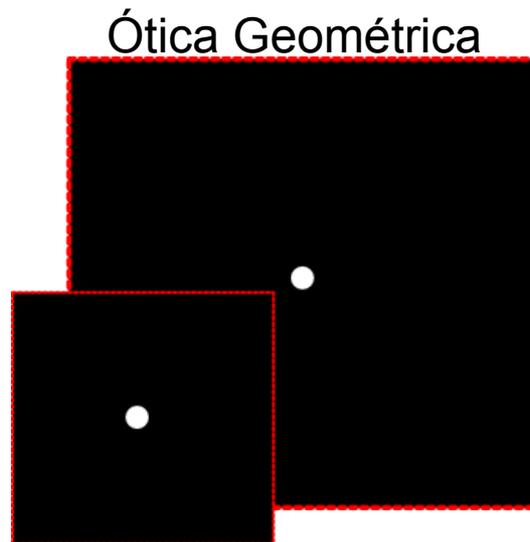
Comprimento de onda curto, $\lambda \ll a$. Essa onda se espalha muito pouco e o feixe permanece bem-definido.

- Para fendas muito estreitas ($a \lesssim \lambda$): Lembrando que $\text{sen}(\theta_1) = \lambda / a$, se $a \rightarrow \lambda$ então $\theta_1 \rightarrow \pi/2$, e a partir daí nossa análise não é mais válida.
- Nesse caso pode-se mostrar que as ondas simplesmente deixam de passar pela abertura (a maior parte da energia é refletida!).
- Ex: furos na porta do forno de microondas deixam passar luz visível ($\lambda_{\text{visível}} \ll \text{furo}$), mas não as microondas ($\lambda_{\text{micro}} > \text{furo}$)...

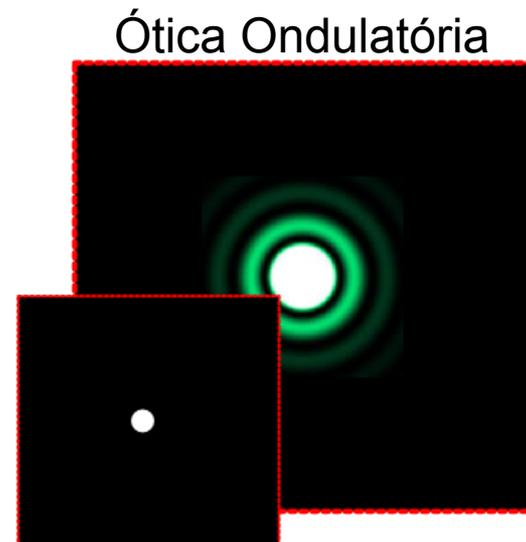
Regra prática simples:

Se a largura w do máximo de difração for:

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



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



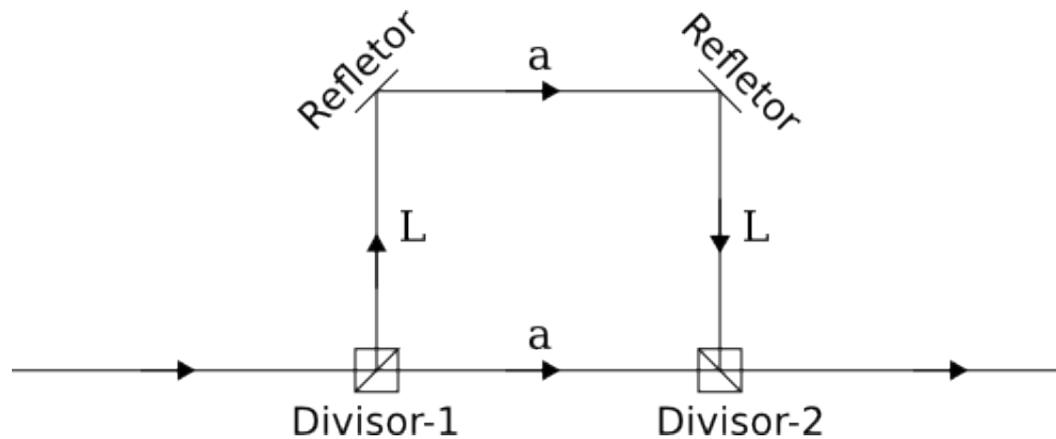
Ex: para luz visível, de comp. de onda $\sim 500\text{nm}$ e $L \sim 1\text{m}$:

$$w = 2,44 \lambda L/D < D \rightarrow D > 1.1\text{mm}$$

(p/ luz visível atravessando orifícios da ordem desse tamanho, ou maiores, já não é necessário utilizar ótica ondulatória)

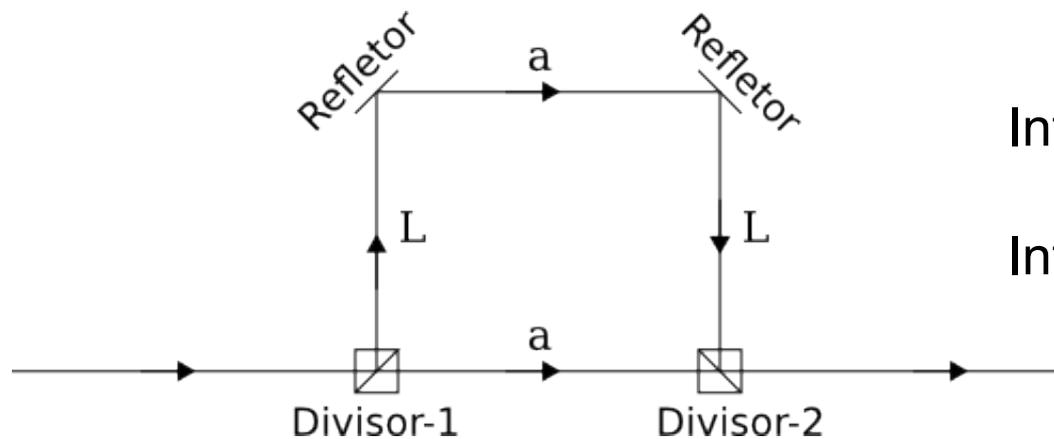
Interferômetros

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



Interferômetros

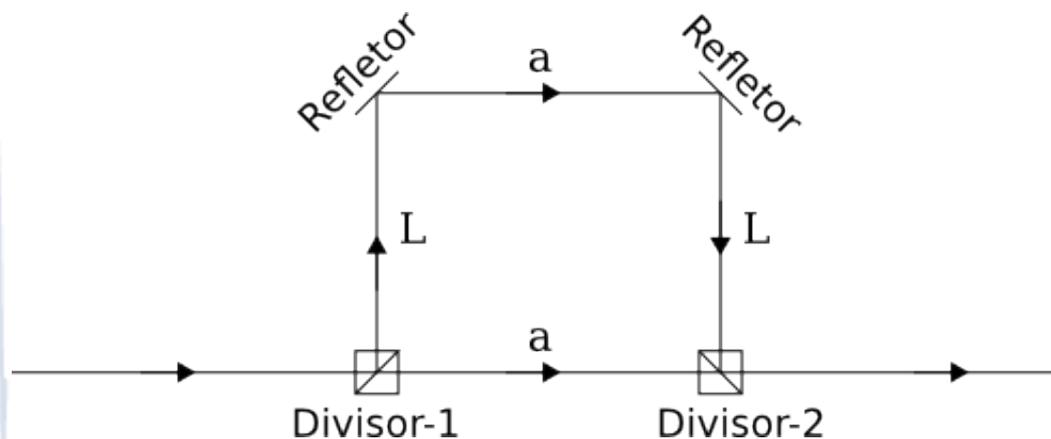
Dispositivos utilizados para medidas ultraprecisas e para o controle do fluxo de luz



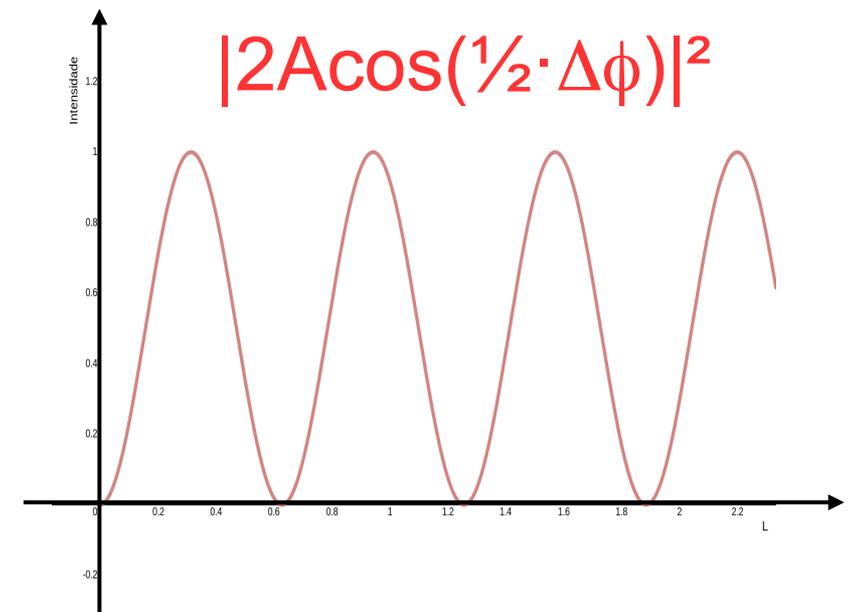
Int. Construtiva: $2L = m\lambda$
Int. Destrutiva: $2L = (m + \frac{1}{2})\lambda$
($m = 0, 1, 2, \dots$)

Interferômetros

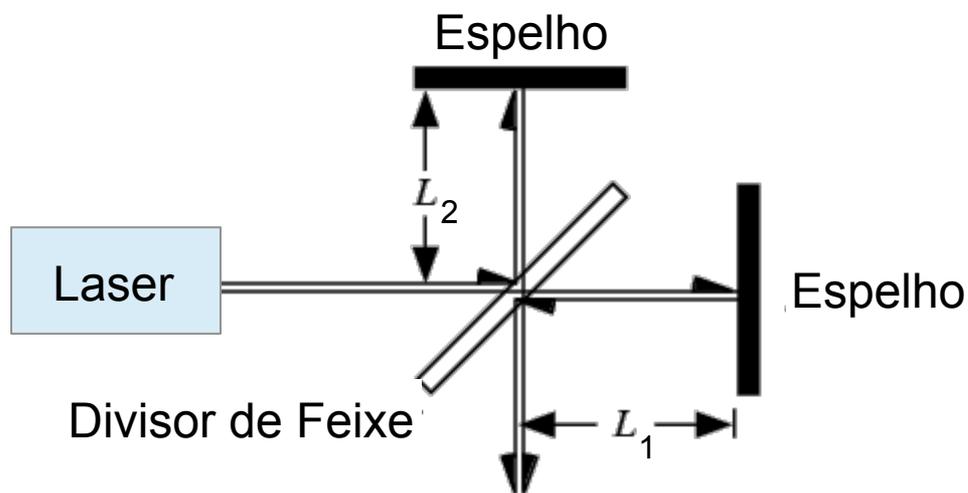
Dispositivos utilizados para medidas ultraprecisas e para o controle do fluxo de luz



padrão de intensidade na saída

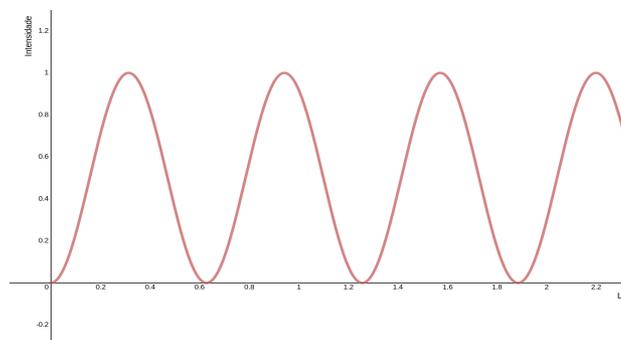


Interferômetro de Michelson



Algumas aplicações

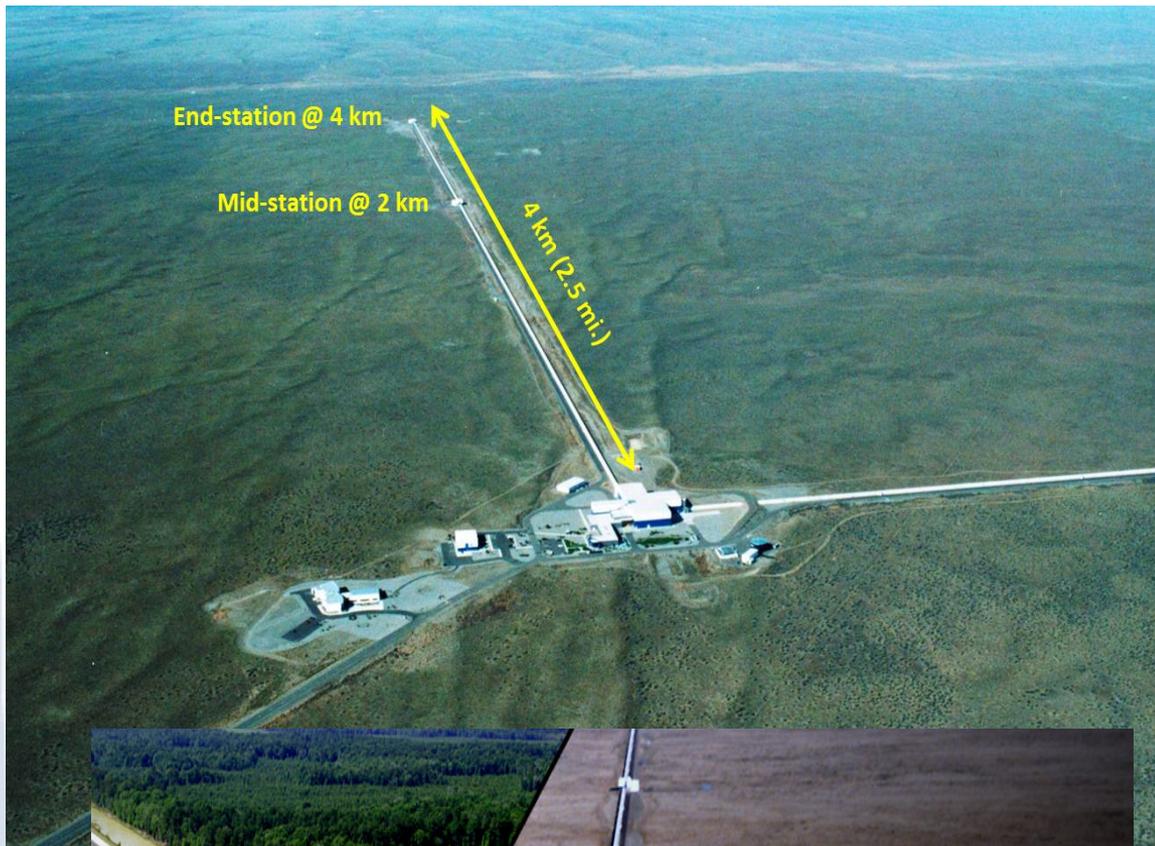
- Medição ultra-precisa de grandezas físicas como frequências, índices de refração etc
- Testes de física fundamental (teoria da relatividade)
- Detecção de sinais extremamente fracos mas que causem uma pequena diferença nos caminhos percorridos (ex: ondas gravitacionais - LIGO)



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

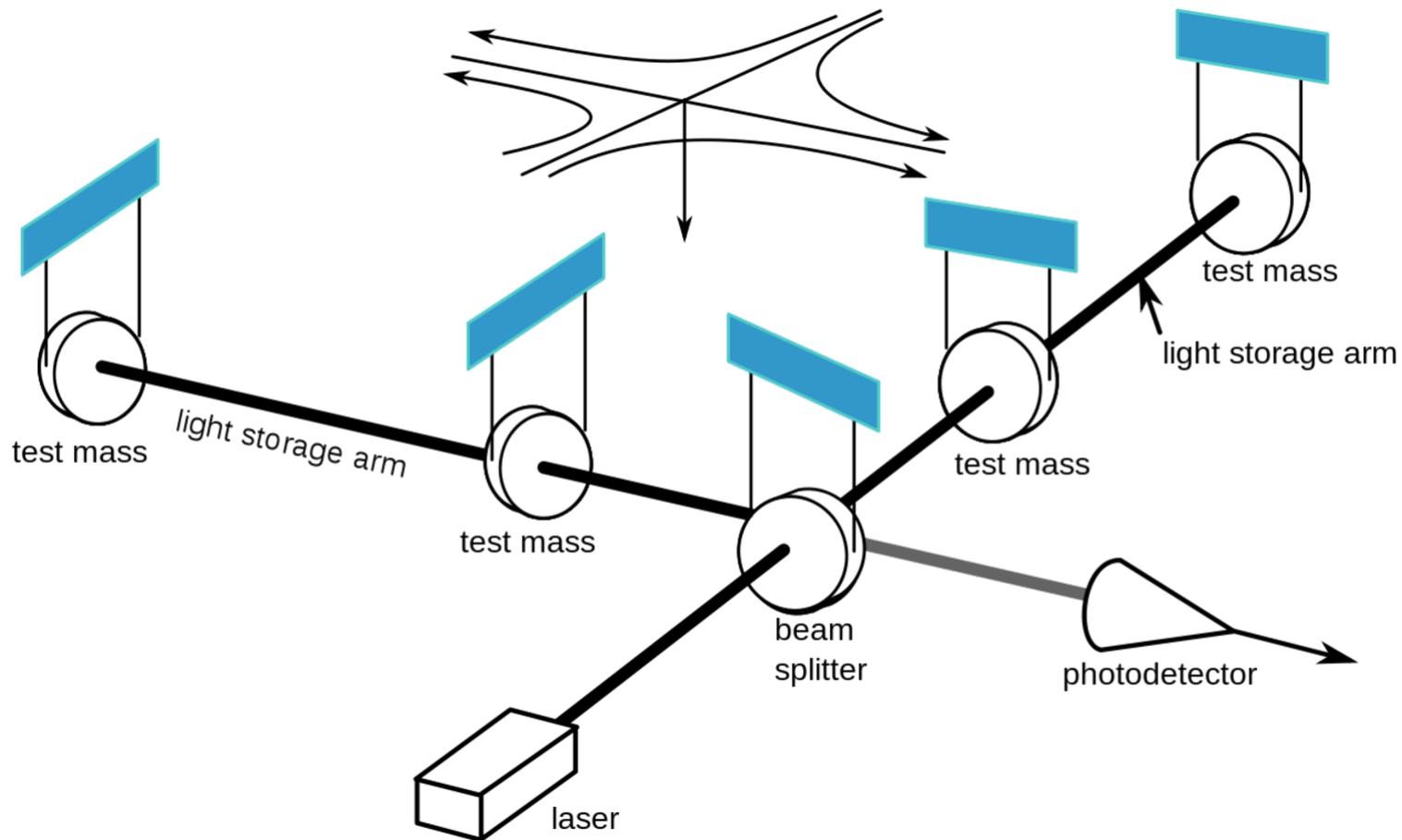
$$\Delta\Phi = 4\pi(L_2 - L_1) / \lambda$$

LIGO: o maior e mais sensível interferômetro do mundo



- projetado para detectar *ondas gravitacionais* (ondas no espaço-tempo)
- Interferômetros de Michelson com 'braços' de 4km (são 2, localizados a 3000km um do outro, nos EUA)
- Capaz de medir um deslocamento relativo entre os braços de apenas 1/1000 do raio de 1 próton (ou $\sim 10^{-18}\text{m}$) !
- Em 2015 realizou a 1ª detecção de ondas gravitacionais na história, identificadas como tendo sido produzidas pela colisão de dois buracos negros

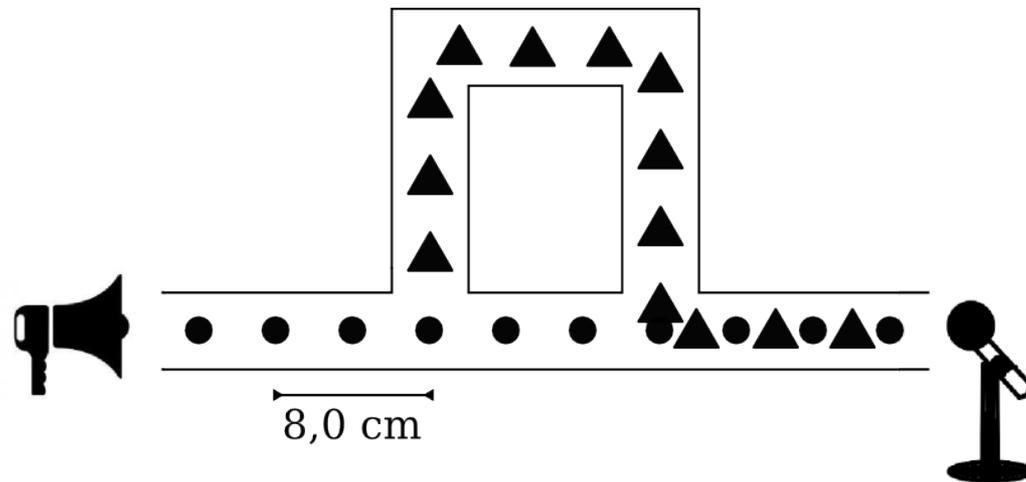
LIGO: o maior e mais sensível interferômetro do mundo



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 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 $\frac{1}{4}$.

Teste Conceitual

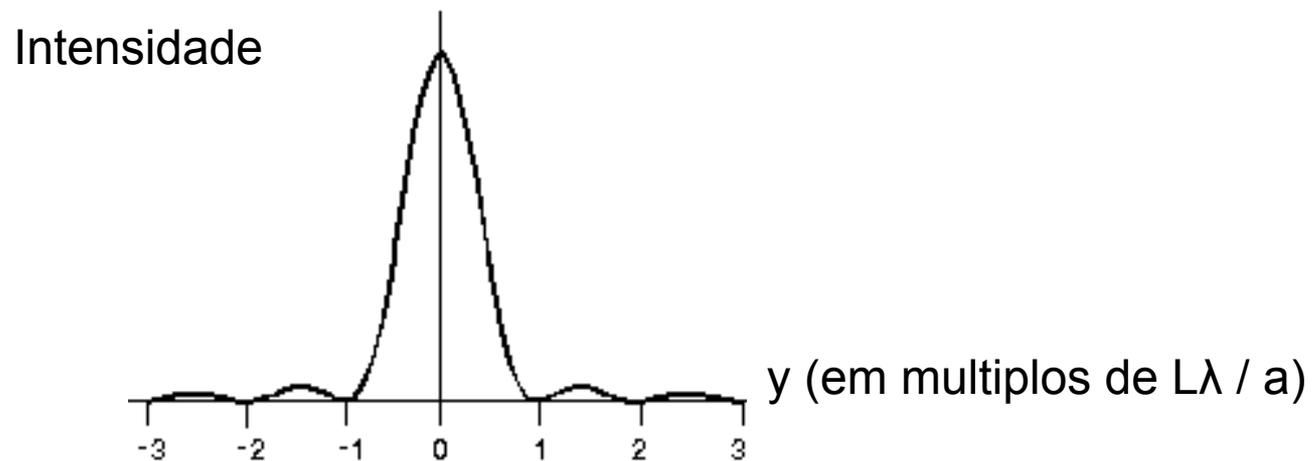
Um Interferômetro de Michelson é ajustado para mostrar interferência construtiva quando a luz tem comprimento de onda λ . Se o comprimento de onda for alterado para $\lambda/2$,

- 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 $\frac{1}{4}$.

Teste Conceitual

Luz com comprimento de onda λ 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

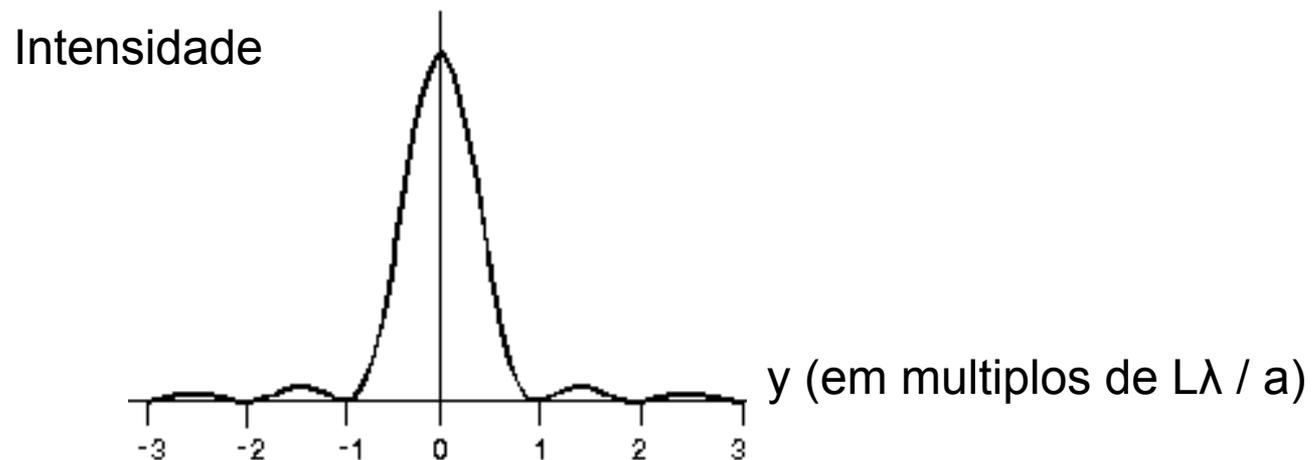


Teste Conceitual

Luz com comprimento de onda λ 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

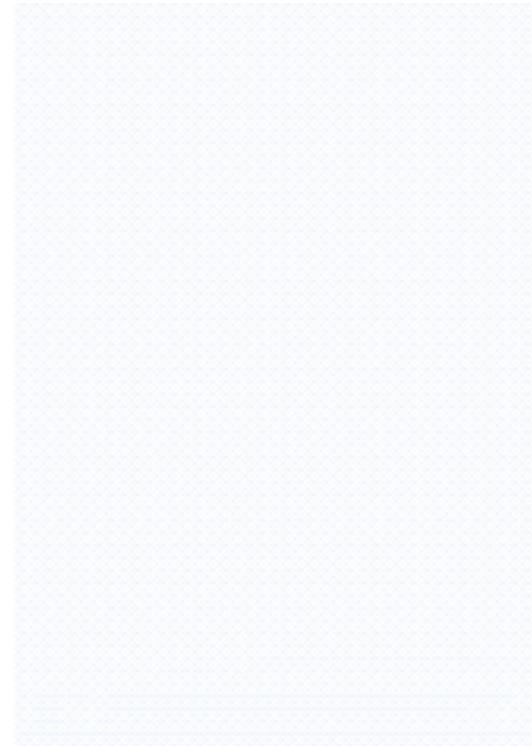
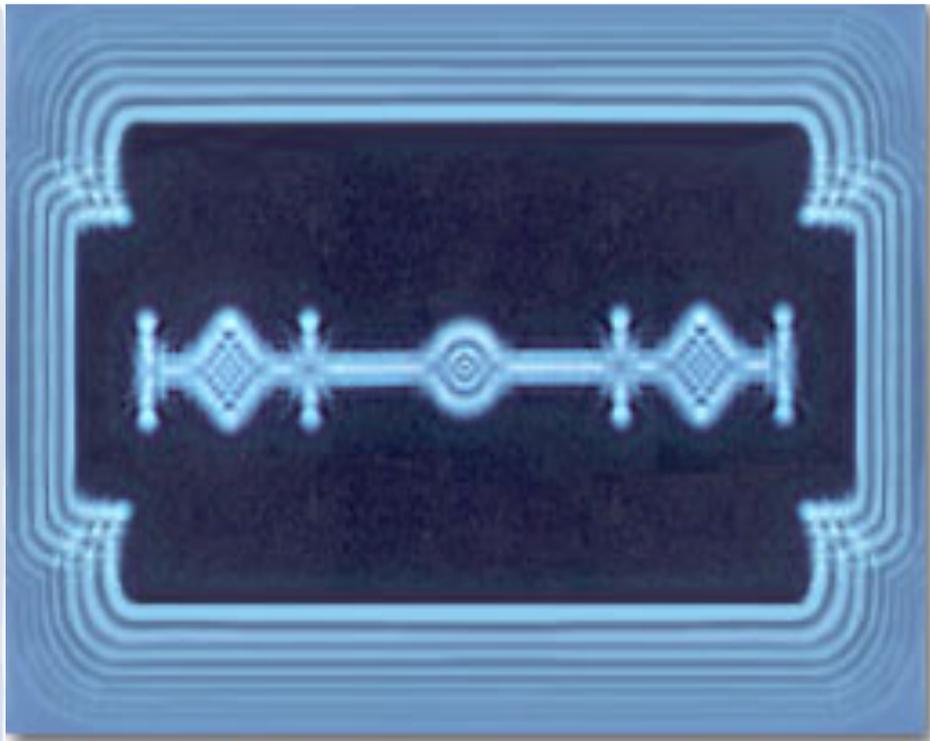
Não confundir!
Expressões semelhantes para os pontos de **máximo** da interferência de 2 fendas e de **mínimo** de difração



Difração

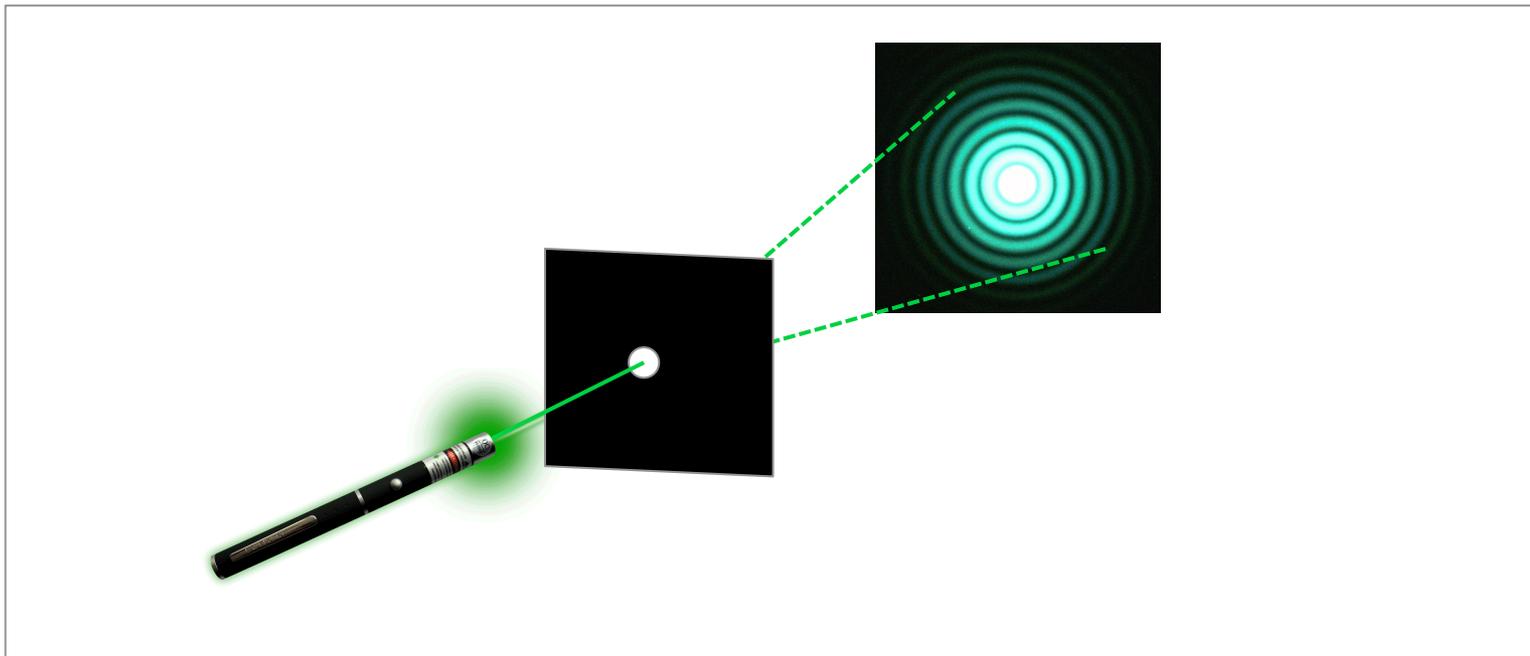
Outro aspecto complementar: a difração causa franjas de interferência ao redor de um objeto com bordas muito nítidas

Ex: Difração de luz ao redor de uma navalha



Difração da luz

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



Difração de um laser por uma abertura circular

Teste Conceitual

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.

