

Física 3

Cap. 22: Óptica Ondulatória

Difração e Interferência de ondas

Teste Conceitual 22.1

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.

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

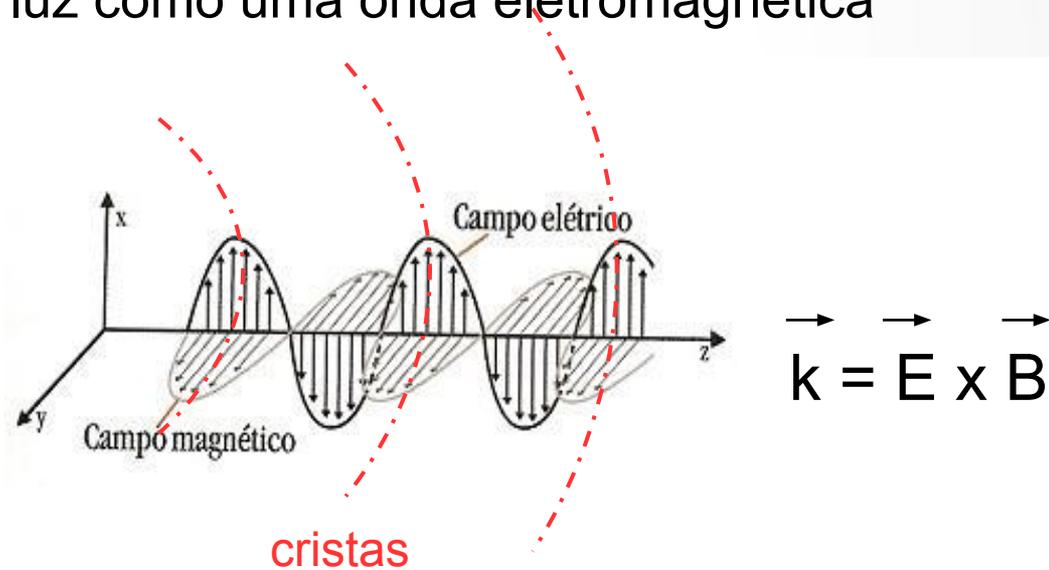


Modelos para a luz

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



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

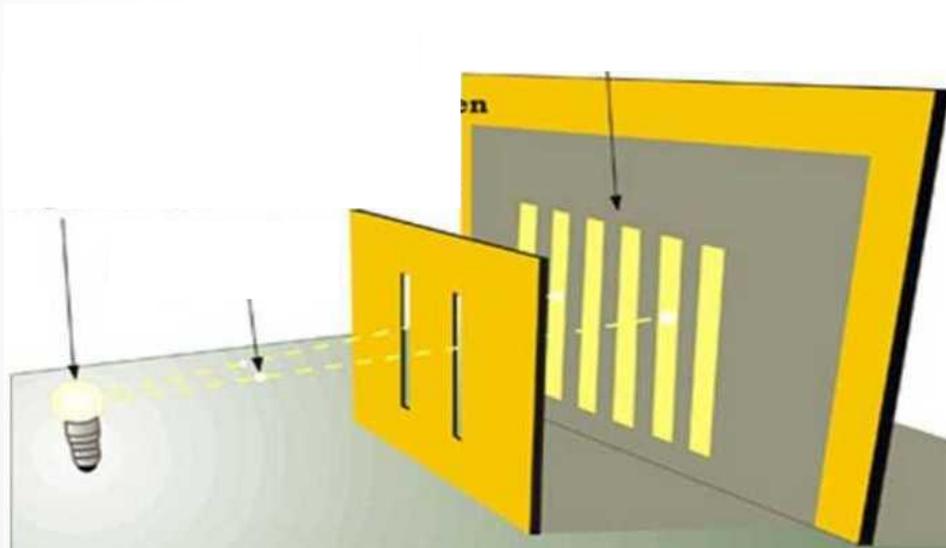
Mesmo assim, os modelos clássicos continuam extremamente úteis dentro dos seus respectivos domínios de validade

Ótica Ondulatória

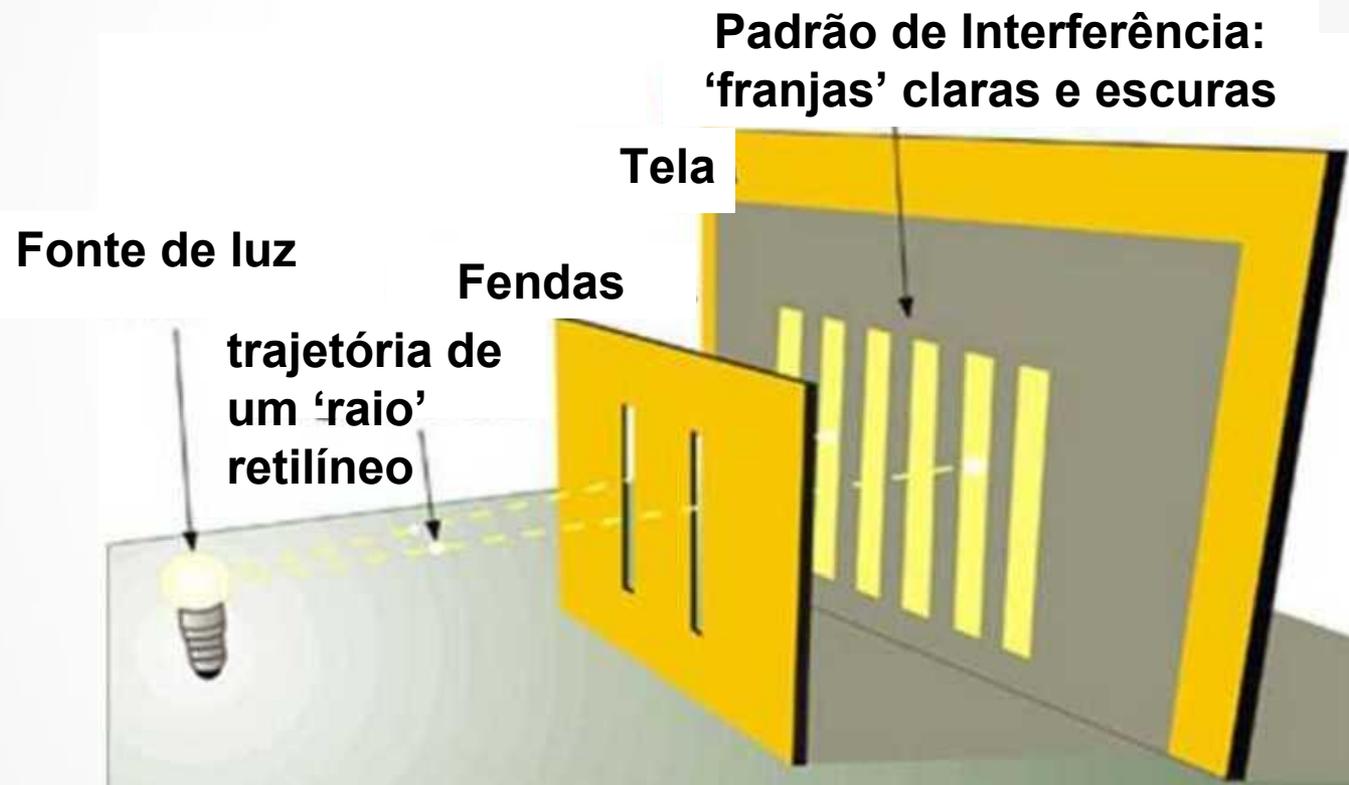
1801: Thomas Young realiza um experimento que evidencia a natureza ondulatória da luz

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

Padrão de Interferência

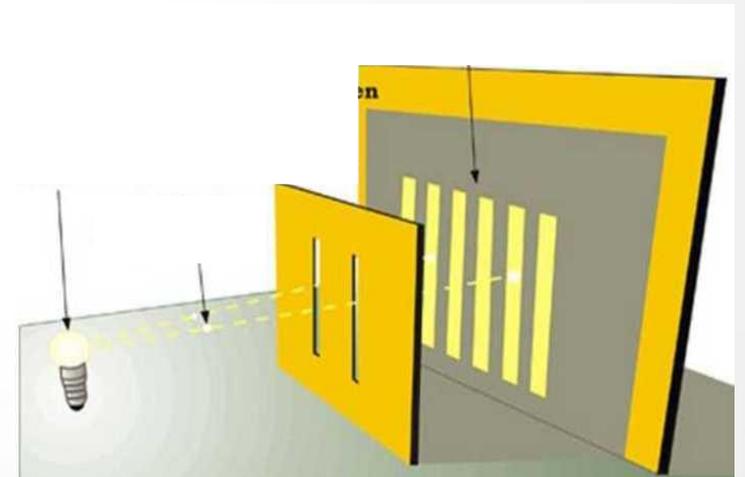
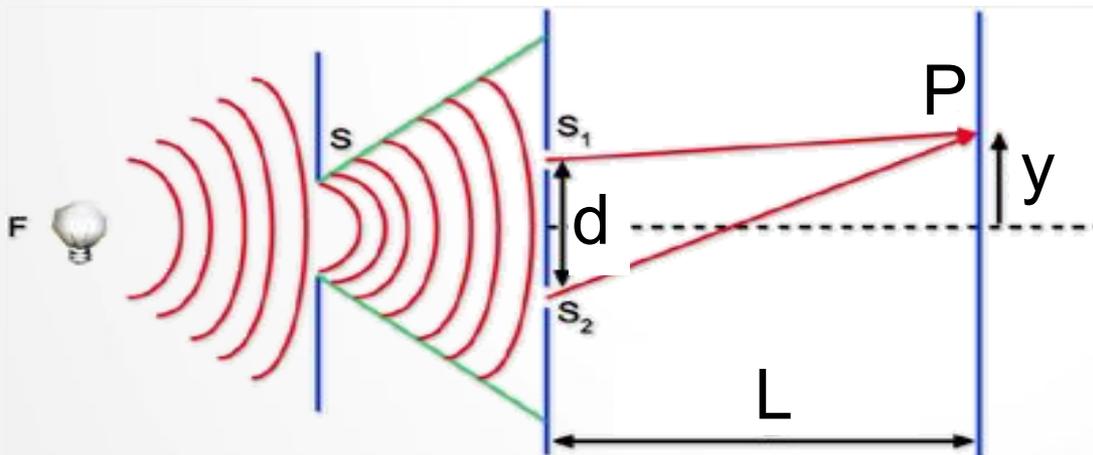


Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young



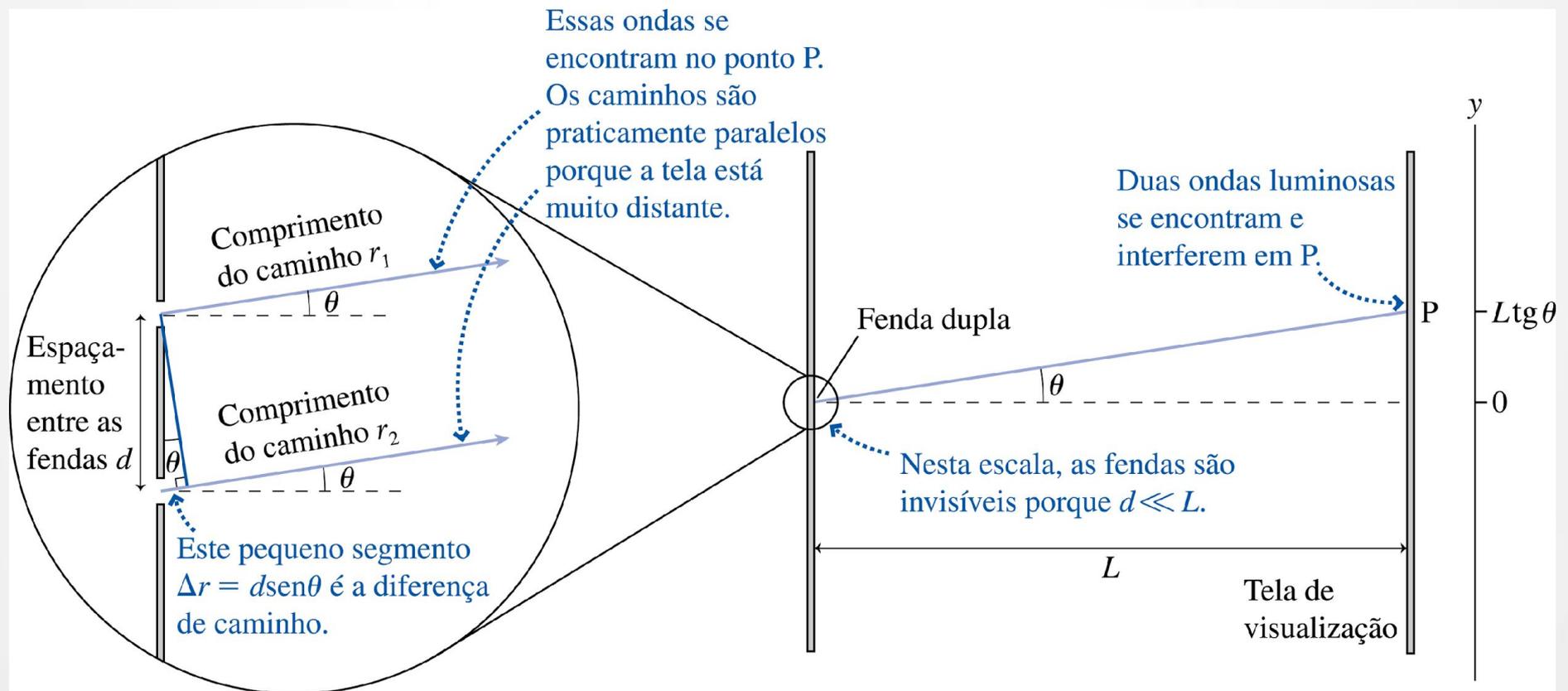
Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

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

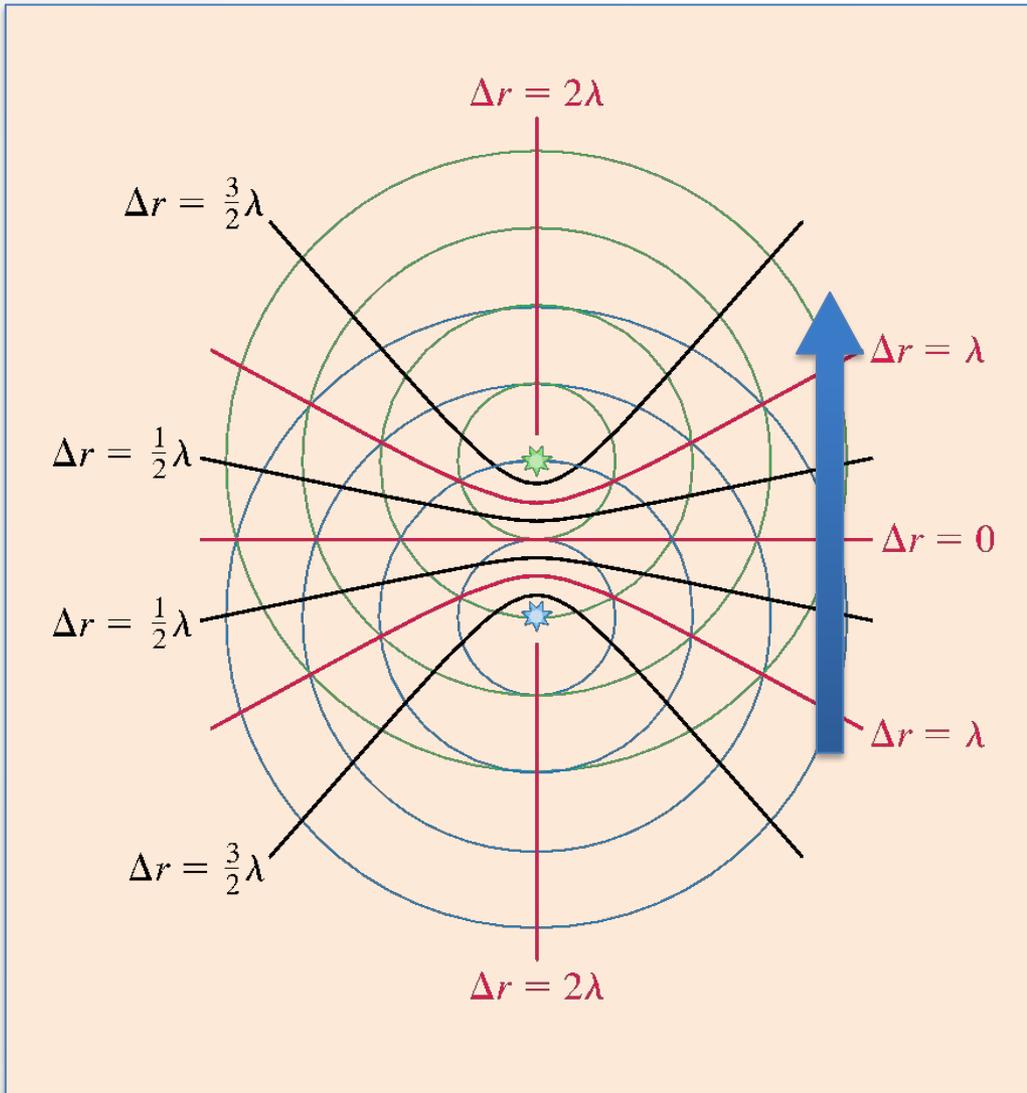


Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

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



Recordando: Interferência entre ondas em 2D

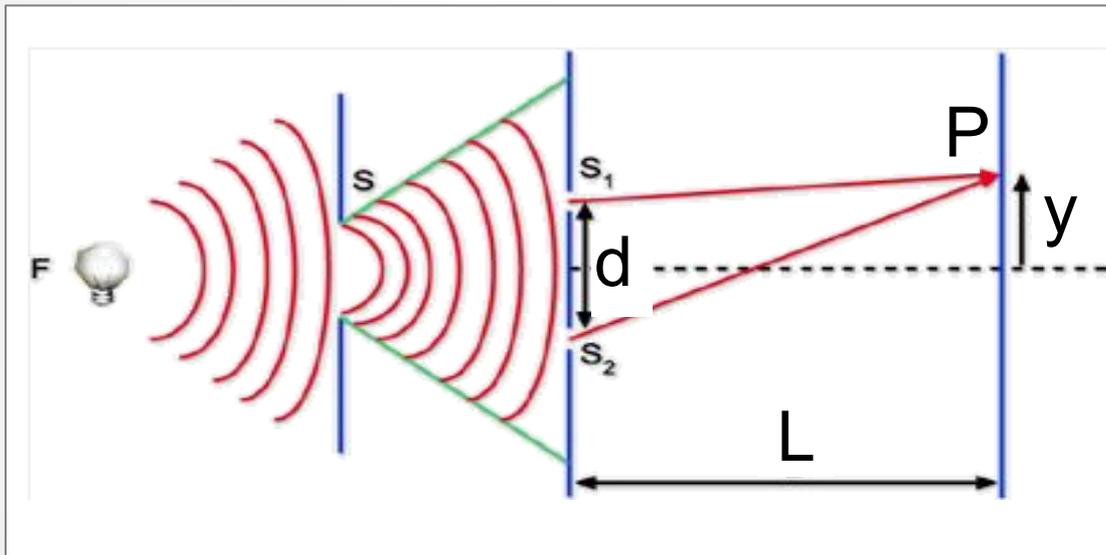


Assumindo que se tratam de ondas sonoras, o que uma pessoa que caminha com velocidade cte. ao longo da reta indicada irá perceber?

- 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

Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young

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



Interferência construtiva

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



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

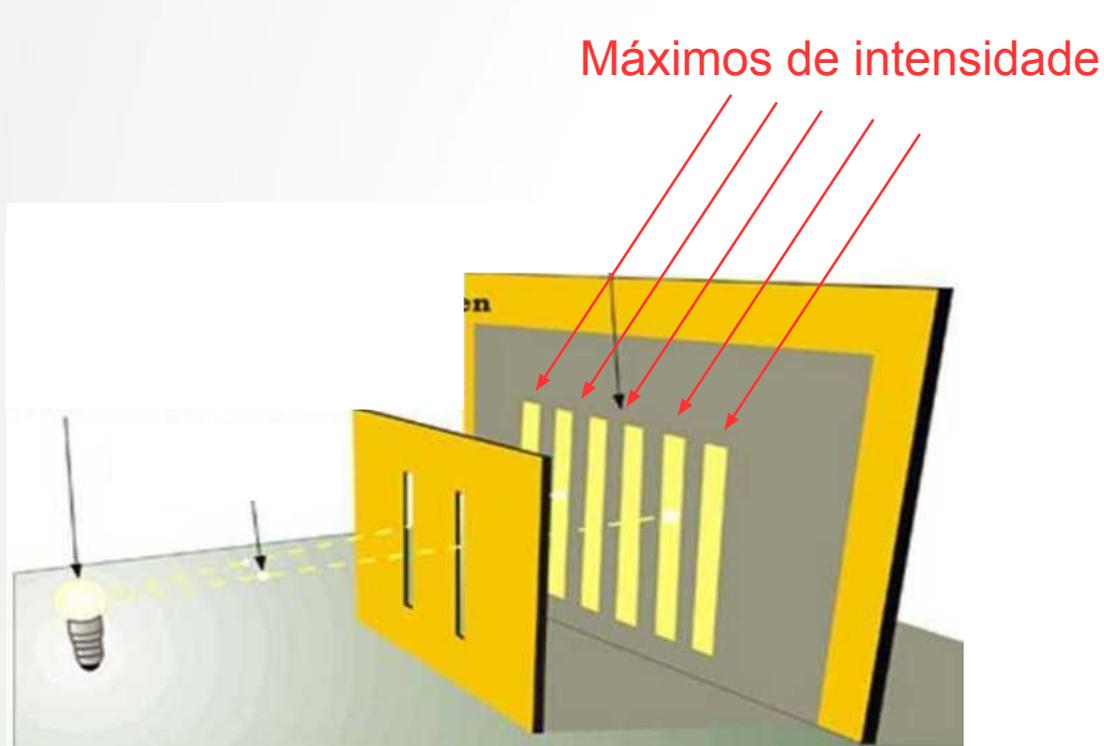
Interferência destrutiva

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



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

Interferência: O Experimento da Fenda Dupla de Young



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

Interferência construtiva

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



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

Interferência destrutiva

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



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

Teste Conceitual 22.2

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?

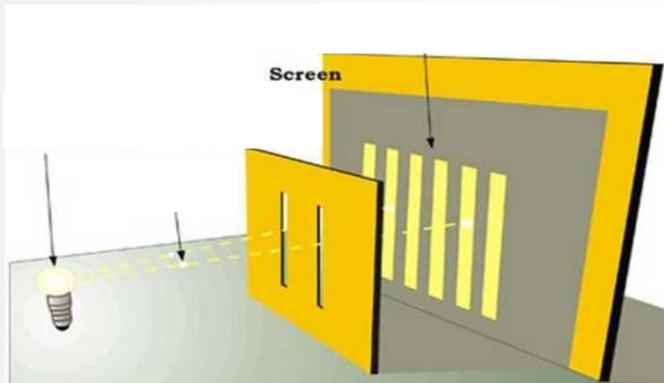
- A. Cerca de 0.1 mm
- B. Cerca de 1 mm
- C. Cerca de 1 cm
- D. Cerca de 10 cm

Dado: separação entre as fendas: cerca de 0.25 mm

(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

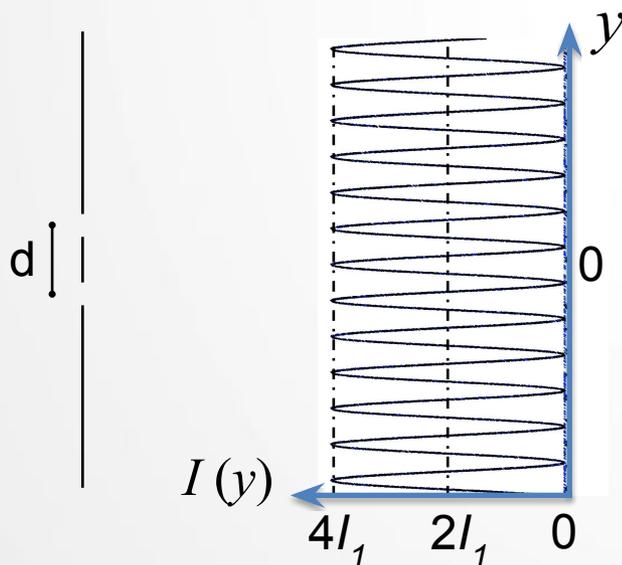
$$D(y, t) = 2A \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \text{sen}\left(k\bar{r} - \omega t + \bar{\phi}\right)$$

onde

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



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



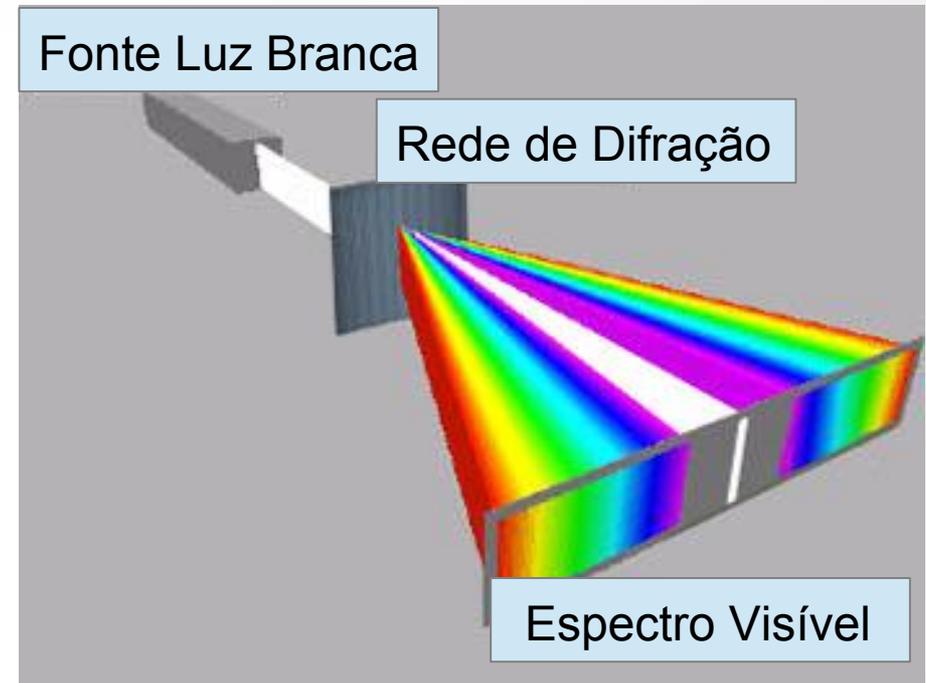
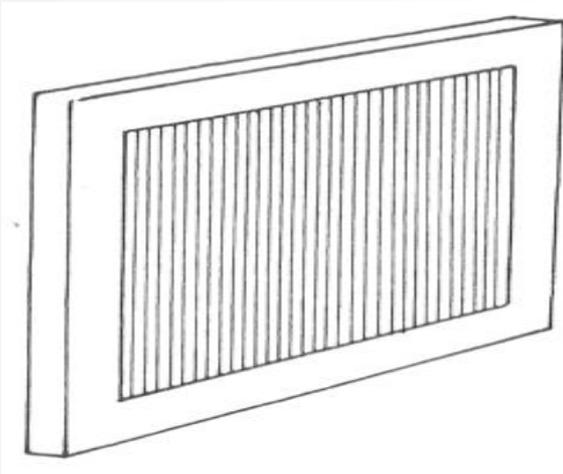
Teste Conceitual 22.3

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.

Interferência de múltiplas fendas: “Redes de Difração”

Dispositivo óptico formado por muitas fendas paralelas

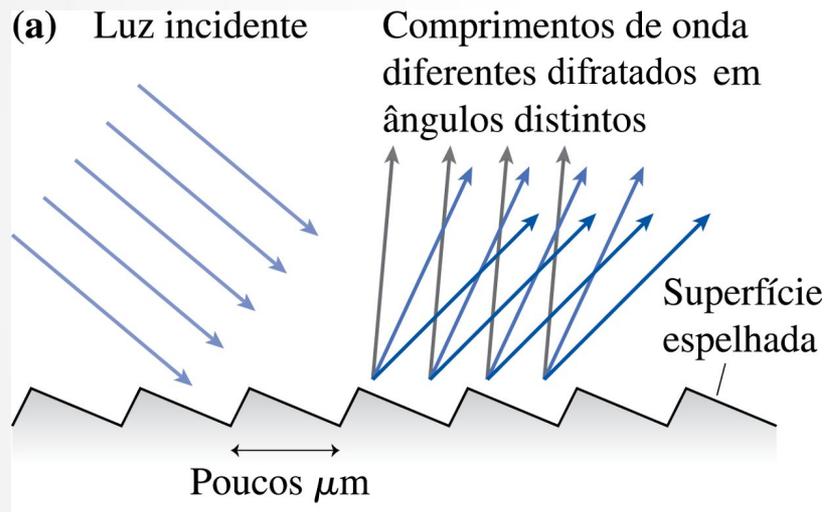


Efeito: separar a luz de acordo com o comprimento de onda (cor).

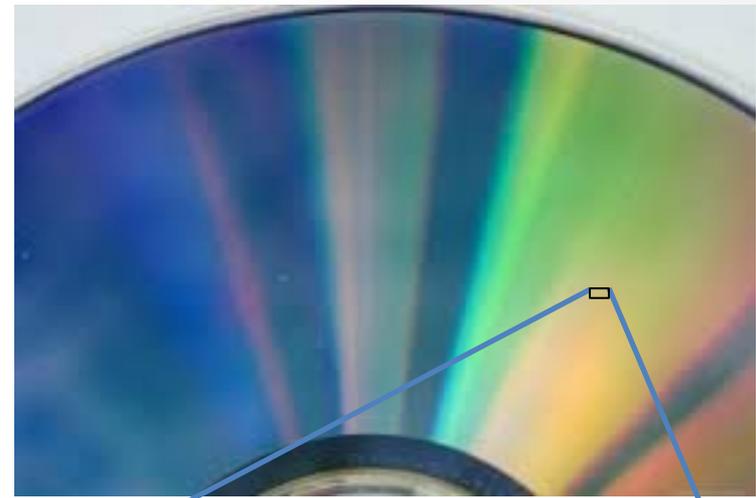
Aplicação: ESPECTROSCOPIA: caracterizar fontes de luz, identificando quais os comprimentos de onda presentes.

Interferência de múltiplas fendas: “Redes de Difração”

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

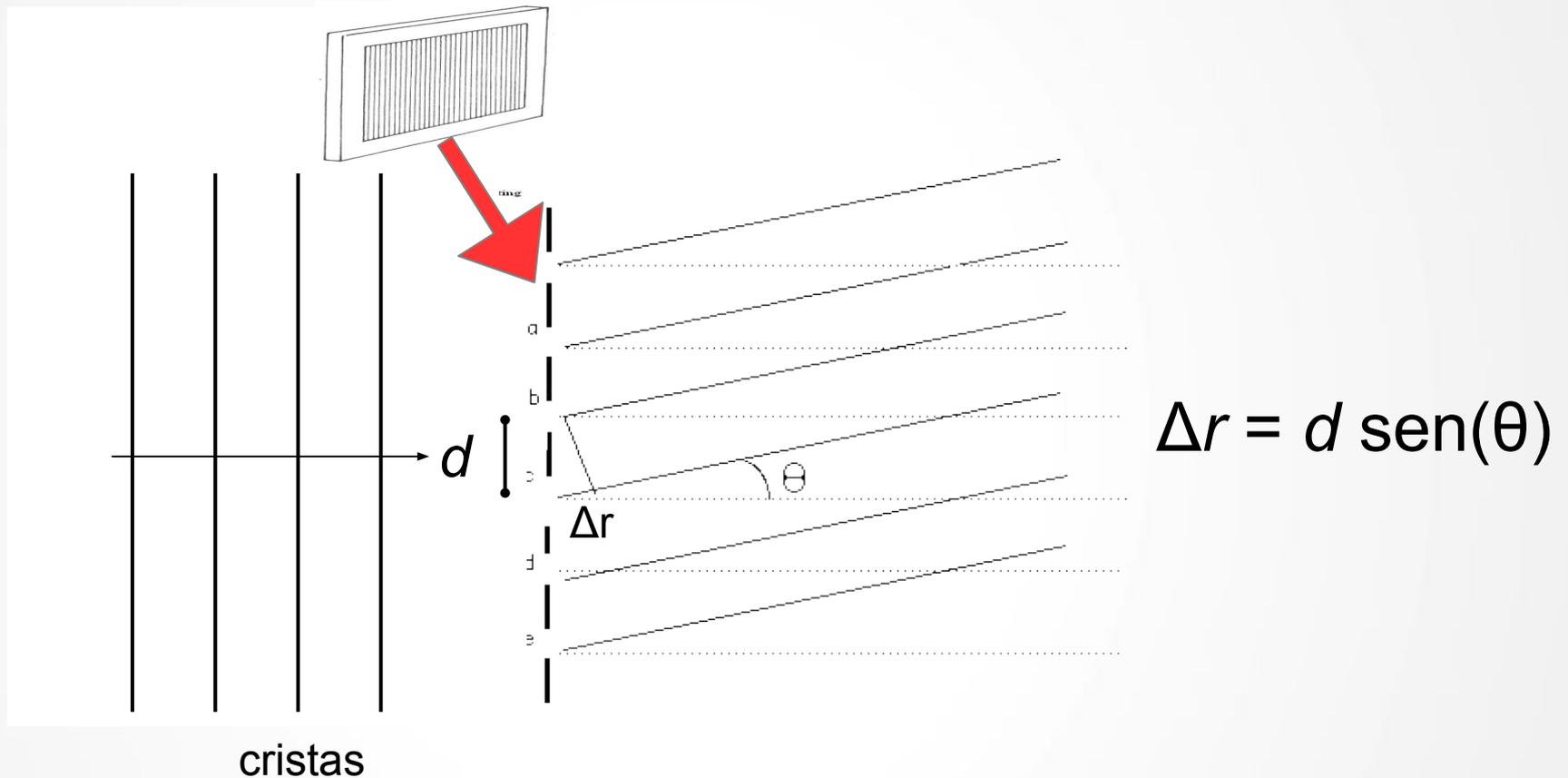


Ex: superfície de um DVD,
penas de certos pássaros



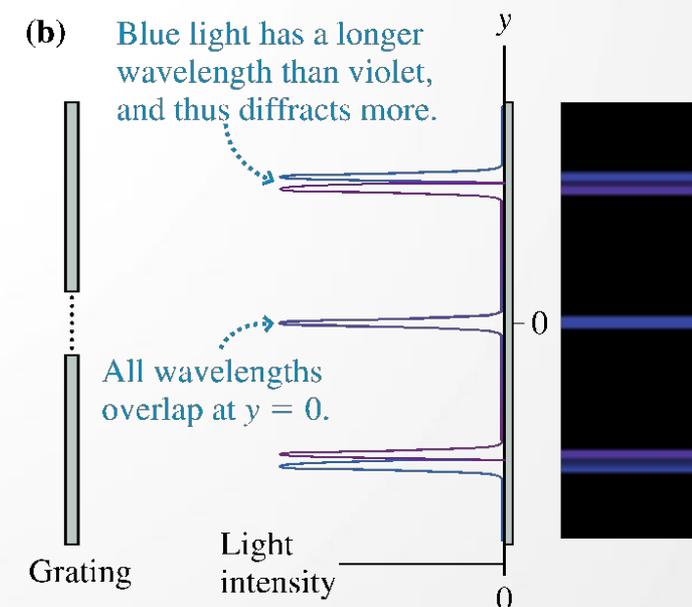
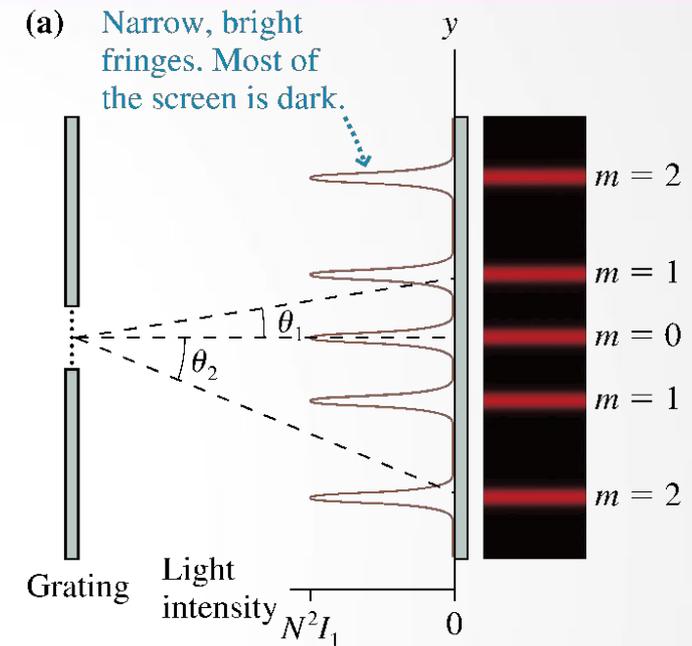
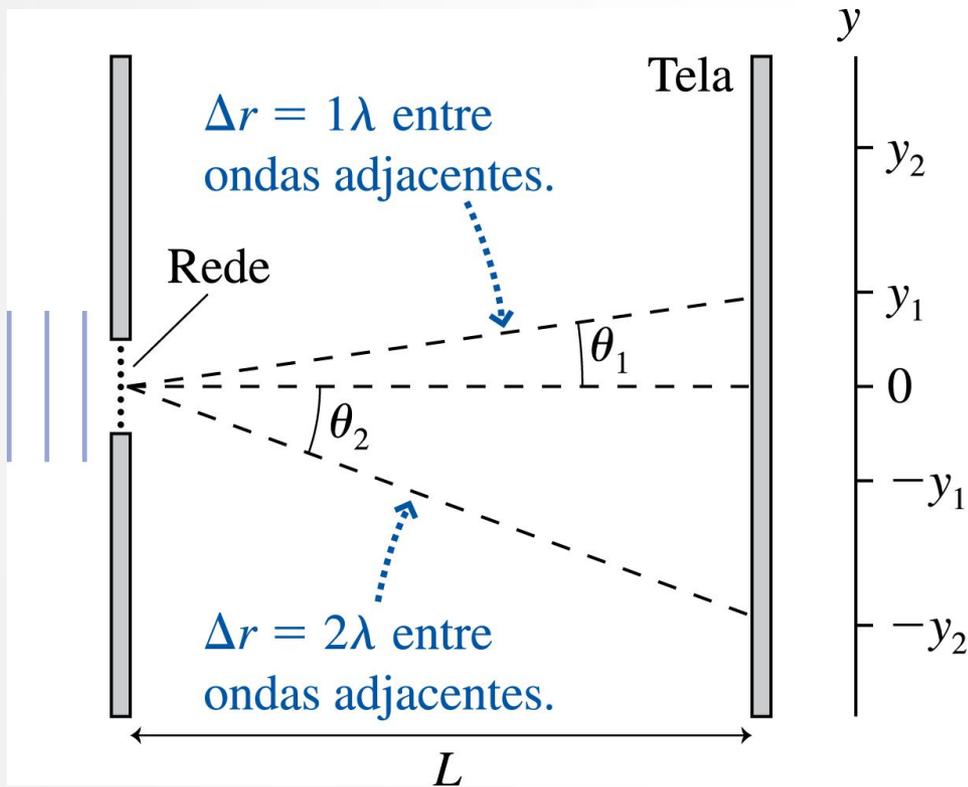
ps micrographs

Redes de Difração - Análise



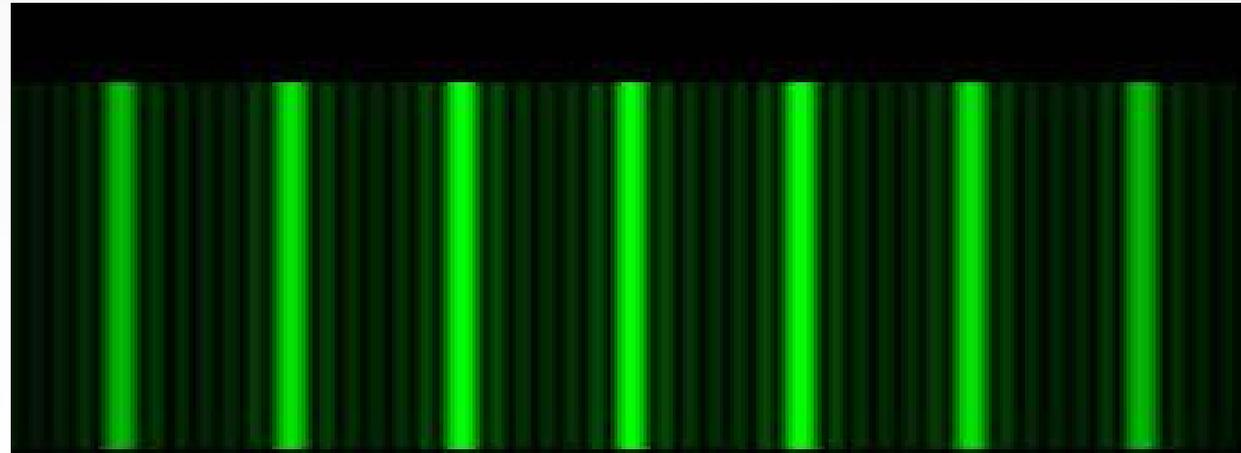
A onda proveniente de cada fenda percorre uma distância extra Δr .

Redes de Difração - Análise

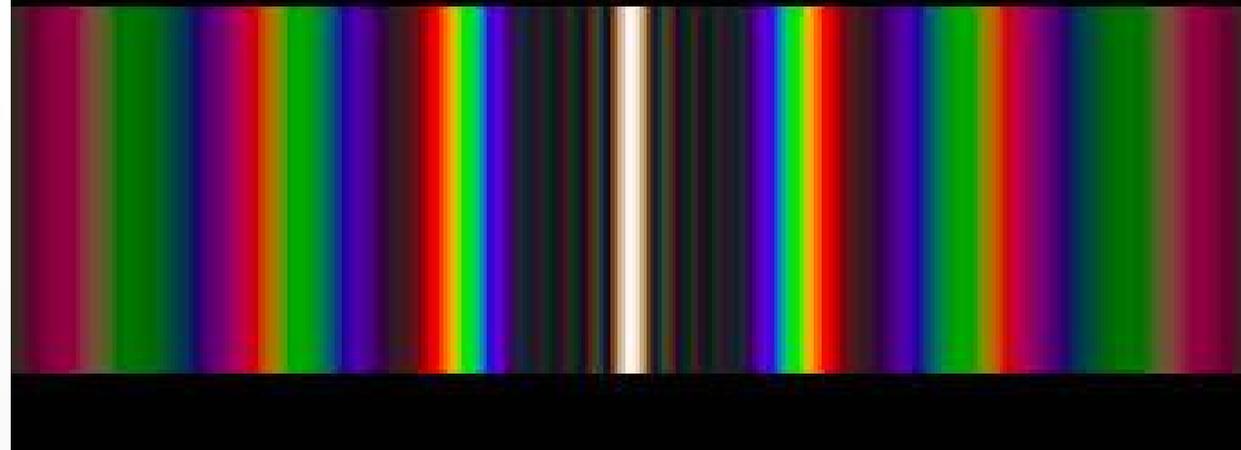


Redes de Difração - Análise

padrão difratado
qdo a rede é
iluminada com
luz verde

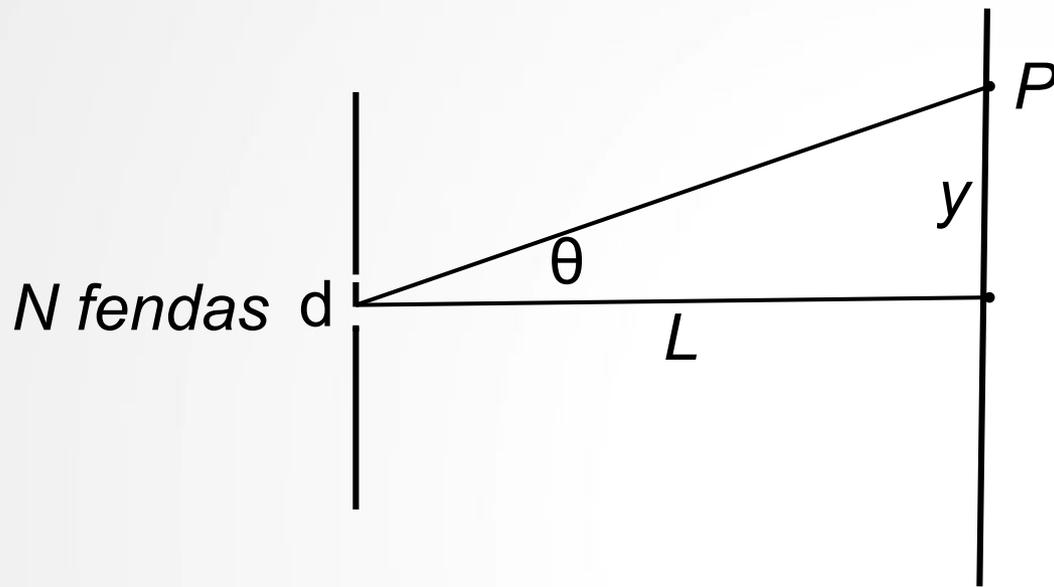


padrão difratado
qdo a rede é
iluminada com
luz branca



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)



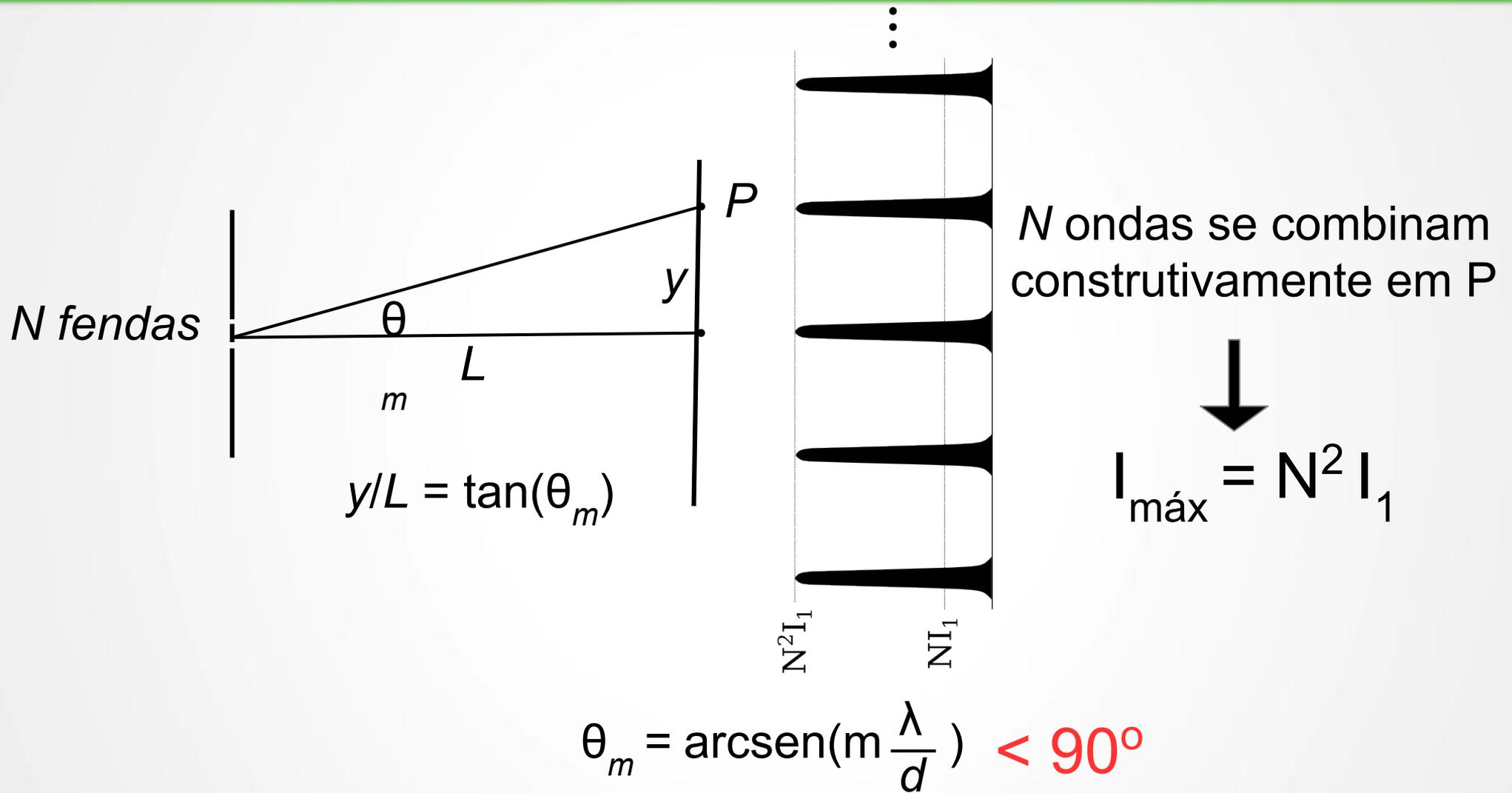
$$d \sin(\theta_m) = m\lambda$$

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

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

Redes de Difração - Análise



Teste conceitual 22.4

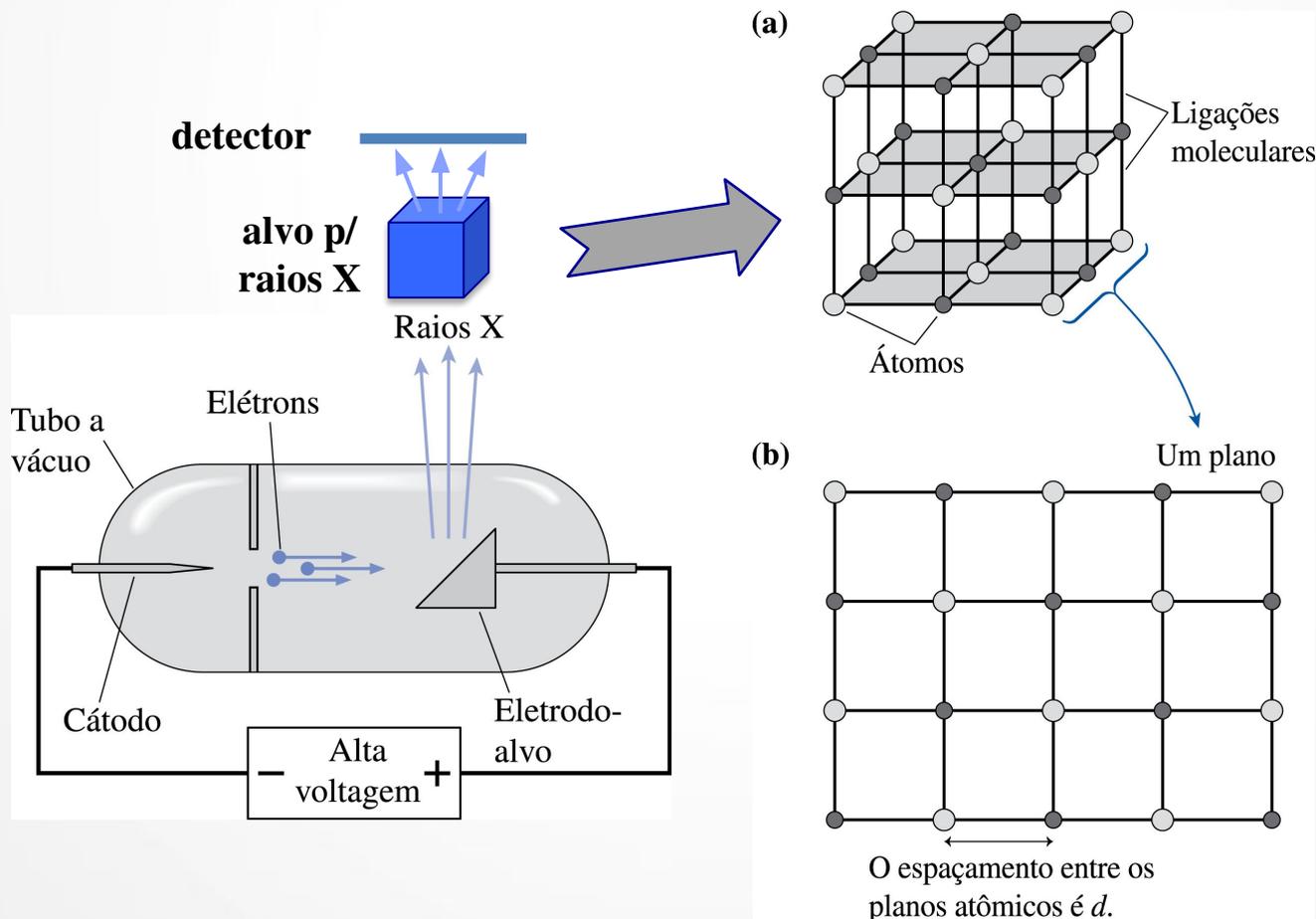
O que acontece com o perfil de interferência de um sistema de múltiplas fendas quando adicionamos mais fendas de mesmo espaçamento?

- 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

Em 1895 W Röntgen descobriu os raios X: ondas eletromagnéticas com comprimento de onda numa faixa entre 0.01nm e 10 nm (cerca de 100 a 100000 vezes menores que a luz visível).

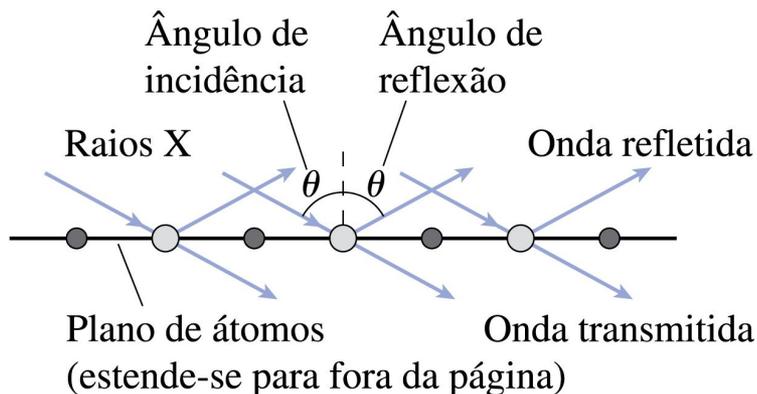
Em 1912 M.V. Laue (Nobel de Física 1914) descobriu que raios-X podem ser difratados por 'alvos' de material cristalino (materiais com uma estrutura tridimensional regular).



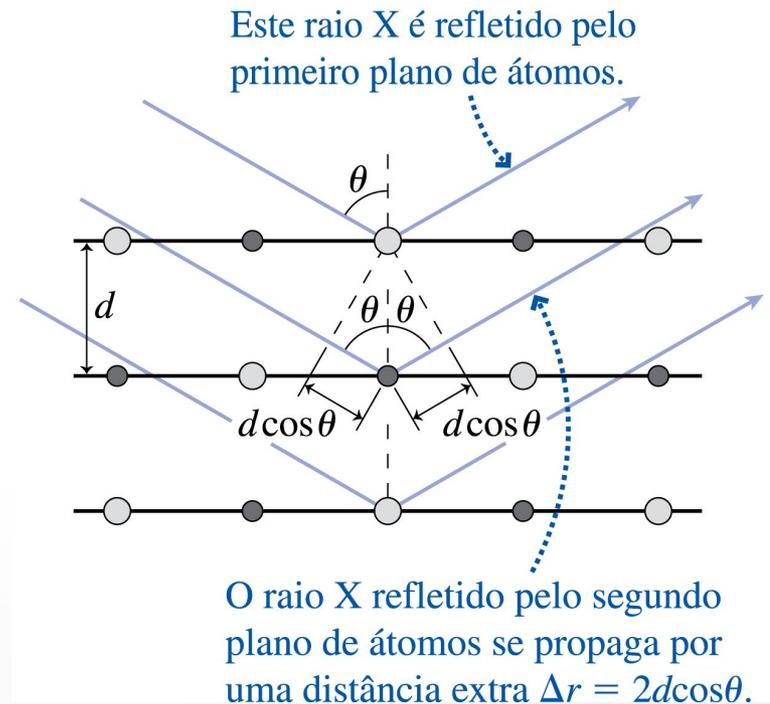
Extra: Difração de raios X

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.

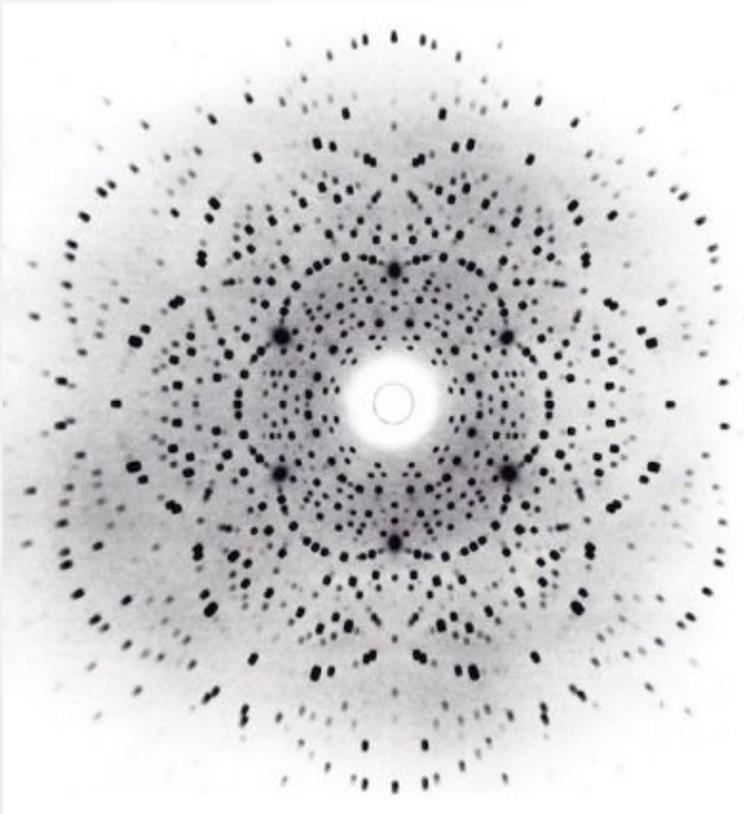


V. cap 25 para mais detalhes!

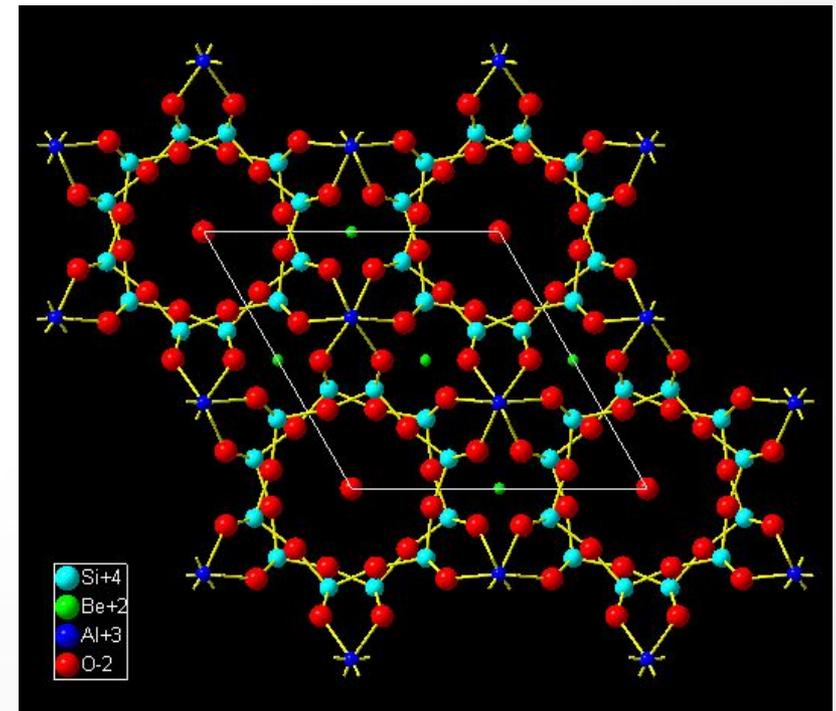
Difração de raios X

Iluminando o cristal com raios x de comprimento de onda conhecido e analisando o padrão de interferência resultante, é possível deduzir a estrutura atômica do material

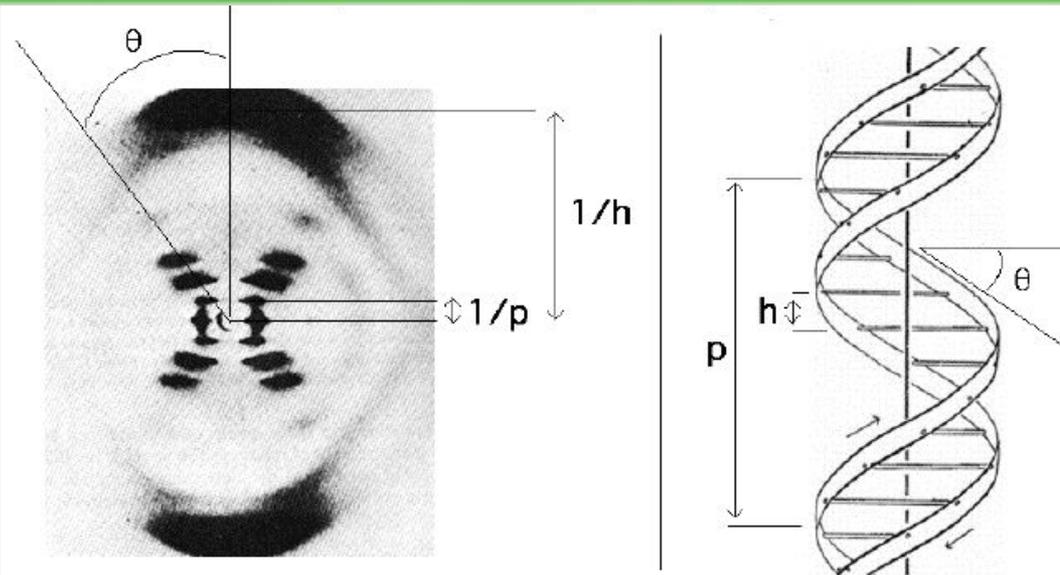
Ex: padrão difratado por um cristal de Berilo (esmeralda ou água-marinha)



Estrutura atômica deduzida



Difração de raios X



Aplicação: identificar a estrutura espacial de biomoléculas complexas

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



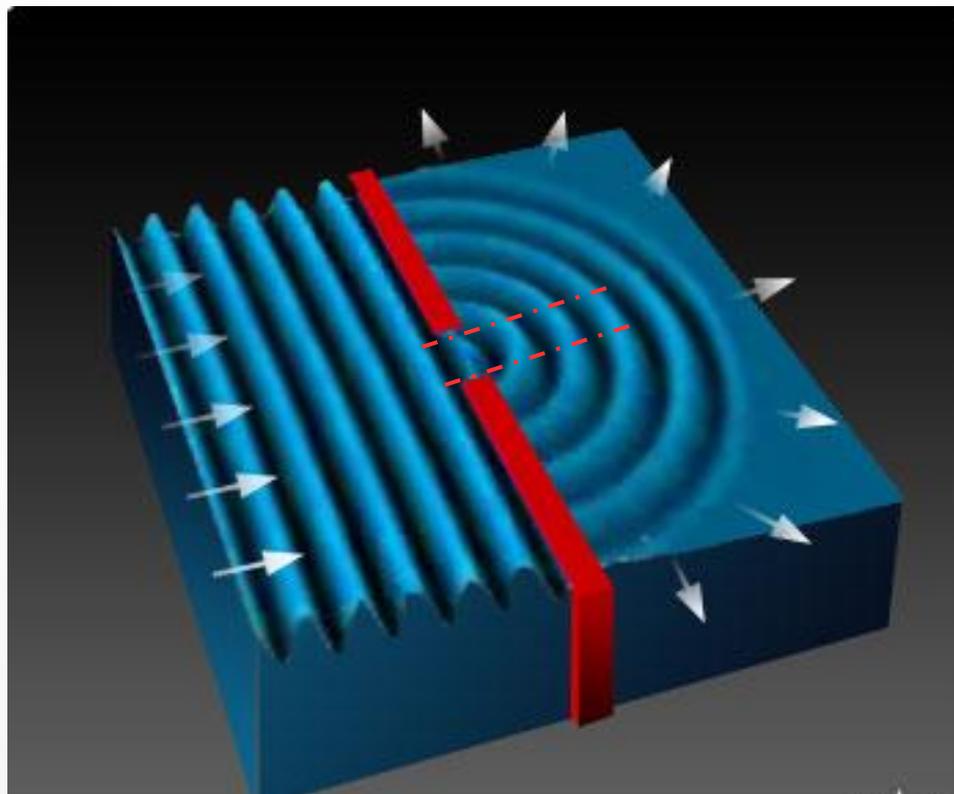
Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), Campinas / SP

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

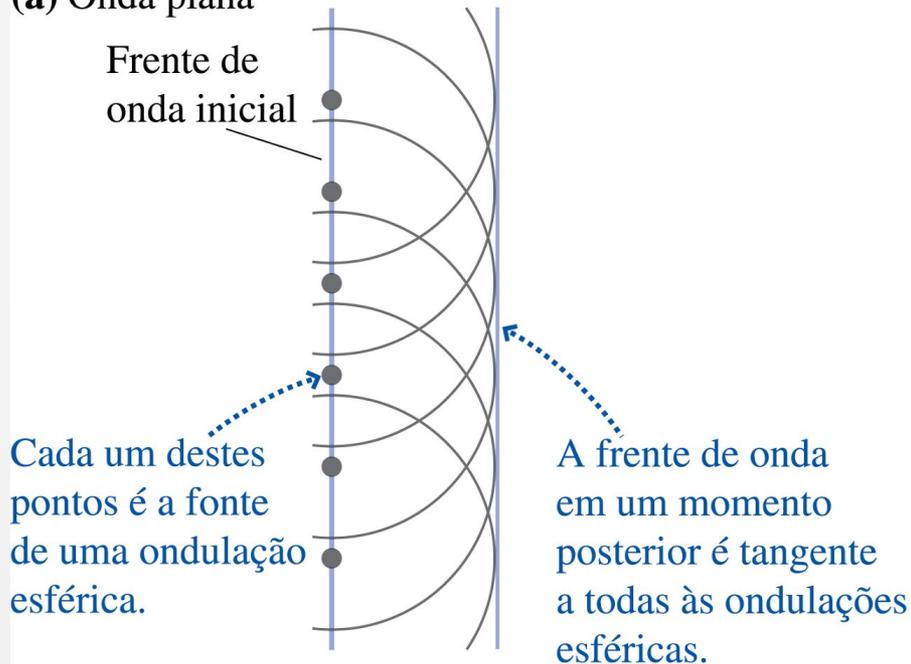


Difração em Fenda Simples

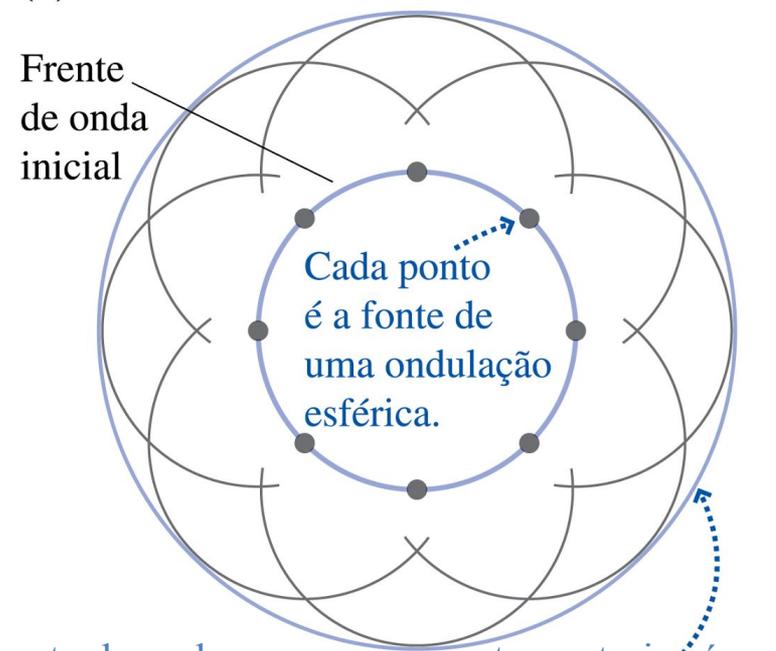
Explicação qualitativa: **Princípio de Huygens (1678)**

- 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

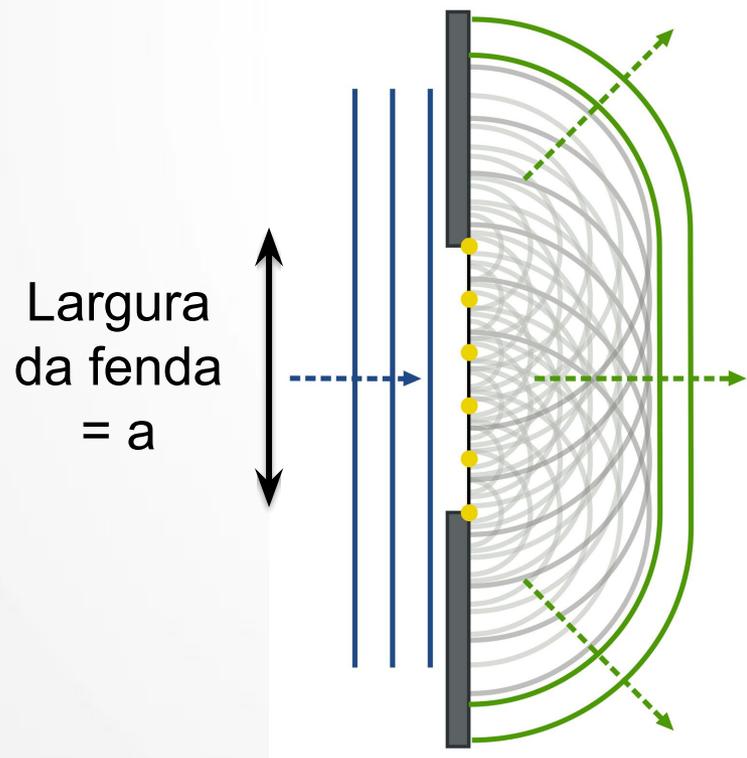


a frente de onda em um momento posterior é uma esfera tangente a todas essas ondulações esféricas

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



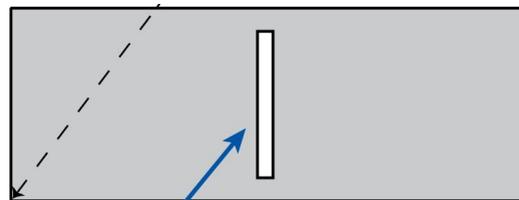
Porém, atenção. Essa imagem está incompleta!

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

Difração em Fenda Simples

Ex: Um laser difratando em uma fenda estreita

Teste Conceitual 22.5



Luz incidente de comprimento de onda λ

Fenda simples de largura a

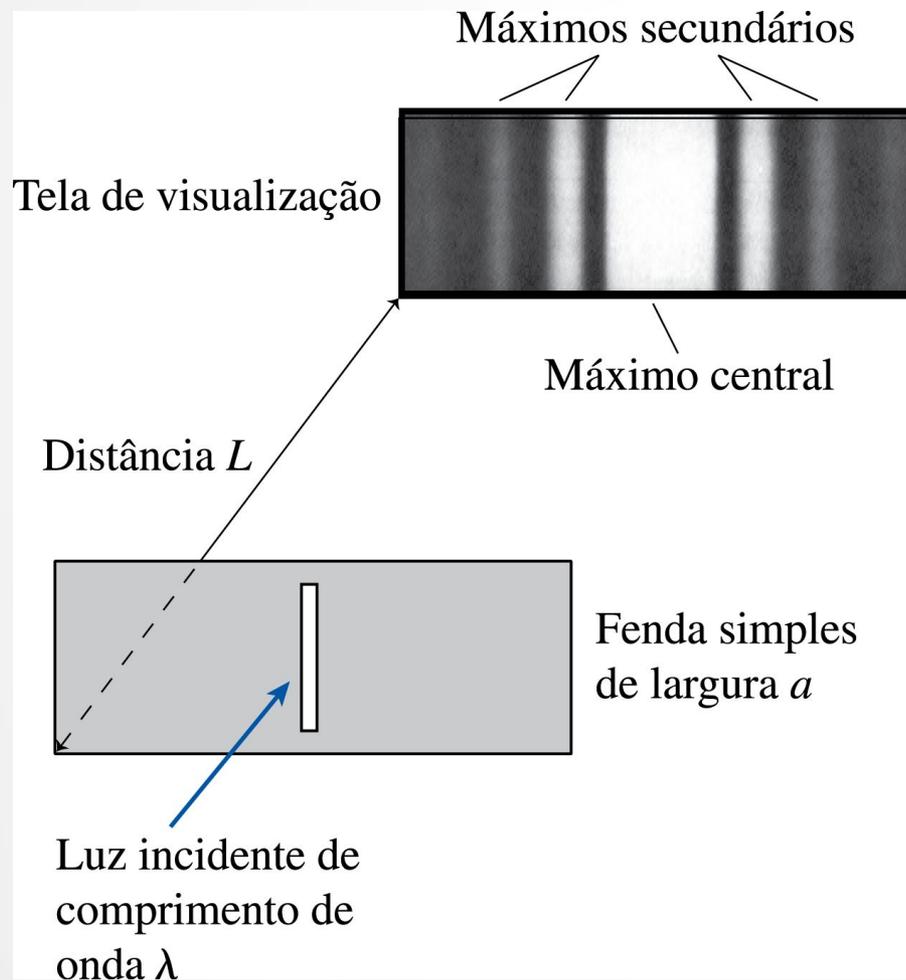
Que padrão aparece na tela quando passamos luz por uma fenda muito estreita?

- A) Uma imagem nítida no centro, com a mesma forma da fenda só que mais larga (ie, uma projeção da fenda).
- B) Uma mancha 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 Conceitual 22.5

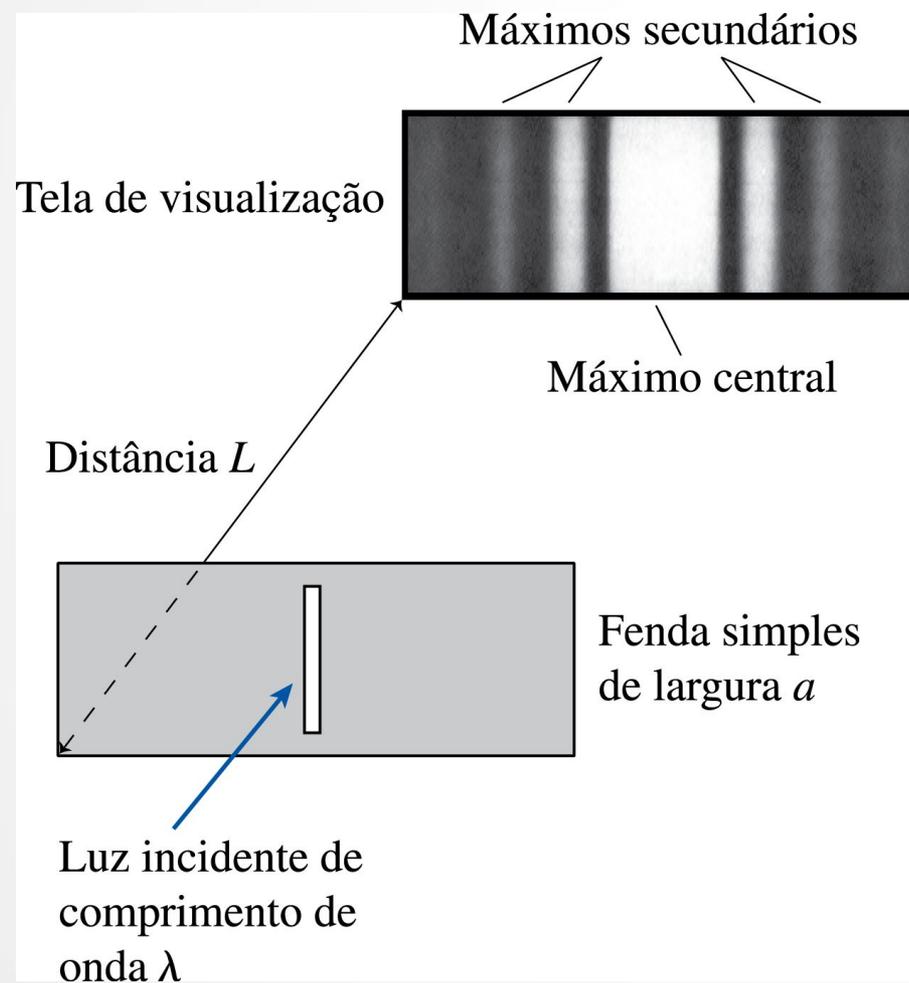


Que padrão aparece na tela quando passamos luz por uma fenda muito estreita?

- 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



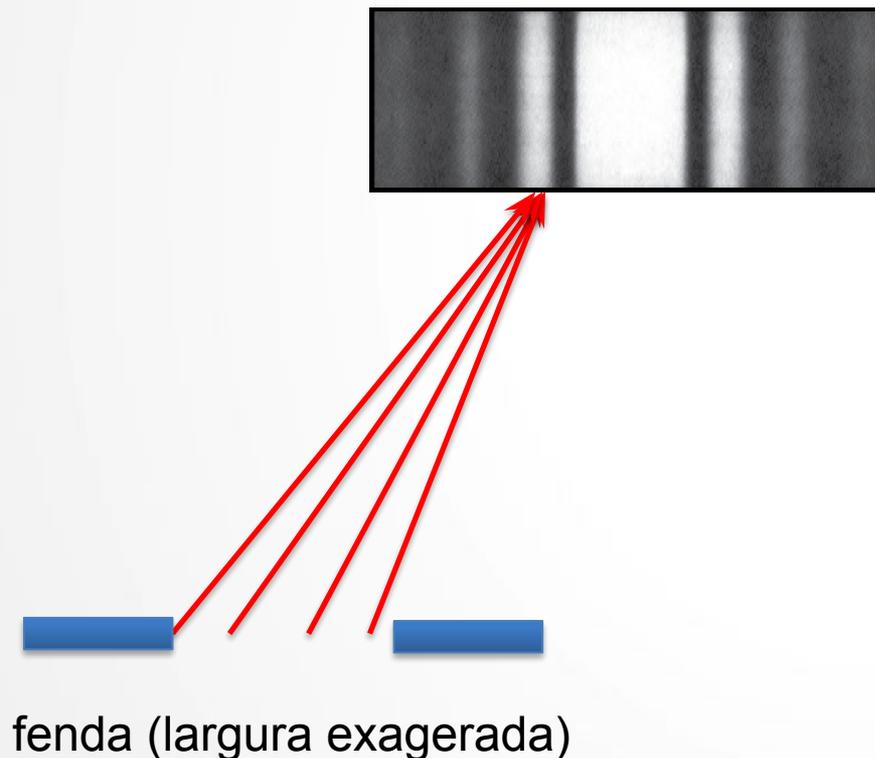
Perguntas

- 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?

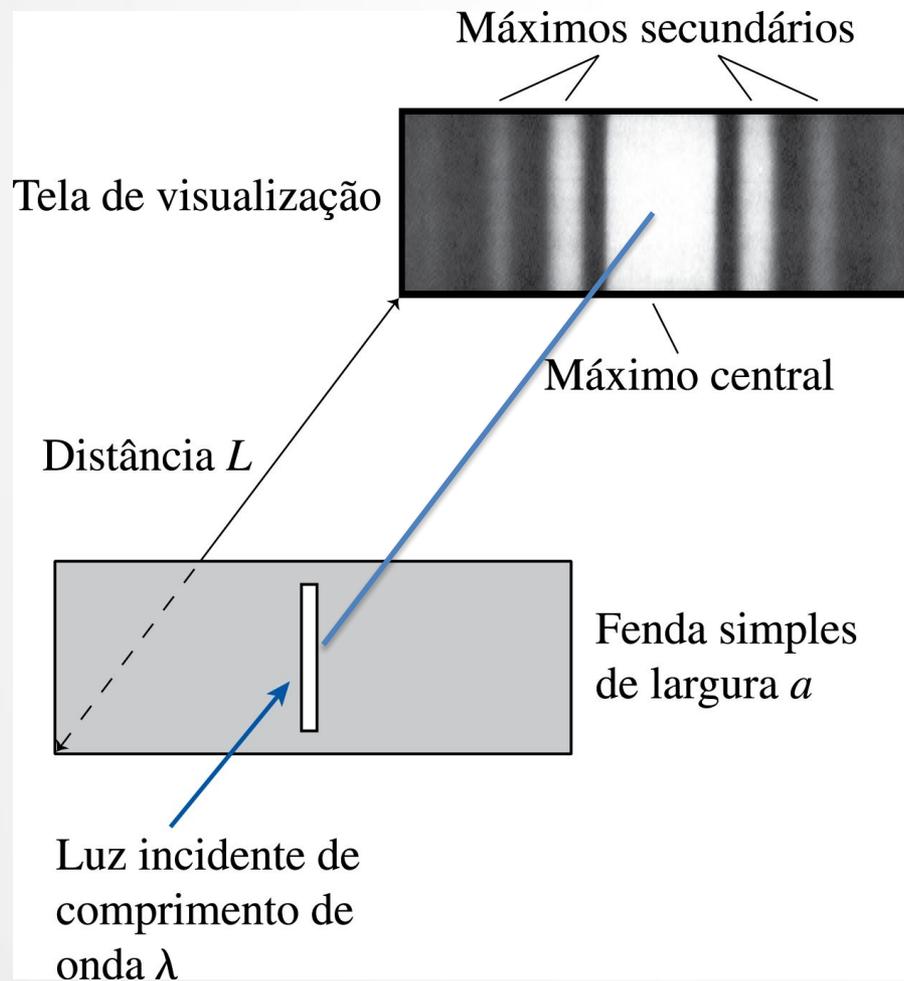
R: a fenda não é uma fonte pontual!

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

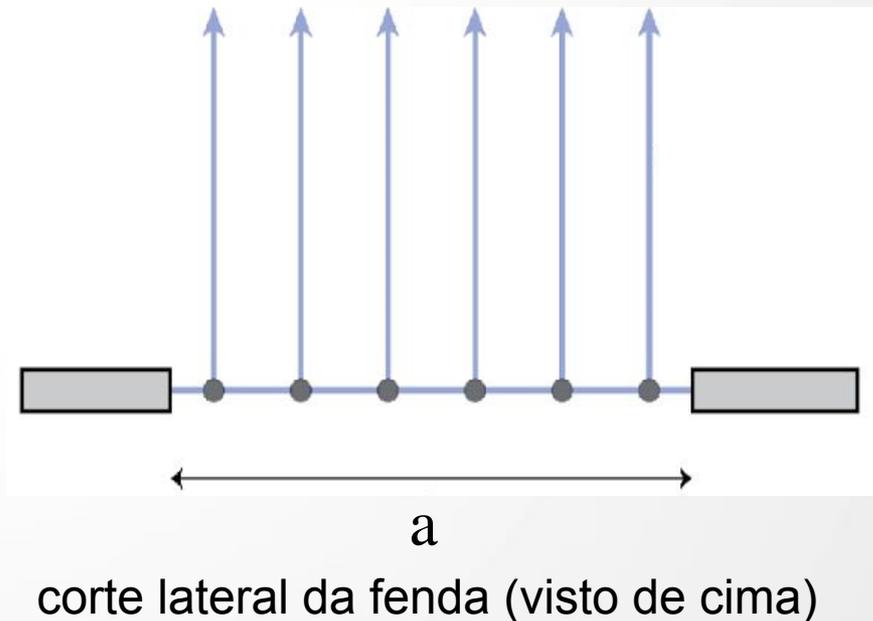
Essa diferença leva a diferenças de fase, portanto a interferência...

Difração em Fenda Simples

Ex: Um laser difratando em uma fenda estreita

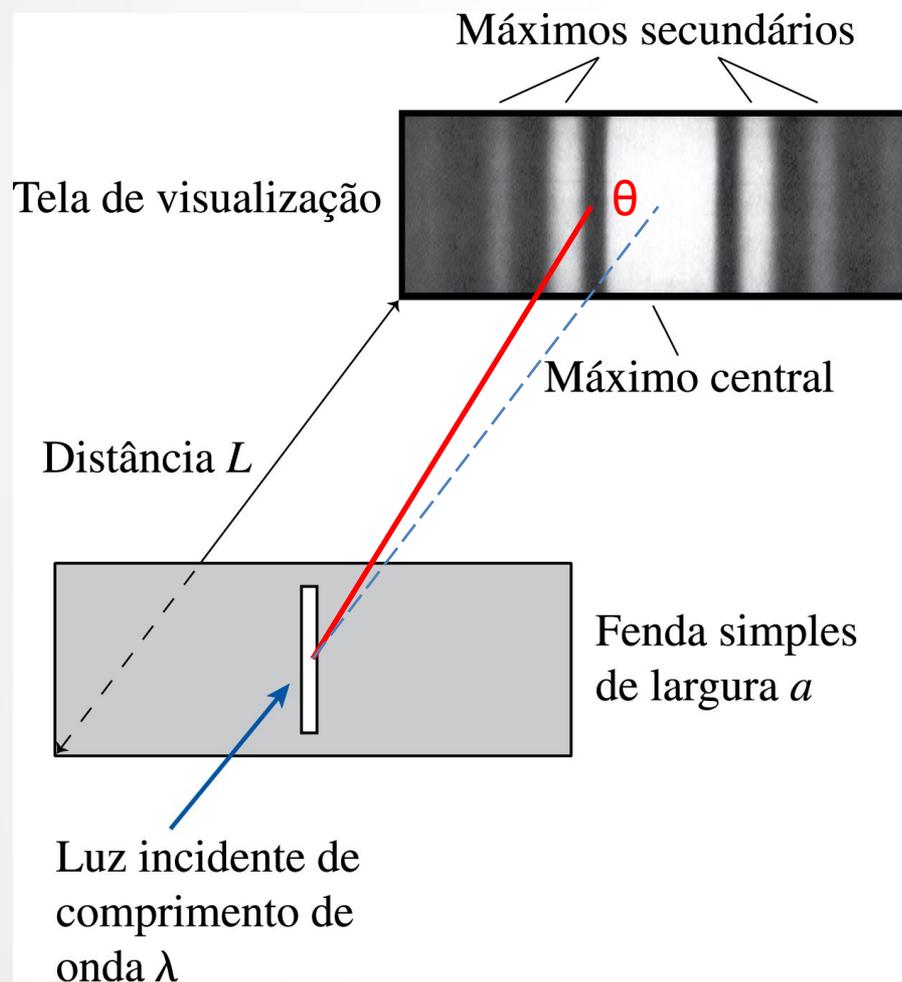


No centro da tela: luz vinda de todos os pontos da fenda percorre praticamente a mesma distância: **interferência construtiva**



Difração em Fenda Simples

Ex: Um laser difratando em uma fenda estreita



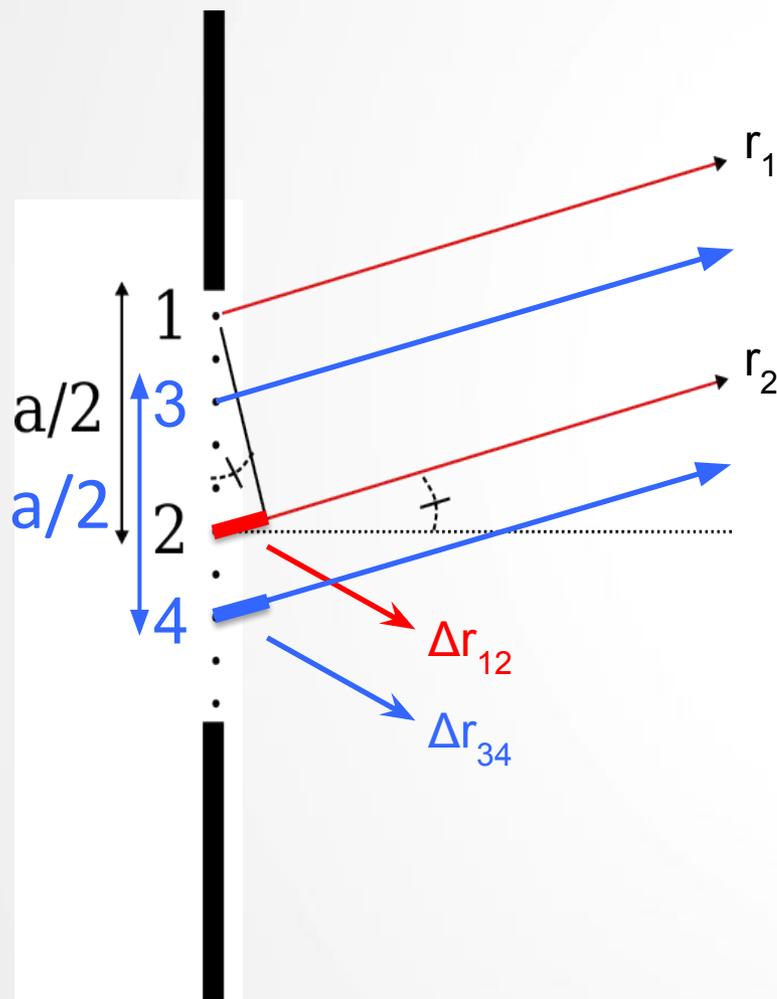
Perguntas

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.

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

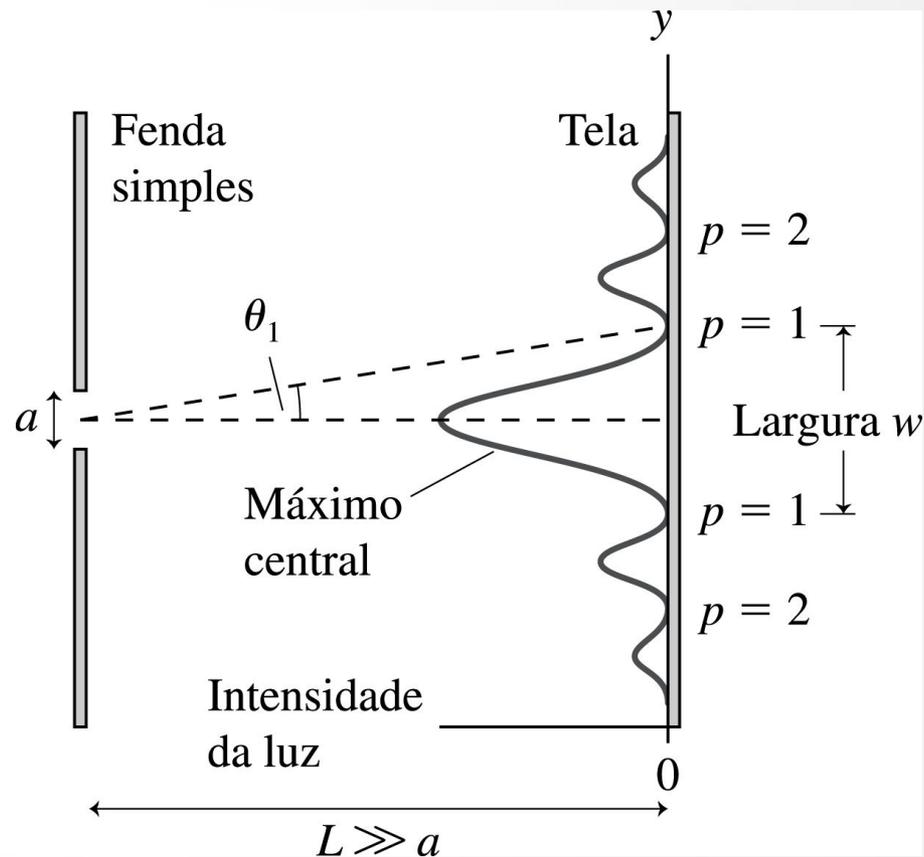
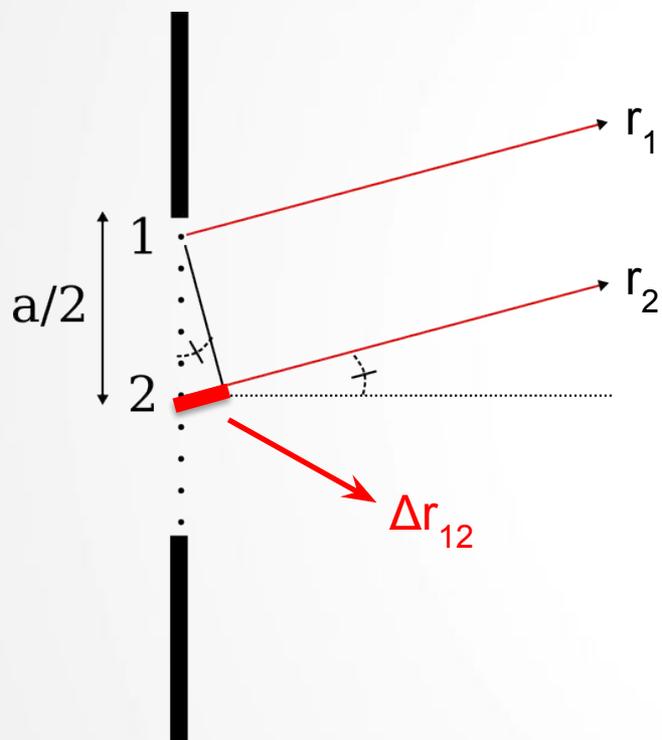
Nesse caso ondas provenientes de **todos** os outros pares de pontos na fenda separados de $a/2$ (como 3 e 4) também vão interferir destrutivamente em y_1

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

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**.

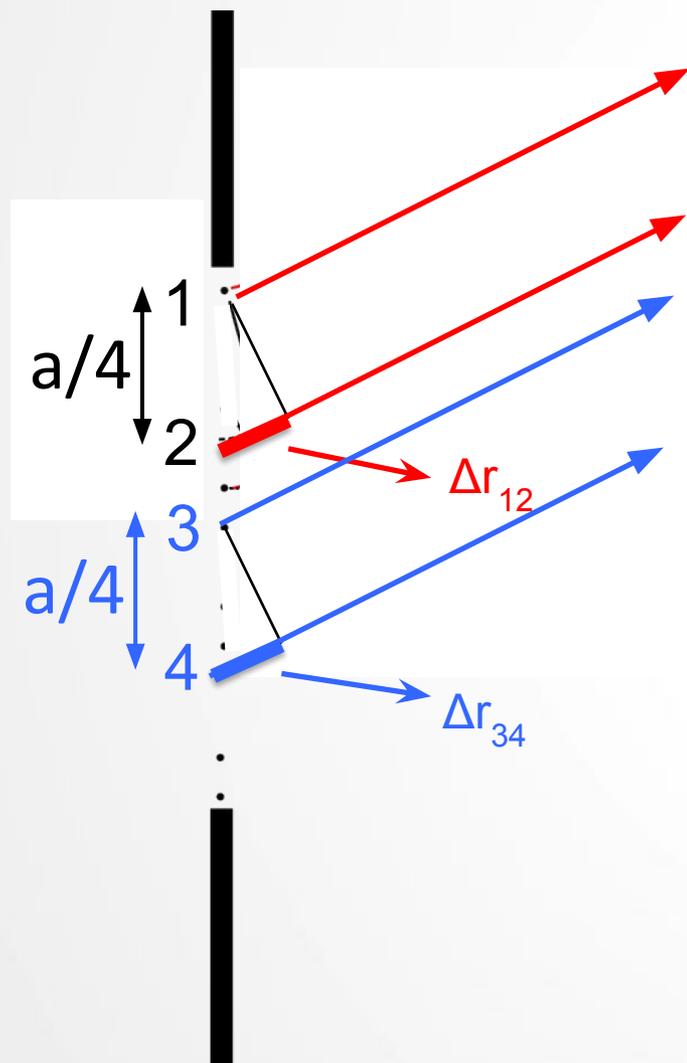


1o mínimo ($p = 1$): $\Delta r_{12} = (a/2) \cdot \text{sen}(\theta_1) = \lambda/2$

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

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.

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

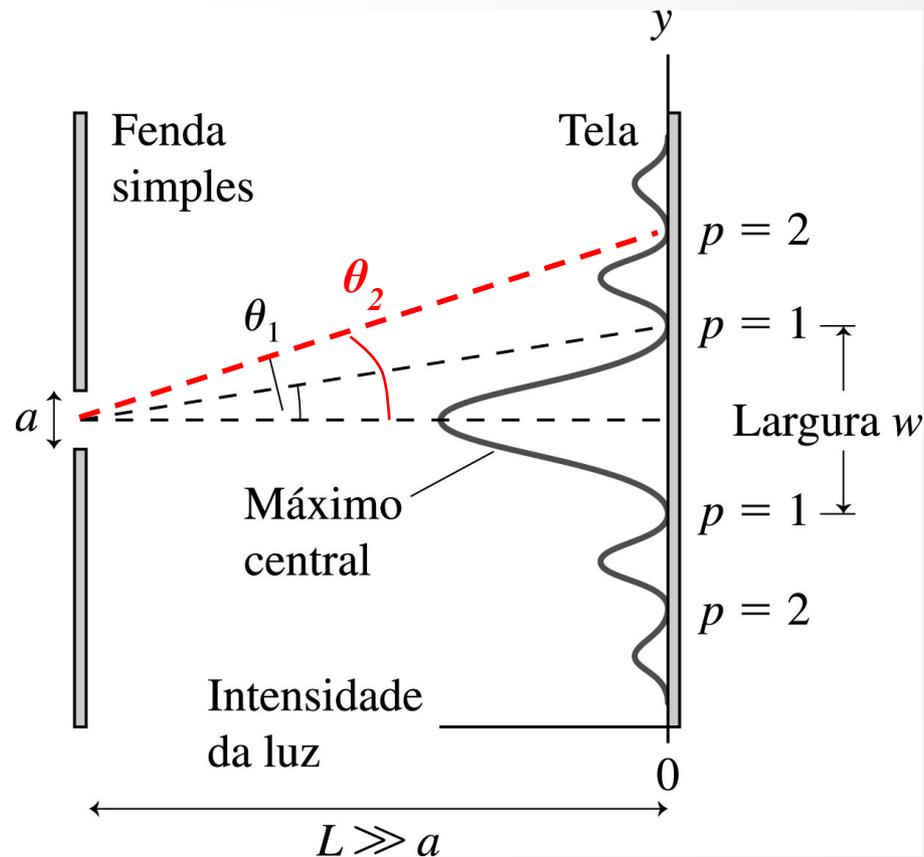
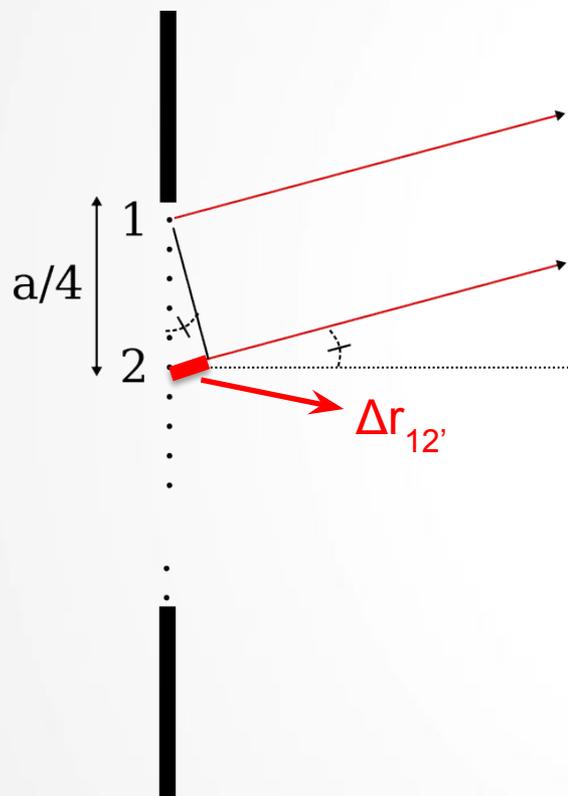
Nesse caso ondas provenientes de **todos** os outros pares de pontos na fenda separados de $a/4$ (como 3 e 4) também vão interferir destrutivamente em y_2

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

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**.

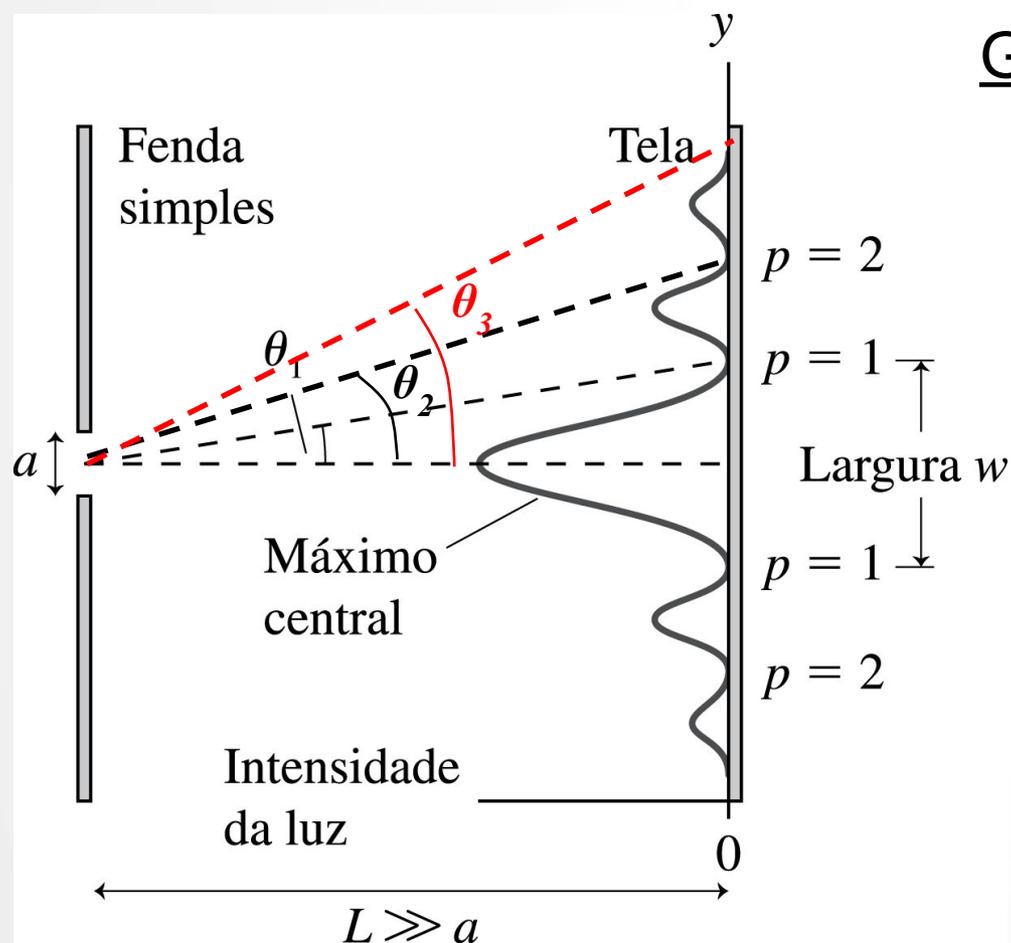


2o mínimo ($p = 2$): $\Delta r_{12} = (a/4) \cdot \text{sen}(\theta_2) = \lambda/2$

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

Difração em Fenda Simples

Determinação dos ângulos de **intensidade mínima**.



Generalizando este procedimento

p -ésimo mínimo:

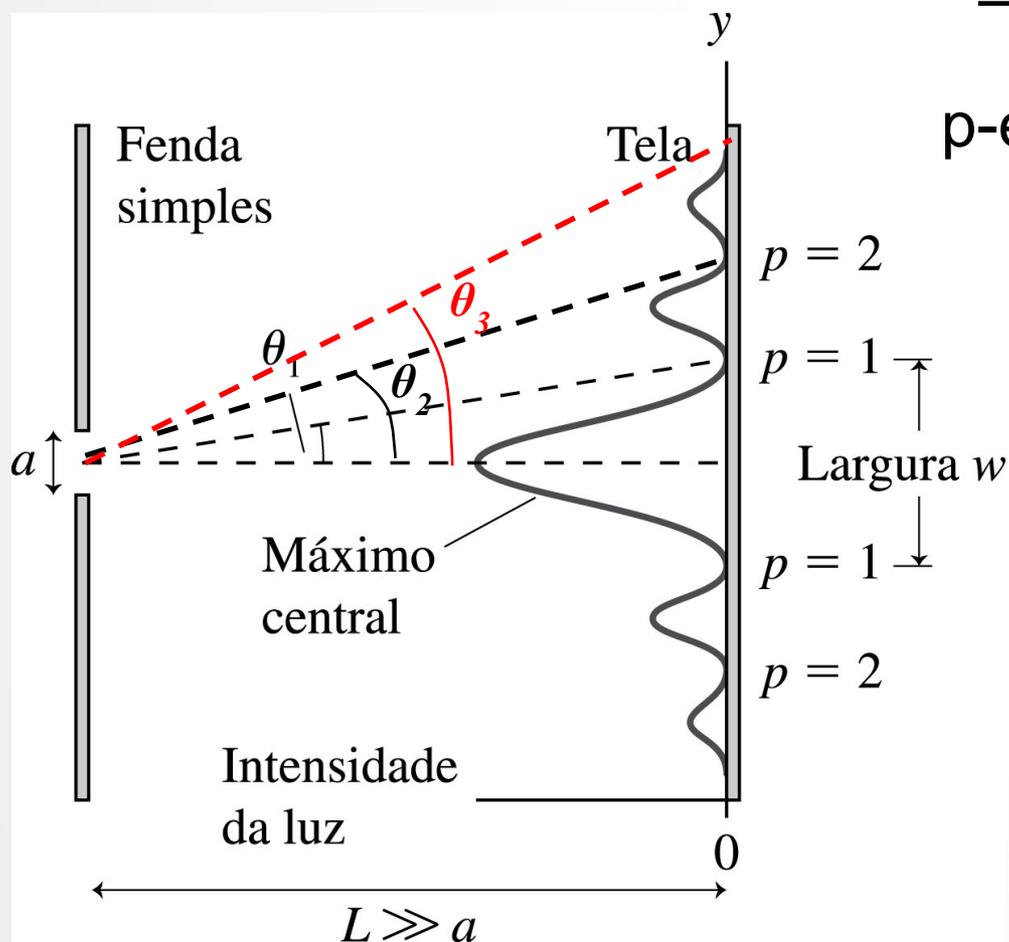
$p=1,2,3\dots$

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

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

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 exatamente na posição média entre os mínimos!)

Não vamos analisar aqui...

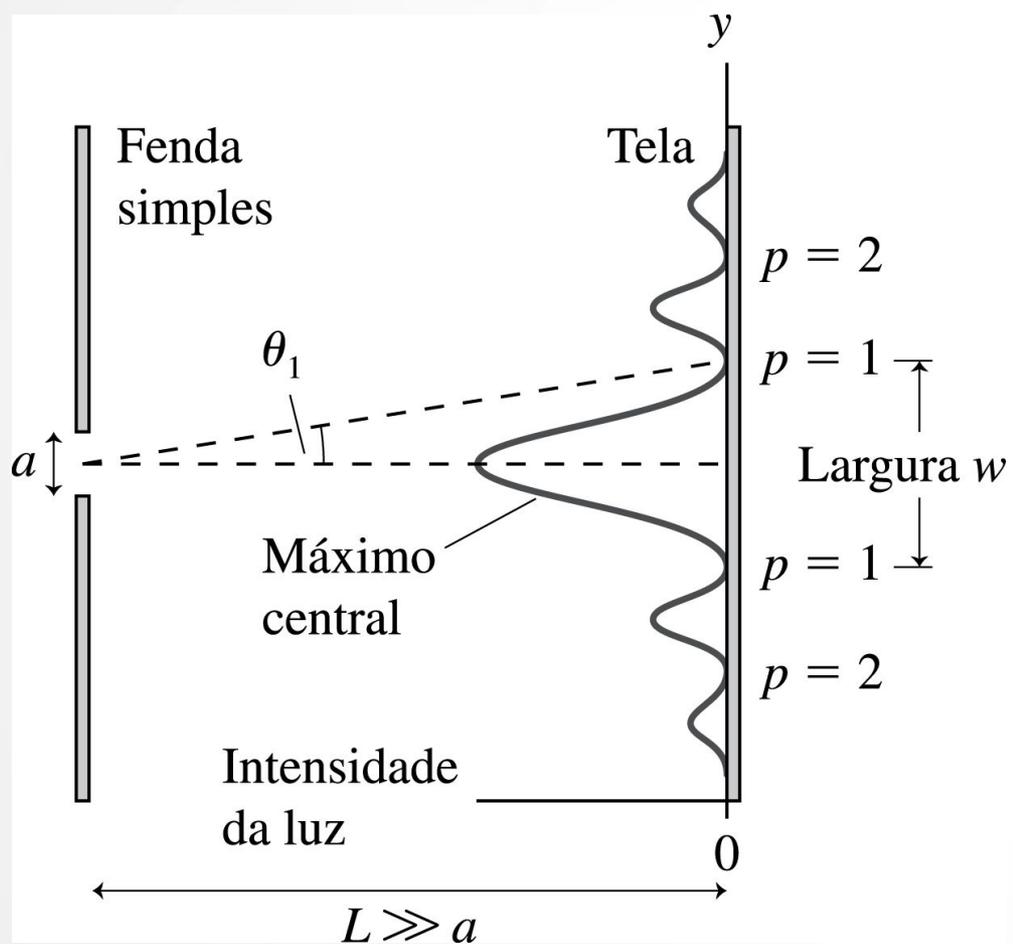
Teste conceitual 22.6

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

Difração em Fenda Simples

A Largura do Padrão de Difração



Se $\theta_1 \ll 1$:

$$y_1 = \lambda L / a$$

$$= 2 L \lambda / a$$

Teste Conceitual 22.7

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) Fica mais fraca, mas sem mudar a concentração relativa entre as várias regiões atrás da fenda.
- D) Permanece inalterada.

Teste Conceitual 22.7

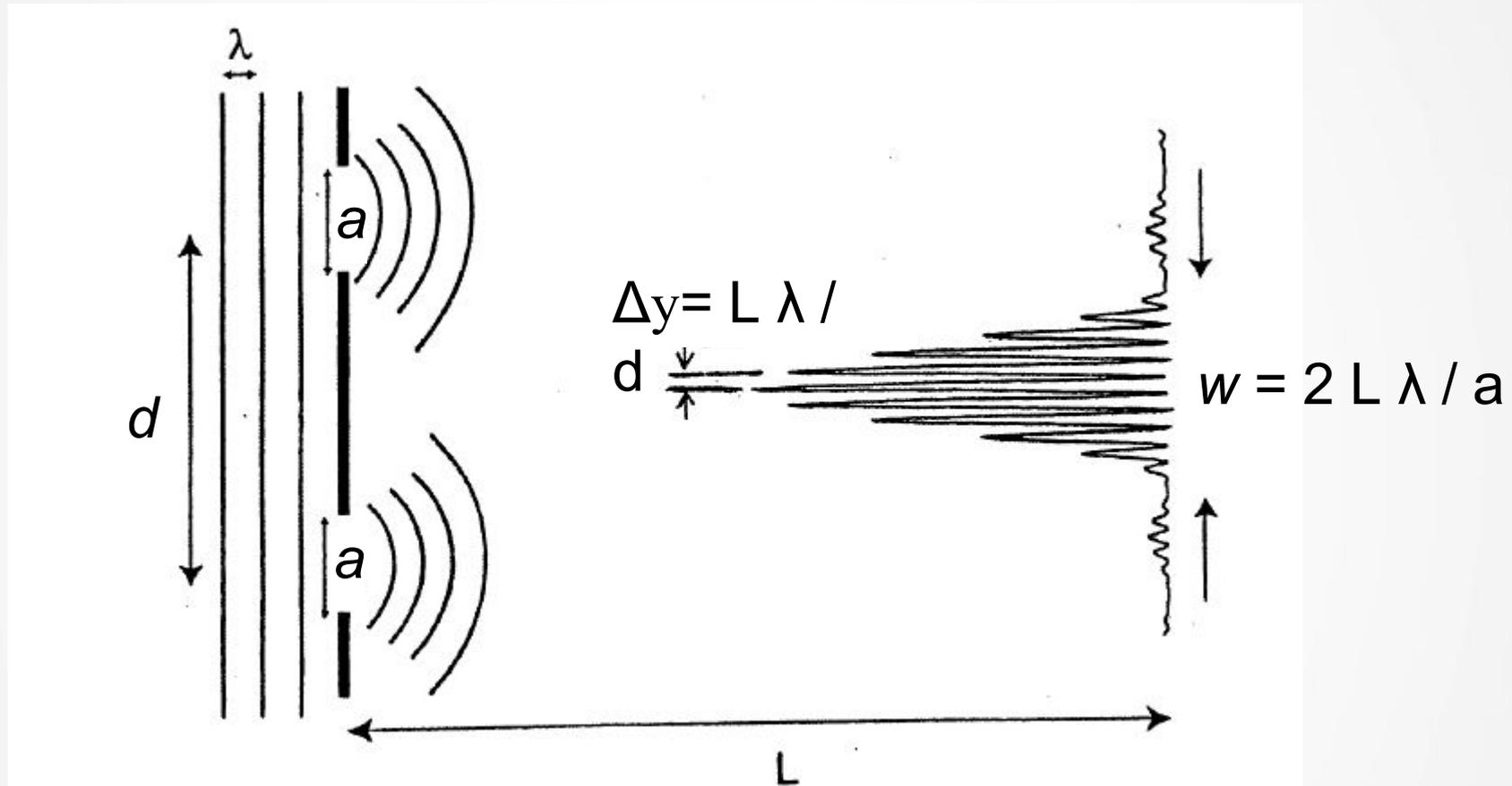
Em um experimento de difração em fenda simples, a largura da fenda através da qual a luz passa é reduzida. O que acontece com a luz transmitida?

- 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) Fica mais fraca, mas sem mudar a concentração relativa entre as várias regiões atrás da fenda.
- D) Permanece inalterada.

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

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

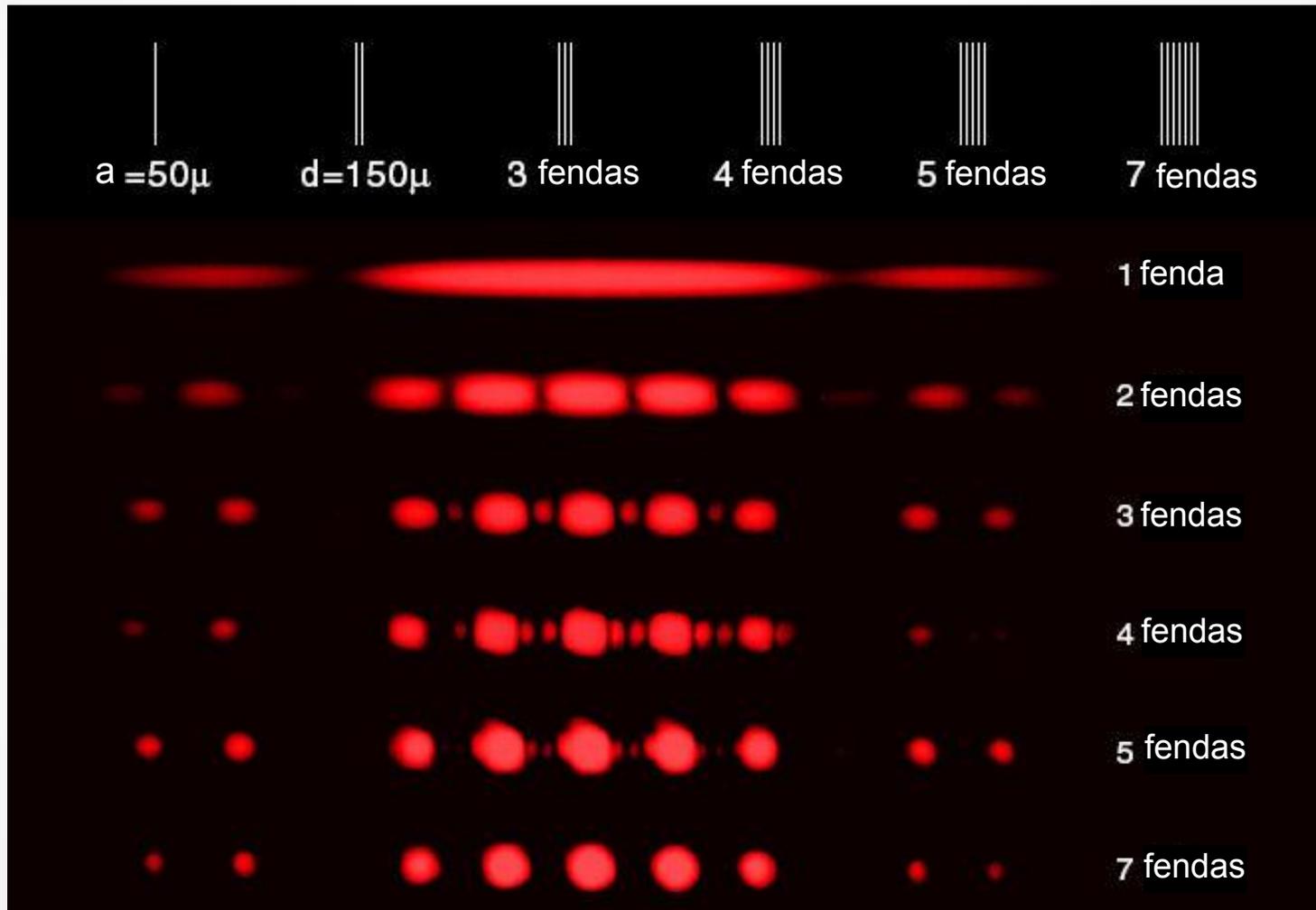
Difração e Interferência: dois fenômenos complementares



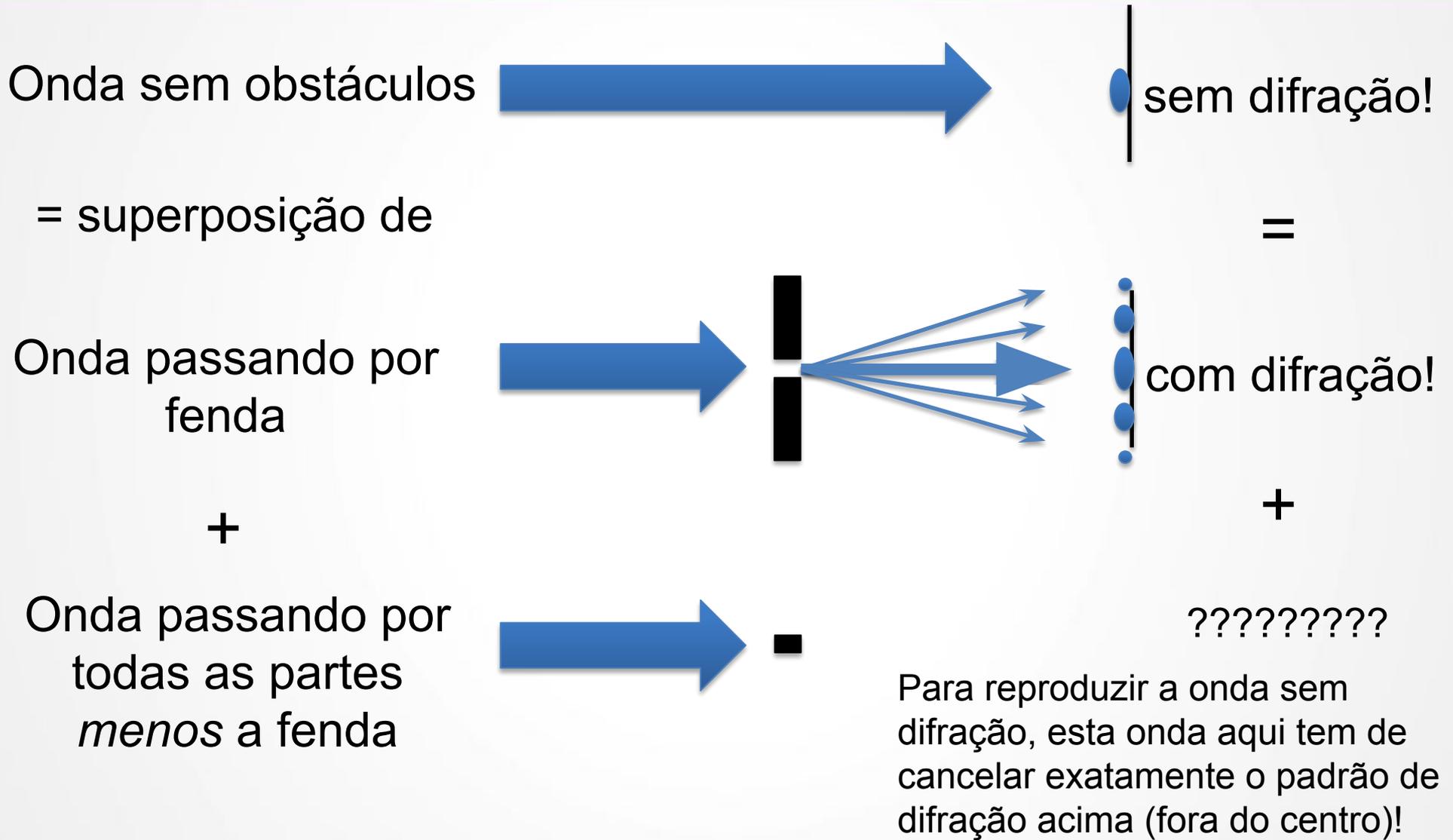
Em geral $a < d$, então há muitos picos de interferência dentro do máx. central de difração

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

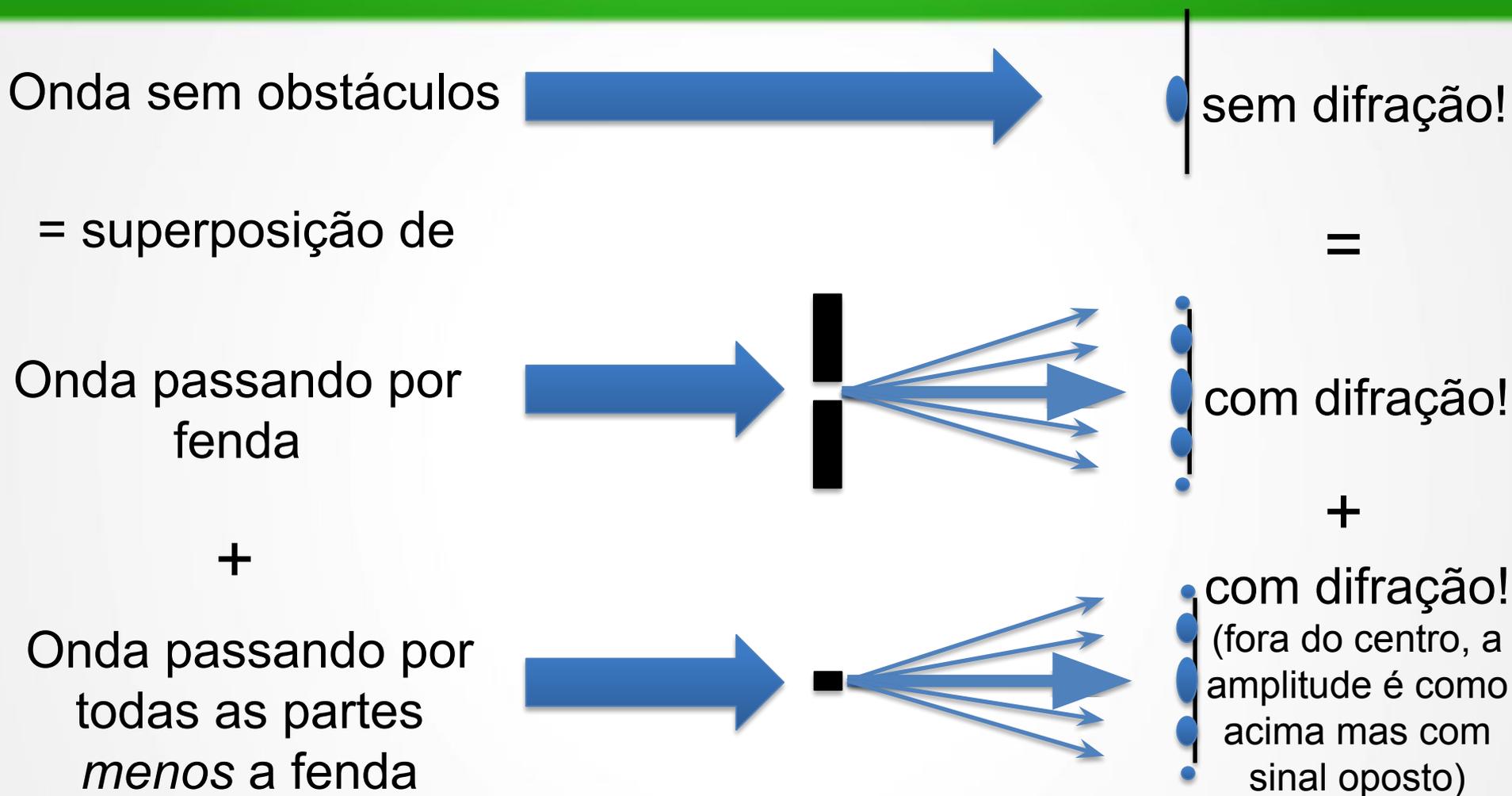
Difração e Interferência: dois fenômenos complementares



Difração ao redor de obstáculos: princípio de Babinet

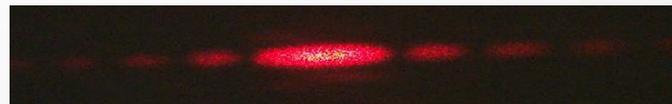


Difração ao redor de obstáculos: princípio de Babinet



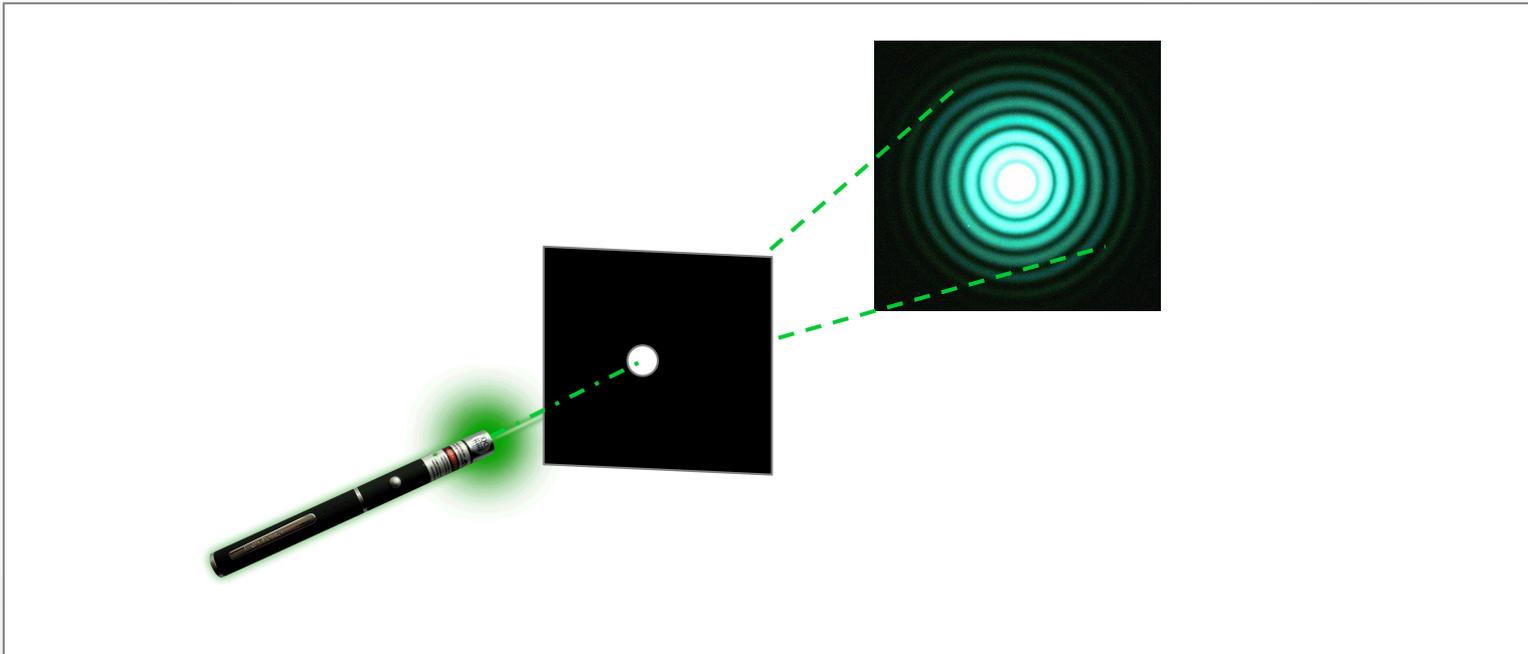
Moral: uma onda incidente sobre um obstáculo produz um padrão de difração **idêntico** ao produzido pela sua 'fenda complementar'

Ex: Difração por um fio de cabelo:



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

Obs: Difração em orifício circular

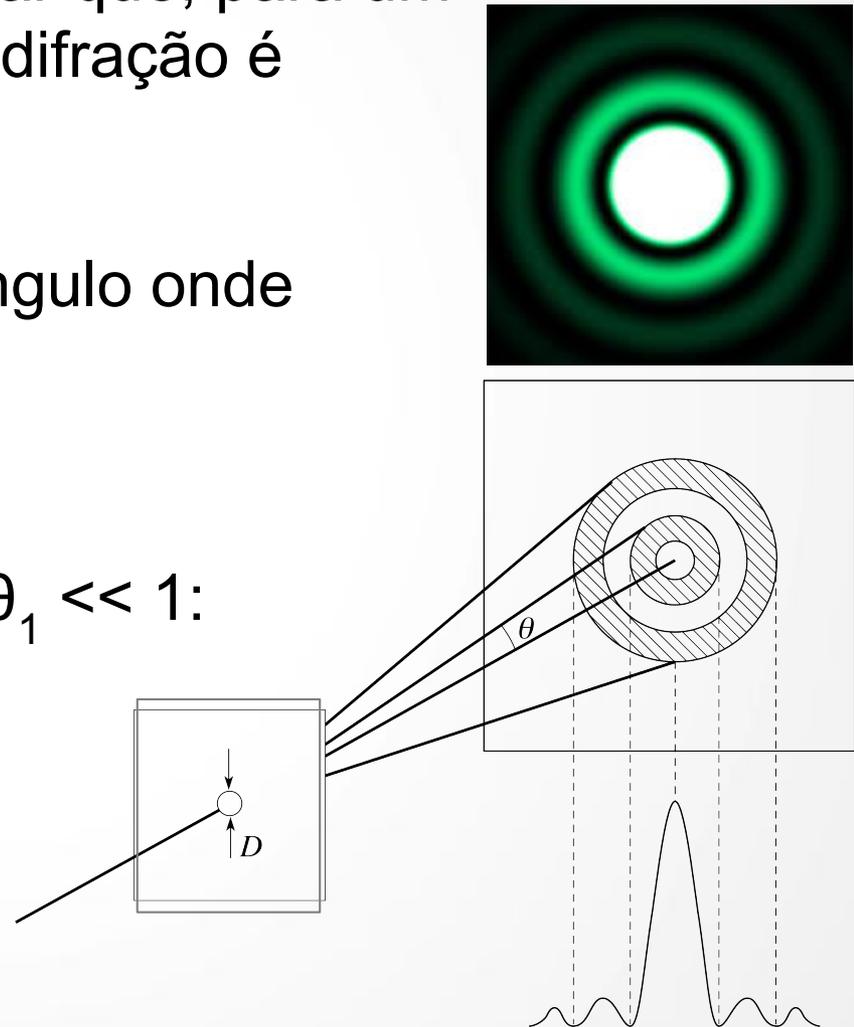
Nesse caso a conta é um pouco mais complicada e não faremos aqui. Pode-se mostrar que, para um orifício de diâmetro D , o padrão de difração é formado por círculos concêntricos.

O primeiro mínimo ocorre para o ângulo onde

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

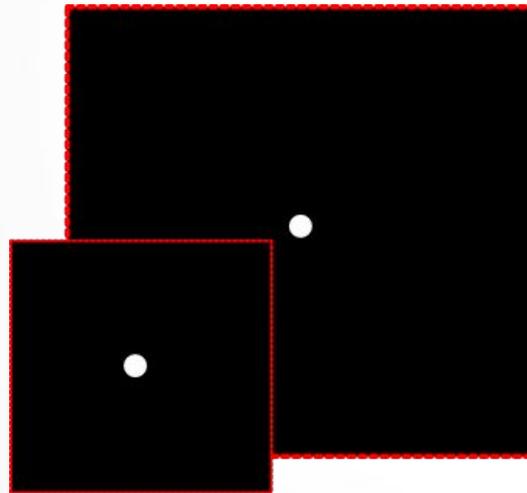
Diâmetro do máximo central se $\theta_1 \ll 1$:

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

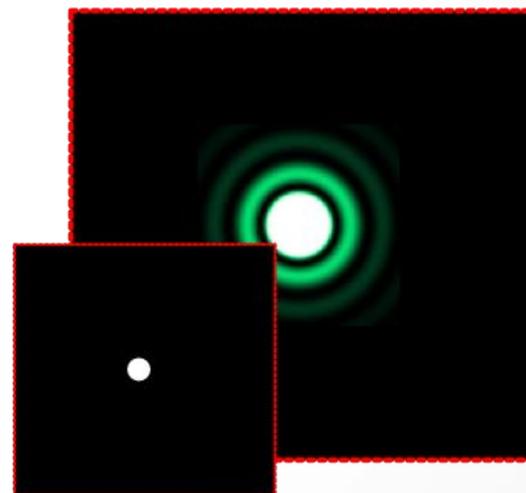


Quando a luz passa por um orifício ou fenda, sempre se observa a difração? → **NÃO**

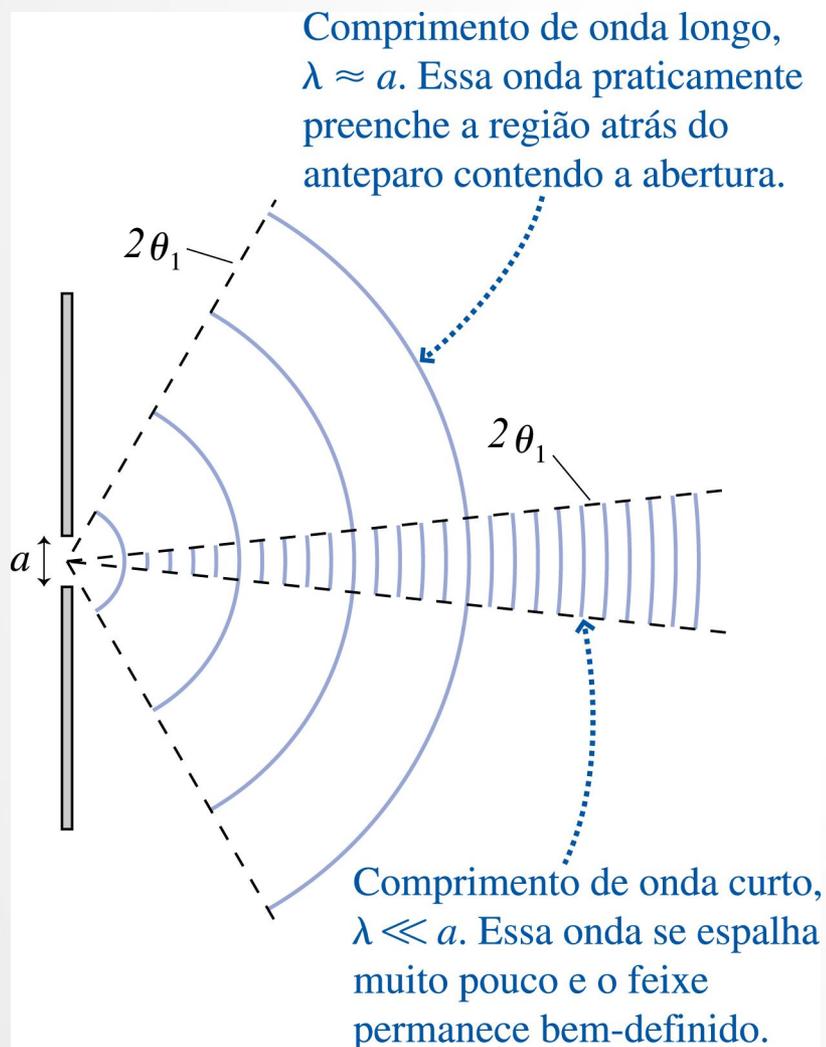
Ótica Geométrica



Ótica Ondulatória

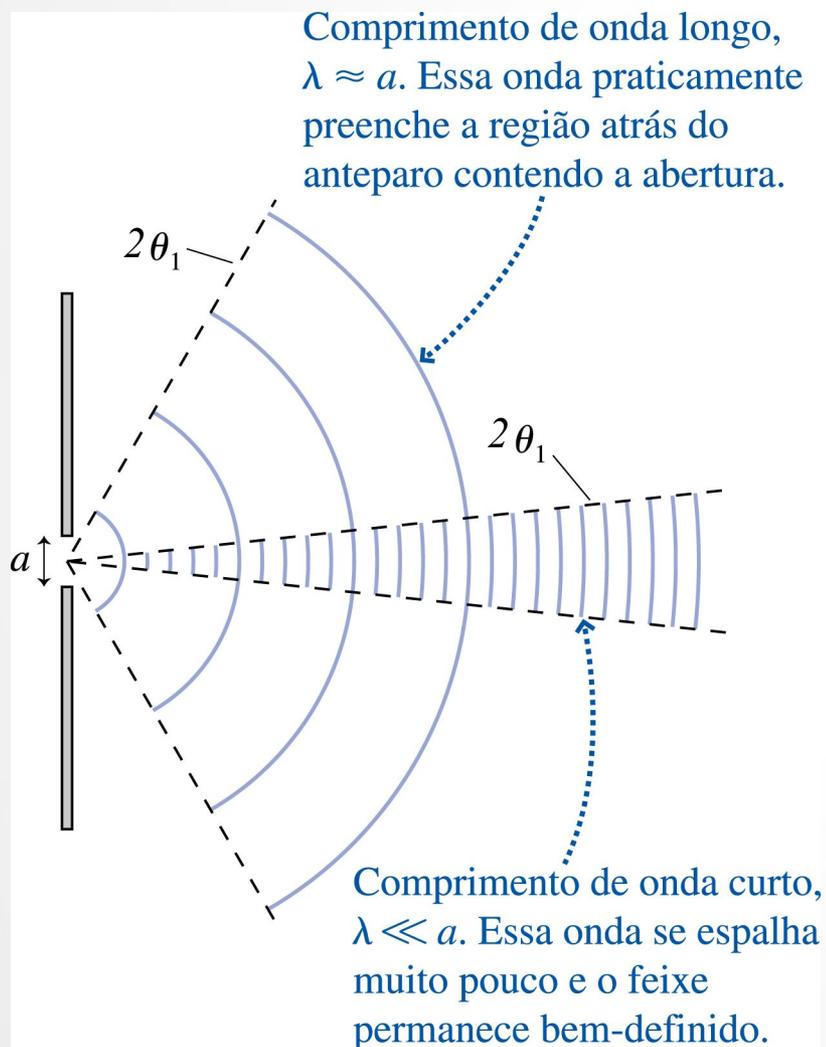


Quando a luz passa por um orifício ou fenda, sempre se observa a difração? → **NÃO** É preciso que a abertura seja nem muito grande, nem muito pequena comparado com o comprimento de onda



- 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



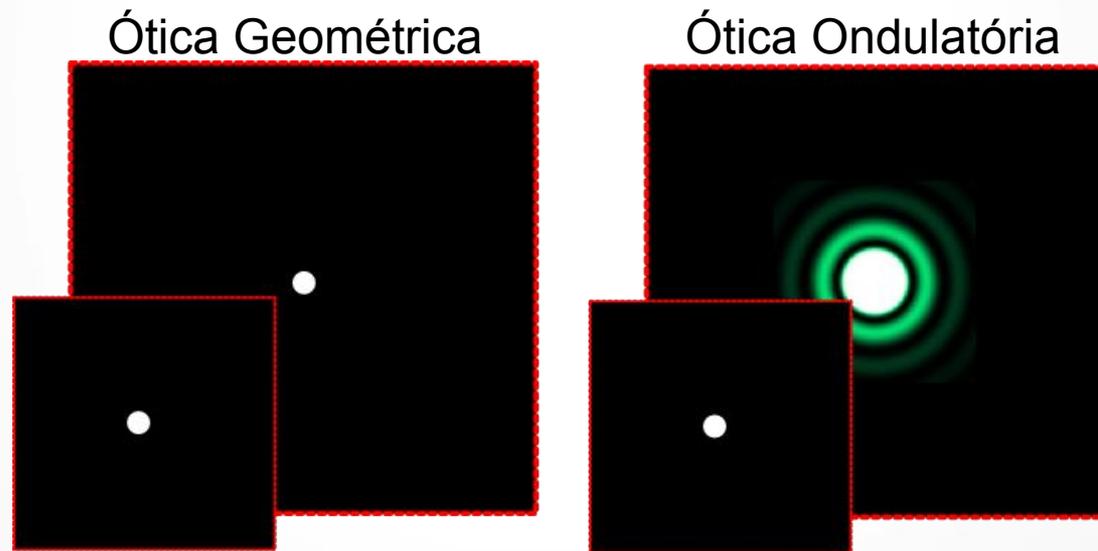
- Para fendas muito estreitas ($a \lesssim \lambda$): Lembrando que $\sin(\theta_1) = \lambda / a$, se $a \rightarrow \lambda$ então $\theta_1 \rightarrow \pi/2$, e a partir daí nossa análise não é mais válida.
- Nesse caso pode-se mostrar que as ondas simplesmente deixam de passar pela abertura (a maior 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

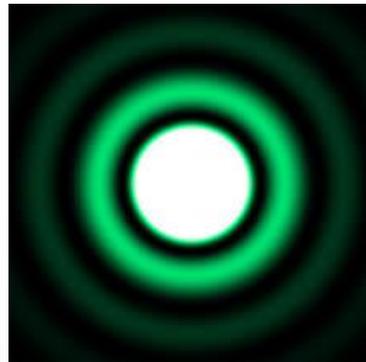
$> D$, é mais útil utilizar o modelo de ótica ondulatória



Teste Conceitual 22.8

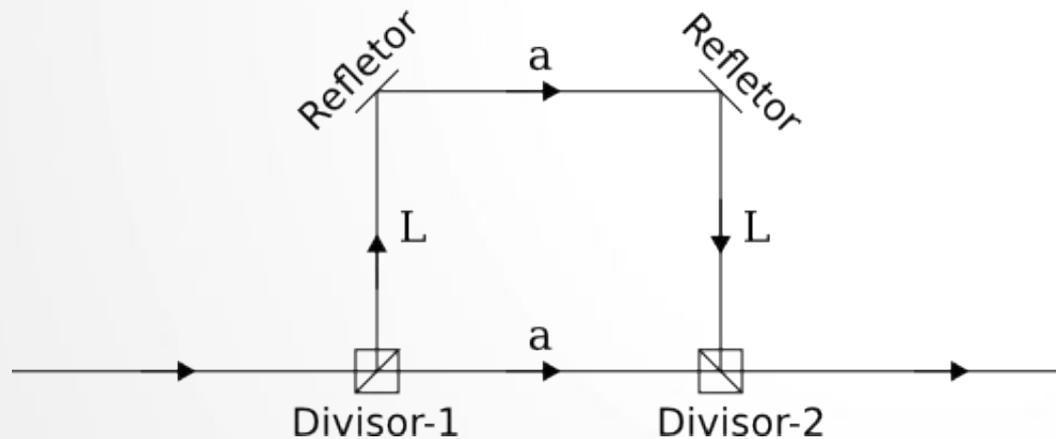
A figura mostra a intensidade de luz na tela de visualização atrás de uma abertura circular. Se o diâmetro da abertura aumentar:

- 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.



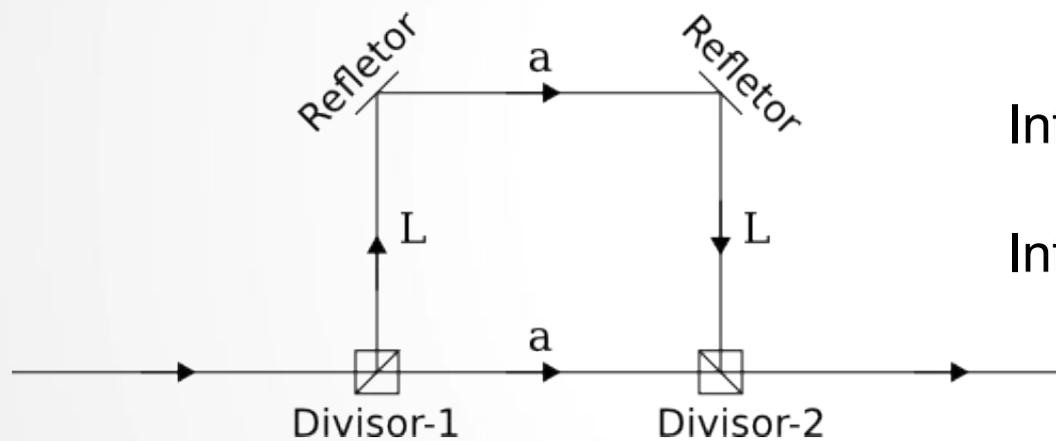
Interferômetros

Dispositivos utilizados para medidas ultra-precisas e para o controle do fluxo de luz



Interferômetros

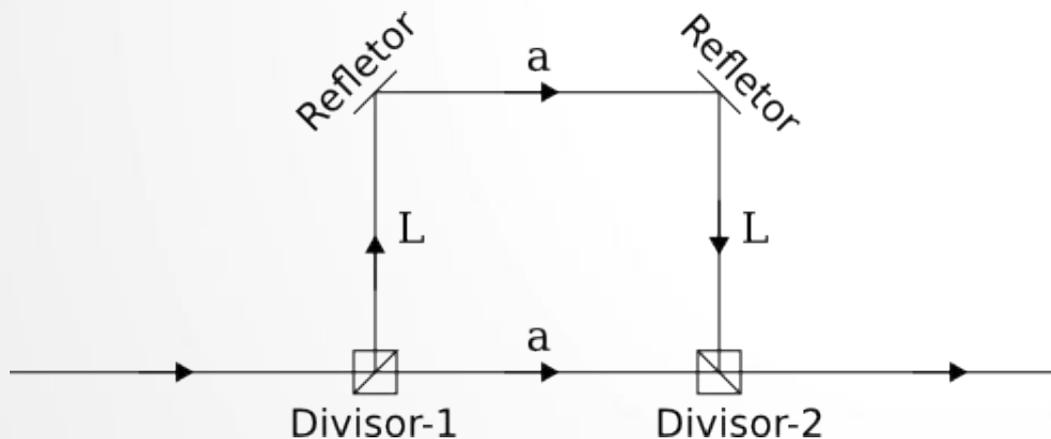
Dispositivos utilizados para medidas ultra-precisas e para o controle do fluxo de luz



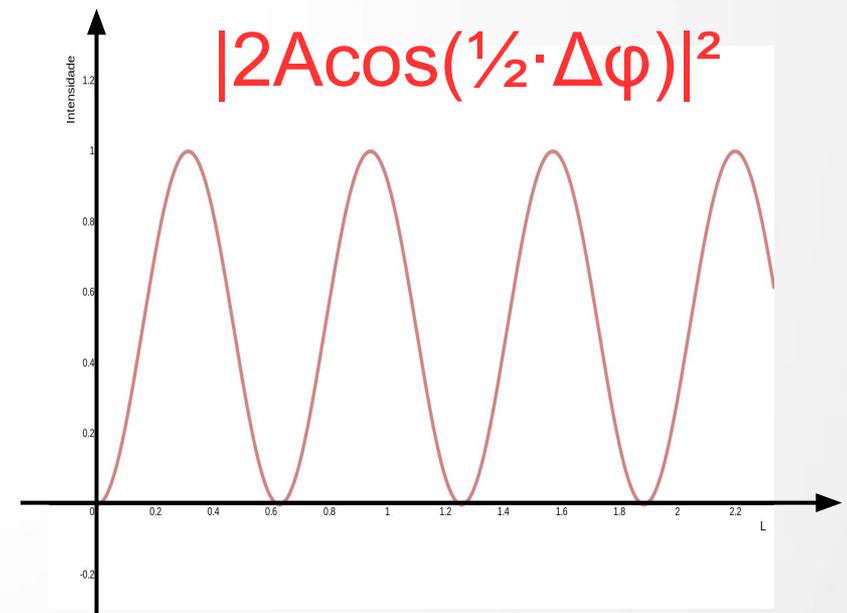
Int. Construtiva: $2L = m\lambda$
Int. Destrutiva: $2L = (m + \frac{1}{2})\lambda$
($m = 0, 1, 2, \dots$)

Interferômetros

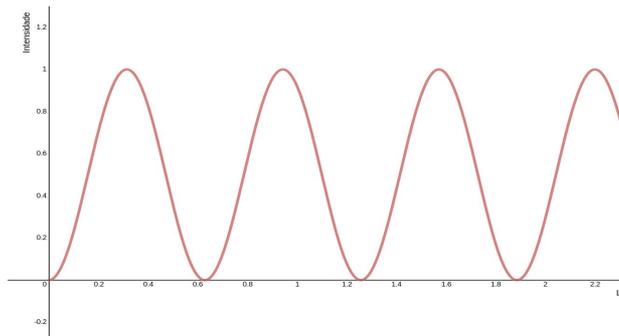
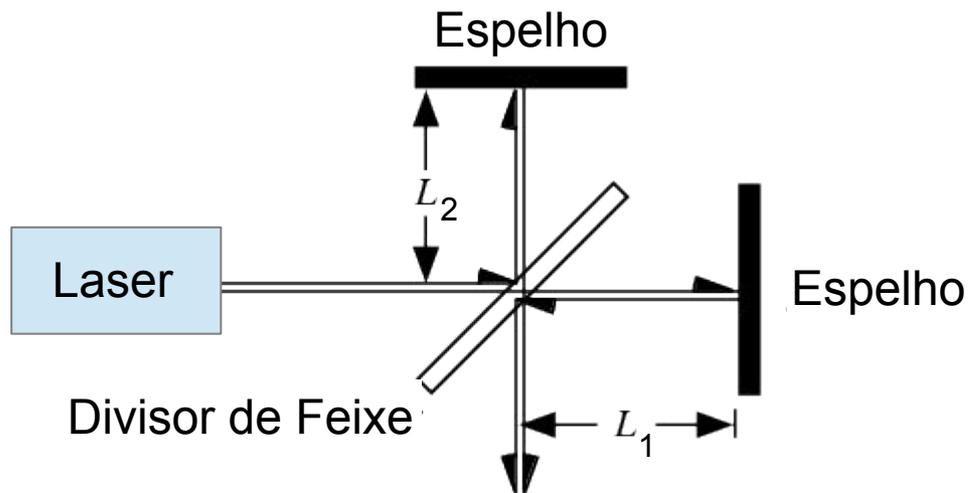
Dispositivos utilizados para medidas ultra-precisas e para o controle do fluxo de luz



padrão de intensidade na saída



Interferômetro de Michelson



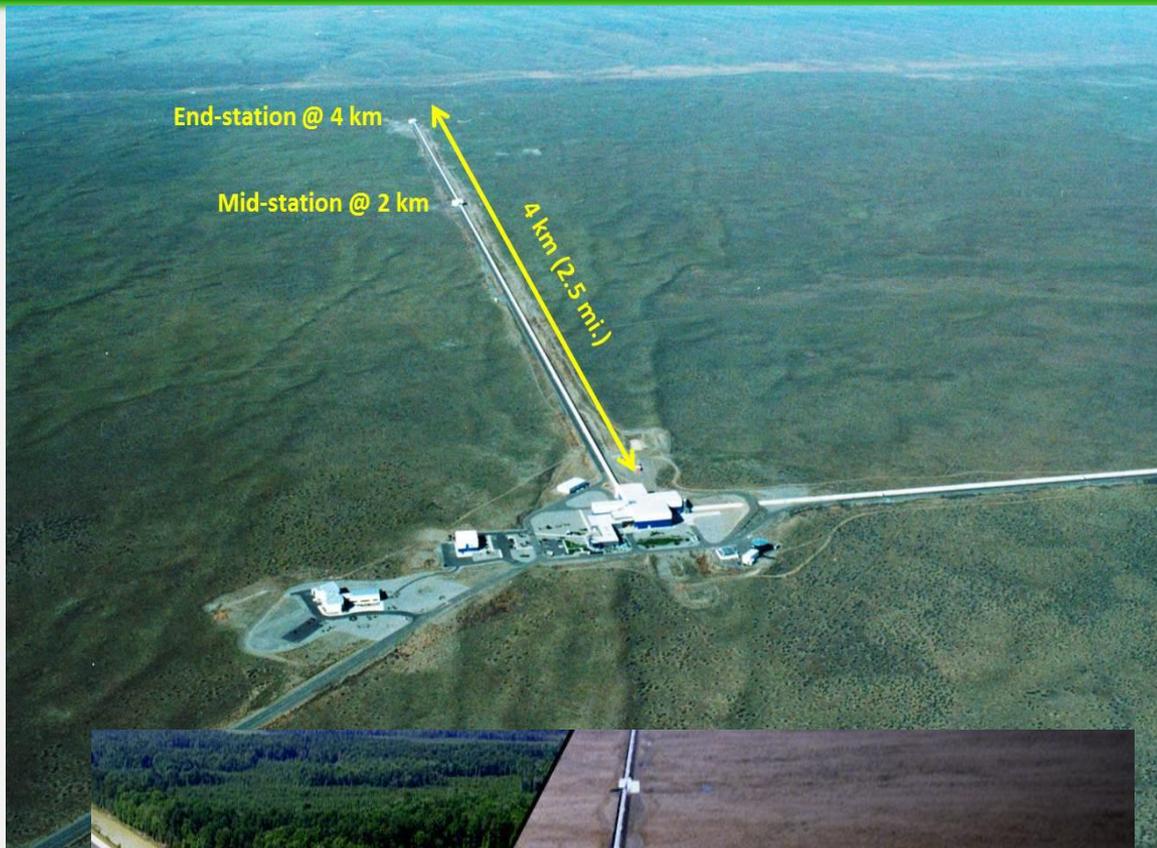
$$|2A \cos(\frac{1}{2} \cdot \Delta\phi)|^2$$

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

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)

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 3000 km 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