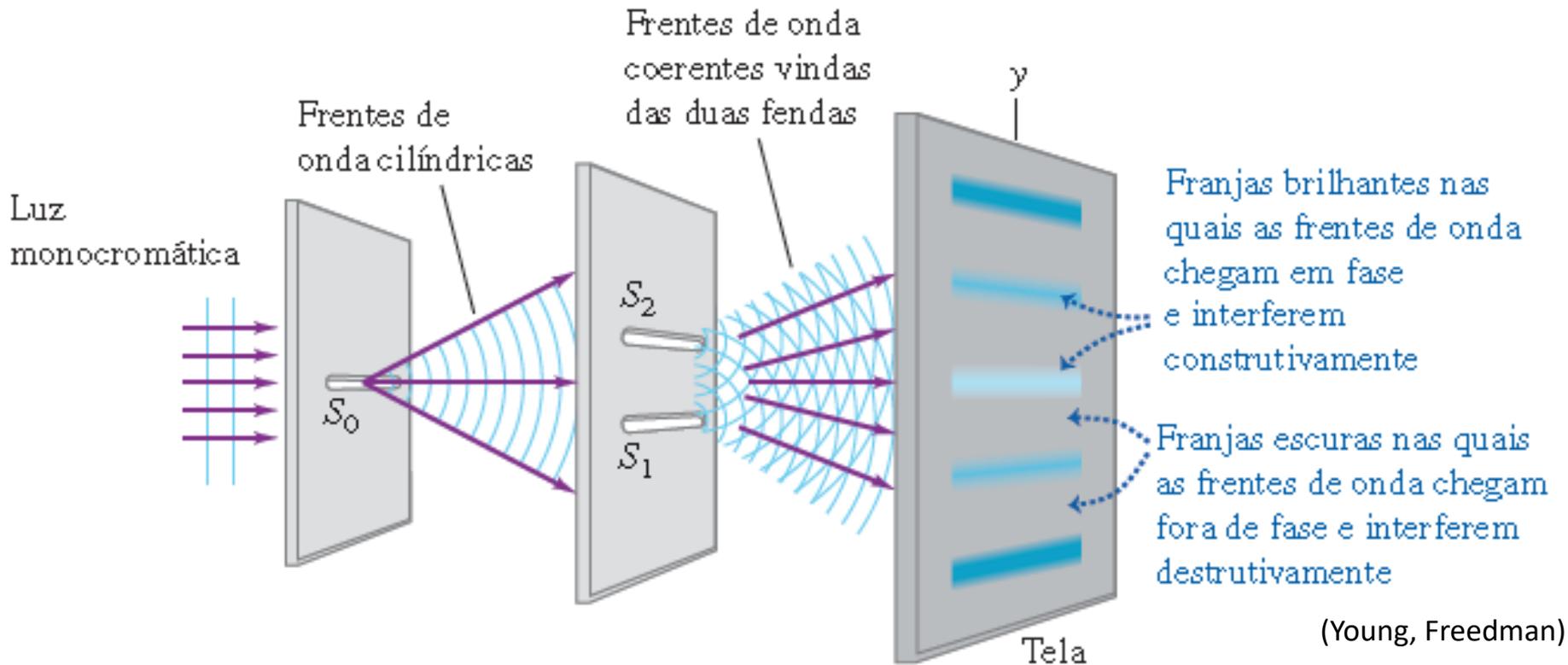


A luz como onda

O fenômeno da interferência de ondas



O experimento de Young

(Aula passada)

(Aula 2) Princípio de Huygens: 1678

Luz como onda

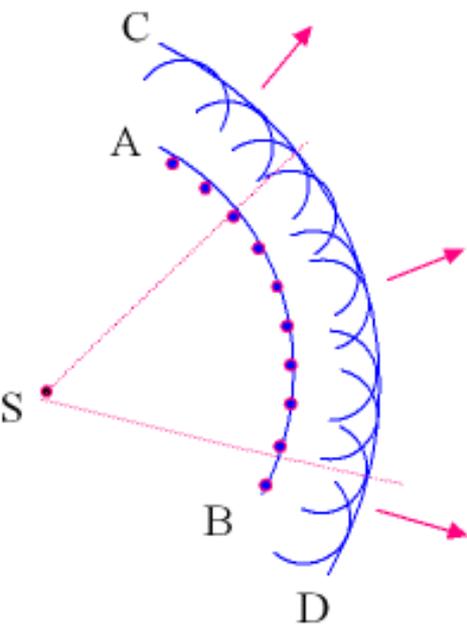
Todos os pontos em uma frente de onda podem ser considerados como fontes pontuais para a produção de ondas esféricas secundárias.

Após um tempo t , a nova posição de uma frente de onda é a superfície tangente a essas ondas esféricas secundárias.

(Aula passada)

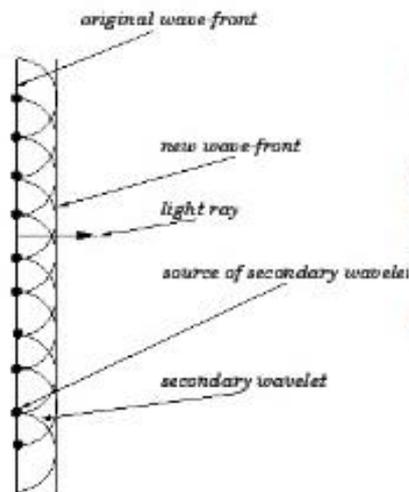
(Aula 2) Princípio de Huygens: 1678

Luz como onda



Huygens' Principle:

Each wavefront is the envelope of the wavelets. Each point on a wavefront acts as an independent source to generate wavelets for the next wavefront. AB and CD are two wavefronts.



Steps in how to apply:

1. Start anywhere of the original wave-front.
2. Draw a circle with any radius.
3. Repeat for the rest of the points you choose with the same radius.
4. You now have your new wave-front

Interferência e difração são os fenômenos importantes que distinguem as ondas das partículas.* A interferência é a formação de um padrão de intensidade permanente por duas ou mais ondas que se superpõem no espaço. A difração é o desvio das ondas em torno de bordas que ocorre quando uma porção de uma frente de onda é bloqueada por uma barreira ou obstáculo.

(Tipler, Mosca, Física Para Cientistas e Engenheiros, Vol 2, Cap 33)

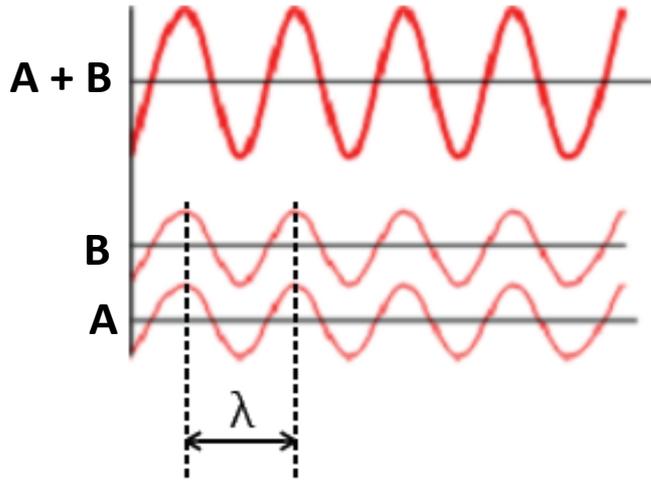
(Aula passada)

Ondas interferem quando se encontram!

Duas ondas em fase



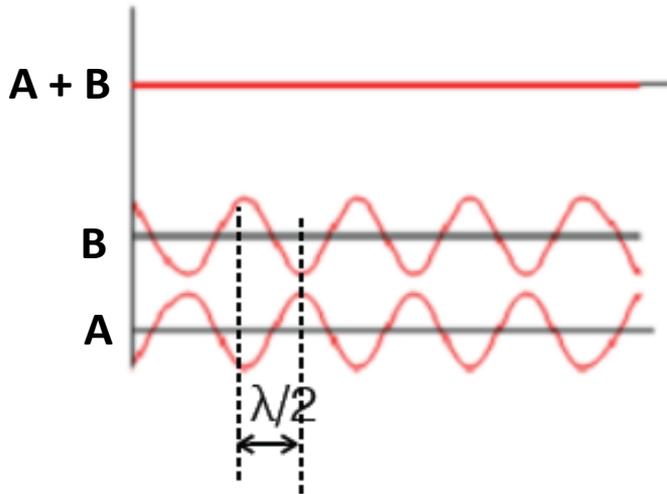
Interferência construtiva



Duas ondas fora de fase



Interferência destrutiva



(Aula passada)

Experimento com duas fontes iguais, coerentes.

Condições para interferência construtiva e destrutiva

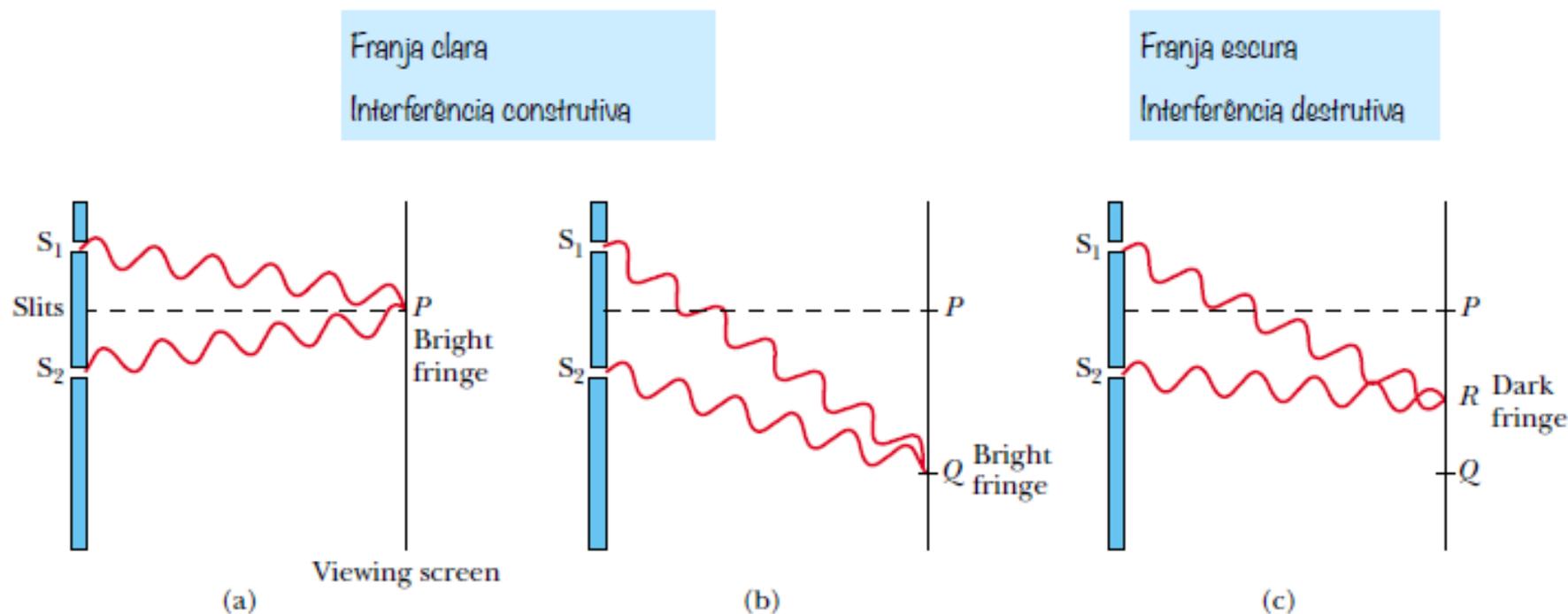


Figure 37.4 (a) Constructive interference occurs at point P when the waves combine. (b) Constructive interference also occurs at point Q . (c) Destructive interference occurs at R when the two waves combine because the upper wave falls half a wavelength behind the lower wave. (All figures not to scale.)

Coerência

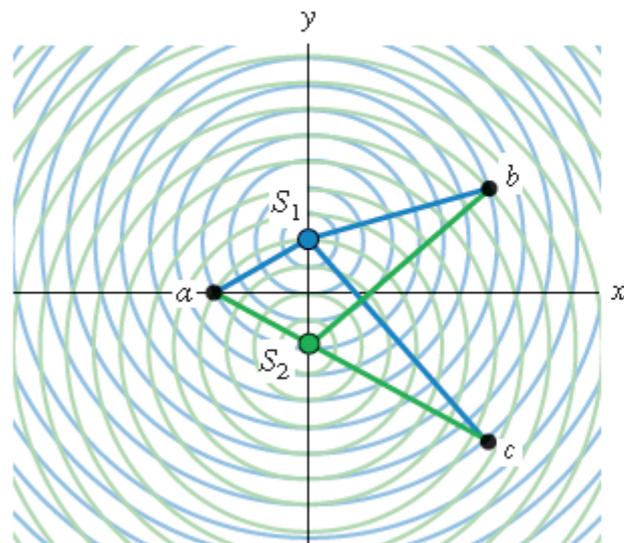
Diz-se que duas ou mais ondas são coerentes se têm a **mesma frequência e comprimento de onda**, e a **diferença de fase entre elas não varia no tempo**

Frequência da luz $\sim 10^{14} \text{ s}^{-1}$

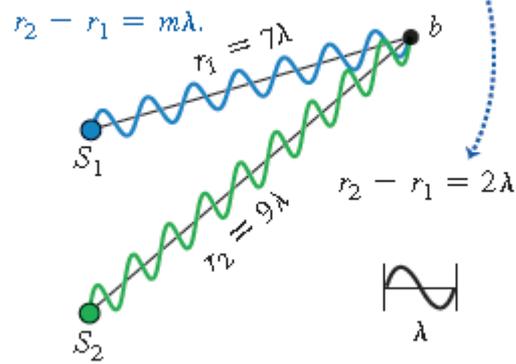
Os campos elétrico e magnético oscilam $\sim 10^{14}$ vezes em 1 s!

O que enxergamos é uma média no tempo!

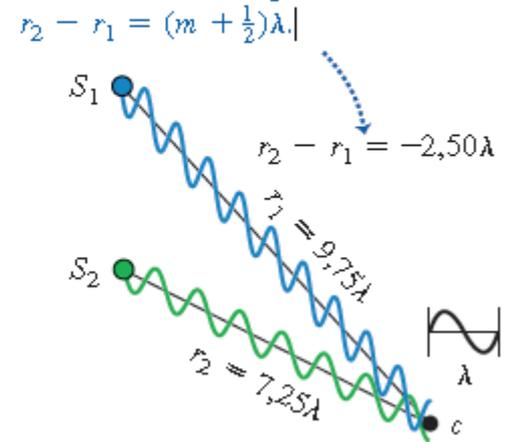
(a) Duas fontes de ondas coerentes separadas por uma distância 4λ



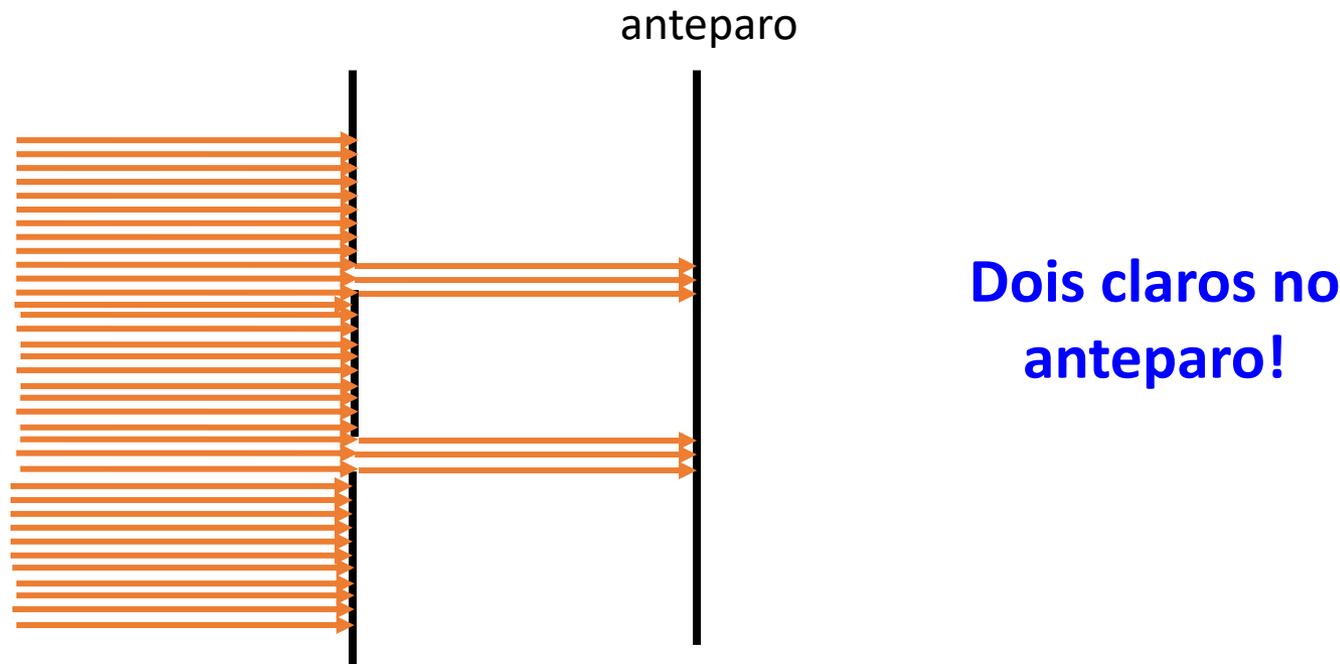
(b) Condições para a interferência construtiva: As ondas interferem construtivamente quando a diferença entre seus caminhos é um número inteiro de comprimentos de onda:



(c) Condições para a interferência destrutiva: As ondas interferem destrutivamente quando a diferença entre seus caminhos é um número semi-inteiro de comprimentos de onda:



Caso a luz fosse feita de **raios de luz**, ou de **partículas**, o que seria esperado no experimento da fenda dupla, isto é duas fontes emitindo luz?



E o que se observa??

Depende do **tamanho das fendas** e da **distância entre elas!**

Fendas grandes, como janelas: dois claros na parede.

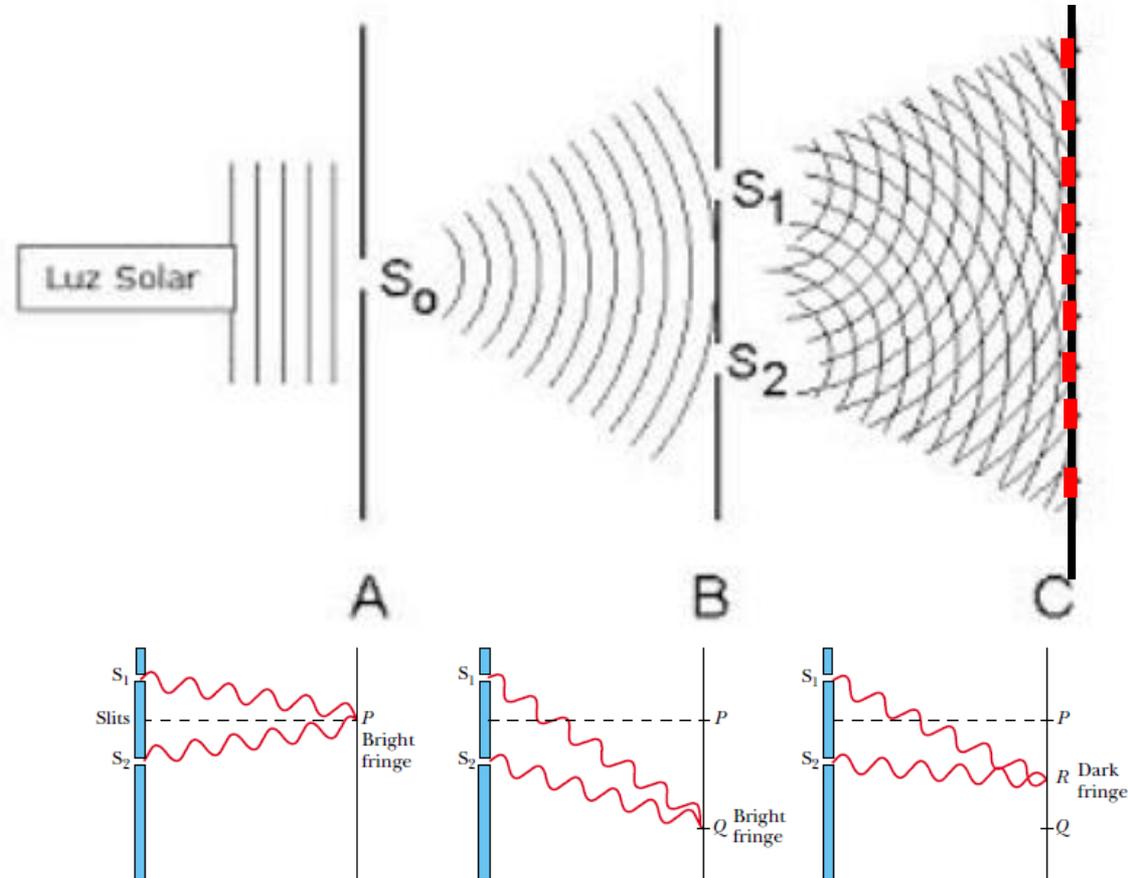
E fendas muuuito pequenas, muuuito próximas?????

Experimento de Young

Não viu dois claros! Viu muitos claros e escuros no anteparo!!



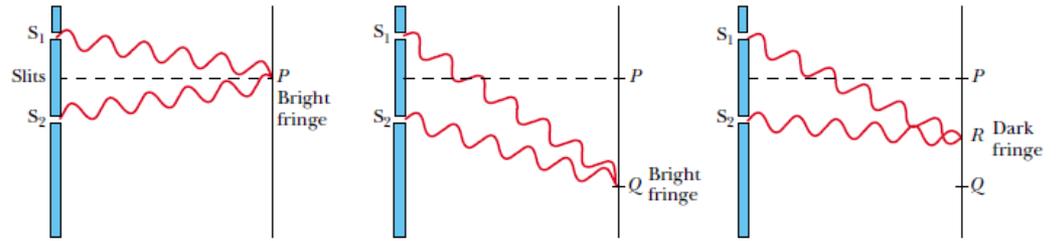
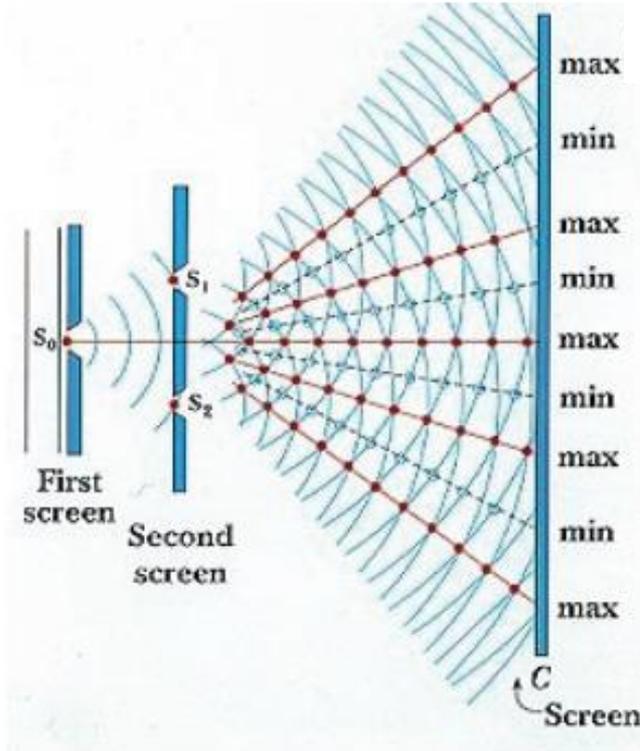
Thomas Young
(1773-1829)



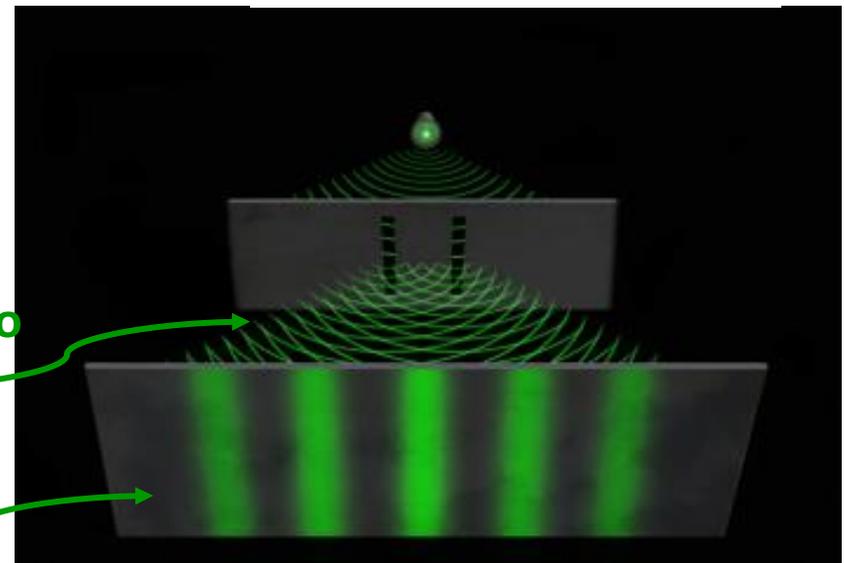
Em 1801 Thomas Young concluiu com seu experimento que a luz é uma onda!

(Aula passada)

Formação de franjas claras e escuras no experimento da fenda dupla



ilustração



franjas de luz vistas em um anteparo

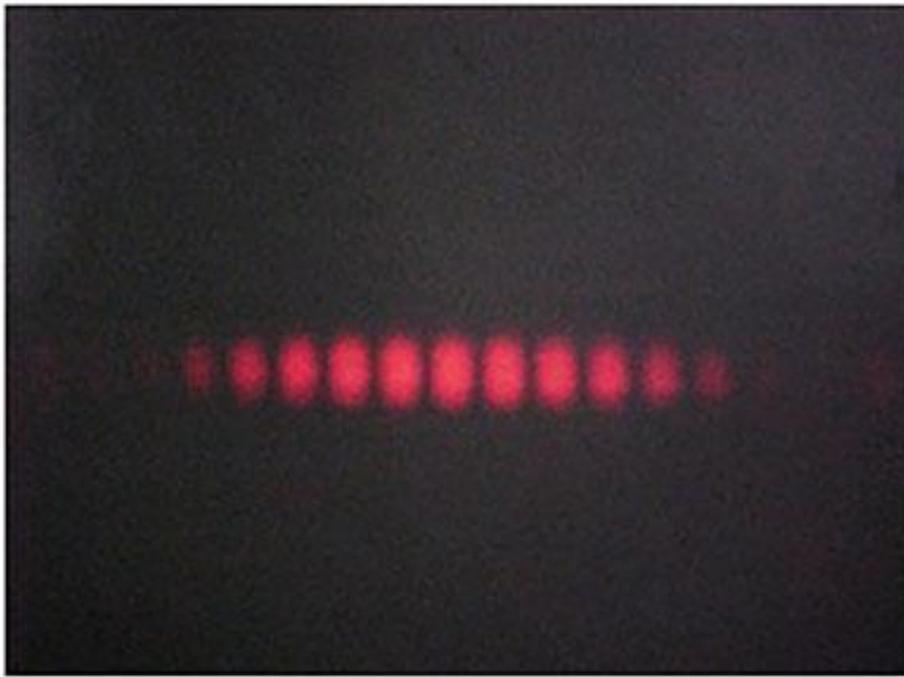
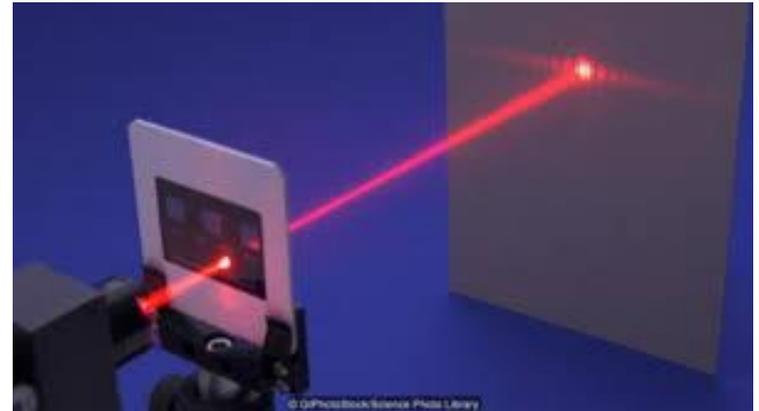


Figure 5 - Picture of the resulting pattern obtained in a typical double slit experiment with a red laser.

https://www.google.com/search?q=double+slits+experiment&sxsrf=ALeKk03imXwj4CxNslGhf_YcW7UnBsM-AA:1590092739816&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjzoaqH5cXpAhVhGbkGHZcUB6kQ_AUoAXoECA4QAw&biw=1803&bih=835#imgrc=TG6QMotYUbgHvM



Vejam estes filmes! Estão em inglês, vejam quantas vezes precisarem.

<https://www.khanacademy.org/science/physics/light-waves/interference-of-light-waves/v/youngs-double-split-part-1>

<http://tsgphysics.mit.edu/front/?page=demo.php&letnum=P%2010&show=0>

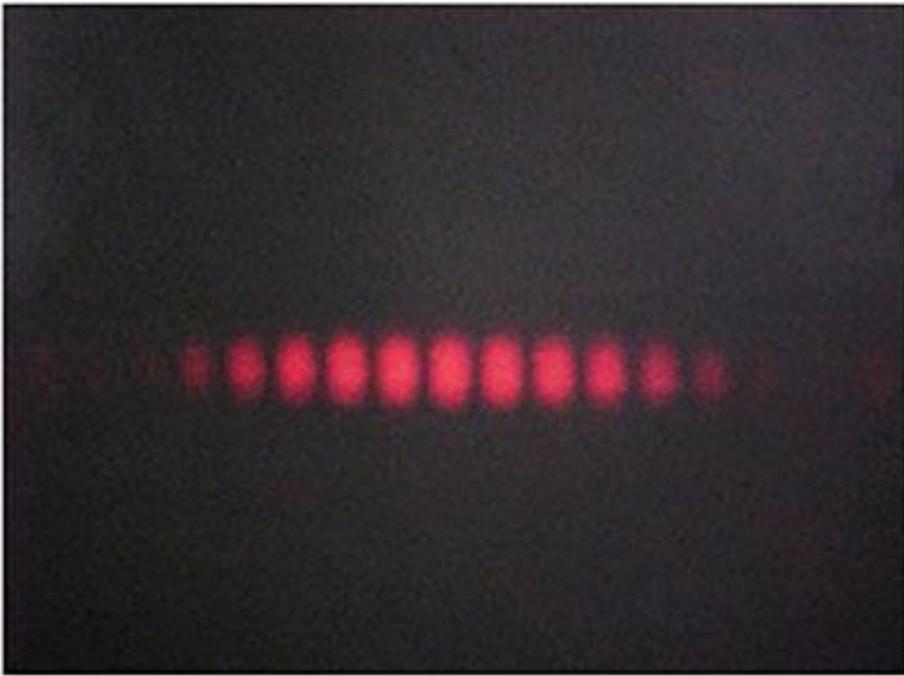
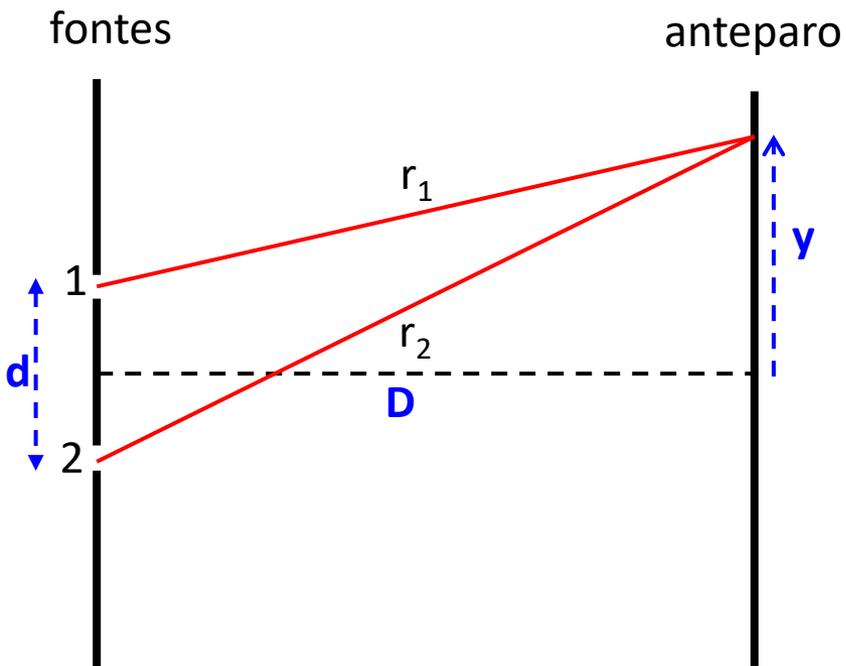


Figure 5 - Picture of the resulting pattern obtained in a typical double slit experiment with a red laser.

A distância entre os claros depende da **largura das fendas** e da **distância entre elas!**

Como??

Vamos ver como depende da **distância entre as fendas**



Máximos de intensidade
Interferência construtiva

$$r_2 - r_1 = \text{número inteiro de } \lambda$$

$$r_2 - r_1 = 0$$

$$r_2 - r_1 = \pm \lambda$$

$$r_2 - r_1 = \pm 2\lambda$$

$$r_2 - r_1 = \pm 3\lambda$$

$$r_2 - r_1 = \pm 4\lambda$$

.....

$$r_2 - r_1 = m \lambda \text{ sendo } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Vamos escrever as posições dos máximos e mínimos no anteparo em

função dos parâmetros:

λ , comprimento de onda da luz;

d , distância entre as fendas;

D , distância entre as fendas e o anteparo;

y , posição no anteparo

Mínimos (zeros) de intensidade
Interferência destrutiva

$$r_2 - r_1 = \text{número ímpar de } \lambda/2$$

$$r_2 - r_1 = \pm \lambda/2$$

$$r_2 - r_1 = \pm 3 \lambda/2$$

$$r_2 - r_1 = \pm 5 \lambda/2$$

$$r_2 - r_1 = \pm 7 \lambda/2$$

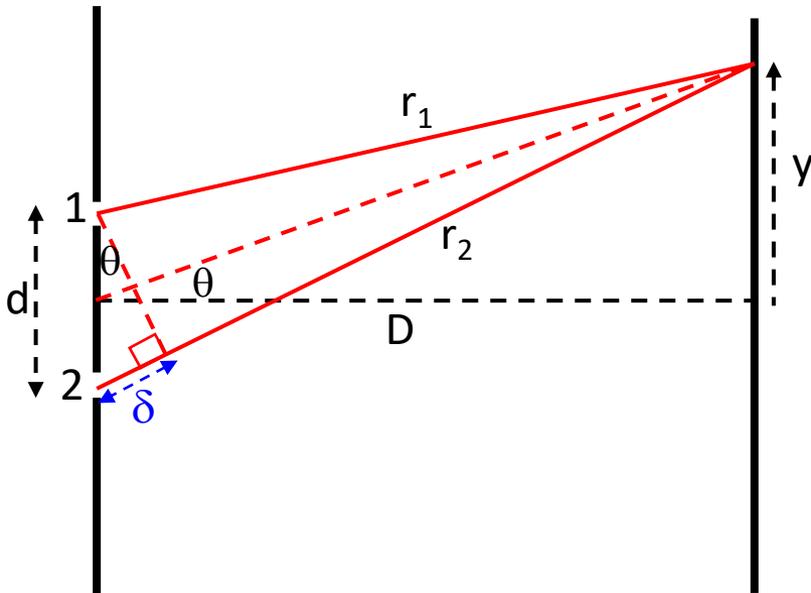
.....

$$r_2 - r_1 = n \lambda/2 \text{ sendo } n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$$

$$\text{Ou } r_2 - r_1 = (2n + 1) \lambda/2 \text{ sendo } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

fontes

anteparo



Máximos de intensidade

$$r_2 - r_1 = m \lambda \text{ sendo } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Mínimos de intensidade

$$r_2 - r_1 = n \lambda/2 \text{ sendo } n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$$

Máximos de intensidade

$$r_2 - r_1 \approx \delta \approx m \lambda \text{ sendo } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

$$\frac{dy_{max}}{D} = m \lambda \Rightarrow y_{max} = m \frac{D \lambda}{d}$$

sendo $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Aproximação de Fraunhofer

$$D \gg d$$

$$r_2 - r_1 \approx \delta$$

$$\text{sen} \theta = \frac{\delta}{d}$$

$$\text{tg} \theta = \frac{y}{D} \approx \text{sen} \theta$$

$$\frac{\delta}{d} \approx \frac{y}{D} \Rightarrow \delta \approx \frac{dy}{D}$$

Mínimos de intensidade

$$r_2 - r_1 \approx \delta \approx n \lambda/2 \text{ sendo } n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$$

$$\frac{dy_{min}}{D} = n \lambda/2 \Rightarrow y_{min} = n \frac{D \lambda}{2d}$$

sendo $n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$

Aproximação de Fraunhofer

$$L \gg d$$

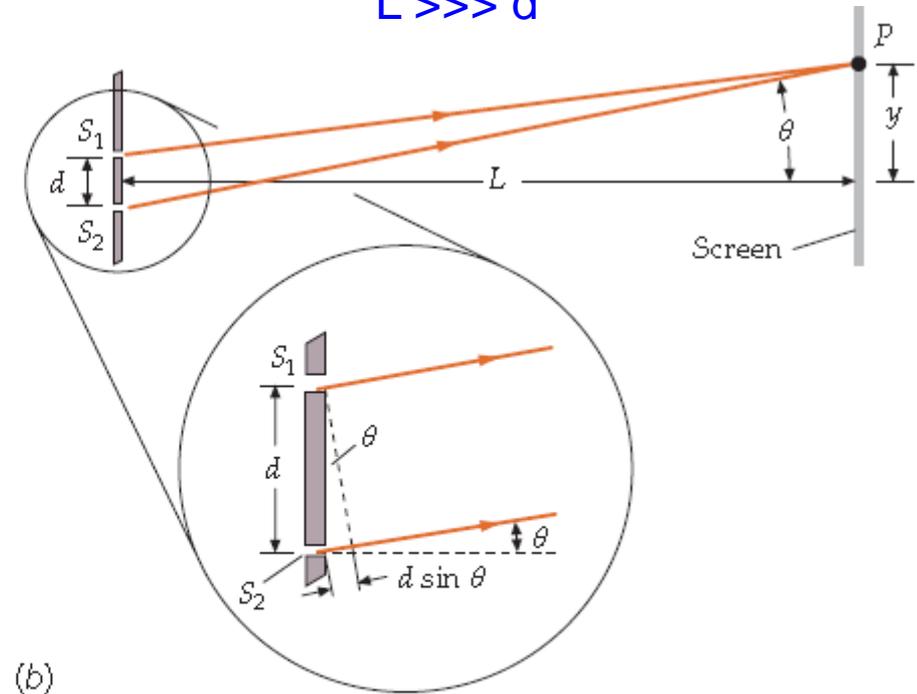
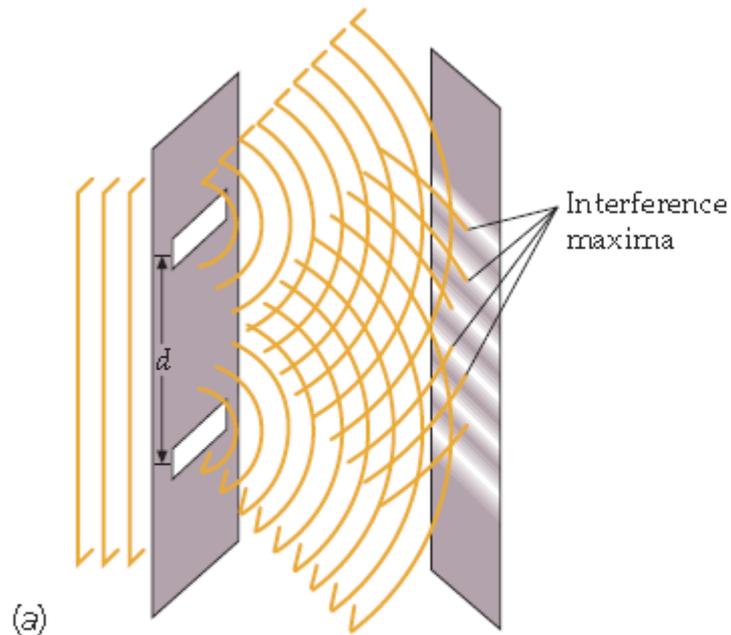
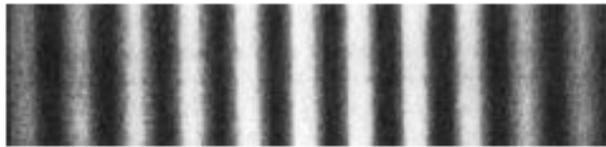
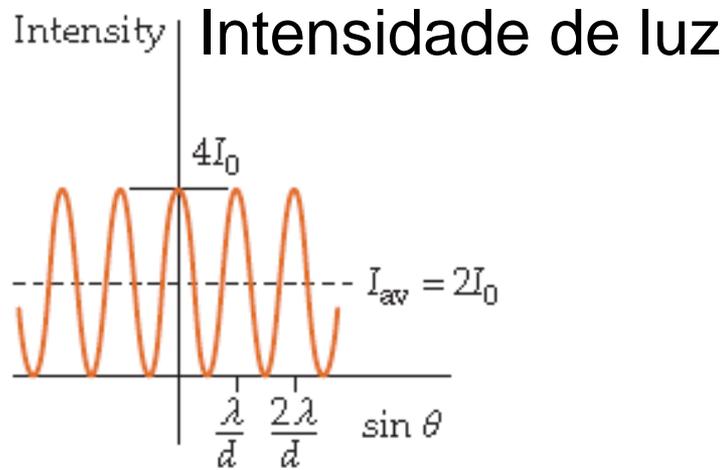


FIGURE 33-7 (a) Two slits act as coherent sources of light for the observation of interference in Young's experiment. Cylindrical waves from the slits overlap and produce an interference pattern on a screen. (b) Geometry for relating the distance y measured along the screen to L and θ . When the screen is very far away compared with the slit separation, the rays from the slits to a point on the screen are approximately parallel, and the path-length difference between the two rays is $d \sin \theta$.

(Tipler, Mosca)



(a)



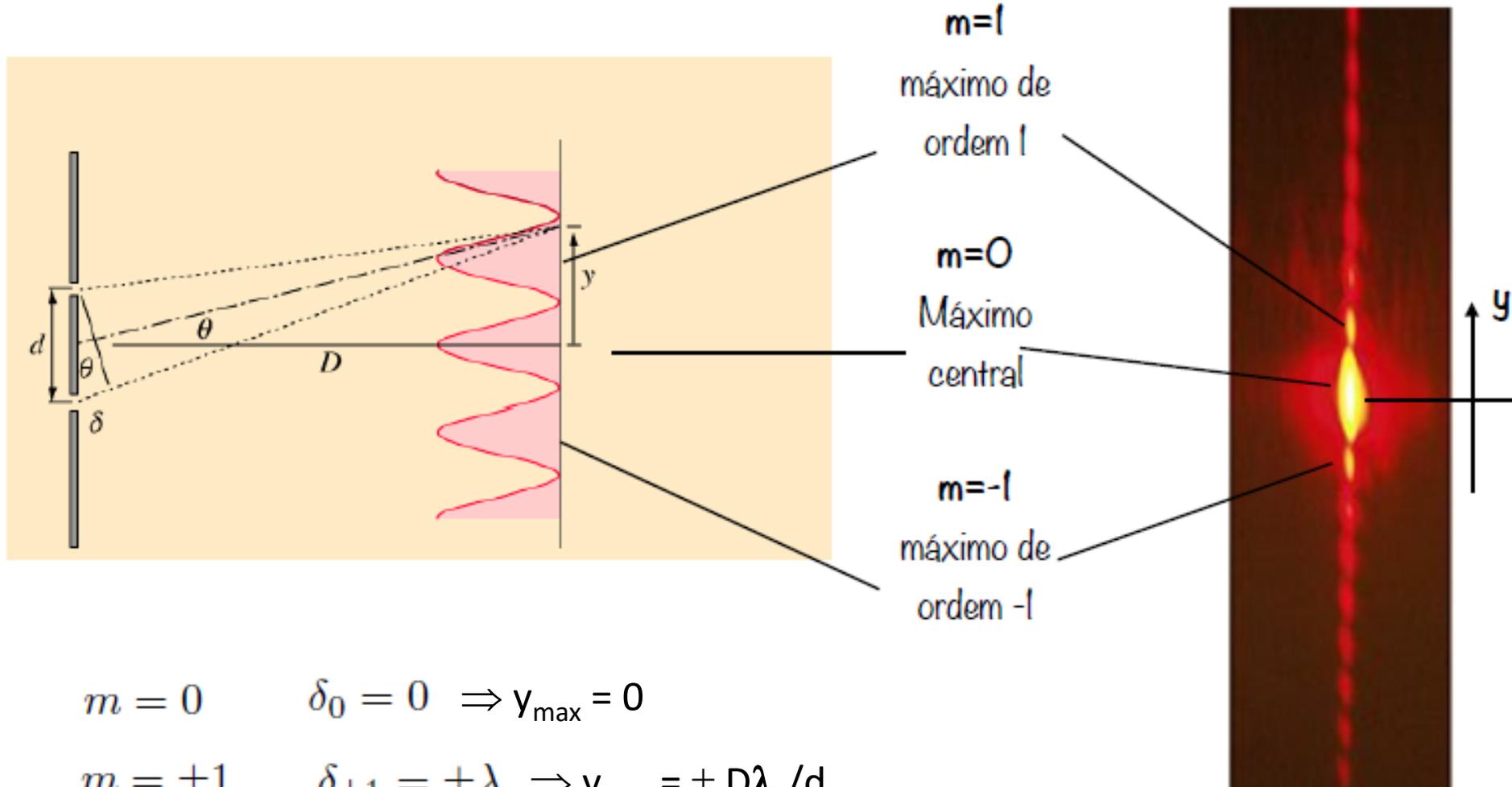
(b)

FIGURE 33-9 (a) The interference pattern observed on a screen far away from the two slits shown in Figure 33-7. (b) Plot of intensity versus $\sin \theta$. The maximum intensity is $4I_0$, where I_0 is the intensity due to each slit separately. The average intensity (dashed line) is $2I_0$.
(Courtesy of Michael Cagnet.)

(Tipler, Mosca)

$$\delta = \frac{dy_{\max}}{D} = m\lambda \Rightarrow y_{\max} = m \frac{D\lambda}{d} \quad \text{sendo } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Interferência construtiva = franja clara = máximos de intensidade de luz



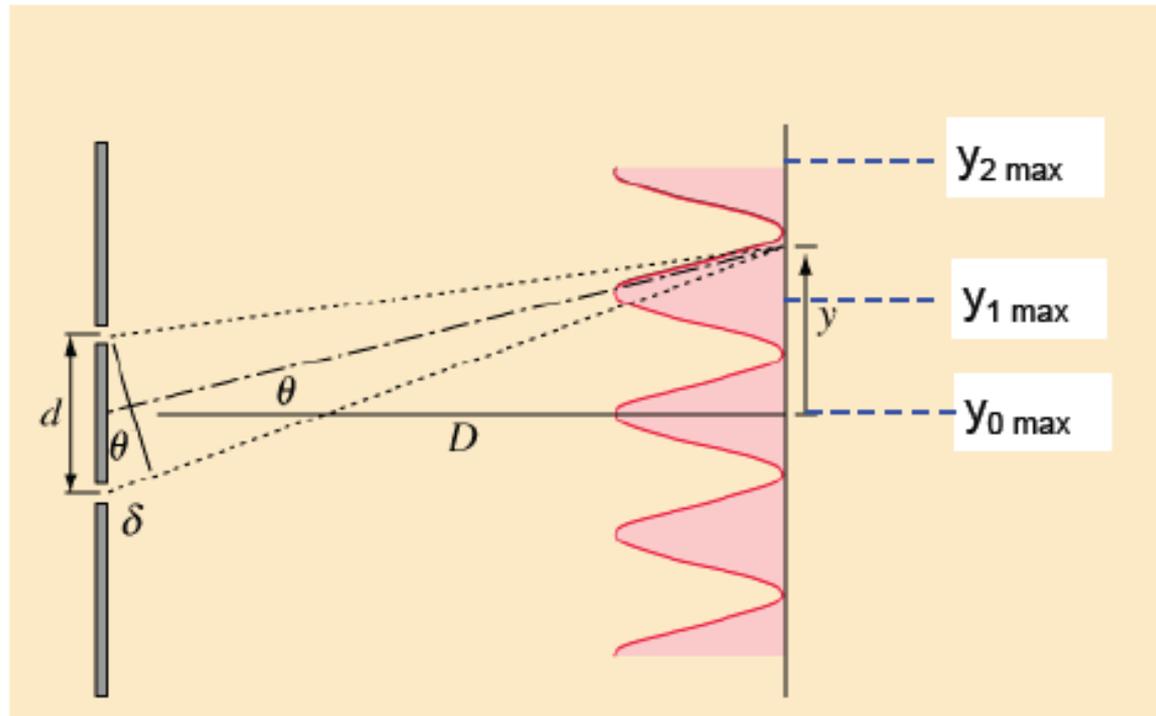
$$m = 0 \quad \delta_0 = 0 \Rightarrow y_{\max} = 0$$

$$m = \pm 1 \quad \delta_{\pm 1} = \pm \lambda \Rightarrow y_{\max} = \pm D\lambda / d$$

$$m = \pm 2 \quad \delta_{\pm 2} = \pm 2\lambda \Rightarrow y_{\max} = \pm 2D\lambda / d$$

Posição dos máximos no eixo y

$$\delta = m\lambda = \frac{dy_{max}}{D} \quad m=0,1,2,3,.. \quad \longrightarrow \quad y_{max} = m \frac{D\lambda}{d}$$



$$y_{2max} = 2 \frac{D\lambda}{d}$$

$$y_{1max} = \frac{D\lambda}{d}$$

$$y_0 = 0$$

distância entre dois máximos vizinhos $\longrightarrow \Delta y_{max} = \frac{D\lambda}{d}$

- ✓ inversamente proporcional a d
- ✓ proporcional a λ

distância entre dois
máximos vizinhos



$$\Delta y_{max} = \frac{D\lambda}{d}$$

- ✓ inversamente proporcional a d
- ✓ proporcional a λ

O que acontece quando $d \gg \lambda$

Distância entre as fendas \gg comprimento de onda
da radiação?

Δy_{max} muuuito pequeno \Rightarrow não se distingue claros, ficam muito juntos!

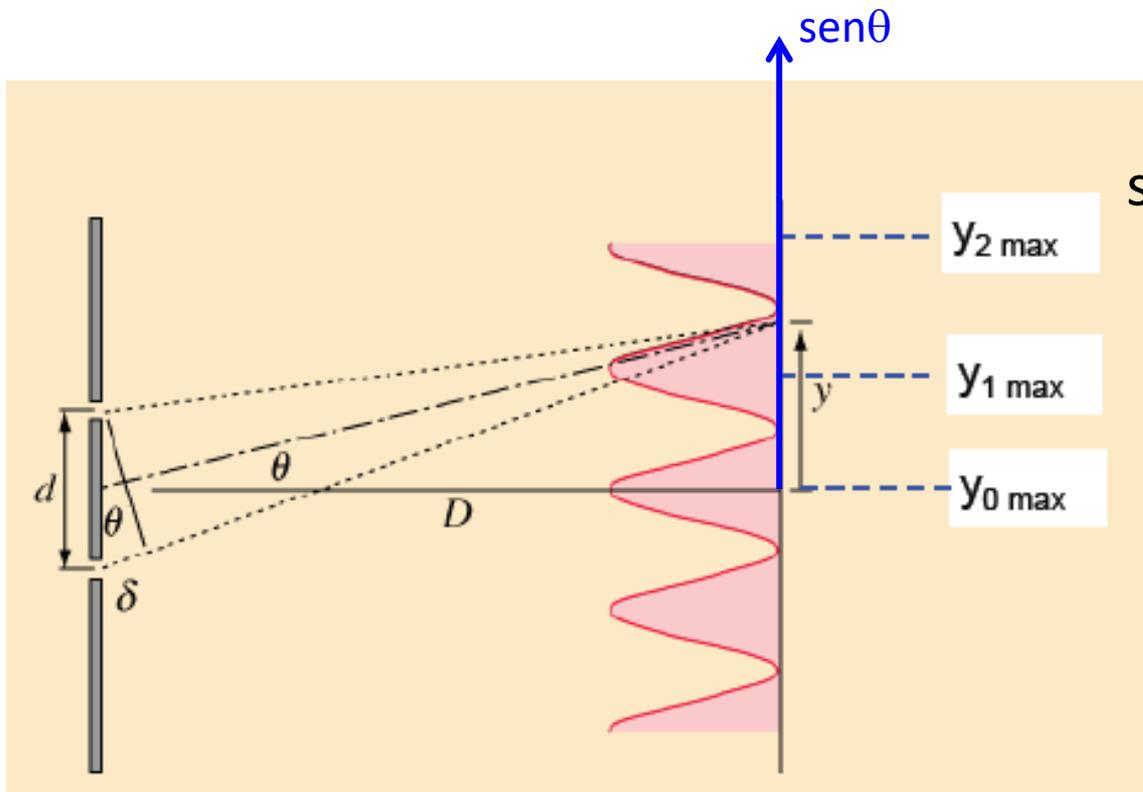
O que acontece quando $d \ll \lambda$

Distância entre as fendas \ll comprimento de onda
da radiação?

Δy_{max} muuuito grande \Rightarrow só se enxerga o máximo central!

Repare que a medida que d cresce a separação entre os claros decresce

Não vou discutir a fundo aqui, mas, reparem...



$$y_{max} = m \frac{D\lambda}{d}$$

$$\text{sen}\theta_{max} \approx \text{tg}\theta_{max} \approx \frac{y_{max}}{D} = m \frac{\lambda}{d}$$

$$m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Mas... $\text{sen}\theta$ tem que ser ≤ 1 não?

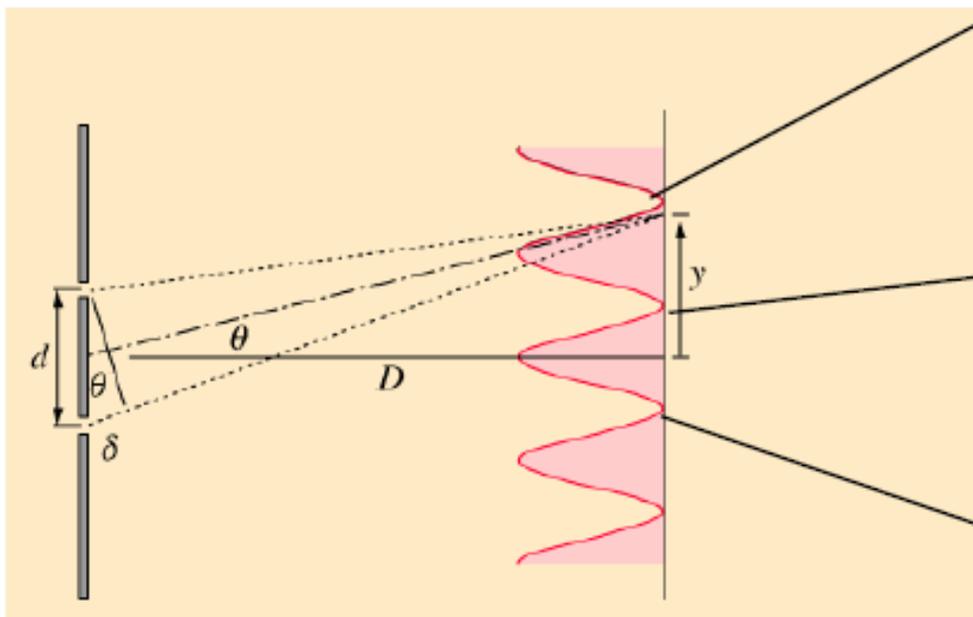
Então $\text{sen}\theta_{max} = \frac{y_{max}}{D} = m \frac{\lambda}{d}$ tem que ser menor ou igual a 1

Então $m \frac{\lambda}{d} \leq 1$ então $m \leq \frac{d}{\lambda}$

Por exemplo: se $d = 0,01 \text{ mm}$, e $\lambda = 500 \text{ nm}$, você só verá na tela claros, ou franjas, até $m = 20$

$$\delta = \frac{dy_{\min}}{D} = n \lambda / 2 \Rightarrow \dots y_{\min} = n \frac{D\lambda}{2d} \quad \text{sendo } n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$$

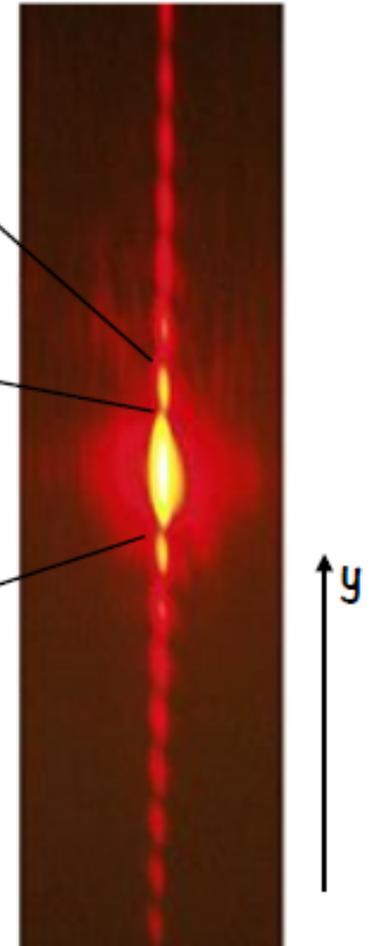
Interferência destrutiva = franja escura = mínimos de intensidade de luz



$m=3$
mínimo de
ordem 3

$m=1$
mínimo de
ordem 1

$m=-1$
mínimo de
ordem -1



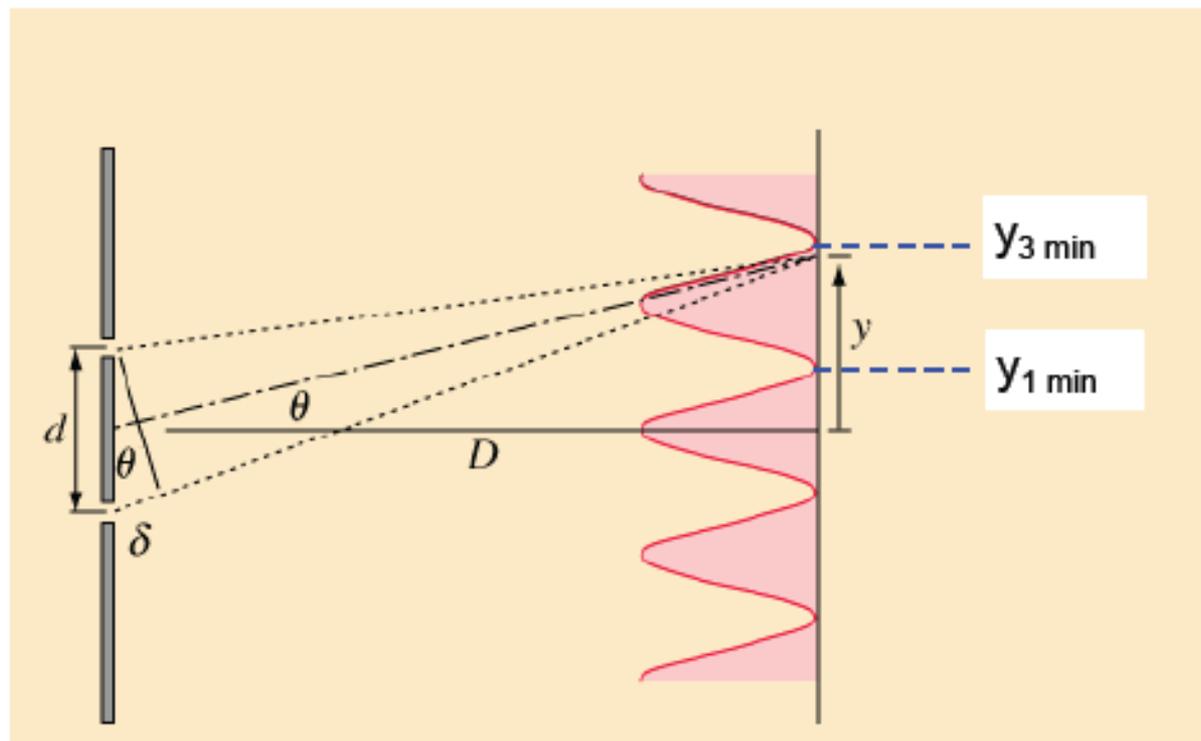
$$\delta_{\pm 1} = \pm \frac{\lambda}{2} \Rightarrow y_{\min} = D\lambda / 2d$$

$$\delta_{\pm 3} = \pm 3 \frac{\lambda}{2} \Rightarrow y_{\min} = \pm 3D\lambda / 2d$$

$$\delta_{\pm 5} = \pm 5 \frac{\lambda}{2} \Rightarrow y_{\min} = \pm 5D\lambda / 2d$$

Posição dos mínimos no eixo y

$$\delta = n \frac{\lambda}{2} = \frac{dy_{min}}{D} \quad n=1,3,5 \dots (\text{ímpar}) \quad \longrightarrow \quad y_{min} = n \frac{D\lambda}{2d}$$



$$y_{3min} = 3 \frac{D\lambda}{2d}$$

$$y_{1min} = \frac{D\lambda}{2d}$$

Distância entre dois
mínimos consecutivos

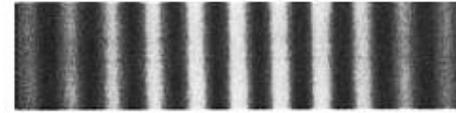
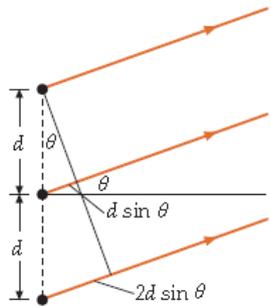
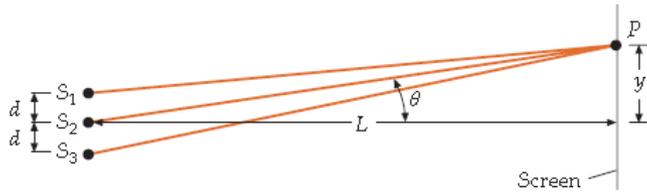


$$\Delta y_{min} = \frac{D\lambda}{d}$$

O que vemos:

$$\Delta y_{max} = \frac{D\lambda}{d}$$

E se no lugar de duas fendas/fontes, forem 3??



Two sources



Three sources

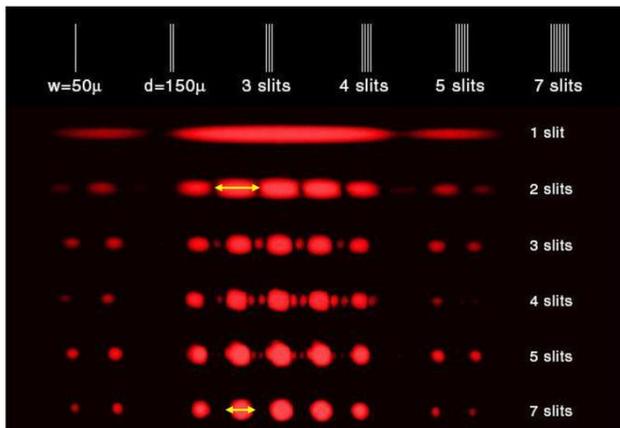
Claros mais definidos



Four sources

Claros ainda mais bem definidos

Muitas fendas



A largura diminui com o número de fendas!

É possível mostrar que com o aumento do número de fendas/fontes, aumenta a definição de cada franja clara:
Rede de Difração

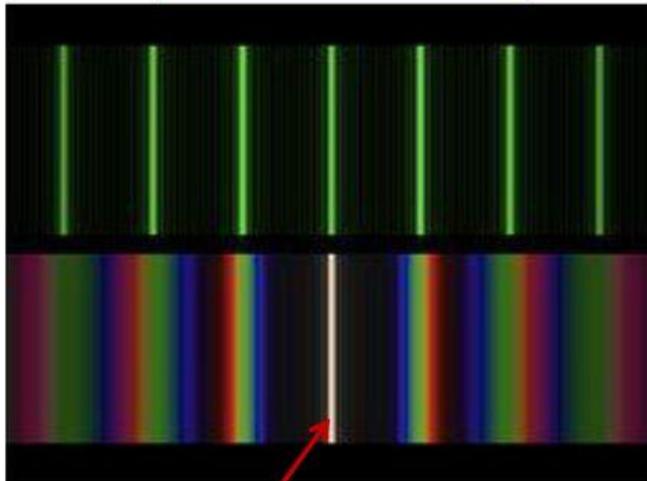
Rede de Difração

1º máximo

$$y_{\max} = \frac{D\lambda}{d}$$

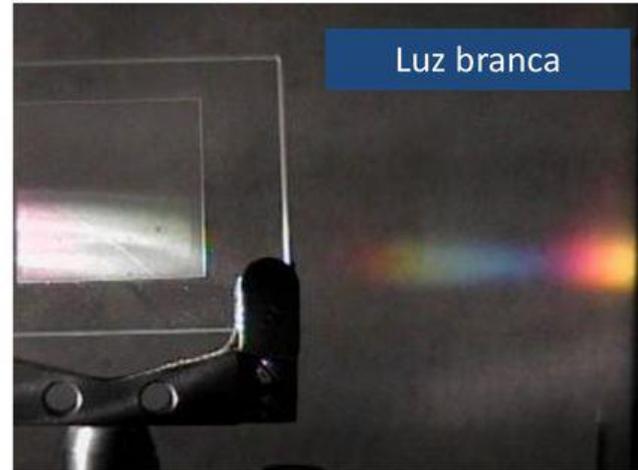
Comprimentos de onda e difração

Luz monocromática



Superposição de máximos

Luz branca



<http://labman.phys.utk.edu/phys136/modules/m9/diff.htm>

- Como obter uma imagem com uma boa “resolução” no espectro?
- Aplicações?

(<https://slideplayer.com.br/slide/15889946/>)

Exercícios para entregar

1. Duas fontes senoidais de micro-ondas, cujo comprimento de onda é 1,5 cm, estão no plano xy , uma sobre o eixo dos y , em $y = 15$ cm, e a outra sobre o eixo dos x , em $x = 3,0$ cm. Se as fontes estão em fase, elas chegarão em fase na origem? **Porque sim ou porque não?**

2. A figura mostra uma experiência de interferência com fenda dupla, na qual a distância entre as fendas é de 0,20 mm e a tela está a uma distância de 1,0 m das fendas. A terceira franja brilhante ($m = 3$) forma-se a uma distância de 9,49 mm da franja central. Calcule o comprimento de onda da luz usada.

