

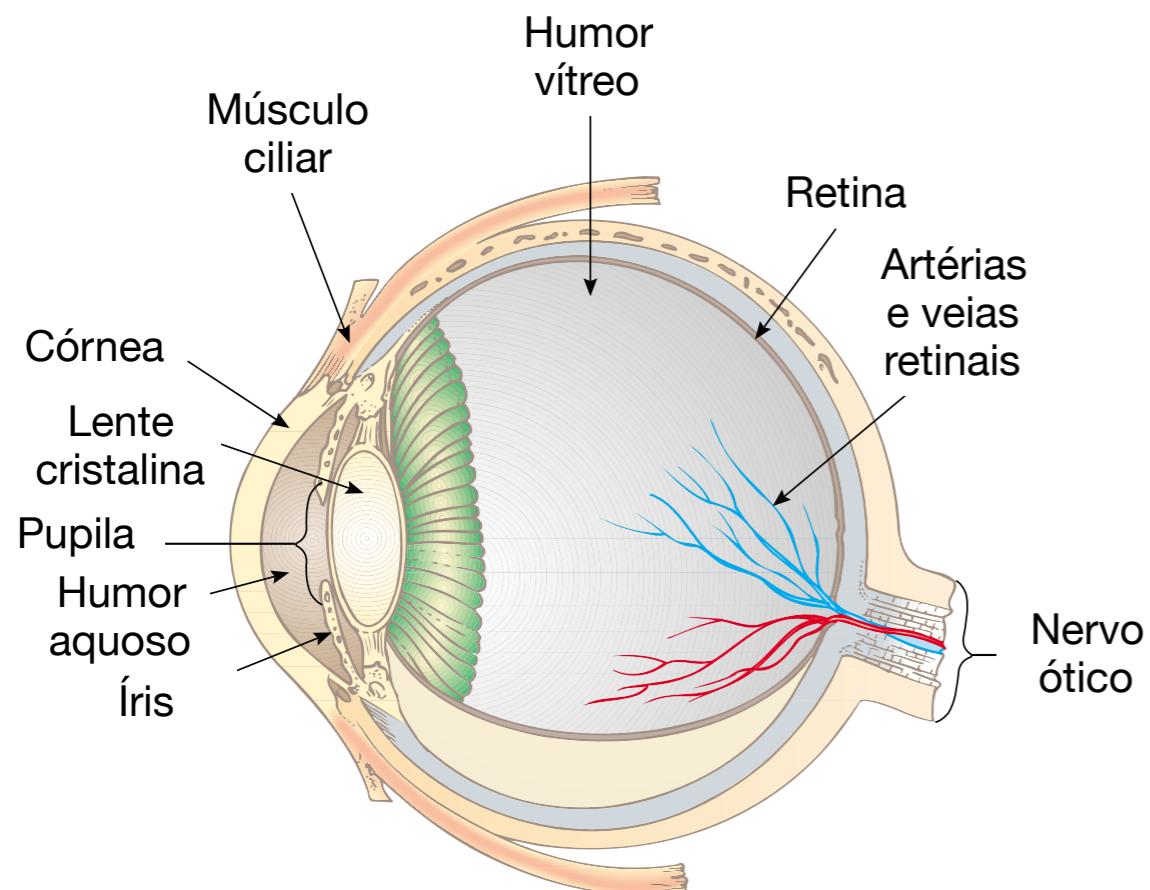
Física Geral I • FIS0703

Aula 12

02/11/2016

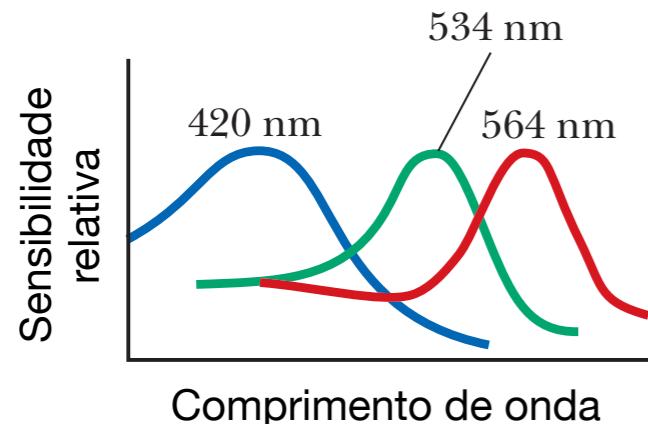
O olho humano

O olho funciona com o mesmo princípio como a câmera. Tem mecanismos complexos para controlar o foco e a quantidade da luz admitida.



- Luz entra na **córnea**, passa por líquido (**humor aquoso**), uma abertura (**íris**), e a **lente cristalina**.
- A **refração** é dominada pela primeira superfície ar-córnea (com filme de água); as partes interiores têm índices de refração parecidas.
- A íris é um diafragma muscular que controla o **diâmetro da pupila**. Abre ou fecha conforme a intensidade da luz incidente (aprox. f/2.8 – f/16).
- Músculos alteram **a forma da lente cristalina** para alterar a distância focal.
- A luz é focada na membrana de parede interior, a **retina**, com células fotorreceptoras (**bastonetes e cones**).

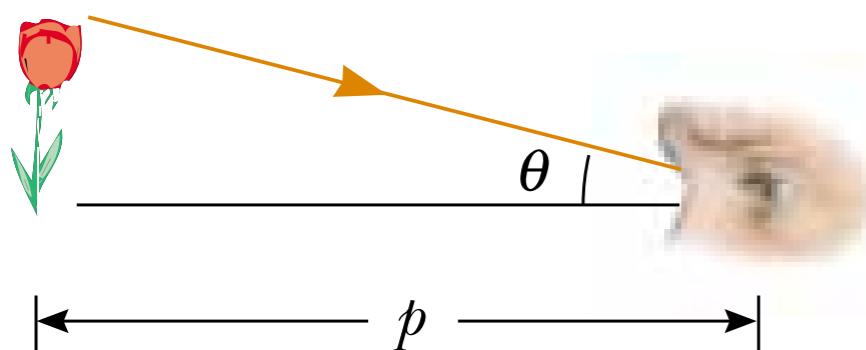
Três tipos de células cones



O olho saudável consegue focar imagens de objetos a distâncias entre infinito e ~ 25 cm (**o ponto próximo**).

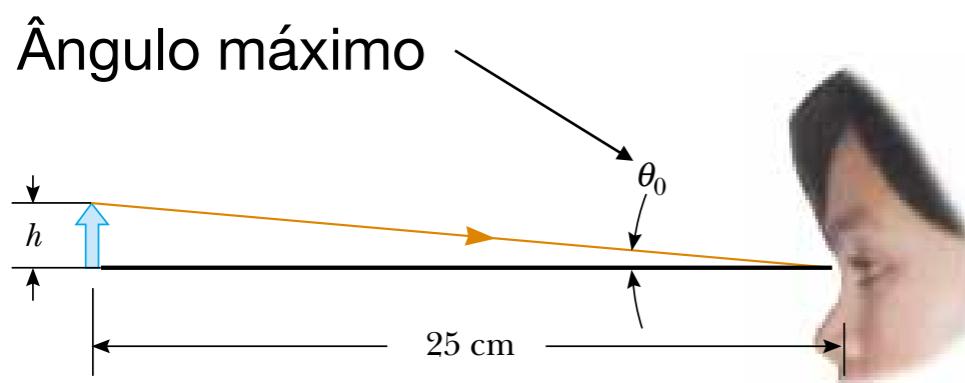
A lupa

Uma lupa simples consiste em uma lente convergente.

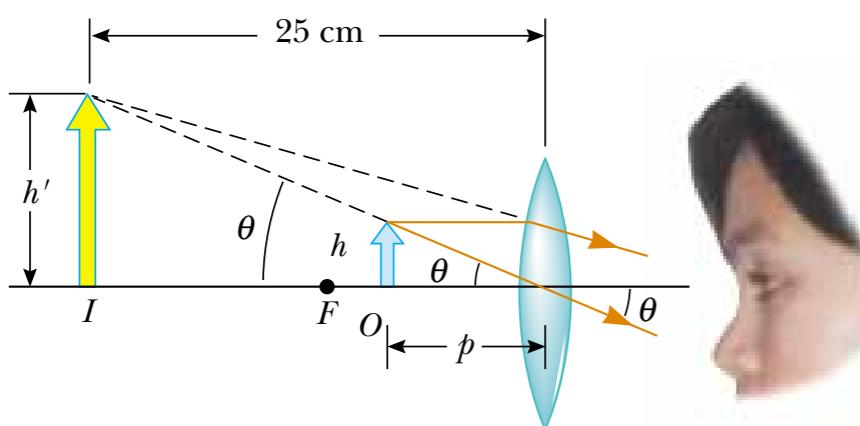


O tamanho da imagem formada na retina depende do ângulo θ subtendido no olho.

Quando o objeto se aproxima do olho, θ aumenta.



Mas o olho não consegue focar um objeto mais perto do que ~ 25 cm, o “ponto próximo”.



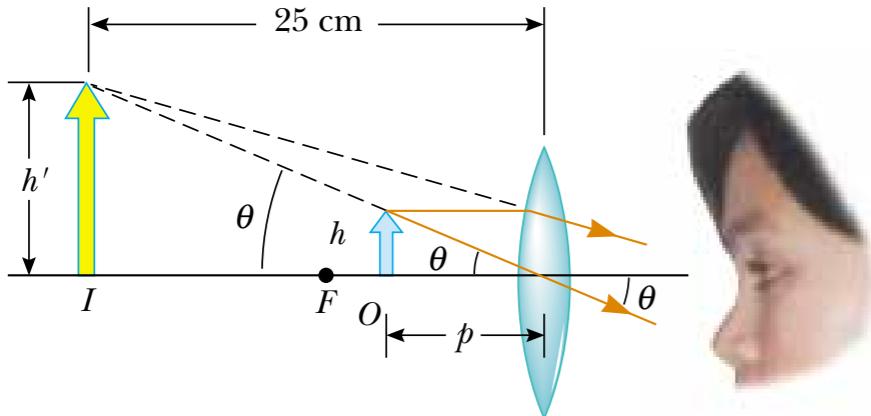
Para aumentar o ângulo coloca-se uma lente convergente em frente do objeto, a uma distância $p < f$.
A imagem é virtual, direita e ampliada.

$$m = \frac{\theta}{\theta_0}$$

Ampliação angular

A maior ampliação é obtida quando a imagem virtual se situa no ponto próximo: $q = -25$ cm

A lupa



$$m = \frac{\theta}{\theta_0}$$

Da equação das lentes obtém-se

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{-25 \text{ cm}} = \frac{1}{f}$$

$$p = \frac{25f}{25 + f} \quad (f \text{ em cm})$$

Aproximação para ângulos pequenos:

$$\tan \theta_0 \approx \theta_0 \approx \frac{h}{25}$$

$$\tan \theta \approx \theta \approx \frac{h}{p}$$

$$m_{\max} = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{h/p}{h/25} = \frac{25}{p} = \frac{25}{25f/(25+f)}$$

$$m_{\max} = 1 + \frac{25}{f} \quad \text{Ampliação máxima}$$

Mas o olho está mais **relaxado** quando a imagem é formada no infinito. Para isso o objeto tem de estar no **ponto focal**.

Com isso

$$\theta_0 \approx \frac{h}{25} \quad \theta \approx \frac{h}{f}$$

Ampliação:

$$m_{\min} = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{25}{f}$$

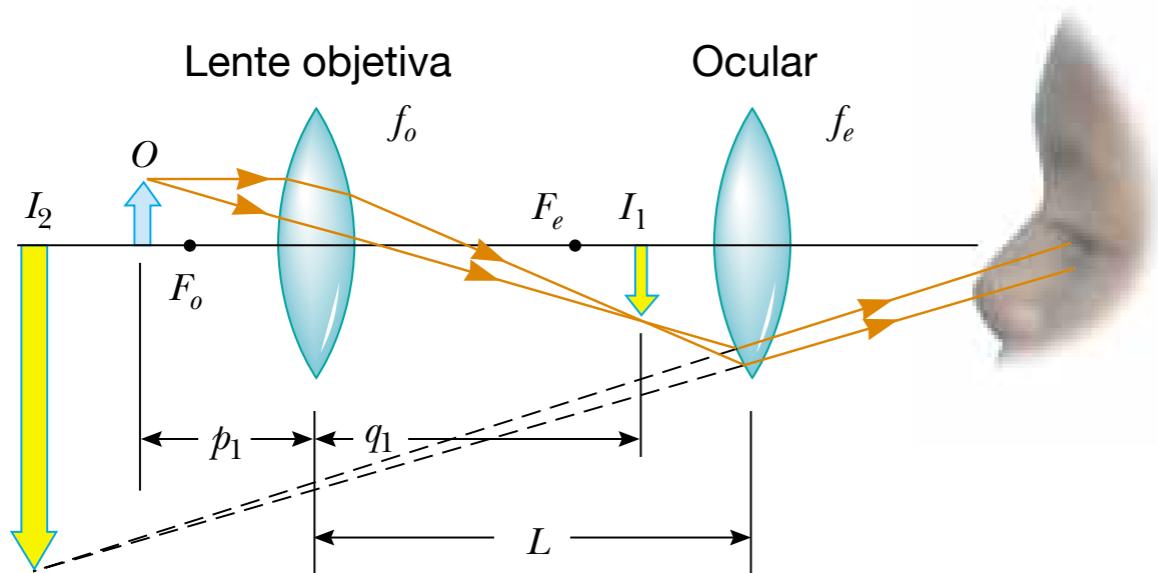
- Com **uma única lente** sem grandes aberrações é possível obter $m \sim 4$.
- Com **lentes adicionais** (correção de aberrações) chega-se até $m \sim 20$.

O microscópio

Para obter ampliação maior do que com uma única lente usa-se uma **combinação de lentes**:

- A **objetiva** tem uma distância focal f_o muito pequena, $f_o < 1 \text{ cm}$
- A **ocular** tem uma distância focal f_e de alguns cm

As lentes são separadas por uma distância L , onde $L \gg f_o, f_e$.



A objetiva produz uma imagem real invertida em I_1 , que é observada com a “lupa” da ocular

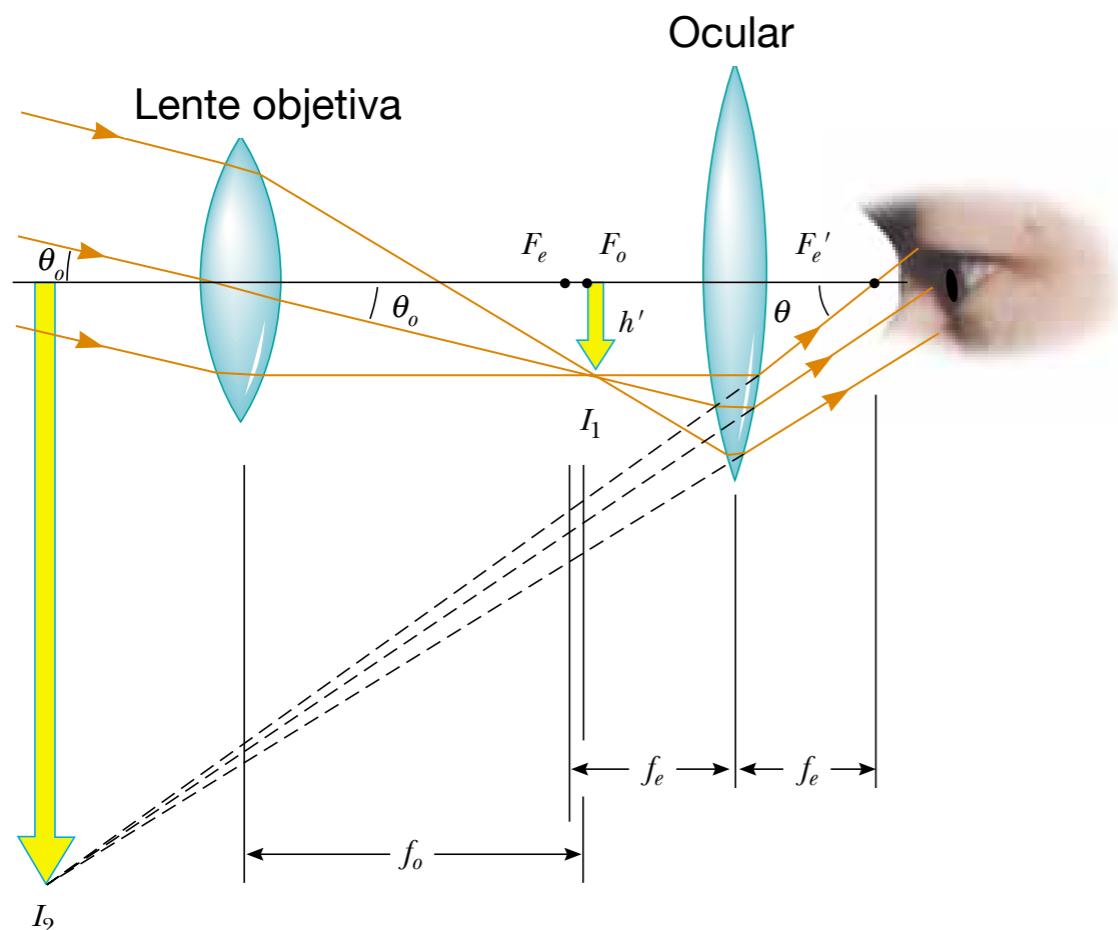
$$\text{Ampliação lateral de } I_1 \quad M_o = -\frac{q_1}{p_1} \approx -\frac{L}{f_o}$$

$$\text{Ampliação angular de } I_2 \text{ pela ocular } (I_1 \sim \text{no foco } F_e) \quad m_e = \frac{25 \text{ cm}}{f_e}$$

$$\text{Ampliação total} \quad M = M_o m_e = -\frac{L}{f_o} \left(\frac{25 \text{ cm}}{f_e} \right)$$

O telescópio refrator

- Observação de **objetos distantes** (efetivamente no infinito).
- A lente objetiva forma uma imagem real invertida quase no foco da lente objetiva.
- Ajusta-se a distância da lente ocular para que a imagem I_1 fica perto do foco da ocular.
- Em I_2 é formada uma imagem invertida e ampliada da I_1 .



Ângulo subtendido pelo objeto na objetiva

$$\tan \theta_o \approx \theta_o \approx -\frac{f_o}{h'}$$

Ângulo subtendido pela imagem final no olho

$$\tan \theta \approx \theta \approx \frac{h'}{f_e}$$

Ampliação angular do telescópio

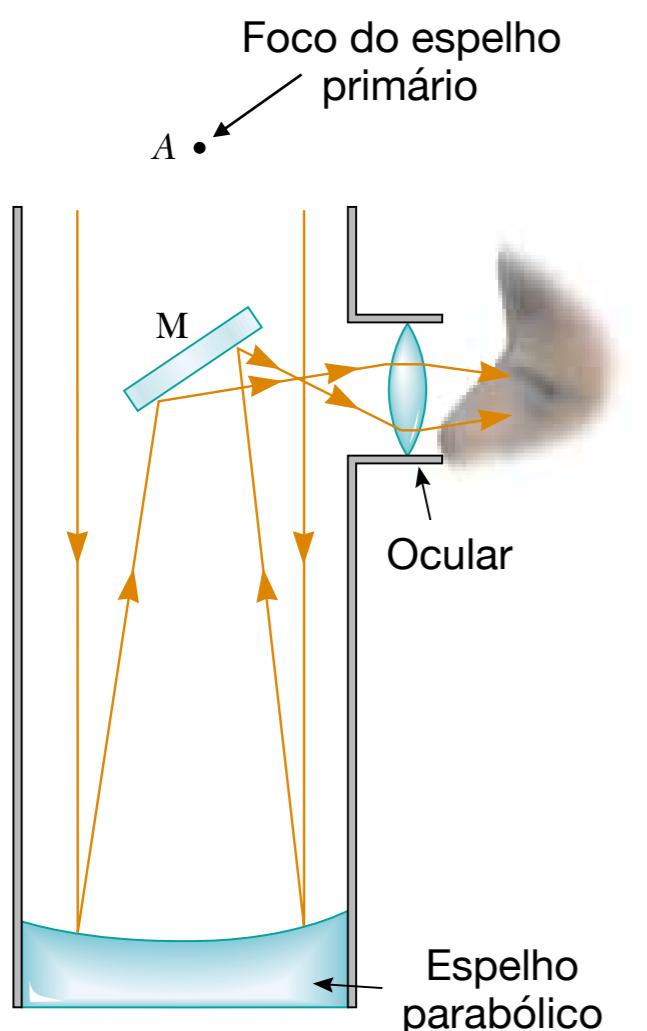
$$m = \frac{\theta}{\theta_o} = \frac{h'/f_e}{-h'/f_o} = -\frac{f_o}{f_e}$$

Em **astronomia**, para estudar objetos muito distantes e fracos. Para captar o máximo de luz possível, o **diâmetro** da lente tem de ser **muito grande**. Isso é difícil (peso) e caro.



O telescópio refletor

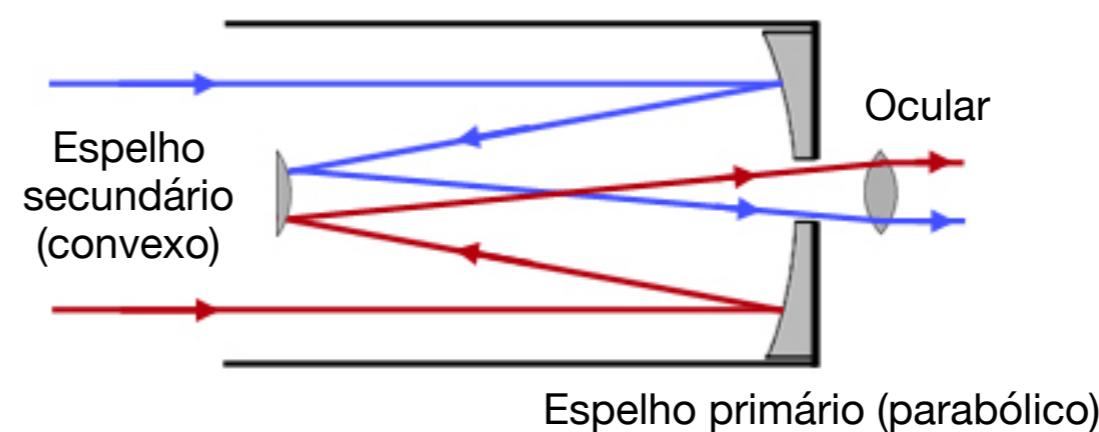
- Permite suporte mais rígido dum espelho grande (a luz não tem de passar para o outro lado).
- Um espelho secundário reflete a luz para uma abertura no tubo onde se situa uma ocular.



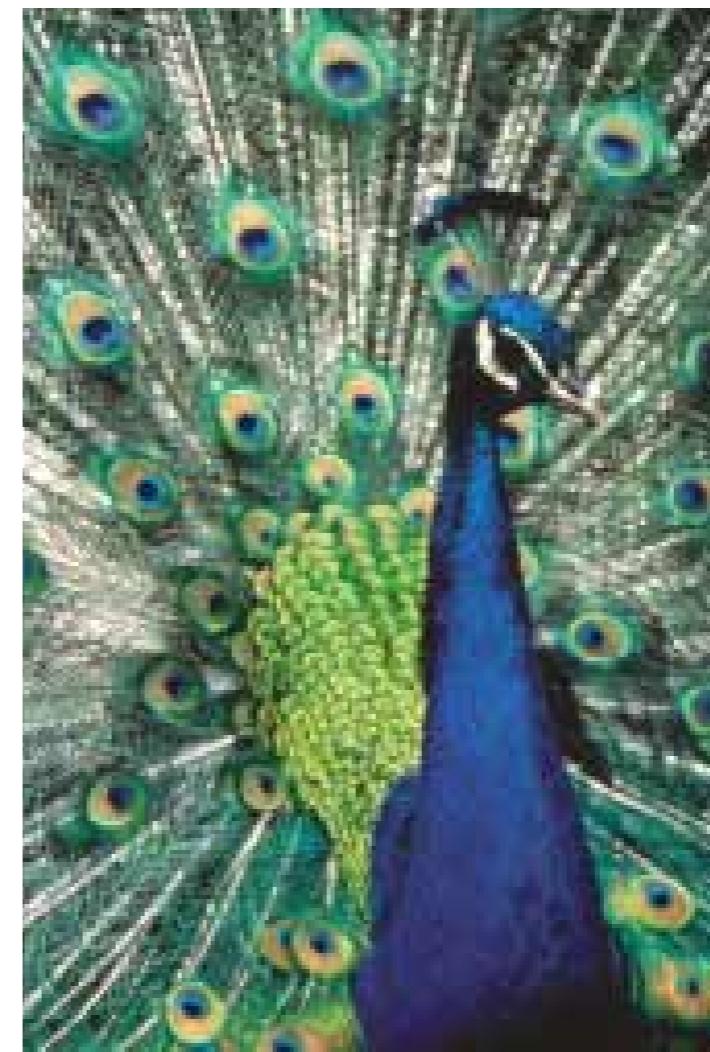
Telescópio newtoniano



Outros desenhos: e.g. Cassegrain



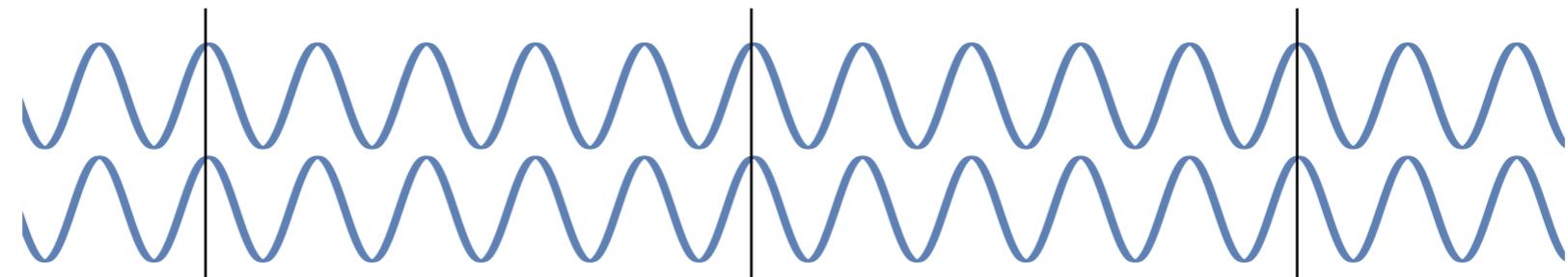
Ótica ondulatória



Luz coerente e incoerente

Já analisámos a [interferência construtiva ou destrutiva](#) de ondas mecânicas.

Ondas de luz também podem interferir construtiva ou destrutivamente.

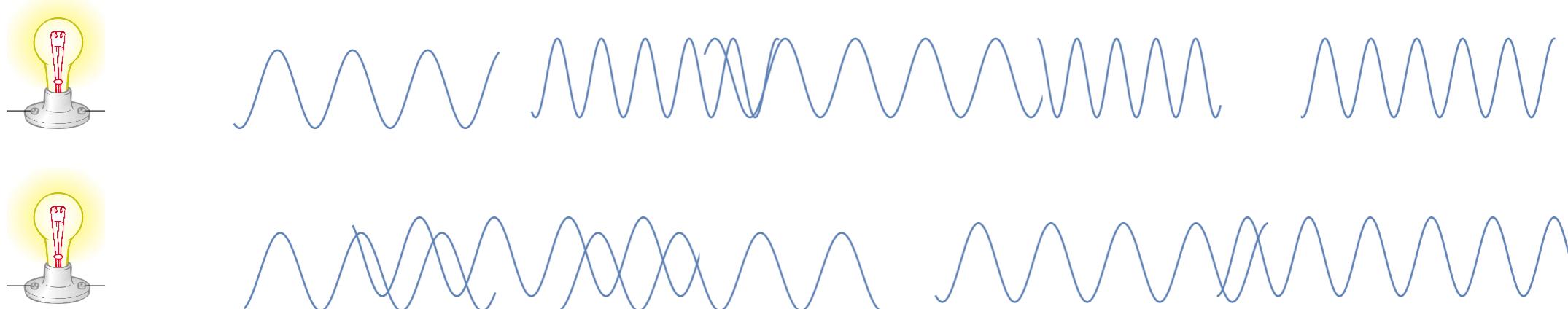


Mas para observar interferência, a luz tem de ser **coerente**, i.e.,

- a [relação de fase](#) entre as diferentes ondas de luz deve manter-se constante durante algum tempo.
- a luz tem de ser [monocromática](#).

Estas condições são bastante restritivas.

Duas lâmpadas colocadas lado ao lado não produzem interferência — não emitem luz coerente

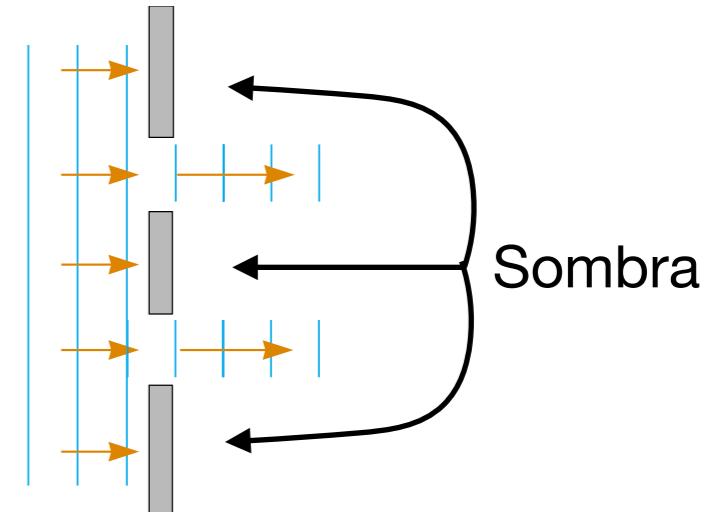


A experiência da fenda dupla

Um método para produzir **duas fontes de luz coerente**:

Luz monocromática incide numa **barreira com duas pequenas aberturas** (tipicamente fendas)

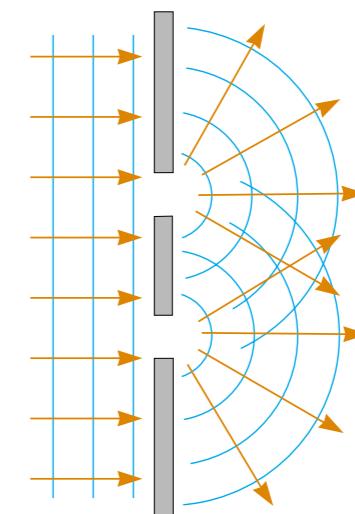
- As fendas servem para separar a luz em dois feixes.
- Qualquer alteração aleatória da fase dum feixe também aparece no outro → **coerência**



Quando o tamanho das **aberturas é comparável com o comprimento de onda**, a luz também “espalha-se” atrás das aberturas (→ princípio de Huygens).

Este fenómeno chama-se **difração**.

Sem difração as ondas não se iam sobrepor, portanto não havia interferência.

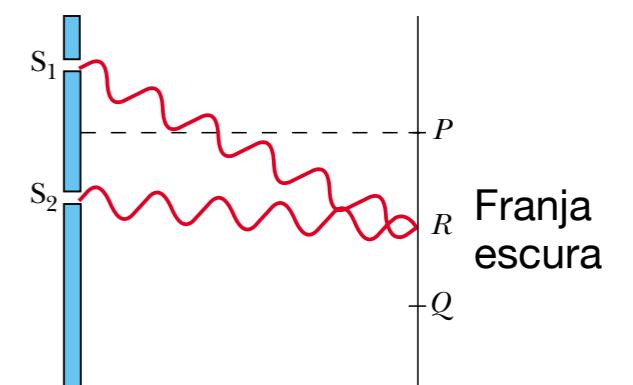
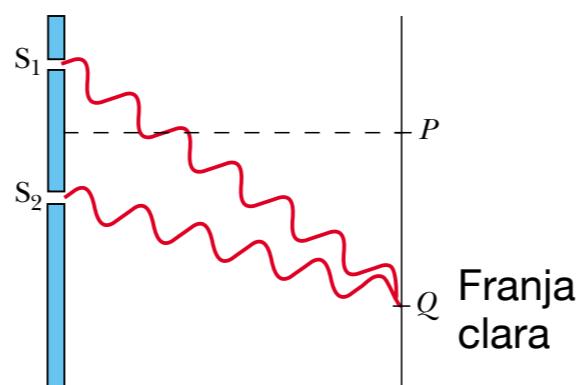
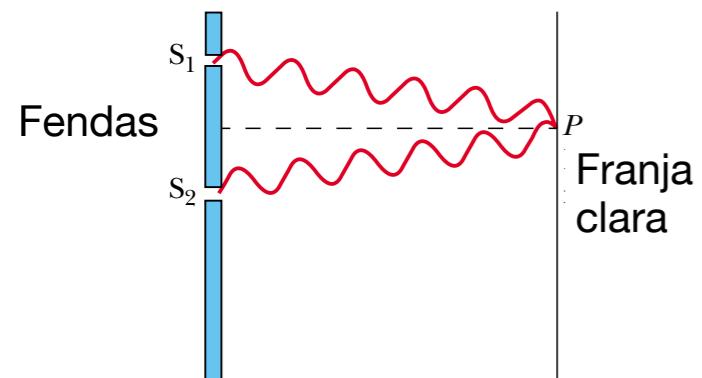
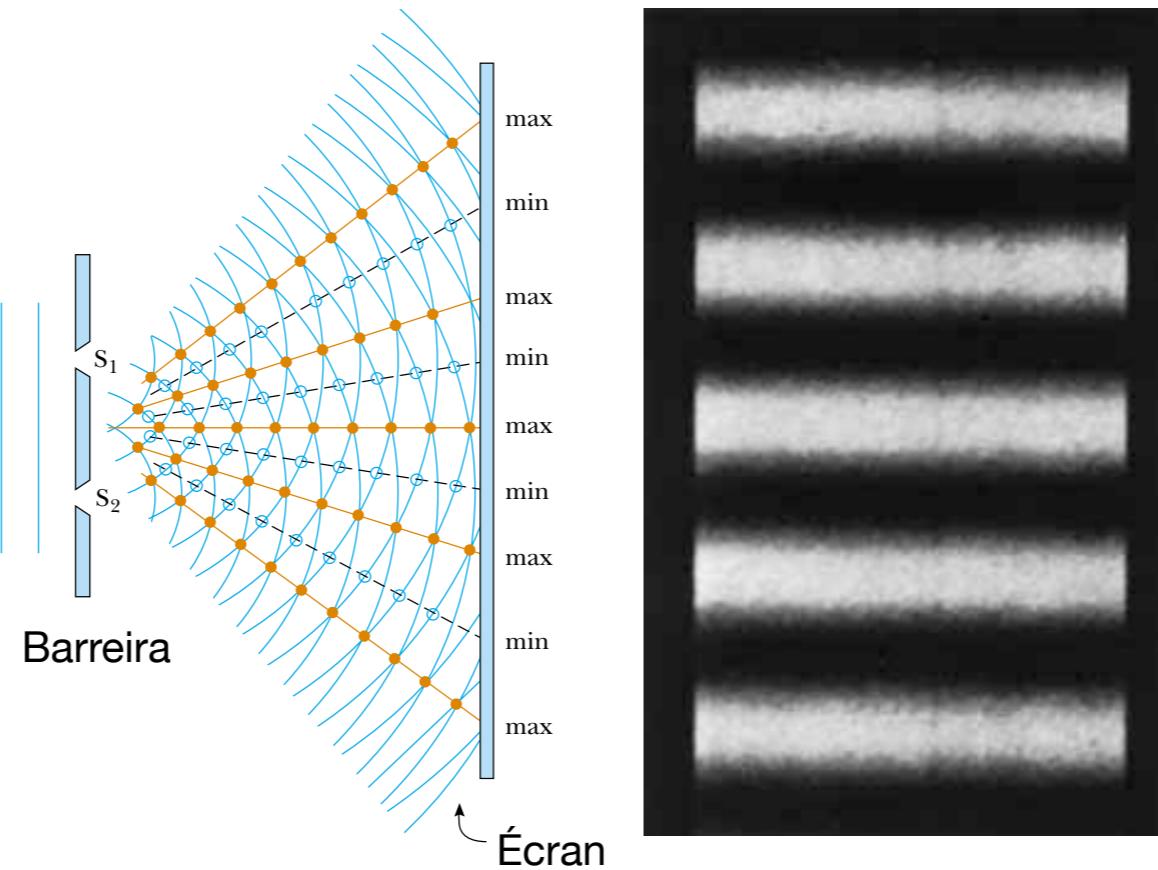


Exemplo: Difração de ondas de água



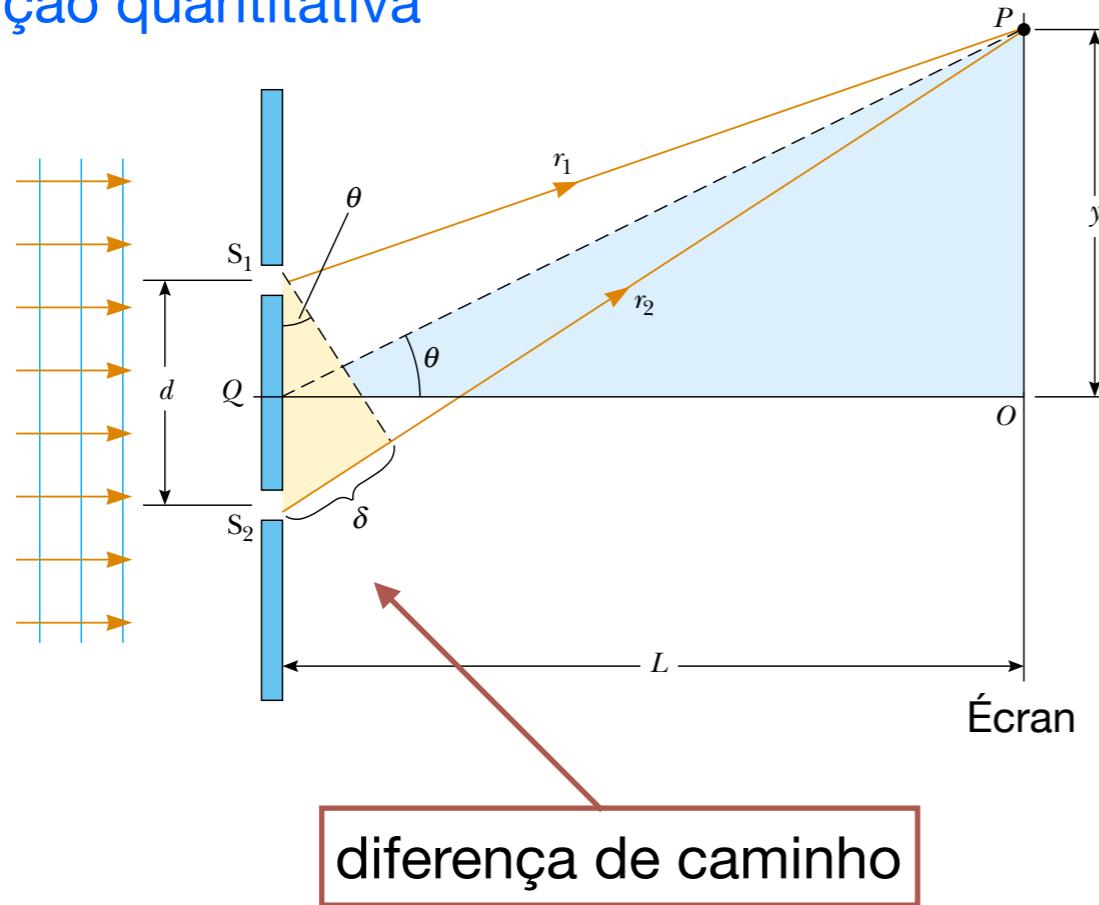
A experiência da fenda dupla

Thomas Young mostrou em 1801 pela primeira vez a interferência de duas ondas de luz. A luz que atravessa as duas fendas é coerente (tem origem na mesma frente de ondas). Esta luz incide num écran onde se observam bandas claras e escuras: franjas de interferência.

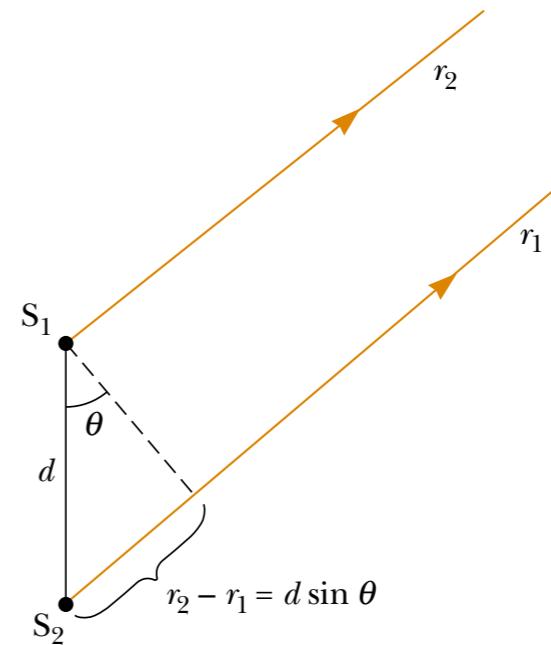


A experiência da fenda dupla

Descrição quantitativa



Para $L \gg d$ os dois raios de comprimentos r_1 e r_2 são aproximadamente paralelos.



$$\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$$

A diferença de caminho determina o tipo de interferência em P

Franjas claras:

$$d \sin \theta_{\text{claro}} = m\lambda$$

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

$m \dots$ ordem do máximo

Franjas escuras:

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

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

Posição vertical das franjas:

$$L \gg d \quad d \gg \lambda \quad \rightarrow \theta \ll 1 \quad \tan \theta \approx \sin \theta$$

$$y = L \tan \theta \approx L \sin \theta$$

$$y_{\text{claro}} = \frac{\lambda L}{d} m$$

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

Medição do comprimento de onda da luz

Exemplo:

Um écran encontra-se à distância de 1.2 m duma fenda dupla, cuja separação é de 0.030 mm. A franja dum máximo de 2^a ordem ($m=2$) está à distância de 4.5 cm da linha central.

- Determine o comprimento de onda da luz.
- Qual é a distância entre duas franjas claras adjacentes?

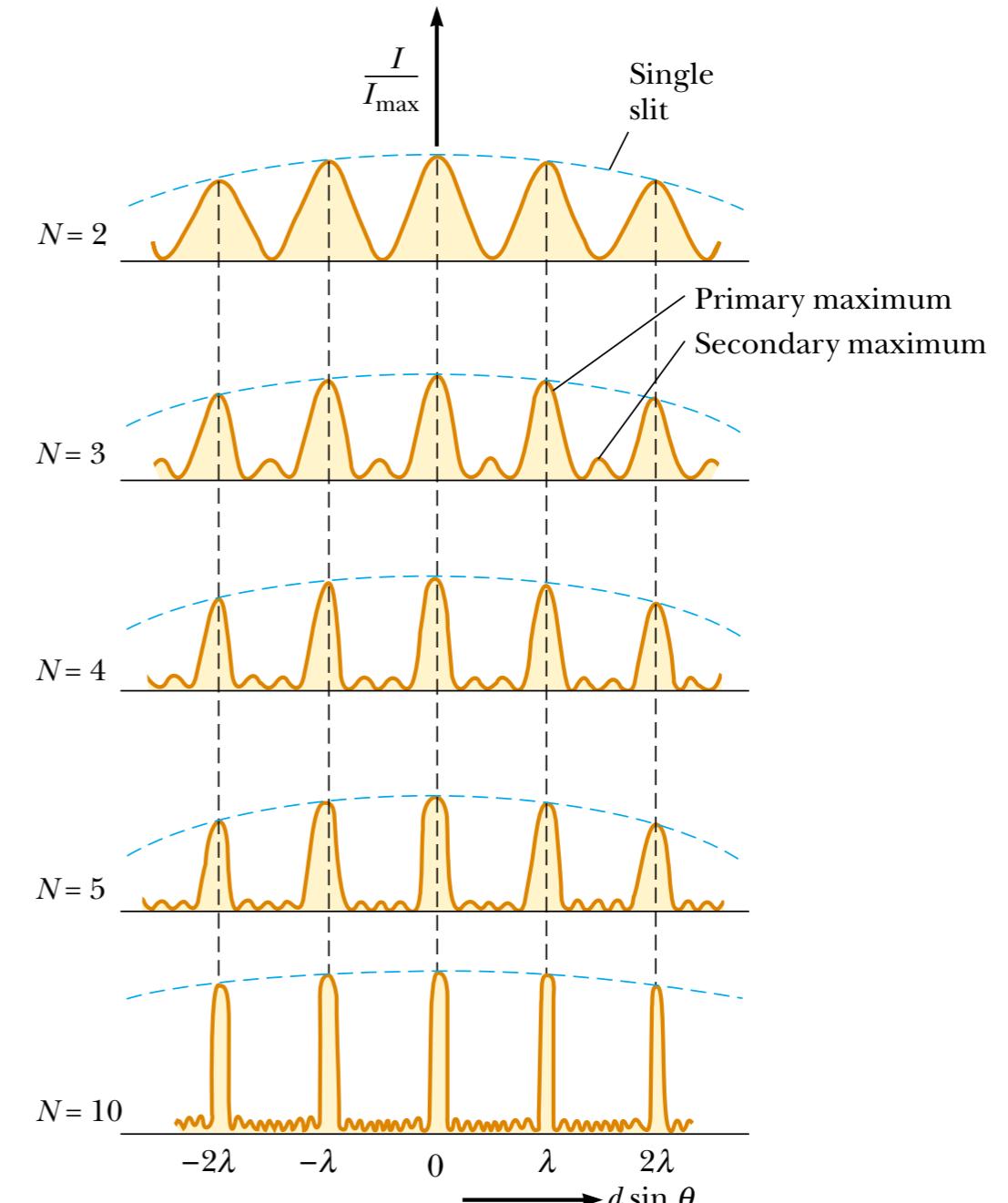
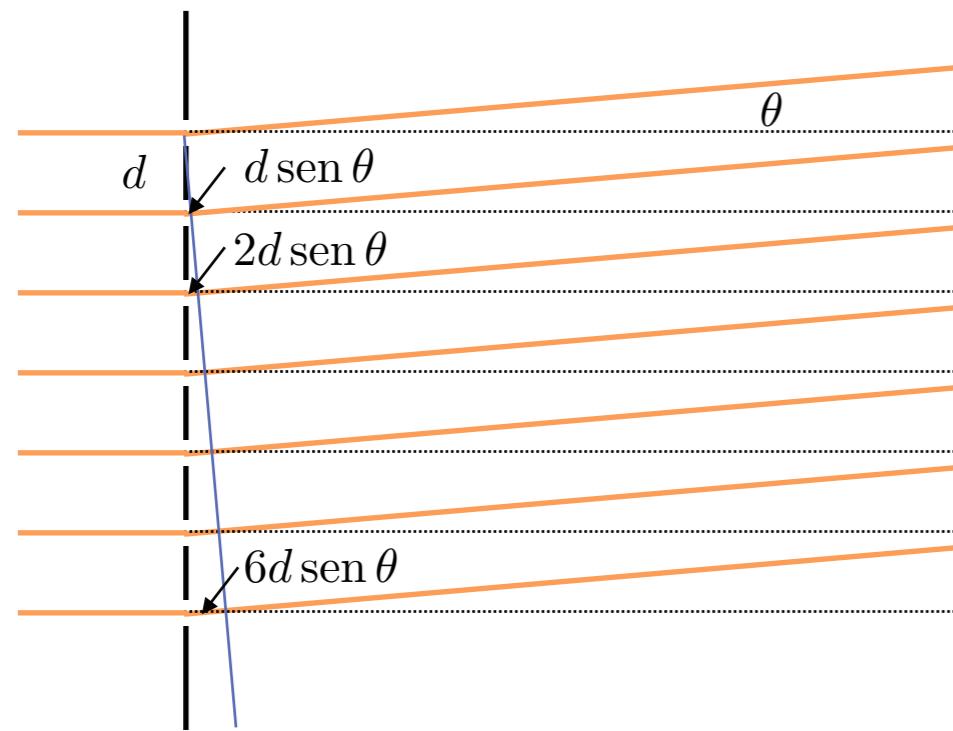
$$(a) \quad y_{\text{claro}} = \frac{\lambda L}{d} m$$

$$\lambda = \frac{y_{\text{claro}} d}{m L} = \frac{(4.5 \times 10^{-2} \text{ m})(3.0 \times 10^{-5} \text{ m})}{2(1.2 \text{ m})} = 5.6 \times 10^{-7} \text{ m} = 560 \text{ nm}$$

$$(b) \quad y_{m+1} - y_m = \frac{\lambda L}{d} (m + 1) - \frac{\lambda L}{d} m = \frac{\lambda L}{d} = \frac{(5.6 \times 10^{-7} \text{ m})(1.2 \text{ m})}{(3.0 \times 10^{-5} \text{ m})} = 2.2 \times 10^{-2} \text{ m} = 2.2 \text{ cm}$$

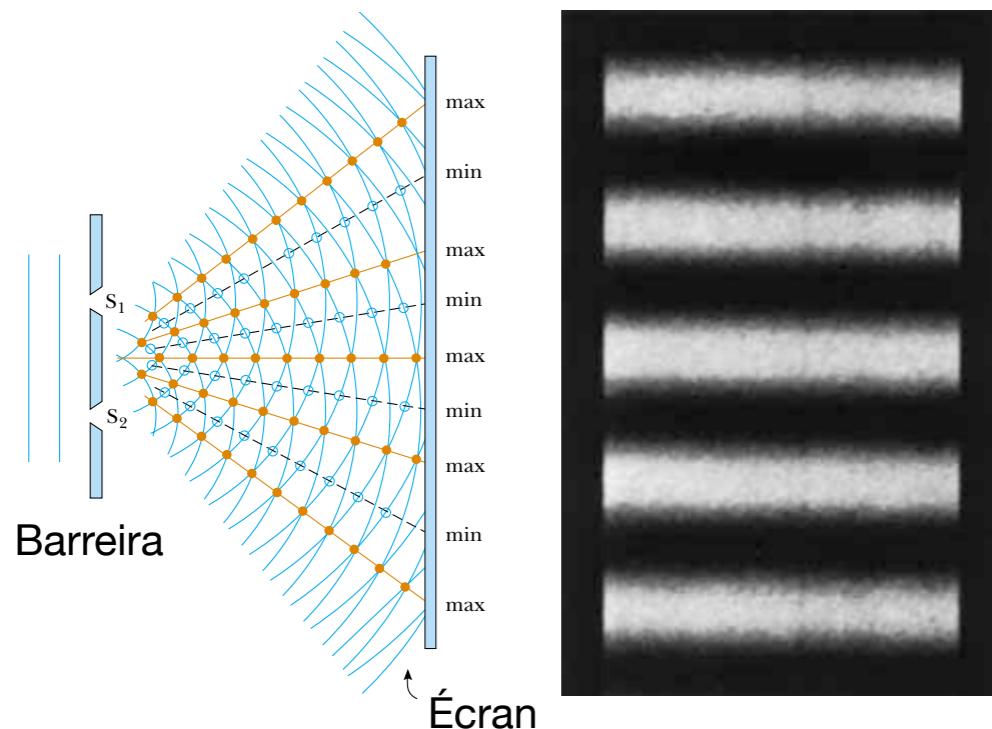
Este método foi usado por Young para medir o comprimento de onda da luz.

Padrão de interferência para N fendas



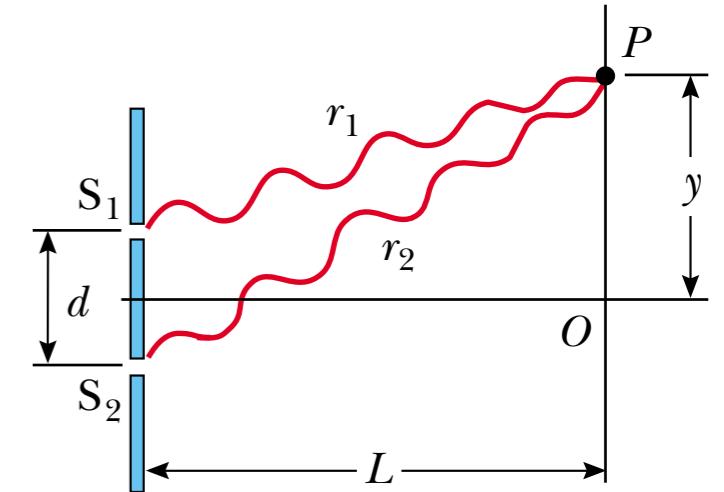
- Quando o número de fendas N aumenta, as **posições dos máximos primários** permanecem **inalteradas**.
- Aparecem $N-2$ **máximos secundários** de menor intensidade.
- A **intensidade** dos máximos primários aumenta (proporcional a N^2).
- A **largura** dos máximos primários diminui.

Fenda dupla: intensidade do padrão de interferência



A mudança da intensidade é gradual

Ondas das fendas S_1 e S_2 chegam a P com a mesma frequência ω e uma diferença de fase ϕ .



$$\text{Em } P: E_1 = E_0 \sin \omega t, E_2 = E_0 \sin(\omega t + \phi) \quad \text{depende de } \delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta : \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\phi}{2\pi}$$

$$\rightarrow \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad \text{Amplitude total em } P: E_P = E_1 + E_2 = E_0 [\sin \omega t + \sin(\omega t + \phi)]$$

Usamos $\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cos \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right)$ $\rightarrow E_P = 2E_0 \sin \left(\omega t + \frac{\phi}{2} \right) \cos \left(\frac{\phi}{2} \right)$

A intensidade é proporcional à amplitude:

$$I \propto E_P^2 = 4E_0^2 \sin^2 \left(\omega t + \frac{\phi}{2} \right) \cos^2 \left(\frac{\phi}{2} \right)$$

A média temporal sobre ciclos inteiros é 1/2

$$I = I_{\max} \cos^2 \left(\frac{\phi}{2} \right)$$

$$I = I_{\max} \cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right)$$