

ufscar

Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Igniez Caracelli

1

Ondas Interferência Difração



Departamento de Física
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Igniez Caracelli
igniez@df.ufscar.br

IoMot

São Carlos, 19 de março de 2018.

ufscar

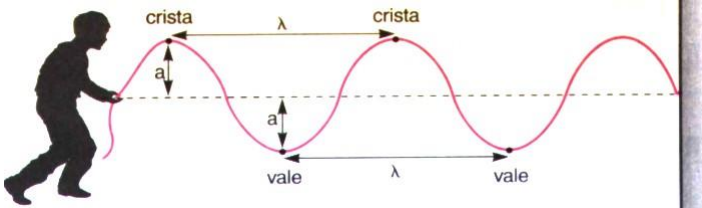
Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Igniez Caracelli

2

Ondas Periódicas



$T \rightarrow$ período

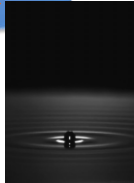
$f \rightarrow$ frequência

$\lambda \rightarrow$ comprimento de onda

$v \rightarrow$ velocidade da onda $v = \lambda f$

$c \rightarrow$ velocidade da **onda eletromagnética** $c = \lambda f$

válido para todas as ondas

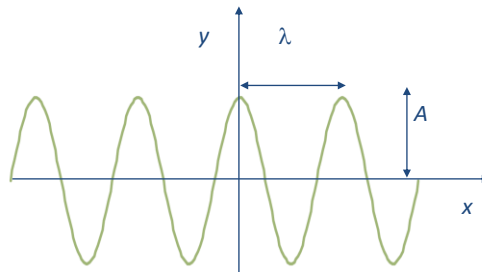


Onda progressiva

onda harmônica de amplitude A se movendo na direção $+x$.

$$y(x,t) = A \sin(kx - \omega t)$$

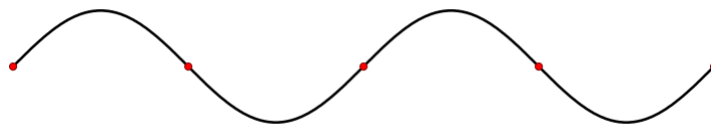
equação de onda



ondas progressivas e estacionárias



onda progressiva



onda estacionária

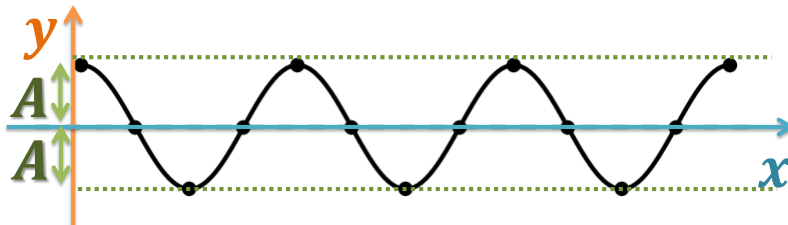
Parâmetros que descrevem uma onda



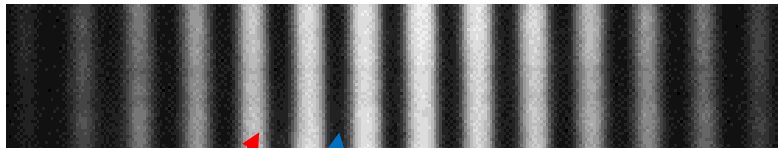
$$y(x, t) = A \text{ sen } (kx \pm \omega t)$$

deslocamento

termo oscilatório



Interferência



Interferência **construtiva** → zonas brilhantes (+ claras)

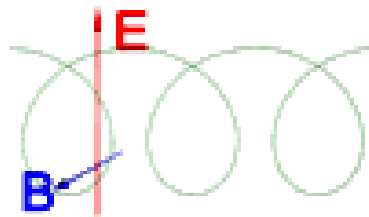
Interferência **destrutiva** → zonas escuras

Ondas Eletromagnéticas

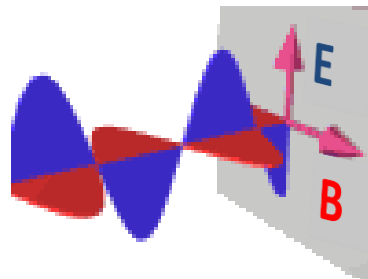
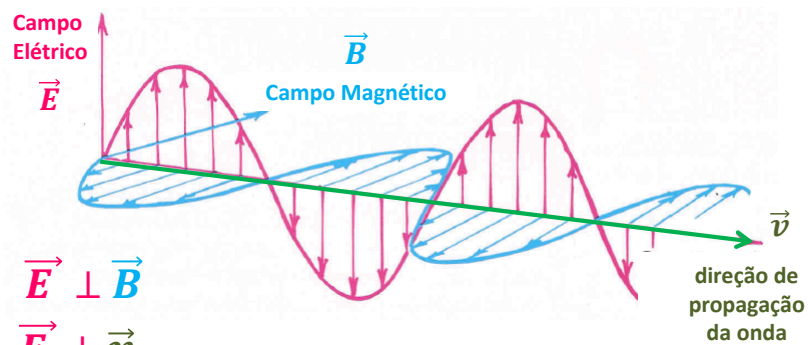
perturbação

cargas elétricas → campo elétrico E

cargas elétricas oscilando → campo magnético $B \perp E$



Ondas Eletromagnéticas





Interferência e Difração



Óptica Geométrica

tamanho do
objeto a

comprimento
de onda λ

$$a \gg \lambda$$



reflexão

refração

tamanho do
objeto a

$$a \cong \lambda$$

Óptica Física
comprimento
de onda λ



difração
interferência

Interferência em fenda dupla

Sir Isaac Newton
(1642-1727)



luz constituída de corpúsculos

Os principais fenômenos óticos (reflexão e refração) podiam ser explicados com o uso da **teoria corpuscular**

Christiaan Huygens
(1629-1695)

teoria ondulatória da luz

<http://www.if.ufrgs.br/historia/young.html>

Interferência em fenda dupla

Thomas Young
(1773-1829)



experimento da fenda dupla

Luz como uma onda.
Os principais fenômenos óticos (difração e interferência) podiam ser explicados com o uso da **teoria ondulatória**

Christiaan Huygens
(1629-1695)

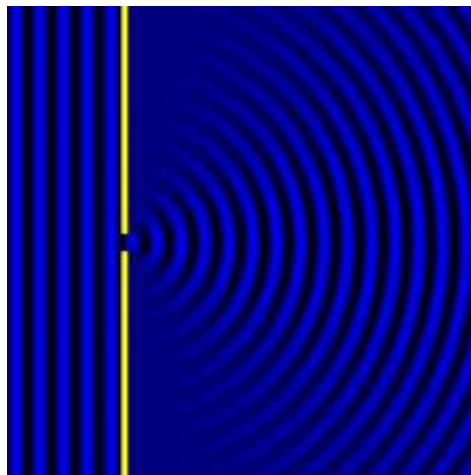


teoria ondulatória da luz

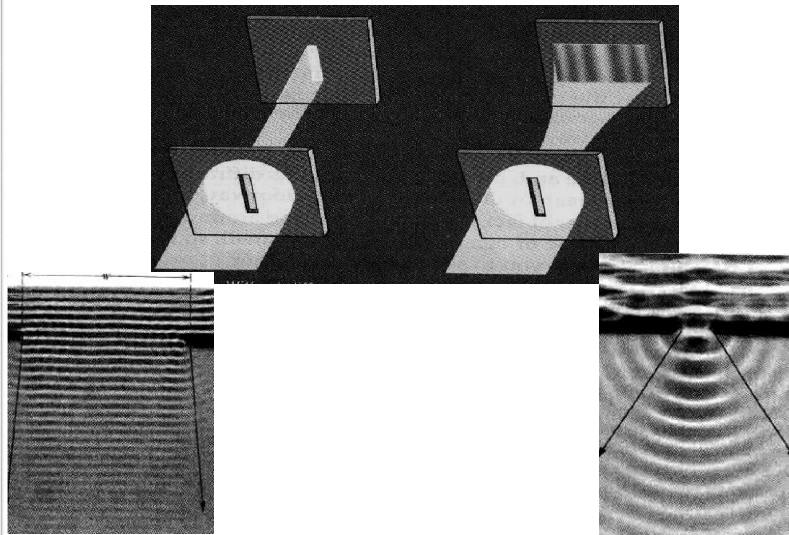
<http://www.if.ufrgs.br/historia/young.html>

Difração

Ondas se espalham ao passar por obstáculos



Difração por fenda



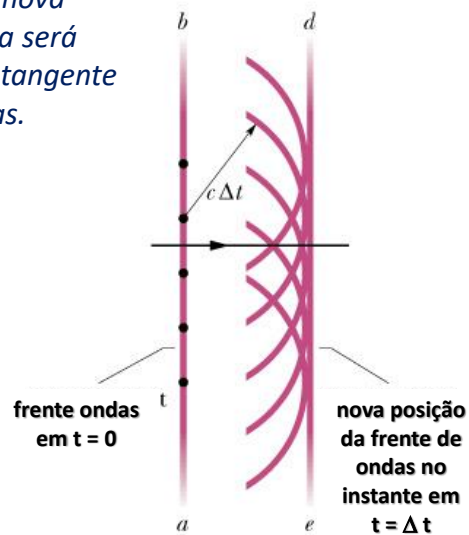
$\lambda \ll \text{largura fenda}$
menos difração

$\lambda \sim \text{largura fenda}$
mais difração

Princípio de Huygens

Depois de um tempo t , a nova posição da frente de onda será dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias.

cada ponto do espaço se comporta como uma fonte secundária de ondas esféricas.

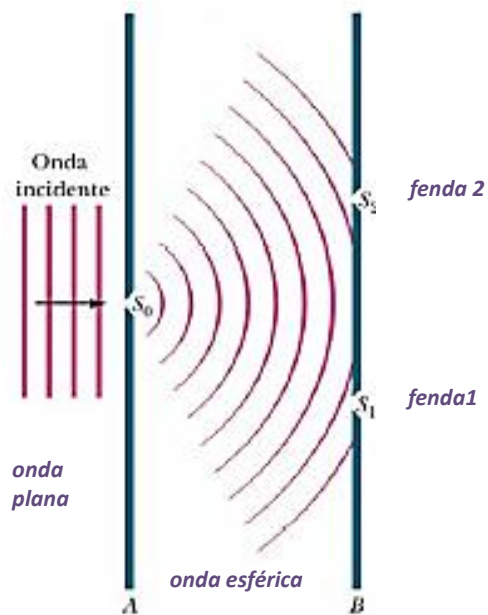


interferência em fenda dupla

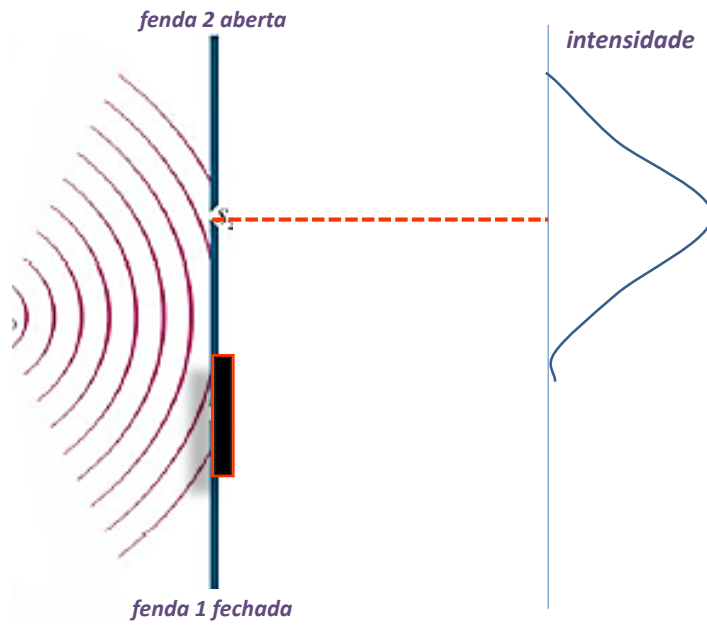


experimento de Young

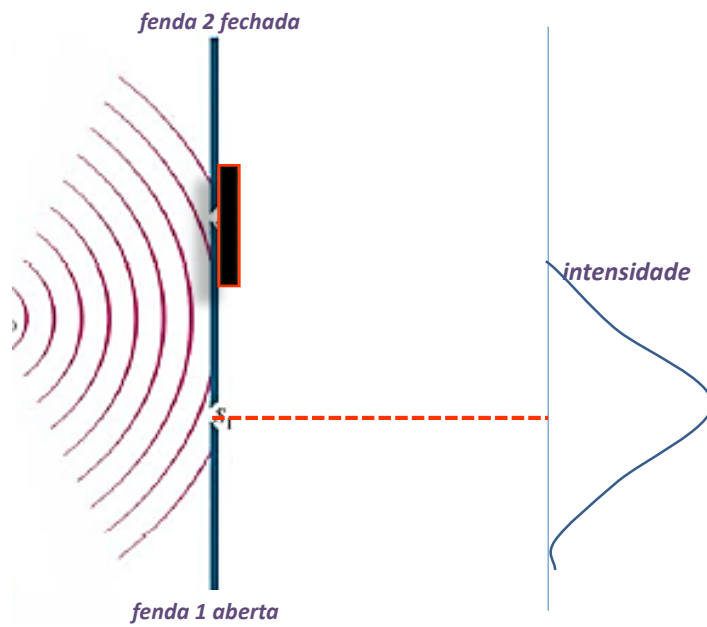
Experimento de Young – fenda dupla



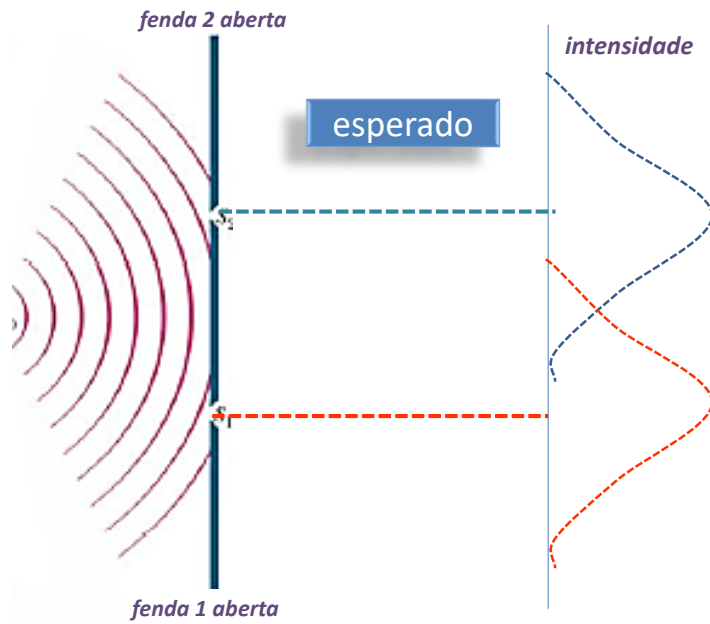
Experimento de Young – fenda dupla



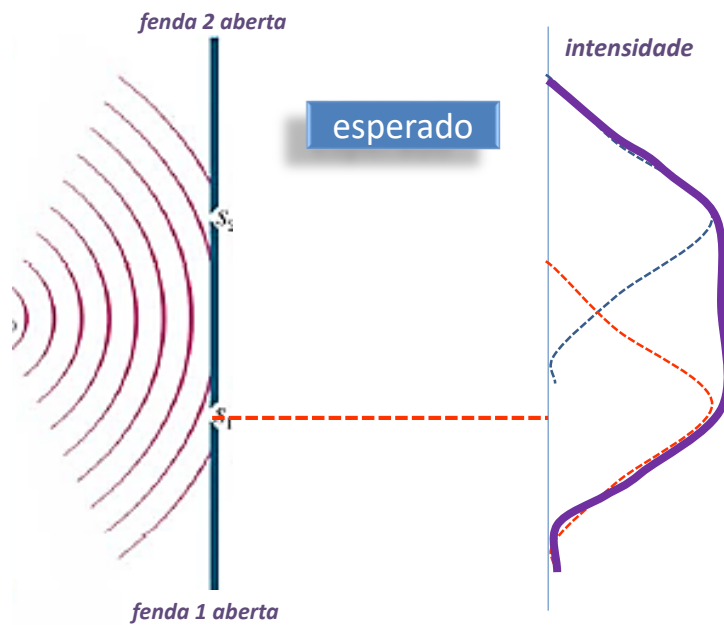
Experimento de Young – fenda dupla



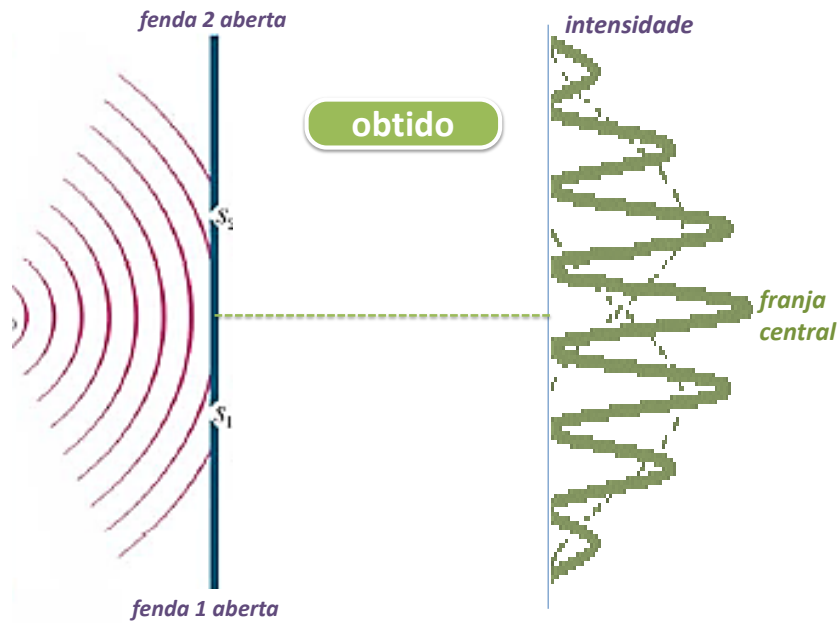
Experimento de Young – fenda dupla



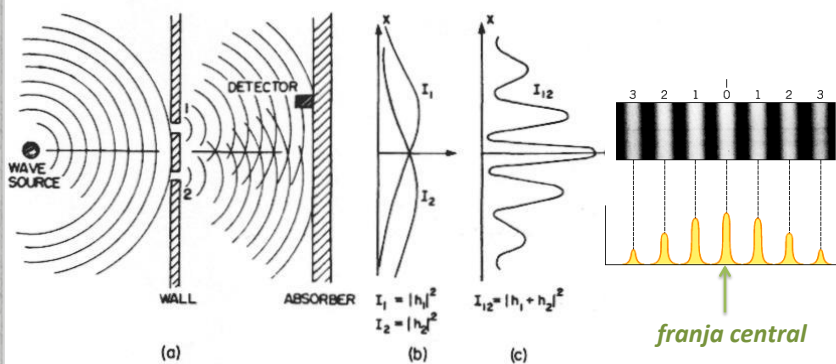
Experimento de Young – fenda dupla



Experimento de Young – fenda dupla



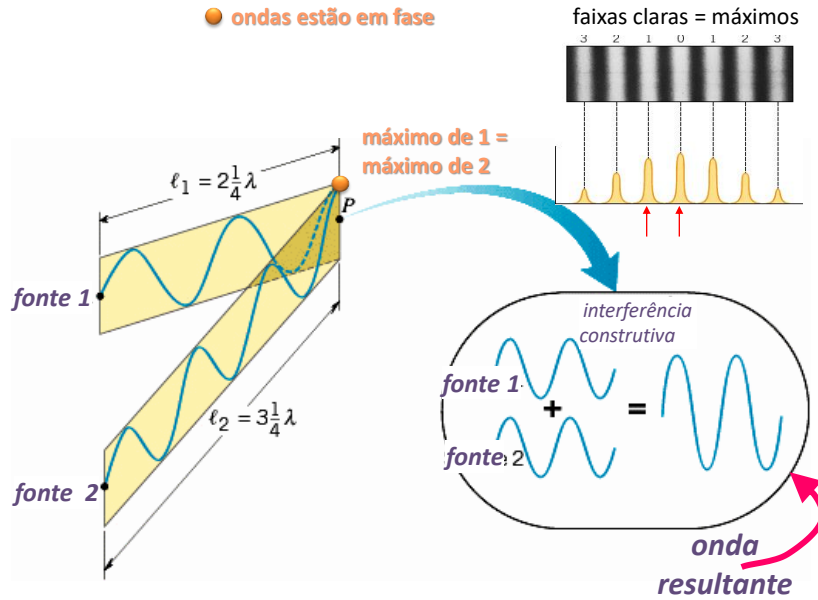
Experimento de Young – fenda dupla



interferência e a natureza ondulatória da luz

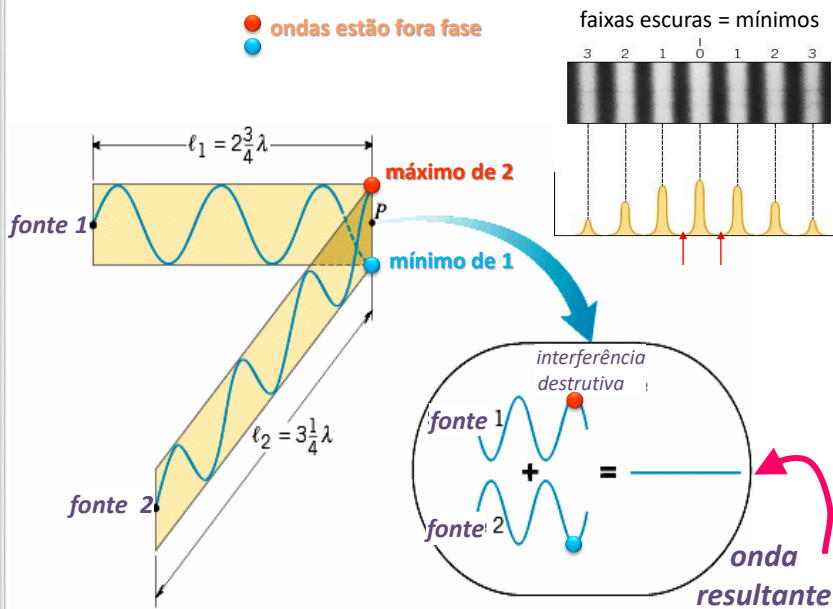
Franjas de Interferência

● ondas estão em fase

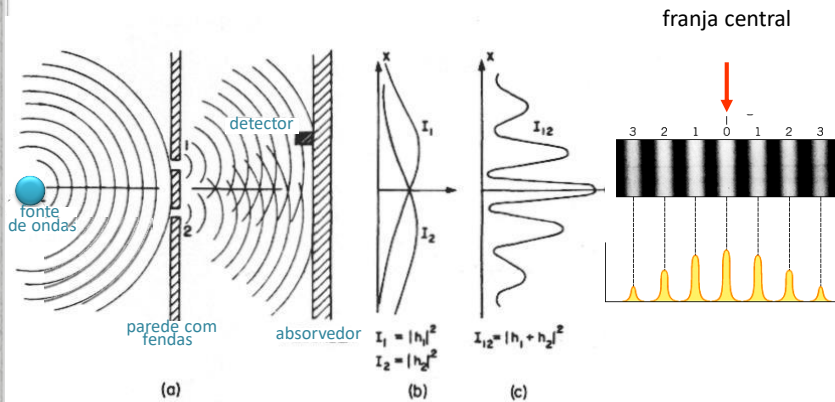


Franjas de Interferência

● ondas estão fora de fase



Experimento de Young – fenda dupla



interferência e a natureza ondulatória da luz

Experimento de Young

Coerência

Diferença de fase não varia com o tempo

➡ Mesma fonte (experimento de Young)

Totamente coerentes → Padrão de interferência

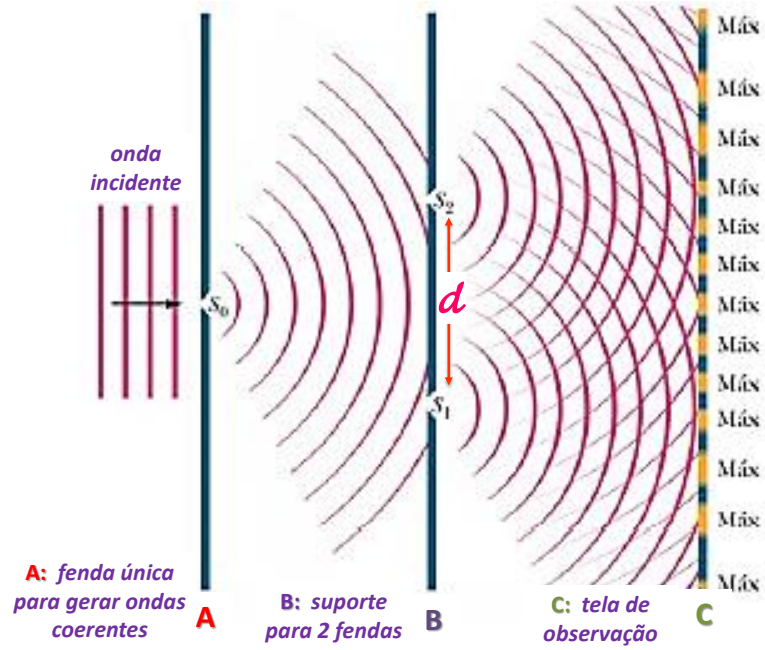
➡ Fontes diferentes

Totamente incoerentes → Sem padrão

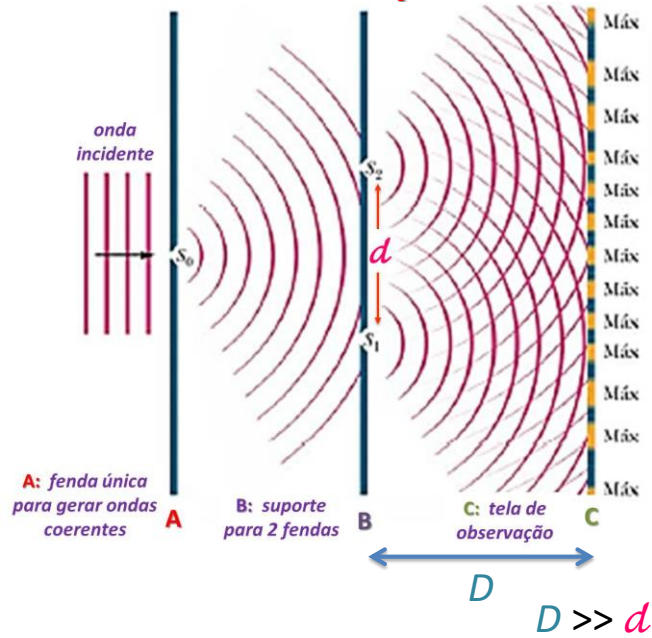
➡ Fontes diferentes (lasers)

Há coerência → Padrão de interferência

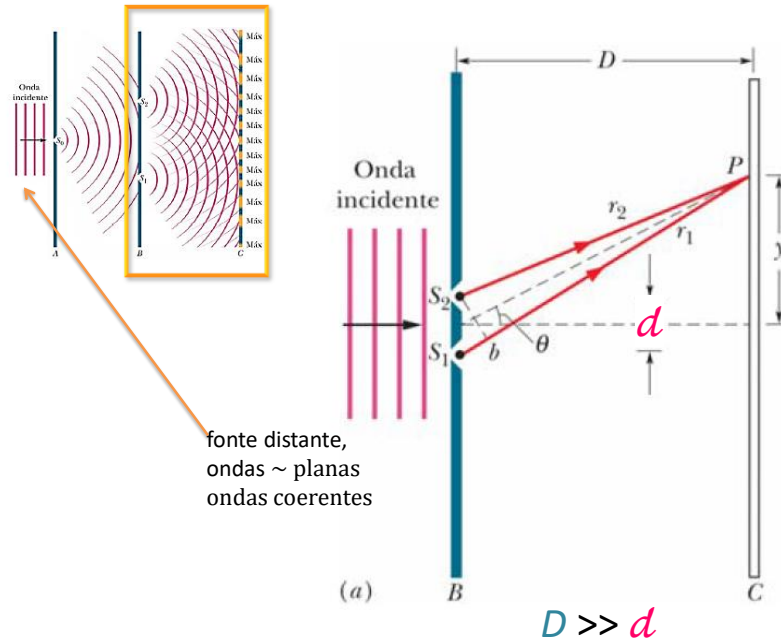
O experimento de Young



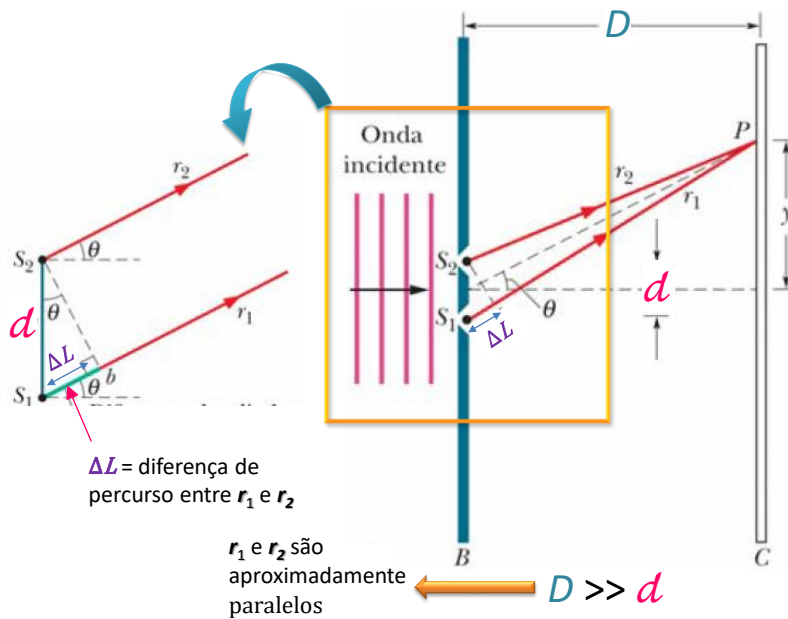
O experimento de Young



O experimento de Young: Localização das franjas

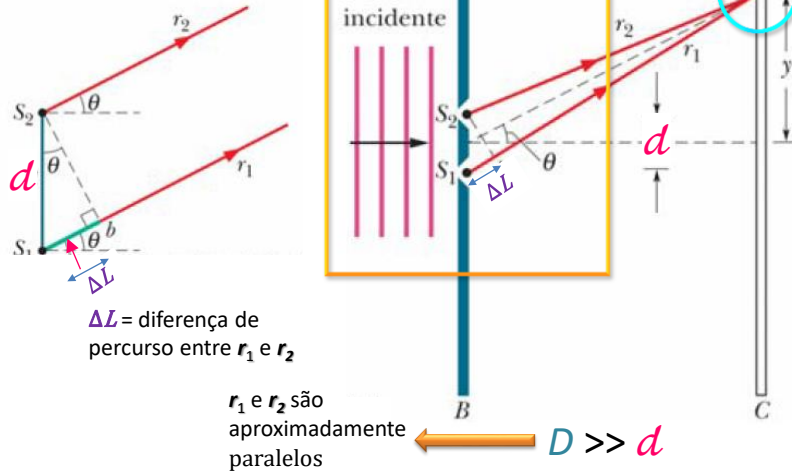


O experimento de Young: Localização das franjas



O experimento de Young: Localização das franjas

se r_1 e r_2 chegam *em fase* em P_1
 → *interferência construtiva*
 se r_1 e r_2 chegam *fora de fase* em P_1
 → *interferência destrutiva*



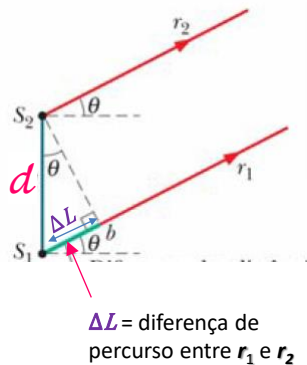
O experimento de Young: Localização das franjas

se r_1 e r_2 chegam *em fase* em P_1
 → *interferência construtiva*
 se r_1 e r_2 chegam *fora de fase* em P_1
 → *interferência destrutiva*

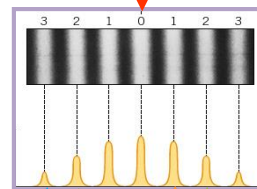
$$\Delta L = d \sin \theta = m \lambda$$

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

faixas claras = interferência construtiva
 máximo central; $m = 0$



$$\Delta L = d \sin \theta$$



m 3 2 1 0 1 2 3

número de máximos =
 número de faixas claras =
 $2m + 1$

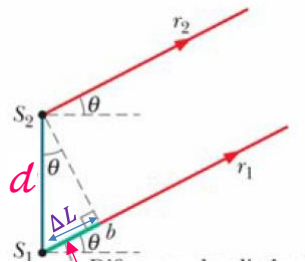
O experimento de Young: Localização das franjas

se r_1 e r_2 chegam *em fase* em P1

→ *interferência construtiva*

se r_1 e r_2 chegam *fora de fase* em

P1 → *interferência destrutiva*



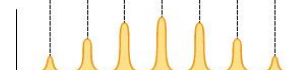
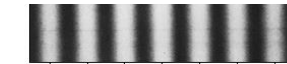
ΔL = diferença de percurso entre r_1 e r_2

$$\Delta L = d \sin \theta$$

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

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

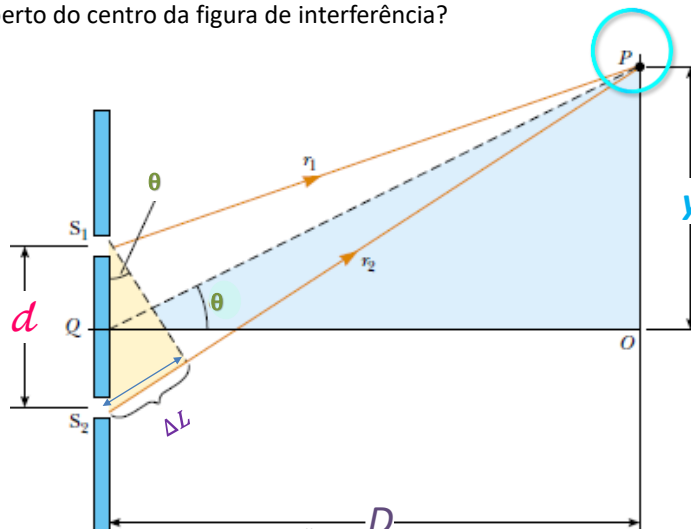
faixas escuras = interferência destrutiva



número de mínimos = número de faixas escuras = $2 \cdot m$

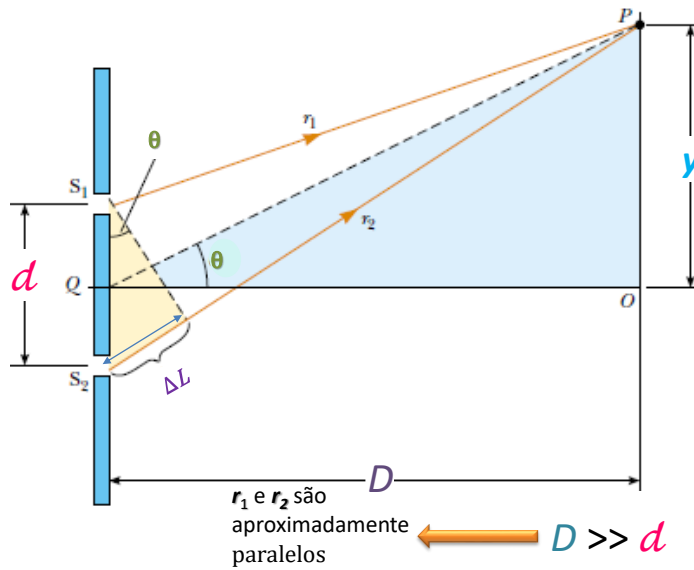
Localização de máximos y_m

Qual é a distância na tela de observação entre dois máximos vizinhos perto do centro da figura de interferência?

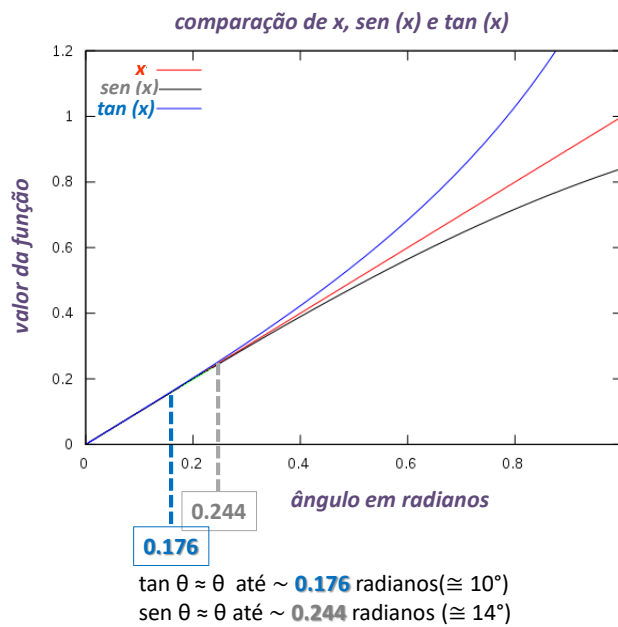


r_1 e r_2 são aproximadamente paralelos $D \gg d$

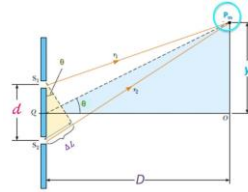
Localização de máximos y_m



ângulos pequenos

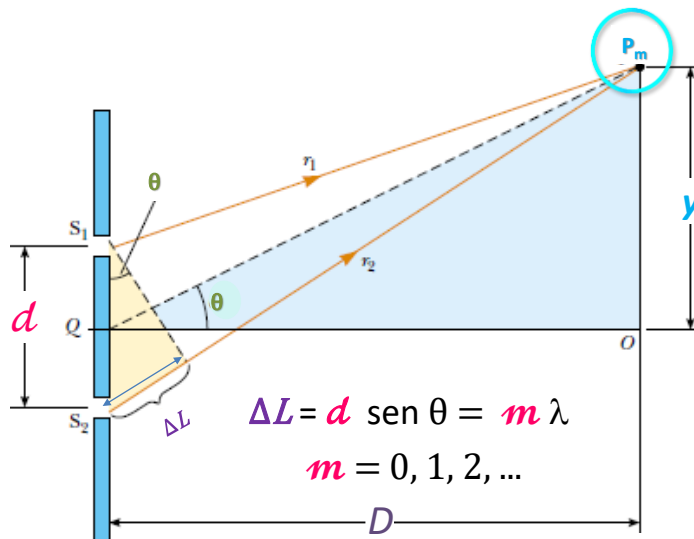


Localização de máximo de interferência



1. y_m : posição de um ponto de máximo de interferência na tela de observação
2. y_{m+1} : posição do ponto de máximo vizinho de interferência na tela de observação
3. Δy_m separação entre pontos y_{m+1} e y_m :

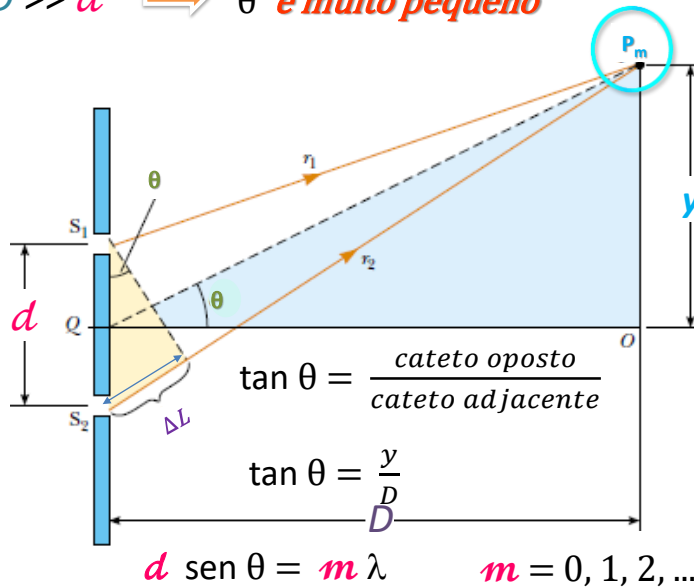
1. Localização de máximo de interferência



se r_1 e r_2 chegam *em fase* em P_m
 → *interferência construtiva*

1. Localização de máximo de interferência

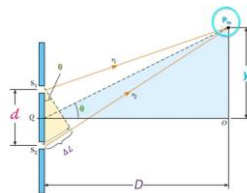
$D \gg d \Rightarrow \theta$ é muito pequeno



1. Localização de máximo de interferência

$D \gg d \Rightarrow \theta$ é muito pequeno

$$\tan \theta = \frac{y}{D}$$



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

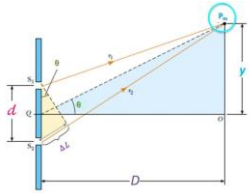
$$\theta \approx \frac{y}{D}$$

$$\theta \approx \frac{m \lambda}{d}$$

$$\frac{y}{D} \approx \frac{m \lambda}{d}$$

$$y_m \approx \frac{m \lambda D}{d}$$

2. Localização de máximo de interferência



$$y_m \approx \frac{m\lambda D}{d}$$

y_m → posição y de um máximo de ordem m

dois máximos vizinhos: y_m e y_{m+1}

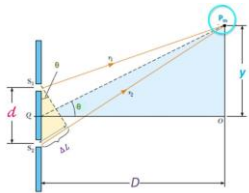
dois máximos consecutivos: y_m e y_{m+1}

y_{m+1} → posição y de um máximo de ordem $m+1$

$$y_m \approx \frac{m\lambda D}{d}$$

$$y_{m+1} \approx \frac{(m+1)\lambda D}{d}$$

3. Separação entre máximos consecutivos



y_m → posição y de um máximo de ordem m

y_{m+1} → posição y de um máximo de ordem $m+1$

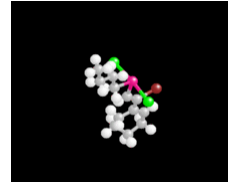
$$y_m \approx \frac{m\lambda D}{d}$$

$$y_{m+1} \approx \frac{(m+1)\lambda D}{d}$$

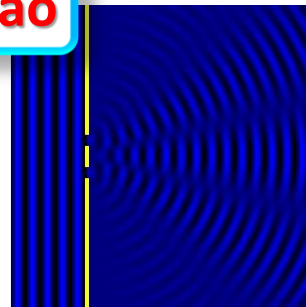
$$\Delta y = y_{m+1} - y_m$$

$$\Delta y = \frac{(m+1)\lambda D}{d} - \frac{m\lambda D}{d} \Rightarrow \Delta y = \frac{\lambda D}{d}$$

Separação entre máximos consecutivos



Interferência e Difração



Richard Feynman disse:

não foi encontrada nenhuma diferença entre interferência e difração.

É só uma questão de tratamento, e não há nenhuma especificidade ou diferença física entre ambos.

tamanho do
objeto a

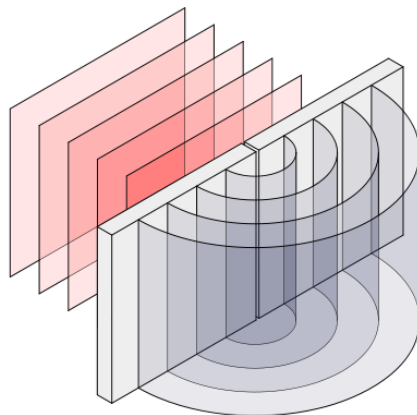
$$a \approx \lambda$$



difração
interferência

Óptica Física

comprimento
de onda λ



Difração é um fenômeno que acontece quando uma onda encontra um obstáculo, fendas ou orifícios.

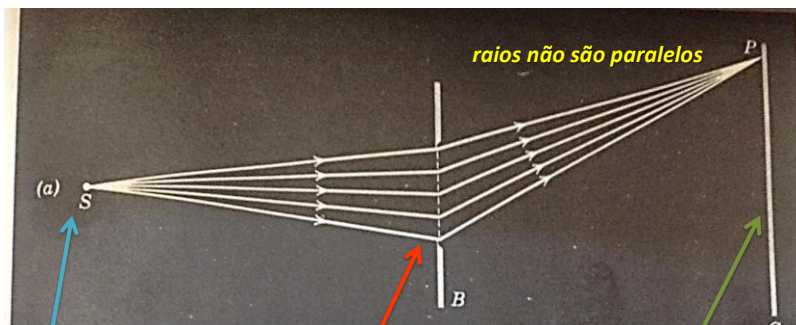
Após atravessar orifícios ou fendas, novas ondas são geradas conforme o princípio de Huygens.

Difração de Fraunhofer e de Fresnel

Pode-se dividir a difração em dois tipos especiais que são:

- de Fresnel
- de Fraunhofer

Difração de Fresnel



fonte luminosa

abertura que produz difração

tela de observação

fonte luminosa

abertura que produz difração

próximos

tela de observação

abertura que produz difração

próximos

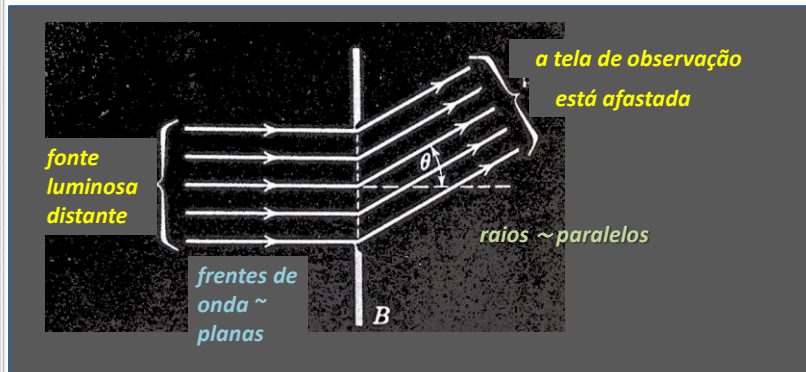
fonte luminosa
tela de observação



abertura que produz difração

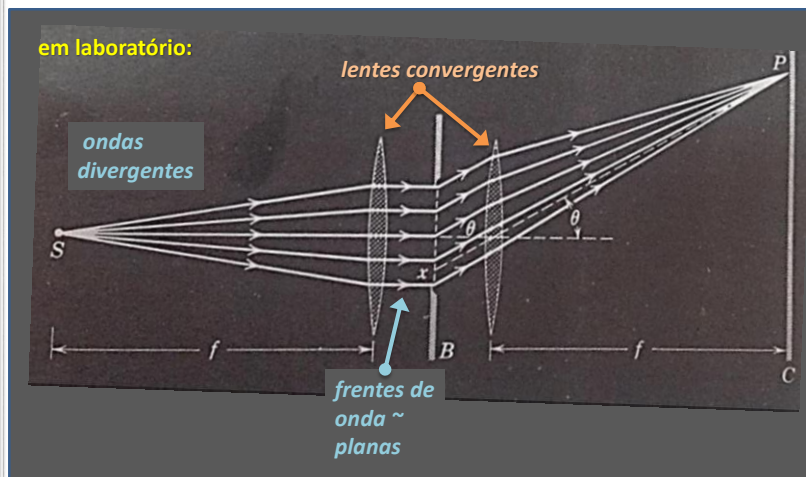
próximos

Difração de Fraunhofer



fonte luminosa abertura que produz difração distantes
 tela de observação abertura que produz difração distantes

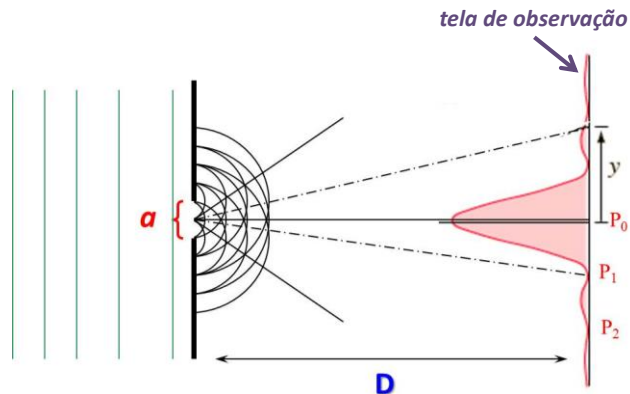
Difração de Fraunhofer



condições de Fraunhofer são as que estudamos (experimento de Young também)

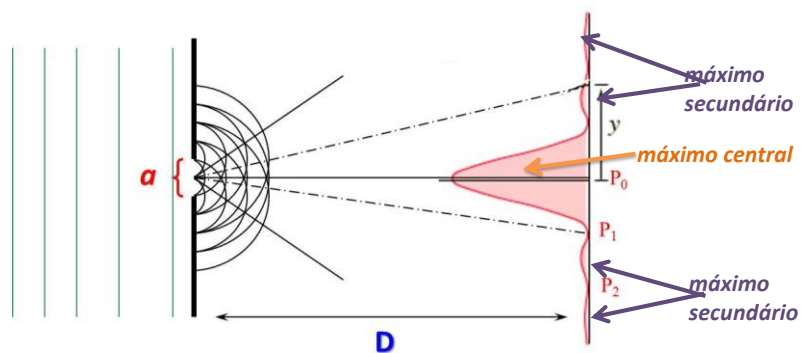
Difração

Quando a luz monocromática de uma fonte distante passa por uma fenda estreita da tamanho a e é interceptada por uma tela de observação, aparece na tela uma figura de difração.



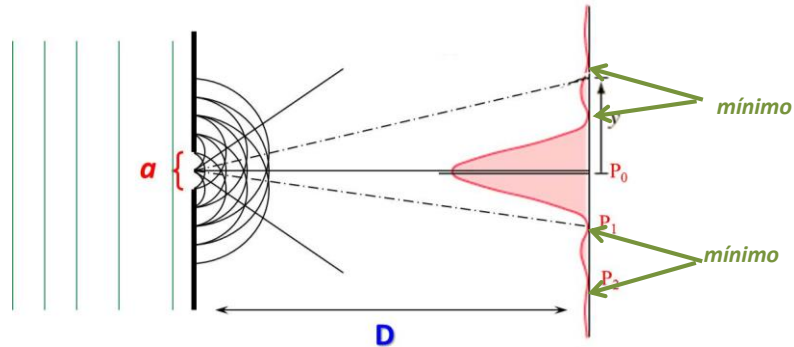
Difração

A figura é formada por um máximo central largo e intenso (muito claro) e uma série de máximos mais estreitos e menos intensos (que são chamados de máximos secundários ou laterais) dos dois lados do máximo central. Os máximos são separados por mínimos.



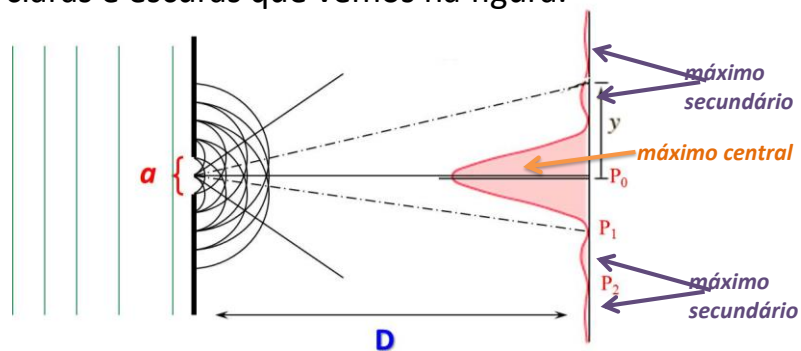
Difração

Os máximos são separados por mínimos.
A luz também chega a essas regiões, mas as ondas luminosas se cancelam



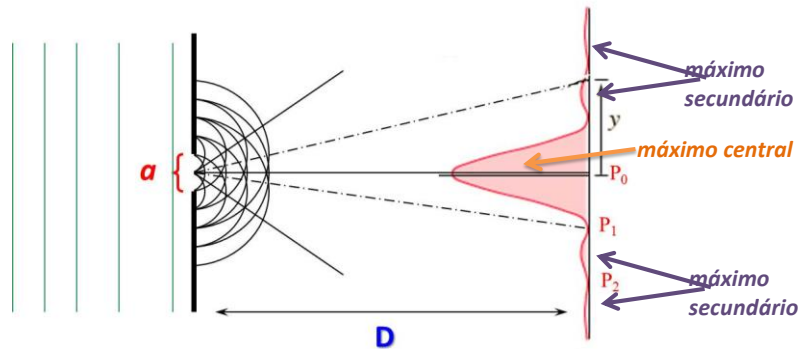
Difração

Uma figura como essa não pode ser explicada pela ótica geométrica: se a luz viajasse em linha reta, na forma de raios, a fenda permitiria que alguns raios passassem e produzissem na tela uma imagem nítida da fenda, de cor clara, em lugar da série de franjas claras e escuras que vemos na figura.

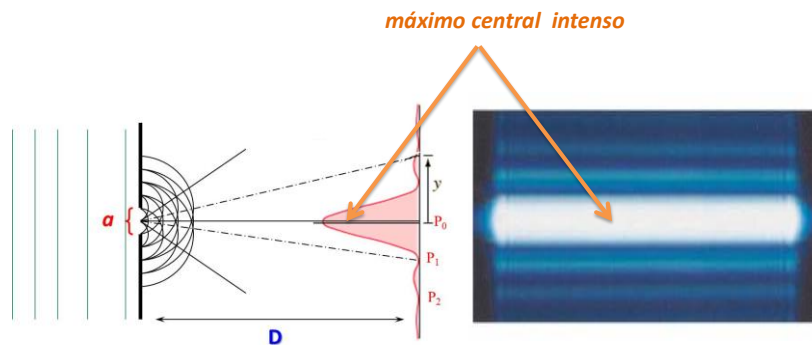


Difração

Conclui-se que a ótica geométrica é apenas uma aproximação.



Difração



Esta figura de difração apareceu em uma tela de observação quando a luz que havia passado por uma fenda vertical estreita chegou à tela.



Teorias sobre a luz

Academia Francesa de Ciências, 1819

corpúscular

×

ondulatória

partidários de **Newton**

concurso para premiar o melhor
trabalho sobre difração



Augustin-Jean **Fresnel**



explicou com modelos
matemáticos a **propagação**
retilínea da luz, as **leis de refração**
de René Descartes e a **difração**

59



Teorias sobre a luz

Academia Francesa de Ciências, 1819

corpúscular

×

ondulatória

partidários de **Newton**

não satisfeitos



Poisson →

Fresnel



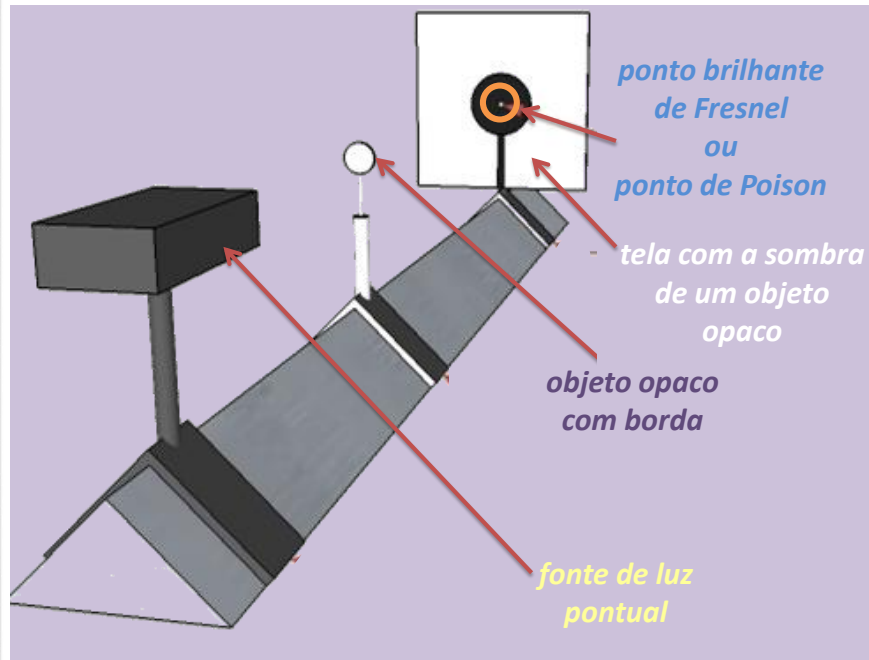
se a teoria de Fresnel
estivesse correta



*as ondas luminosas convergiriam para a sombra de uma
esfera ao passarem pela borda do objeto, produzindo
um ponto luminoso no centro da sombra*

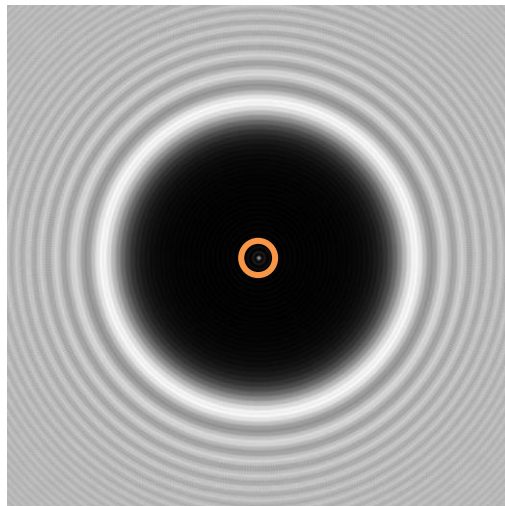
60

O Ponto Claro de Fresnel



Fresnel

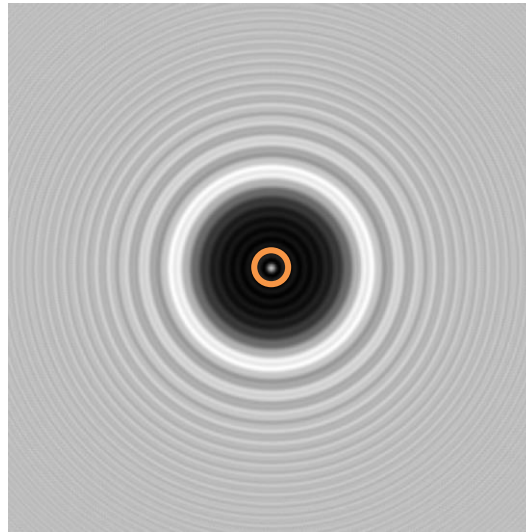
4mm





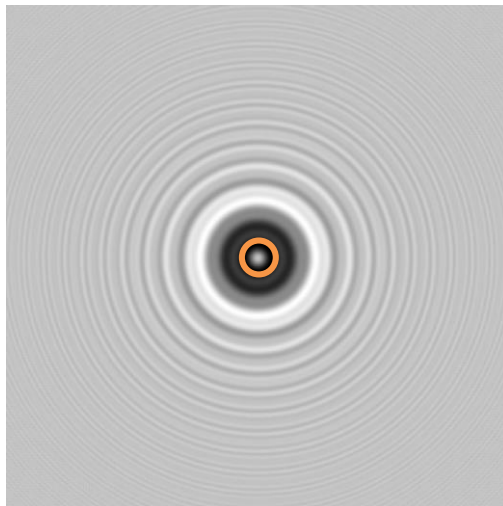
Fresnel

2 mm



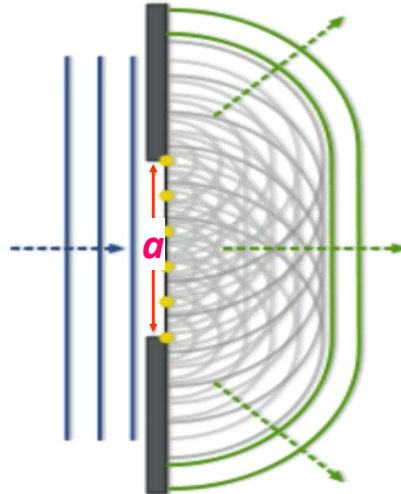
Fresnel

1 mm

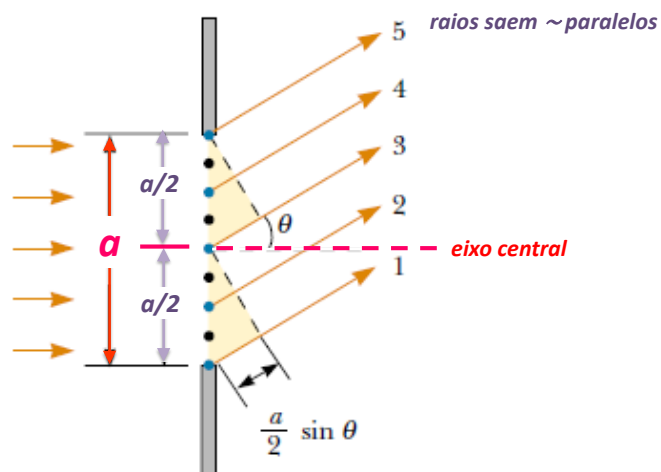


Difração – Princípio de Huygens

Todos os pontos de uma frente de ondas se comportam como fontes puntuais de ondas secundárias.

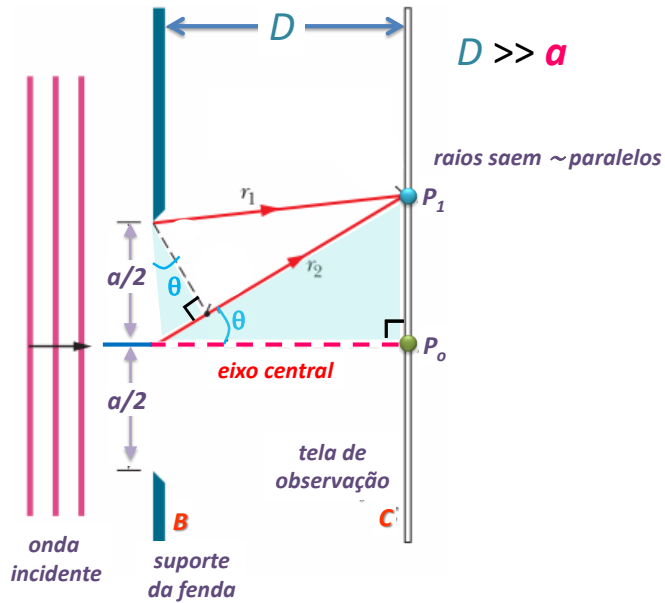


Difração por uma fenda

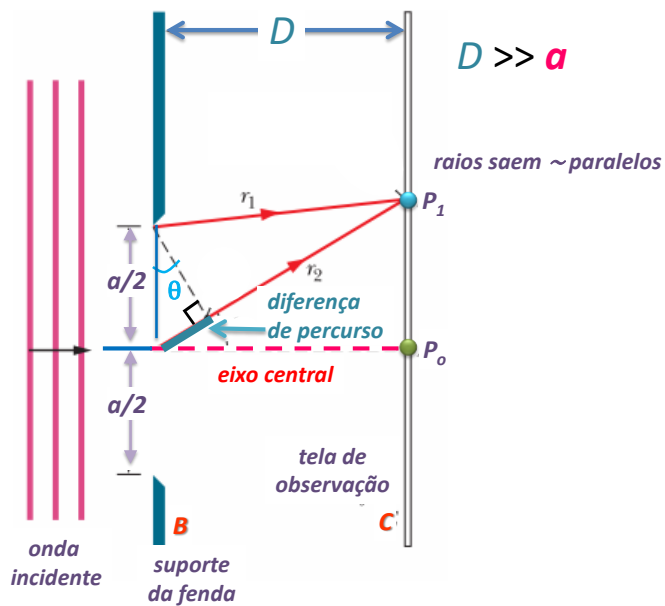




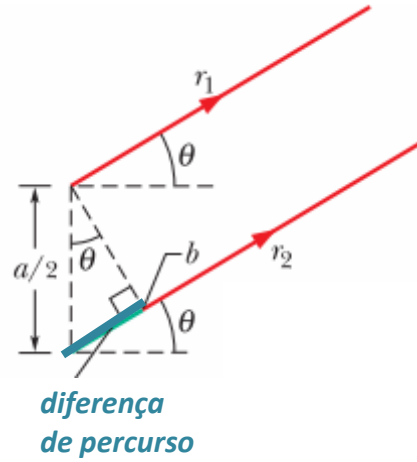
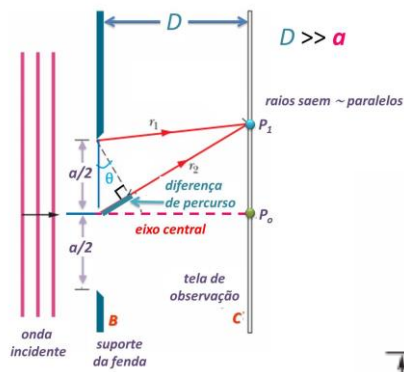
Difração por uma fenda: exagerando....



Difração por uma fenda: exagerando....

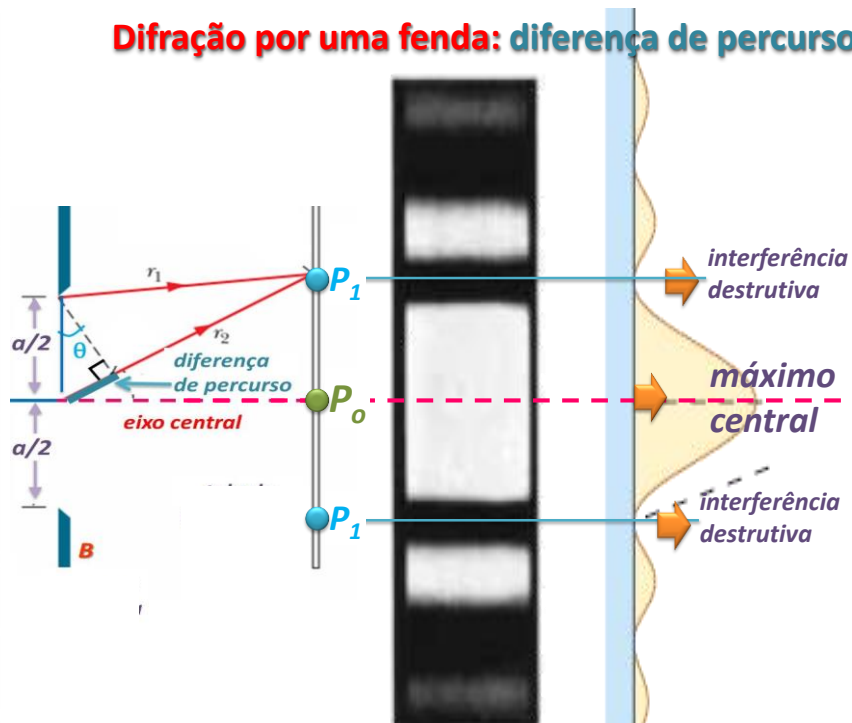


Difração por uma fenda: diferença de percurso

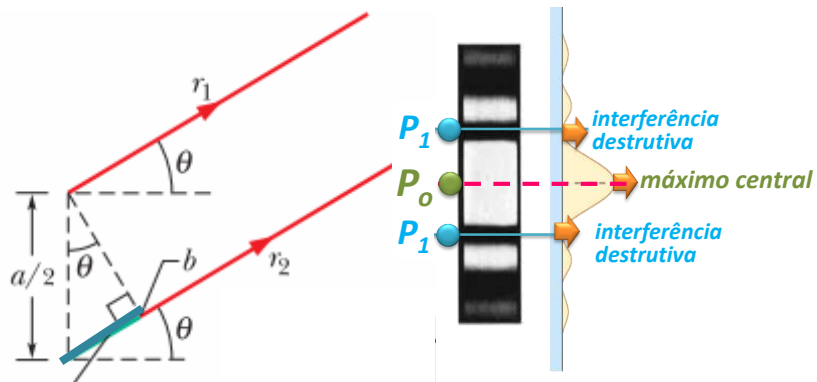


$$b = \frac{a}{2} \text{ sen } \theta$$

Difração por uma fenda: diferença de percurso



Difração por uma fenda: diferença de percurso



diferença de percurso

$$b = \frac{a}{2} \operatorname{sen} \theta$$

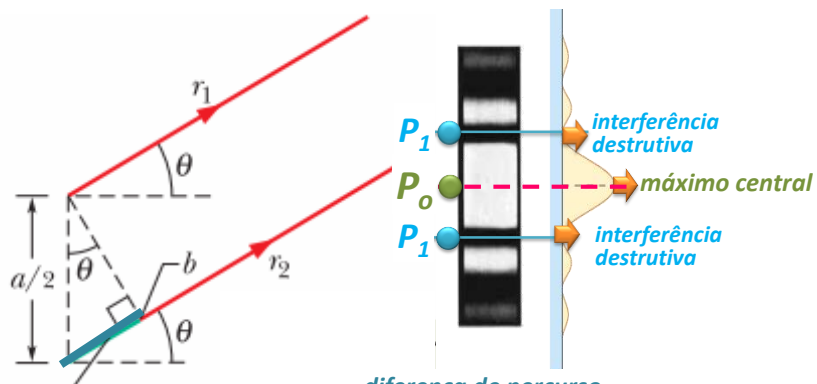
em $P_1 \rightarrow$ interferência destrutiva
↓ diferença de percurso

$$\text{em } P_1 \rightarrow \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$$

em $P_1 \rightarrow 1^\circ$ mínimo $\rightarrow m = 0$

$$\text{em } P_1 \rightarrow \frac{\lambda}{2}$$

Difração por uma fenda: diferença de percurso



diferença de percurso

$$b = \frac{a}{2} \operatorname{sen} \theta$$

diferença de percurso
em $P_1 \rightarrow 1^\circ$ mínimo

$$\text{em } P_1 \rightarrow \frac{\lambda}{2}$$

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{a}{2} \operatorname{sen} \theta$$

$$a \operatorname{sen} \theta = \lambda$$

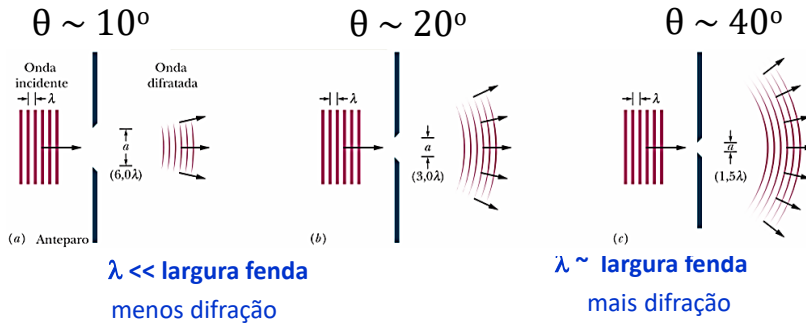
1° mínimo

Difração por uma fenda: condição de mínimo

$$a \operatorname{sen} \theta = \lambda$$

1º mínimo

$a \rightarrow$ largura da fenda



$$\operatorname{sen} \theta = \frac{\lambda}{a}$$

Difração por uma fenda: condição de mínimo

$a \rightarrow$ largura da fenda

$$a \operatorname{sen} \theta = \lambda$$

1º mínimo

$$a \operatorname{sen} \theta = 2\lambda$$

2º mínimo

$$a \operatorname{sen} \theta = m \lambda$$

$m^{\text{ésimo}}$ mínimo

$$m = 1, 2, 3, 4, \dots$$

mínimo = franjas escuras

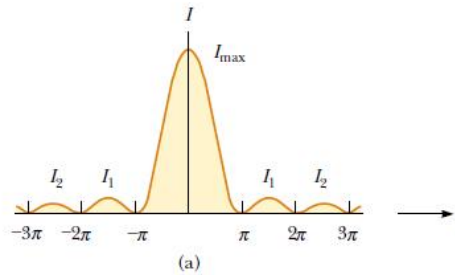
Difração por uma fenda: condição de mínimo

$$a \operatorname{sen} \theta = m \lambda$$

a → largura da fenda

$m = 1, 2, 3, 4, \dots$

mínimo = franjas escuras



Exemplo

Figura de difração de uma fenda iluminada com luz branca

Uma fenda de largura a é iluminada com luz branca.

(a) Para que valor de a ocorre em $\theta = 15^\circ$, o primeiro mínimo para a luz vermelha?

A difração ocorre **separadamente** para cada λ presente na luz que passa pela fenda, com as localizações dos mínimos para cada comprimento de onda determinadas por

$$a \operatorname{sen} \theta = \lambda$$

1º mínimo

Exemplo

Figura de difração de uma fenda iluminada com luz branca

Uma fenda de largura a é iluminada com luz branca.

(a) Para que valor de a ocorre em $\theta = 15^\circ$, o primeiro mínimo para a luz vermelha ($\lambda = 650 \text{ nm}$)?

$$a \operatorname{sen} \theta = \lambda \quad 1^\circ \text{ mínimo}$$

$$a = \frac{\lambda}{\operatorname{sen} \theta}$$

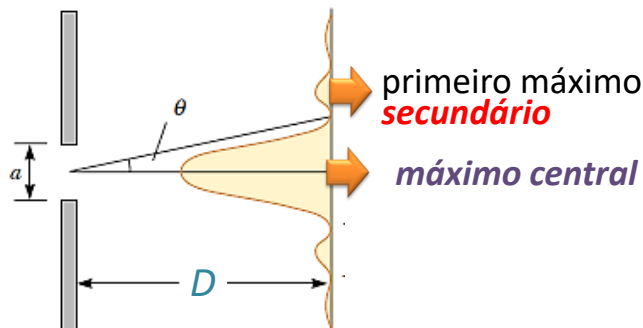
$$a = \frac{650 \times 10^{-9}}{\operatorname{sen} 15^\circ} \quad a \approx 2,5 \mu\text{m}$$

Exemplo

Figura de difração de uma fenda iluminada com luz branca

Uma fenda de largura a é iluminada com luz branca.

(b) Qual é o comprimento de onda λ' da luz cujo primeiro máximo secundário está em 15° , coincidindo assim com o primeiro mínimo para a luz vermelha?

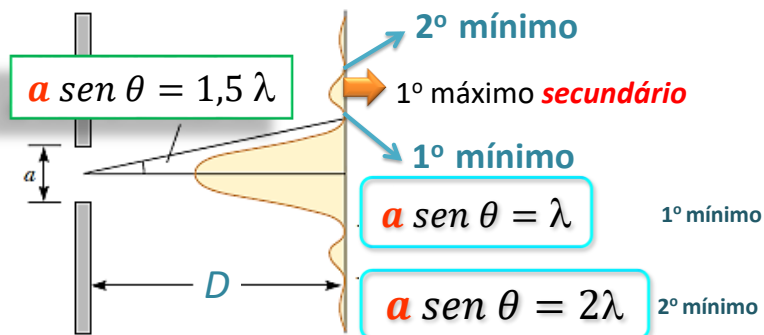


Exemplo

Figura de difração de uma fenda iluminada com luz branca

Uma fenda de largura a é iluminada com luz branca.

(b) Qual é o comprimento de onda λ' da luz cujo primeiro máximo *secundário* está em 15° , coincidindo assim com o primeiro mínimo para a luz vermelha?



Exemplo

Figura de difração de uma fenda iluminada com luz branca

Uma fenda de largura a é iluminada com luz branca.

(b) Qual é o comprimento de onda λ' da luz cujo primeiro máximo *secundário* está em 15° , coincidindo assim com o primeiro mínimo para a luz vermelha?

$$a \sin \theta = 1,5 \lambda \quad \Rightarrow \quad 1^\circ \text{ máximo secundário}$$

$$a \approx 2,5 \mu m \quad \theta = 15^\circ$$

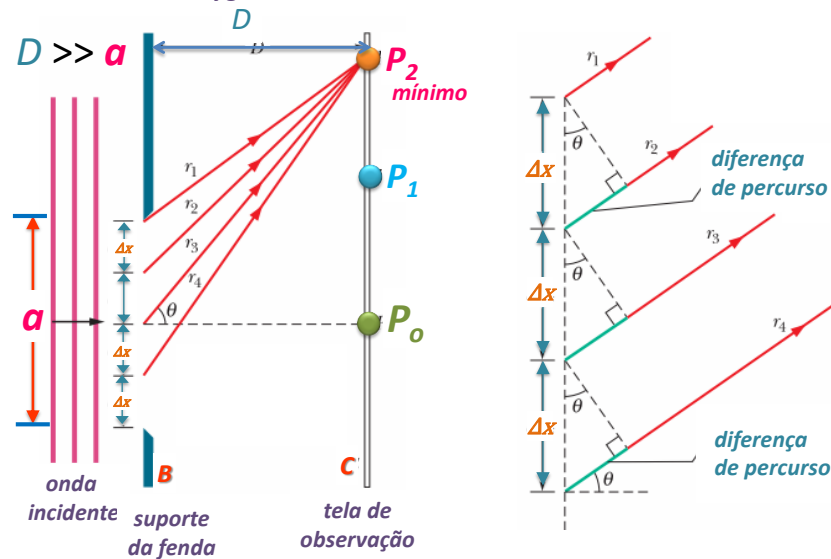
obtido na parte (a)

$$\lambda' = \frac{a \sin \theta}{1,5} \quad \lambda' = \frac{(2,5 \times 10^{-6}) \sin 15^\circ}{1,5}$$

$$\lambda' = 430 \text{ nm}$$

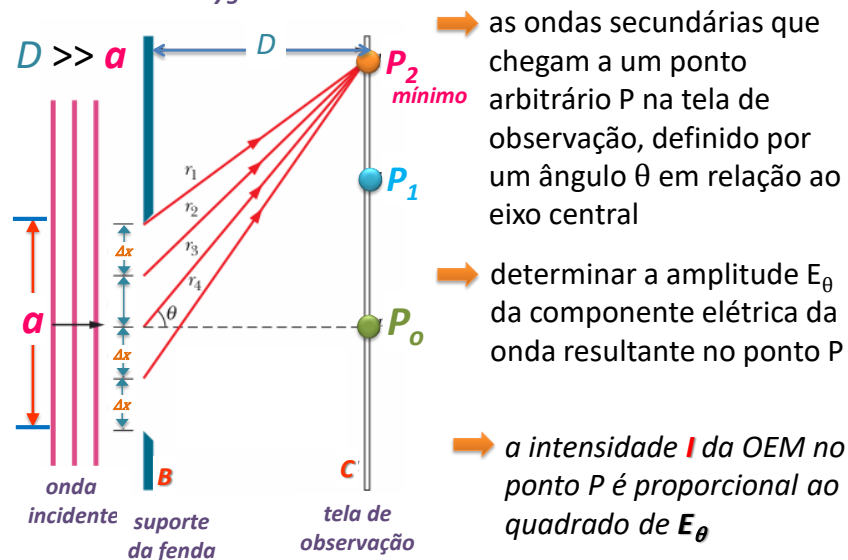
Intensidade da Luz Difrata por Uma Fenda

A fenda está dividida em N regiões de largura Δx , suficientemente estreitas para supor que cada região se comporta como uma fonte de ondas secundárias de Huygens.



Intensidade da Luz Difrata por Uma Fenda

A fenda está dividida em N regiões de largura Δx , suficientemente estreitas para supor que cada região se comporta como uma fonte de ondas secundárias de Huygens.



Intensidade da Luz Difrata por Uma Fenda

Cálculo de E_θ

- conhecer as fases relativas das ondas secundárias
- diferença de fase entre as ondas secundárias provenientes de regiões vizinhas é dada por

$$\text{diferença de fase} \longleftrightarrow 2\pi$$

$$\text{diferença de percurso} \longleftrightarrow \lambda$$

$$\Delta\phi \longleftrightarrow 2\pi$$

$$\Delta x \sin\theta \longleftrightarrow \lambda$$

$$\text{diferença de fase} \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \sin\theta$$

Intensidade da Luz Difrata por Uma Fenda

Cálculo de E_θ

$$\text{diferença de fase} \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \sin\theta$$

Suposição: as ondas secundárias que chegam ao ponto P tem a mesma amplitude, ΔE .

- para calcular a amplitude E_θ da onda resultante no ponto P → somar as ondas secundárias usando o método dos fasores.
- construir um diagrama de N fasores, cada um correspondendo à onda secundária proveniente de uma das regiões da fenda.

Intensidade da Luz Difrata por Uma Fenda

$$a \operatorname{sen} \theta = m \lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

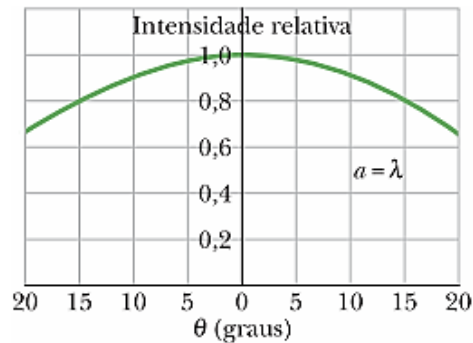
Método
Quantitativo

$$I_{\theta} = I_m \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\alpha} \right)^2$$

mínimos

$$a = \lambda$$

Quanto mais larga é a fenda, mais estreito é o máximo central.



Intensidade da Luz Difrata por Uma Fenda

$$a \operatorname{sen} \theta = m \lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

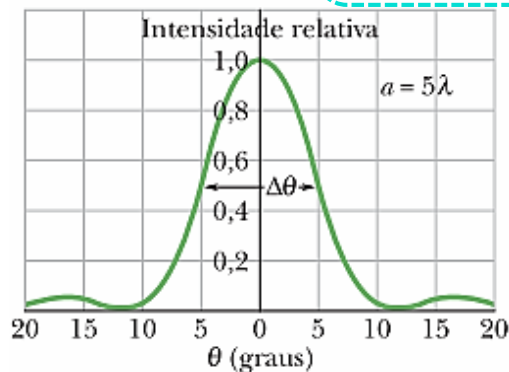
Método
Quantitativo

$$I_{\theta} = I_m \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\alpha} \right)^2$$

mínimos

$$a = 5\lambda$$

Quanto mais larga é a fenda, mais estreito é o máximo central.



Intensidade da Luz Difrata por Uma Fenda

$$a \operatorname{sen} \theta = m \lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

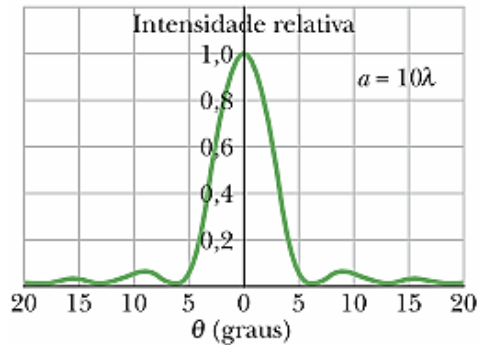
Método
Quantitativo

$$I_{\theta} = I_m \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\alpha} \right)^2$$

mínimos

$$a = 10 \lambda$$

Quanto mais larga é a fenda, mais estreito é o máximo central.



Exemplo

Determine as intensidades dos três primeiros máximos secundários da figura de difração de uma fenda da figura expressas como porcentagens da intensidade do máximo central.

mínimos:

$$a \operatorname{sen} \theta = m \lambda$$

$$\alpha = m \pi$$

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



Exemplo

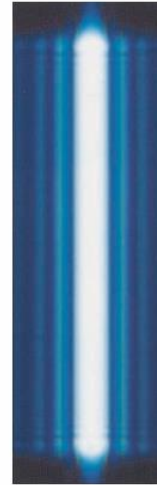
Determine as intensidades dos três primeiros máximos secundários da figura de difração de uma fenda da figura expressas como porcentagens da intensidade do máximo central.

Os **máximos secundários** estão aproximadamente a meio caminho entre os mínimos

As localizações dos máximos secundários são dadas por

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

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



Exemplo

Determine as intensidades dos três primeiros máximos secundários da figura de difração de uma fenda da figura expressas como porcentagens da intensidade do máximo central.

máximos

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

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

$$\alpha = \left(m + \frac{1}{2} \right) \pi$$



Exemplo

Determine as intensidades dos três primeiros máximos secundários da figura de difração de uma fenda da figura expressas como porcentagens da intensidade do máximo central.

$$\alpha = \left(m + \frac{1}{2}\right)\pi \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

$$I_{\theta} = I_m \left(\frac{\text{sen } \alpha}{\alpha}\right)^2$$

$$\frac{I_{\theta}}{I_m} = \left(\frac{\text{sen } \alpha}{\alpha}\right)^2$$



Exemplo

Determine as intensidades dos três primeiros máximos secundários da figura de difração de uma fenda da figura expressas como porcentagens da intensidade do máximo central.

$$\alpha = \left(m + \frac{1}{2}\right)\pi \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

$$\frac{I_{\theta}}{I_m} = \left(\frac{\text{sen } \alpha}{\alpha}\right)^2$$

$$\frac{I_{\theta}}{I_m} = \left(\frac{\text{sen } \left(m + \frac{1}{2}\right)\pi}{\left(m + \frac{1}{2}\right)\pi}\right)^2$$



Exemplo

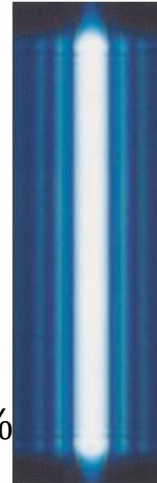
Determine as intensidades dos três primeiros máximos secundários da figura de difração de uma fenda da figura expressas como porcentagens da intensidade do máximo central.

$$\alpha = \left(m + \frac{1}{2}\right)\pi \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

primeiro máximo secundário $\rightarrow m = 1$

$$\frac{I_0}{I_m} = \left(\frac{\text{sen}\left(1 + \frac{1}{2}\right)\pi}{\left(1 + \frac{1}{2}\right)\pi}\right)^2$$

$$\frac{I_1}{I_m} = \left(\frac{\text{sen}\frac{3}{2}\pi}{\frac{3}{2}\pi}\right)^2 = 4,5 \times 10^{-2} \approx 4,5\%$$



Exemplo

Determine as intensidades dos três primeiros máximos secundários da figura de difração de uma fenda da figura expressas como porcentagens da intensidade do máximo central.

primeiro máximo secundário $\rightarrow m = 1$

$$\frac{I_1}{I_m} \approx 4,5\%$$

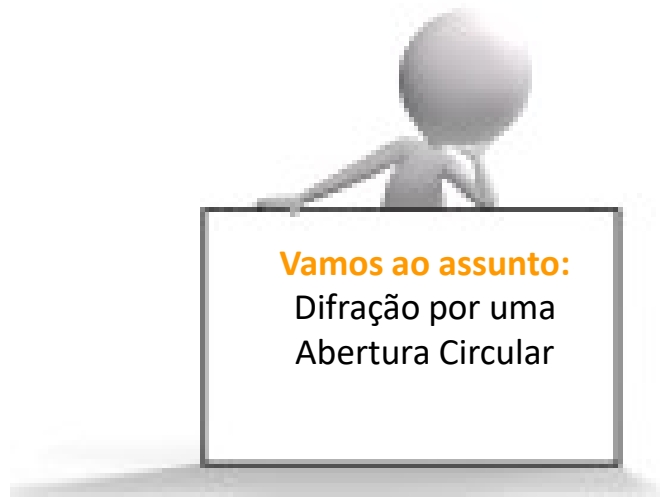
segundo máximo secundário $\rightarrow m = 2$

$$\frac{I_2}{I_m} \approx 1,6\%$$

terceiro máximo secundário $\rightarrow m = 3$

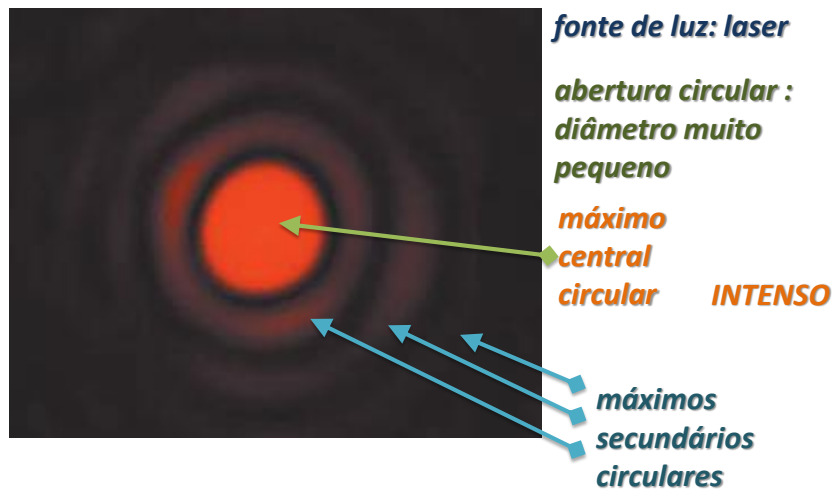
$$\frac{I_3}{I_m} \approx 0,83\%$$





95

Difração por uma Abertura Circular

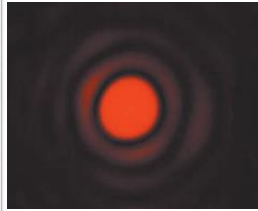


óptica geométrica: imagem → ponto

+ FRACOS

óptica física: imagem → disco luminoso com anéis claros e escuros

Difração por uma Abertura Circular



abertura circular : diâmetro d

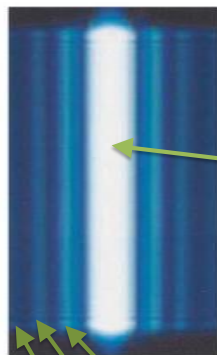
a posição do primeiro mínimo é dada por:

$$\text{sen } \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

diâmetro d

θ é o ângulo entre o eixo central e a reta que liga o centro do anel à posição do mínimo (circular)

Difração por uma fenda



fenda: abertura a

máximo central

INTENSO

fenda: largura a

posição dos mínimos :

$$a \text{ sen } \theta = m \lambda$$

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

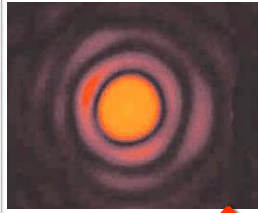
máximos secundários circulares
+ FRACOS

Difração por uma Abertura Circular

abertura circular : diâmetro d

$$\text{sen } \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

posição do primeiro mínimo



figuras de difração

fenda: largura a

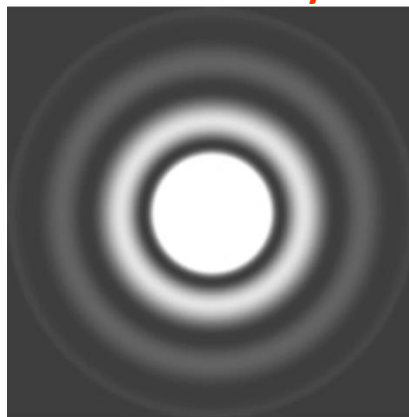
$$\text{sen } \theta = \frac{\lambda}{a}$$

posição do primeiro mínimo



Abertura Circular: Disco de Airy

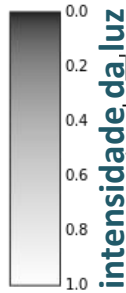
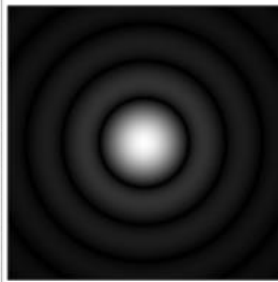
Disco de Airy



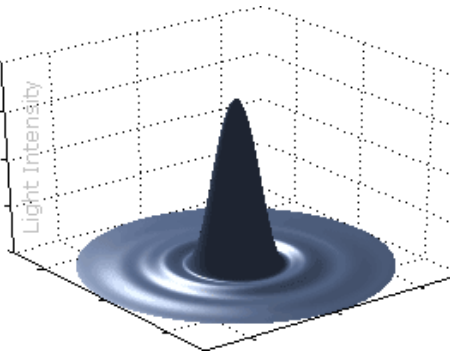
Padrão de difração
para abertura circular

Abertura Circular: Disco de Airy

Disco de Airy

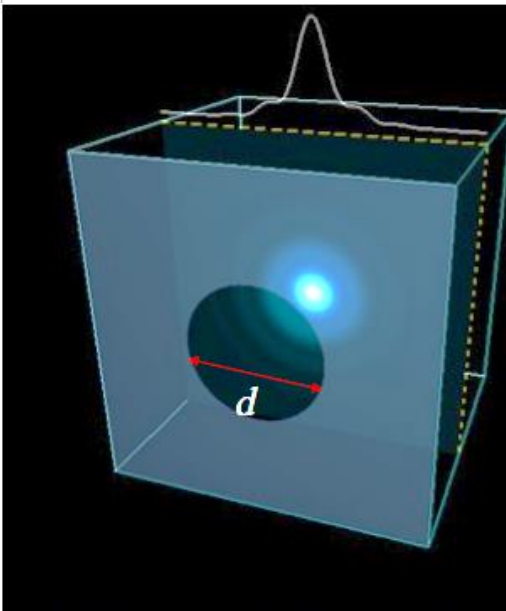


Visualização 3D

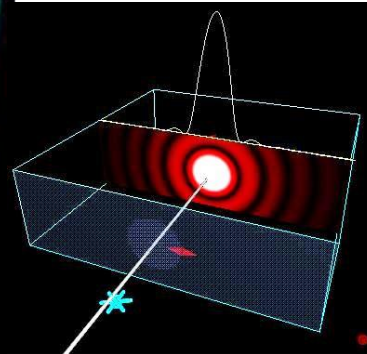


O padrão de difração 2-D proporcionado por uma abertura circular ideal, é chamado de "disco de Airy," (primeiro a explicar: George Airy). O disco de Airy é utilizado para definir a resolução máxima teórica de um sistema óptico (definido como o diâmetro do primeiro círculo escuro - mínimo).

Abertura Circular: Disco de Airy

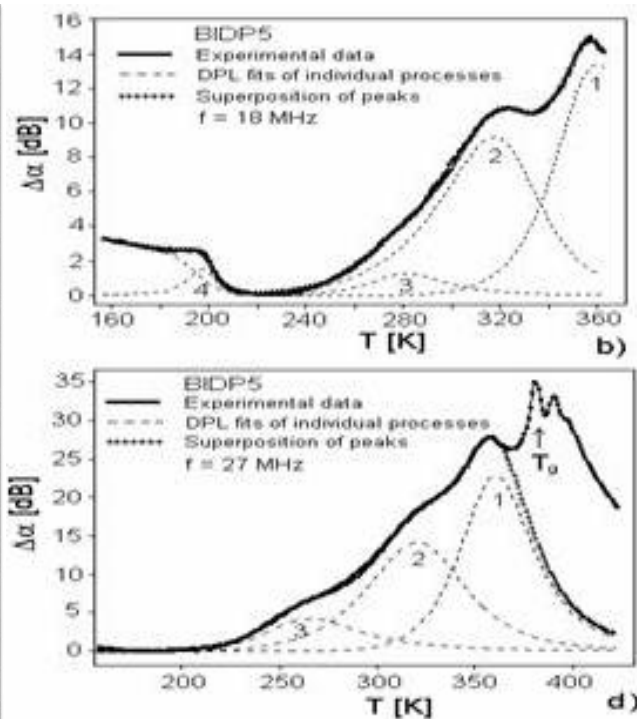


$$\text{sen } \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

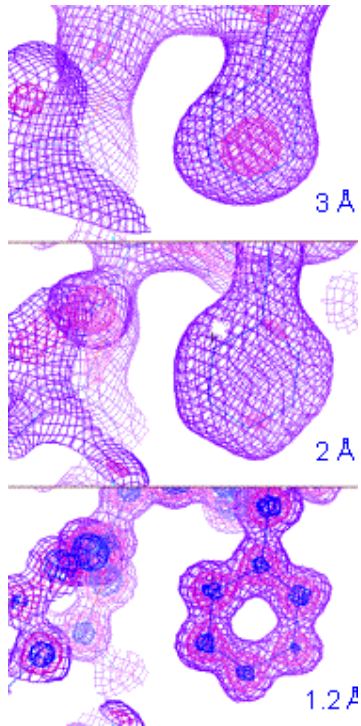


Resolução

As imagens produzidas por lentes são figuras de difração → é importante quando o interesse é o de **resolver** (**distinguir**) dois objetos pontuais distantes cuja separação angular é pequena.

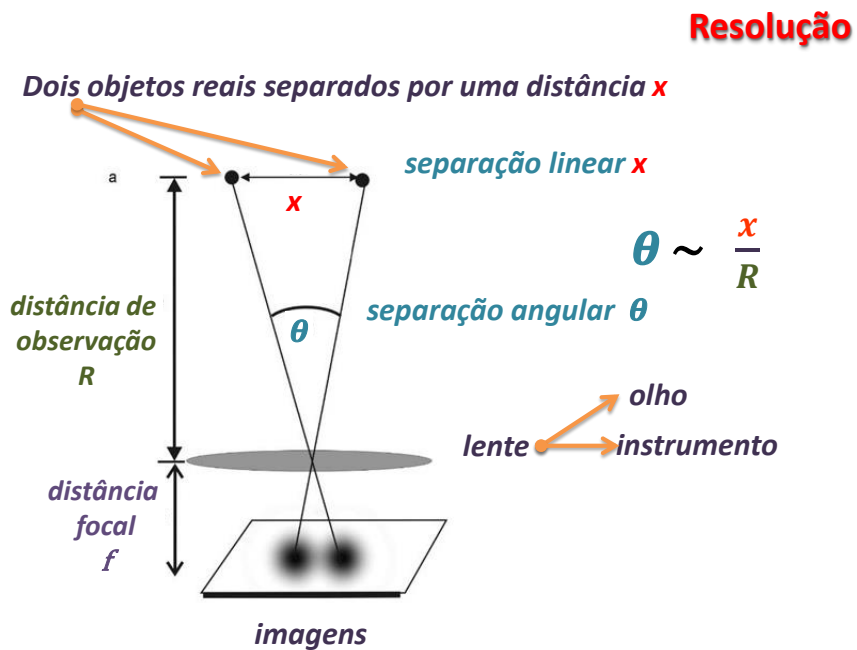


Resolução Exemplo



Resolução Exemplo

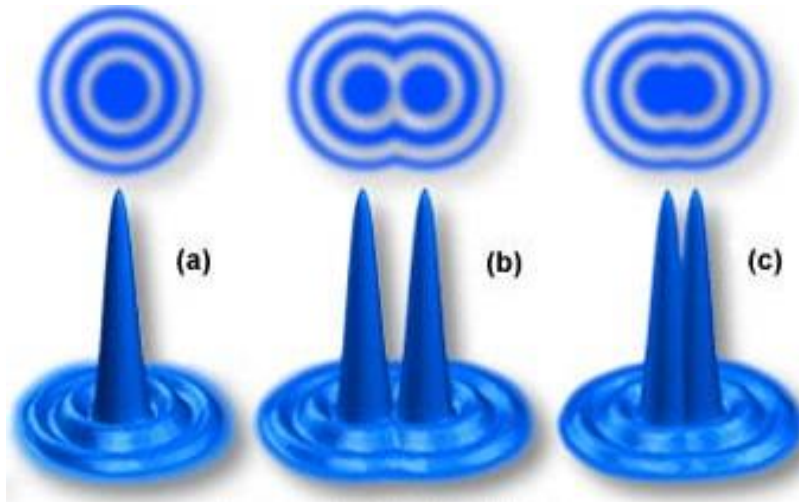
*difração de raios X
por monocristal*



<http://what-when-how.com/remote-sensing-from-air-and-space/diffraction-limits-the-rayleigh-criterion-visible-imagery-remote-sensing/>

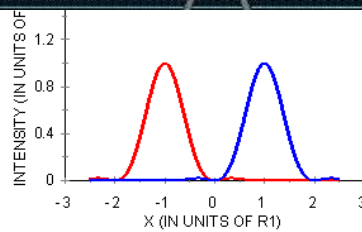
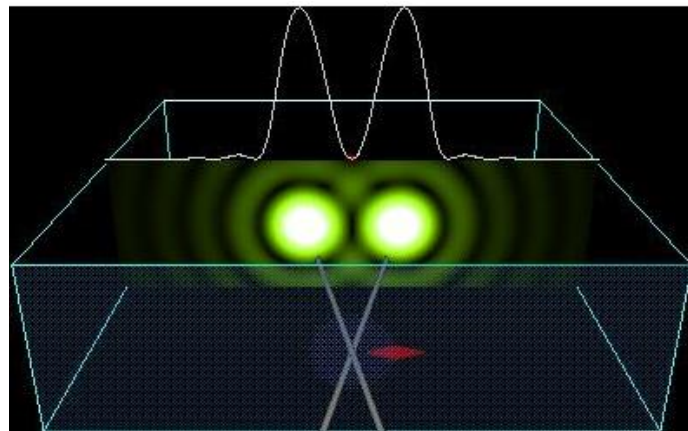
Resolução: 2 objetos

Discos de Airy

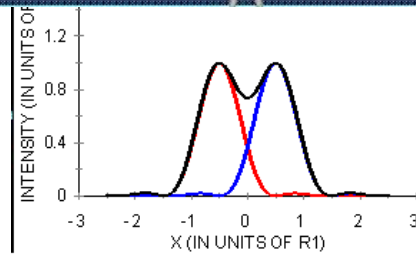
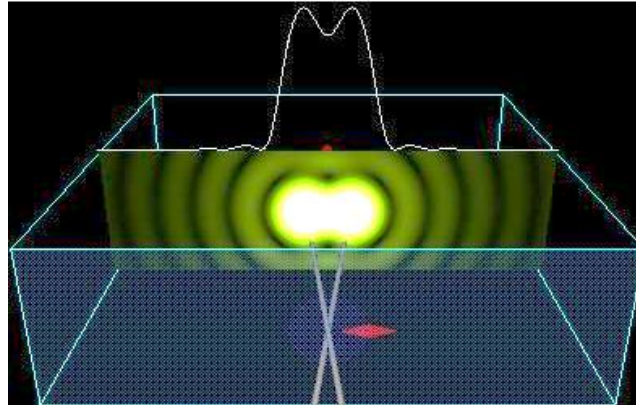


Visualização 3D

Resolução: 2 objetos

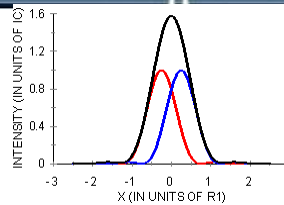
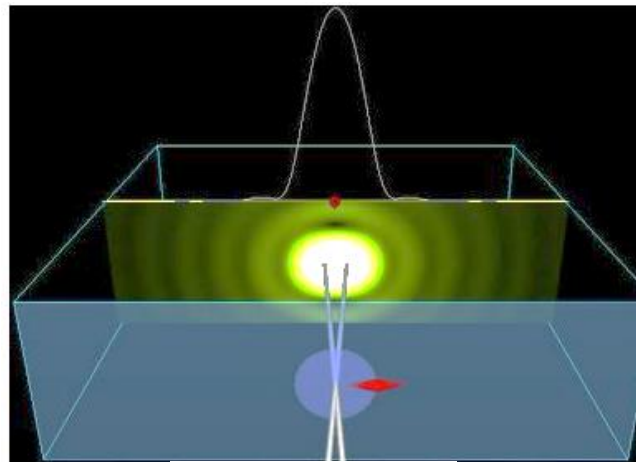


Resolução: 2 objetos



**pobremente
 resolvidos**

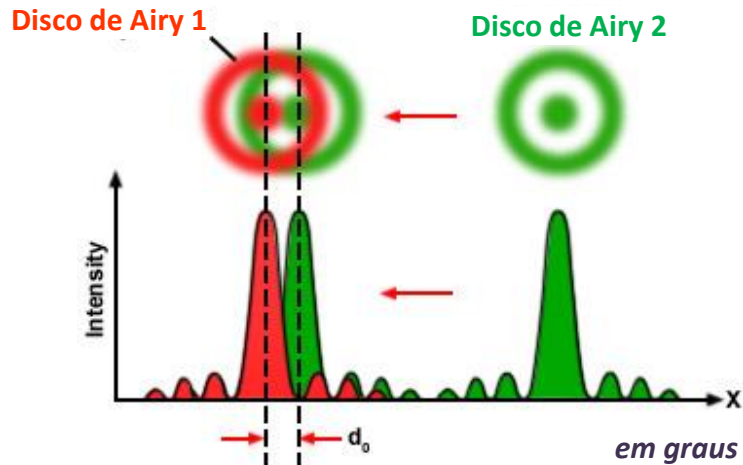
Resolução: 2 objetos



**não
 resolvidos**

Resolução: 2 objetos

Crítério de Rayleigh

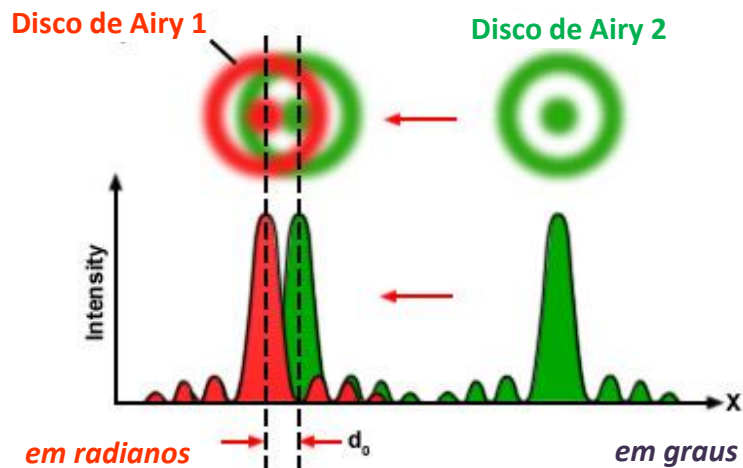


$$\text{sen } \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

$$\theta_R = \text{sen}^{-1} \left(1,22 \frac{\lambda}{d} \right)$$

Resolução: 2 objetos

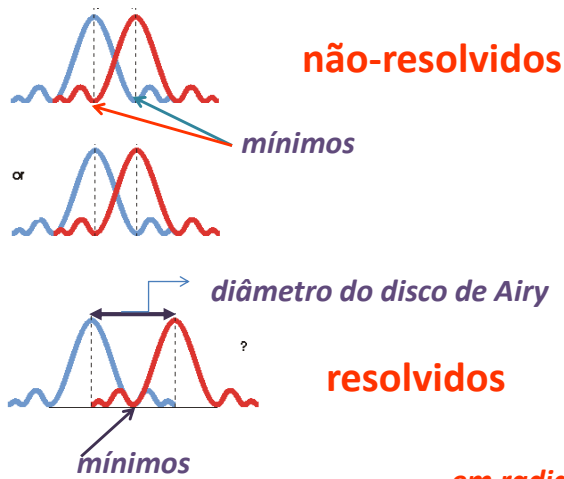
Crítério de Rayleigh



$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

$$\theta_R = \text{sen}^{-1} \left(1,22 \frac{\lambda}{d} \right)$$

Resolução: 2 objetos



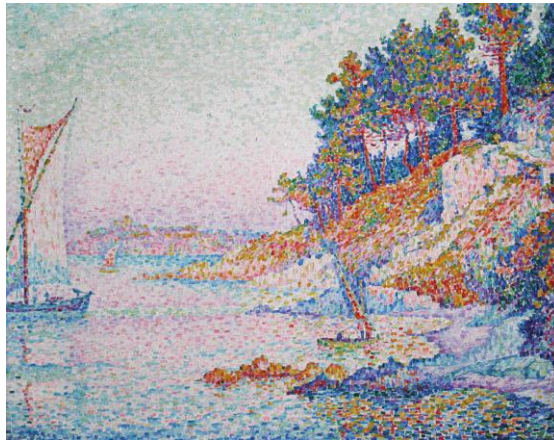
Critério de Rayleigh

em radianos

$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Exemplo: Pontilhismo

La calanque, (1906)
[Paul Signac](#)



O **Pontilhismo** é uma técnica de pintura, saída do movimento impressionista, em que pequenas manchas ou pontos de cor provocam, pela justaposição, uma mistura óptica nos olhos do observador (imagem).

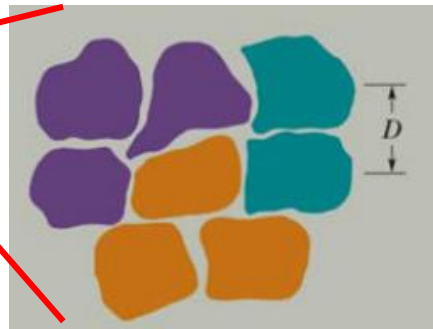
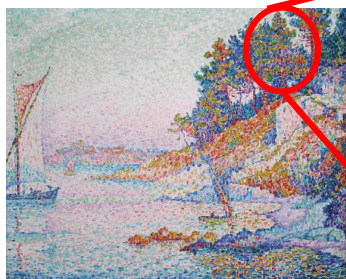
Exemplo: Pontilhismo



Tarde de Domingo na Ilha de Grande Jatte, [1884](#) – [1886](#)

Exemplo

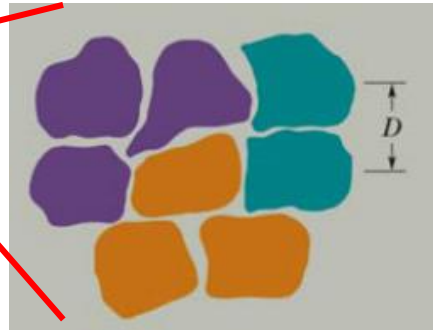
A figura mostra uma vista ampliada dos pontos coloridos de uma pintura pontilista.



A distância média entre os centros dos pontos é $D = 2,0 \text{ mm}$. O diâmetro da pupila do olho do observador é $d = 1,5 \text{ mm}$ e a menor separação angular entre os pontos que o olho pode resolver é dada pelo **critério de Rayleigh**.

Qual é a menor distância de observação na qual os pontos não podem ser resolvidos para nenhuma cor?

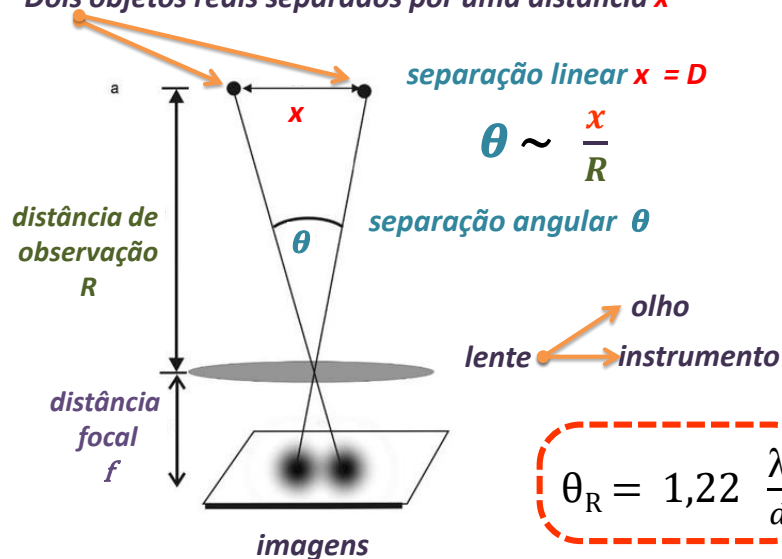
Exemplo



separação entre centro dos pontos $D = 2,0 \text{ mm}$.
 diâmetro da pupila do olho do observador $d = 1,5 \text{ mm}$
 a menor separação angular entre os pontos que o olho pode resolver é dada pelo **critério de Rayleigh**.
 Qual é a menor distância de observação na qual os pontos não podem ser resolvidos para nenhuma cor?

Critério de Rayleigh

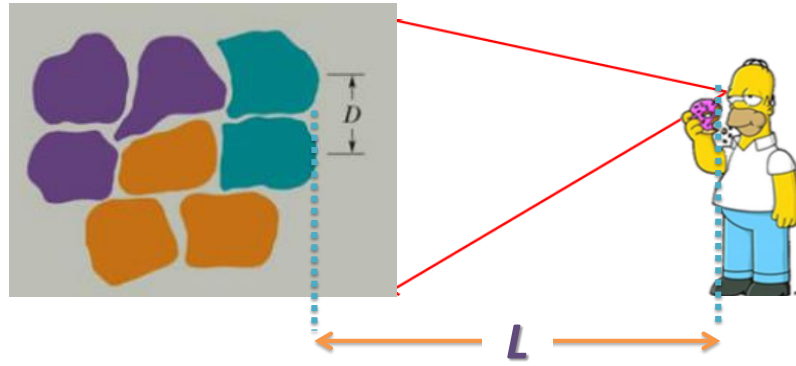
Dois objetos reais separados por uma distância x



<http://what-when-how.com/remote-sensing-from-air-and-space/diffraction-limits-the-rayleigh-criterion-visible-imagery-remote-sensing/>

Critério de Rayleigh

separação linear $x = D$



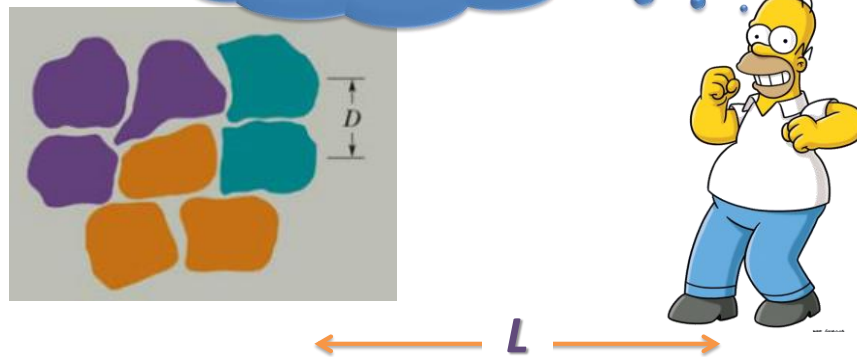
luz branca

critério de Rayleigh

$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Critério de Rayleigh

pintura
contínua



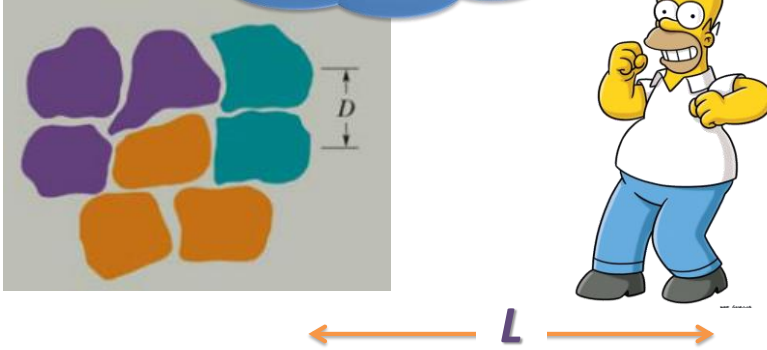
luz branca

critério de Rayleigh

$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Cr terio de Rayleigh

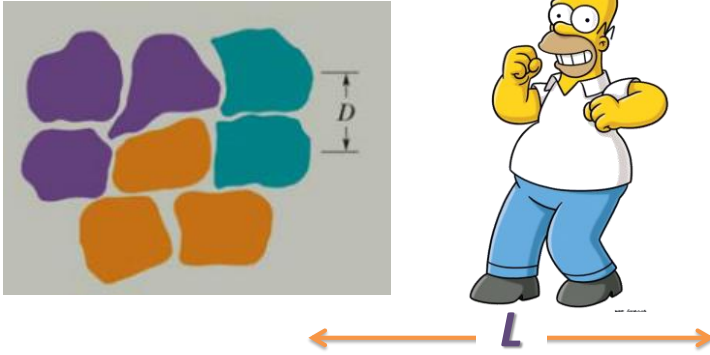
pintura cont nua



luz branca

cr terio de Rayleigh $\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$

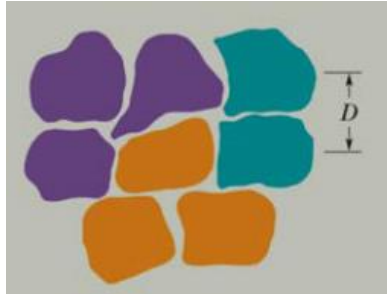
Cr terio de Rayleigh



luz branca

cr terio de Rayleigh $\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$

Cr terio de Rayleigh



L

luz branca

cr terio de Rayleigh

$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Cr terio de Rayleigh



2 pontos separados



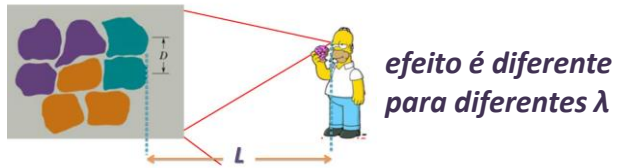
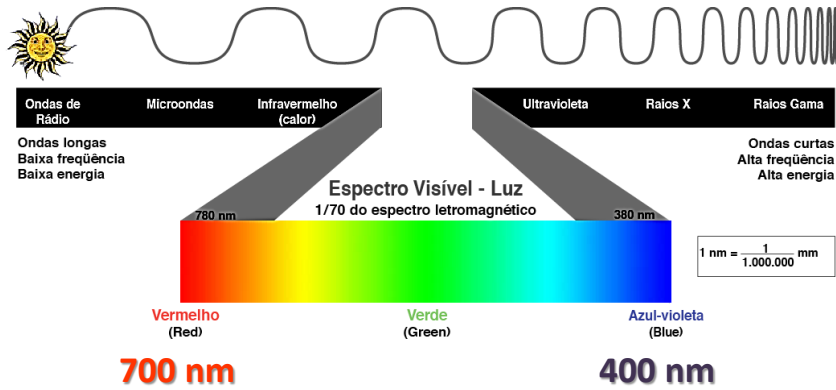
L

luz branca

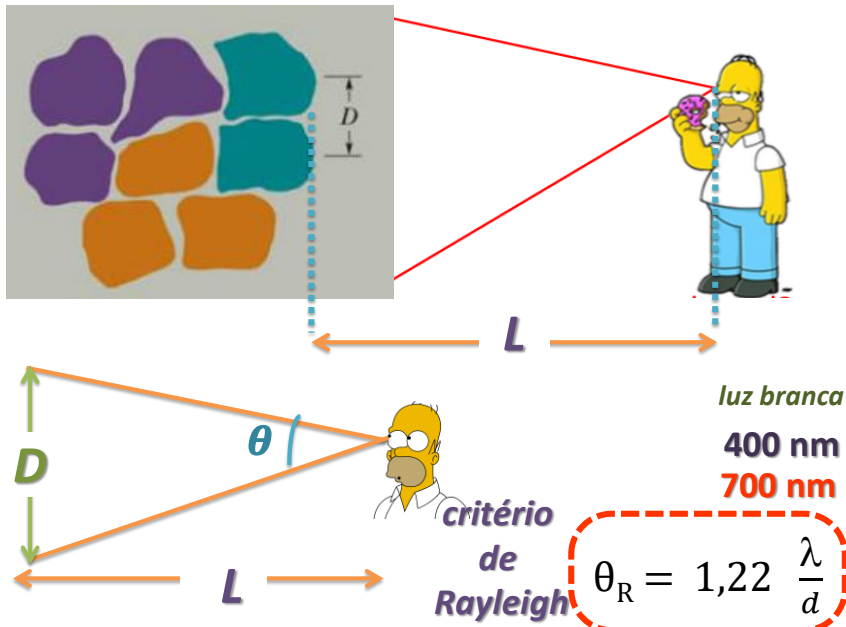
cr terio de Rayleigh

$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

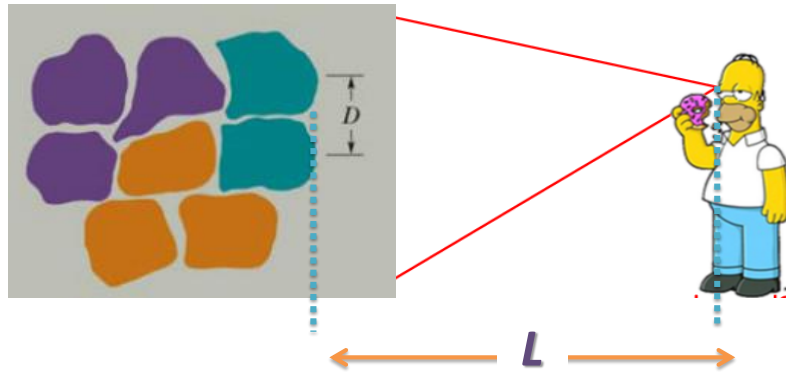
luz branca



Crítério de Rayleigh

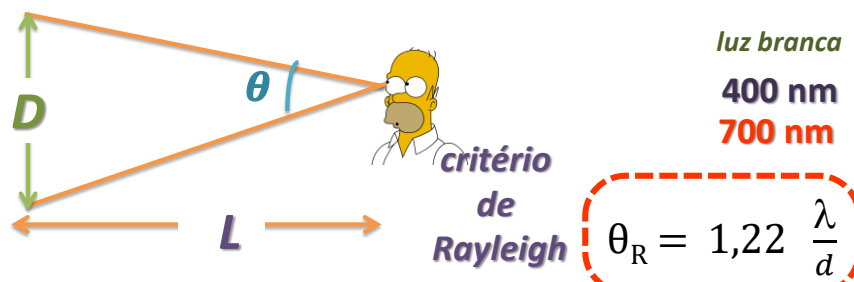
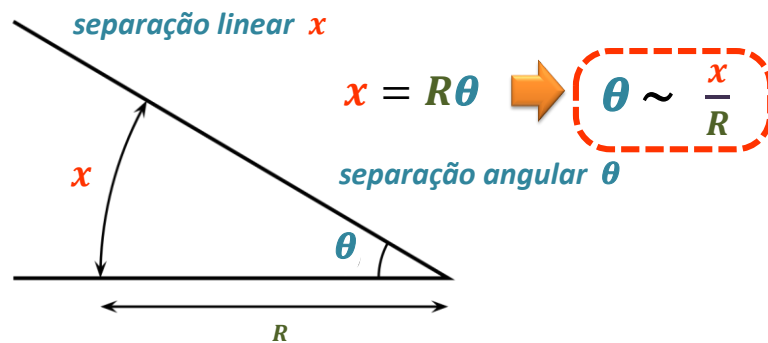


Crítério de Rayleigh



Qual é a menor distância de observação na qual os pontos não podem ser resolvidos para nenhuma cor?

Crítério de Rayleigh

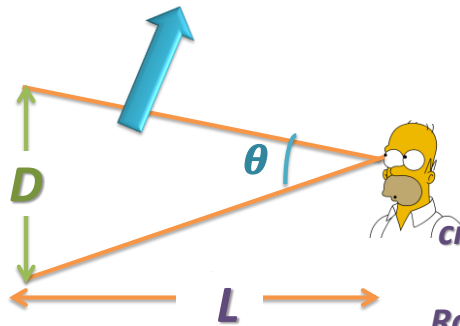


Critério de Rayleigh

separação angular θ

$$\theta \sim \frac{x}{R}$$

$$\theta = \frac{D}{L}$$



luz branca

400 nm

700 nm

critério
de
Rayleigh

$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Critério de Rayleigh

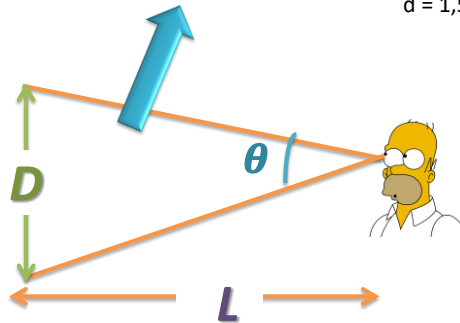
critério de Rayleigh:

400 nm

700 nm

$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

diâmetro da pupila do olho do observador
 $d = 1,5 \text{ mm}$



luz branca

$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Critério de Rayleigh

se $\theta > \theta_R$ os pontos são distinguíveis

$$\theta = \frac{D}{L}$$

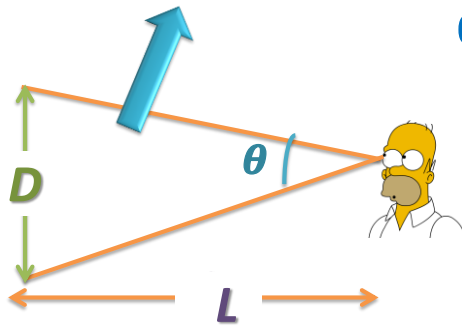
$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

400 nm

700 nm

limite mínimo ocorre para $\theta = \theta_R$

$$\theta = \frac{D}{L} = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

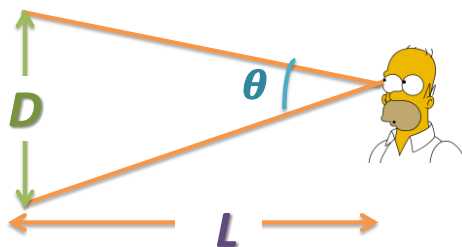


Critério de Rayleigh

$$\frac{D}{L} = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

$$L = \frac{D d}{1,22 \lambda}$$

$$L = \frac{(2,0 \times 10^{-3} \text{ m})(1,5 \times 10^{-3} \text{ m})}{1,22 \lambda}$$



400 nm

700 nm



Critério de Rayleigh

400 nm

$$L = \frac{(2,0 \times 10^{-3} \text{ m})(1,5 \times 10^{-3} \text{ m})}{1,22 \lambda}$$

$$L = \frac{(2,46 \times 10^{-6} \text{ m})(\text{ m})}{400 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$L = 6,15 \text{ m}$$



Critério de Rayleigh

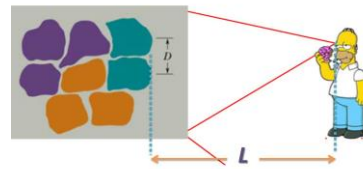
700 nm

$$L = \frac{(2,0 \times 10^{-3} \text{ m})(1,5 \times 10^{-3} \text{ m})}{1,22 \lambda}$$

$$L = \frac{(2,46 \times 10^{-6} \text{ m})(\text{ m})}{700 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$L = 3,51 \text{ m}$$

Crítério de Rayleigh



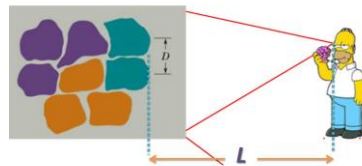
700 nm

para $L = 3,51 \text{ m}$
os pontos vermelhos se tornam
indistinguíveis, mas os violetas ainda
parecem distinguíveis.

$L = 3,51 \text{ m}$

Crítério de Rayleigh

400 nm



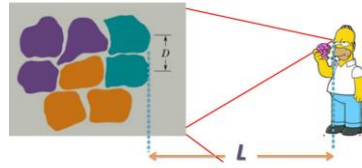
para $L = 6,15 \text{ m}$
os pontos *violetas* se tornam
indistinguíveis

$L = 6,15 \text{ m}$

Crítério de Rayleigh

400 nm

$L = 6,15 m$

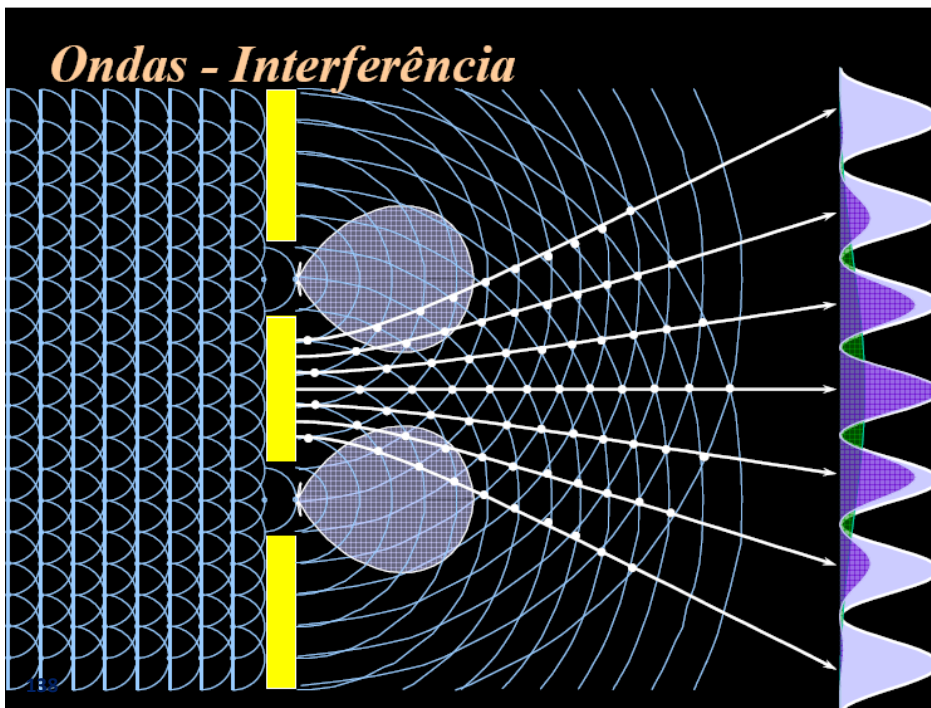


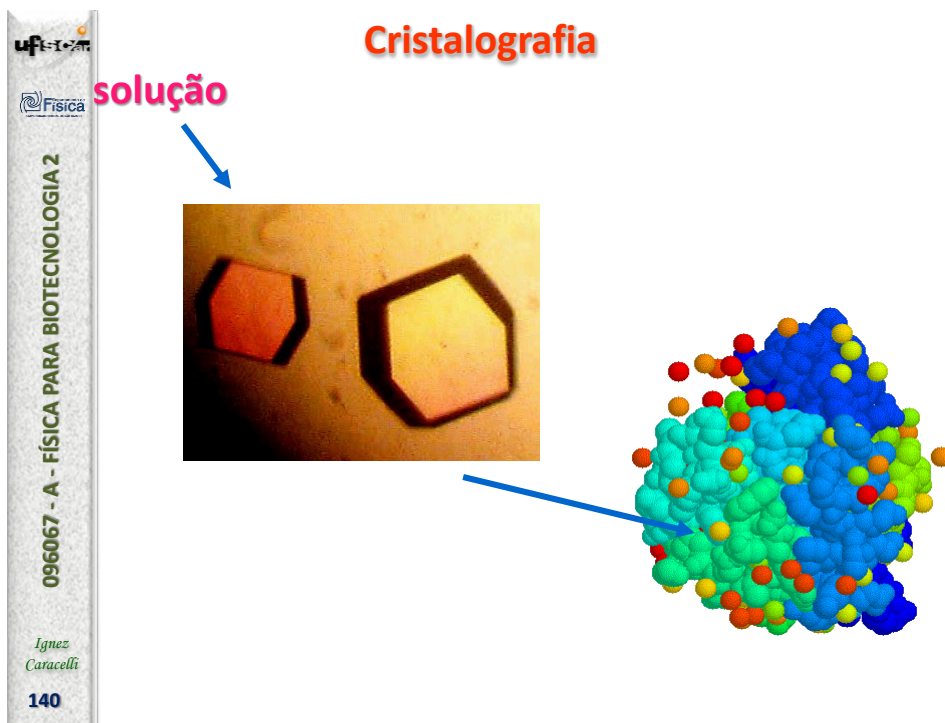
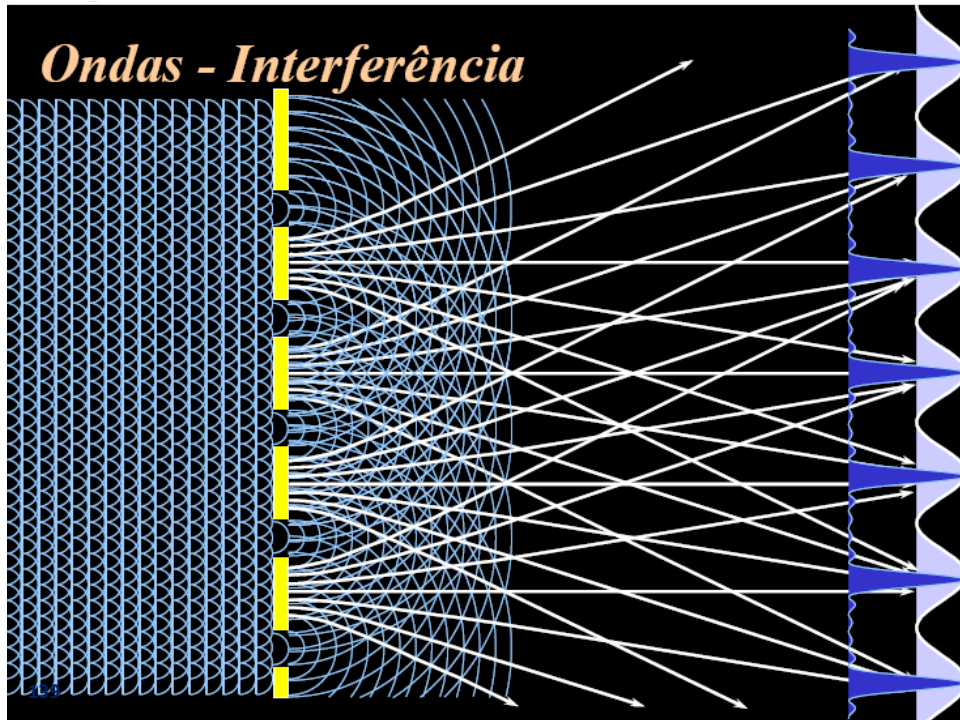
700 nm

$L = 3,51 m$

para $L = 6,15 m$

ou a distância maior, as cores dos pontos vizinhos se misturam; a cor percebida em cada região do quadro é uma cor que pode nem existir na pintura.





Formação de cristal de lisozima

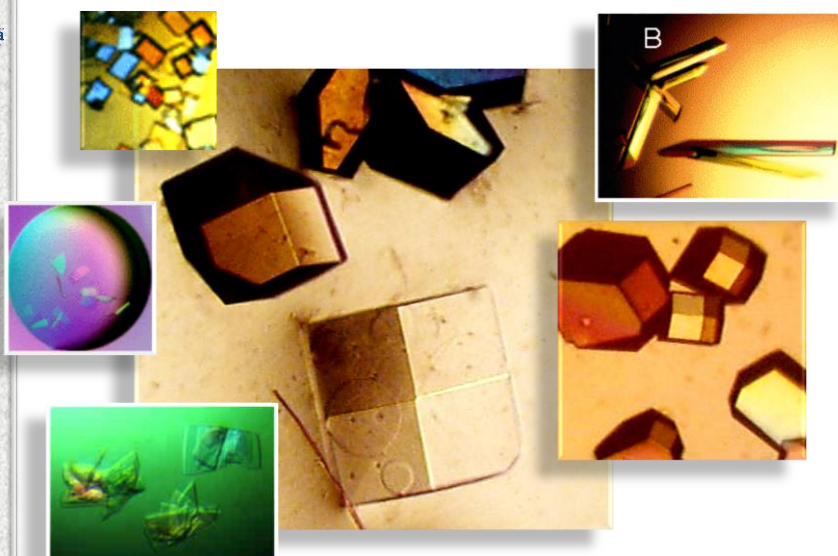


gotícula com cerca de 10 μL contendo solução de proteína + precipitantes, vista sob um microscópio tempo real do filme ~ 36 h; os cristais crescem em até ~ 18 h

formato mpeg: <http://shelx.uni-ac.gwdg.de/xtal/xtal.htm#xtalgrowth>

formato gif: <http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/>

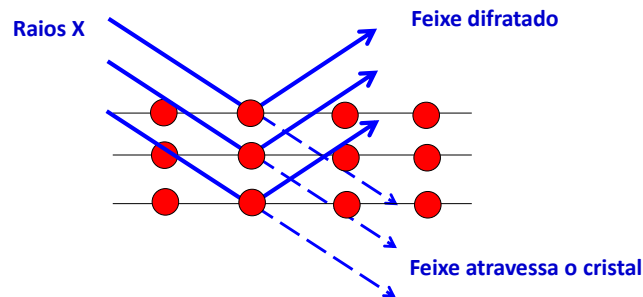
Material a ser analisado: cristalino



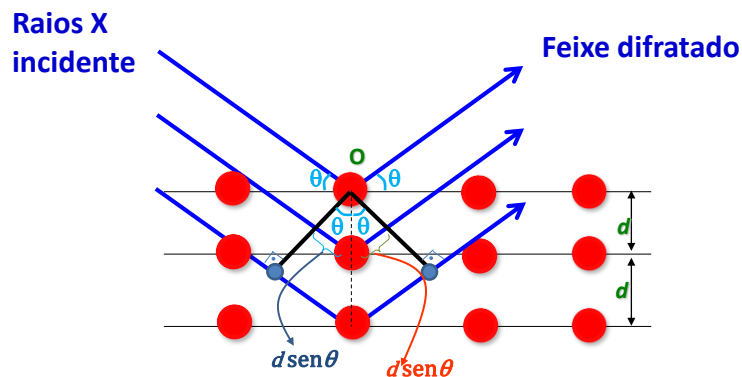
Difração de Raios X

Os raios X incidem sobre o ambiente ordenado do cristal e sofrem espalhamento (scattering)

Interferência (construtiva e destrutiva) ocorre entre estes raios pela distância entre os centros espalhadores que são da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação

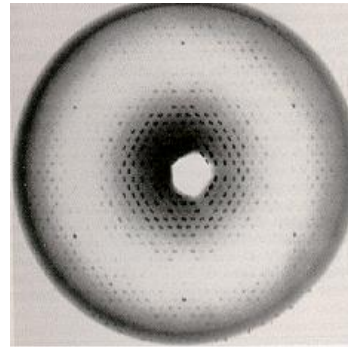
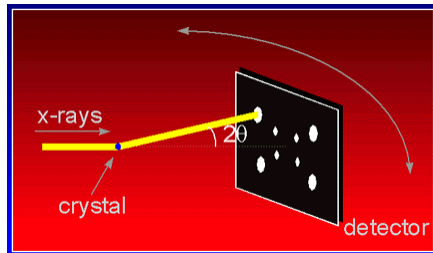


Difração de Raios X



diferença de percurso entre 2 raios: $d \text{sen} \theta + d \text{sen} \theta =$

diferença de percurso entre 2 raios: $2 d \text{sen} \theta$



Difração de Raios X

Lei de Bragg

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

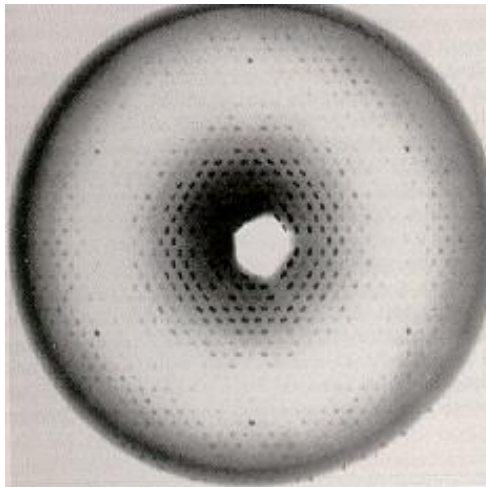
$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{2d}$$

interferência construtiva

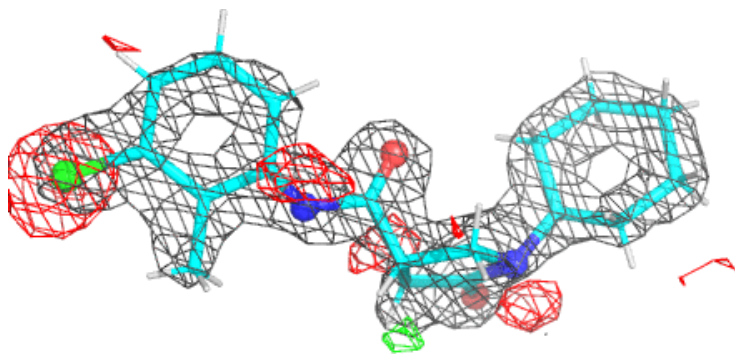
outros ângulos:

interferência destrutiva

Padrão de difração Experimento DRX (monocristal)

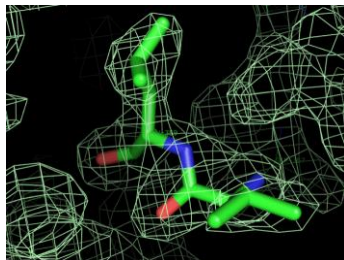


Padrão de difração Experimento DRX (monocristal) densidade eletrônica

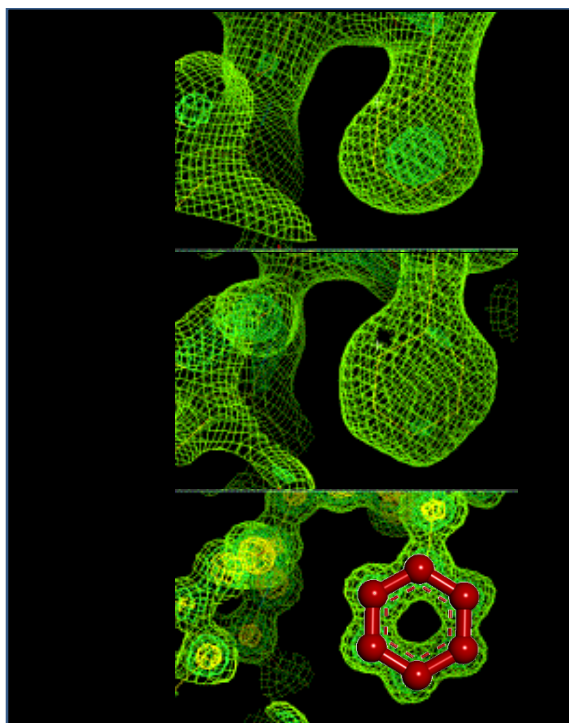
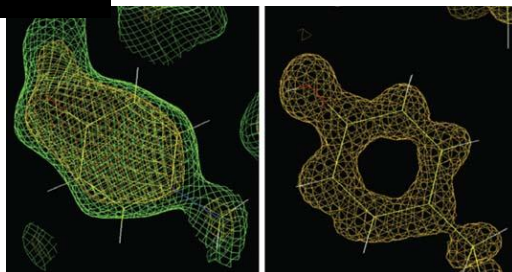


Experimento DRX (monocristal)

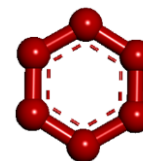
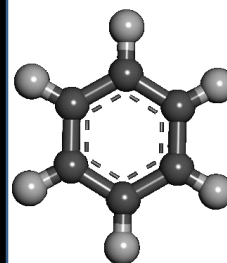
ajuste

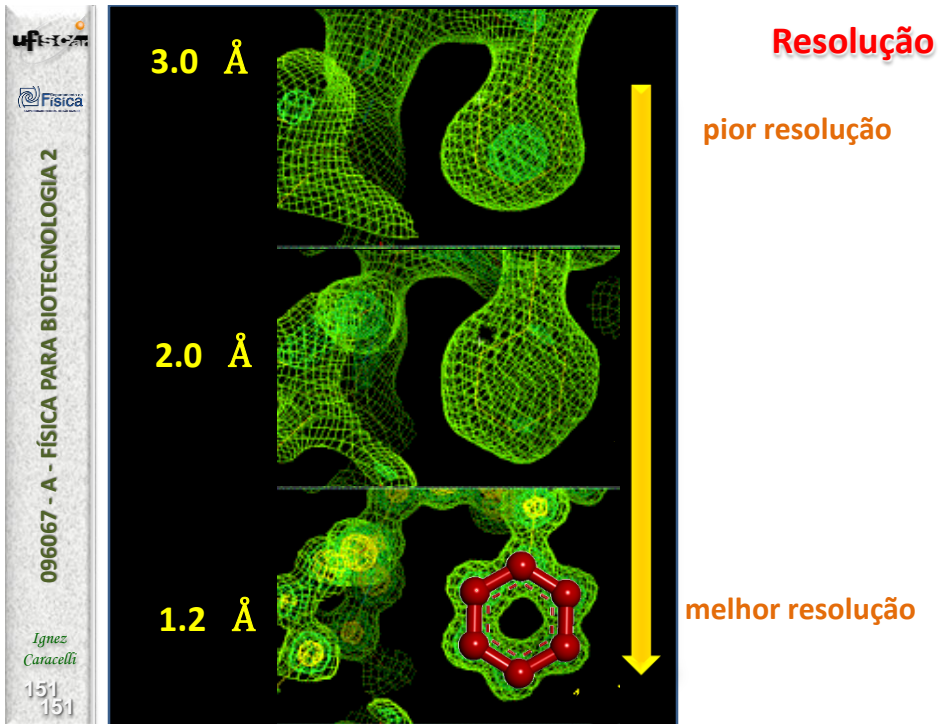


Resolução



Resolução





ufpe
Física

096067 - A - FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 2

Ignês Caracelli

Vídeo para assistir

O experimento da fenda dupla:
ondas, matéria e partículas

<http://www.youtube.com/watch?v=u7VctogNgU4>

português