

# Física Experimental IV

[www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex](http://www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex)

[www.fap.if.usp.br/~hbarbosa](http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa)

## Aula 3 – Computador Óptico

## Difração

Profa. Eloisa Szanto  
[eloisa@dfn.if.usp.br](mailto:eloisa@dfn.if.usp.br)

Ramal: 7111

Pelletron

Prof. Henrique Barbosa  
[hbarbosa@if.usp.br](mailto:hbarbosa@if.usp.br)

Ramal: 6647

Basílio, sala 100

Prof. Nelson Carlin  
[nelson.carlin@dfn.if.usp.br](mailto:nelson.carlin@dfn.if.usp.br)

Ramal: 6820

Pelletron

Prof. Paulo Artaxo  
[artaxo@if.usp.br](mailto:artaxo@if.usp.br)

Ramal: 7016

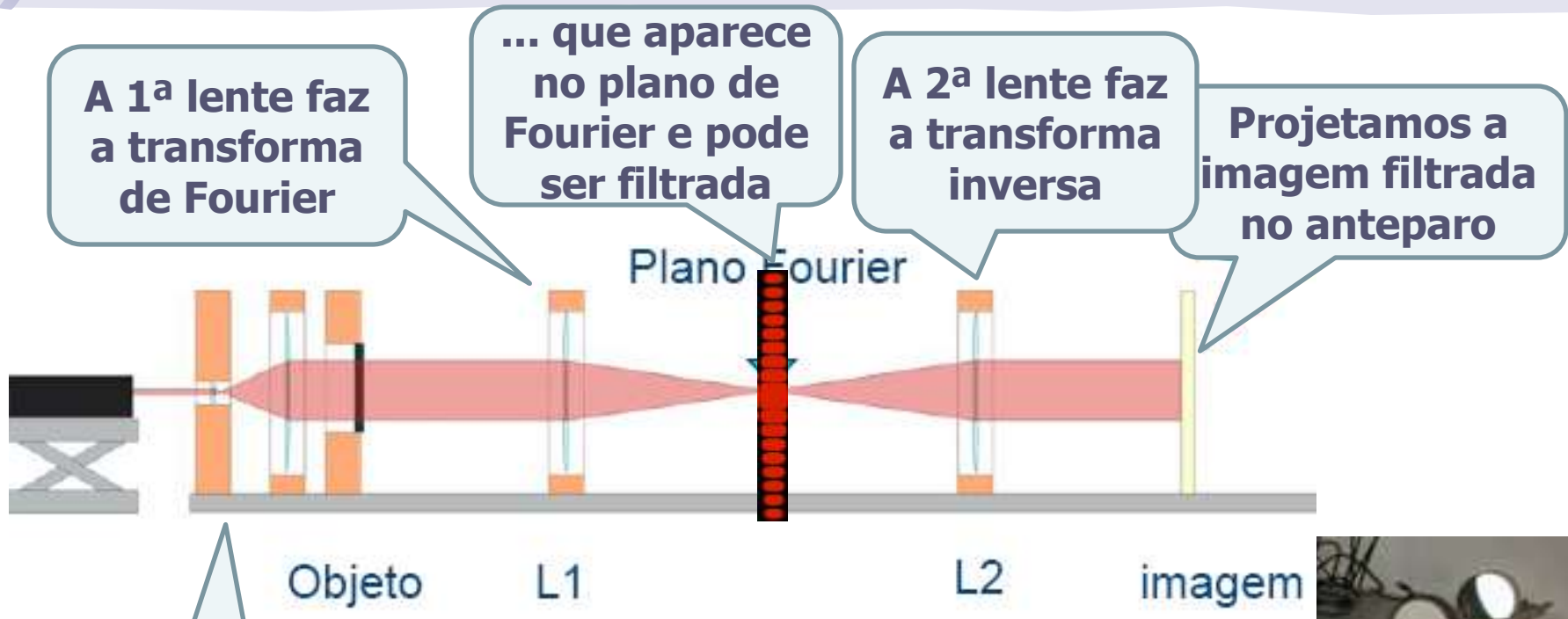
Basilio, sala 101

# Computador ótico

- **Computador ótico** é um dispositivo que permite a manipulação de imagem de maneira controlada sem a necessidade de efetuar cálculos complicados.
- Esse dispositivo pode e vai ser construído e estudado no laboratório e vamos, nas próximas aulas, discutir como fazê-lo em detalhe.



# Como funciona?



o laser ilumina o objeto

COMPUTADOR  
ÓTICO



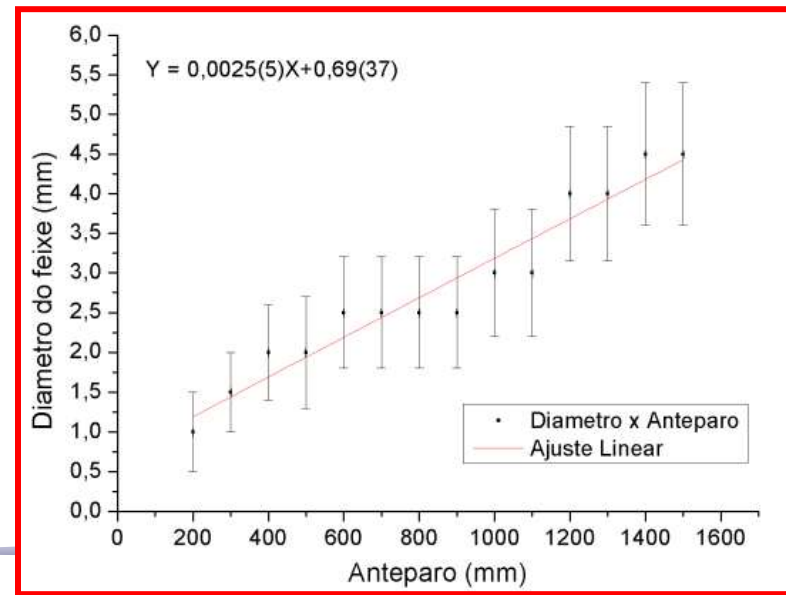
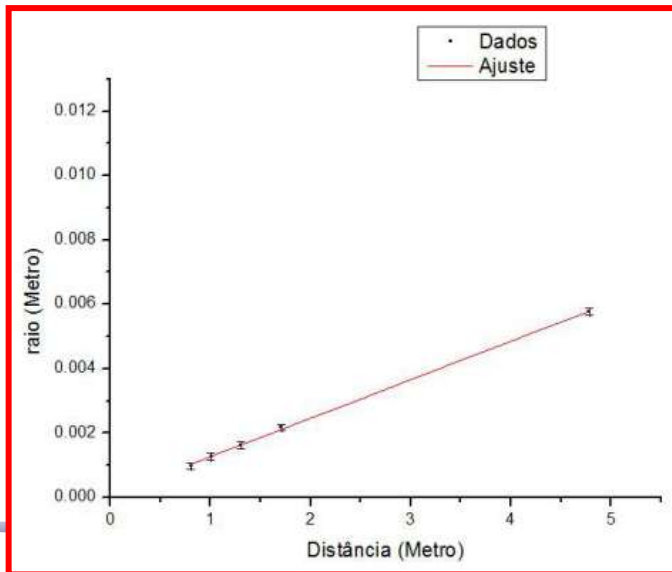
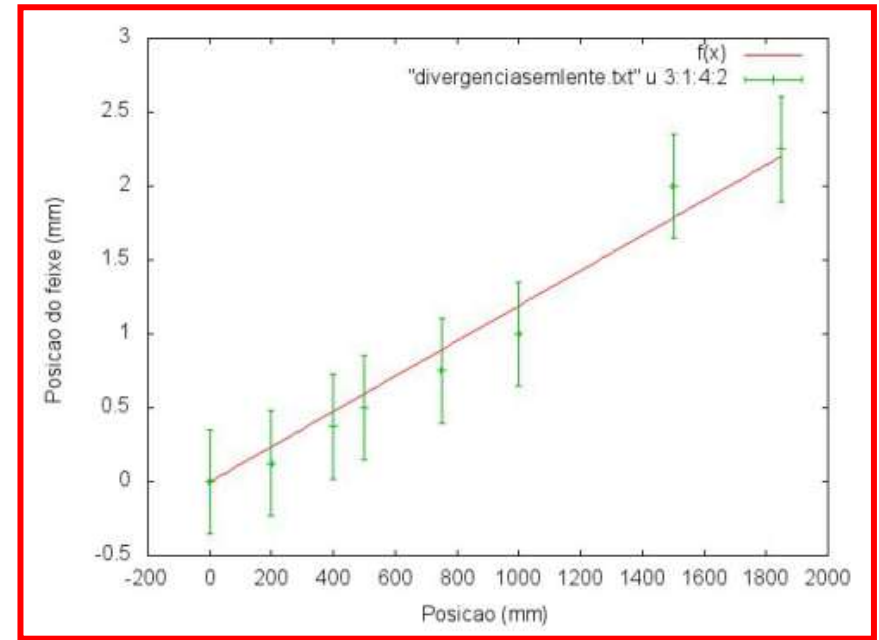
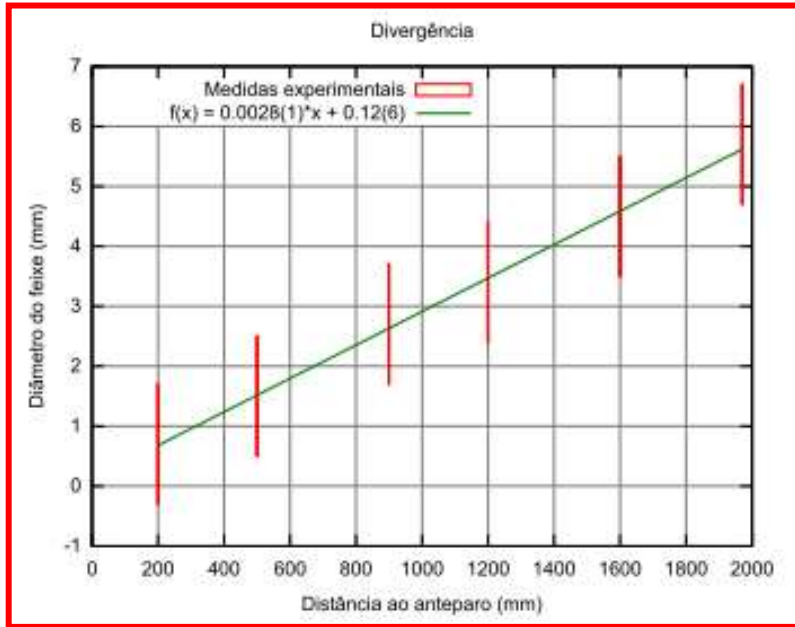
# Programação da Exp. 2

- Aula 1: óptica geométrica
  - Medidas com lentes convergente e divergente
- Aula 2: laser
  - Associação de lentes e aumento do diâmetro do laser
- Aula 3: difração
  - Figuras de difração e espectrofotômetro
- Aula 4: transformada de fourier
  - Estudo no plano de fourier
- Aula 5: computador ótico
  - Filtro na transformada de Fourier e recompor a imagem filtrada
- Aula 6: ImageJ
  - Tratamento de imagem no computador

# Tarefas 1 – para síntese

- Medir a divergência do feixe
  - Dica: projetá-lo a uma distância grande ou através da medida de **r1** e **r2**.
- Montar um sistema ótico de duas lentes convergentes com distâncias focais conhecidas para aumentar o diâmetro do feixe
  - Experimentalmente, qual a distância entre as lentes para que o feixe saia paralelo? Compare com o valor teórico esperado
  - A previsão teórica está de acordo com a distância medida na bancada? Se não estiver explique porque usando o Raytrace.

# Divergência



# Divergência (1.7mrad)

	<b>Dist. Min. (mm)</b>	<b>Dist. Max. (mm)</b>	<b>Diverg. (mrad)</b>
H2	200	~2000	<b>2.8 (1)</b>
H3	0	~1800	<b>1.19 (6)</b>
H4	~750	~5000	<b>1.20 (3)</b>
H5	~0	~1560	<b>2 (1)</b>
H6	<b>?</b>	<b>?</b>	<b>1.05 (21)</b>
H7	~200	~1500	<b>2.5 (5)</b>
H8	<b>?</b>	<b>?</b>	<b>2.4 (4)</b>
H9	50	900	<b>1.25 (10)</b>

Em geral, quem mediu mais longe,  
mediu um ângulo menor.

# Tarefas 2 – para síntese

- Medir a magnificação do feixe através das medidas de  $r_1$  e  $r_2$ , ou através dos diâmetros do feixe antes e depois do sistema de lentes:
  - Precisa medir vários valores e apresentá-los de maneira convincente, com erros aceitáveis.
  - Utilize valores de  $r_1$  acima ou abaixo do eixo.
- Demonstre o paralelismo do feixe na saída:
  - pode ser feito com qualquer uma das montagens escolhidas
  - o paralelismo deve ser verificado através de várias medidas ao longo de todo o comprimento do trilho.

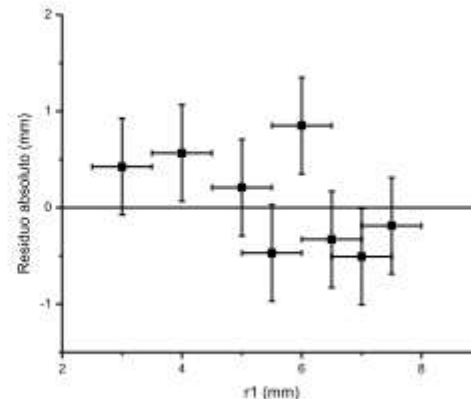
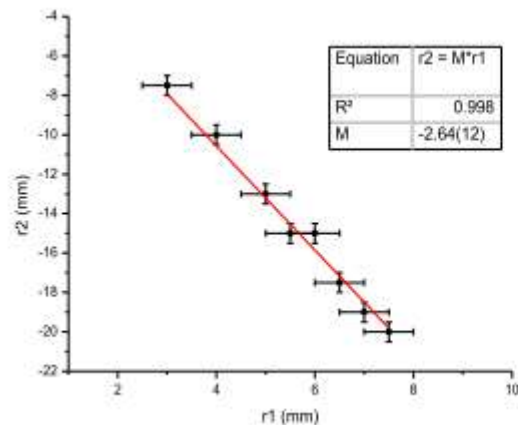
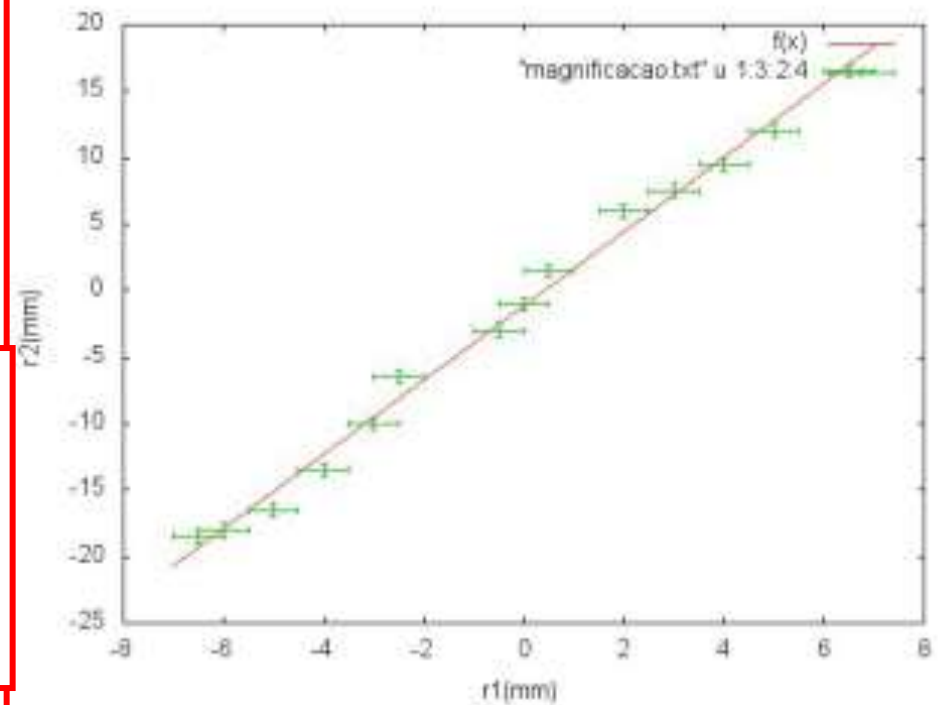


# Magnificação

$r_1$ (mm)	$r_2$ (mm)	Magnificação
3.0(5)	9.0(7)	3.0(6)
5.0(5)	14.0(7)	2.8(3)
7.5(5)	21.5(7)	2.87(21)

**Tabela 1.** Medidas da altura do feixe do laser após sair da última lente.

Distância em relação à última lente ( $\pm 0,1$ cm)	Altura do ponto ( $\pm 0,5$ mm)	Diâmetro do ponto ( $\pm 0,5$ mm)
8,7	13,8	2,0
49,7	14,0	2,0
104,7	14,0	2,0
139,7	14,5	2,0



# Magnificação: $14.4/5=2.88$

	<b>F1 (mm)</b>	<b>F2 (mm)</b>	<b>Separa. (mm)</b>	<b>M ( )</b>
H2	50 (1)	144 (5)	206 (1)	<b>2.89 (10)</b>
H3	?	?	194.0 (28)	<b>2.79 (7)</b>
H4	50 (2)	144 (2)	219.0 (5)	<b>3.88 (18)</b>
H5	50 (?)	144 (?)	200 (1)	<b>2.64 (12)</b>
H6	50 (2)	144 (2)	218 (3)	<b>2.8 (5)</b>
H7	50 (2)	144 (2)	200 (1)	<b>2.3 (3)</b>
H8	50 (?)	144 (?)	199 (3)	<b>2.7 (2)</b>
H9	50 (?)	144 (?)	216.5 (7)	<b>3.11 (4)</b>

# Tarefas 3 – para relatório

- A magnificação obtida pelo método matricial está de acordo (dentro dos erros experimentais) com a medida na bancada? Discuta.
- Simule, com o programa Raytrace, o sistema de lentes utilizado.
  - Determine os planos principais da associação
  - Determine o foco da associação
  - Compare com os valores esperados pelo método matricial

# Tarefas 4 - EXTRA

O laser tem uma divergência, ie  $\varphi_1 > 0$ , assim:

- Calcule qual a divergência na saída se for usado  $\mathbf{d} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2$ .
- Calcule usando o método matricial qual deve ser a separação  $\mathbf{d}'$  entre as lentes para se ter  $\varphi_2 = 0$ 
  - Discuta se o deslocamento  $\mathbf{d}' - \mathbf{d}$  era perceptível/mensurável na montagem de vocês

# Alguns fizeram:

Usando  $d = f_1 + f_2$ , do método matricial, temos:  $\theta_2 = \left[ \frac{-1}{f_2} \left( 1 - \frac{f_1 + f_2}{f_1} \right) - \frac{1}{f_1} \right] r_1 + \left( 1 - \frac{f_1 + f_2}{f_2} \right) \theta_1$ , usando os valores sobre o eixo principal das lentes, temos **que  $\theta_2 = -3,43(16) \times 10^{-3} \text{ rad}$ .**

Ainda com o método matricial, buscamos ter  $\theta_2 = 0$ , desse modo, podemos determinar a distância ( $d'$ ) que as lentes devem estar separadas. Logo:  $d' = f_2 + f_1 \left( 1 + f_1 \frac{\theta_1}{r_1} \right)$ .

Para  $r_1 = 1 \text{ mm}$ , temos que  $d' = 21,9(4) \text{ cm}$ , que é compatível pelo teste z, com o valor da distância entre as lentes determinada experimentalmente.

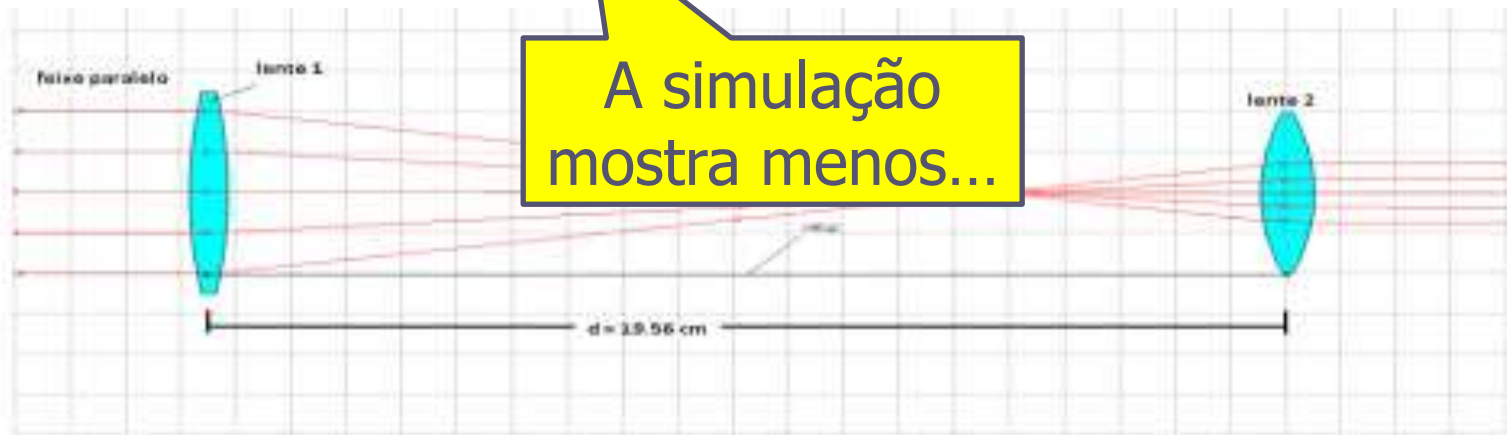
Para a magnificação, escrevendo a relação  $r_2/r_1$ , por meio do método matricial, e usando o  $d$  acima, temos:  $m = \frac{f_2}{f_1} \left( 1 - d\theta_1/r_1 \right)$ , o valor sem correção é da ordem de 2,88(11), com a correção 2,70(12).

O que nos mostra que levando em conta os erros experimentais, a magnificação obtida pelo método matricial está de acordo com a medida na bancada.

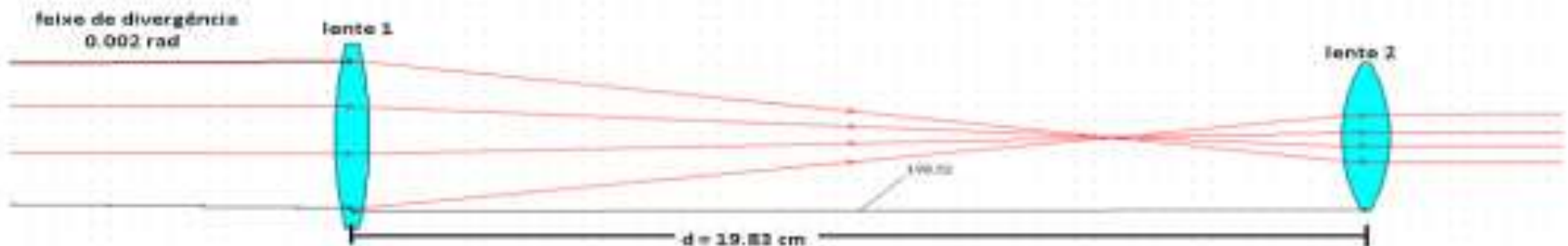
- A diferença é pequena:
  - de 19.4 (28) cm
  - para 21.9 (4) cm (seperestimado)

# Simulação

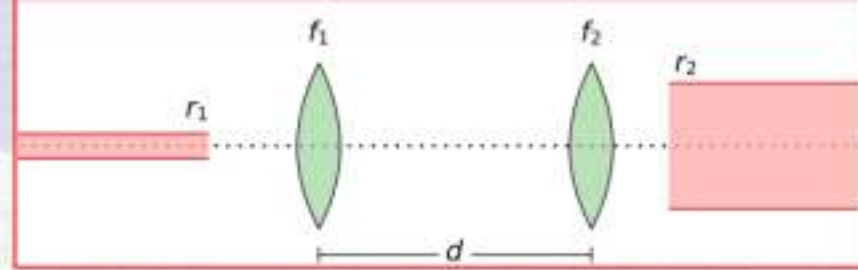
Foi feita uma simulação usando o Raytrace usando as características das lentes usadas no experimento. Primeiro, fez-se incidir um feixe paralelo sobre a lente 1 e se ajustou a posição da lente 2 de modo que o feixe de saída fosse paralelo. Neste caso, obteve-se que a distância entre as lentes era de 19.56 cm, valor que está próximo de  $f_1 + f_2$ , como era de se esperar. Depois, fazendo incidir um feixe de divergência 0.002 rad, obteve-se que a distância era de 19.83 cm, valor que é compatível com o valor experimental de 20,0(1) cm. As figuras 1 e 2 mostram o resultado da simulação.



**Figura1.** Simulação incidindo um feixe paralelo.



# Método matricial



- Aplicando o método matricial:

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix}$$

Notem que não era preciso incluir as posições do objeto e da imagem!

- E portanto:

$$\begin{cases} r_2 = \left(1 - \frac{d}{f_1}\right) r_1 + d \phi_1 \\ \phi_2 = \left(\frac{d}{f_1 f_2} - \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}\right)\right) r_1 + \left(1 - \frac{d}{f_1}\right) \phi_1 \end{cases}$$

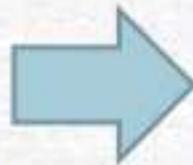
- $\phi_1 = \phi_2 = 0$  (ou seja  $f_{eq} \rightarrow \infty$ ) implica:

$$r_1 \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad d = f_1 + f_2$$

# Aumento do Diâmetro

- Substituindo  $d=f_1+f_2$  nas equações para  $r_2$  e  $\phi_2$ , temos:

$$\begin{cases} r_2 = \left(1 - \frac{d}{f_1}\right) r_1 + d \phi_1 \\ \phi_2 = \left(\frac{d}{f_1 f_2} - \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}\right)\right) r_1 + \left(1 - \frac{d}{f_1}\right) \phi_1 \end{cases}$$



$$\begin{cases} r_2 = -\frac{f_2}{f_1} r_1 + (f_1 + f_2) \phi_1 \\ \phi_2 = -\frac{f_1}{f_2} \phi_1 \end{cases}$$

- Como  $\phi_1=0$  então temos:

Reduz a divergência...

$$M = \frac{r_2}{r_1} = -\frac{f_2}{f_1}$$

- ... e  $\phi_2=0$

Aumenta o diâmetro...



# E se a divergência $\phi_1 \neq 0$ ?

- Neste caso, devemos usar a equação completa:

$$\phi_2 = \left( \frac{d}{f_1 f_2} - \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} \right) r_1 + \left( 1 - \frac{d}{f_2} \right) \phi_1 = 0$$

- Resolvendo a equação para  $d$ , temos:

$$d = f_2 + \frac{f_1}{1 - f_1 \phi_1 / r_1} = f_2 + f_1 \left( 1 + f_1 \frac{\phi_1}{r_1} \right)$$

- Ou seja, a correção é pequena!

$$d \approx 14.4 + 5 * 1.05 = 19.65$$

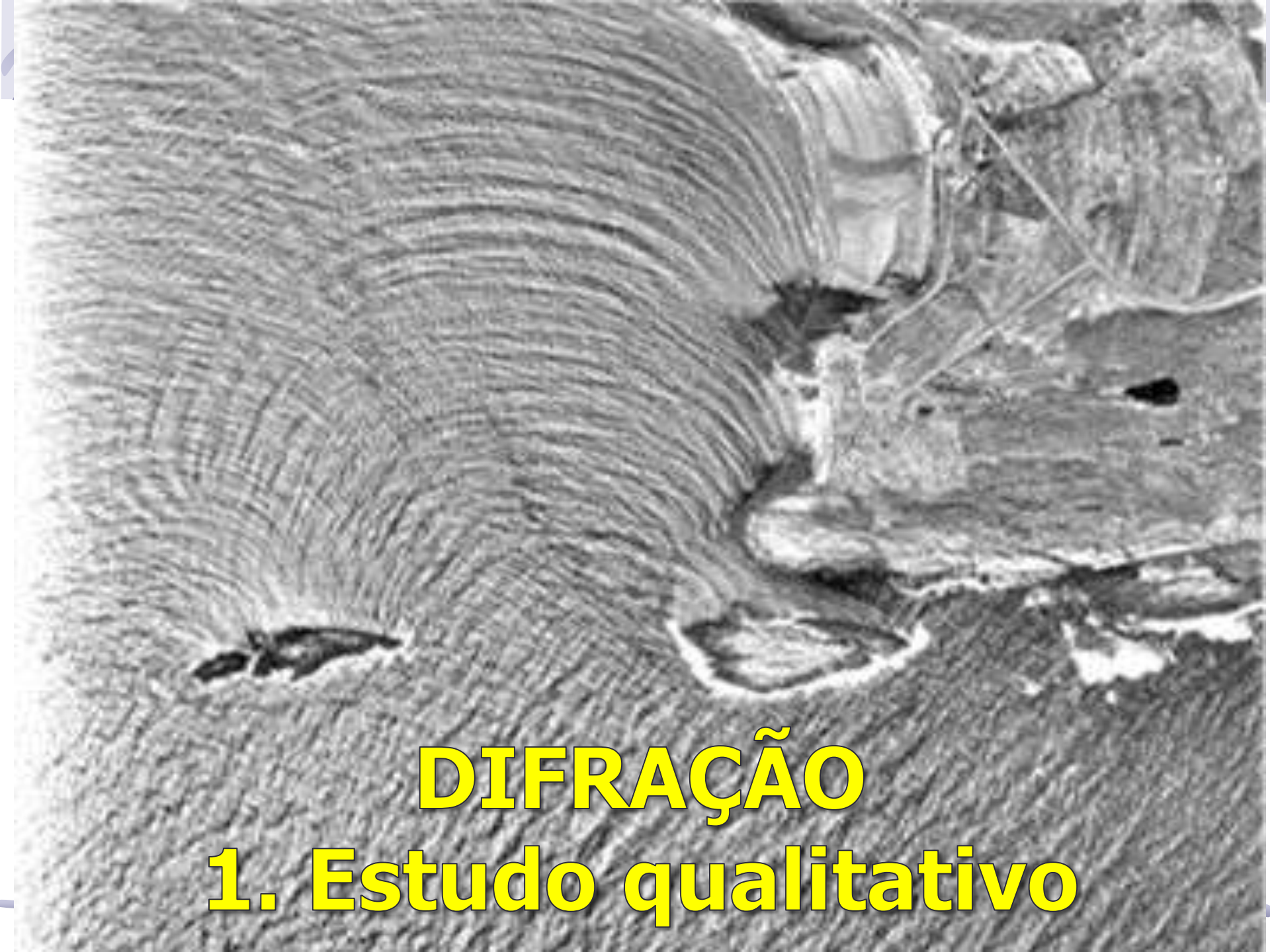
$$0.05 \leftarrow \begin{cases} f_1 = 5cm \\ \phi_1 = 2mrad \\ r_1 = 1mm \end{cases}$$

- Analogamente p/ a magnificação:

$$\frac{r_2}{r_1} \approx \frac{-f_2}{f_1} \left( 1 - f_1 \phi_1 / r_1 \right) \approx \frac{-f_2}{f_1} * 0.95 \sim 2.74$$

# Programação da Exp. 2

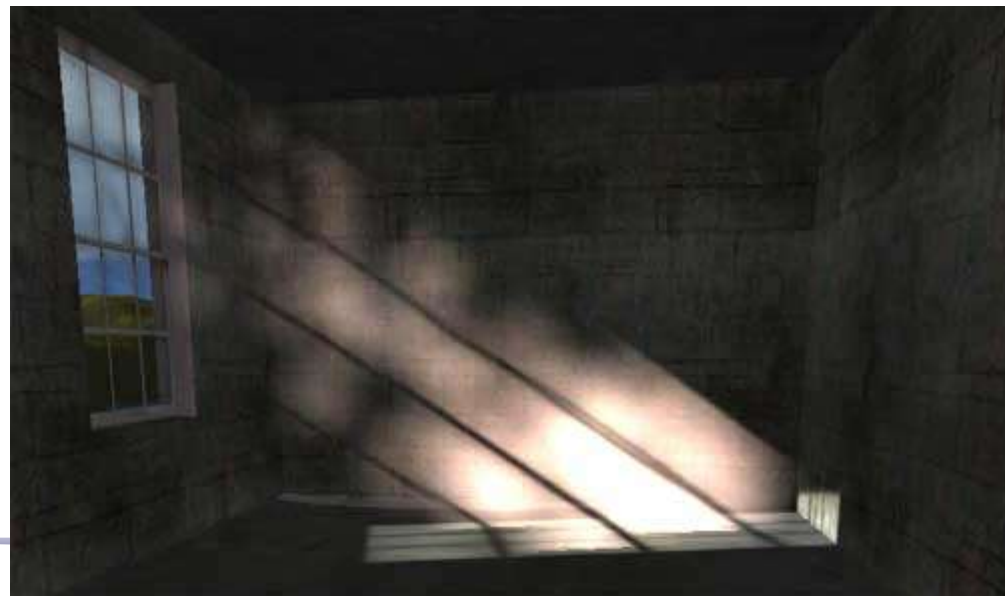
- Aula 1: óptica geométrica
  - Medidas com lentes convergente e divergente
- Aula 2: laser
  - Associação de lentes e aumento do diâmetro do laser
- Aula 3: difração
  - Figuras de difração e espectrofotômetro
- Aula 4: transformada de fourier
  - Estudo no plano de fourier
- Aula 5: computador ótico
  - Filtro na transformada de Fourier e recompor a imagem filtrada
- Aula 6: ImageJ
  - Tratamento de imagem no computador



**DIFRAÇÃO**  
**1. Estudo qualitativo**

# Ótica geométrica

- Os raios se propagam em linha reta:
  - as dimensões do ostáculo são muito menores que o comprimento de onda da luz incidente



# Difração

- Um objeto colocado entre uma fonte e uma tela produz uma sombra totalmente inesperada:
  - essa sombra não pode ser explicada pela propagação retilínea da luz.
  - o fenômeno é chamado de difração.

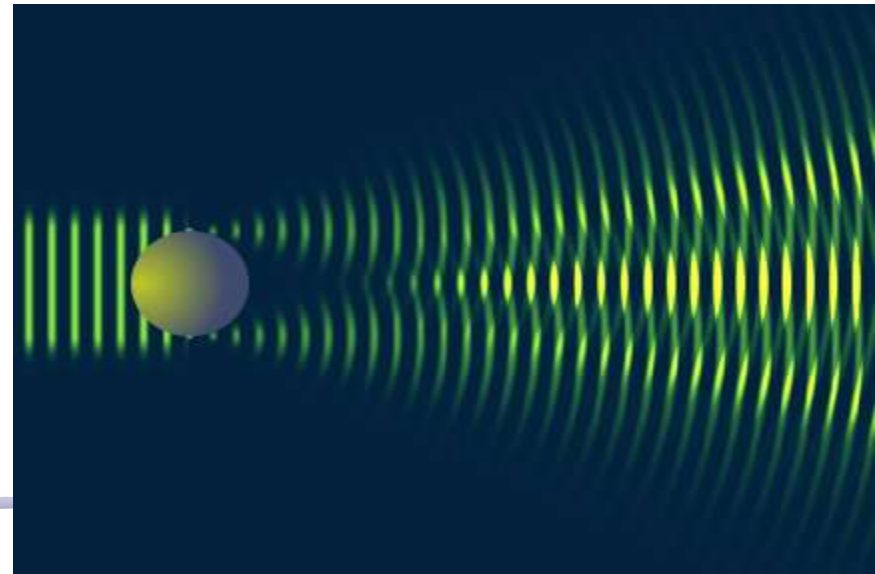
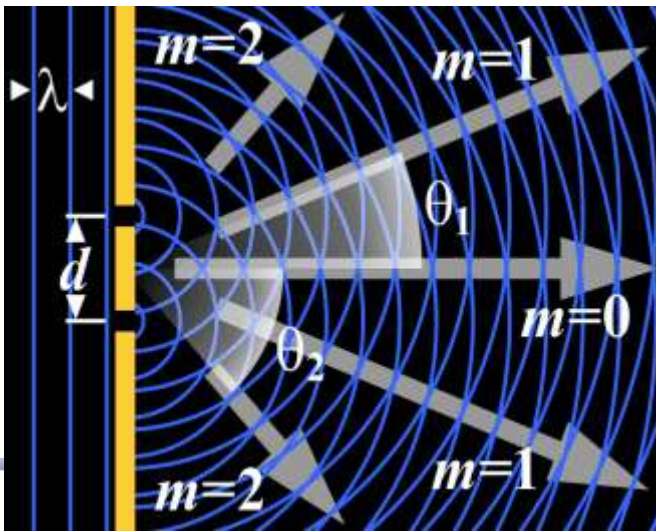


Figure 2

Light Diffraction by a Razor Blade

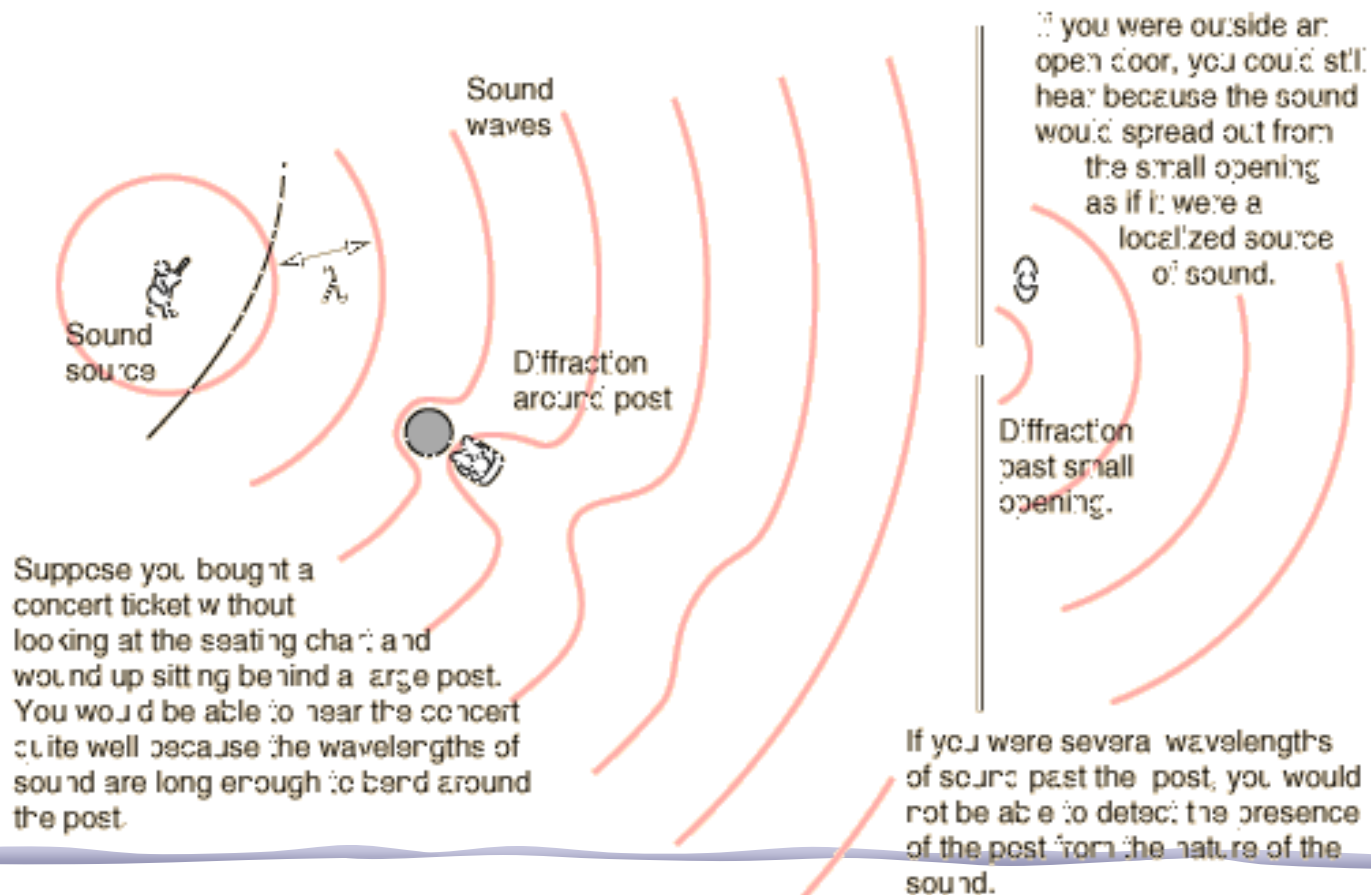
# Difração

- Em meados do século **XVII** foi publicado um trabalho, de autoria de Francesco Grimaldi descrevendo o fenômeno que o autor chamou de "**Diffractio**". Esse fenômeno era a propagação não retilínea da luz, que é percebido a olho nu, sob determinadas circunstâncias.



# O que é Difração

- Como um espectador, atrás de uma porta, por exemplo, é capaz de ouvir um som mas não é capaz de enxergar a pessoa falando?

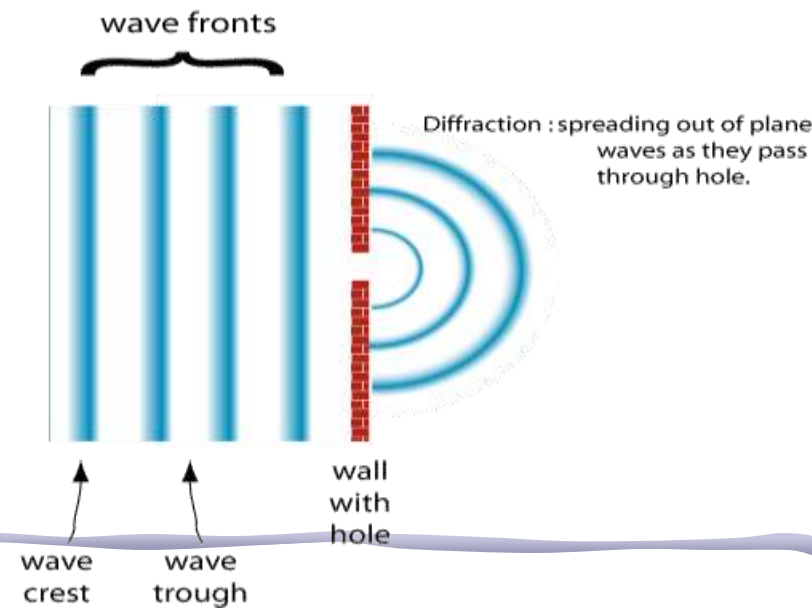


# Difração

- Fenômeno comum com todos os tipos de ondas
- Desvio sofrido por uma onda ao se deparar com um obstáculo de dimensões similares ao comprimento de onda.
  - A onda se espalha em torno desse objeto como se o mesmo fosse uma nova fonte de emissão da onda
  - Se a dimensão do objeto for muito maior (ou menor) que o comprimento de onda, não ocorre difração.

- Pode ocorrer em ondas:

- Mecânicas
  - Sonoras
  - Oceano, etc...
- Eletromagnéticas
  - Luz
  - Raios-X, etc...

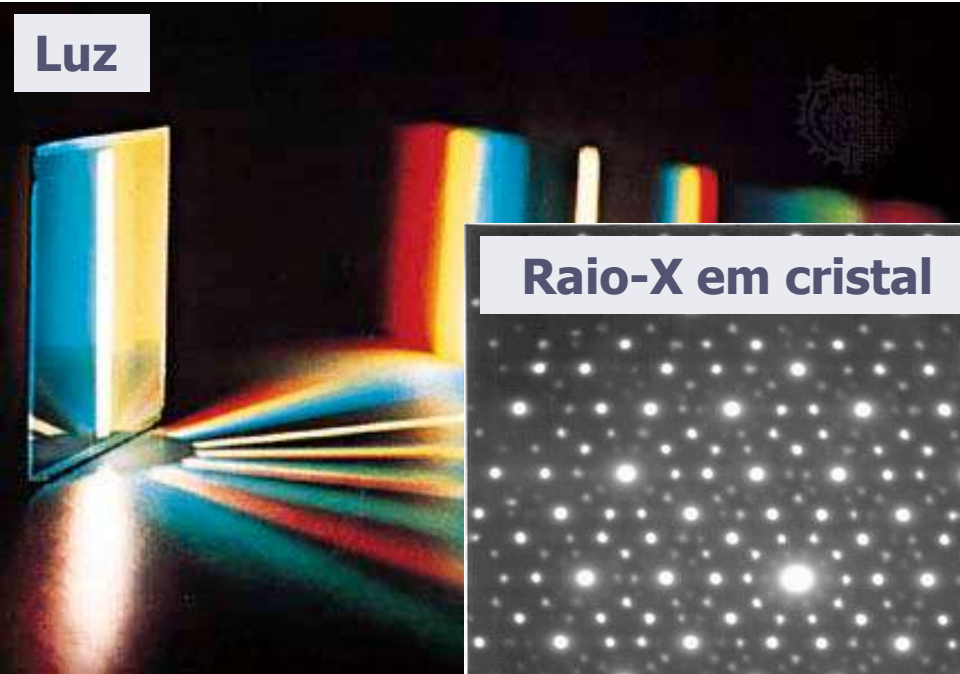




# Exemplos

Difração de elétrons em estruturas microscópicas

Luz

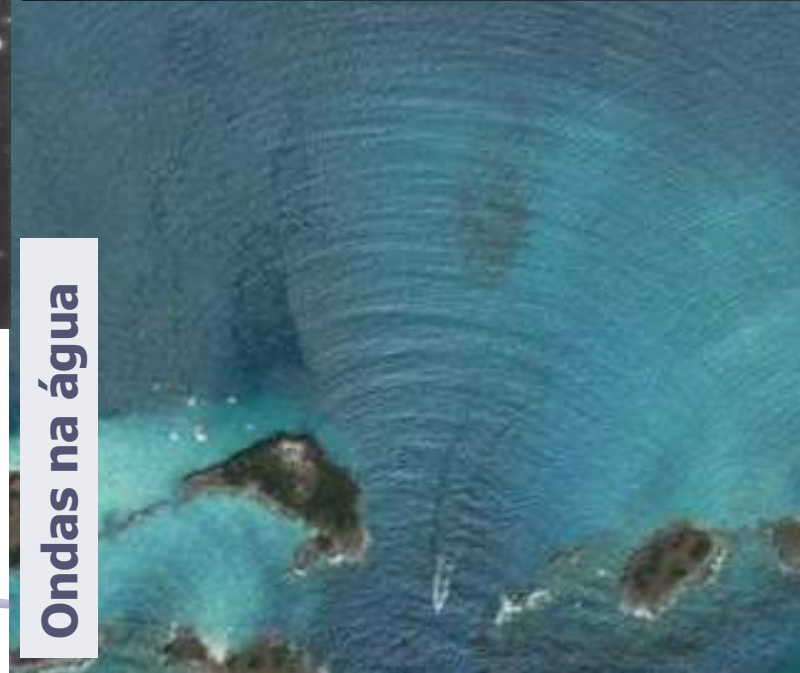


Raio-X em cristal



Luz do sol

Ondas na água



# Difração

- Ondas de comprimento muito menor que as dimensões do obstáculo sofrem pouca difração
  - <http://sampa.if.usp.br/~suaide/applets/falstad/mirror1/ripple/>

Para mais detalhes da parte teórica veja o capítulo 10 do livro **Optics** de **E. Hecht** e a apostila de difração do curso de 2007 na página do Labflex.

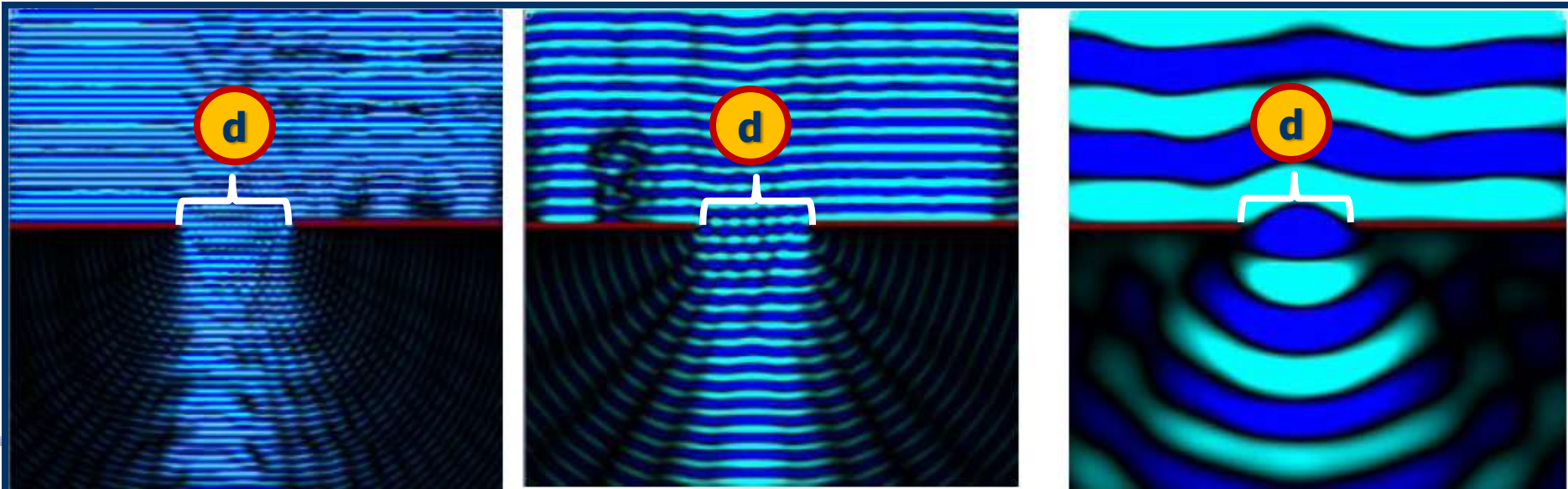
$\lambda_1$

$\ll$

$\lambda_2$

$\ll$

$\lambda_3$



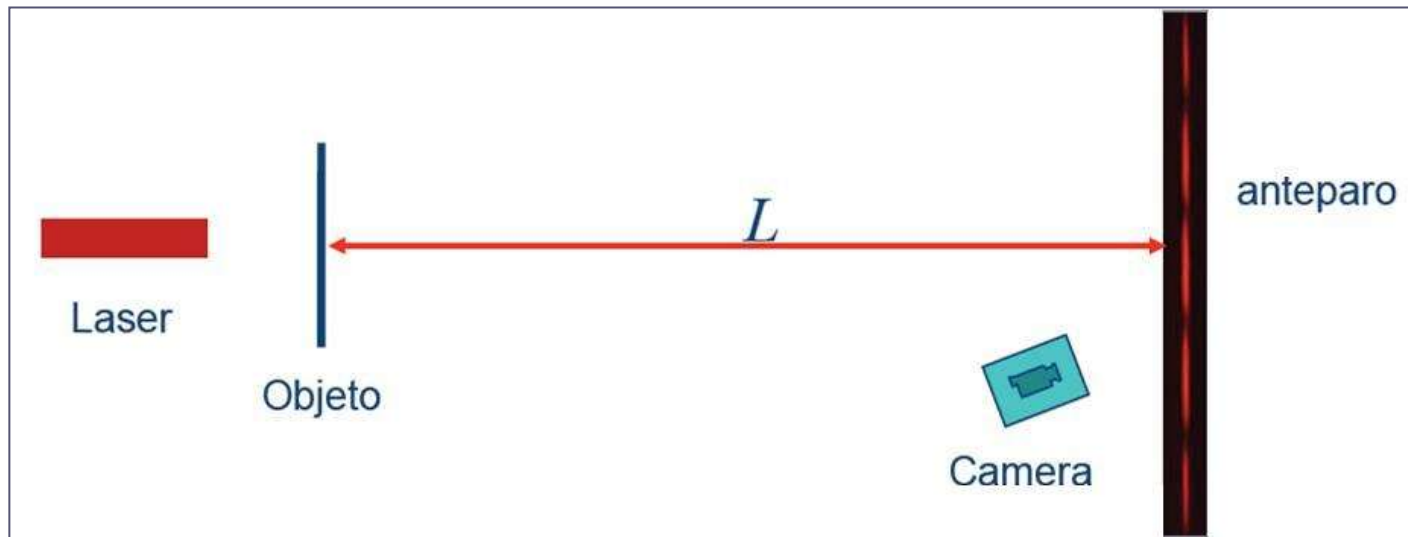
# Parte 1 – Para a síntese

Usando o laser e o slide das figuras:

- Fotografe figuras de difração para os seguintes objetos:
  - fendas simples (pelo menos duas fendas)
  - fenda dupla (pelo menos duas fendas)
  - para os objetos diferentes da linha superior, escolha apenas um dos tamanhos
- Discuta os resultados obtidos.
  - Para as fendas simples e duplas tente relacionar as figuras observadas com as dimensões dos objetos.
  - Tente identificar a forma geométrica dos objetos na linha superior do slide de fendas a partir das figuras de difração observadas. Discuta.

# Medidas de Difração

- Montar no trilho o laser, o slide de fendas e o anteparo.
- Cuidado com o alinhamento!
- Escolha a melhor situação possível para observar as figuras desejadas e fotografe todas



# Medidas de Difração

Muitas fendas paralelas

Poucas fendas paralelas

Duas fendas afastadas

Duas fendas próximas

Uma fenda larga

Uma fenda estreita

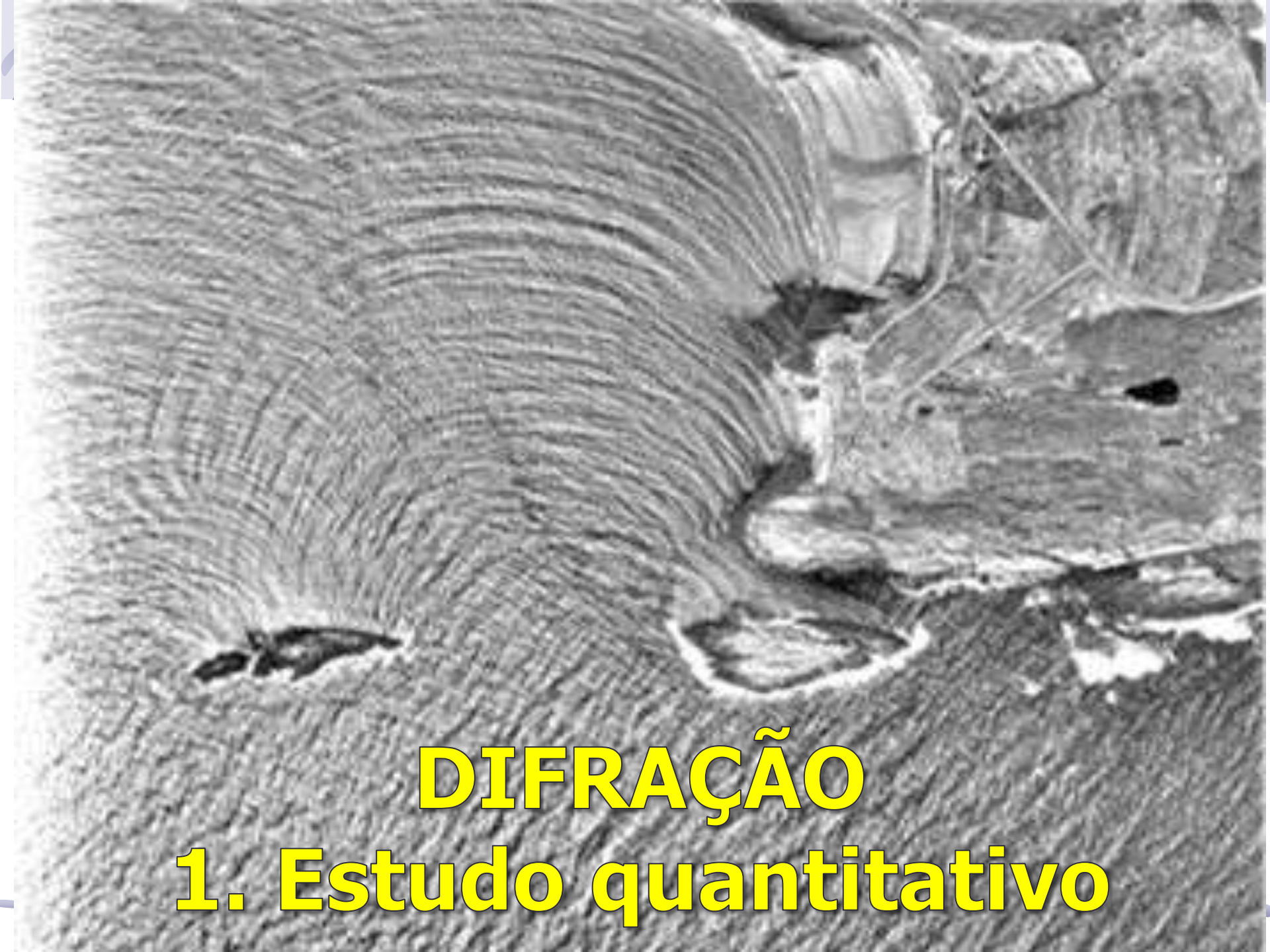
Para cada um dos 6, escolher apenas um dos 9 tamanhos disponíveis.

2

# Dicas para a montagem

- **Dicas:**

1. **O alinhamento do laser com a fenda é fundamental para uma boa figura de difração.**
2. Você deve relacionar cada figura de difração com o objeto difrator – cuidado para não fazer confusão.
3. Há papel preto ou branco que pode ser preso ao anteparo, veja qual produz a melhor foto.
4. As câmeras disponíveis no laboratório são as câmeras CCD, se quiser pode trazer uma máquina fotográfica melhor.
5. Por favor não coloque o dedo sobre as fendas do slide, (elas não estão protegidas) segure-o pelas bordas.



**DIFRAÇÃO**  
**1. Estudo quantitativo**

# Difração: tratamento

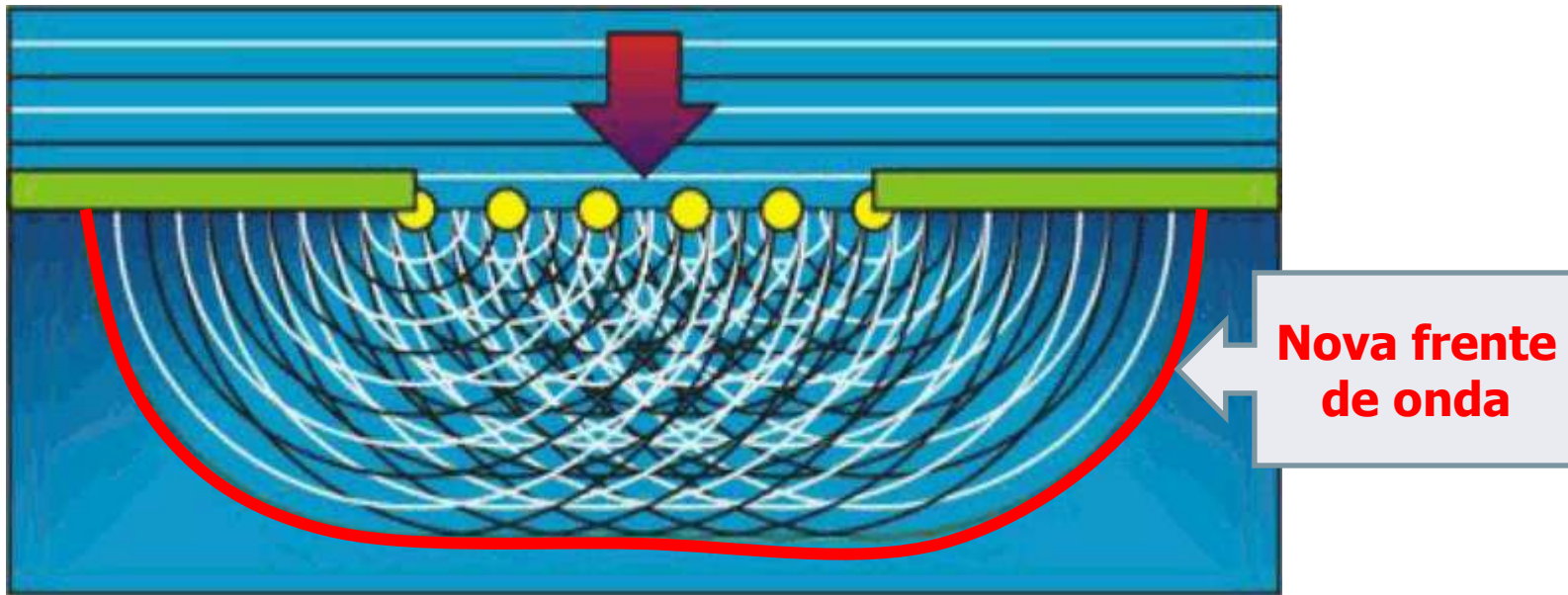
Esse comportamento, apesar de ocorrer sempre, pode não ser notado. O **domínio da Óptica Geométrica** ou os fenômenos ópticos que podem ser explicados por essa teoria são aqueles que ocorrem em condições tais que os **efeitos da difração são desprezíveis**.

O tratamento completo da difração deve ser realizado através da teoria da eletrodinâmica quântica, entretanto, para as experiências que estamos propondo, a teoria eletromagnética clássica, que possibilita um tratamento extremamente mais simples, é mais que suficiente.



# Difração: Princípio de Huygens

Princípio de Huygens. Esse princípio diz que **cada ponto de uma frente de onda pode ser considerado como uma fonte secundária de ondas esféricas**.



Esse princípio **independe do comprimento** de onda e prevê o mesmo comportamento para ondas de diferentes comprimentos de onda ao encontrarem o mesmo obstáculo.

**Isso não é verdadeiro.**

# Difração: Princípio de Huygens-Fresnel

**Fresnel**, resolveu o problema adicionando a esse princípio, o conceito de interferência

## Princípio de Huygens-Fresnel:

- Qualquer ponto de uma frente de onda que não seja obstruído, em qualquer instante se comporta como uma fonte de ondas esféricas secundárias, da mesma frequência da onda primária.
- A amplitude do campo elétrico em qualquer ponto após a passagem pelo obstáculo, é a superposição das amplitudes das ondas esféricas secundárias, levando em conta suas fases relativas.

Ou seja, considera-se a interferência!

# Difração de Fraunhofer e de Fresnel

Se o plano de observação está a uma distância grande do obstáculo que contém a abertura, o princípio de **Huygens-Fresnel** funciona bem. Essa é a **difração de Fraunhofer** ou **difração de campo distante**.

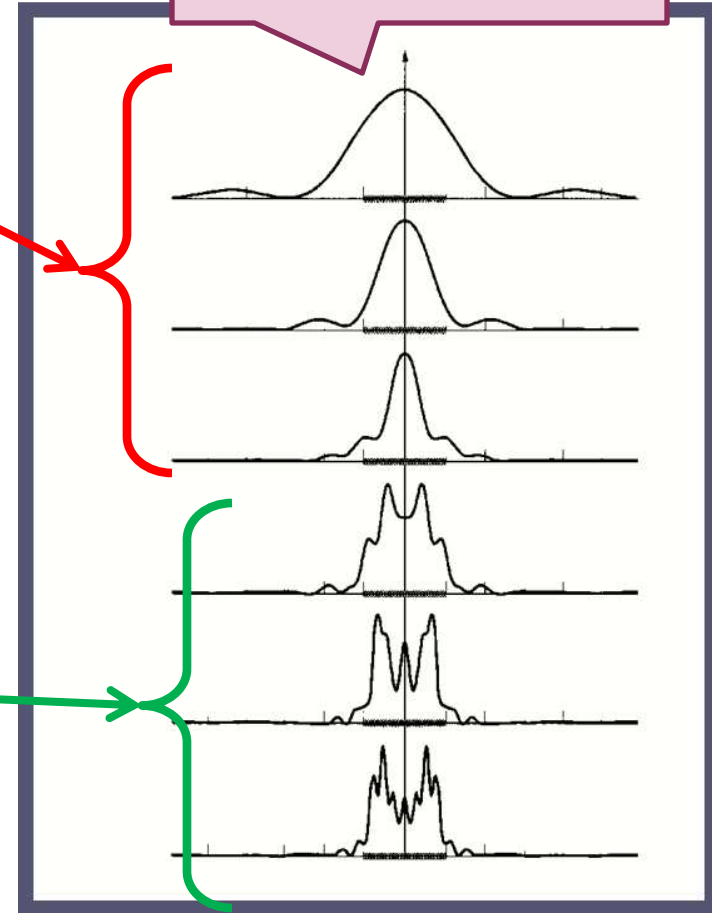
Se o plano de observação é movido para uma distância um pouco maior que a dimensão da abertura, a imagem projetada ainda será reconhecível, mas terá estruturas bem visíveis, à medida que as franjas de difração ficam mais proeminentes. Esse fenômeno é conhecido como **difração de Fresnel** ou **difração de campo próximo**.

## Número de Fresnel

- $F \ll 1$  (Fraunhofer)
- $F \gg 1$  (Fresnel)

$$F = \frac{d^2}{\lambda L}$$

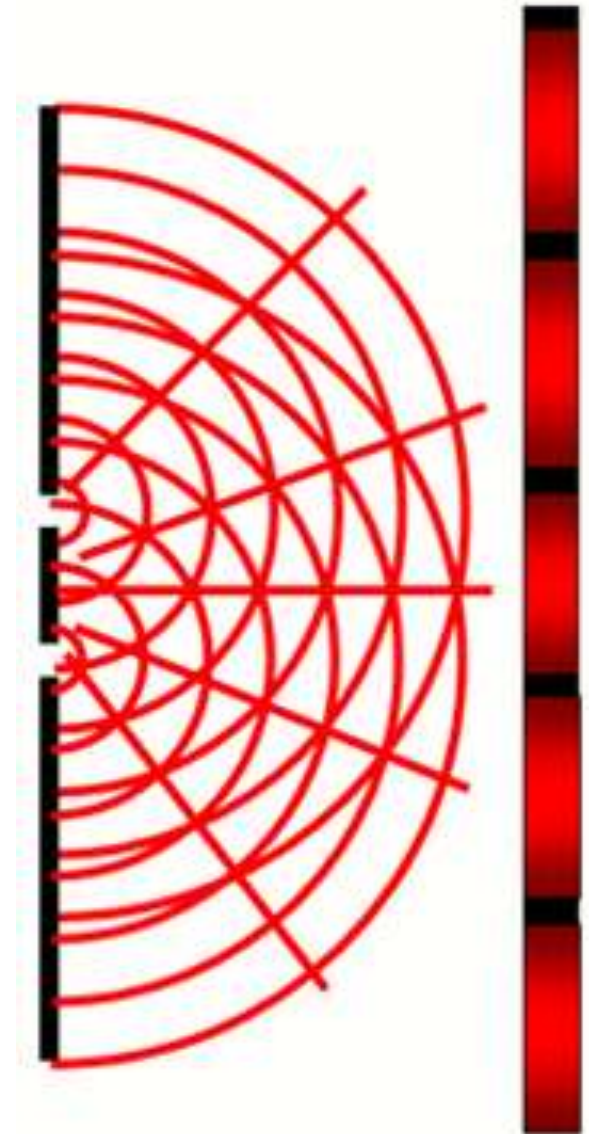
Vamos trabalhar neste limite!



# Interferência

- Seja **duas fendas ideais**, separadas de uma distância ***a***.
- Como cada fenda funciona como uma fonte puntiforme radial, o campo elétrico gerado por uma delas vale:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{R} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$



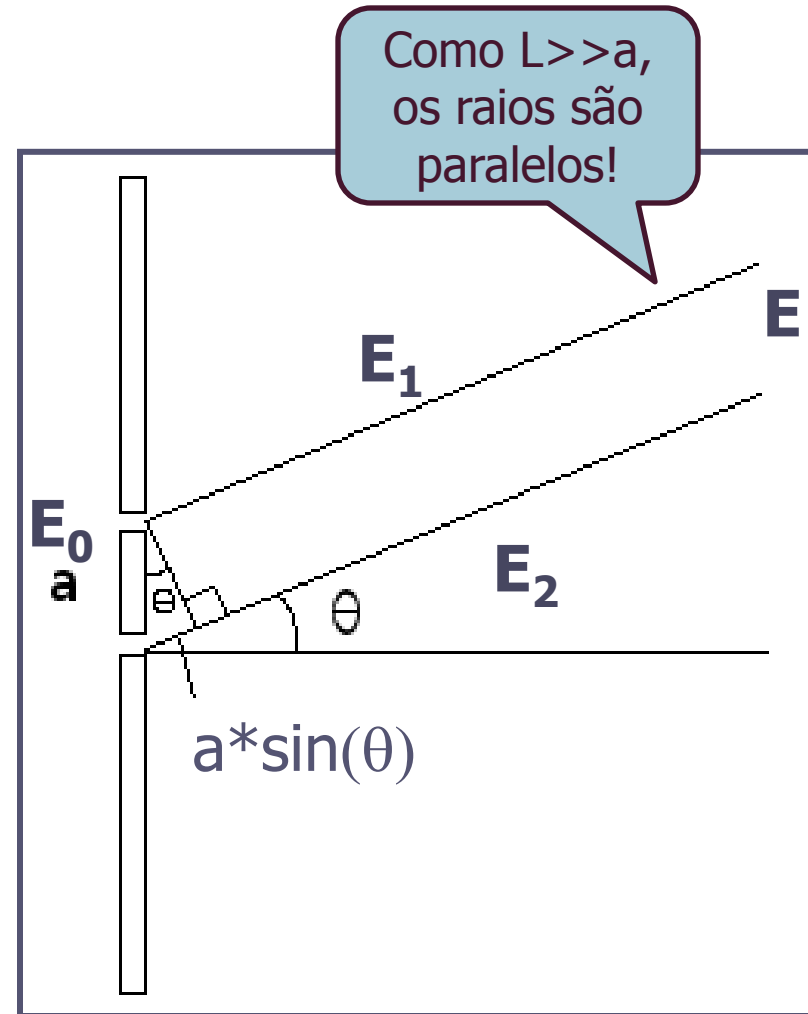
# Duas fendas ideais

- Assim o campo total em um ponto distante qualquer vale:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \\ &= \frac{\vec{E}_0}{R} \left[ \begin{array}{l} \cos(kr - \omega t) \\ + \cos(kr - \omega t + \delta) \end{array} \right]\end{aligned}$$

- Sendo  $\delta$  a diferença de fase entre as duas ondas, que vale

$$\delta = k a \sin \theta$$



# Duas Fendas: **Interferência**

- O campo elétrico será nulo, i.e., há interferência destrutiva, quando:

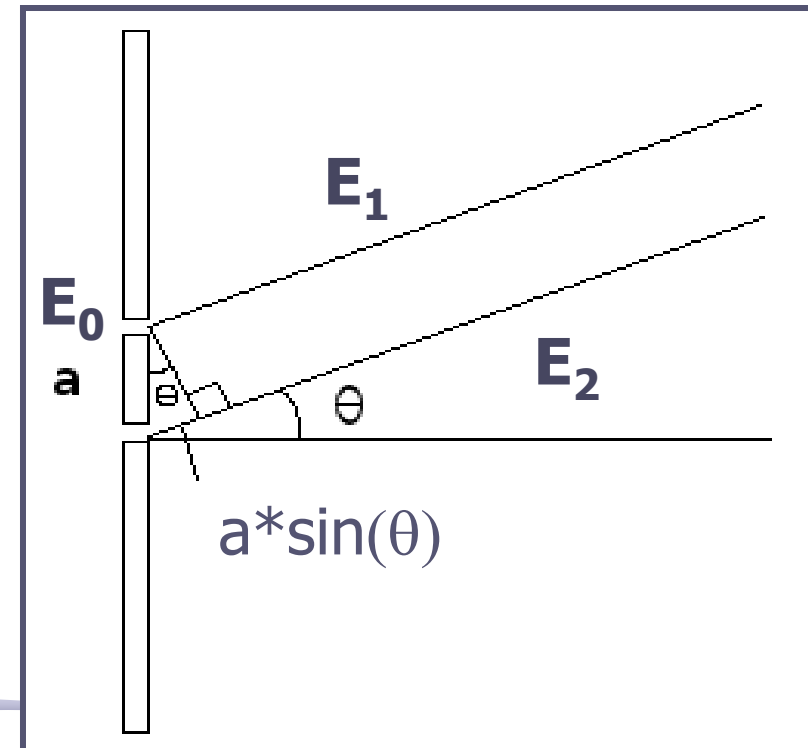
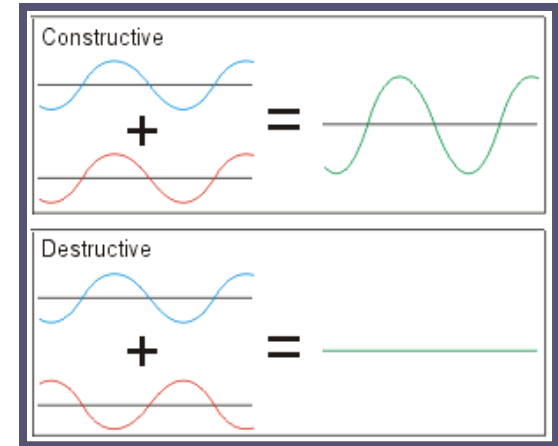
$$\delta = k a \sin \theta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$$

$$k a \sin \theta = (2m + 1)\pi, m = 0, 1, 2, \dots$$

- Ou seja, quando:

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

$$a \sin \theta = \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda, m = 0, 1, 2, \dots$$



# Duas Fendas: **Intensidade**

**Irradiância (I)** de uma fonte de ondas eletromagnéticas: é a energia média emitida por unidade de área, por unidade de tempo. É proporcional ao quadrado do campo elétrico da onda eletromagnética.

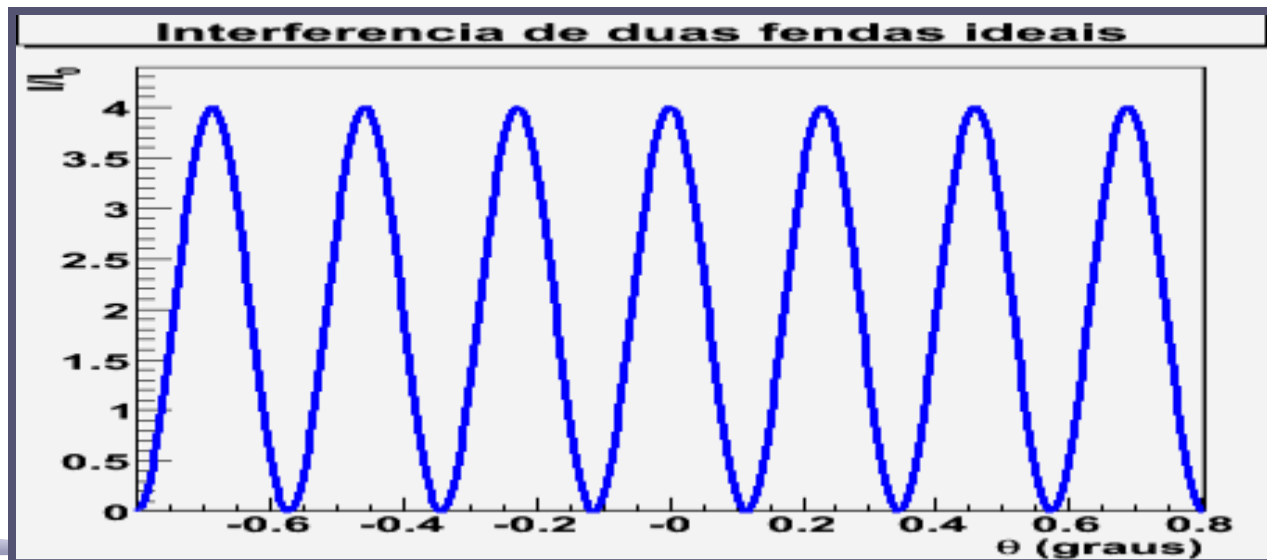
$$\begin{aligned}\vec{E}_1 + \vec{E}_2 &= \frac{\vec{E}_0}{R} [\cos(kr - \omega t) + \cos(kr - \omega t + \delta)] \\ &= \frac{\vec{E}_0}{R} \left[ 2 \cos\left(\frac{(kr - \omega t) + (kr - \omega t + \delta)}{2}\right) \cos\left(\frac{(kr - \omega t) - (kr - \omega t + \delta)}{2}\right) \right] \\ &= \frac{\vec{E}_0}{R} \left[ 2 \cos\left(kr - \omega t + \frac{\delta}{2}\right) \cos\left(\frac{-\delta}{2}\right) \right]\end{aligned}$$

# Duas Fendas: **Intensidade**

- Portanto o campo e a intensidade são

$$\vec{E} = \left( \frac{\vec{E}_0}{R} 2 \cos(\delta / 2) \right) \cos(kr - \omega t + \delta / 2)$$

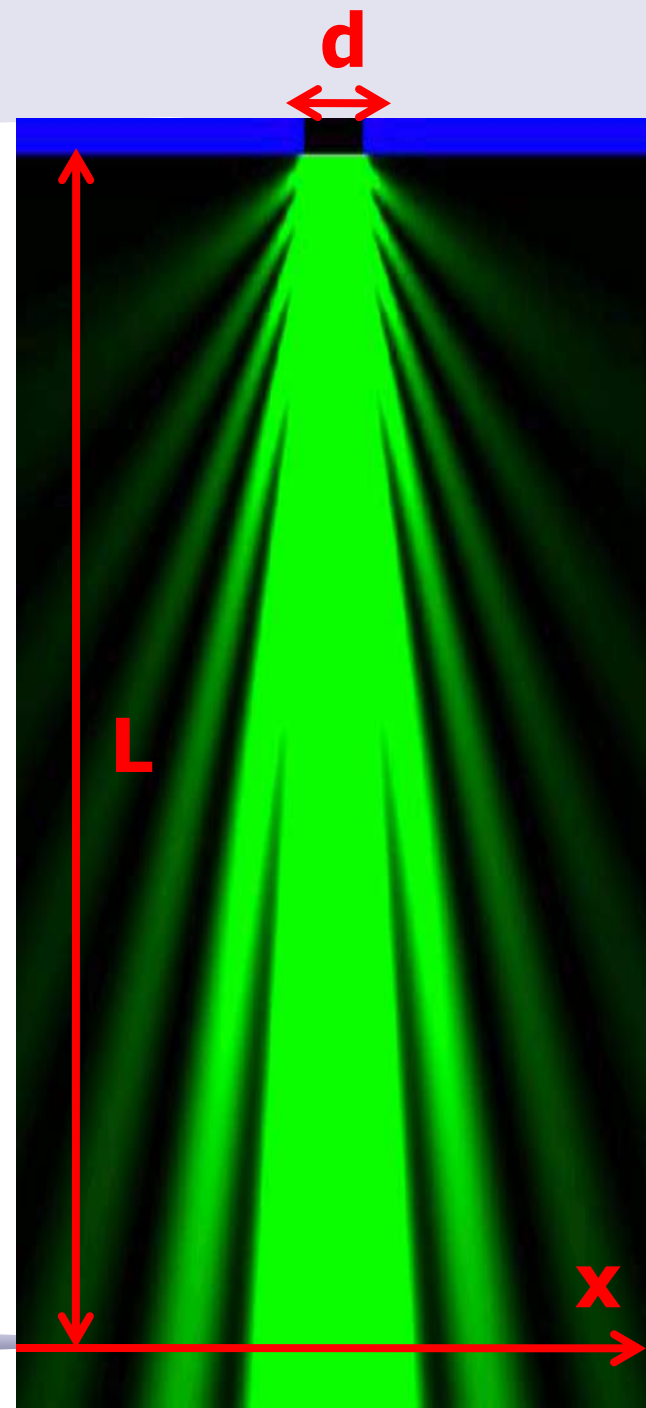
$$I = 4I_0 \cos^2 \alpha, \quad \alpha = \frac{\delta}{2} = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta, \quad I_0 = \frac{E_0^2}{R^2}$$





# Difração

- Seja uma fenda de largura  $d$ .
- Se a largura  $d$  for comparável com o comprimento de onda  $\lambda$ , ocorre difração.
- Se colocarmos um anteparo a uma distância  $L$ , *muito maior que  $d$* , qual é a intensidade luminosa ao longo do eixo  $x$ ?



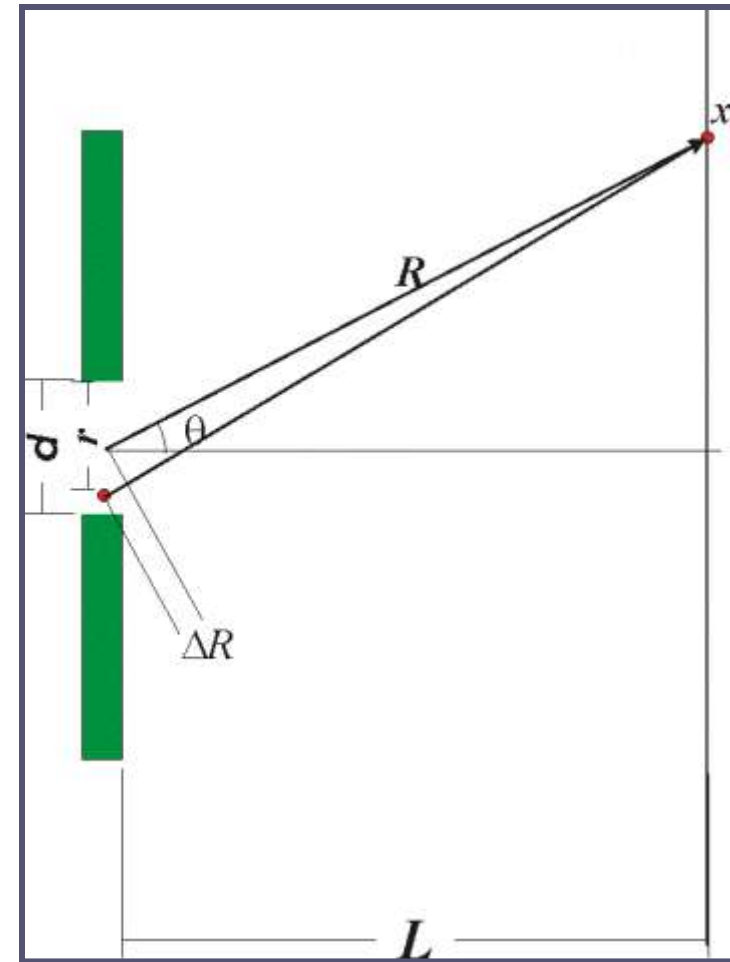
# Fenda Simples

Neste caso consideramos **cada pedaço** da fenda como uma fonte pontual.

- Seja um pedaço qualquer da fenda, distante de  $r$  de uma das extremidades
- Seja uma onda de frequência  $f$  e comprimento de onda  $\lambda$ .
- Em um instante  $t$  qualquer a intensidade da onda no ponto  $x$  vale:

$$\vec{E}(r) = \frac{\vec{E}_0}{R} \cos(kR - \omega t + \delta)$$

$$\delta = k\Delta R = kr \sin \theta$$



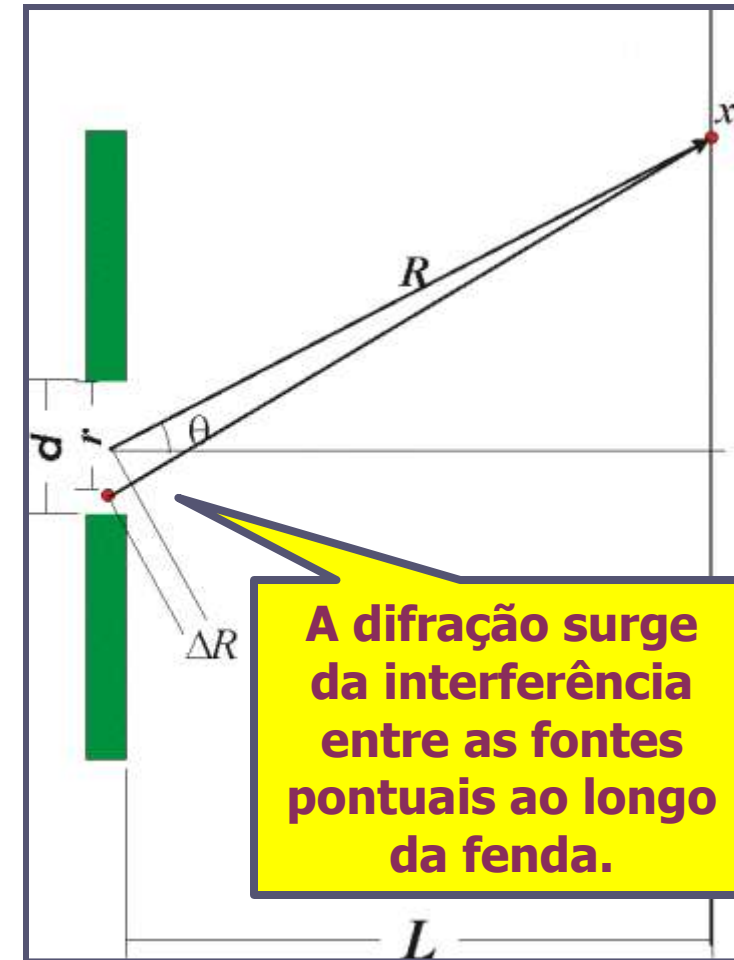
# Fenda Simples: Difração

- Para saber o campo total, é preciso somar todos os pedaços da fenda:

$$\vec{E}(x) = \int_{-d/2}^{d/2} \vec{E}(r) dr$$
$$\propto \left[ \frac{\sin(kR - \omega t + kr \sin \theta)}{k \sin \theta} \right]_{-d/2}^{d/2}$$
$$\propto \frac{\sin(\beta)}{\beta}, \text{ onde: } \beta = k \frac{d}{2} \sin \theta$$

- Assim a intensidade fica:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2, \quad \beta = \pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta$$



# Fenda Simples: **Intensidade**

- A intensidade para o caso da fenda simples também apresenta mínimos:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2, \quad \beta = \pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta$$

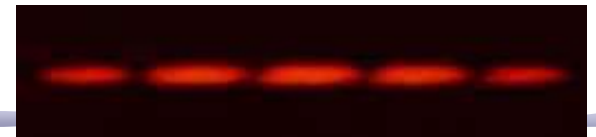
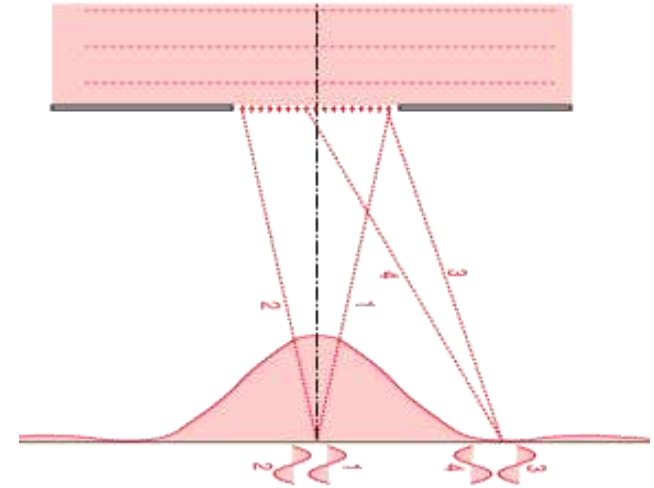
- Que ocorrem quando:  
 $\sin \beta = 0 \Rightarrow \beta = \pm m\pi, m = 0, 1, 2, 3, \dots$

- Ou seja:

$$d \sin \theta = \pm m\lambda, m = 1, 2, 3, \dots$$

- Para  $m=0$  temos um máximo pois:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$$

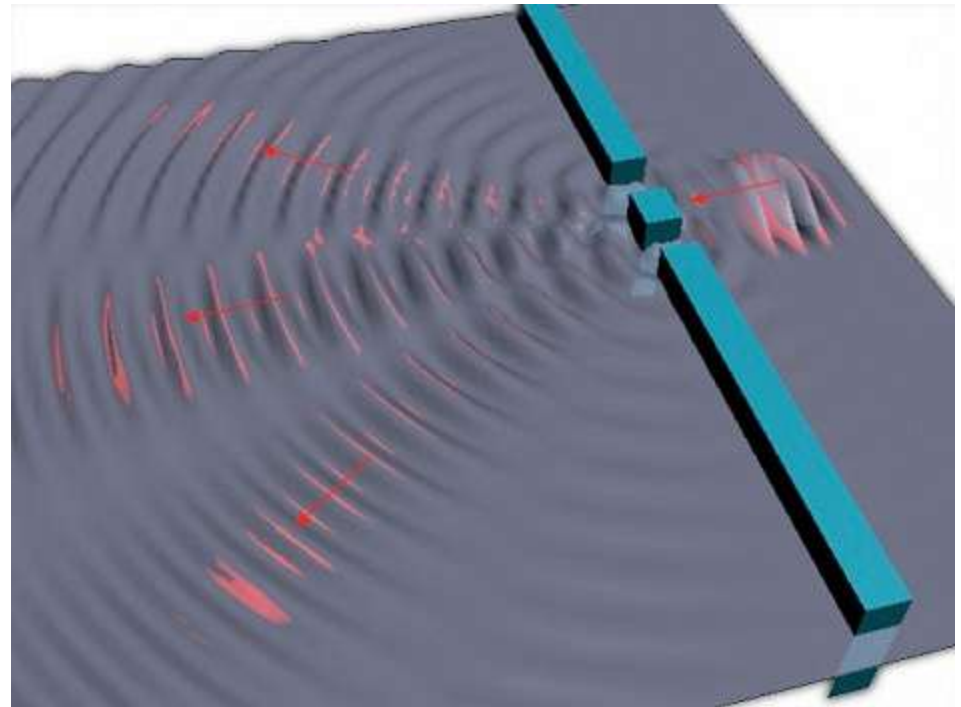


# Fenda Dupla REAL

- Vamos voltar ao caso da fenda dupla e considerá-la real, isto é, vamos considerar que cada abertura tem uma dimensão não pontual.

- Seja uma fenda dupla de separação, centro a centro, ***a***, e largura de fenda ***b***.
- Além da difração em cada fenda separadamente, temos a interferência entre as duas fendas.

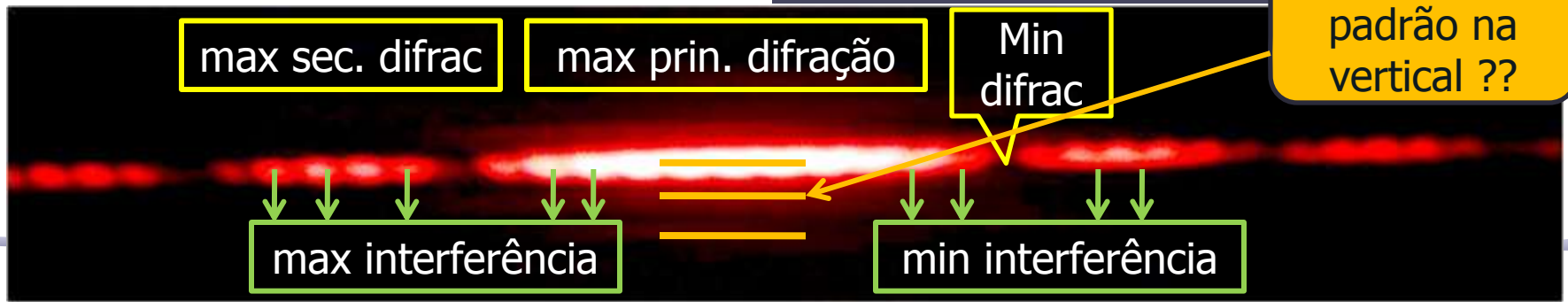
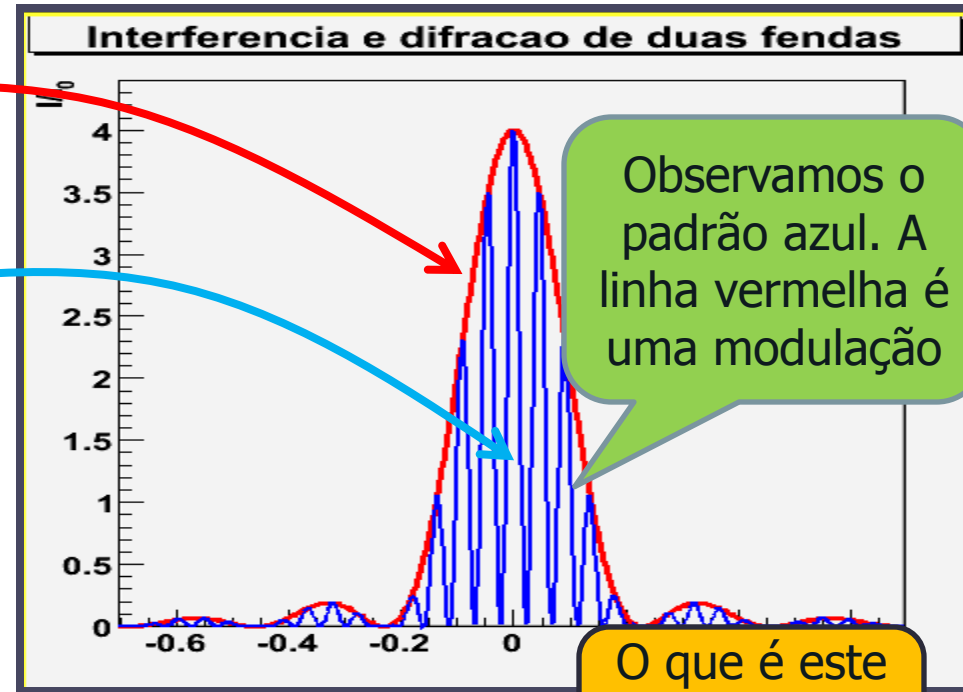
$$I = I_{\text{difrac}} * I_{\text{interf}}$$



# Fenda Dupla: Difração e Interferência

- Sendo  $a$  distância entre as fendas e  $d$  a largura de cada uma, podemos escrever que:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \alpha$$
$$\beta = \pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \quad \alpha = \pi \frac{a}{\lambda} \sin \theta$$



# Difração em duas dimensões

Uma fenda real, tem um comprimento  $D$  e uma largura  $d$ , e a difração acontece nas duas direções! Contudo, ao longo do comprimento, a intensidade cai muito rapidamente pois  $D \gg \lambda$  enquanto que  $d \sim \lambda$ .

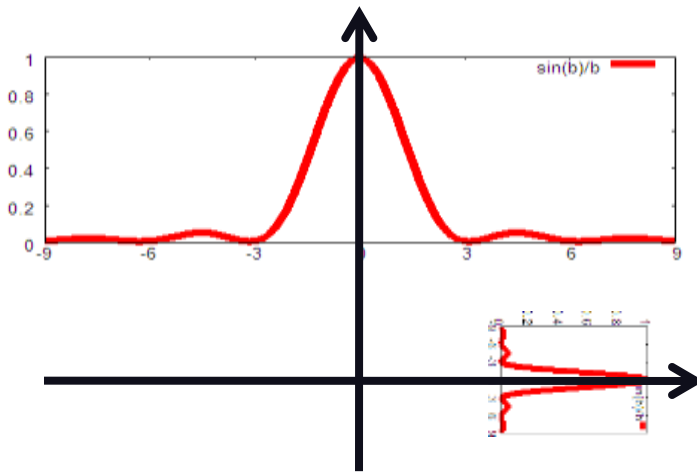
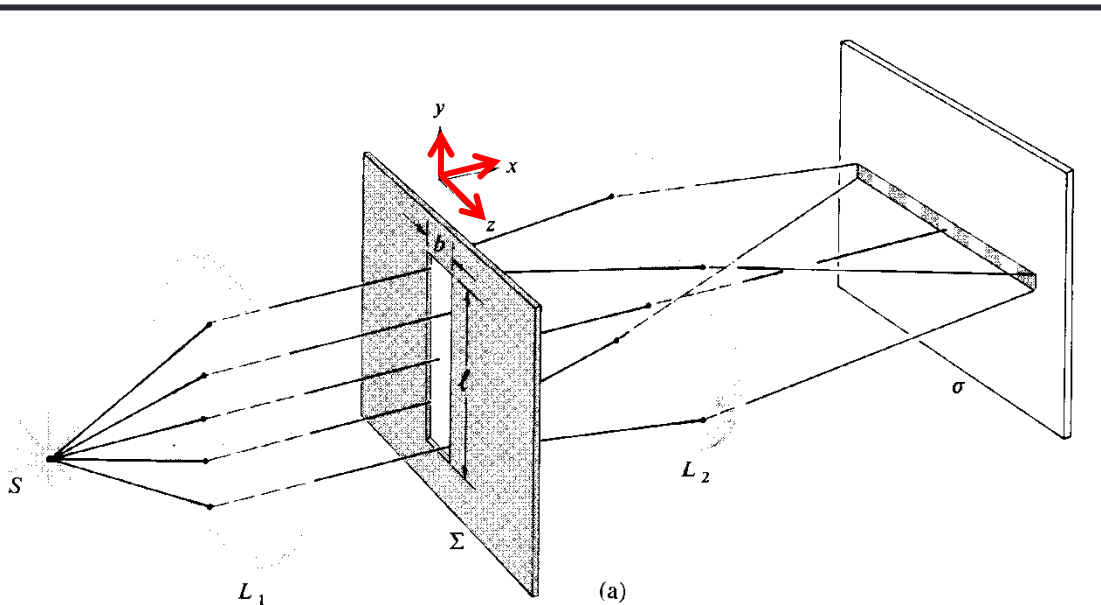
Como:

$$\beta = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta$$

Então:

$$\beta \gg 1 \rightarrow \frac{\sin \beta}{\beta} \ll 1$$

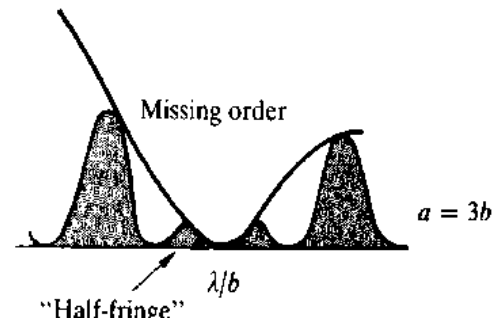
Na direção do comprimento, a intensidade é muito pequena para valores de  $\beta > 0$ .



# Difração de fenda dupla

Na prática, uma fenda real, com comprimento e largura, só difrata "na largura" pois é o tamanho que é da ordem do comprimento de onda!

O padrão de difração/interferência de uma fenda dupla aparece no plano  $x/z$ , perpendicular ao comprimento da fenda





# Características do objeto

Como vimos, a razão entre as dimensões do objeto e comprimento de onda determinam o padrão de difração.

- A partir da separação entre os mínimos da figura de difração pode-se calcular a largura da fenda.
- A partir da separação entre os máximos (ou mínimos) do padrão de interferência pode-se calcular a separação entre elas.

Nos dois casos, é preciso conhecer a **distância entre as fendas e o anteparo** e que as condições para a ocorrência da **difração de Fraunhofer estejam satisfeitas**.



# Difração: orifício circular

- Da mesma forma que para a fenda simples, podemos observar figuras de difração para um orifício circular de diâmetro **a**. Neste caso, os mínimos de intensidade correspondem à:

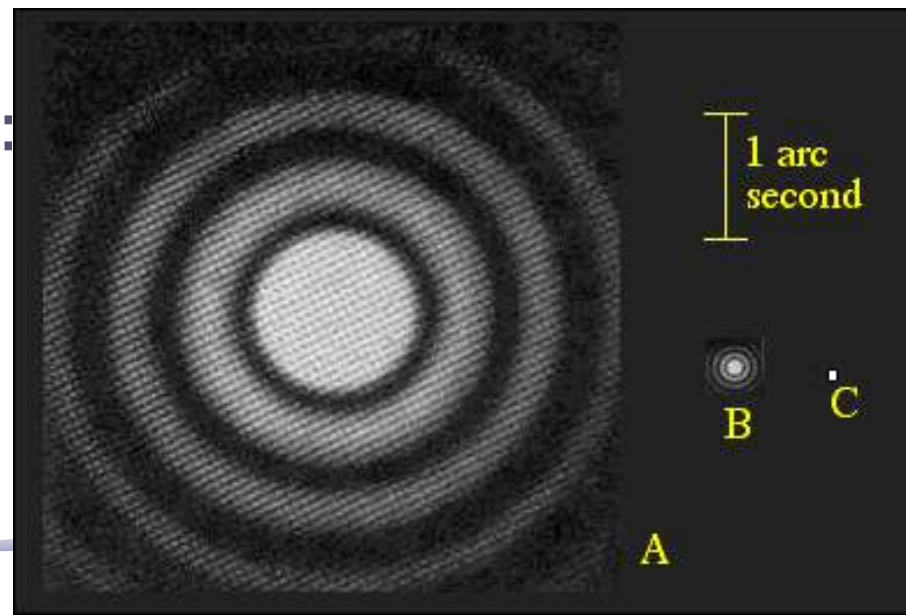
$$\frac{\text{sen } \theta}{\lambda / a} = 1,22; \quad 2,23; \quad 3,24; \quad \dots$$

Imagens de uma estrela com telescópios de aberturas diferentes:

A=espelho de 10cm de diâmetro

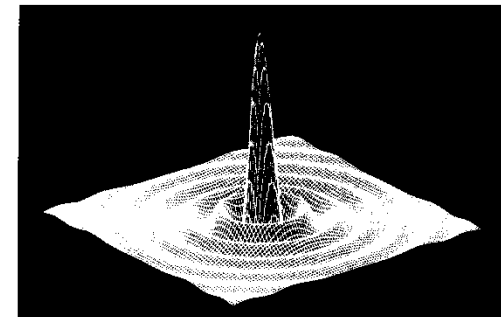
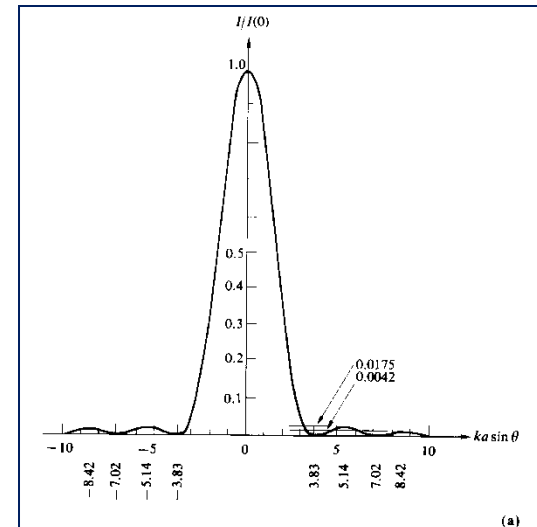
B= espelho de 1m de diâmetro

C= espelho de 10m de diâmetro



# Difração: orifício circular

- A imagem de uma fonte pontual formada por uma lente convergente, totalmente livre de aberrações, nunca é um ponto, ela é o máximo principal correspondente a algum tipo de difração.
- Os máximos, neste caso, são chamados de **discos de Airy**, porque foi Sir George Biddell Airy quem primeiro derivou a fórmula que descreve a distribuição de intensidade para a abertura circular.
- **E aí está incluído o seu olho! Portanto o que se enxerga é sempre uma figura de difração.**



# Parte 2 – Para a síntese

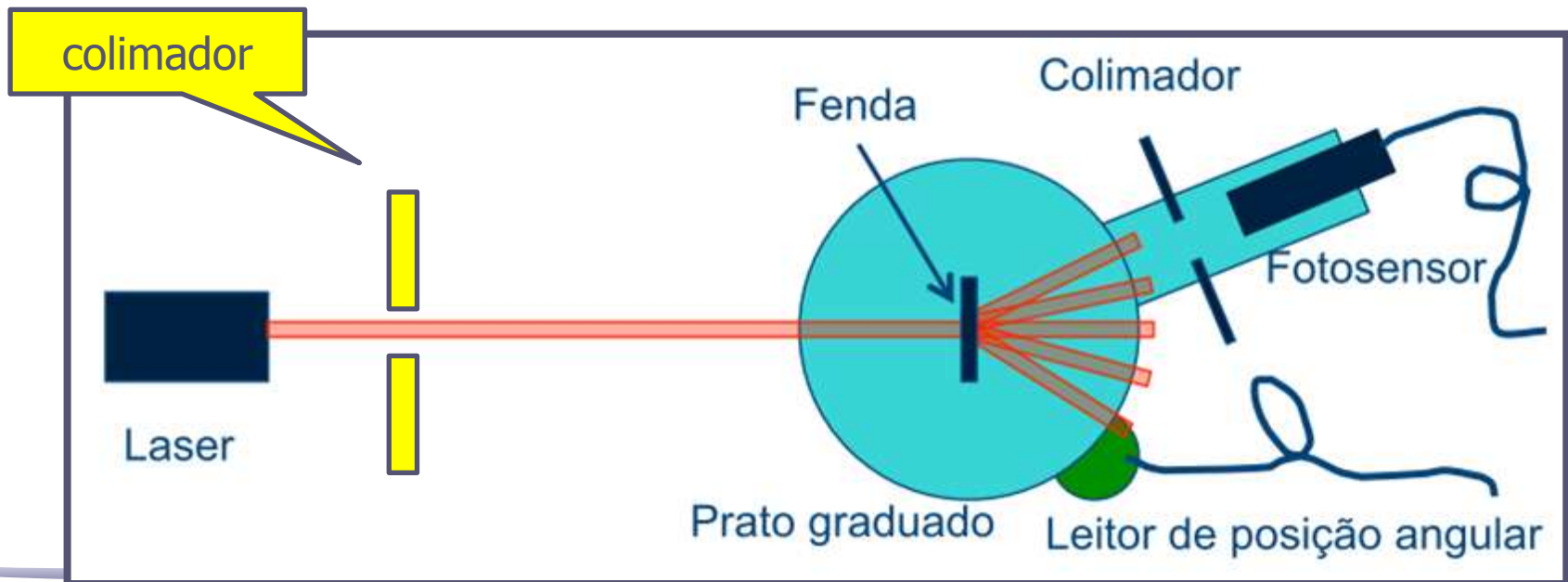
- Estudar a difração e interferência da Fenda simples:
  - Medir as intensidades da figura de difração da fenda simples com o espectrofotômetro.
    - Com  $\text{ganho}=1$  dá pra medir todos os picos, mas os secundários ficam muito pequenos. Com  $\text{ganho}=10$  satura o máximo central mas os outros ficam mais visíveis.
    - Qual é melhor usar? Dá para juntar as duas medidas ??
  - Da distância entre os mínimos nesse espectro obtenha a largura da fenda e compare com o valor nominal.
  - Usando esta largura de fenda e normalizando pelo máximo, sobreponha a curva esperada à experimental

# Parte 3 – Extra (junto c/ síntese)

- Faça o ajuste não linear da função teórica aos dados experimentais do espectro da fenda simples
- Como se compara o ajuste e a função teórica?
  - Descreva as discrepâncias se houver
    - Os máximos são bem representados? E os mínimos?? Porque???
  - Como você pode explicar essas diferenças?
- Que parâmetros não foram levados em conta e que podem explicar as diferenças?
  - Encontre uma função teórica mais apropriada, justifique, refaça o cálculo e compare novamente.

# Espectrofotômetro e DataStudio

- Espectrofotômetro e datastudio
  - O espectrofotômetro consiste de um arranjo contendo um fotosensor (para medir intensidade) e um sensor de rotação para medir ângulo





laser

Sensor de posição

Colimador

Sensor de luz

Slide com a fenda

Prato giratório

Suporte regulável do laser para alinhamento



Colimador

Sensor de  
posição

Sensor  
de luz

A fenda deve  
estar centralizada  
e alinhada

Girar o braço lentamente,  
sem forçar, 1 a 2 graus por  
segundo.

**Meça todo o espectro!  
Ou seja, comece de um  
lado e termine do outro,  
na mesma medida**



# Escolhendo a fenda



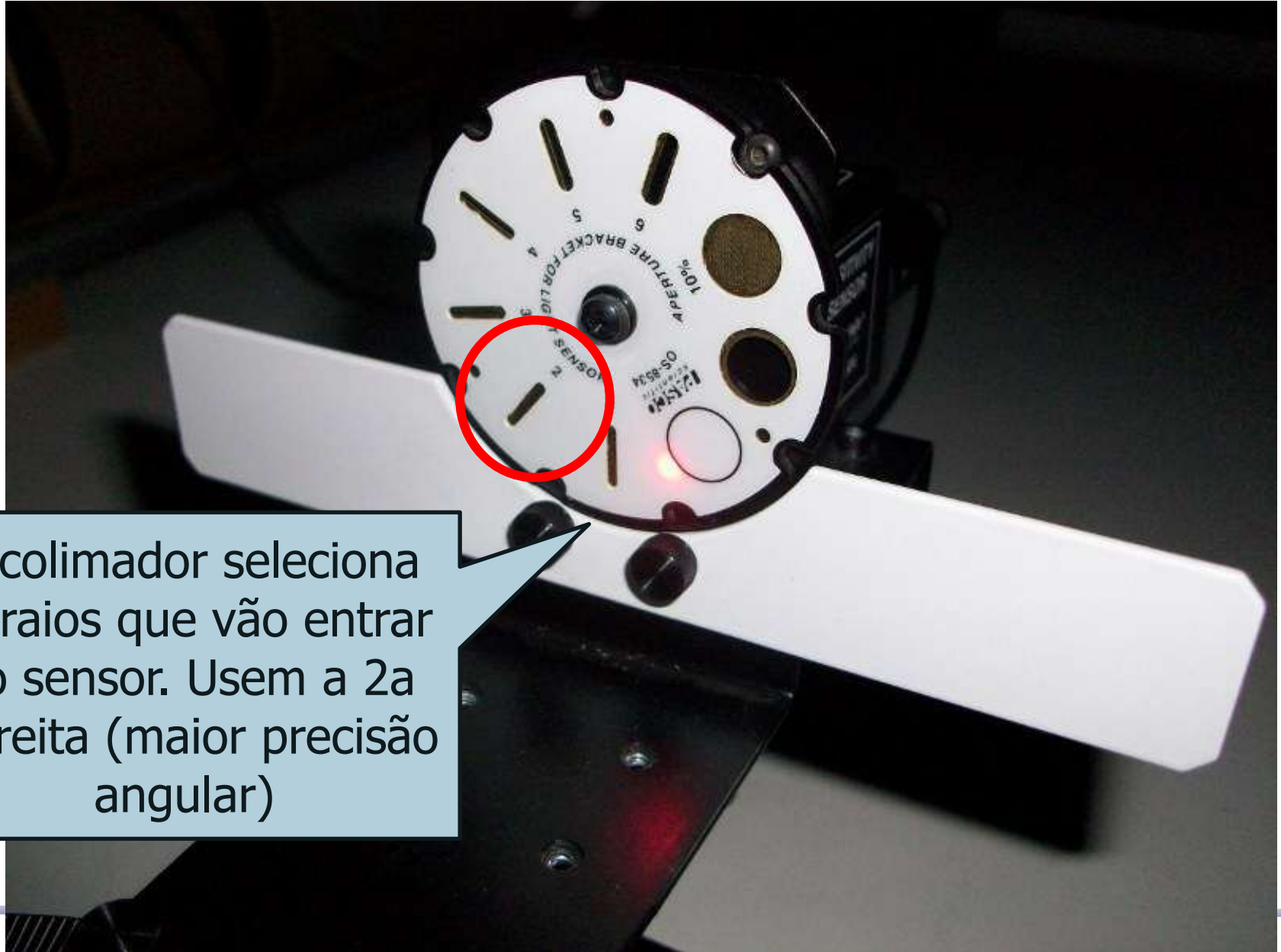
Use o slide  
prateado

Use a segunda  
fenda mais  
estreita



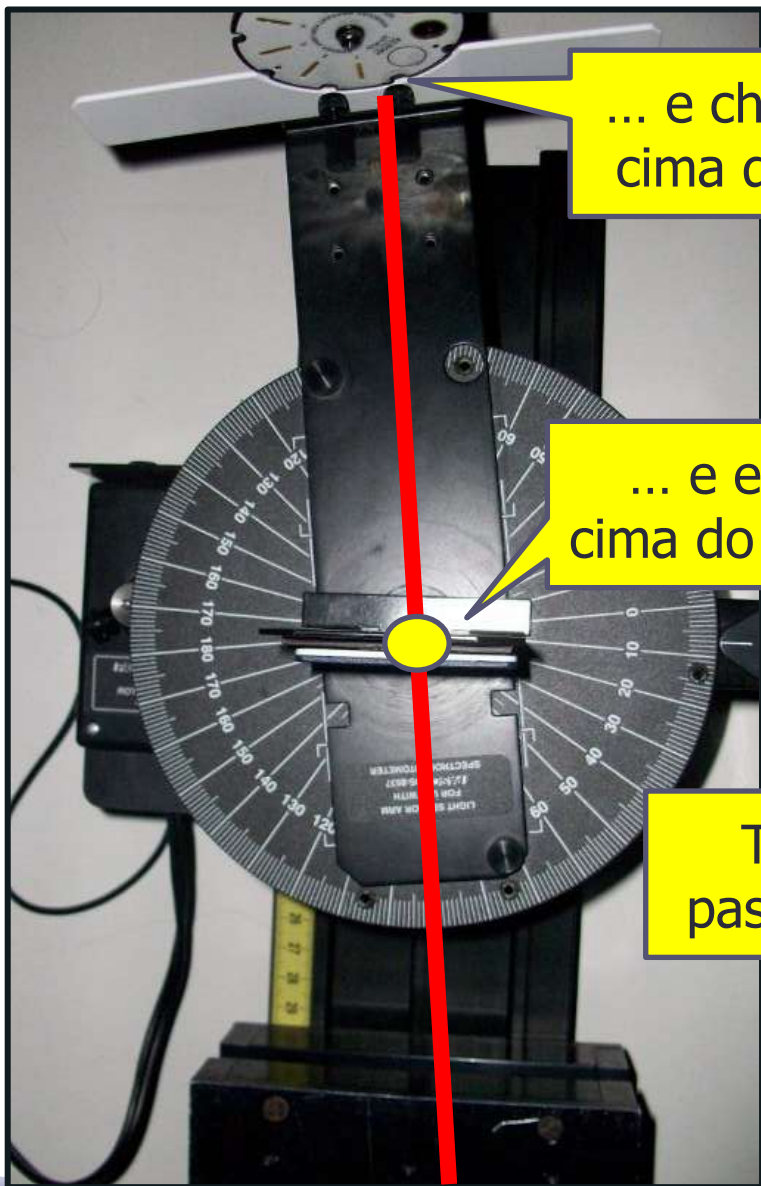
Se o slide não estiver  
em cima do eixo, a  
medida do ângulo vai  
estar errada!

# Escolhendo o colimador



O colimador seleciona os raios que vão entrar no sensor. Usem a 2a estreita (maior precisão angular)

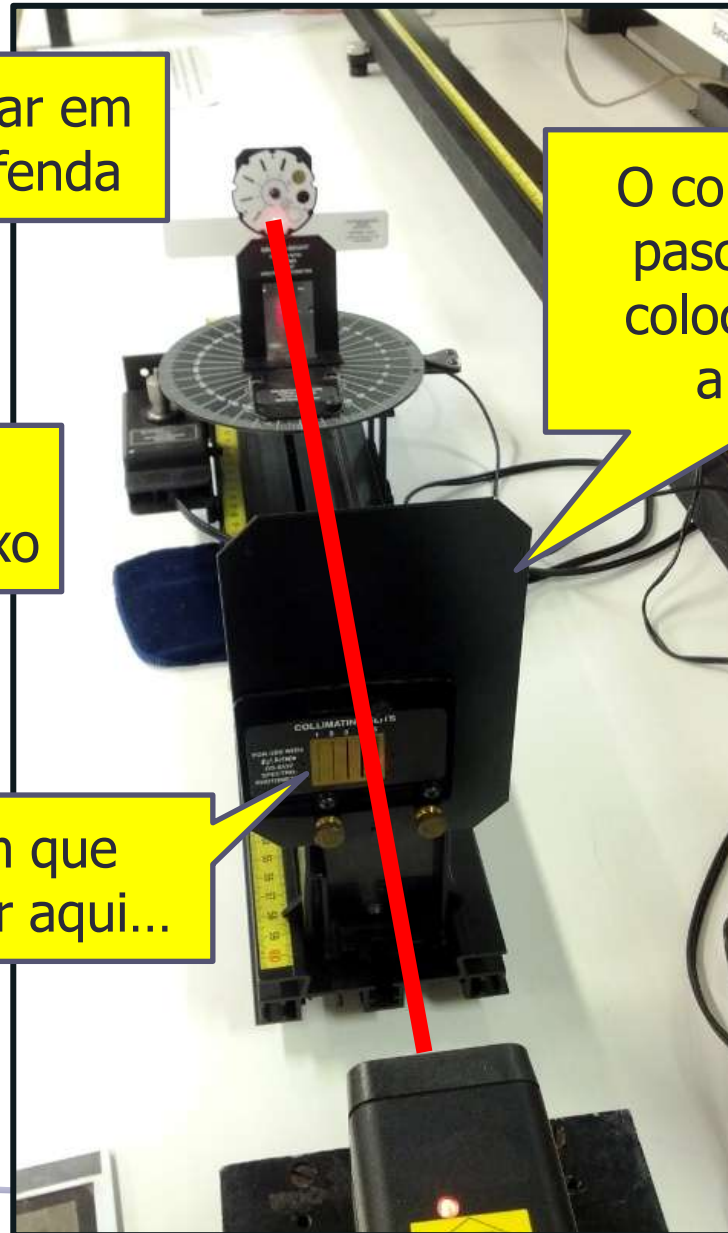
# Alinhamento (1)



... e chegar em cima da fenda

... e em cima do eixo

Tem que passar aqui...



O colimador da pasco ajuda a colocar o laser alinhado

# Alinhamento (2)



Sem a fenda o laser devia bater em cima da posição de medida!



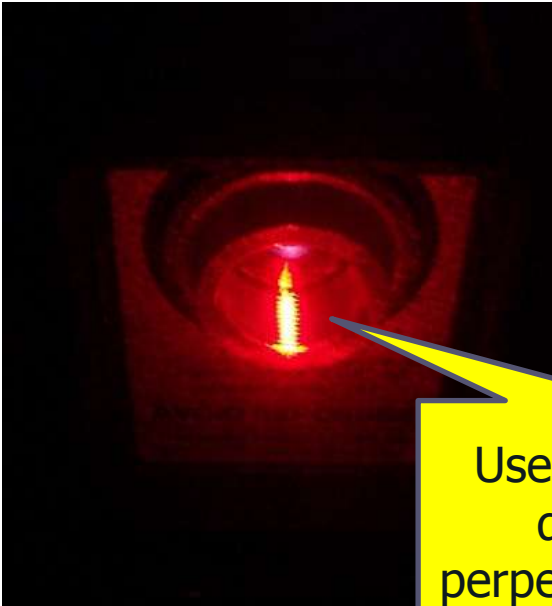
Com a fenda, a figura deve ficar centrada em torno da posição de medida!



OK!

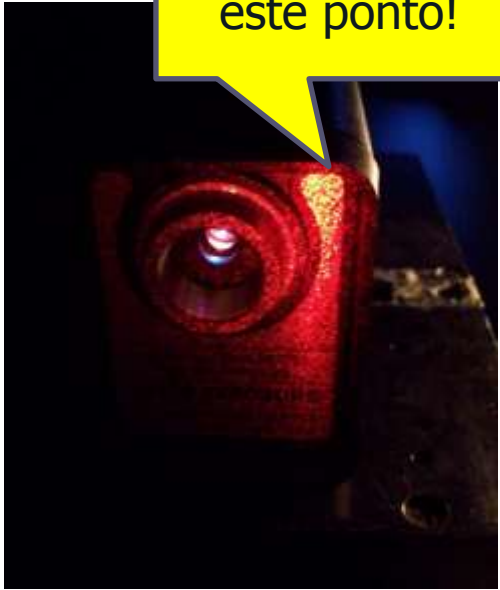


# Alinhamento (3)

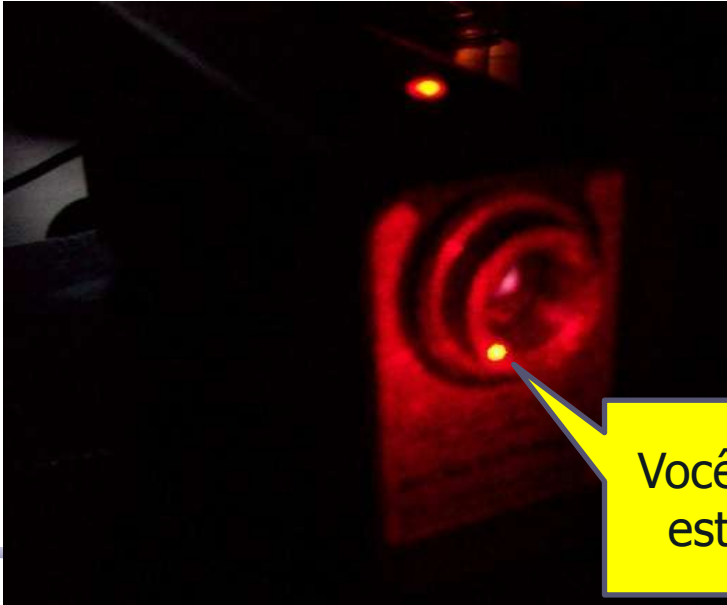


O laser será parcialmente refletido pela superfície do slide

Use a reflexão para deixar o laser perpendicular ao slide!



Você pode ver este ponto!

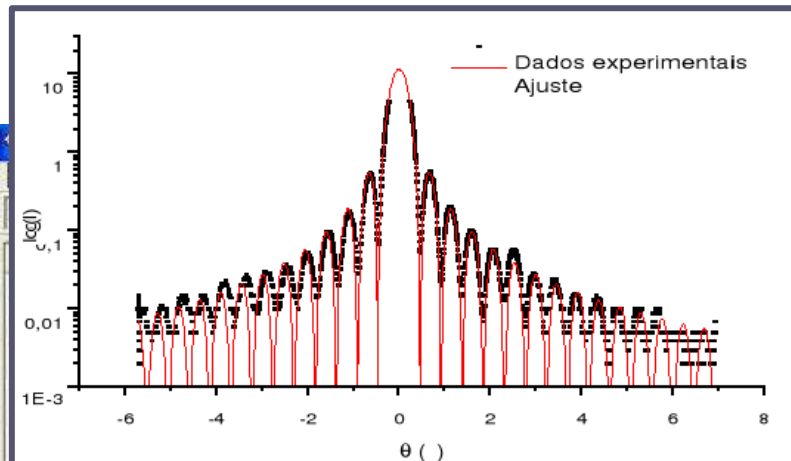


Você pode ver este ponto!

# Data Studio

- Esse instrumento funciona com o **DataStudio**:
  - Ligue o **light sensor** no **canal A**
  - Ligue o **rotary motion sensor** (é só clicar)
- Clique no **rotary motion** e abre-se a janela do **set up**:
  - ajuste a resolução do **rotary motion** para **1440 divisão/grau**
  - ajuste a frequência de amostragem para **50Hz**
- Coloque o ganho do sensor ótico igual a **1**. (No próprio sensor).
- Com a função **Calculate** definir o ângulo correto:
  - Quando o disco calibrado dá uma volta, o pino gira 60 voltas. Como o instrumento dá o ângulo do pino, o ângulo correto é a leitura do instrumento(ângulo do pino) dividido por 60.
  - No **Calculate** definir **ângulo=x/60**.
- Comece as medidas movimentando o **light sensor** de forma contínua e pausada.

# Dados



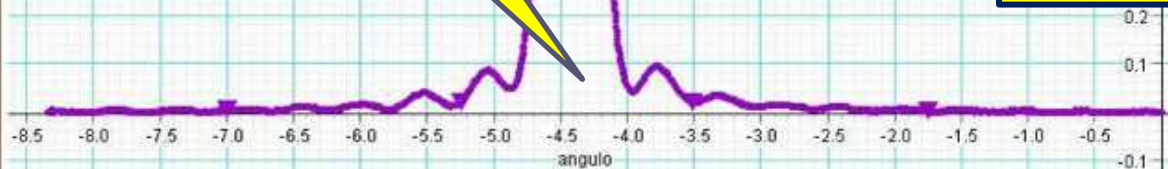
Você sabe que o laser e o slide estão alinhados quando os picos laterais tem o mesmo tamanho

O ângulo central anotado pelo DataStudio não vai ser ZERO (como deveria) pois você começou a medida fora do centro!

**FAÇA A CORREÇÃO!!**



É possível ver vários picos.



# Cuidado com a resolução usada

