

Física Experimental IV

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=90535>

2º Semestre 2021

Exp. 2 – Computador Óptico

Atividade 2 – Difração e Interferência

Semana 5 - 23/Setembro

Prof. Henrique Barbosa

hbarbosa@if.usp.br

<http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa>

AVISO

- Nossa turma não fará as atividades na ordem que estão no site.
- Sigam as orientações da **minha aula.**
 - Sempre usar o PDF que eu coloco na nossa pasta.

Exp. 2 – Computador Óptico

- Objetivos
 - Investigar a natureza ondulatória da luz através do estudo da difração e interferência.
 - Estudar a difração como uma transformada de Fourier.
 - Construir um computador ótico.

Cronograma

- 5 atividades:
 - **Atividade 1:** Estudo qualitativo de difração e interferência
 - **Atividade 2:** Estudo quantitativo de difração em fendas simples
 - **Atividade 3:** Processamento de imagens (ImageJ)
 - **Atividade 4:** Simulação do computador óptico, plano de Fourier
 - **Atividade 5:** Aplicação do computador óptico, objeto vs. sua T.F.

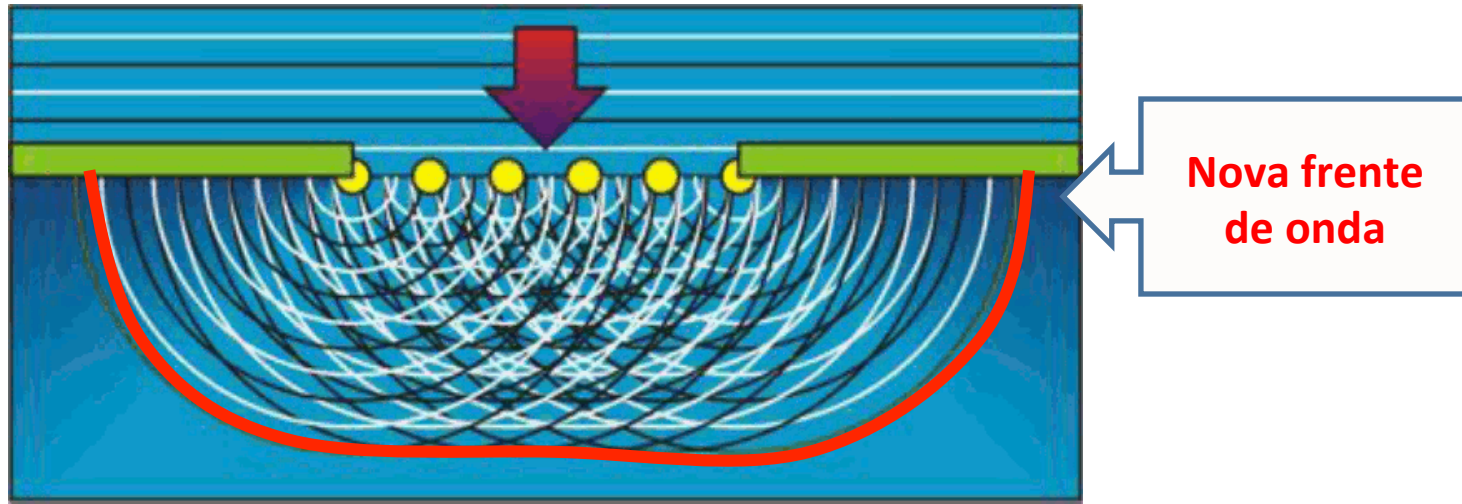
Difração

- 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.
 - Se a dimensão do objeto for muito maior (ou menor) que o comprimento de onda, não ocorre difração.

Princípio de Huygens-Fresnel

Cada ponto de uma frente de onda (não obstruído) funciona como uma fonte (secundária) puntiforme esférica. – **Huygens**

A onda resultante consiste da superposição de todas as ondas esféricas, levando em consideração a fase entre elas (interferência). – **Fresnel**



Difração de Fraunhofer e de Fresnel

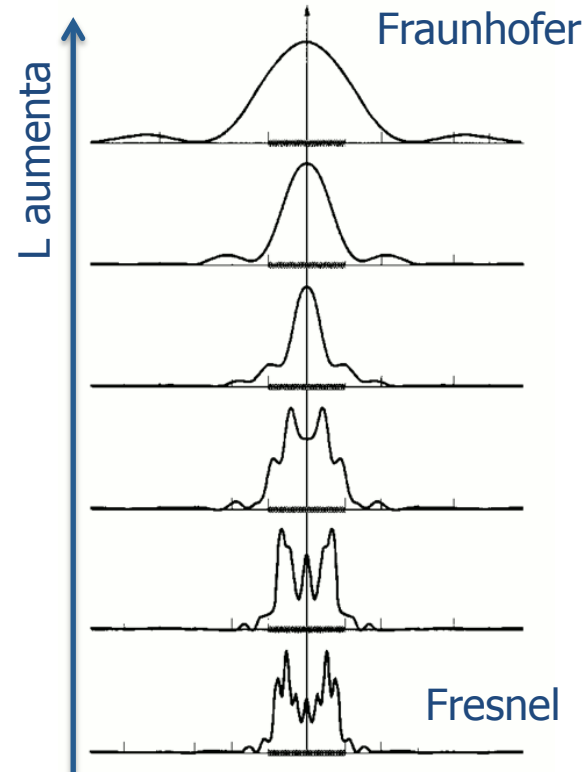
Se anteparo está **longe da fenda**, o princípio de Huygens-Fresnel funciona bem. Essa é a **difração de Fraunhofer** ou **difração de campo distante**.

Se o anteparo está **perto da fenda**, os cálculos são complexos. Essa é a **difração de Fresnel** ou **difração de campo próximo**.

Número de Fresnel

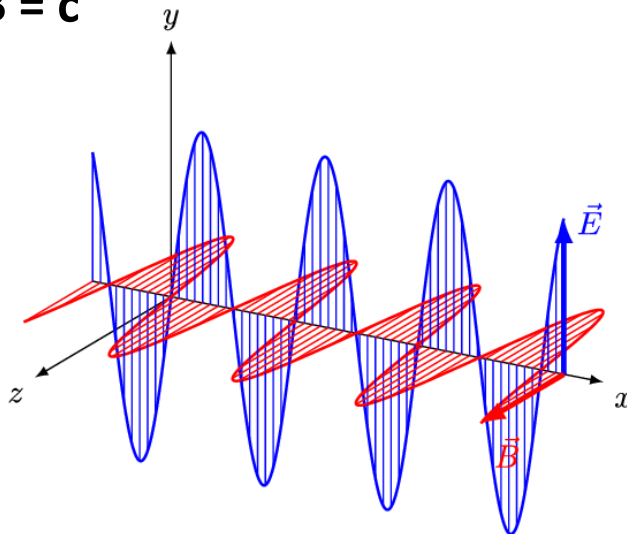
- $F \ll 1$ (Fraunhofer)
- $F \gg 1$ (Fresnel)

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



Radiação Eletromagnética

- É formada por um campo magnético e um campo elétrico que vibram em fase, perpendiculares entre si e a direção de propagação;
- Se propaga no espaço como uma onda, com velocidade de propagação dada pela razão $\mathbf{E}/\mathbf{B} = \mathbf{c}$



Parado no ponto $(x_0, 0, 0)$,
vemos o campo \mathbf{E} oscilar:

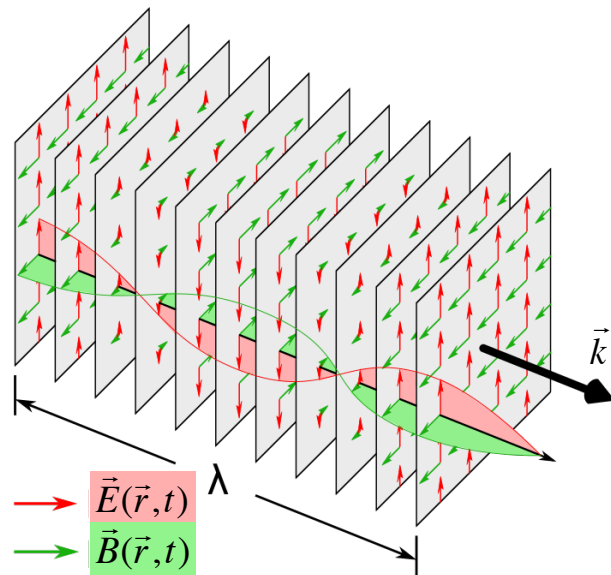
$$E_{x0}(t) = E_0 \cos(\omega t)$$

Onda Plana

- Um onda E.M. plana é uma idealização, onde o campo \mathbf{E} é constante em qualquer plano perpendicular a direção de propagação.

- Podemos representá-la assim:

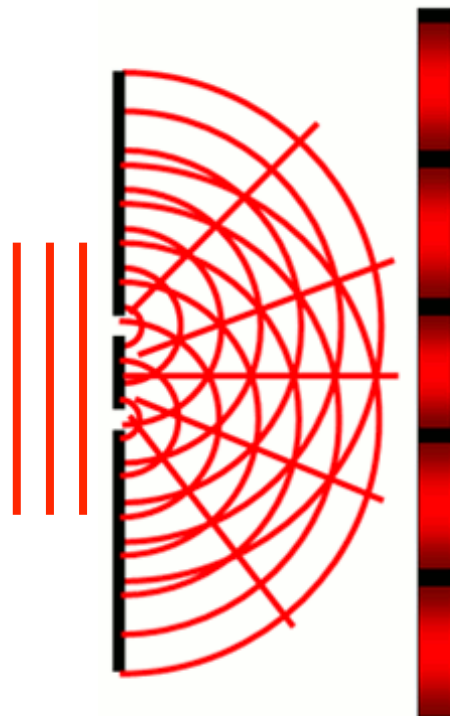
$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$



Duas fendas ideais

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

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

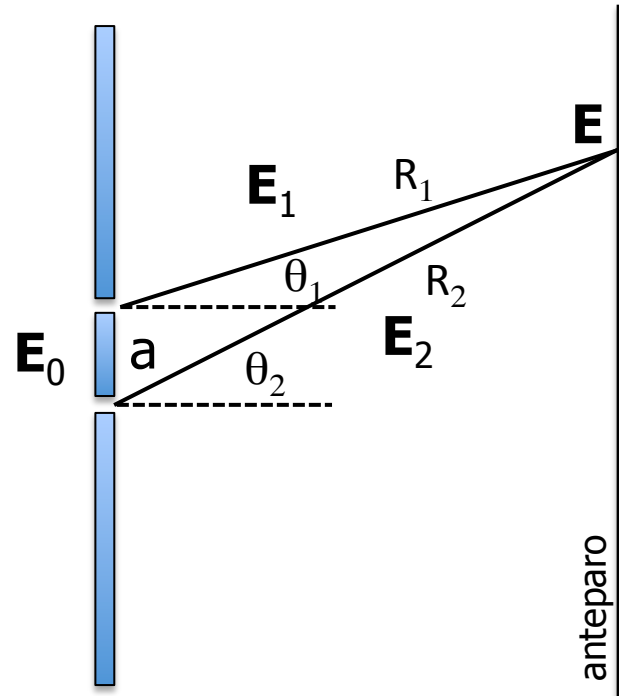


Duas fendas ideais

- O campo total vale:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

- Aproximação de campo distante:
 - $\theta_1 \sim \theta_2 \sim \theta$ (raios paralelos)
 - $R_1 \sim R_2 \sim R \gg a$
- Fontes pontuais:
 - intensidade $\sim 1/R^2$
 - $|\mathbf{E}| \sim 1/R$



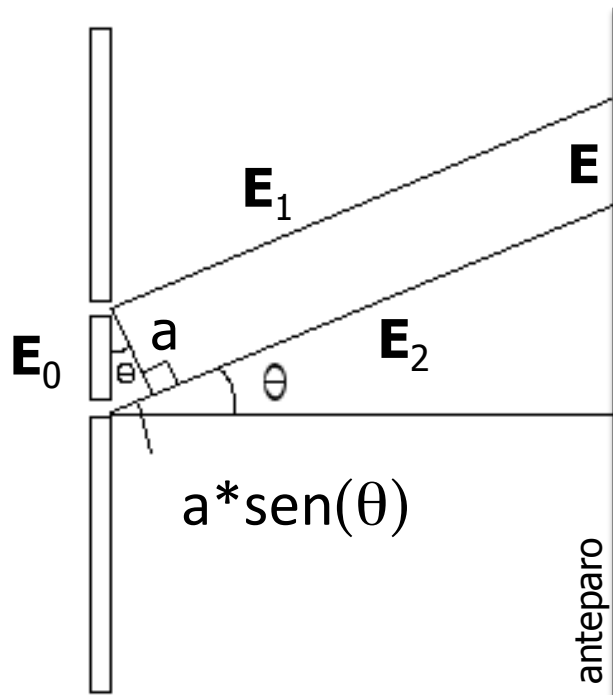
Duas fendas ideais

- Portanto, podemos escrever que:

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

- Onde δ é a diferença de fase entre as duas ondas, que vale

$$\delta = ka \sin \theta$$



Interferência entre E_1 e E_2

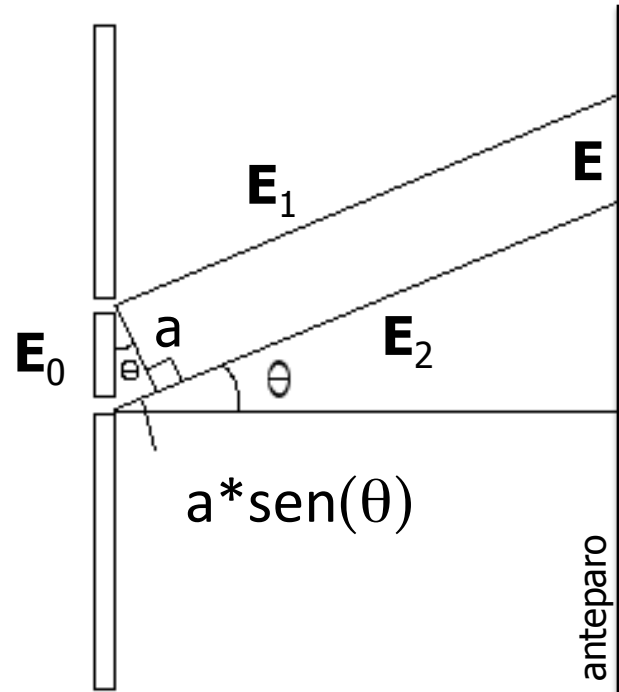
- O campo elétrico será nulo quando a interferência é destrutiva:

$$\delta = ka \sin \theta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$$

$$ka \sin \theta = (2m + 1)\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

- Ou seja, quando:

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



Intensidade

Irradiância (I) é a energia média emitida por unidade de área, por unidade de tempo. É proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico da onda E.M..

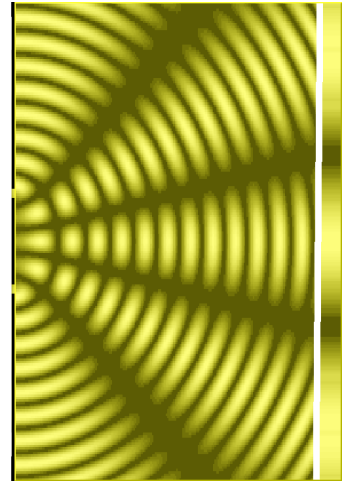
Vamos calcular:

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

Intensidade

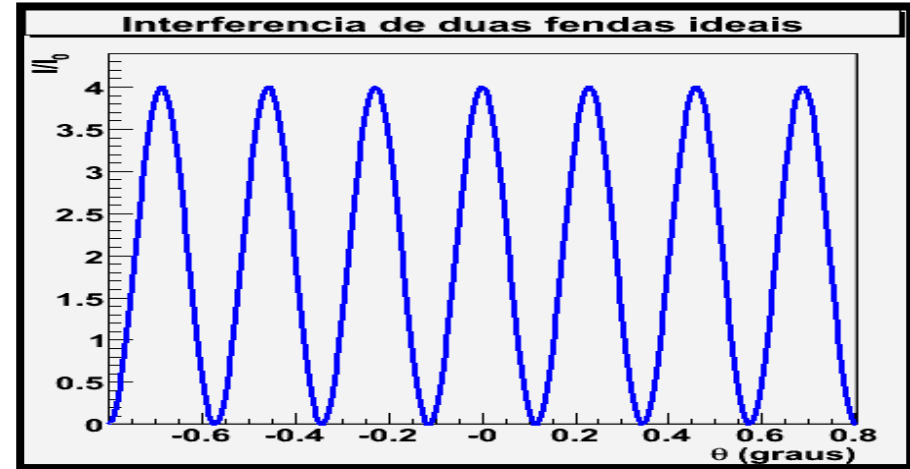
- Portanto:

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



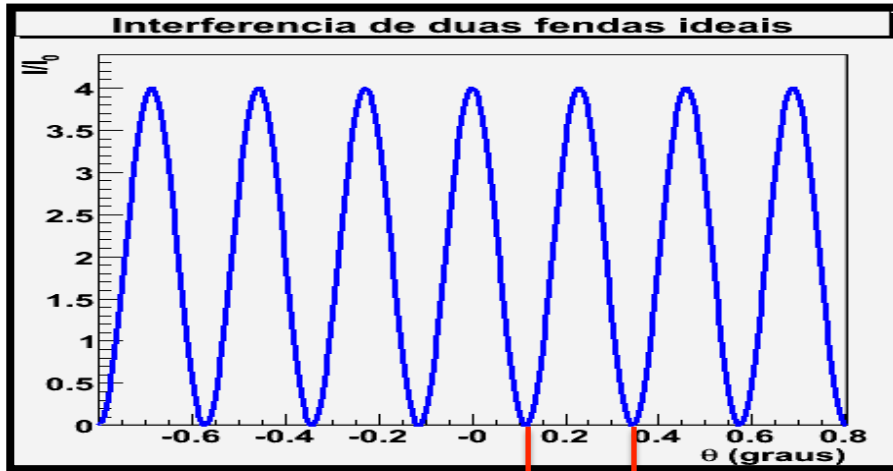
$$I = I_0 \cos^2 \alpha$$

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



Intensidade

- Qual a separação entre 2 mínimos? $\sin\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{a}$, $m = 0, 1, 2, \dots$



$$\sin\theta = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{a}$$

$$\sin\theta = \frac{3}{2} \frac{\lambda}{a}$$

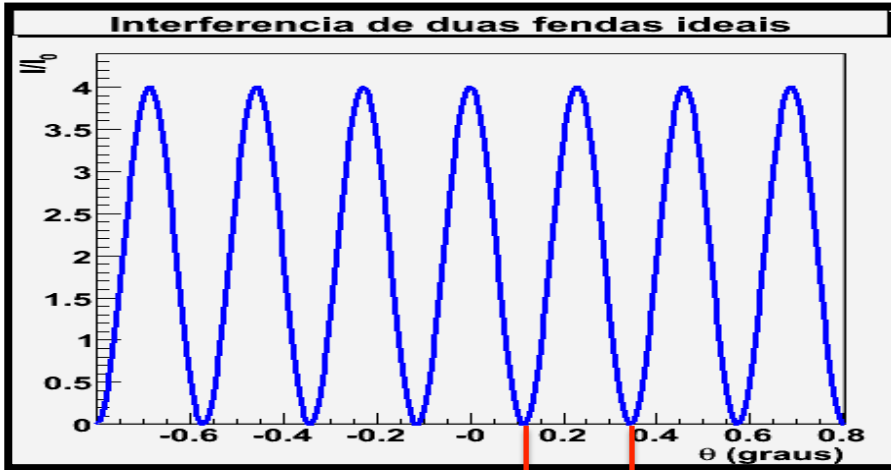
$$a = 2000\text{nm}, \lambda = 500\text{nm}$$

m	Sin(θ)	θ
0	1/8	7.2°
1	3/8	22°
2	5/8	39°
3	7/8	61°
4		

Sin() <=1, portanto, só tem 4 mínimos

Intensidade

- Qual a separação entre 2 mínimos? $\sin\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{a}$, $m = 0, 1, 2, \dots$



$$\sin\theta = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{a}$$

$$\sin\theta = \frac{3}{2} \frac{\lambda}{a}$$

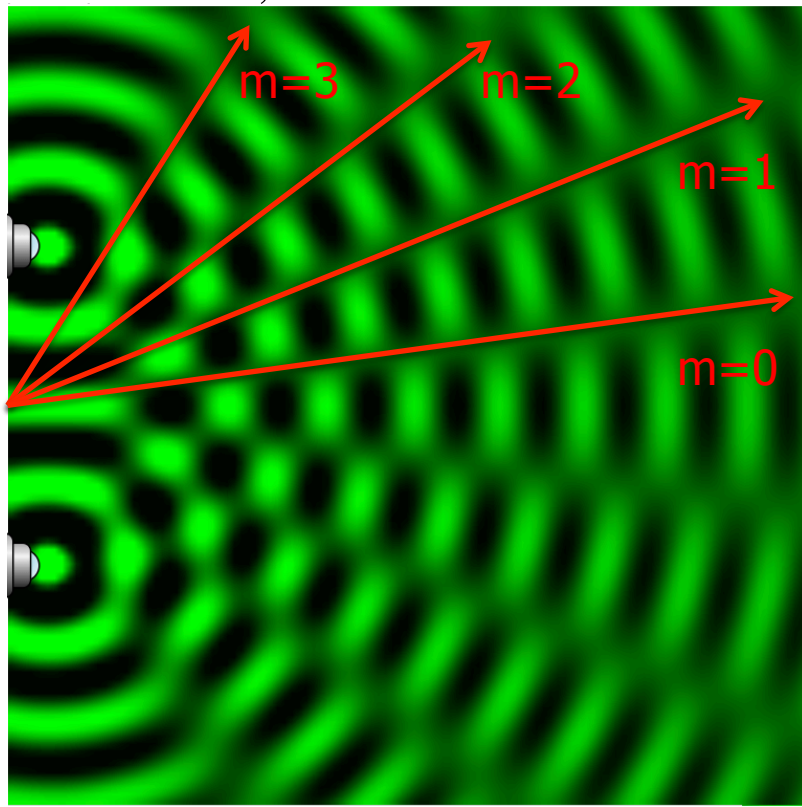
$$a = 500\text{nm}, \lambda = 500\text{nm}$$

m	Sin(theta)	theta
0	0.5	30°
1	1.5	

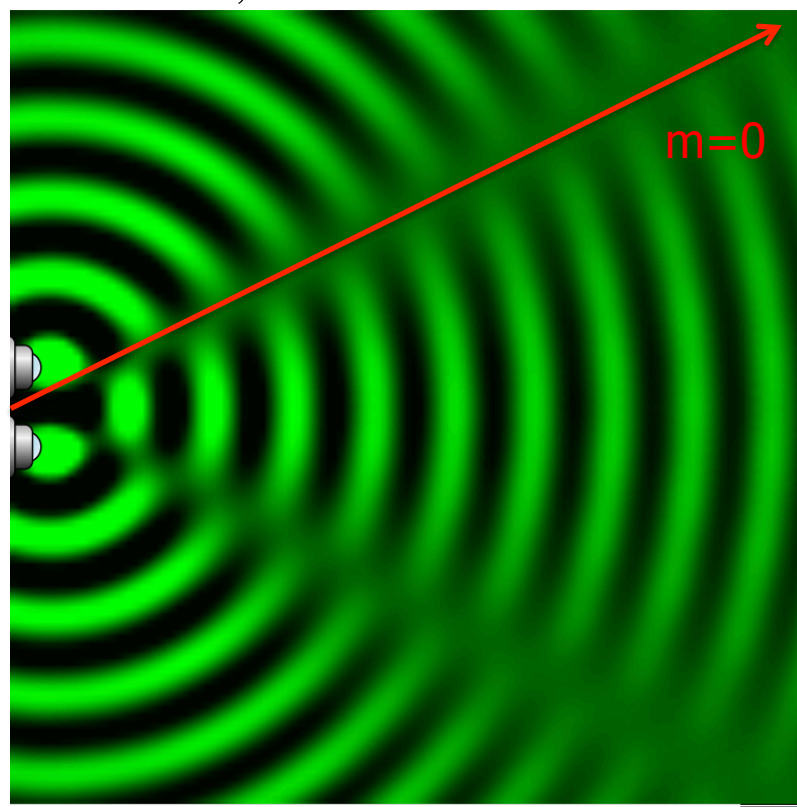
Sin() <= 1, portanto, só tem 1 mínimos

Intensidade

$a = 2000\text{nm}, \lambda = 500\text{nm}$

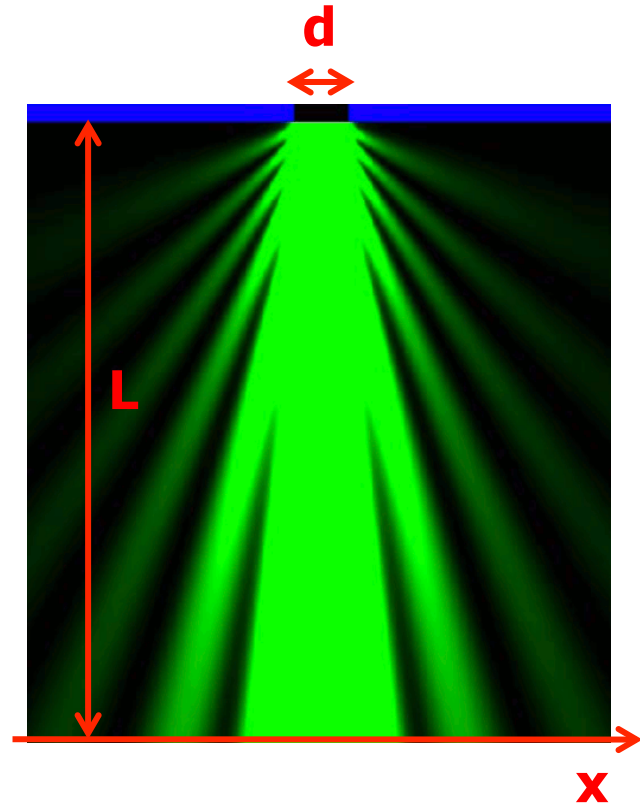


$a = 500\text{nm}, \lambda = 500\text{nm}$



Fenda Simples

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

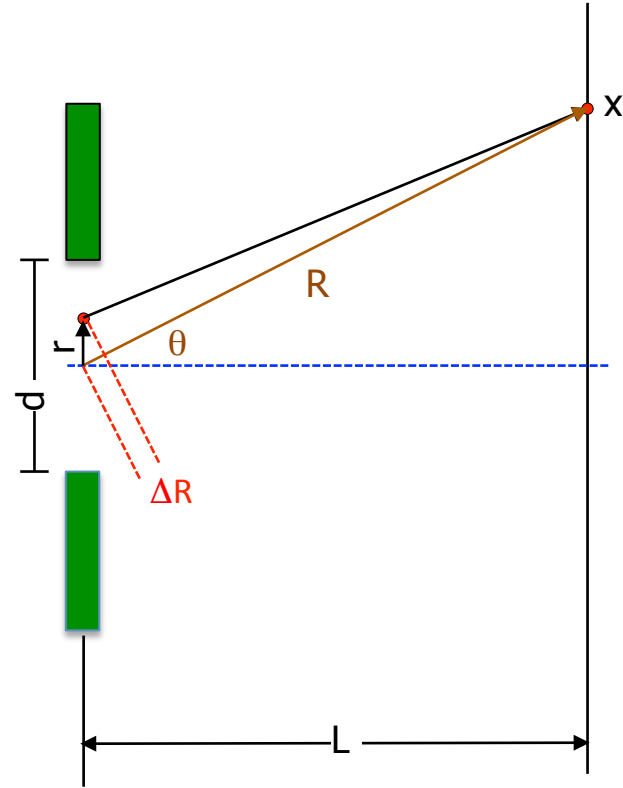


Fenda Simples

- **Cada ponto** da fenda é uma fonte pontual.
- Para o ponto em r , no instante t , a intensidade da onda no ponto x vale:

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

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

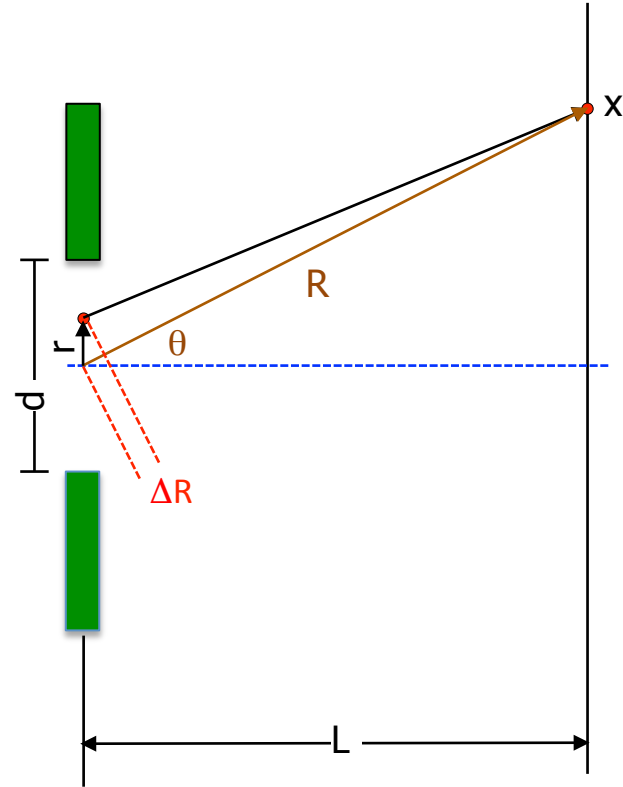


Fenda Simples

- Precisamos somar todos os pedaços:

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

$\sin(A + \beta) - \sin(A - \beta)$



Fenda Simples: **Intensidade**

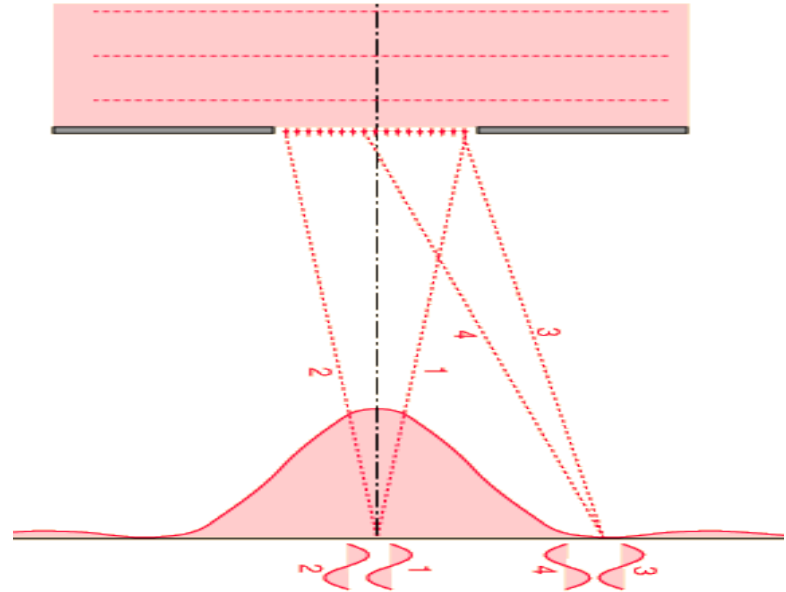
- A intensidade vale portanto:

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

- Que apresenta mínimos quando:

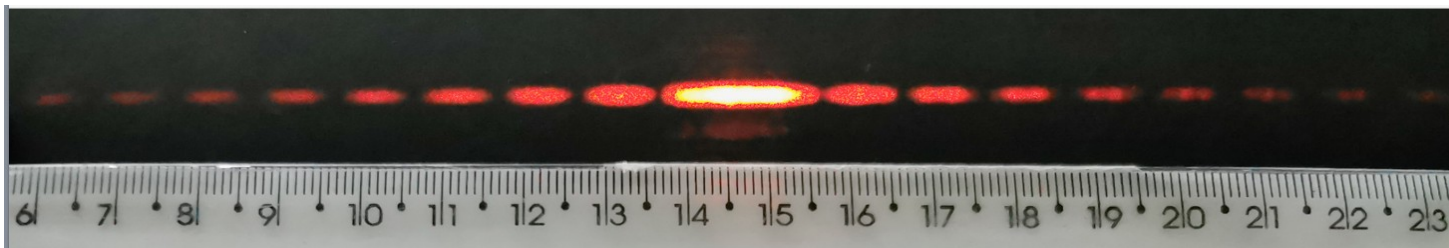
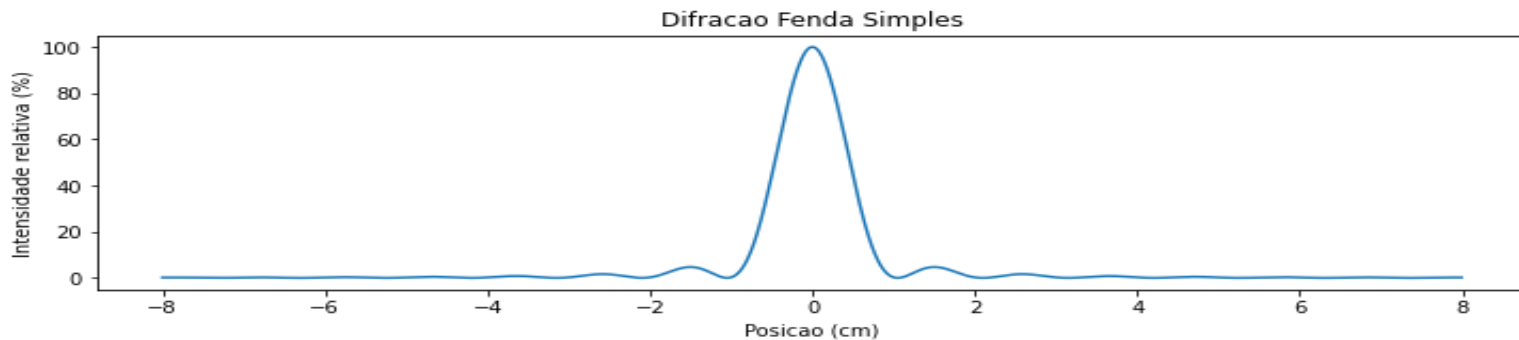
$$\beta = \pm m\pi, m = 1, 2, 3, \dots$$

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



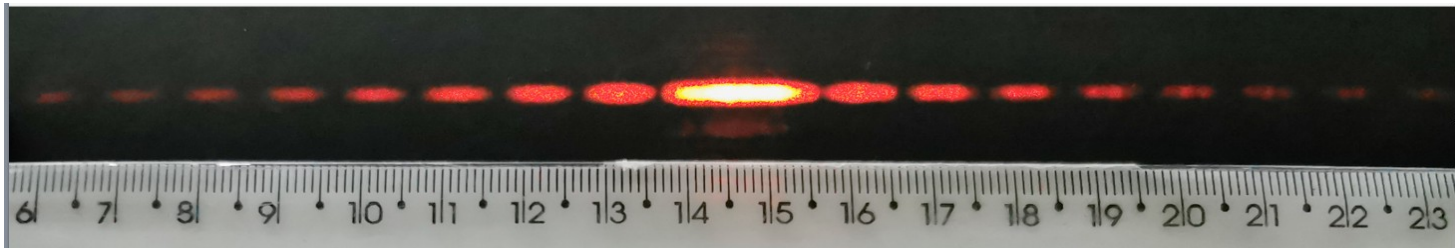
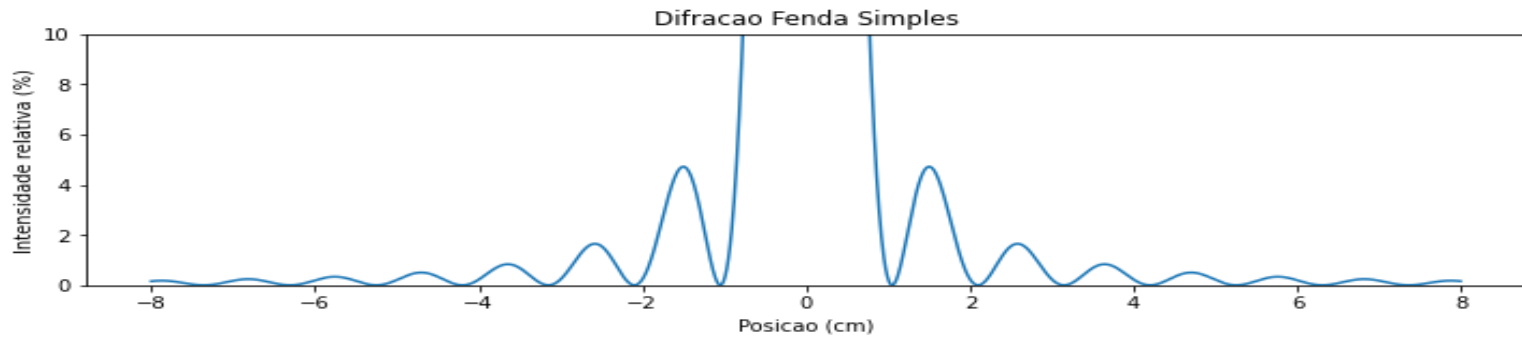
Fenda Simples: **Intensidade**

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



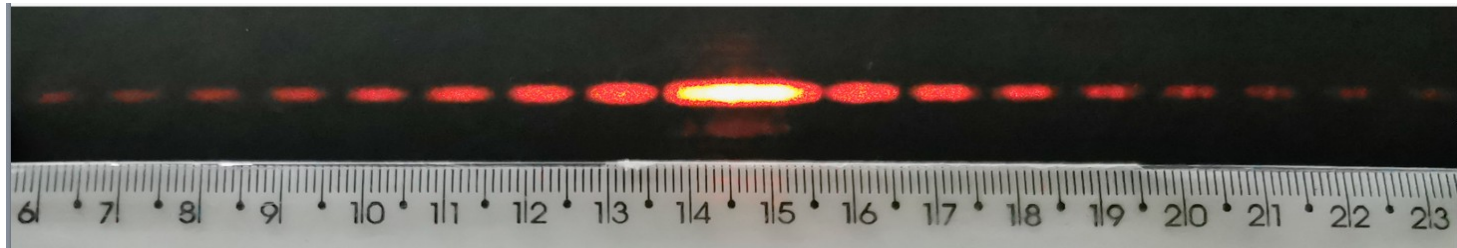
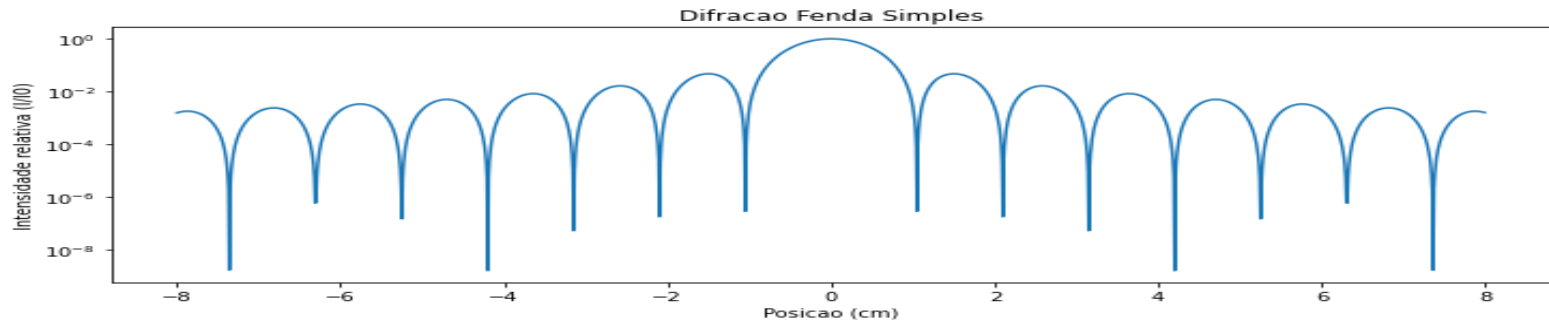
Fenda Simples: **Intensidade**

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



Fenda Simples: **Intensidade**

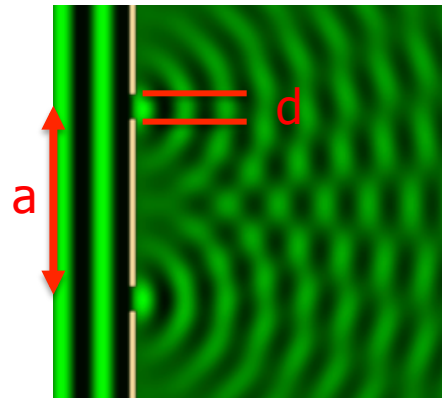
$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2, \quad \beta = \pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta$$



Fenda Dupla REAL

- Vamos considerar que cada fenda tem largura d (não pontual) e estão paradas de a .
- Além da difração em cada fenda separadamente, temos a interferência entre as duas fendas, portanto:

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

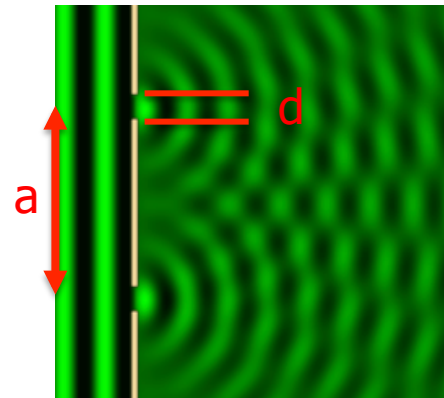


Fenda Dupla REAL

- Difração e Interferência:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \alpha$$

$$\beta = \pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \quad \alpha = \pi \frac{a}{\lambda} \sin \theta$$

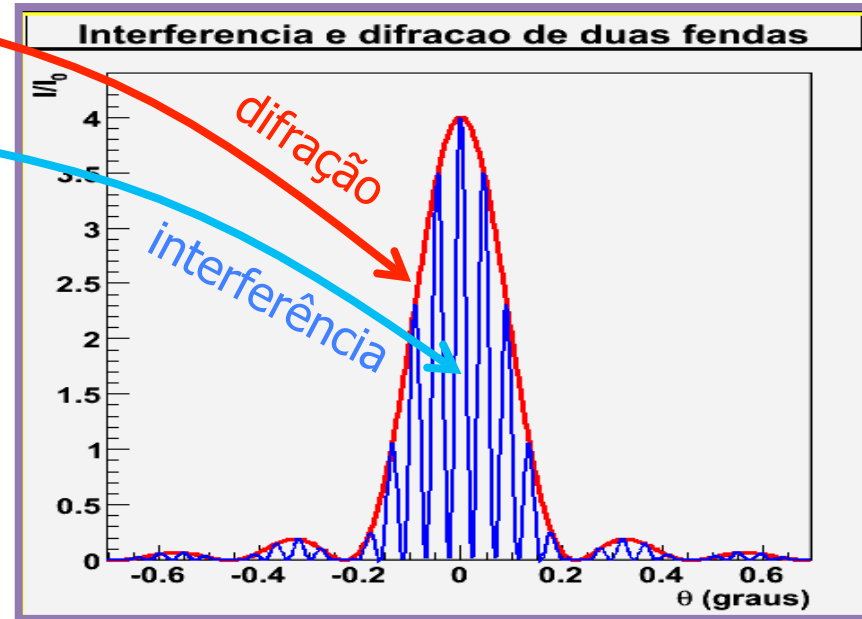


Fenda Dupla REAL

- Difração e Interferência:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \alpha$$

$$\beta = \pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \quad \alpha = \pi \frac{a}{\lambda} \sin \theta$$



Fenda Dupla REAL

- Difração e Interferência:

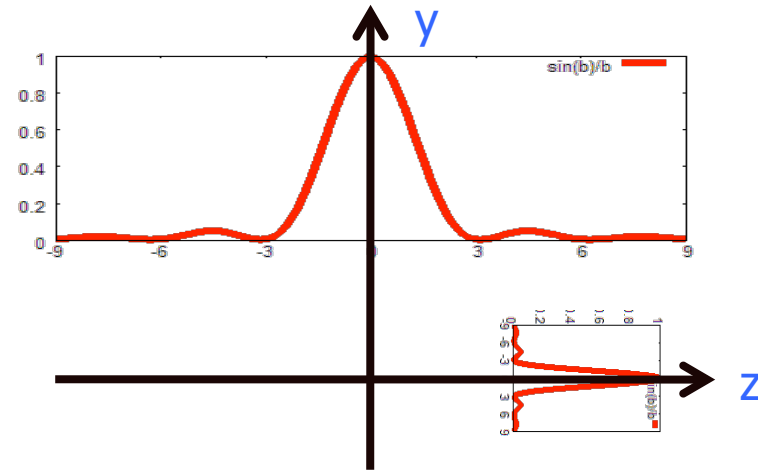
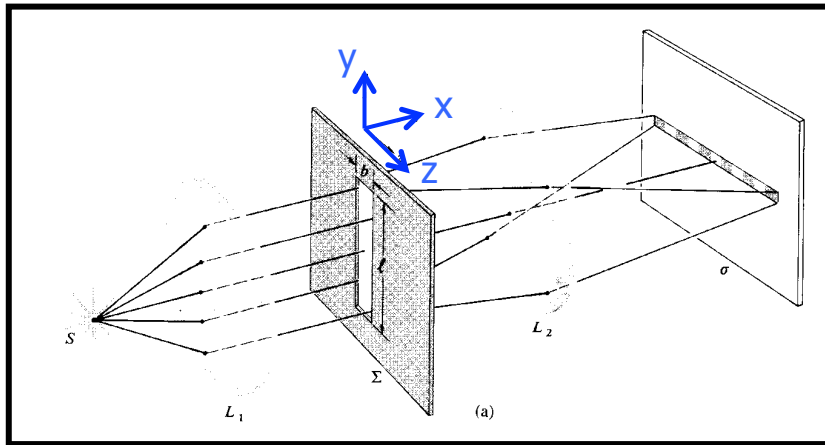


$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \alpha$$

O que é este padrão na vertical ??

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 $d \sim \lambda$.



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.

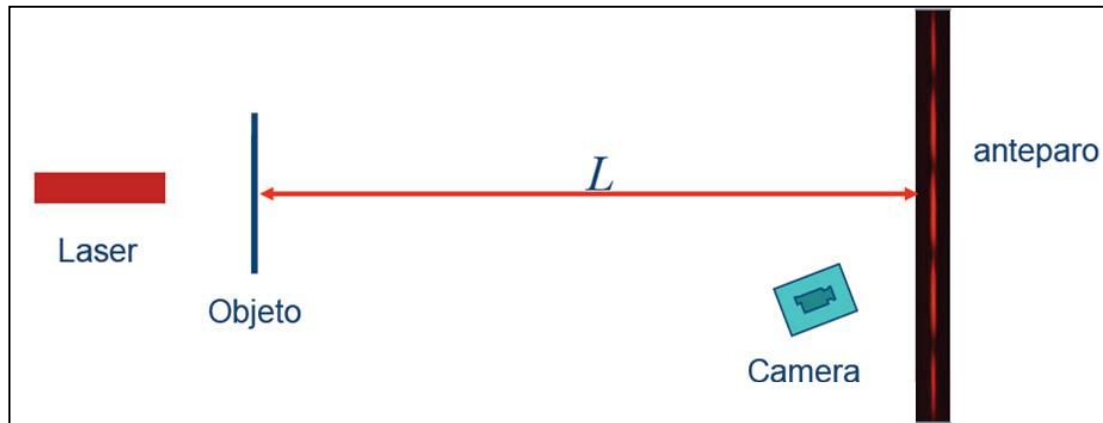
Nos dois casos, é preciso conhecer a **distância entre as fendas e o anteparo** e que as condições para a ocorrência da **difração de Fraunhofer estejam satisfeitas**.

Atividades

- Estudar, quantitativamente, a figura de difração de uma fenda simples, uma fenda dupla ~~e da rede de difração~~

Como obter as figuras de difração

- Montagem: laser + objeto + anteparo
- O anteparo é colocado a uma distância conhecida para observar as figuras de interferência e difração

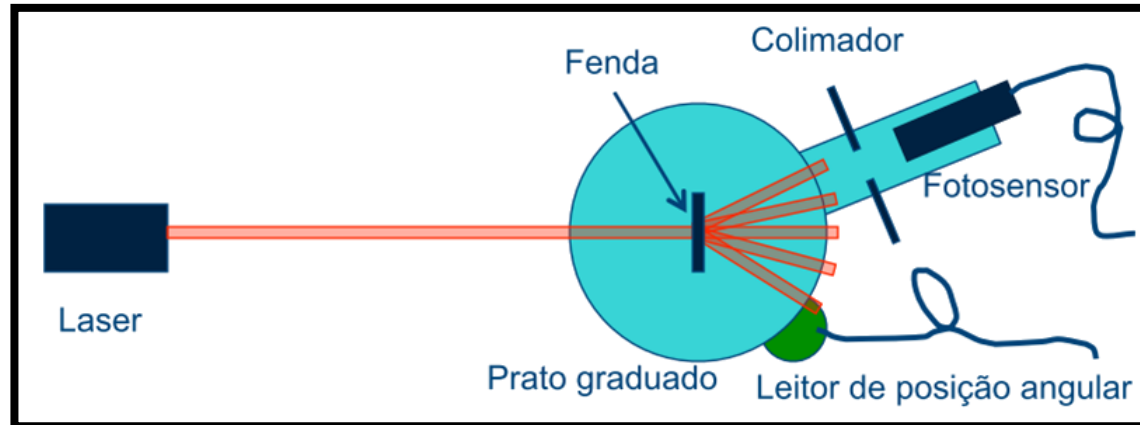


Análise das figuras de difração

- Para uma fenda simples e uma fenda dupla
 - Observe os fenômenos de interferência e difração
 - Meça as posições de mínimo de interferência e difração
 - Alguns acham melhor medir os máximos
 - Faça a análise apropriada e determine as dimensões das fendas
 - Compare com os valores nominais
- ~~Para a rede de difração, meça as posições de máximo de interferência e determine a densidade de fios da rede~~

Espectrofotômetro

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





laser

Sensor
de luz
















Slide com a
fenda

Ver a descrição completa do aparato, e
como fazer a medida com ele no
material desta semana.

Intensidade da difração

- Meça a intensidade x ângulo para a figura de difração da fenda simples utilizando o espectrofotômetro.
- Faça o ajuste não linear da função teórica aos dados experimentais.
 - Como se compara o ajuste e a função teórica? Descreva eventuais discrepâncias, e tente explicá-las.
- A partir do ajuste, obtenha a largura da fenda
 - Compare com os valores nominais e discuta.

Para a nossa AT2

Atividade 1 - Estudo da intensidade de difração em fendas simples	Atividade 2 - Estudo de difração e interferência em fendas simples
 Slides sobre a atividade 1	 Slides sobre a atividade 2 
 Guia uso do Espectrofotometro 2021	 Vídeo de demonstração da Atividade 2 
 Video demonstrando a aquisição dos dados com o Espectrofotômetro	 Resumo dos resultados da Atividade 2 
 Dados do Espectrofotometro, Difracao com fenda simples	 Imagens das medidas da Atividade 2 
 Síntese da Atividade 1 do Experimento 2	 Síntese da Atividade 2 do Experimento 2 

Apenas enviem a síntese por aqui...

Na nossa pasta

Aula com os pedidos:

- [EXP2_CompOptico_Aula_02_2021.pdf](#) ✓

Dados:

- [EXP2_CompOptico_Aula_02_2021_Espectrofotometro.pdf](#) ✓