

4302214 - Física Experimental IV (2022)

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=100499>

Aula introdutória à atividade IV

Profa. Nathália Tomazio

ntomazio@if.usp.br

Sala 214 - BJ

Objetivos gerais da atividade IV

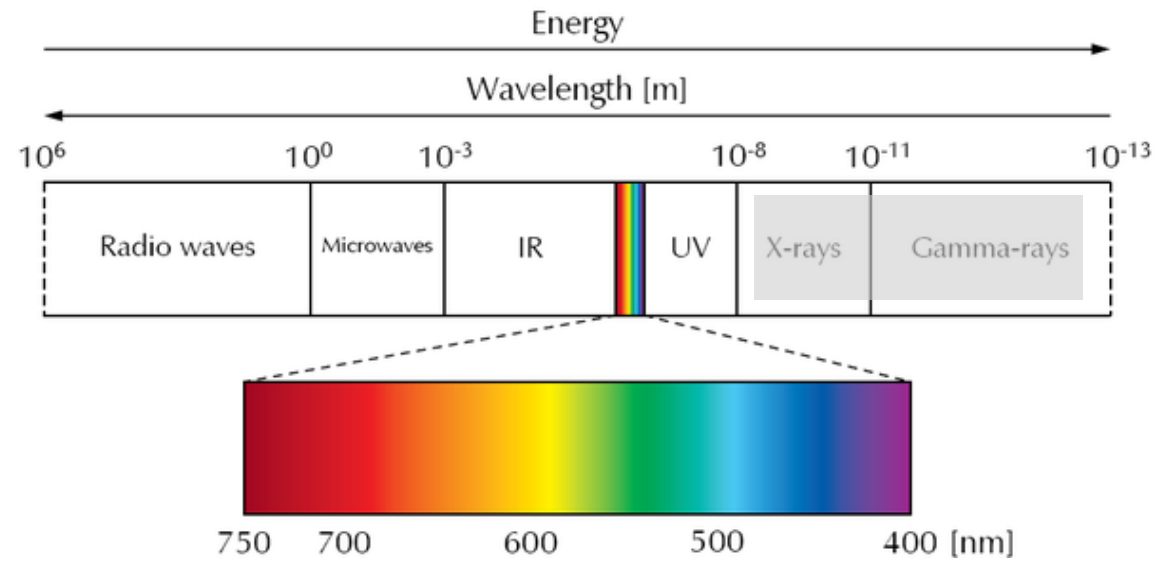
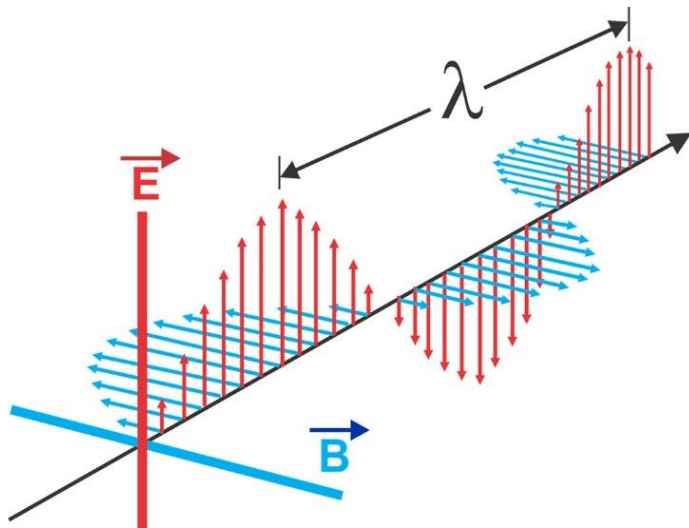
- Familiarizar-se com o fenômeno de interferência e difração.
- Determinar as dimensões e separações entre as fendas e a densidade de linhas da rede de difração.

A natureza da luz

- O estudo de trajetórias de raios luminosos, em geral, é bem descrito pela óptica geométrica (lentes, espelhos, etc)
- Durante muito tempo a teoria de Newton para a luz foi bem aceita
- Experimentos de Young e Fresnel, no início dos anos de 1800, revelaram os efeitos de interferência e difração da luz

A natureza da luz no começo do século XIX

- Maxwell: teoria eletromagnética da luz
- Luz → onda eletromagnética

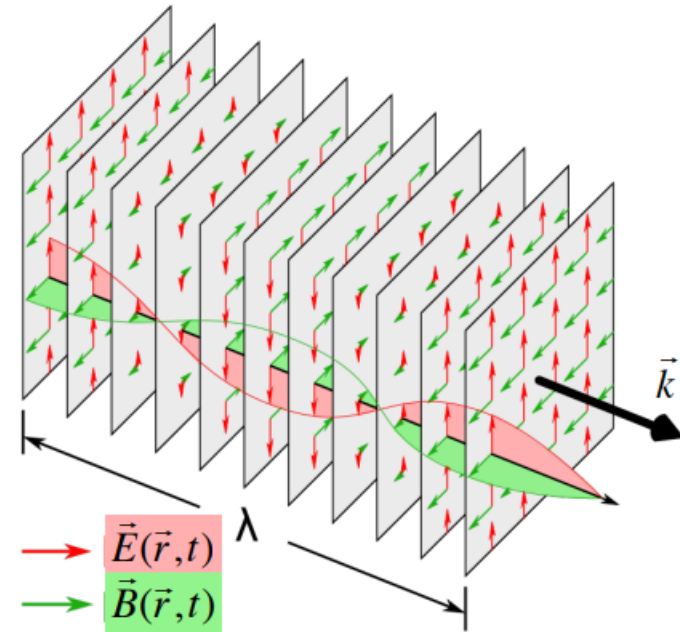


- ✓ Onda transversal: campos $\vec{E}$, $\vec{B}$ oscilantes perpendiculares entre si e perpendiculares a direção de propagação
- ✓ Velocidade da luz: c (3×10^8 m/s)

Onda Plana

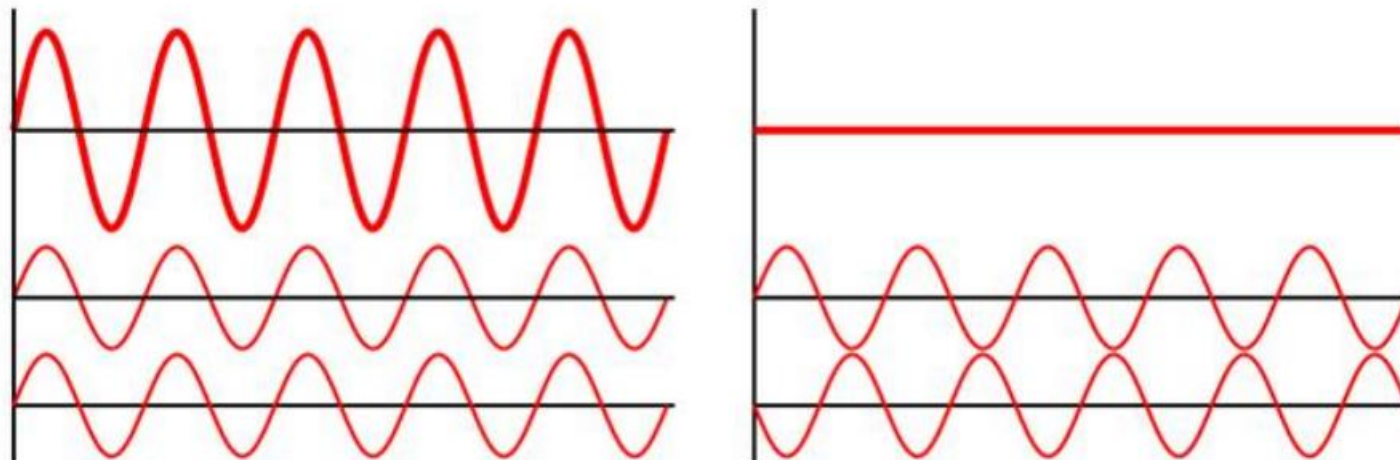
- Um onda E.M. plana é uma idealização, onde o campo $\mathbf{E}$ é constante em qualquer plano perpendicular a direção de propagação.
- Podemos representá-la assim:

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

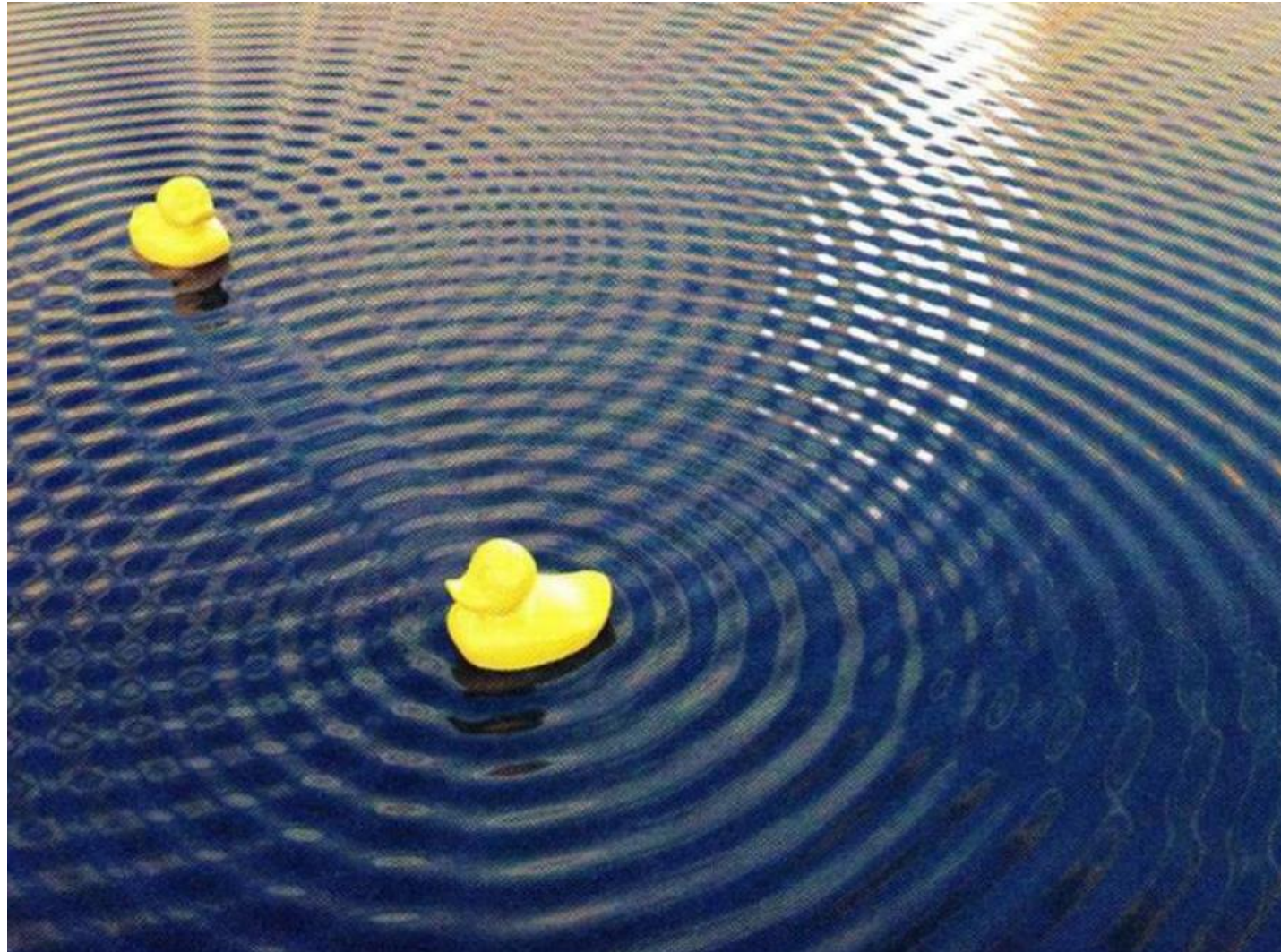


Princípio de superposição

- O princípio de superposição de ondas
 - ▶ Amplitudes se somam ponto a ponto
 - ★ Interferência
- Interferência construtiva ou destrutiva



Interferência



Difração

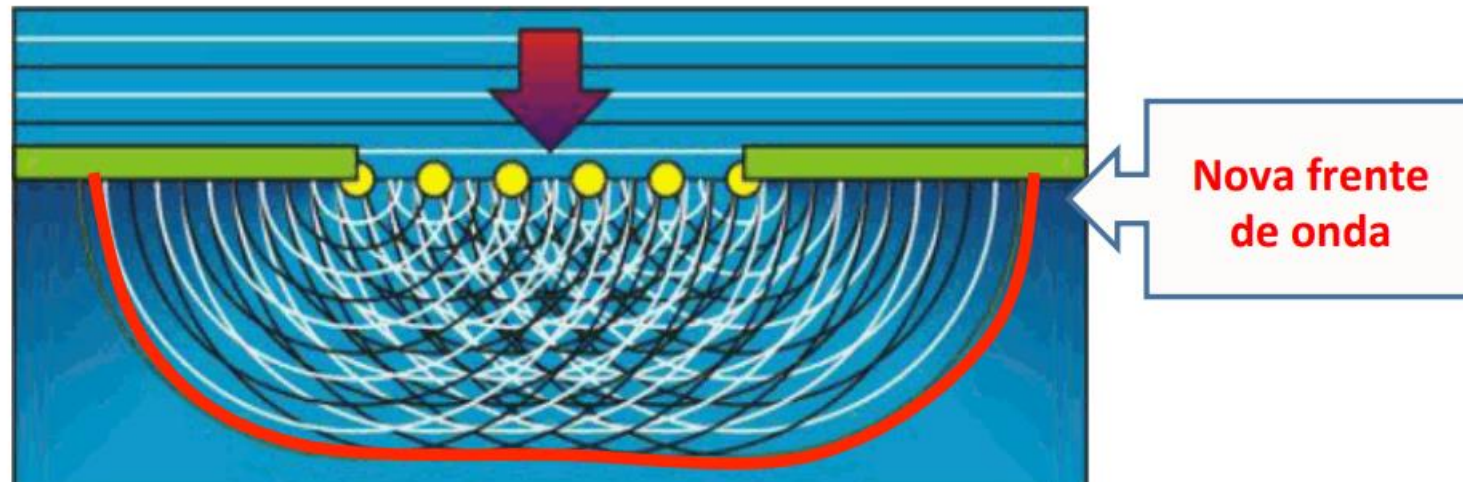
- Fenômeno comum com todos os tipos de ondas
- Desvio sofrido por uma onda ao se deparar com um obstáculo de dimensões similares ao comprimento de onda.
 - Se a dimensão do objeto for muito maior (ou menor) que o comprimento de onda, não ocorre difração.

Difração

Princípio de Huygens-Fresnel

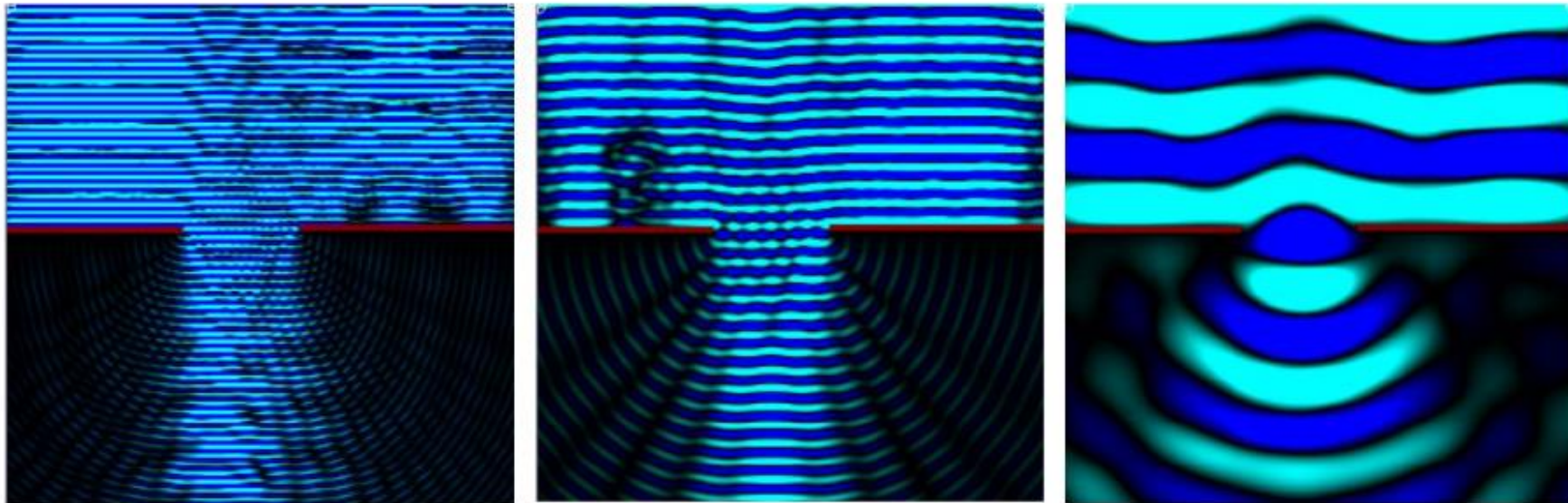
Cada ponto de uma frente de onda (não obstruído) funciona como uma fonte (secundária) puntiforme esférica. – **Huygens**

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



Difração

- Ondas de comprimento muito menor que as dimensões do obstáculo sofrem pouca difração



Difração

Difração de Fraunhofer e de Fresnel

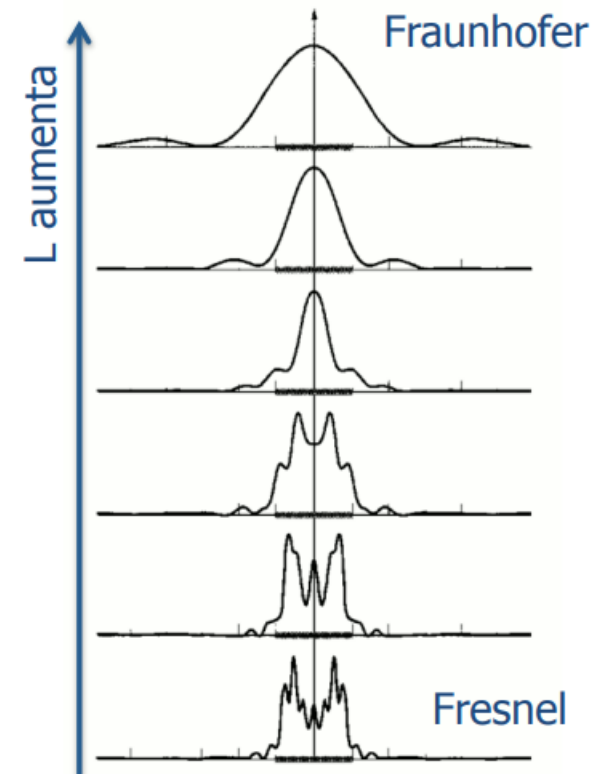
Se anteparo está **longe da fenda**, o princípio de Huygens-Fresnel funciona bem. Essa é a **difração de Fraunhofer** ou **difração de campo distante**.

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)

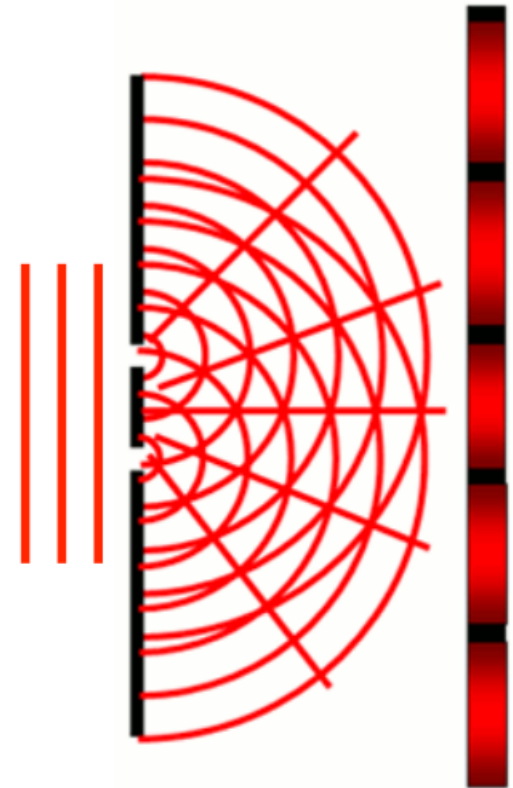
$$F = \frac{d^2}{\lambda L}$$



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:

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



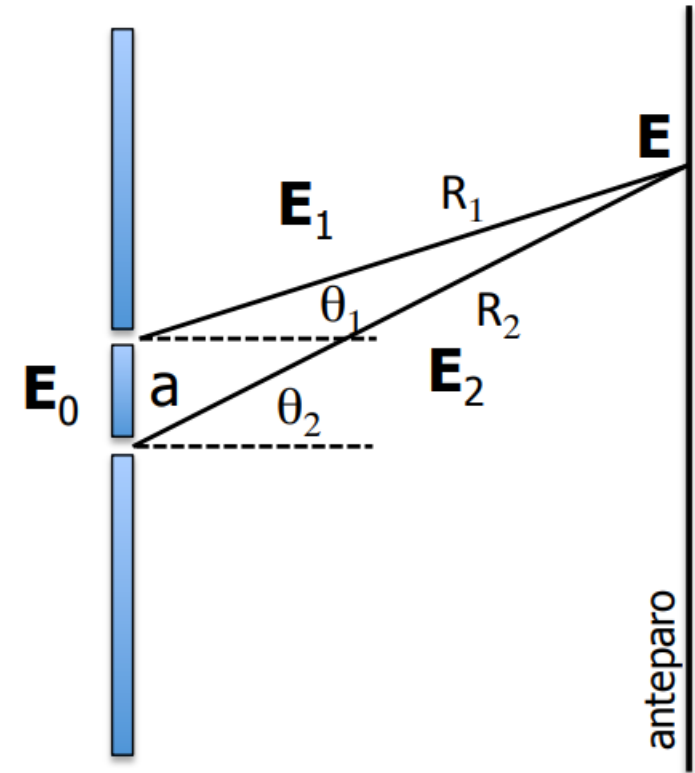
(resourcefulphysics.org)

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 $\sim 1/R^2$
 - $|\mathbf{E}| \sim 1/R$



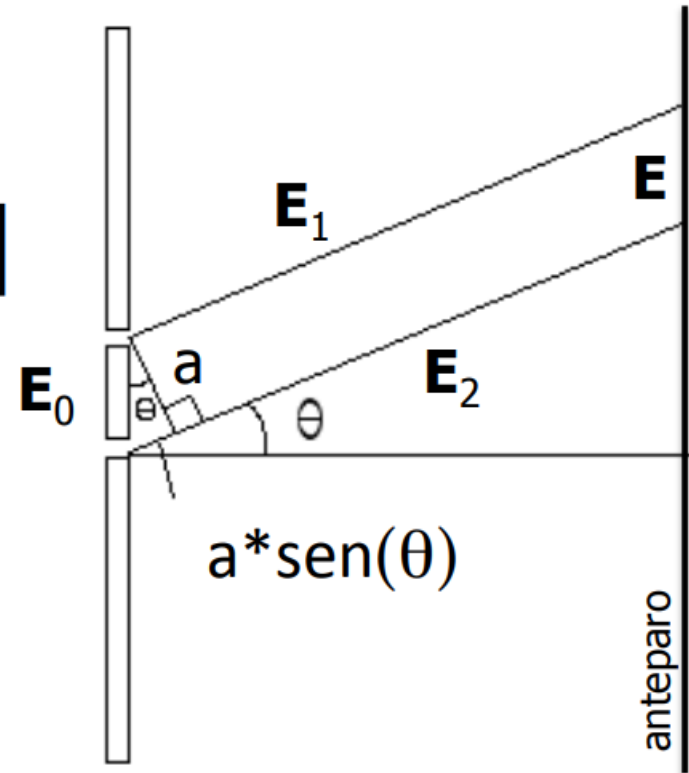
Duas fendas ideais

- 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

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



Intensidade

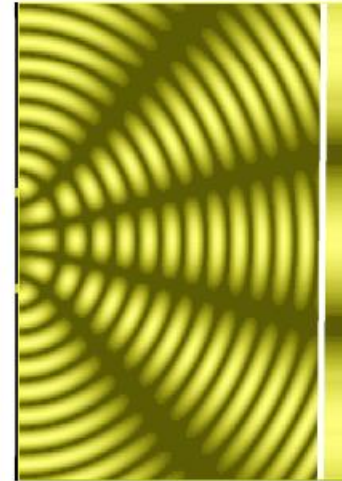
Irradiância (I) é a energia média emitida por unidade de área, por unidade de tempo. É proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico da onda E.M..

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

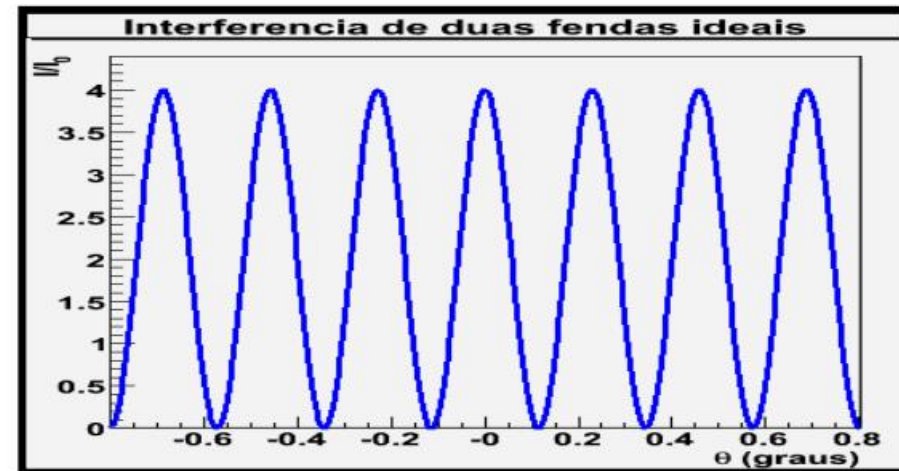
- Portanto:

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



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

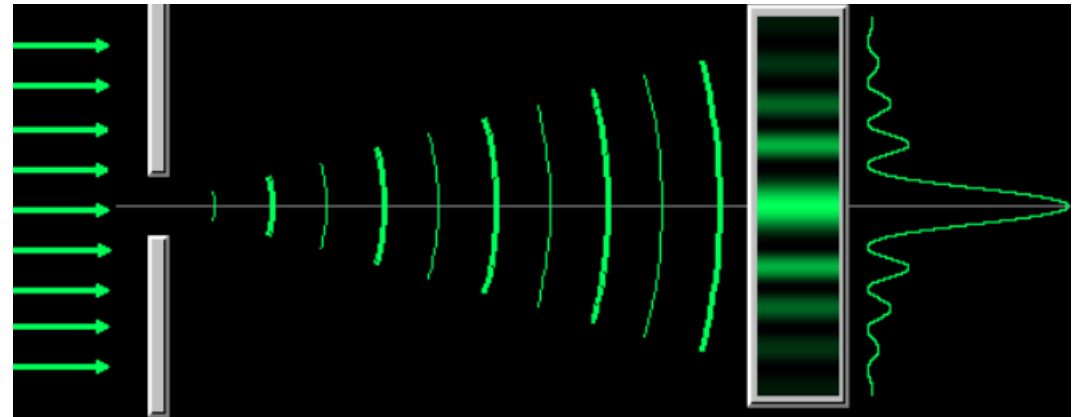
$$\alpha = \frac{\delta}{2} = \pi \frac{a}{\lambda} \sin \theta, \quad I_0 = 4 \frac{E_0^2}{R^2}$$



- Obter a posição dos máximos e mínimos de intensidade

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 ?*

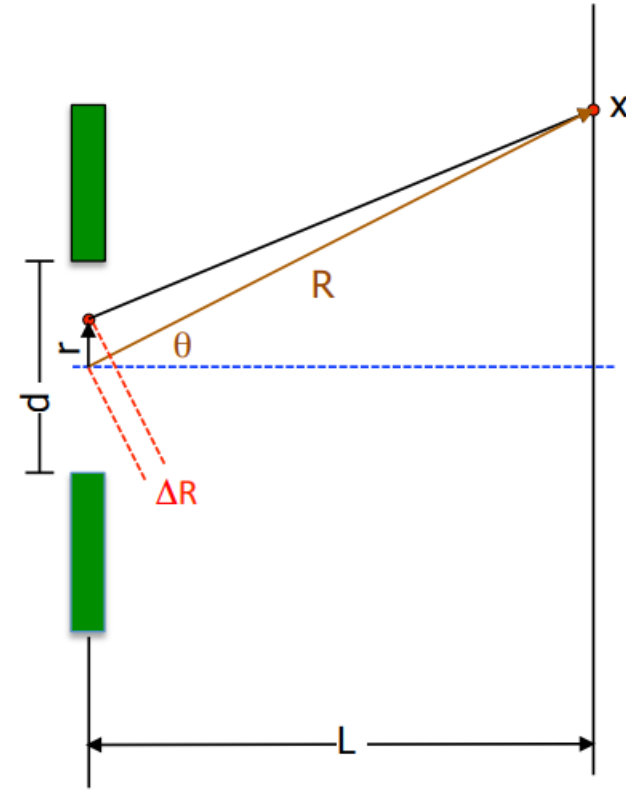


Fenda Simples

- **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

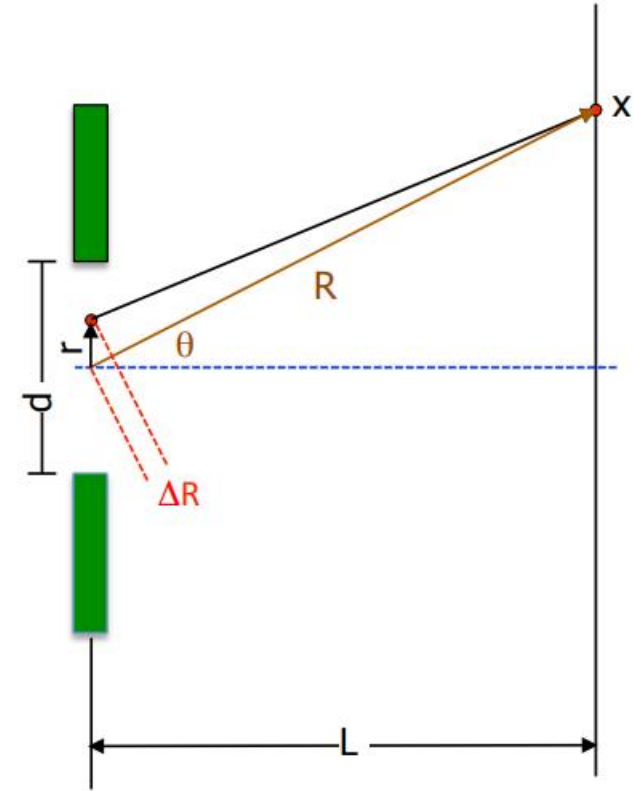
- Precisamos somar todos os pedaços:

$$\vec{E}(x) = \int_{-d/2}^{d/2} \vec{E}(r) dr$$

$$\propto \left[\frac{\sin(kR - \omega t + kr \sin \theta)}{k \sin \theta} \right]_{-d/2}^{d/2}$$

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

$$\propto \frac{\sin(\beta)}{\beta}, \text{ onde: } \beta = k \frac{d}{2} \sin \theta$$



Fenda Simples: **Intensidade**

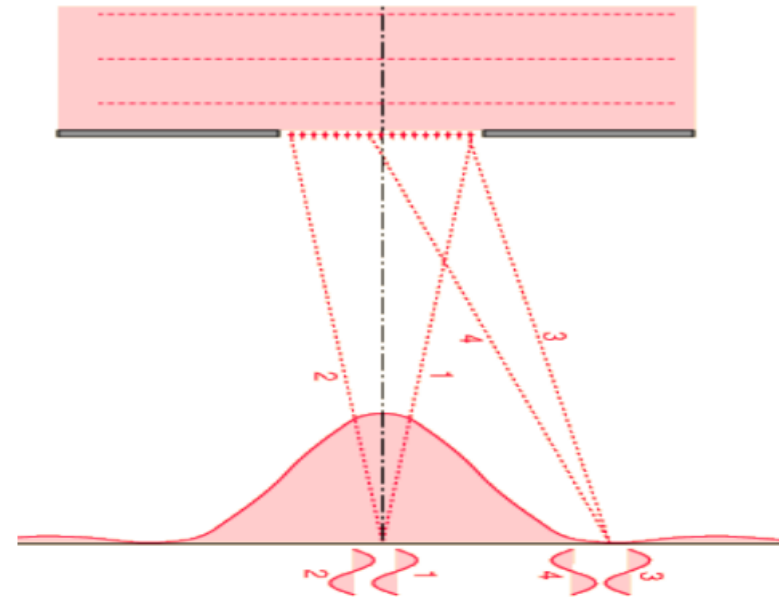
- A intensidade vale portanto:

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

- Que apresenta mínimos quando:

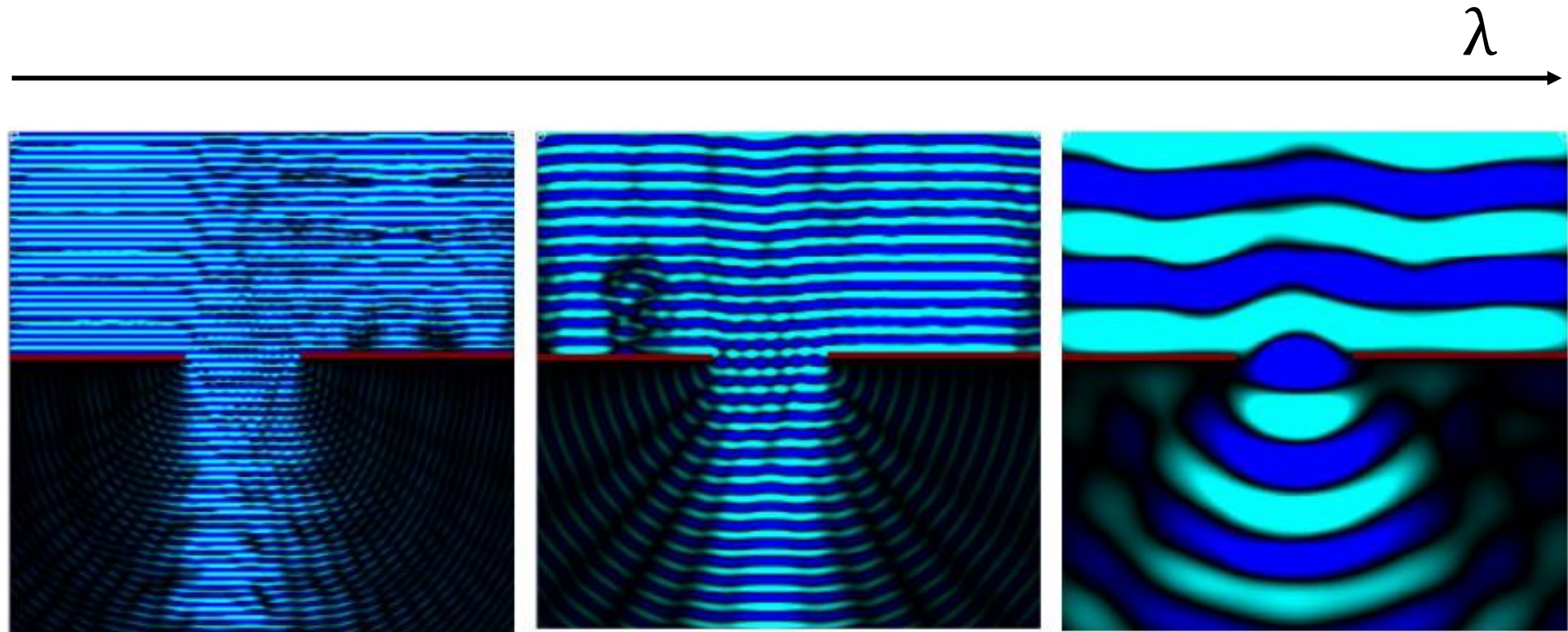
$$\beta = \pm m\pi, m = 1, 2, 3, \dots$$

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



- Determinar a distância entre mínimos consecutivos
- Discutir regimes de difração para comp. de onda pequeno e grande

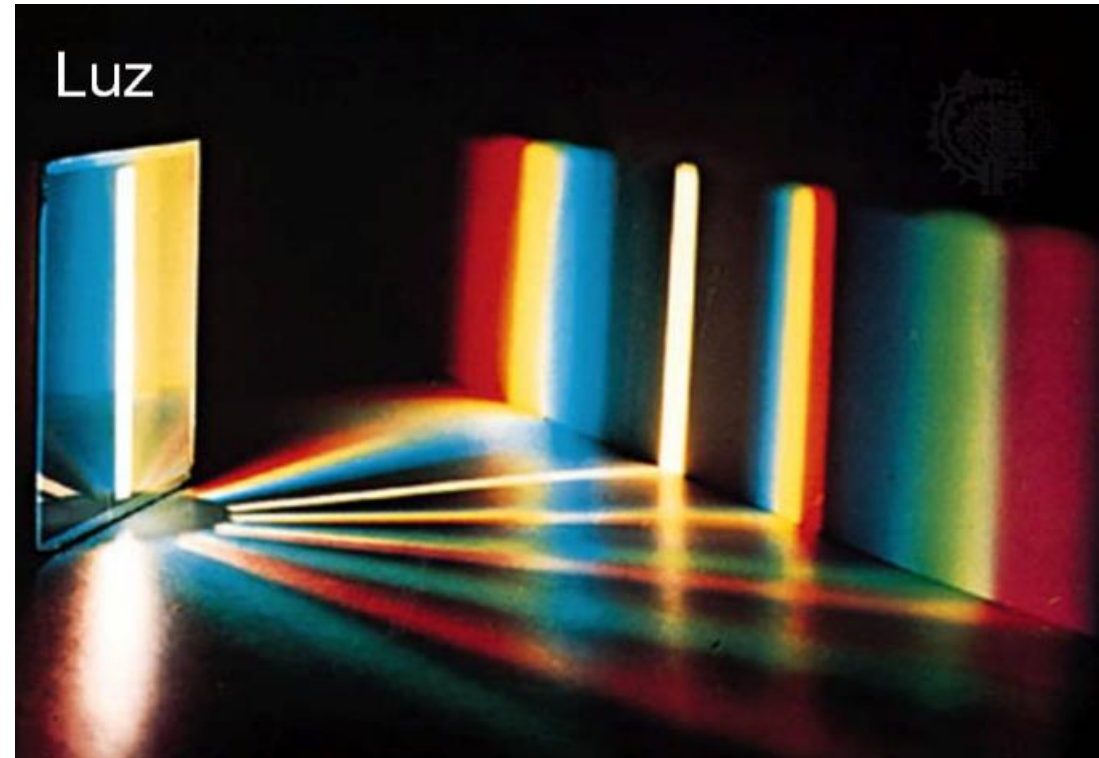
Dependência com o comp. de onda da luz



Dependência com o comp. de onda da luz

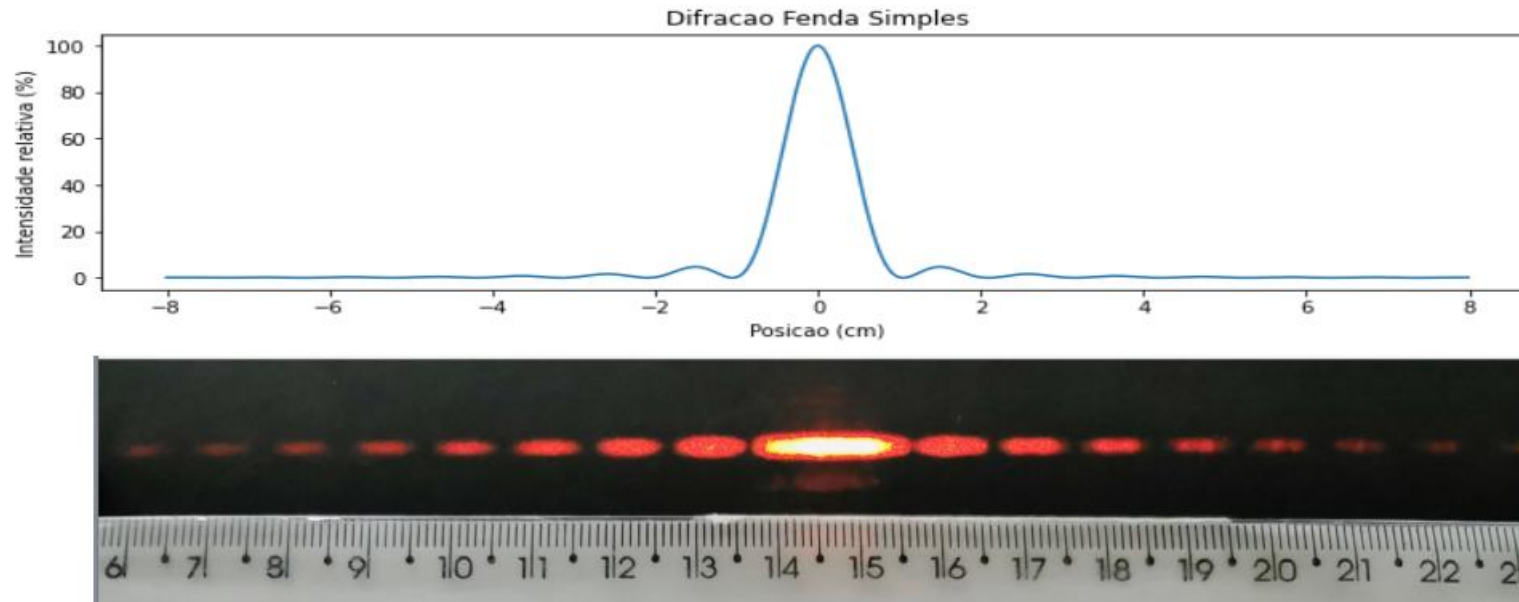
$$\beta = \pm m\pi, m = 1, 2, 3, \dots$$

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



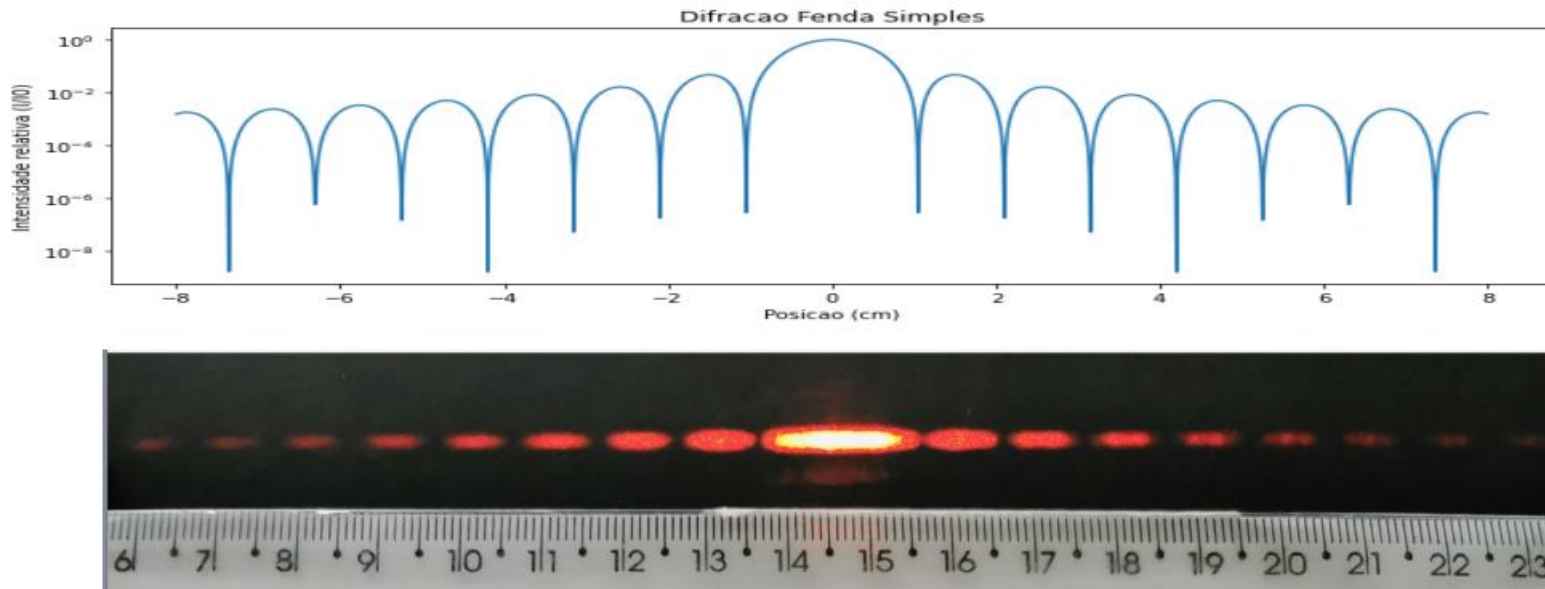
Fenda Simples: **Intensidade**

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



Fenda Simples: **Intensidade**

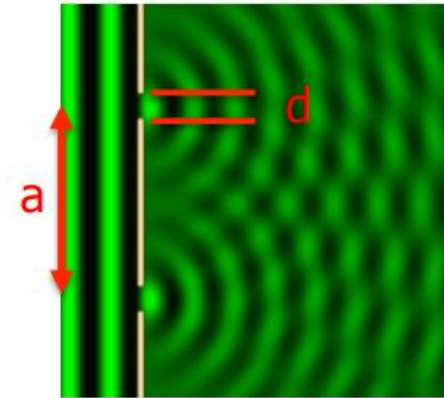
$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2, \quad \beta = \pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta$$



Fenda 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:

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

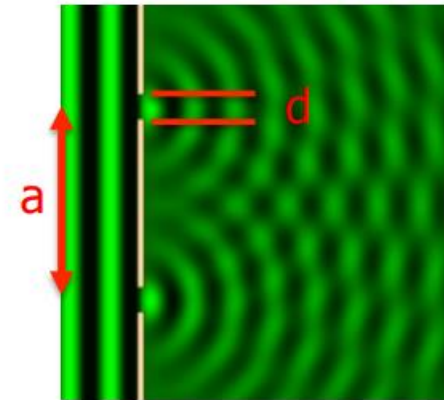


Fenda Dupla REAL

- Difração e Interferência:

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

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

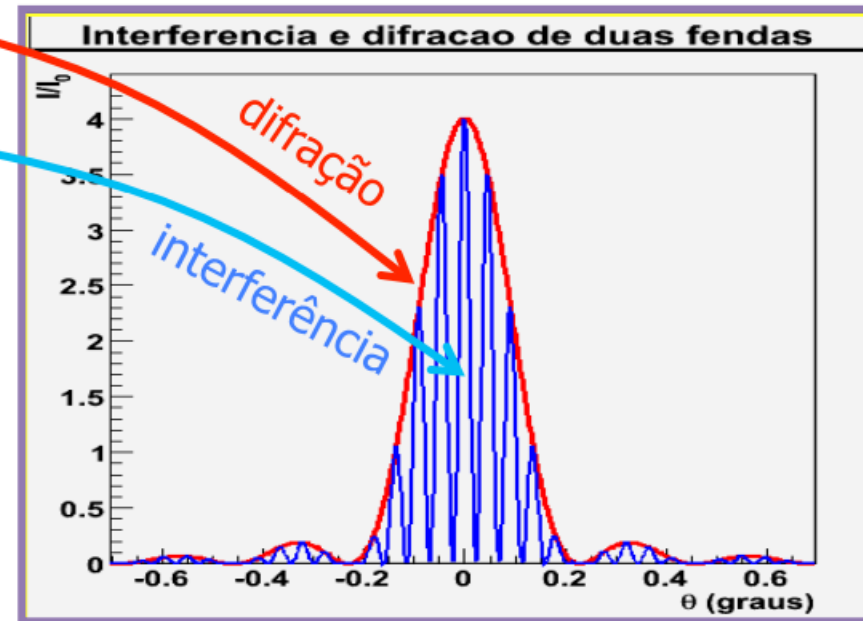


Fenda Dupla REAL

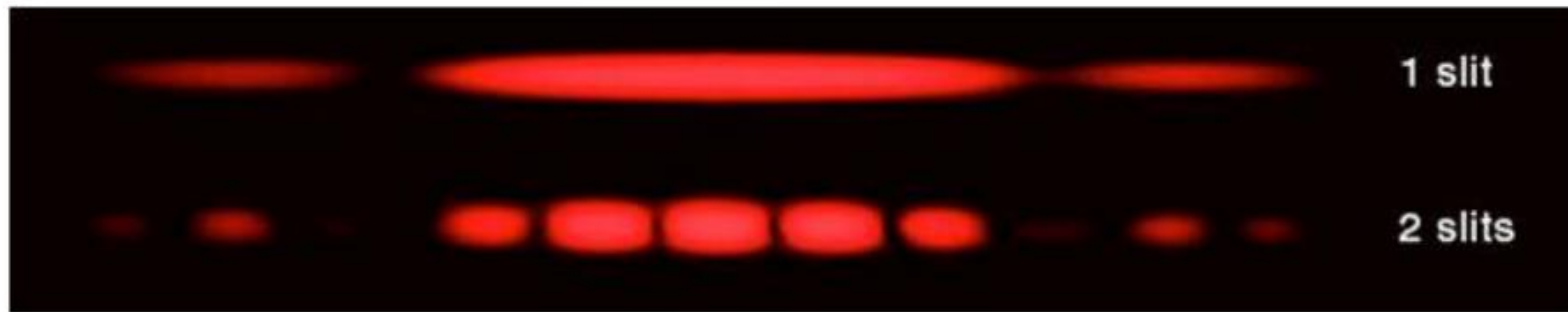
- Difração e Interferência:

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

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



Fenda Dupla REAL



Muitas fendas separadas – grade de difração

- Na medida em que aumentamos o número de fendas, os máximos ficam bem localizados
- Rede de difração
 - ▶ Muitas fendas igualmente espaçadas
 - ▶ Máximos em:

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

- ▶ d = distância entre as linhas

