

# Física Experimental IV

Segundo semestre de 2019

## Aula 3 - Experimento I - semana 3

Página da disciplina:

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=70354>

27 de agosto de 2019

# Experimento I - Experiencias básicas de óptica



## 1 Ótica ondulatória

- Interferência
- Difração

## 2 Experimento

- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- Fenda dupla
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

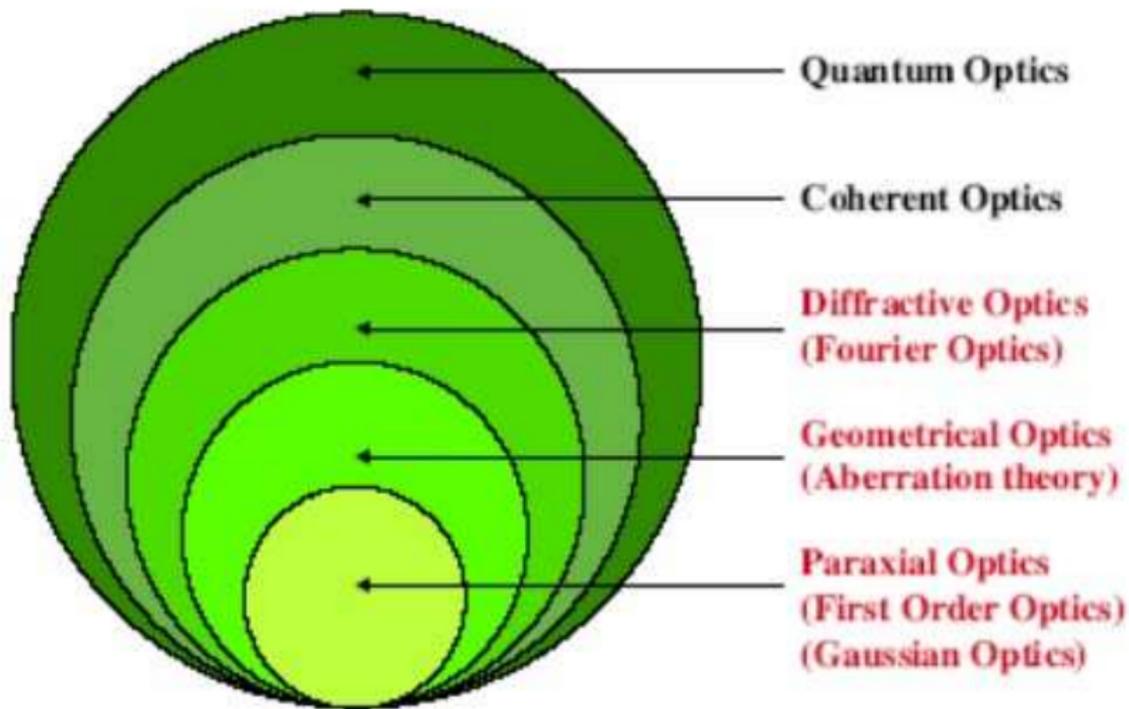
## 1 Ótica ondulatória

- Interferência
- Difração

## 2 Experimento

- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- Fenda dupla
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

## *Hierarchy of Optical Theories*

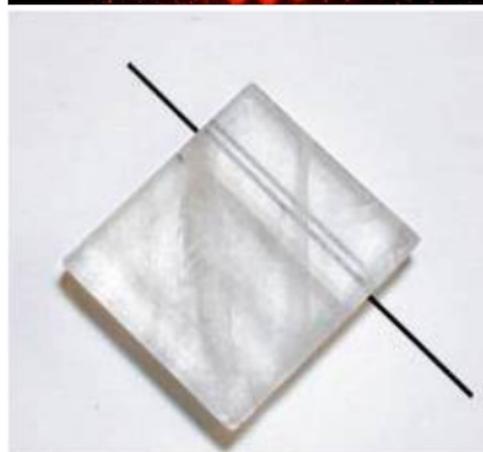
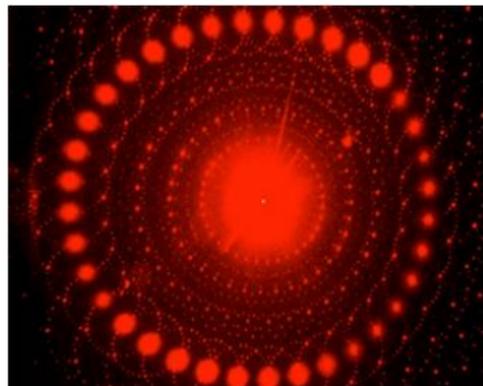


# A natureza da luz

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

# A natureza da luz

- Interferência e difração
  - ▶ A luz se comporta como uma onda
- Que tipo de onda?
  - ▶ A observação de fenômenos de polarização indicam que a luz é uma onda transversal
    - ★ Erasmus Bartholin, 1669 – Calcita
    - ★ Thomas Young e Augustin-Jean Fresnel – duas componentes com diferentes velocidades
- Os estudos de Maxwell (1864)
  - ▶ A luz é uma onda eletromagnética



## 1 Ótica ondulatória

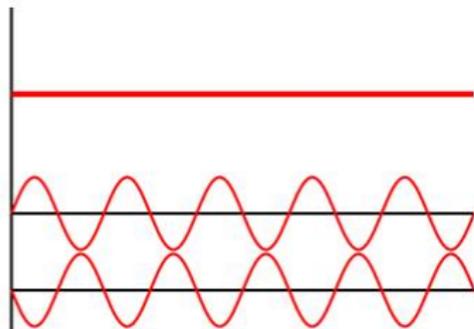
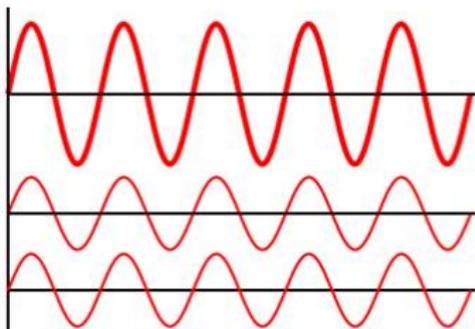
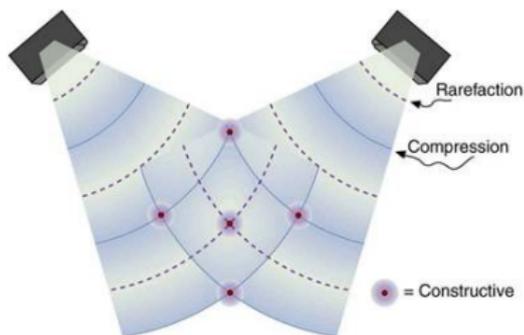
- Interferência
- Difração

## 2 Experimento

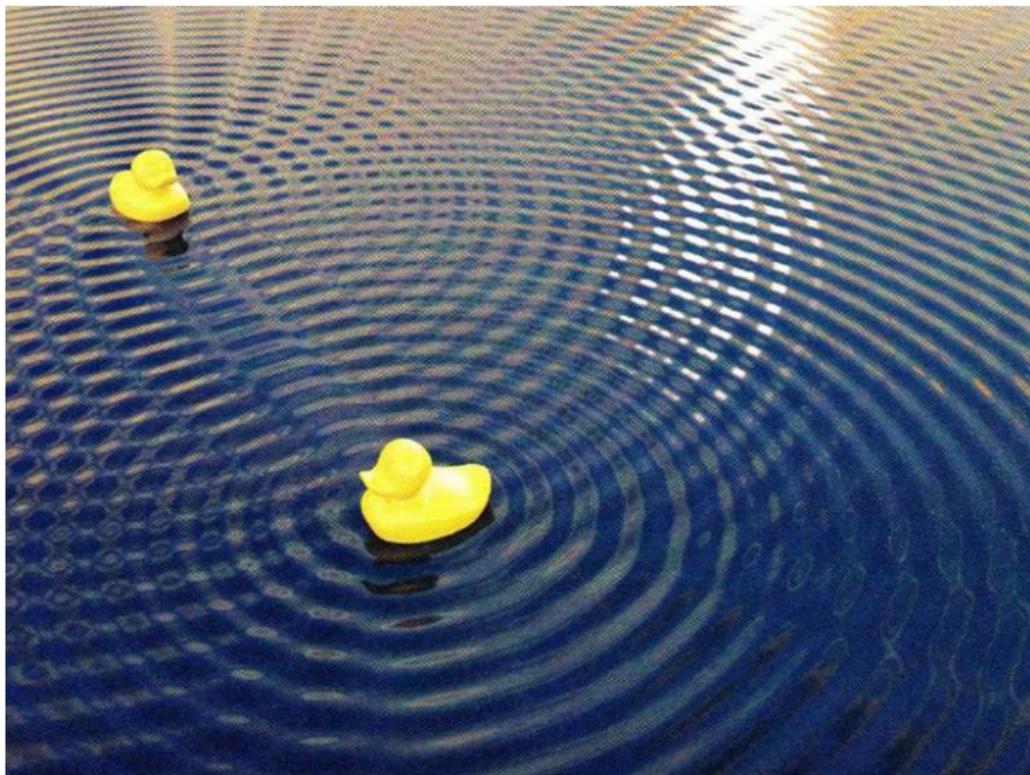
- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- Fenda dupla
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

# Interferência

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



# Interferência



## 1 Ótica ondulatória

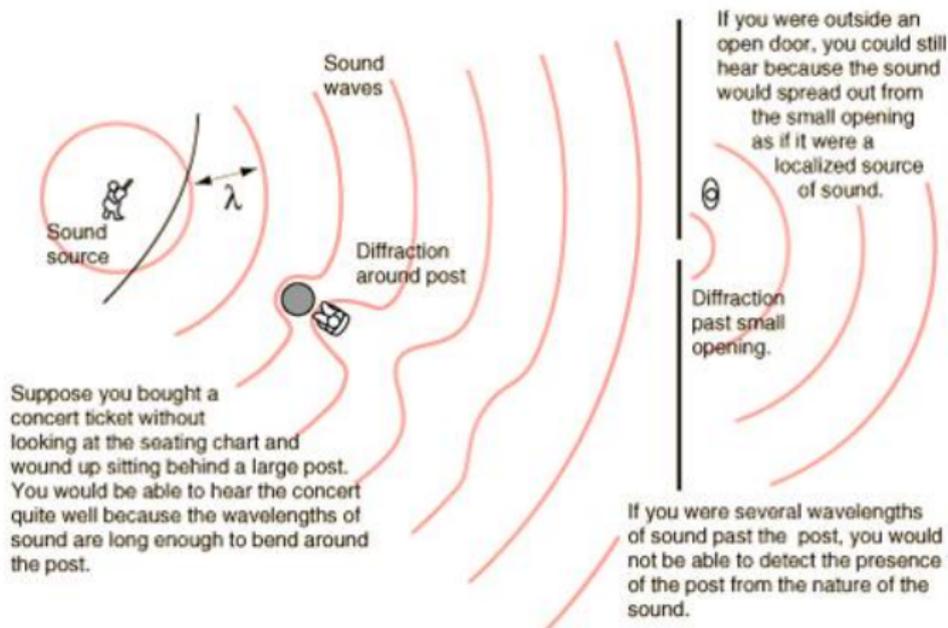
- Interferência
- Difração

## 2 Experimento

- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- Fenda dupla
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

# Difração

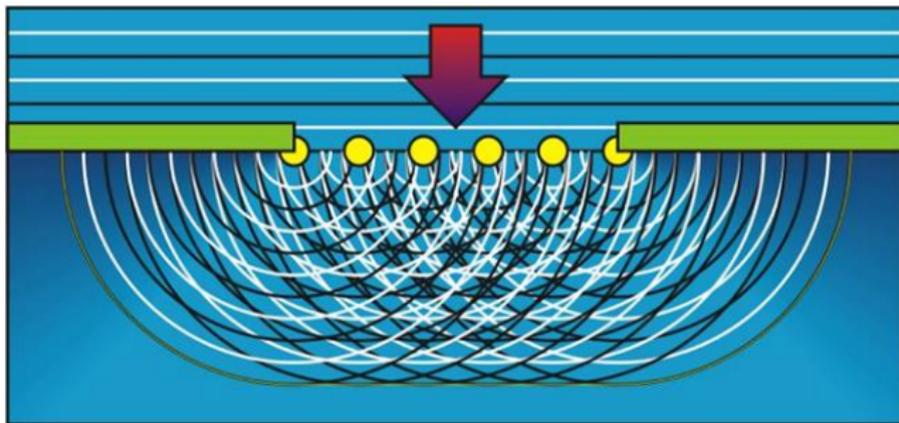
- Como um espectador, atrás de uma porta, por exemplo, é capaz de ouvir um som mas não é capaz de enxergar a pessoa falando?



# Explicando o fenômeno da difração

- Princípio de Huygens-Fresnel

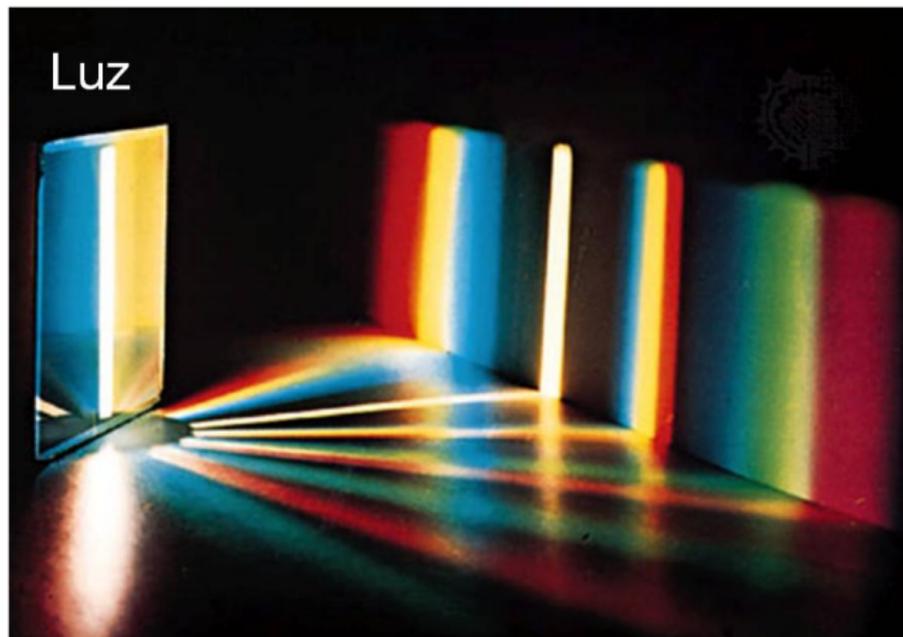
- ▶ Cada ponto de uma frente de onda (não obstruído) funciona como uma fonte emissora puntiforme esférica
- ▶ A onda resultante consiste da superposição de todas as ondas esféricas, levando em consideração a fase entre elas

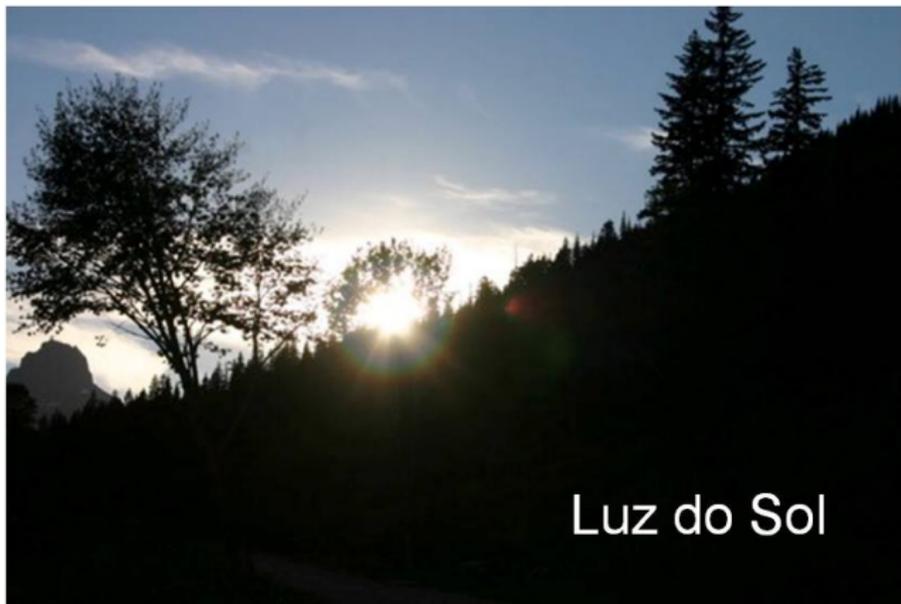


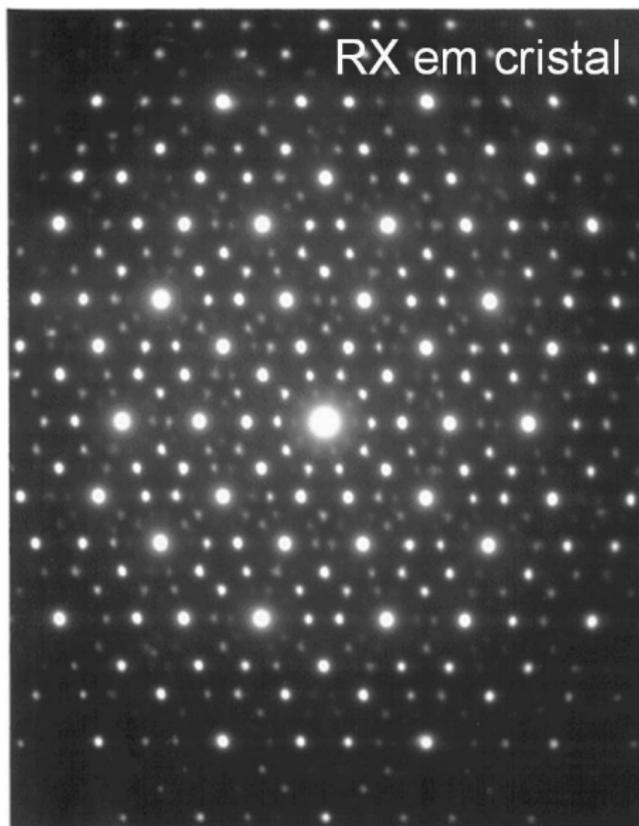
# Difração na natureza



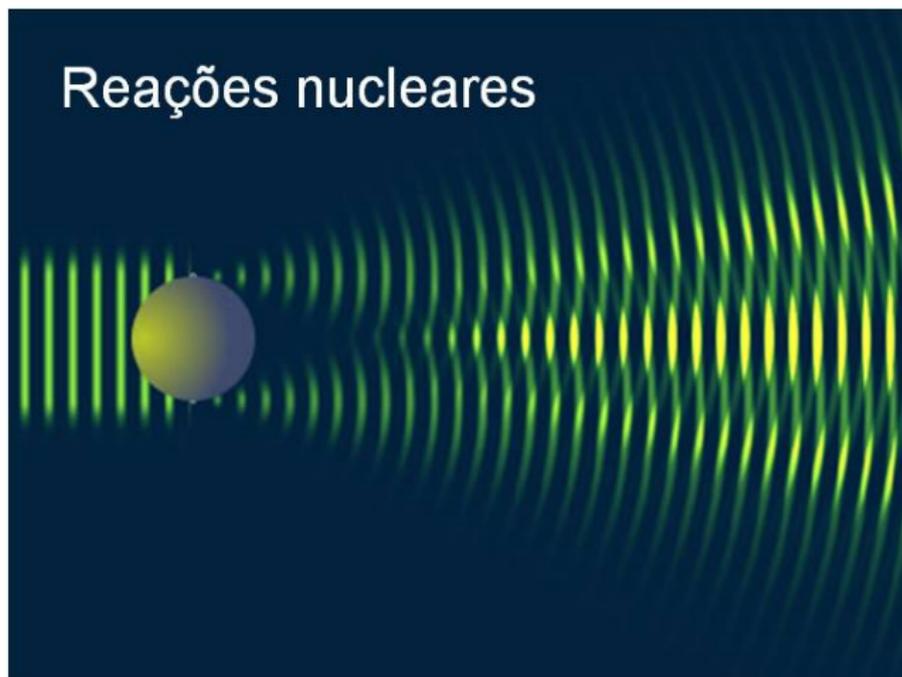
# Difração na natureza





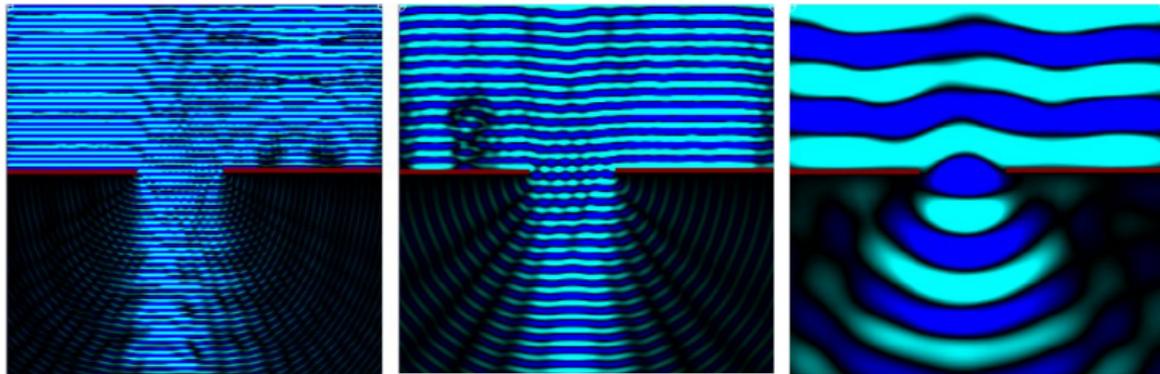






# Dependência das dimensões dos obstáculos

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

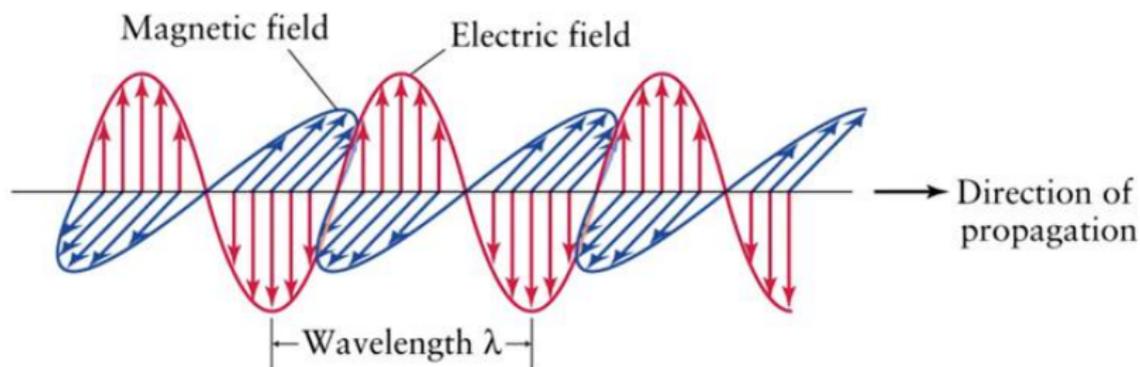


# Ondas longitudinais e transversais

# Ondas mistas (ondas do mar)

# Ondas transversais

- São aquelas nas quais as suas vibrações são perpendiculares à direção de propagação
- A luz é formada por um campo elétrico e magnético transversais e variantes no tempo



## 1 Ótica ondulatória

- Interferência
- Difração

## 2 Experimento

- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- Fenda dupla
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

## 1 Ótica ondulatória

- Interferência
- Difração

## 2 Experimento

- Experimento I
  - Fenda simples
  - Fenda simples 1D
  - Fenda dupla
  - Rede de difração
  - Atividades da semana 3

# Objetivos do experimento

- Estudar algumas características da ótica geométrica e construir imagens a partir de objetos em uma lente.
- Investigar a natureza ondulatória da luz através do estudo da difração e interferência.

- 3 semanas

- ▶ Semana 1

- ★ Lente delgada

- ▶ Semana 2

- ★ Determinação da distância focal de lentes convergente e divergente

- ▶ **Semana 3**

- ★ **Estudo de difração e interferência em fendas simples e duplas e rede de difração**

# IMPORTANTE!

- Síntese da semana (até 1 ponto)
  - ▶ Arquivo em PDF com os gráficos das curvas obtidas, ajustes realizados e eventuais comentários (duas paginas no máximo!)
  - ▶ **A data máxima para upload é:**
    - ★ Diurno: 18h00 da segunda-feira
    - ★ Noturno: 08h00 da terça-feira
    - ★ Upload no site de reservas como “síntese”
- Muitas atividades são feitas através da comparação dos resultados de toda a turma
- **Banco de dados no site da disciplina** (não preencher afeta a nota!)
  - ▶ Grupos DEVEM fazer upload de resultados no site
  - ▶ A data máxima para upload é 18h00 do dia 31/08

## RELATÓRIO

- Determinação da distância focal de lentes convergente e divergente
- No máximo 10 páginas
- **Data máxima para upload**
  - ▶ Diurno: 10/09 as 8h00
  - ▶ Noturno: 10/09 as 18h00
- Upload no site de reservas como “relatório”

## 1 Ótica ondulatória

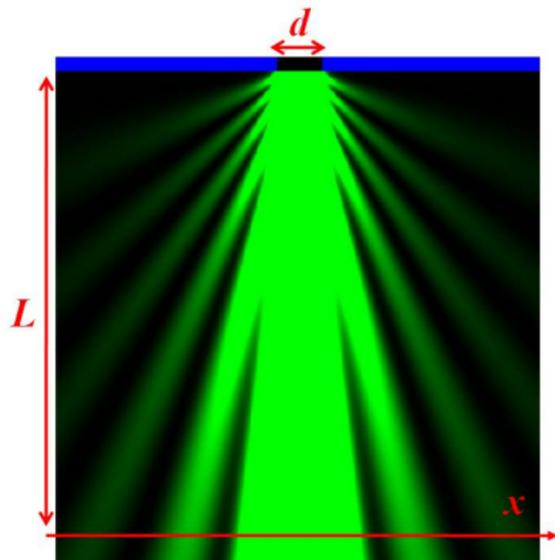
- Interferência
- Difração

## 2 Experimento

- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- Fenda dupla
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

# Estudo de uma fenda simples

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



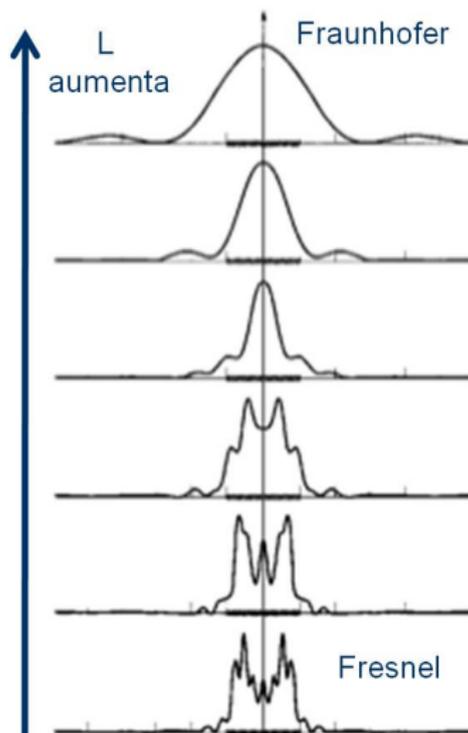
# Por que $L \gg d$ ?

## • Dois limites

- ▶ Difração de Fresnel
  - ★ Próximo ao obstáculo
  - ★ Cálculos complexos
  - ★ Efeitos de borda importantes
- ▶ Difração de Fraunhofer
  - ★ Longe do obstáculo
  - ★ Muito mais simples de calcular

[http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel\\_diffraction](http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_diffraction)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer\\_diffraction](http://en.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer_diffraction)



# Generalizando a difração de Fraunhofer

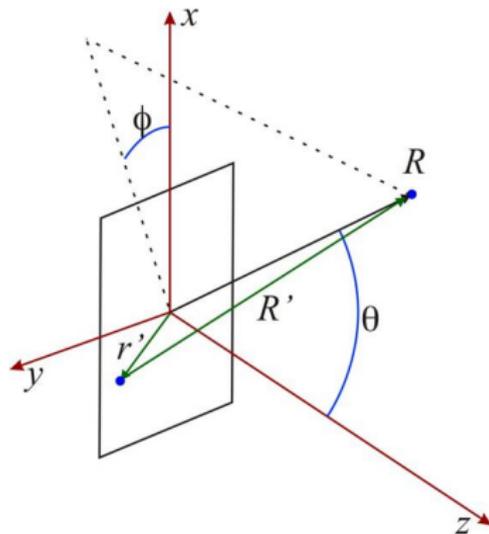
- Campo elétrico incidente no objeto

$$\hat{E} = E_0 e^{j(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

por simplicidade

$$\hat{E} = E_0 e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}}$$

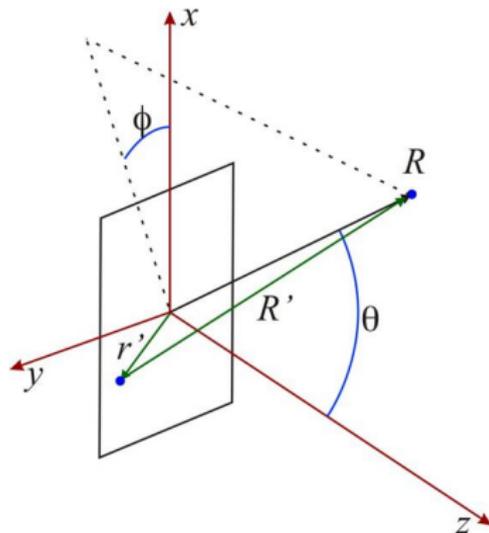
- Qual o campo elétrico no ponto  $R$ ?



# Generalizando a difração de Fraunhofer

- Na posição  $R$ , o campo devido ao ponto em  $r'$  vale:

$$\hat{E}_{r'}(\vec{R}) = \frac{E_0(r')}{R'} e^{j\vec{k} \cdot \vec{R}'}$$



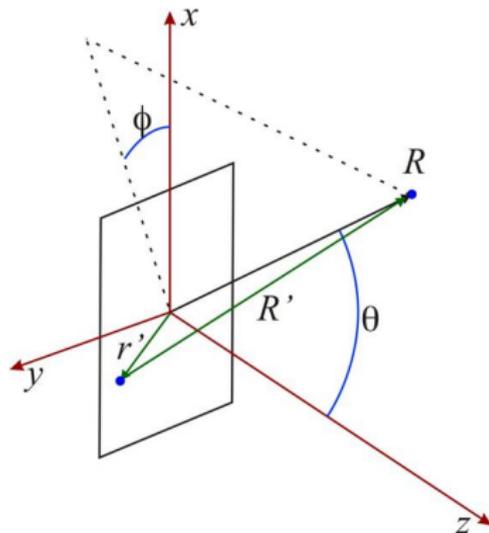
# Generalizando a difração de Fraunhofer

- Na posição  $R$ , o campo devido ao ponto em  $r'$  vale:

$$\hat{E}_{r'}(\vec{R}) = \frac{E_0(r')}{R'} e^{j\vec{k} \cdot \vec{R}'}$$

- O campo total é dado por:

$$\hat{E}(\vec{R}) = \int \frac{E_0(r')}{R'} e^{j\vec{k} \cdot \vec{R}'} dx dy$$

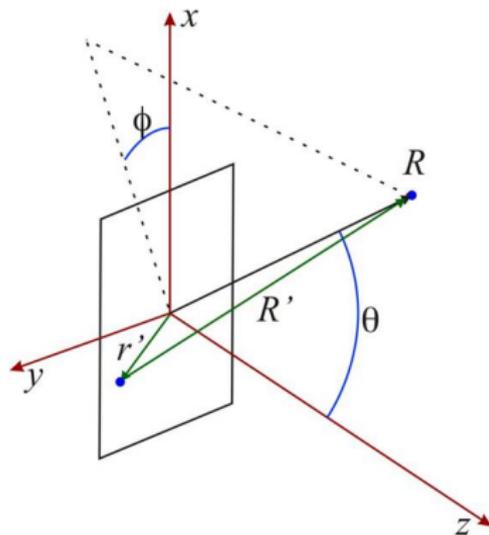


# Generalizando a difração de Fraunhofer

- Para grandes distâncias

$$\vec{k} = k\hat{r}$$

$$\vec{R}' = \vec{R} - \vec{r}' = R\hat{r} - \vec{r}'$$



# Generalizando a difração de Fraunhofer

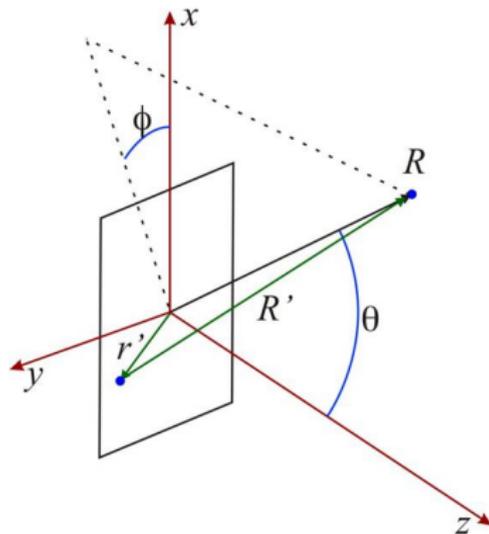
- Para grandes distâncias

$$\vec{k} = k\hat{r}$$

$$\vec{R}' = \vec{R} - \vec{r}' = R\hat{r} - \vec{r}'$$

- Assim:

$$\hat{E}(\vec{R}) = \int \frac{E_0(r')}{R'} e^{j(kR - \vec{k} \cdot \vec{r}')} dx dy$$



# Generalizando a difração de Fraunhofer

- Para grandes distâncias

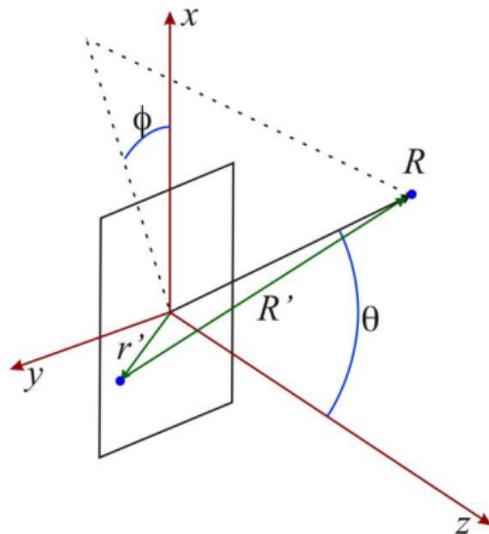
$$\vec{k} = k\hat{r}$$

$$\vec{R}' = \vec{R} - \vec{r}' = R\hat{r} - \vec{r}'$$

- Assim:

$$\hat{E}(\vec{R}) = \int \frac{E_0(r')}{R'} e^{j(kR - \vec{k} \cdot \vec{r}')} dx dy$$

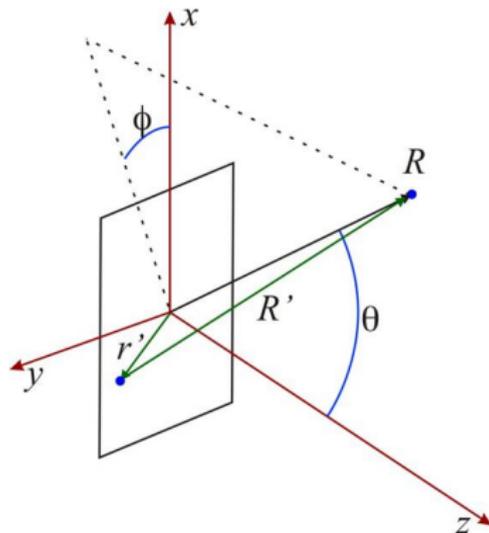
$$\hat{E}(\vec{R}) = e^{jkR} \int \frac{E_0(r')}{R'} e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}'} dx dy$$



# Generalizando a difração de Fraunhofer

- Na condição de Fraunhofer

$$R' = R \text{ (módulo)}$$



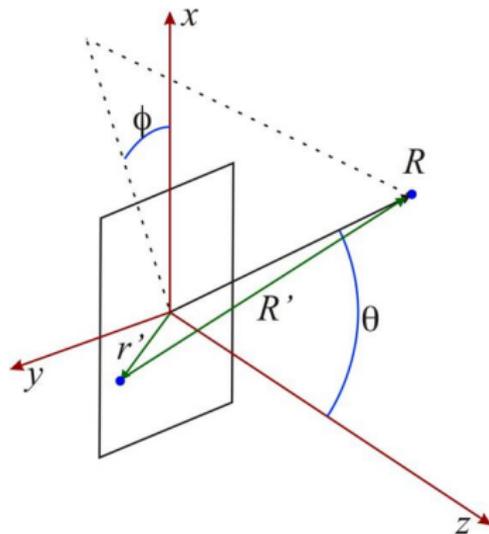
# Generalizando a difração de Fraunhofer

- Na condição de Fraunhofer

$$R' = R \text{ (módulo)}$$

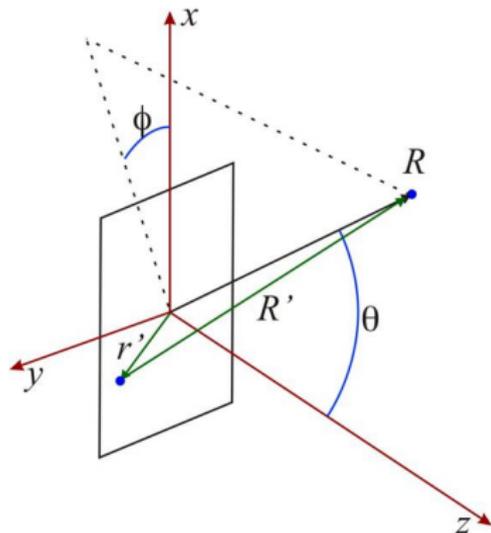
- Assim:

$$\hat{E}(\vec{R}) = \frac{e^{jkR}}{R} \int E_0(r') e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}'} dx dy$$



# Generalizando a difração de Fraunhofer

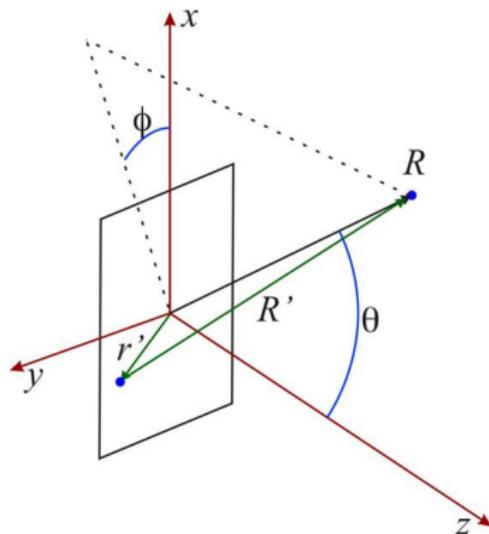
- Quem é  $\vec{k} \cdot \vec{r}'$ ?



# Generalizando a difração de Fraunhofer

- Quem é  $\vec{k} \cdot \vec{r}'$ ?

$$\vec{r}' = x\hat{x} + y\hat{y}$$

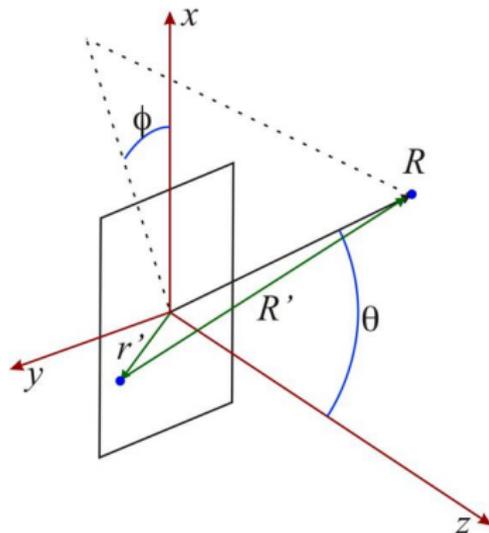


# Generalizando a difração de Fraunhofer

- Quem é  $\vec{k} \cdot \vec{r}'$ ?

$$\vec{r}' = x\hat{x} + y\hat{y}$$

$$\vec{k} = k\hat{r} = (k\text{sen}\theta\text{cos}\phi)\hat{x} + (k\text{sen}\theta\text{sen}\phi)\hat{y} + k\text{cos}\theta\hat{z}$$



# Generalizando a difração de Fraunhofer

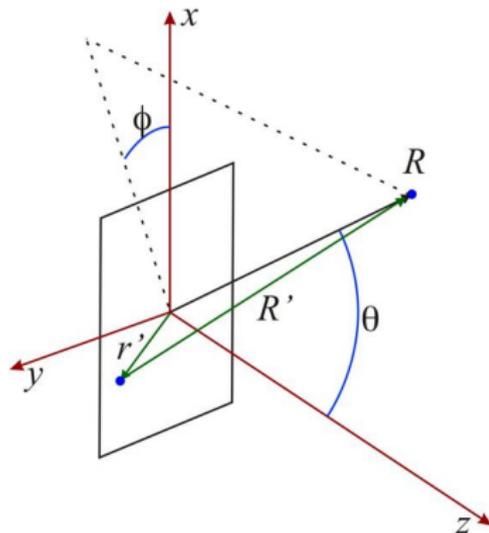
- Quem é  $\vec{k} \cdot \vec{r}'$ ?

$$\vec{r}' = x\hat{x} + y\hat{y}$$

$$\vec{k} = k\hat{r} = (k\text{sen}\theta\text{cos}\phi)\hat{x} + (k\text{sen}\theta\text{sen}\phi)\hat{y} + k\text{cos}\theta\hat{z}$$

- Assim:

$$\vec{k} \cdot \vec{r}' = (k\text{sen}\theta\text{cos}\phi)x + (k\text{sen}\theta\text{sen}\phi)y$$



# Generalizando a difração de Fraunhofer

- Quem é  $\vec{k} \cdot \vec{r}'$ ?

$$\vec{r}' = x\hat{x} + y\hat{y}$$

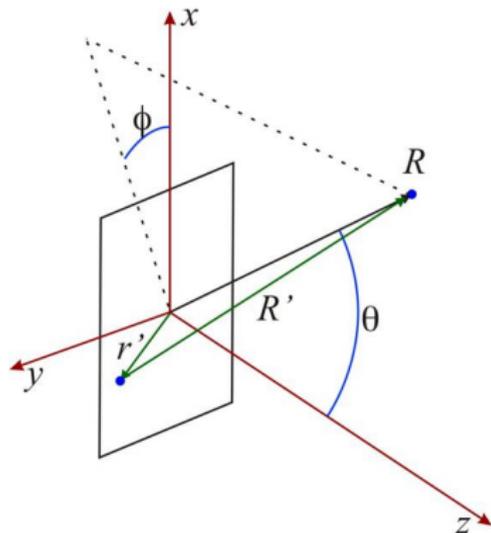
$$\vec{k} = k\hat{r} = (k\text{sen}\theta\text{cos}\phi)\hat{x} + (k\text{sen}\theta\text{sen}\phi)\hat{y} + k\text{cos}\theta\hat{z}$$

- Assim:

$$\vec{k} \cdot \vec{r}' = (k\text{sen}\theta\text{cos}\phi)x + (k\text{sen}\theta\text{sen}\phi)y$$

- Definindo:

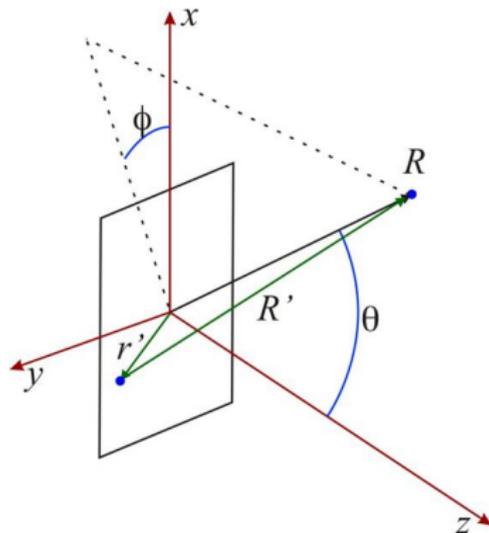
$$\begin{cases} k_x = k\text{sen}\theta\text{cos}\phi \\ k_y = k\text{sen}\theta\text{sen}\phi \end{cases} \Rightarrow \vec{k} \cdot \vec{r}' = k_x x + k_y y$$



# Generalizando a difração de Fraunhofer

- A expressão para o campo

$$\hat{E}(\vec{R}) = \frac{e^{jkR}}{R} \int E_0(r') e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}'} dx dy$$



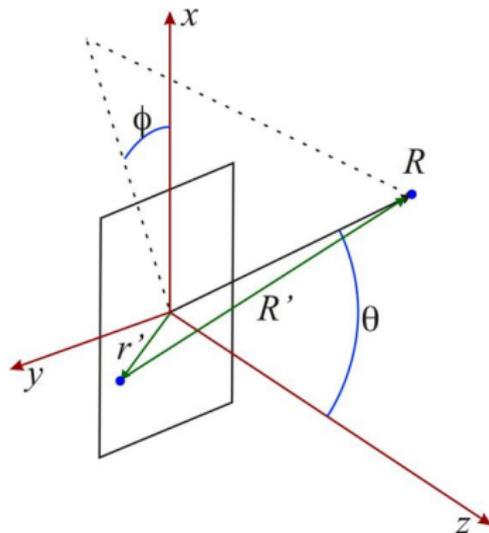
# Generalizando a difração de Fraunhofer

- A expressão para o campo

$$\hat{E}(\vec{R}) = \frac{e^{jkR}}{R} \int E_0(r') e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}'} dx dy$$

- Torna-se:

$$\hat{E}(\vec{R}) = \frac{e^{jkR}}{R} \int E_0(x, y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy$$



## 1 Ótica ondulatória

- Interferência
- Difração

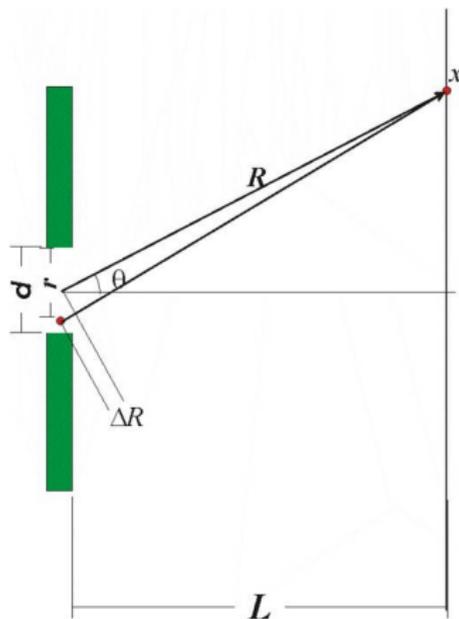
## 2 Experimento

- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- Fenda dupla
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

# O estudo de uma fenda simples em 1D

- O problema em 2D se resume a uma dimensão:

$$\phi = 0 \Rightarrow \begin{cases} k_x = k \sin \theta \cos \phi = k \sin \theta \\ k_y = k \sin \theta \sin \phi = 0 \end{cases}$$



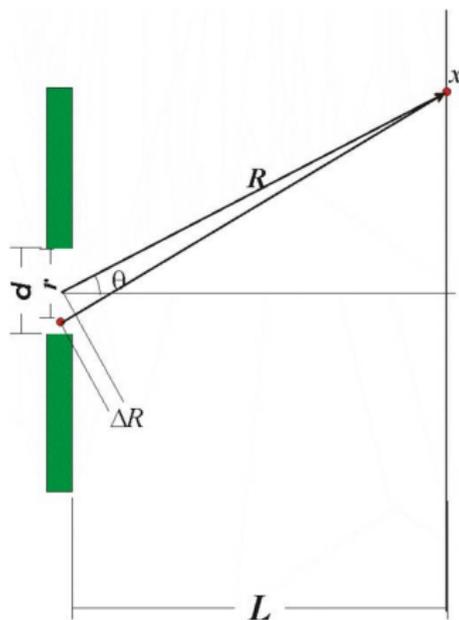
# O estudo de uma fenda simples em 1D

- O problema em 2D se resume a uma dimensão:

$$\phi = 0 \Rightarrow \begin{cases} k_x = k \sin \theta \cos \phi = k \sin \theta \\ k_y = k \sin \theta \sin \phi = 0 \end{cases}$$

- O campo elétrico em um ponto  $x$  qualquer, distante da fenda vale:

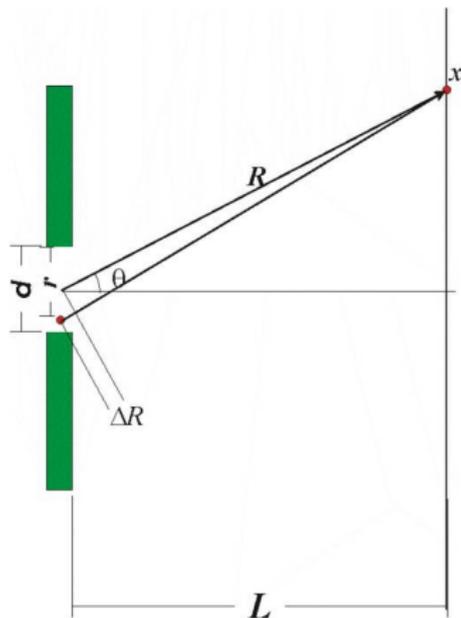
$$\begin{aligned} \hat{E}(\vec{R}) &= \frac{e^{jkR}}{R} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} E_0 e^{-jk_x x} dx \\ &= \hat{C} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} e^{-jk_x x} dx \end{aligned}$$



# O estudo de uma fenda simples em 1D

- Ou seja:

$$\hat{E}(\vec{R}) = \hat{C} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} e^{-jk_x x} dx$$



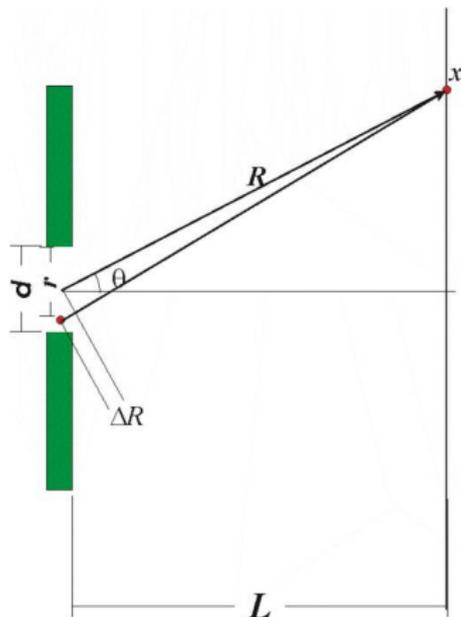
# O estudo de uma fenda simples em 1D

- Ou seja:

$$\hat{E}(\vec{R}) = \hat{C} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} e^{-jk_x x} dx$$

- Que resulta em:

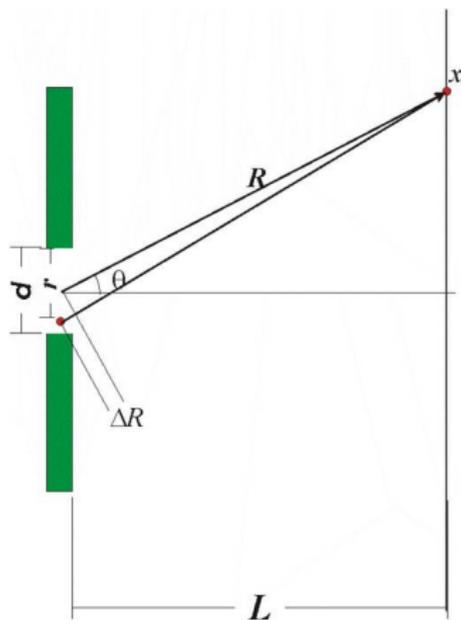
$$\hat{E}(\vec{R}) = \frac{\hat{C}}{jk_x} \left( e^{jk_x \frac{d}{2}} - e^{-jk_x \frac{d}{2}} \right)$$



# O estudo de uma fenda simples em 1D

- Sabendo que:

$$\text{sen}\alpha = \frac{1}{2j} (e^{j\alpha} - e^{-j\alpha})$$



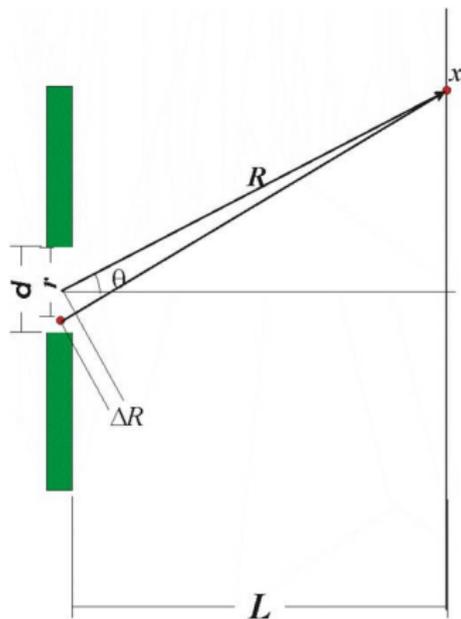
# O estudo de uma fenda simples em 1D

- Sabendo que:

$$\text{sen}\alpha = \frac{1}{2j} (e^{j\alpha} - e^{-j\alpha})$$

- Temos que:

$$\hat{E}(\vec{R}) = \frac{\hat{D}}{k_x} \text{sen} \left( k_x \frac{d}{2} \right)$$



# O estudo de uma fenda simples em 1D

- Sabendo que:

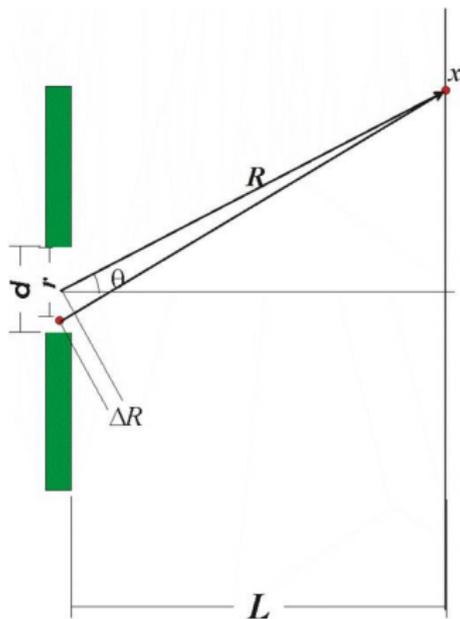
$$\text{sen}\alpha = \frac{1}{2j} (e^{j\alpha} - e^{-j\alpha})$$

- Temos que:

$$\hat{E}(\vec{R}) = \frac{\hat{D}}{k_x} \text{sen} \left( k_x \frac{d}{2} \right)$$

- Lembrando que:

$$k_x = k \text{sen}\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \text{sen}\theta$$



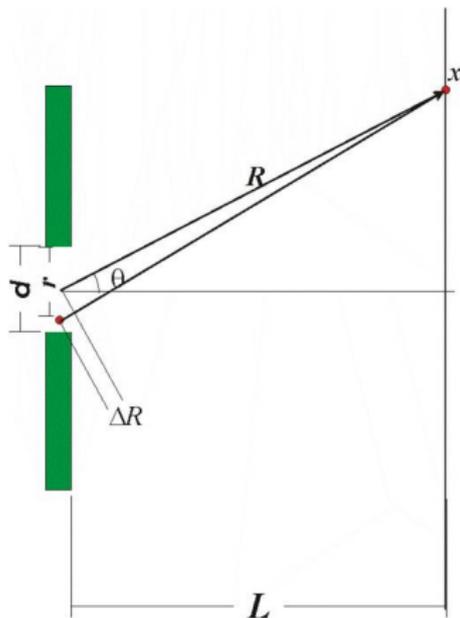
# O estudo de uma fenda simples em 1D

- Com um pouco de manipulação, podemos escrever que:

$$\hat{E}(\vec{R}) = \hat{A} \frac{\text{sen}\beta}{\beta}$$

- com:

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \text{sen}\theta, \text{ e } \hat{A} = \text{constante}$$



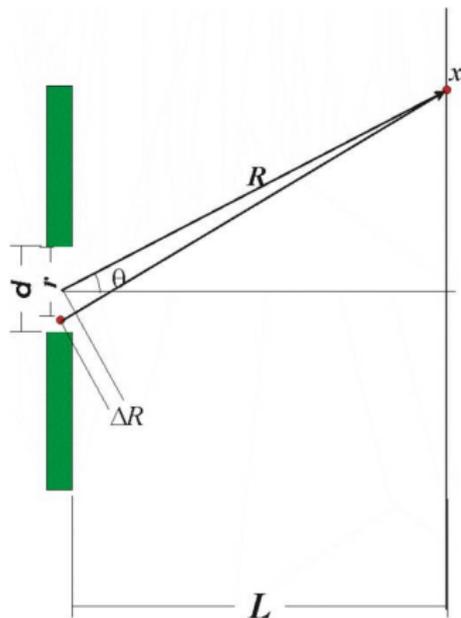
# O estudo de uma fenda simples em 1D

- Como a intensidade luminosa é proporcional ao quadrado do campo elétrico temos que:

$$I \propto \hat{E}^2 = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2$$

- com:

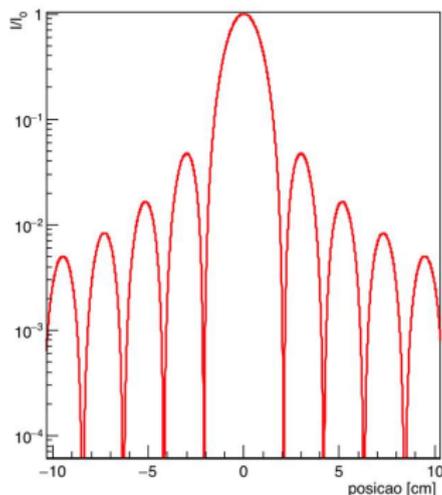
$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$$



# O estudo de uma fenda simples em 1D

- Variação de intensidade com o ângulo:

$$I \propto \hat{E}^2 = I_0 \left( \frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right)^2$$



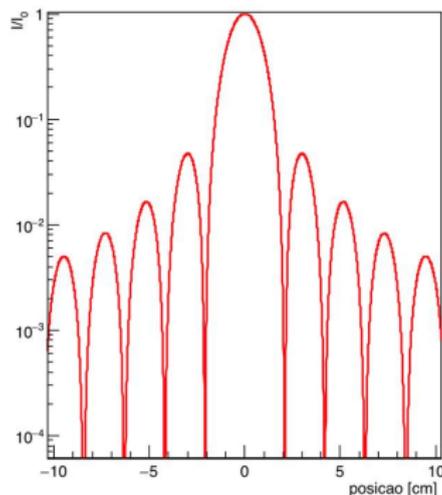
# O estudo de uma fenda simples em 1D

- Variação de intensidade com o ângulo:

$$I \propto \hat{E}^2 = I_0 \left( \frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right)^2$$

- Mínimos  $\rightarrow \text{sen}\beta = 0$ :

$$\beta = \pi, 2\pi, \dots, n\pi$$



# O estudo de uma fenda simples em 1D

- Variação de intensidade com o ângulo:

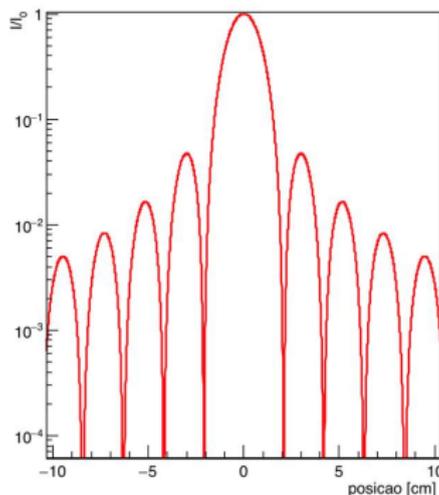
$$I \propto \hat{E}^2 = I_0 \left( \frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right)^2$$

- Mínimos  $\rightarrow \text{sen}\beta = 0$ :

$$\beta = \pi, 2\pi, \dots, n\pi$$

- Máximos  $\rightarrow \beta = \tan\beta$ :

$$\beta = 0 \text{ e } \beta \approx \frac{3}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi, \dots, \frac{2n+1}{2}\pi$$



## 1 Ótica ondulatória

- Interferência
- Difração

## 2 Experimento

- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- **Fenda dupla**
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

# Duas fendas separadas

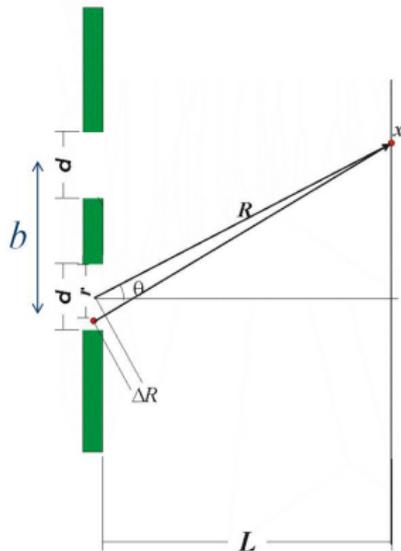
- Soma sobre duas fendas separadas de uma distância  $b$ :

$$I \propto \hat{E}^2 = I_0 \underbrace{\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2}_{\text{Difração}} \cdot \underbrace{\cos^2\left(\frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta\right)}_{\text{Interferência}}$$

- com:

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

- Pode-se deduzir as posições dos máximos e mínimos de interferência e difração da mesma forma que para a fenda simples



## 1 Ótica ondulatória

- Interferência
- Difração

## 2 Experimento

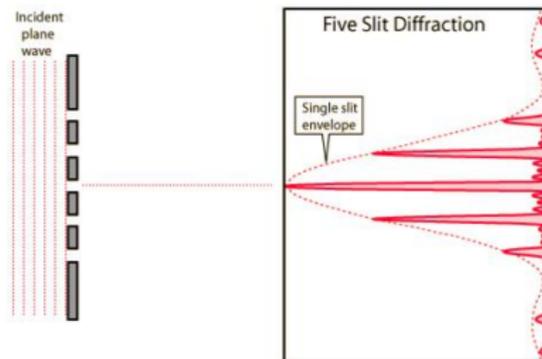
- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- Fenda dupla
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

# Muitas fendas separadas (rede 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:

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

- ▶  $d$  = densidade de linhas



## 1 Ótica ondulatória

- Interferência
- Difração

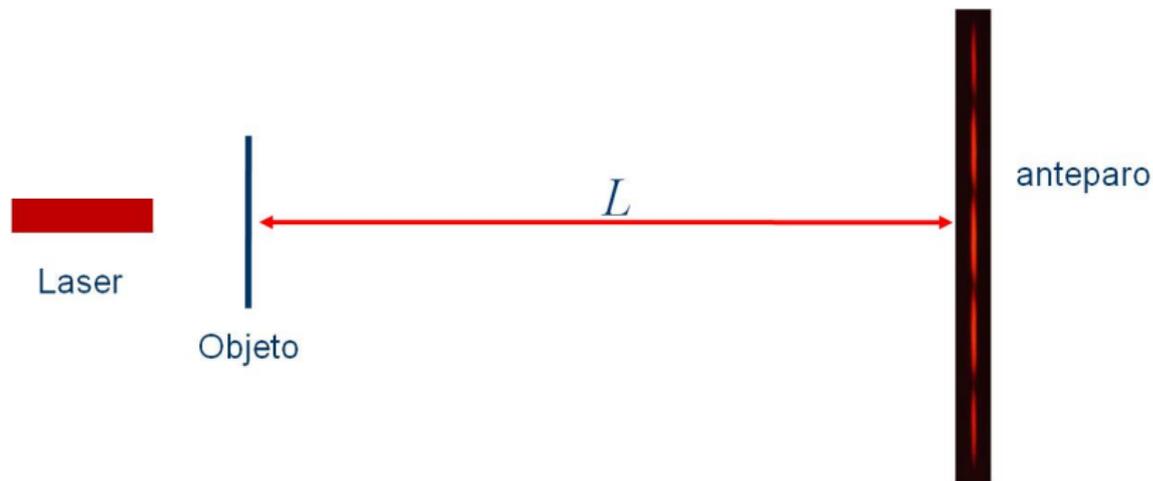
## 2 Experimento

- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- Fenda dupla
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

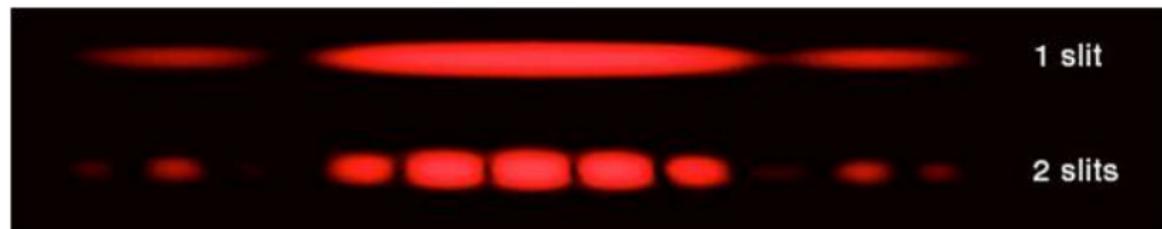
- Estudar, quantitativamente, a figura de difração de uma fenda simples, uma fenda dupla e da rede de difração
  - ▶ *Slide* de fendas
  - ▶ Anote o número do *slide*
  - ▶ Rede de difração - anote o número
  - ▶ Ver detalhes no roteiro de aula sobre quais fendas utilizar na tomada de dados

# Como obter figuras de difração?

- Montar: laser + objeto + anteparo
- Colocar o anteparo a uma distância conhecida para observar as figuras de interferência e difração



# Difração por fenda simples e dupla



- Estimar a distância entre o anteparo e a fenda de modo a ser possível medir as posições dos mínimos/máximos de difração de forma confortável, tanto para a fenda simples como para a dupla
- Fazer os gráficos de intensidade em função da posição no anteparo para a fenda simples e para a fenda dupla
- Estimar o número de pontos que você vai conseguir medir para cada uma das fendas utilizadas
  - ▶ Ver detalhes na página da disciplina

- Para uma fenda simples e uma fenda dupla no *slide*
  - ▶ *Anote o número do slide!*
- Observe os fenômenos de interferência e difração
- Meça as posições de mínimo de interferência e difração
  - ▶ Alguns grupos acham melhor medir os máximos
- Faça a análise apropriada e determine estas dimensões
  - ▶ Compare com os valores nominais
- Usando a rede de difração no lugar das fendas medir as posições de máximo de interferência e determinar a densidade de fios da rede