

Física Experimental IV

Segundo semestre de 2018

Aula 3 - Experimento I - semana 3

Página da disciplina:

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=63622>

27/28 de agosto de 2018

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

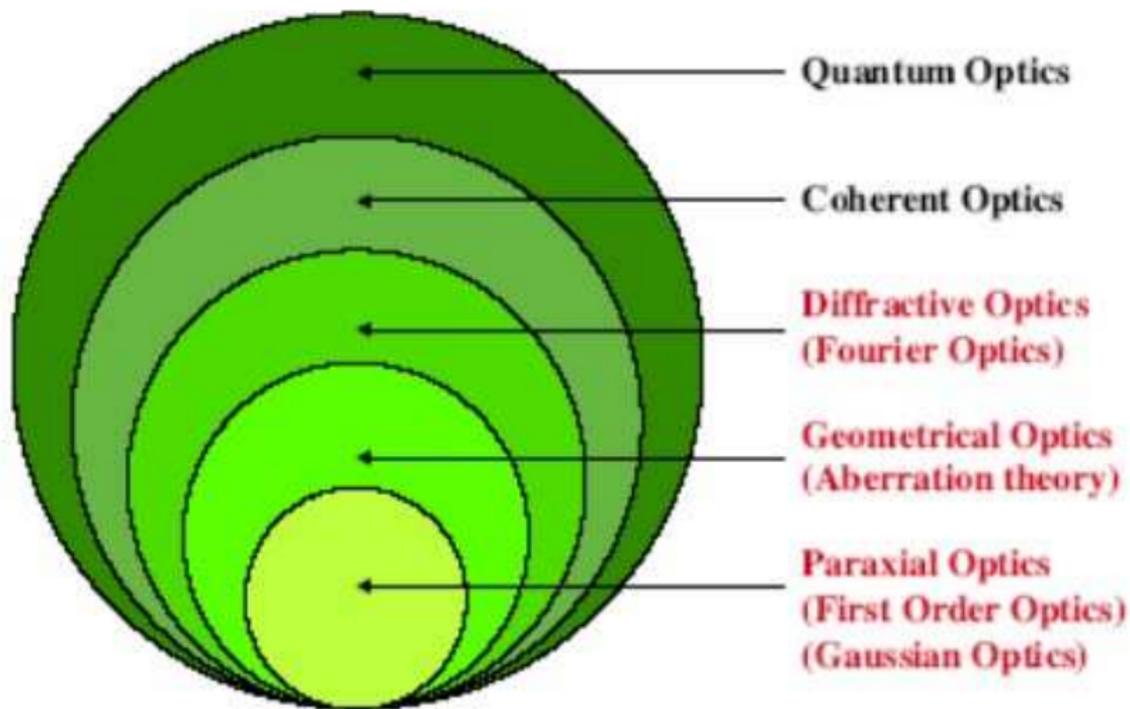
1 Ótica ondulatória

- Interferência
- Difração

2 Experimento

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

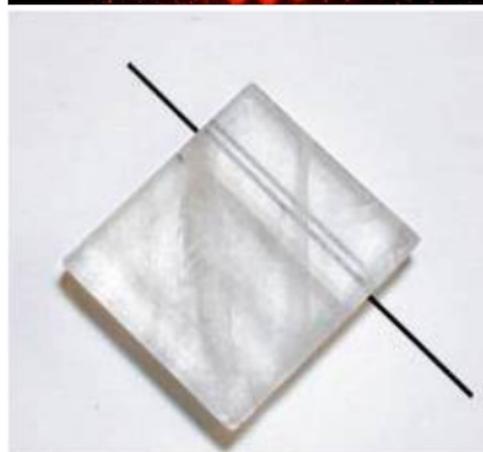
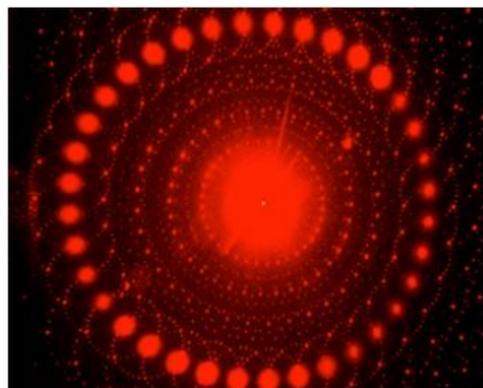
Hierarchy of Optical Theories



- 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

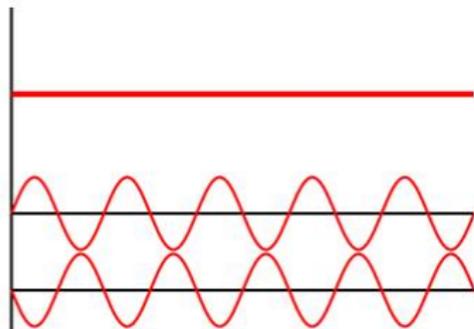
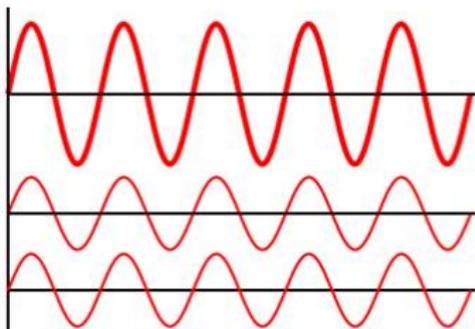
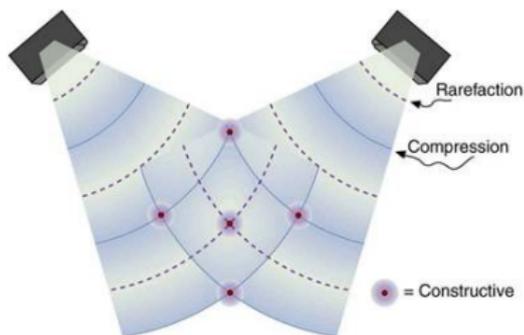
- Interferência
- Difração

2 Experimento

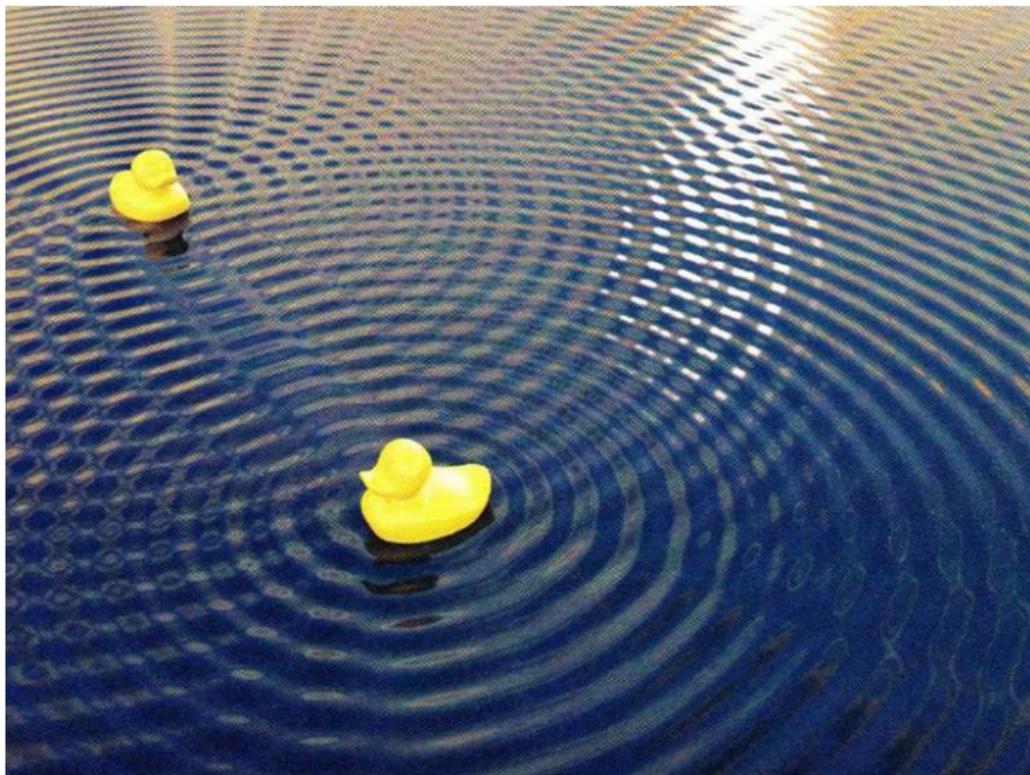
- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- Fenda dupla
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

Interferência

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



Interferência



1 Ótica ondulatória

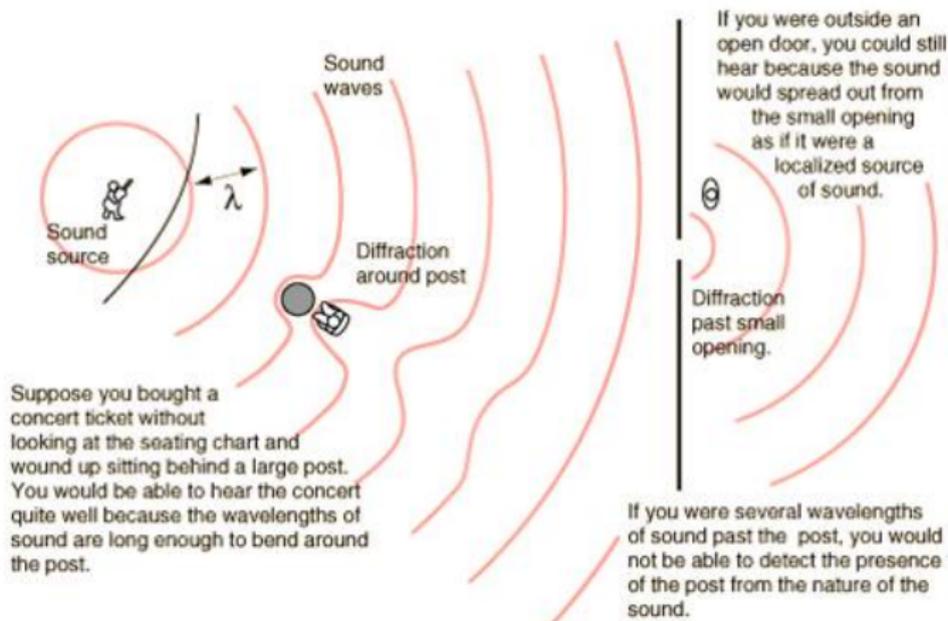
- Interferência
- Difração

2 Experimento

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

Difração

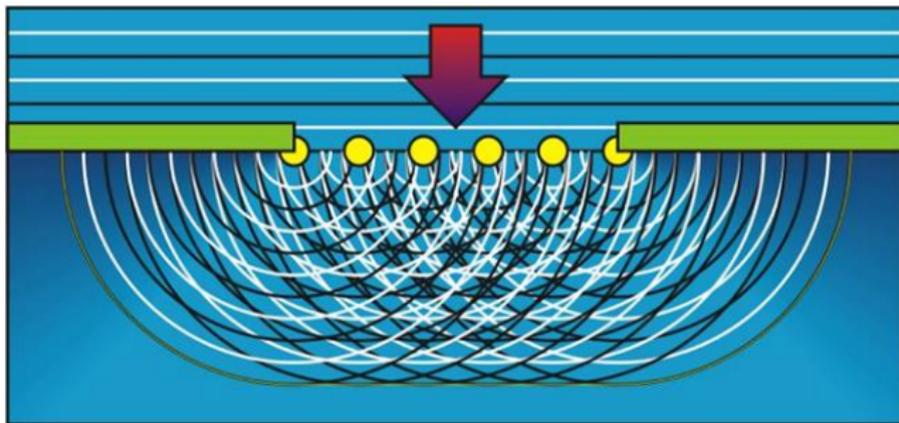
- Como um espectador, atrás de uma porta, por exemplo, é capaz de ouvir um som mas não é capaz de enxergar a pessoa falando?



Explicando o fenômeno da difração

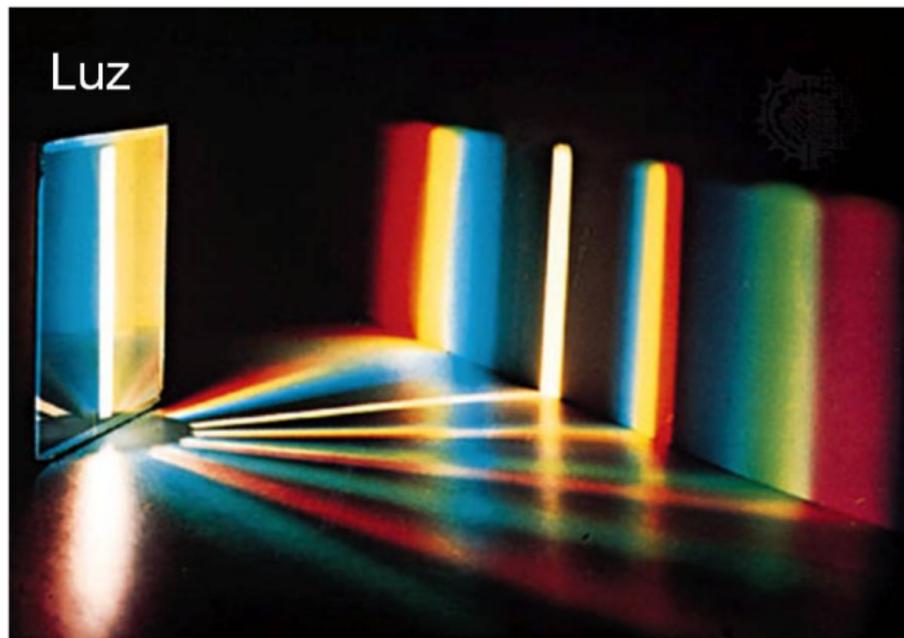
- Princípio de Huygens-Fresnel

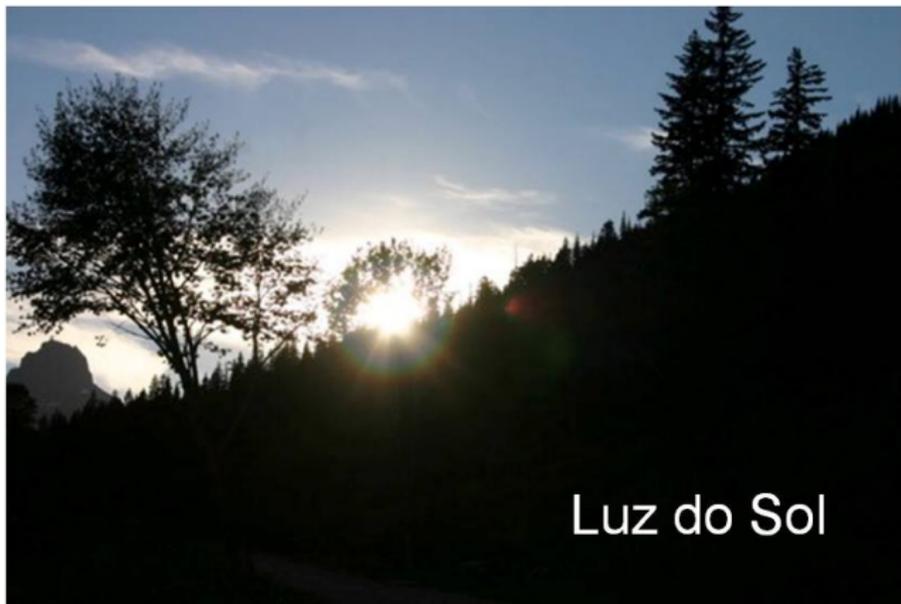
- ▶ Cada ponto de uma frente de onda (não obstruído) funciona como uma fonte emissora puntiforme esférica
- ▶ A onda resultante consiste da superposição de todas as ondas esféricas, levando em consideração a fase entre elas

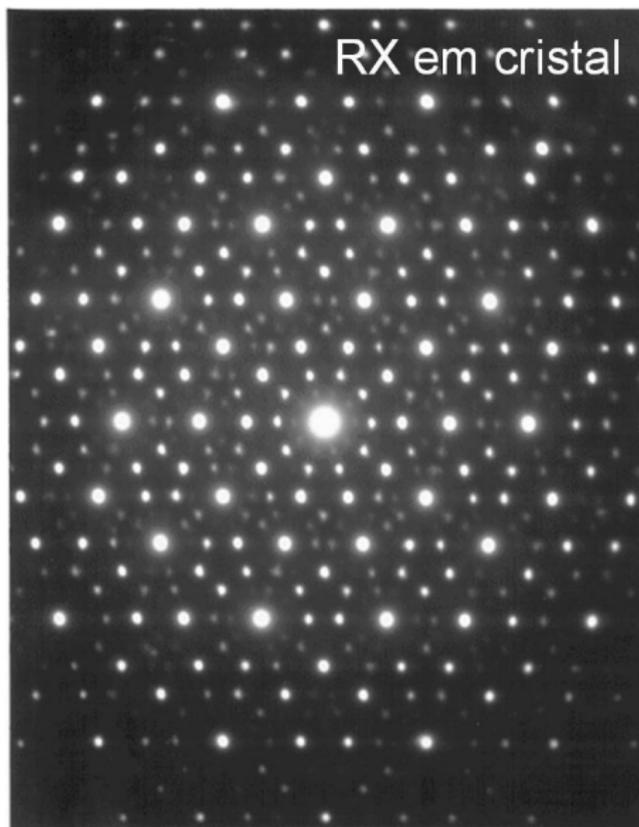




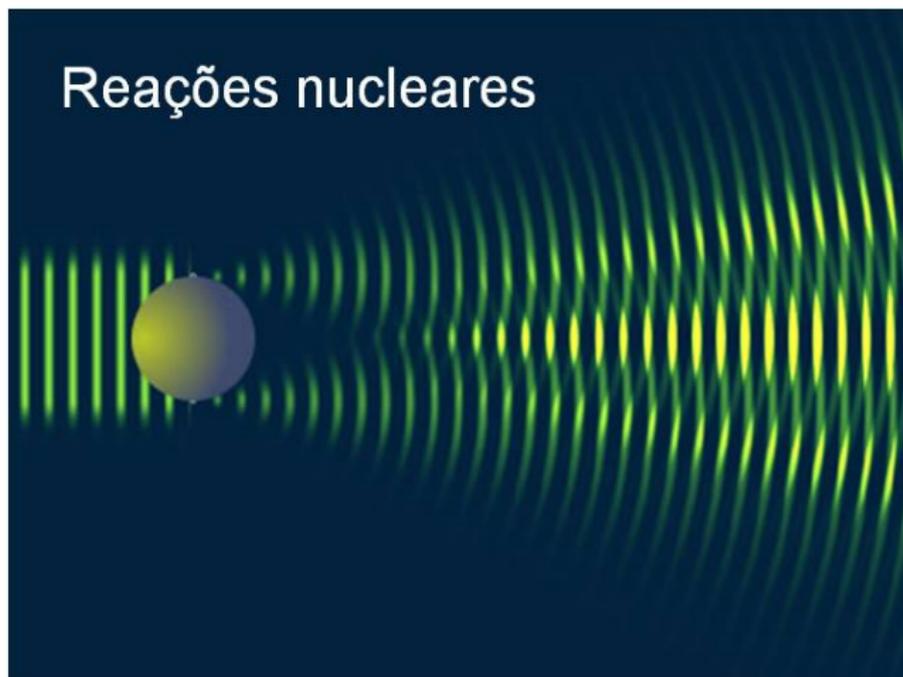
Difração na natureza





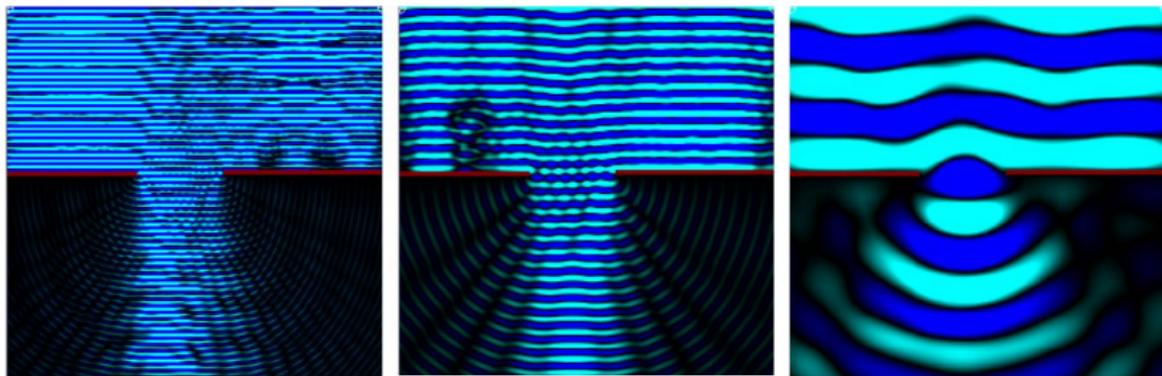






Dependência das dimensões dos obstáculos

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

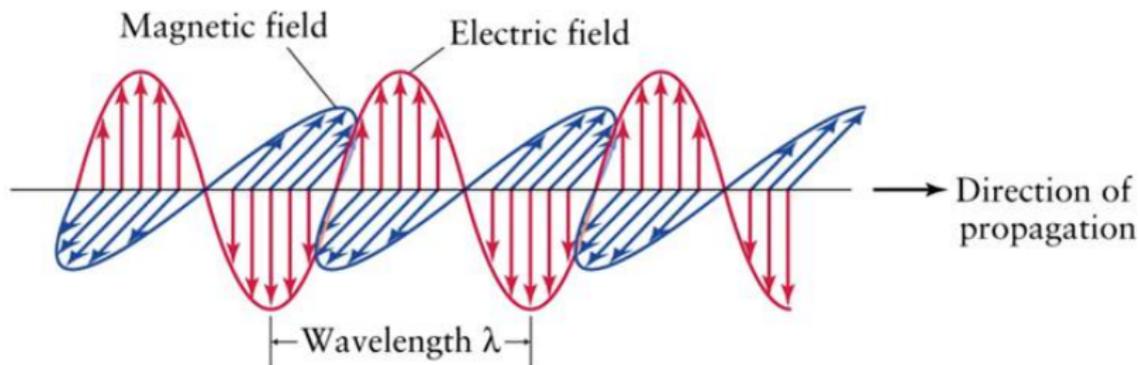


Ondas longitudinais e transversais

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**

- 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:**
 - ★ **Noturno: 12h00 da segunda-feira**
 - ★ **Diurno: 18h00 da segunda-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**
 - ▶ Noturno: 10/09 as 8h00
 - ▶ Diurno: 11/09 as 8h00
- Upload no site de reservas como “relatório”

1 Ótica ondulatória

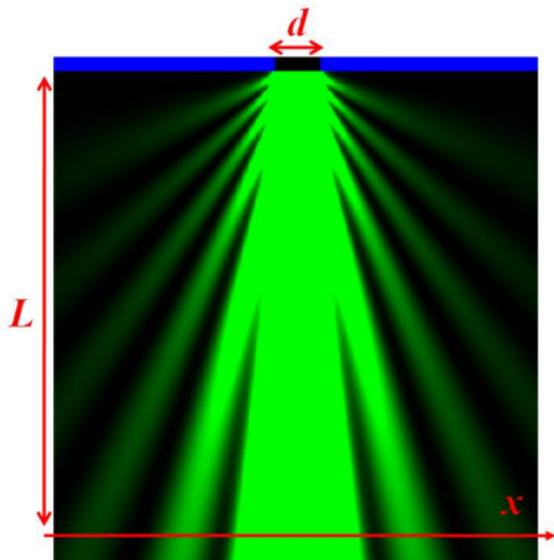
- Interferência
- Difração

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 λ
- 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 ?



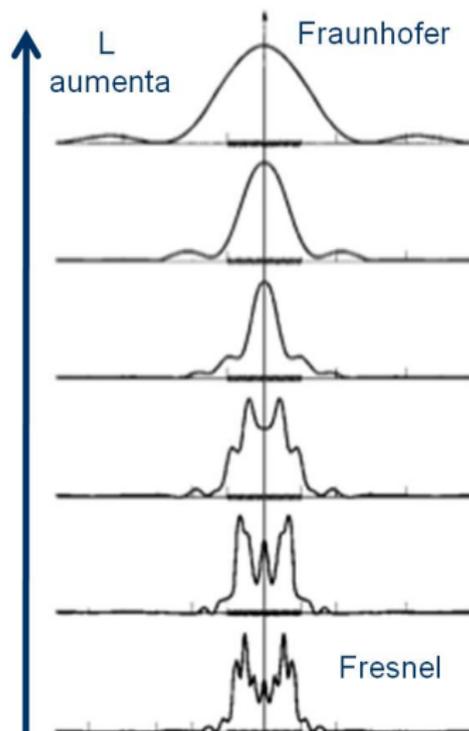
Por que $L \gg d$?

● 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/Fraunhofer_diffraction



Generalizando a difração de Fraunhofer

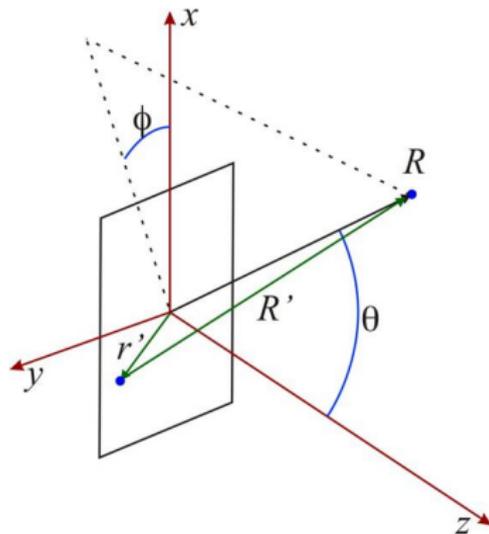
- Campo elétrico incidente no objeto

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

por simplicidade

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

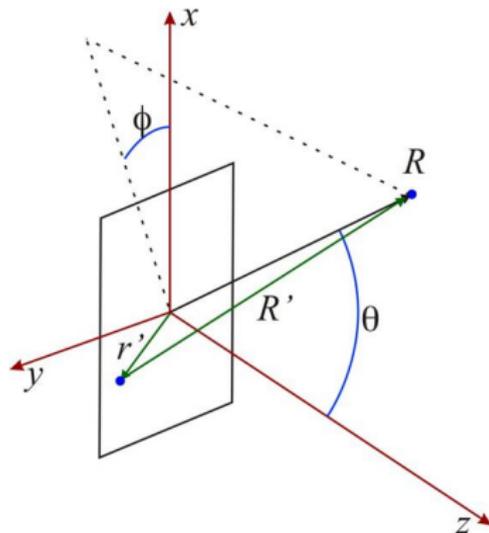
- Qual o campo elétrico no ponto R ?



Generalizando a difração de Fraunhofer

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

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



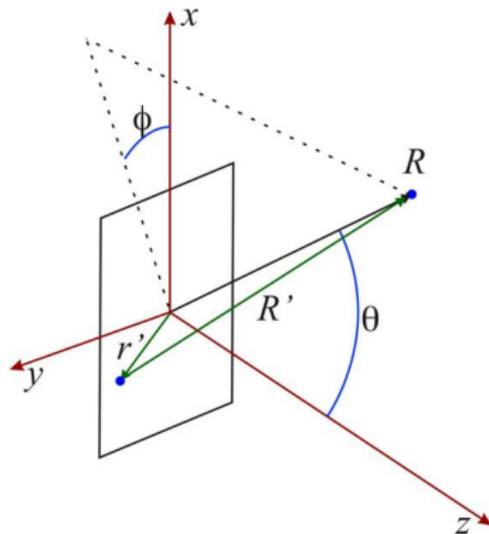
Generalizando a difração de Fraunhofer

- 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:

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

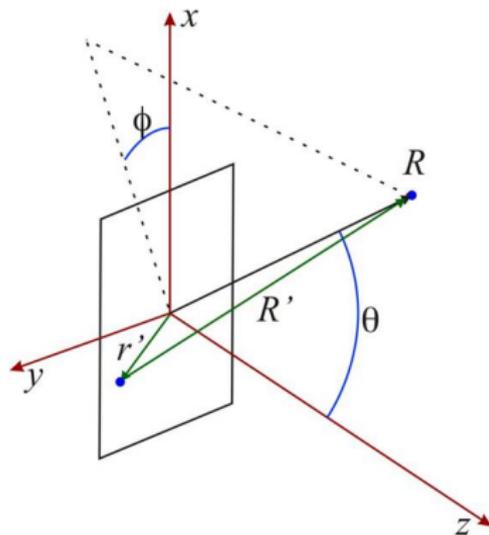


Generalizando a difração de Fraunhofer

- Para grandes distâncias

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

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



Generalizando a difração de Fraunhofer

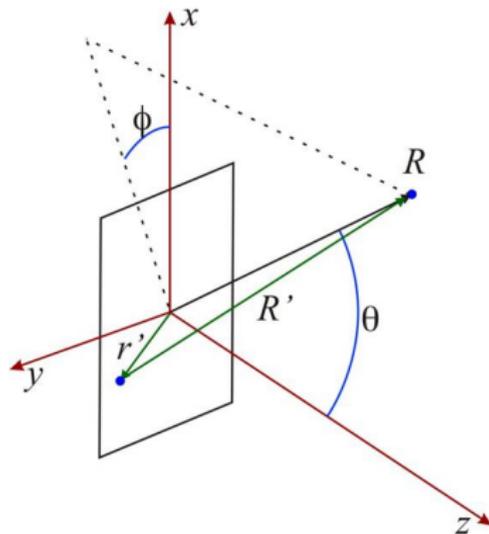
- Para grandes distâncias

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

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

- 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

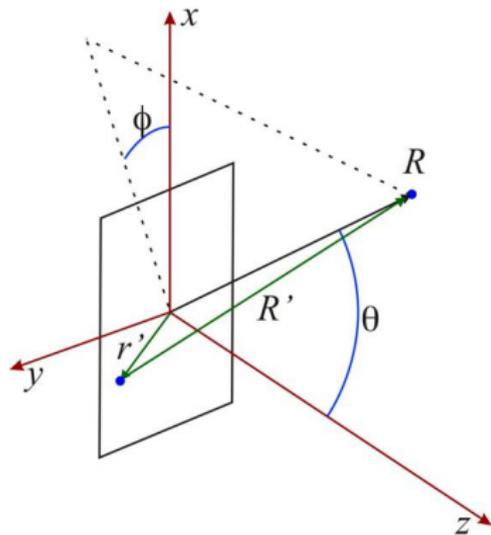
$$\vec{k} = k\hat{r}$$

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

- Assim:

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

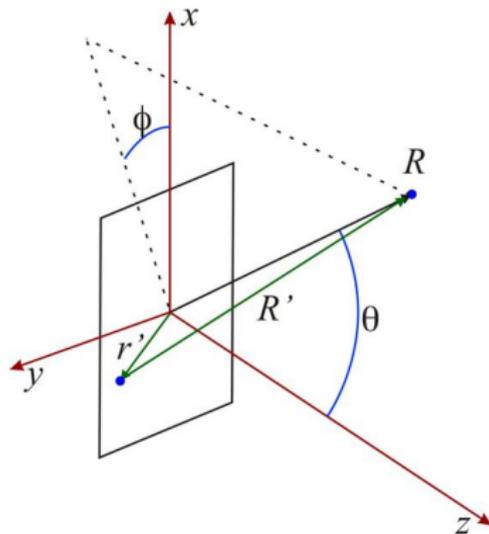
$$\hat{E}(\vec{R}) = e^{jkR} \int \frac{E_0(r')}{R'} e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}'} dx dy$$



Generalizando a difração de Fraunhofer

- Na condição de Fraunhofer

$$R' = R \text{ (módulo)}$$



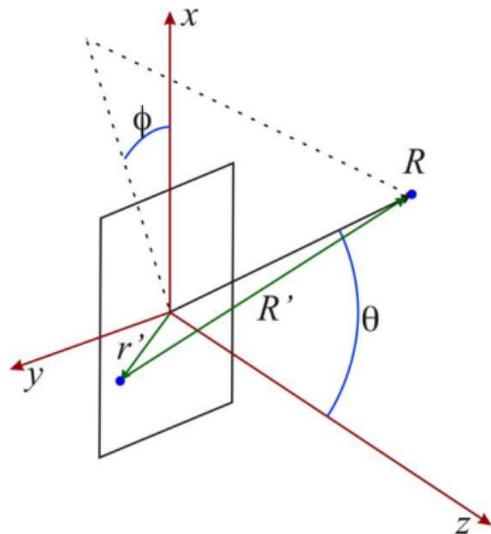
Generalizando a difração de Fraunhofer

- Na condição de Fraunhofer

$$R' = R \text{ (módulo)}$$

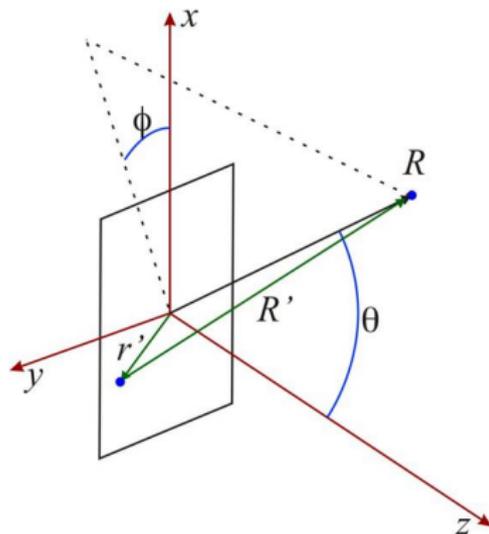
- Assim:

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



Generalizando a difração de Fraunhofer

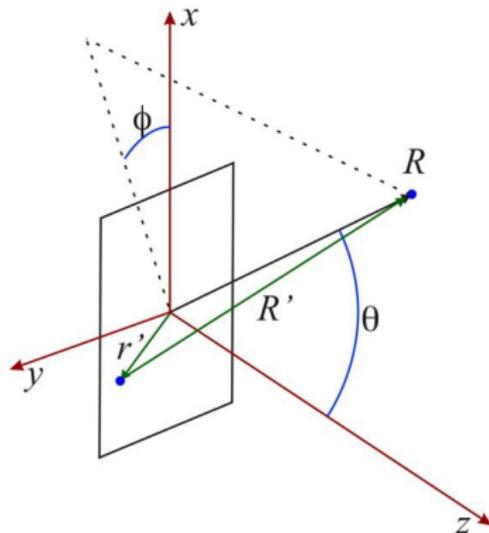
- Quem é $\vec{k} \cdot \vec{r}'$?



Generalizando a difração de Fraunhofer

- Quem é $\vec{k} \cdot \vec{r}'$?

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

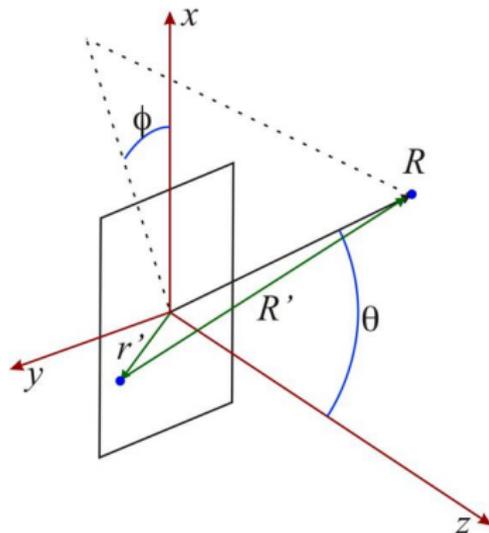


Generalizando a difração de Fraunhofer

- 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

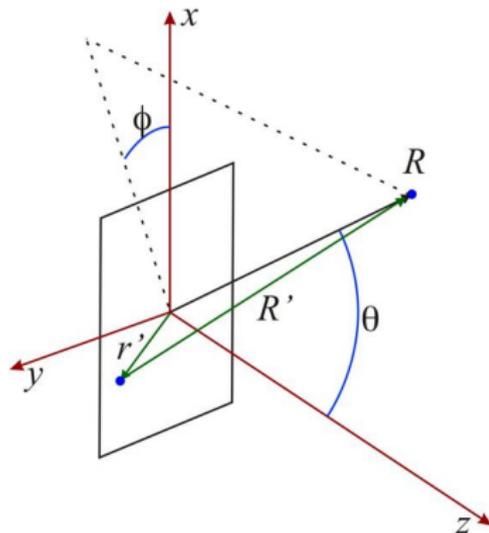
- Quem é $\vec{k} \cdot \vec{r}'$?

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

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

- 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 $\vec{k} \cdot \vec{r}'$?

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

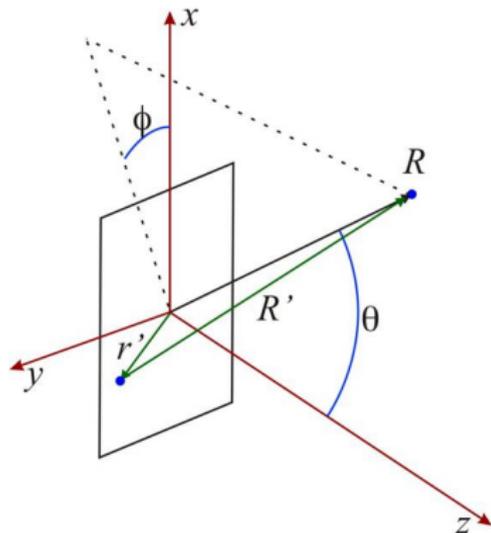
$$\vec{k} = k\hat{r} = (k\text{sen}\theta\text{cos}\phi)\hat{x} + (k\text{sen}\theta\text{sen}\phi)\hat{y} + k\text{cos}\theta\hat{z}$$

- Assim:

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

- Definindo:

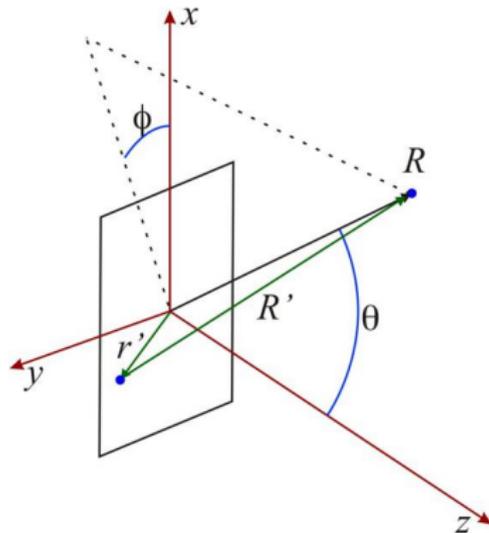
$$\begin{cases} k_x = k\text{sen}\theta\text{cos}\phi \\ k_y = k\text{sen}\theta\text{sen}\phi \end{cases} \Rightarrow \vec{k} \cdot \vec{r}' = k_x x + k_y y$$



Generalizando a difração de Fraunhofer

- A expressão para o campo

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



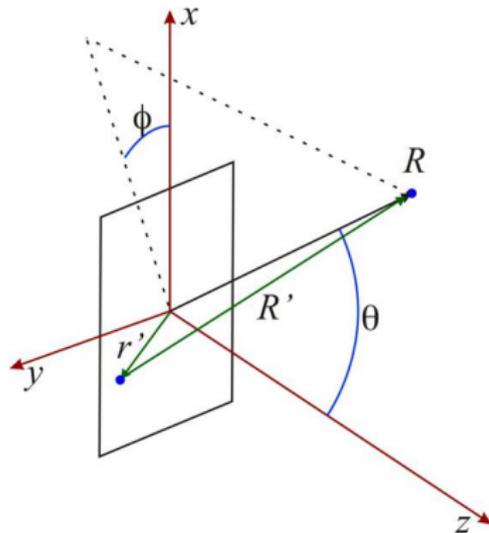
Generalizando a difração de Fraunhofer

- 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

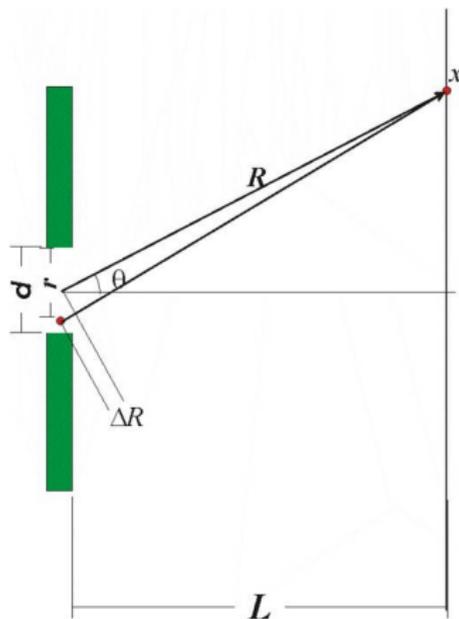
2 Experimento

- 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:

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



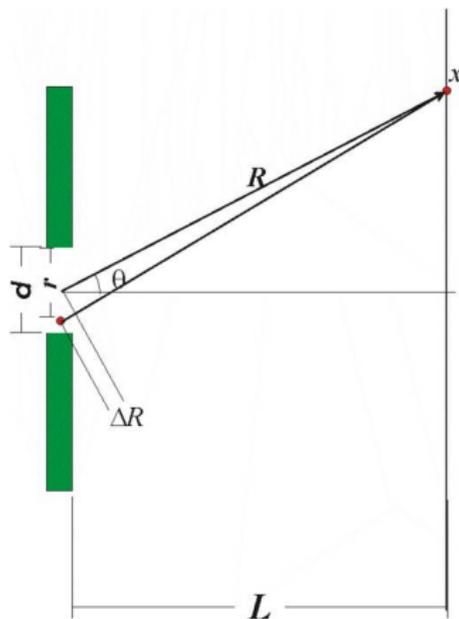
O estudo de uma fenda simples em 1D

- 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:

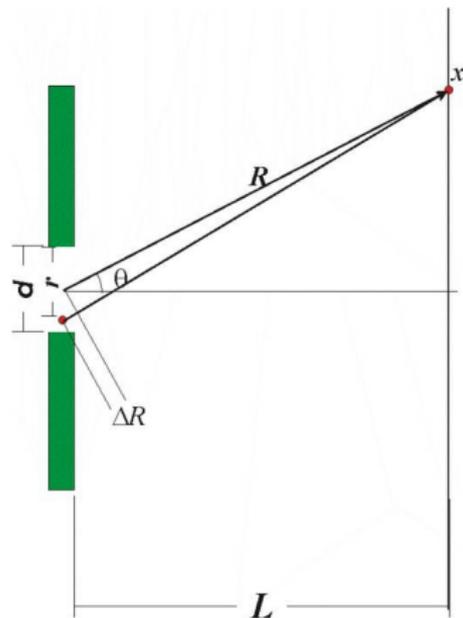
$$\begin{aligned} \hat{E}(\vec{R}) &= \frac{e^{jkR}}{R} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} E_0 e^{-jk_x x} dx \\ &= \hat{C} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} e^{-jk_x x} dx \end{aligned}$$



O estudo de uma fenda simples em 1D

- Ou seja:

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



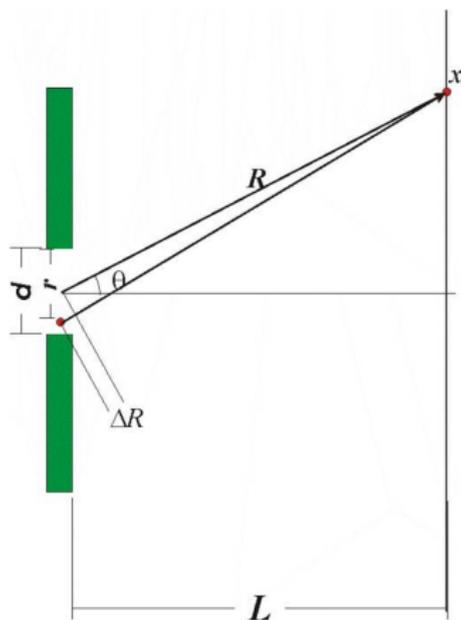
O estudo de uma fenda simples em 1D

- Ou seja:

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

- Que resulta em:

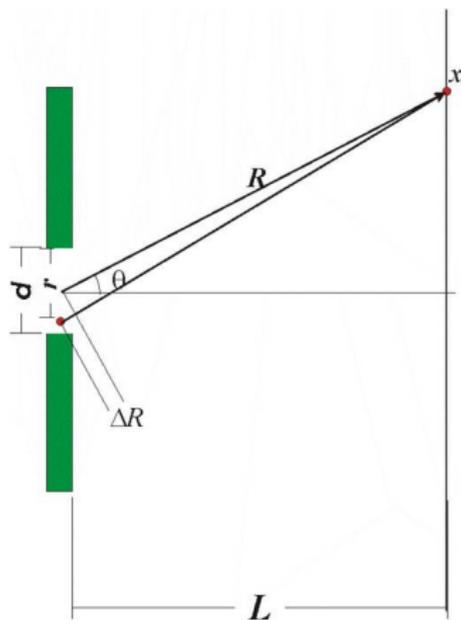
$$\hat{E}(\vec{R}) = \frac{\hat{C}}{jk_x} \left(e^{jk_x \frac{d}{2}} - e^{-jk_x \frac{d}{2}} \right)$$



O estudo de uma fenda simples em 1D

- Sabendo que:

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



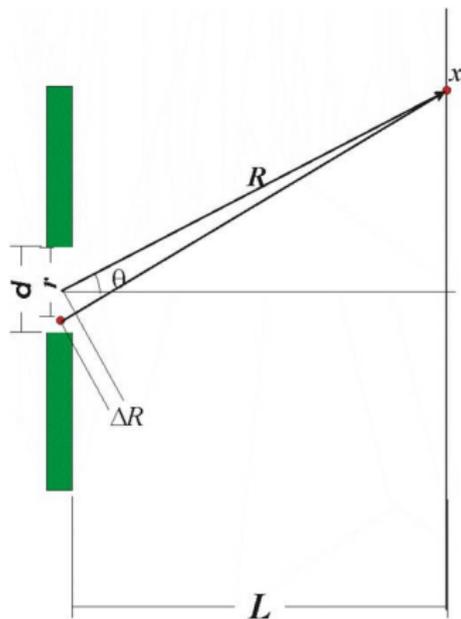
O estudo de uma fenda simples em 1D

- 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:

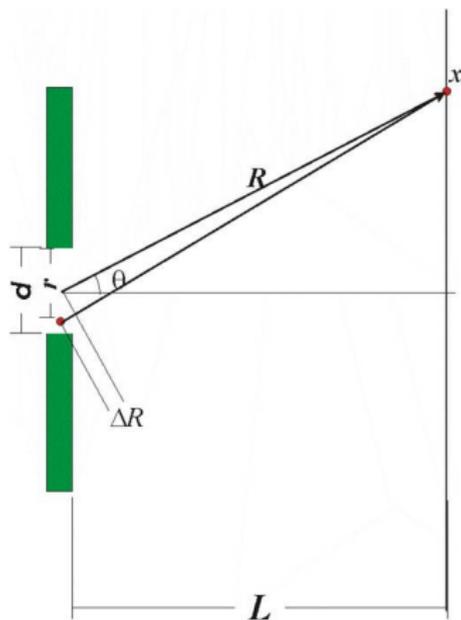
$$\text{sen}\alpha = \frac{1}{2j} (e^{j\alpha} - e^{-j\alpha})$$

- Temos que:

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

- Lembrando que:

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



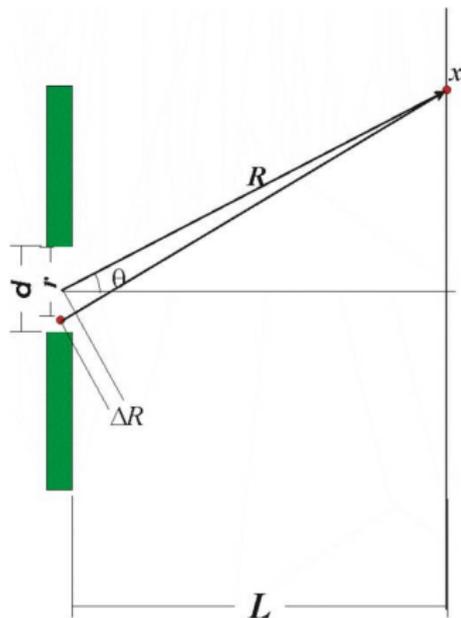
O estudo de uma fenda simples em 1D

- Com um pouco de manipulação, podemos escrever que:

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

- com:

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



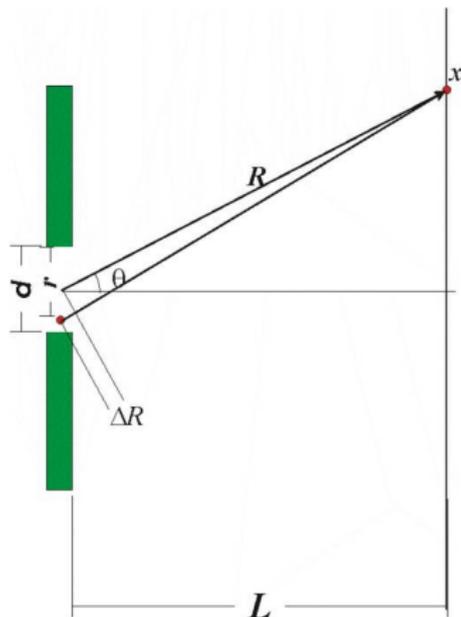
O estudo de uma fenda simples em 1D

- 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:

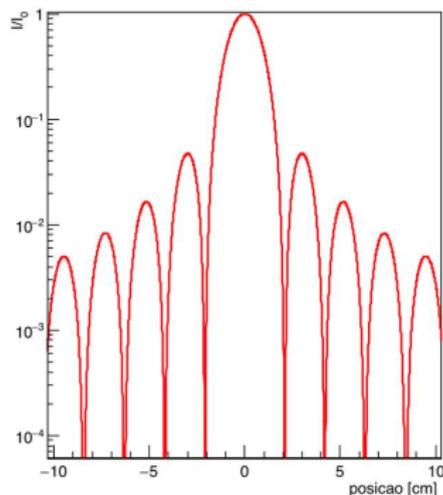
$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$$



O estudo de uma fenda simples em 1D

- Variação de intensidade com o ângulo:

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



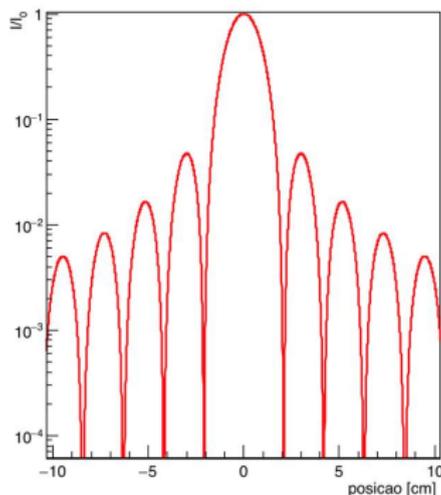
O estudo de uma fenda simples em 1D

- Variação de intensidade com o ângulo:

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

- Mínimos $\rightarrow \sin\beta = 0$:

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



O estudo de uma fenda simples em 1D

- Variação de intensidade com o ângulo:

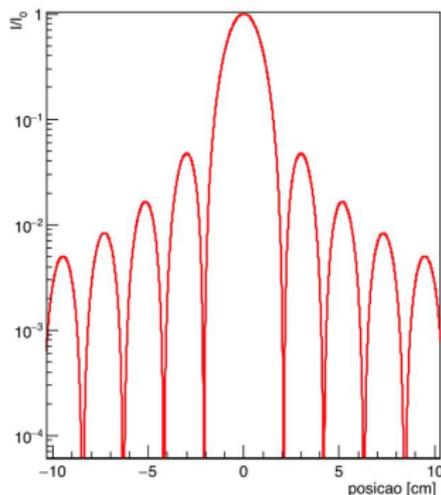
$$I \propto \hat{E}^2 = I_0 \left(\frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right)^2$$

- 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

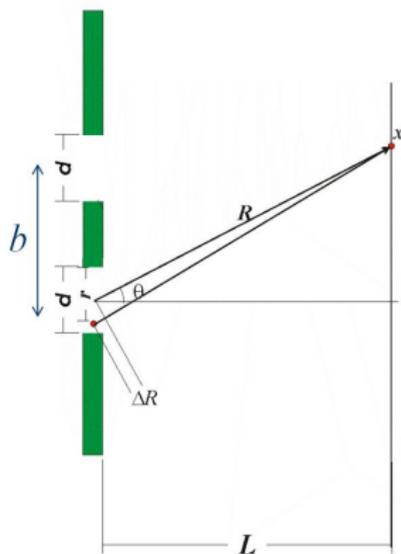
- Soma sobre duas fendas separadas de uma distância b :

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

- 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

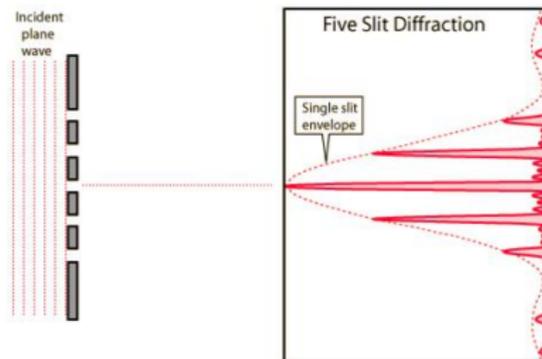
- Experimento I
- Fenda simples
- Fenda simples 1D
- Fenda dupla
- Rede de difração
- Atividades da semana 3

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

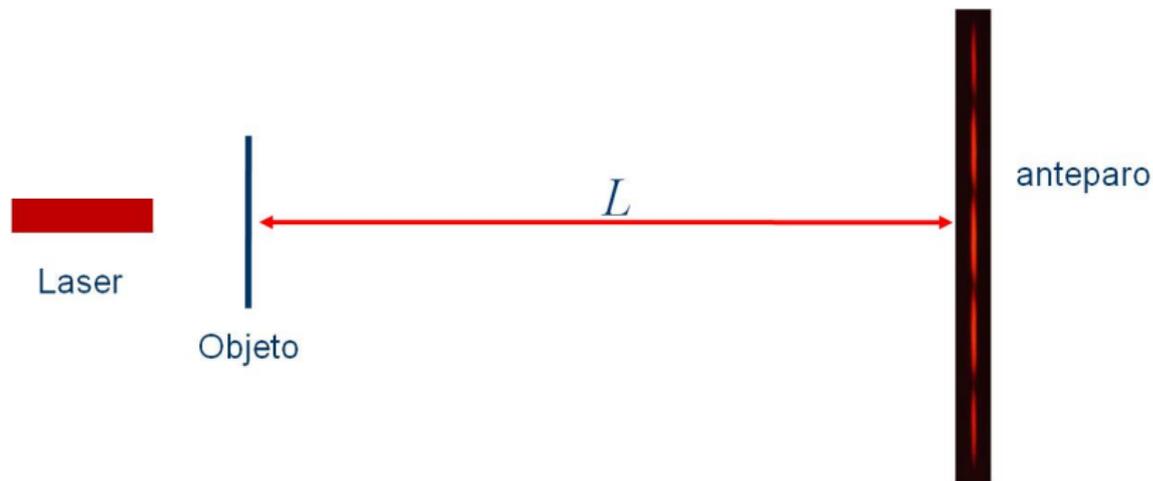
2 Experimento

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

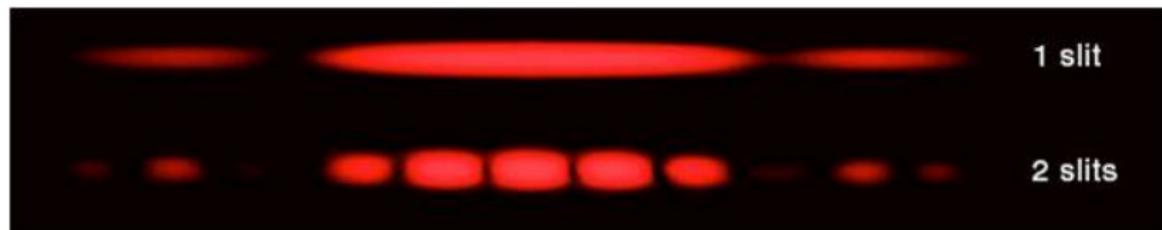
- Estudar, quantitativamente, a figura de difração de uma fenda simples, uma fenda dupla e da rede de difração
 - ▶ *Slide* de fendas
 - ▶ Anote o número do *slide*
 - ▶ Rede de difração - anote o número
 - ▶ Ver detalhes no roteiro de aula sobre quais fendas utilizar na tomada de dados

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