Aula de Revisão do Exp III

Ótica Física: Estudo dos fenômenos de Interferência, Difração e Polarização.

Questões

1. **A luz é uma onda? Que tipo de onda? Justifique com base nas observações efetuadas de efeitos de difração, interferência e polarização.**
2. A partir das posições dos mínimos de difração e interferência, quais são os tamanhos e separação das fendas estudadas? Compare aos valores nominais.
3. **No espectro de difração de uma fenda simples, discuta a aplicação do modelo de difração ideal aos dados com base em análise estatística. Compare o valor obtido para o tamanho da fenda por este método com o método de medir posições dos mínimos. Neste mesmo espectro, elabore uma expressão realista que considere as características experimentais (<u>largura do sensor, posicionamento da fenda no espectrógrafo, etc.</u>). Quais seriam os parâmetros ajustáveis nesta expressão, além da dimensão da fenda? Ajuste esta função aos dados e discuta os resultados obtidos. Compare o tamanho da fenda obtido por este novo modelo com o obtido pelo modelo anterior.**
4. Discuta a mudança de polarização da luz por uma solução de água + açúcar. A partir de uma expressão empírica para a rotação do eixo de polarização com a concentração da solução e com o comprimento atravessado pela luz ajuste os dados e estabeleça os coeficientes relevantes desta expressão. Determine a rotatividade específica do açúcar utilizado na solução. Pesquise valores típicos para vários tipos de açúcares (sacarose, frutos, dextrose, etc.) e compare aos seus resultados.

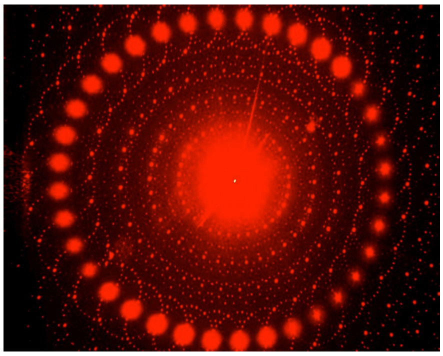
Questões

1. A ***luz é uma onda? Que tipo de onda? Justifique com base nas observações efetuadas de efeitos de difração, interferência e polarização.***

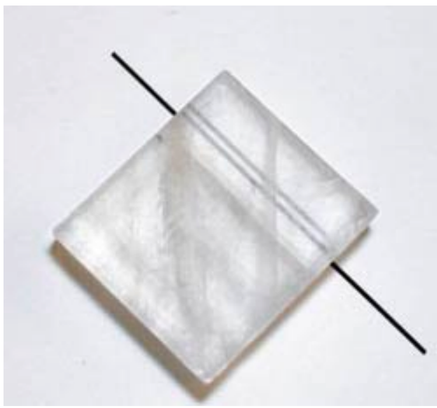
A natureza da Luz

- O estudo de trajetórias de raios luminosos, em geral, é bem descrita pela ótica geométrica
  - Lentes, espelhos, etc.
- Por conta disto, durante muito tempo, a teoria para a luz de Newton foi bem aceita
- Porém, as experiências de Young e Fresnel no início dos anos de 1800 revelaram os efeitos de interferência e difração da luz

A natureza da Luz

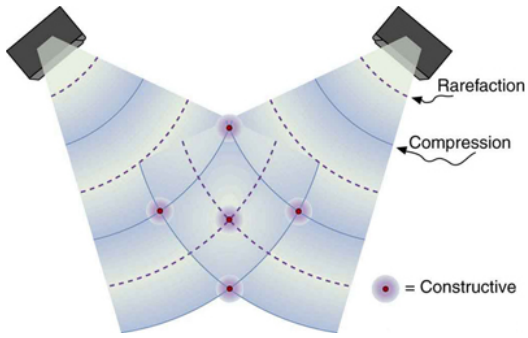


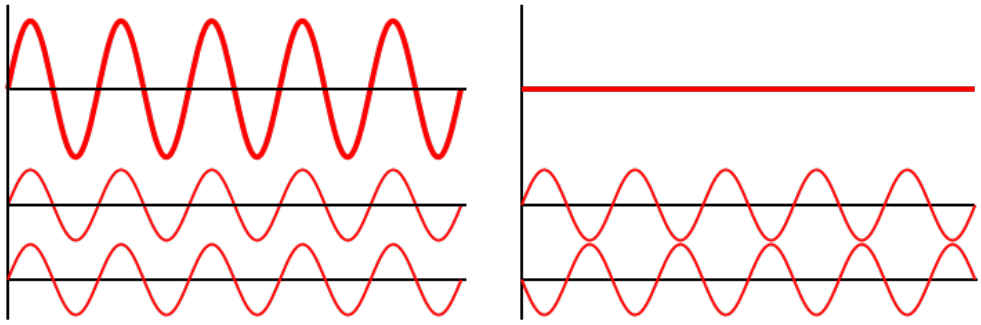
- Interferência e difração
  - A luz se comporta como uma onda
- Que tipo de onda?
  - A observação de fenômenos de polarização indicam que a luz é uma onda transversal
    - Erasmus Bartholin, 1669 – Calcita
    - Thomas Young & Augustin-Jean Fresnel – duas componentes com diferentes velocidades
  -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



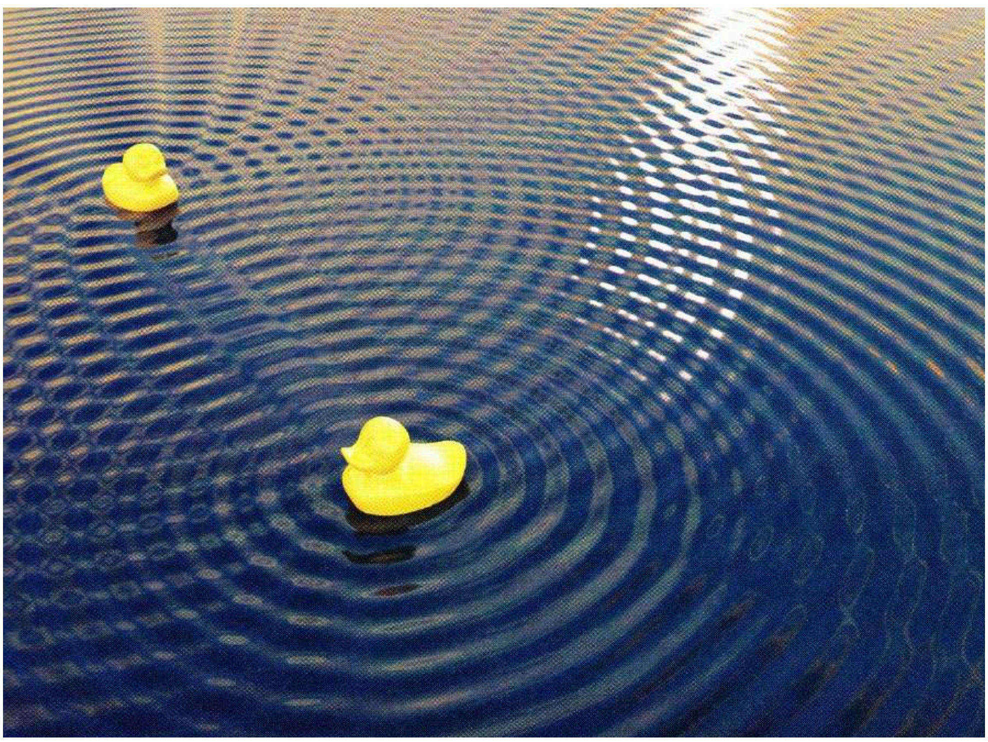
Interferência

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



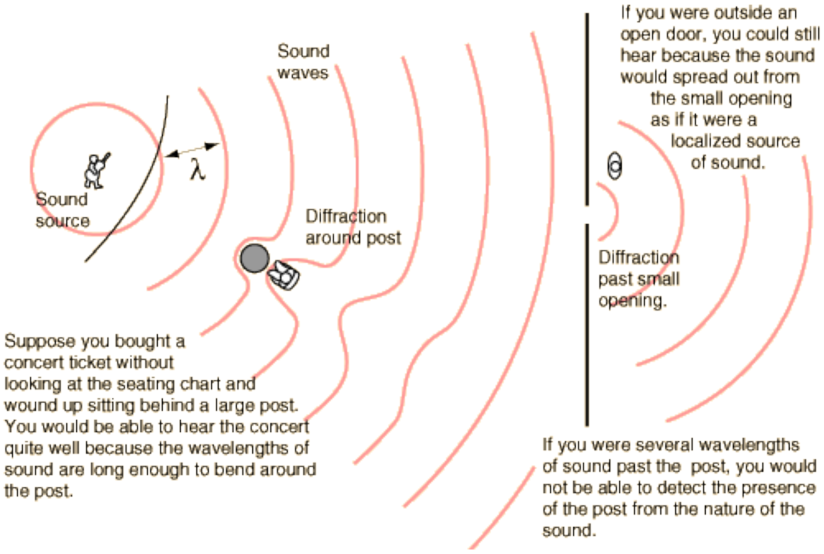


Interferência



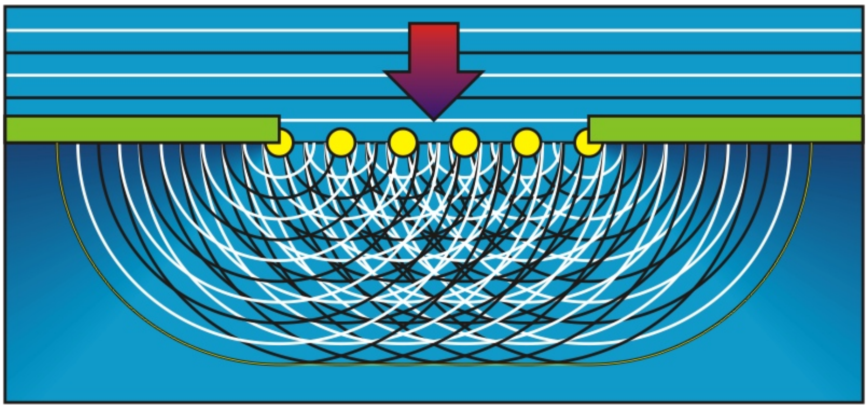
Difração: o que é?

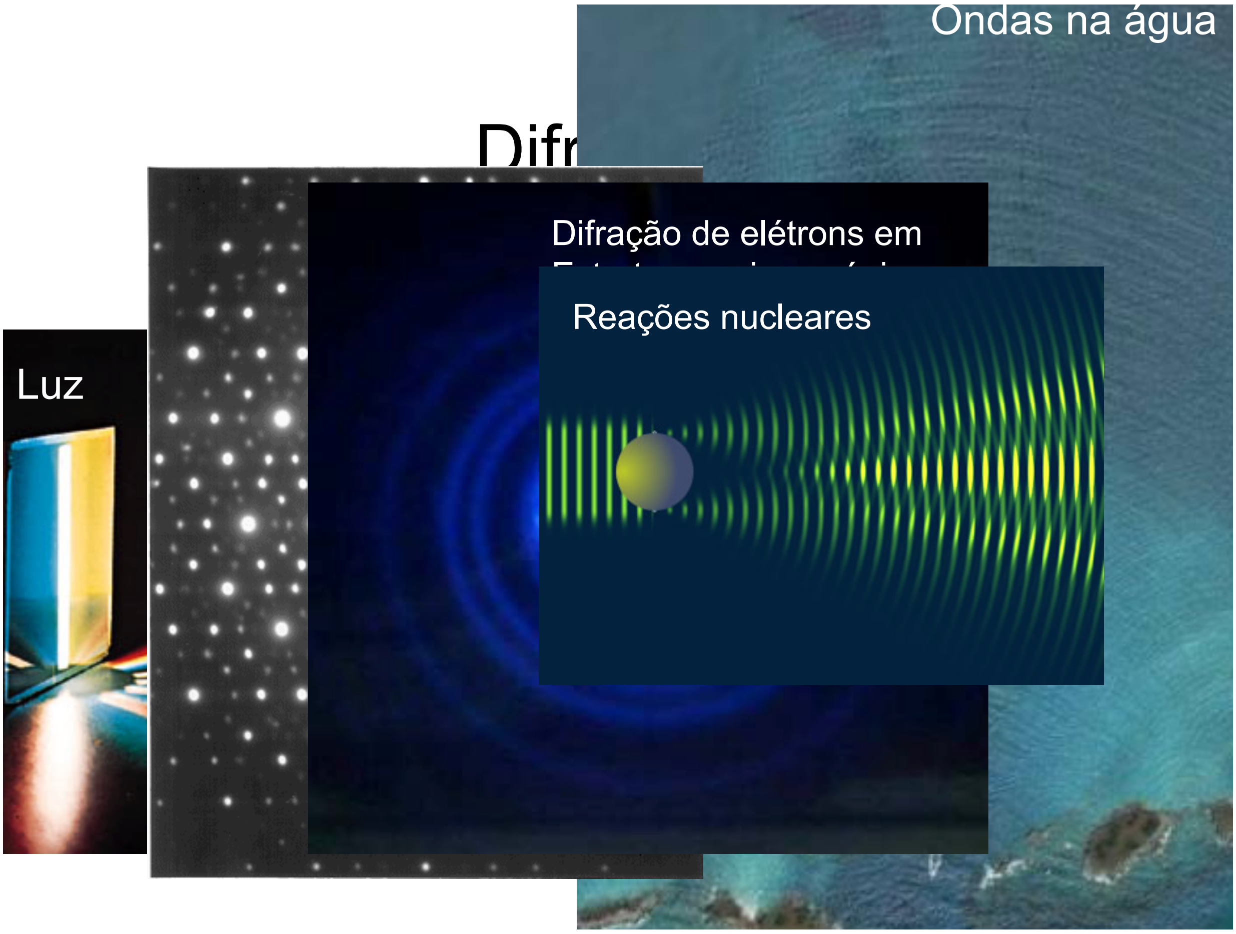
- Como um espectador, atrás de uma porta, por exemplo, é capaz de ouvir um som mas não é capaz de enxergar a pessoa falando?



Explicando o fenômeno de difração

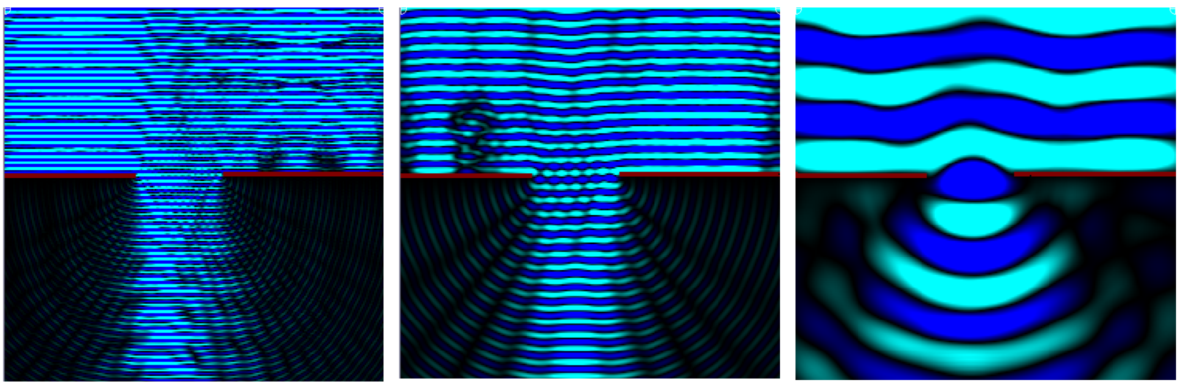
- Princípio de Huygens-Fresnel
  - Cada ponto de uma frente de onda (não obstruído) funciona como uma fonte emissora puntiforme, ou seja, esférica
  - A onda resultante consiste da superposição de todas as ondas esférica, levando em consideração a fase entre elas



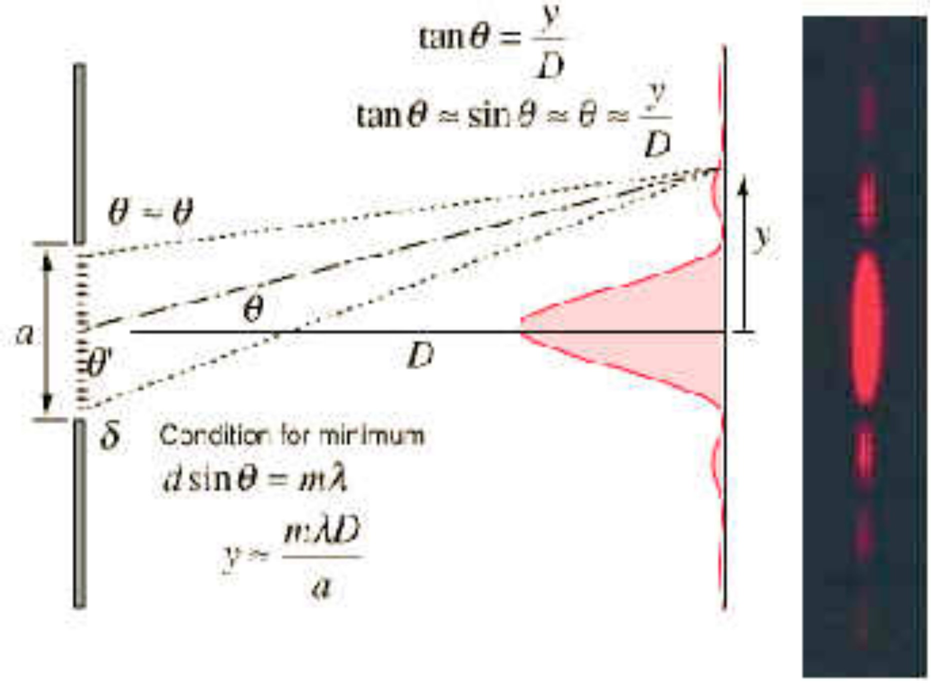


Dependência das dimensões dos obstáculos

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



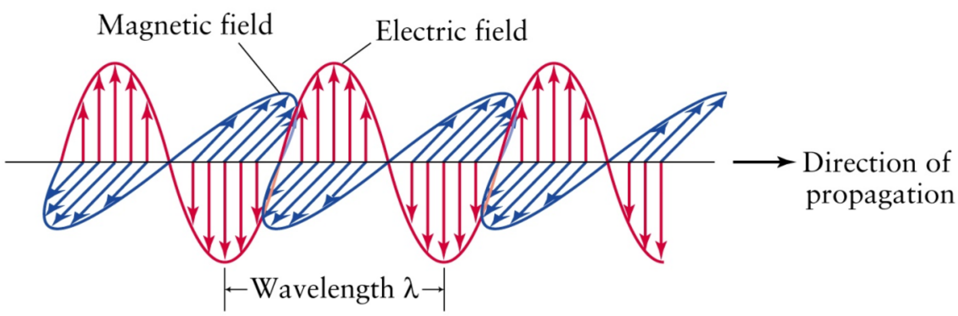
Fenda Simples



Questão 2: ***A partir das posições dos mínimos de difração e interferência, quais são os tamanhos e separação das fendas estudadas? Compare aos valores nominais.***

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

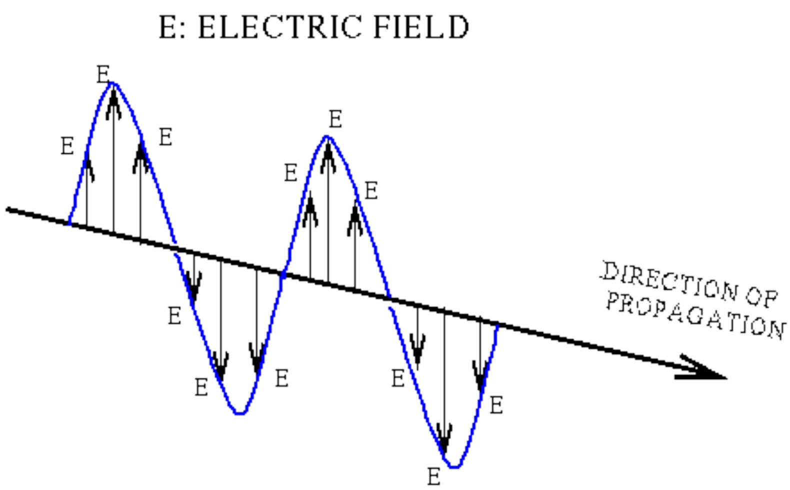


Polarização

- Efeito característico de ondas transversais
- No caso da luz, a direção de polarização é aquela do campo elétrico
- Tipos de polarização:
  – Linear
  – Circular ou elíptica
  – Não polarizada

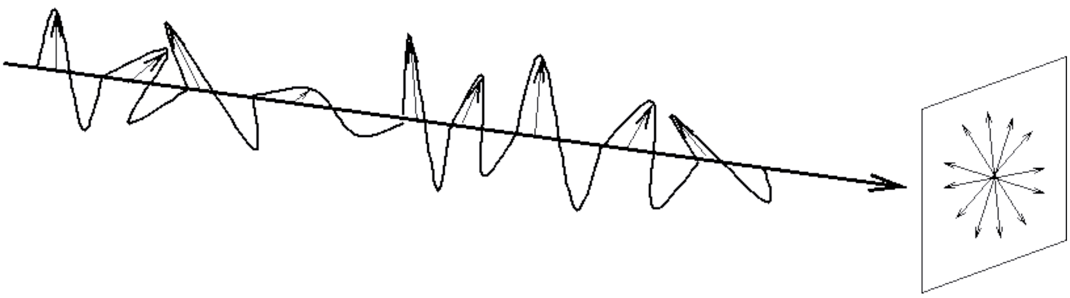
Polarização linear

- É aquela na qual a direção do campo elétrico não se altera com o tempo, somente a sua intensidade



Luz não polarizada

- Tanto a intensidade como a direção do campo elétrico variam de forma incoerente no tempo
- Contudo, podemos sempre escrever que o campo elétrico possui uma componente j e i

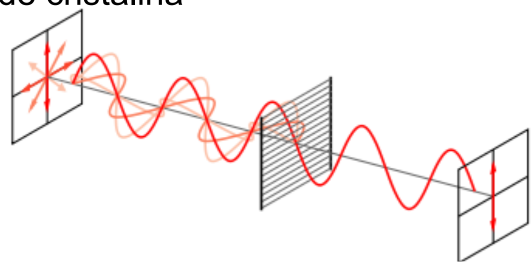


O Polarizador

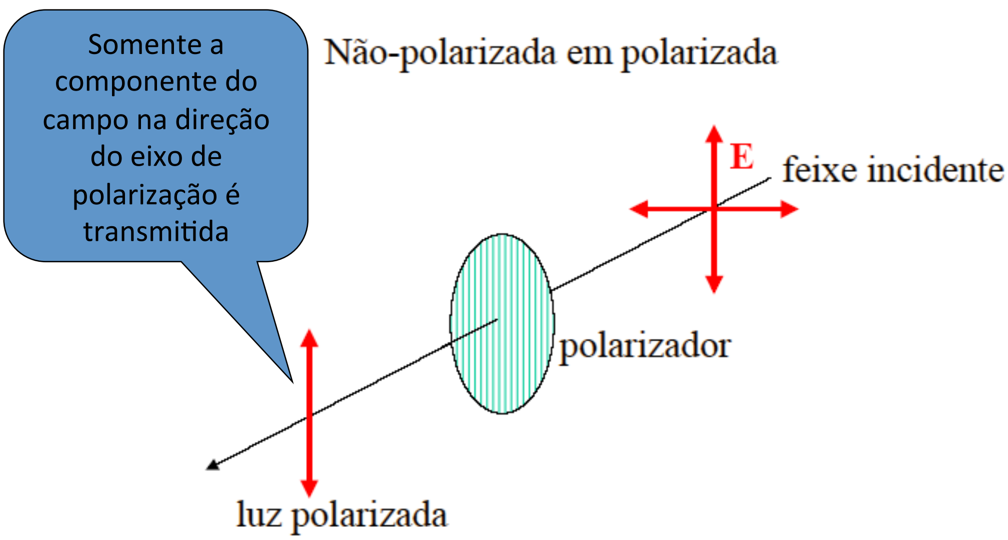
- Instrumento óptico capaz de polarizar a luz em uma dada direção pré-definida.
- Todo polarizador é caracterizado por um eixo de polarização
  – Este eixo representa a direção da componente do campo elétrico que será transmitida
- Vários tipos de polarizador
  – Absorção
    - Absorve a componente dos campos EM em uma dada direção
  – Birrefringentes
    - O índice de refração pode depender da polarização da luz
  – Reflexão
    - A luz refletida, dependente do ângulo, favorece a polarização em uma direção

Polarizador por absorção

- O mais simples é o de grade de fios
  - O campo elétrico na direção dos fios faz com que os elétrons livres se movam. O movimento desses elétrons faz com que essa componente seja absorvida
- Dicroismo
  - Alguns cristais possuem absorção diferente para cada componente da luz incidente, dependendo da estrutura da rede cristalina

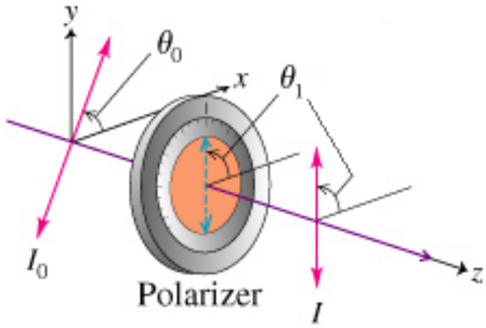


Efeito de um polarizador na luz



Lei de Malus

- Lei de Malus
  - Polarizador colocado na frente de uma luz, com seu eixo em um ângulo q em relação ao campo elétrico incidente



$$E = E_0 \cos\theta$$

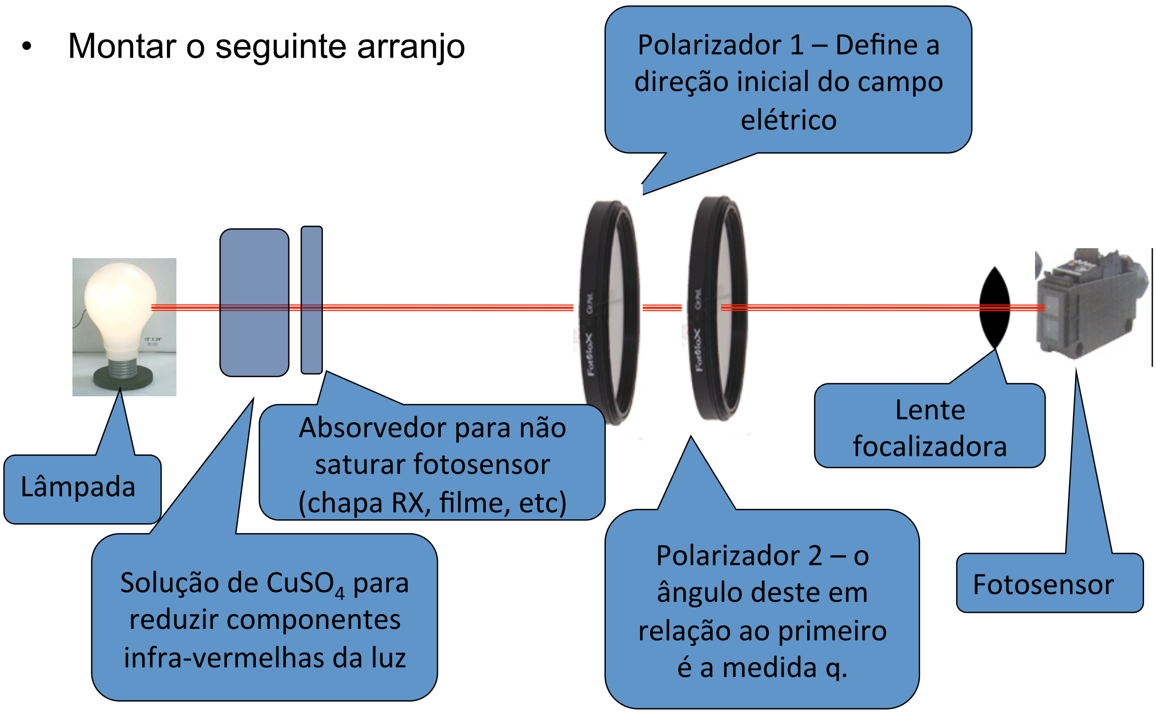
- Intensidade luminosa é proporcional ao quadrado do campo elétrico

$$I = I_0 \cos^2(\theta)$$

Questão 1

Arranjo experimental: Lei de Malus

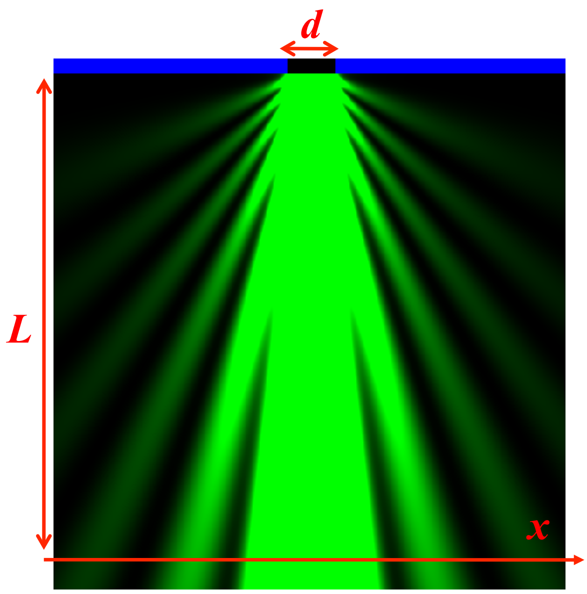
- Montar o seguinte arranjo



Questao 3 – Fenda Simples em maiores detalhes…

O estudo de uma fenda simples

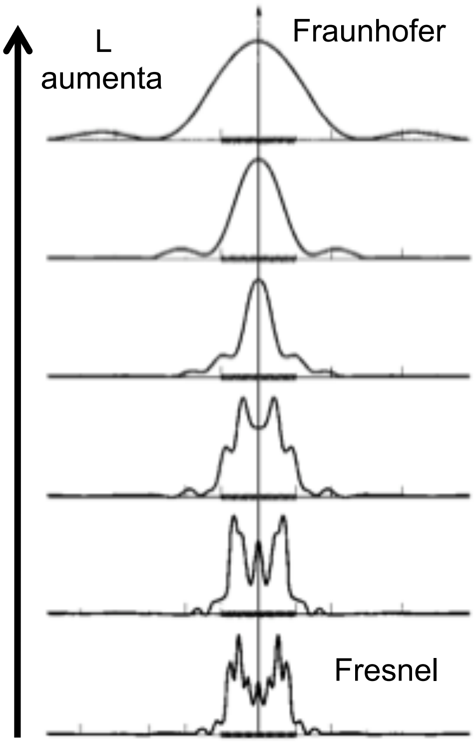
- Seja uma fenda de largura d, comparável com o comprimento de onda l.
- Se colocarmos um anteparo a uma distância L, muito maior que d(difração de Fraunhofer), qual é a intensidade luminosa ao longo do eixo x?



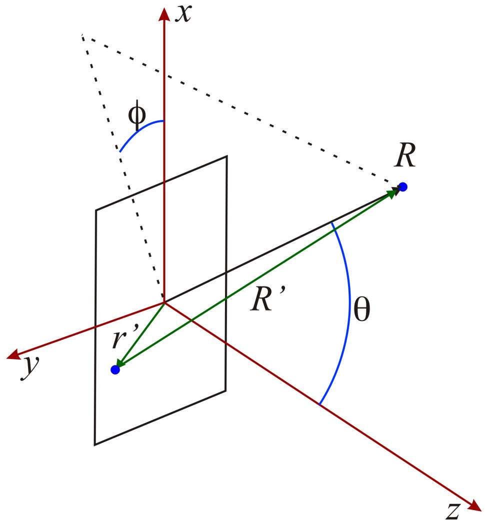
http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_diffraction
http://en.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer_diffraction

Porque L >> 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



Generalizando a difração de Fraunhofer



- Campo elétrico incidente no objeto

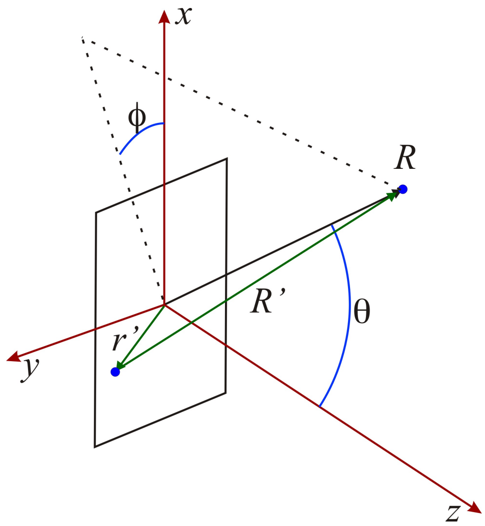
$$\hat{E} = E_0 e^{j\left(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t\right)}$$

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



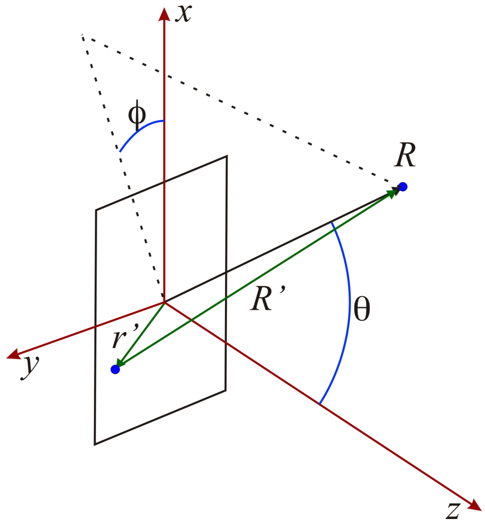
- Na posição R, o campo devido ao ponto em r' vale:

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

- O campo total é dado por:

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

Generalizando a difração de Fraunhofer



- Sabemos que, para grandes distâncias:

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

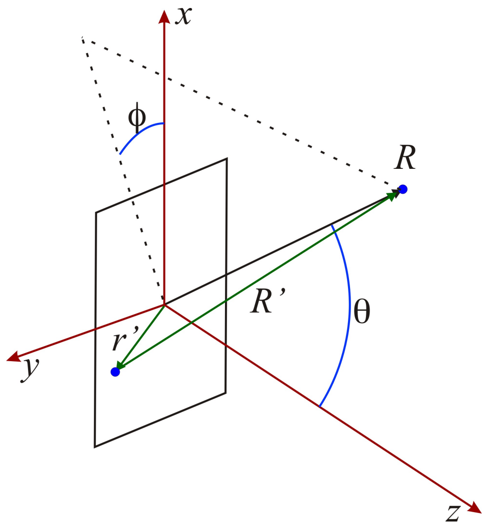
$$\vec{R}' = \vec{R} - \vec{r} = R\hat{r} - \vec{r}'$$

- Assim:

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

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

Generalizando a difração de Fraunhofer



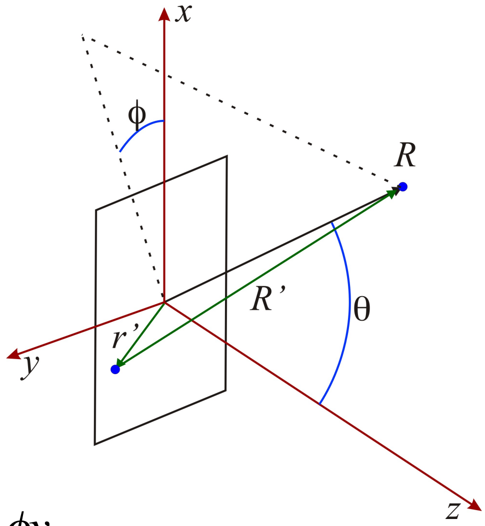
- Na condição de Fraunhofer

$$R' = R \text{ (módulo)}$$

- Assim:

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

Generalizando a difração de Fraunhofer



- Quem é $\vec{k}\cdot\vec{r}'$?

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

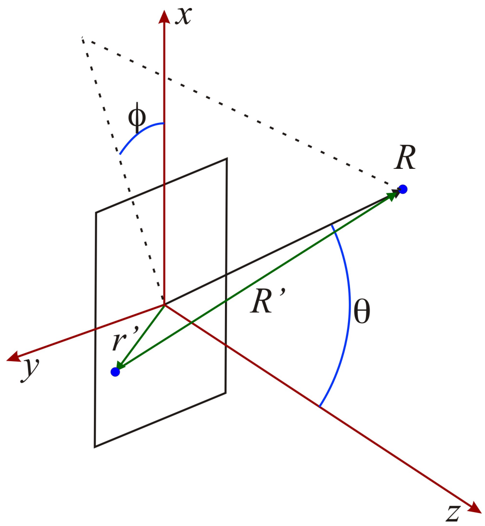
- Assim:

$$\vec{k}\cdot\vec{r}' = k\sin\theta\cos\phi x + k\sin\theta\sin\phi y$$

- Definindo

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

Generalizando a difração de Fraunhofer



- A expressão para o campo

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

- Torna-se:

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

Lembrando: Séries de Fourier

- Transformada de fourier em 2D

$$f(x,y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{nm} e^{j(nx+my)}$$

$$c_{nm} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x,y) e^{-j(nx+my)} dxdy$$

- No caso da difração de Fraunhofer

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

Difração e transformada de Fourier

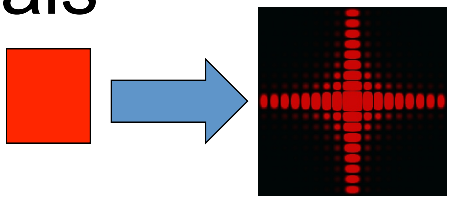
- A figura de difração está relacionada à transformada de Fourier do objeto iluminado

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

A transformada de Fourier se dá no campo elétrico. Contudo, medimos intensidade luminosa, que é proporcional a E^2.

Difração

Freqüências espaciais



- A intensidade luminosa em uma dada posição está relacionada às componentes da T.F. para cada freqüência espacial

$$\hat{E}(\vec{R}) \to E(R_x, R_y) \to E(k_x, k_y)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \begin{cases} k_x = k\sin\theta\cos\phi \\ k_y = k\sin\theta\sin\phi \end{cases}$$

O estudo de uma fenda simples em 1D

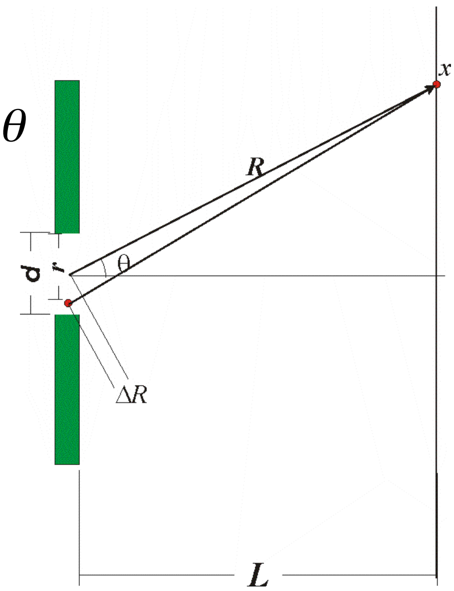
- O problema em 2D se resume a uma dimensão:

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

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

$$\hat{E}(\vec{R}) = \frac{e^{jkR}}{R}\int_{-d/2}^{d/2} E_0 e^{-jk_x x}\,dx$$

$$= \hat{C}\int_{-d/2}^{d/2} e^{-jk_x x}\,dx$$



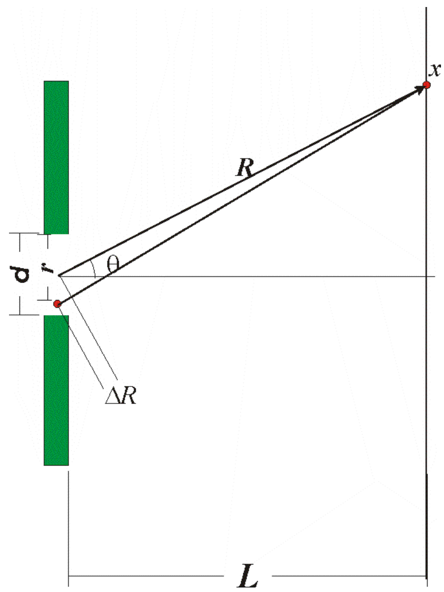
O estudo de uma fenda simples em 1D

- Ou seja

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

- 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:

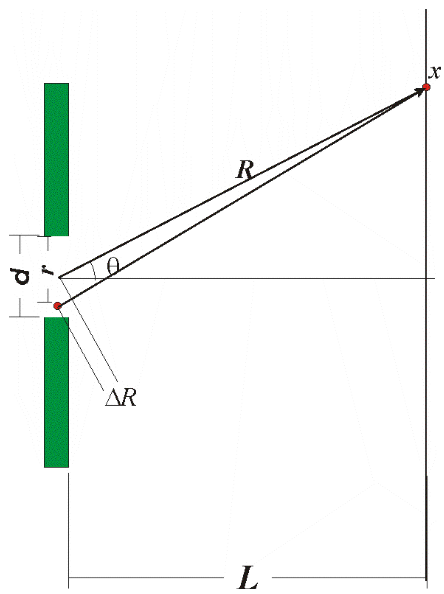
$$\sin\alpha = \frac{1}{2j}\left(e^{j\alpha} - e^{-j\alpha}\right)$$

- Temos que:

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

- Lembrando que:

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

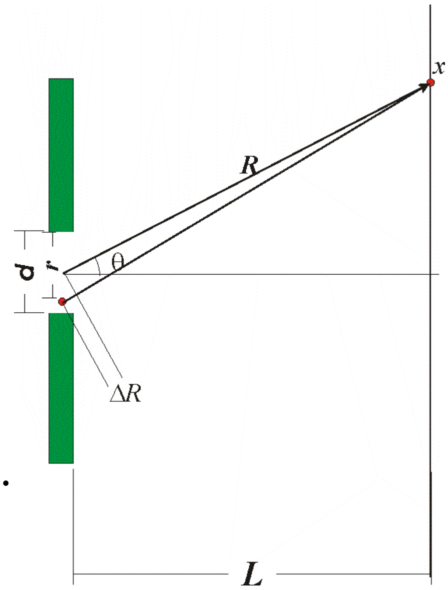


O estudo de uma fenda simples em 1D

- Com um pouco de manipulação, podemos escrever que:

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

$$\text{com } \beta = \frac{\pi d}{\lambda}\sin\theta, \qquad \hat{A} = const.$$

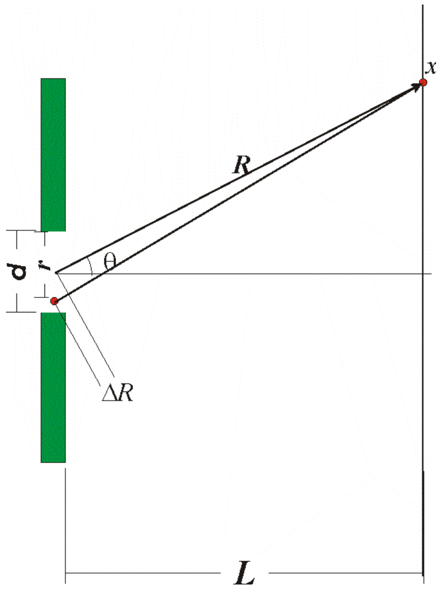


O estudo de uma fenda simples em 1D

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

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

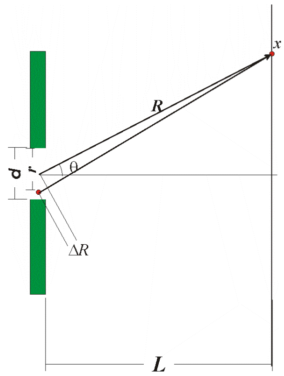
$$\text{com } \beta = \frac{\pi d}{\lambda}\sin\theta$$

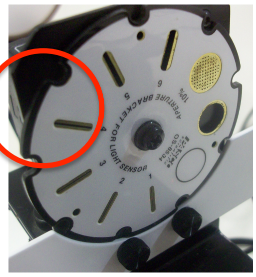


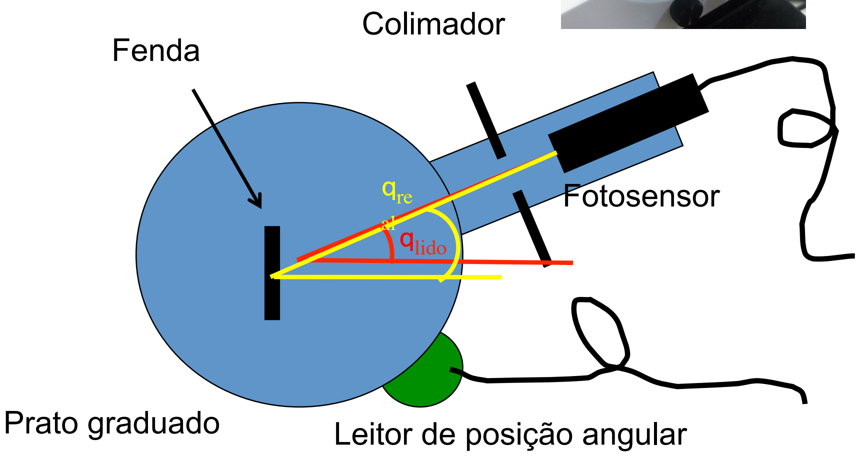
Existe alguma correção que deveria ser feita?

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

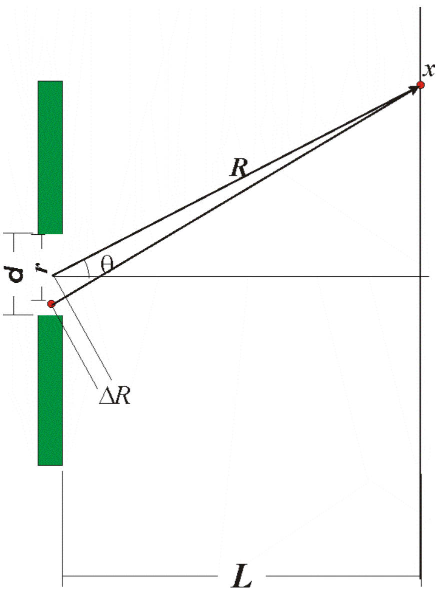
$$\text{com } \beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta$$

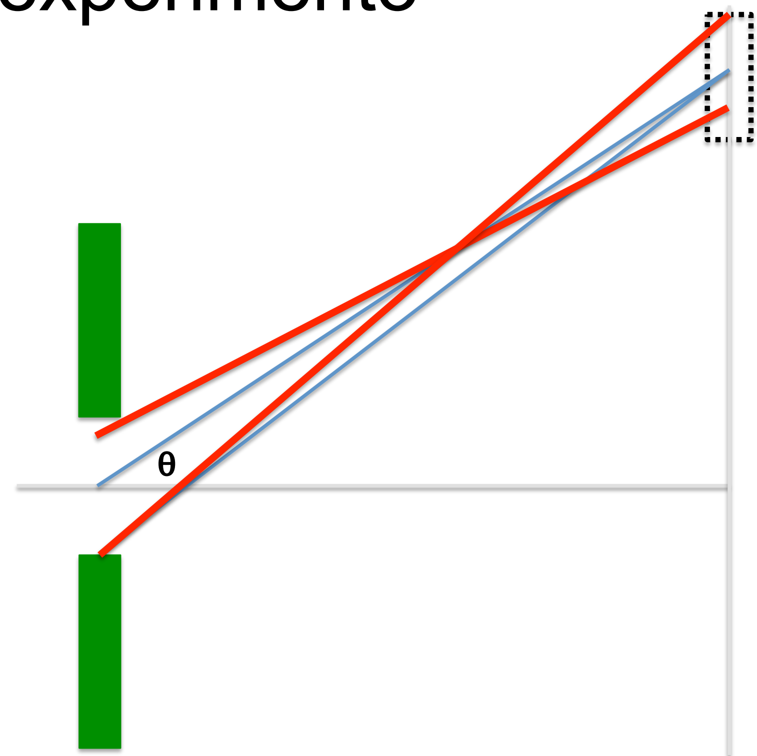






Difração no experimento





Como implementar estas correções?

- Largura do colimador
  - Supondo que o colimador tenha uma abertura angular de δ.
  - A luz medida no sensor corresponde à soma das intensidades sobre todos os ângulos entre θ – δ/2 até θ + δ/2.

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin(b \sin\theta)}{b \sin\theta} \right)^2$$

$$b = \frac{\pi d}{\lambda}$$

$$I(\theta) = I_0 \int_{\theta-\delta/2}^{\theta+\delta/2} \left(\frac{\sin(b \sin\alpha)}{b \sin\alpha} \right)^2 d\alpha$$

Como consideramos a abertura do detector na expressão teórica para a difração de uma fenda simples?

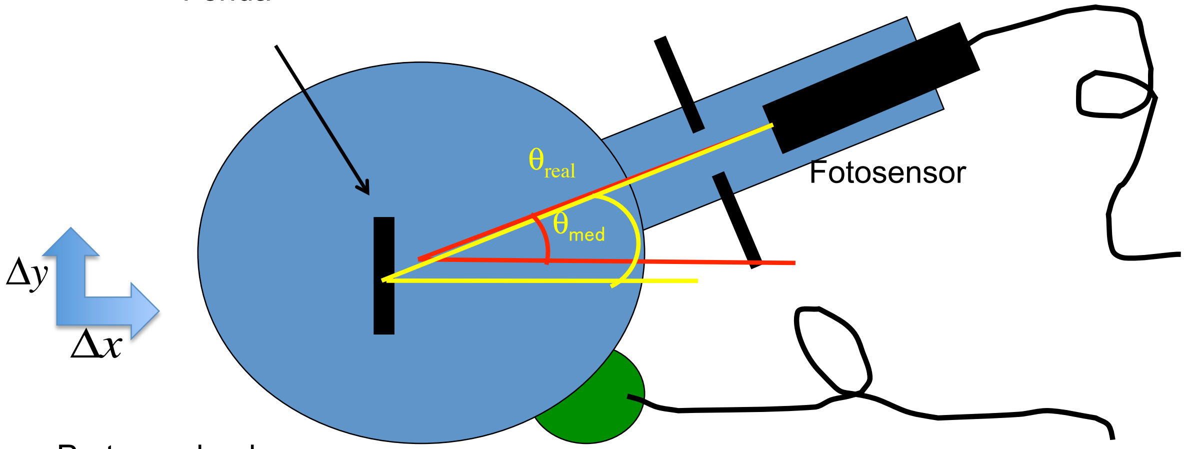
$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin(b \sin\theta)}{b \sin\theta} \right)^2$$

$$b = \frac{\pi d}{\lambda}$$

$$I(\theta) = I_0 \int_{\theta-\delta/2}^{\theta+\delta/2} \left(\frac{\lambda \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\alpha \right)}{\pi d \sin\alpha} \right)^2 d\alpha =$$

$$= I_0 \left(\frac{\lambda}{\pi d} \right)^2 \int_{\theta-\delta/2}^{\theta+\delta/2} \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\alpha \right)}{\sin\alpha} \right)^2 d\alpha$$

Corrigindo a posição da Fenda



$$tg(\theta_{real}) = \frac{L}{L + \Delta x} tg(\theta_{med})$$

Para Correções apenas em x, o valor de $\Delta y = 0$, nesse exemplo

Questão 4: Mudança de polarização da luz por uma solução de água + açúcar.

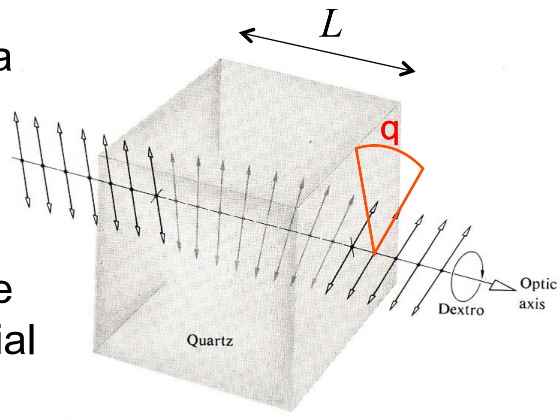
Atividade Ótica

- Seja um material de espessura L.
- Qual o ângulo q de giro da polarização?

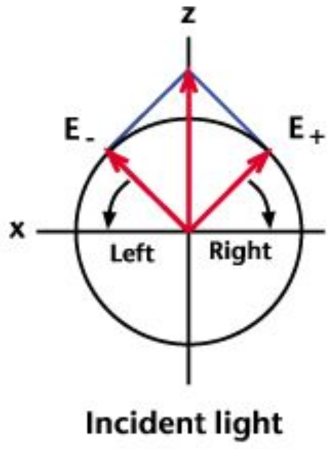
- Sendo b (rad/cm) a capacidade de rotação da polarização (constante)

$$\theta = \beta L$$

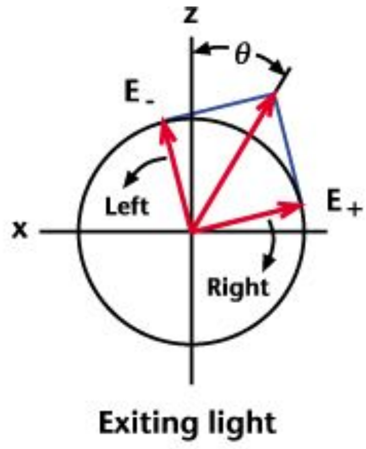
- A constante b depende da estrutura do material



Luz Linearmente Polarizada



Polarização
Vertical



Polarização
Deslocada

Objetivos da aula de hoje

- Estudar a atividade óptica de uma solução de açúcar

$$\theta = \beta L \quad \Rightarrow \quad \beta = \alpha C^{\gamma} \quad \Rightarrow \quad \theta = \alpha C^{\gamma} L$$

- No caso da solução de açúcar, a atividade óptica depende fortemente da concentração de açúcar na água

Objetivos da aula de hoje

- Mostrar que a mudança na direção da polarização de um feixe linearmente polarizado depende:

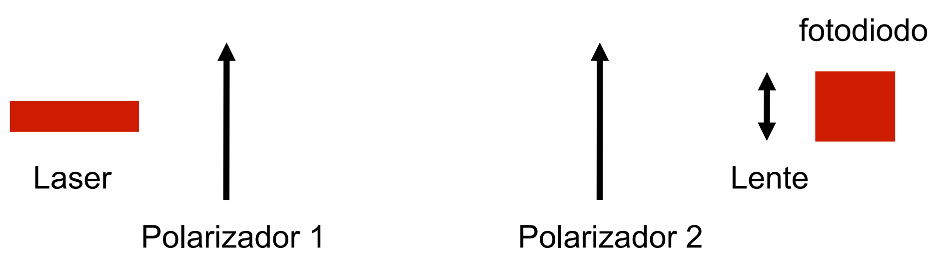
$$\theta = \alpha C^{\gamma} L$$

  - Linearmente da concentração de açúcar (g = 1)
  - Linearmente do comprimento de solução (L)
  - Obter a constante de proporcionalidade (a)

Arranjo experimental

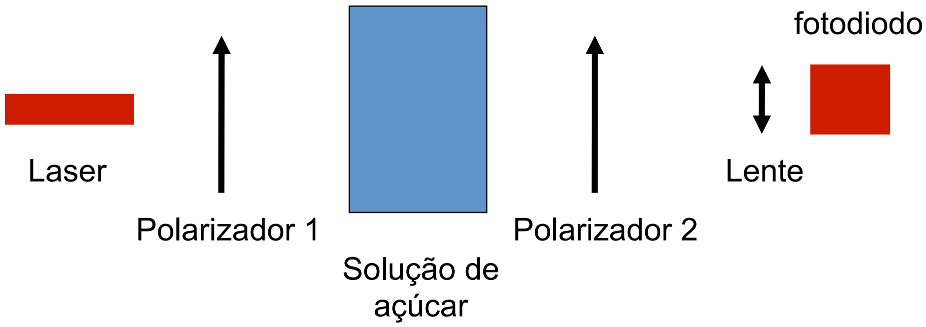
Solução de açúcar

- Montar o arranjo do laser + polarizador 1 + polarizador 2 + fotodiodo
- Girar o polarizador 2 até a intensidade no fotodiodo ser mínima (90º)



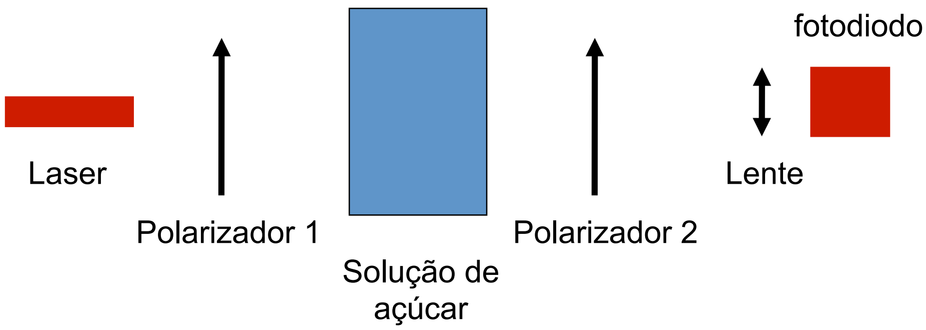
Arranjo experimental

- Colocar a solução de açúcar
- Como a solução alterou a polarização, a intensidade no fotodiodo muda

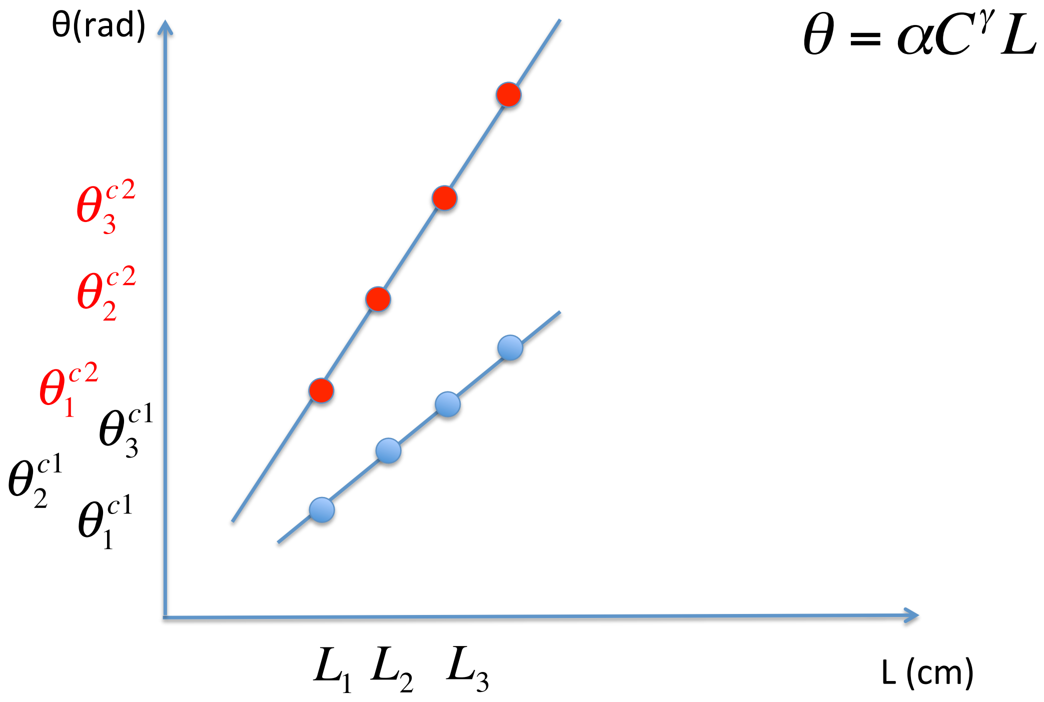


Arranjo experimental

- Girar o polarizador 2 até que a intensidade volte a ser mínima
- Medir o quanto precisou girar o polarizador 2. Este é o ângulo q.



Variamos o L e obtemos o ângulo do vetor de Polarização



Variamos a Concentraçao para um valor de L “ Fixo”