

*Alexandre Suaide*

Ed. Oscar Sala

sala 246

ramal 7072

**Física Experimental IV - 11ª aula**  
**<http://www.dfn.if.usp.br/~suaide/>**

# Experiência III - Polarização da luz

- Objetivos – Estudar o fenômeno de polarização da luz
  - Aula 1 – Lei de Malus e polarização por reflexão
  - Aula 2 – Atividade óptica de elementos
    - Estudo da birrefringência em soluções de açúcares

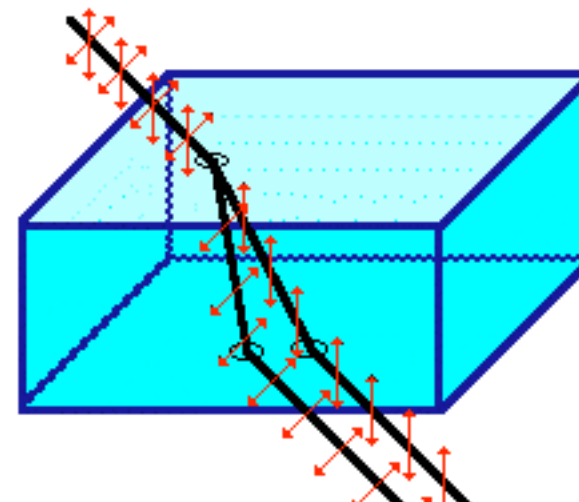
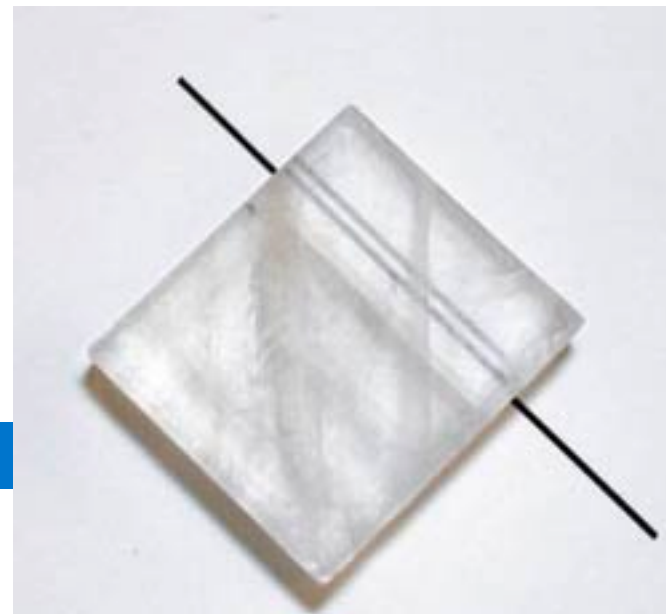
# A natureza da Luz

- O estudo de trajetórias de raios luminosos, em geral, é bem descrita pela óptica 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



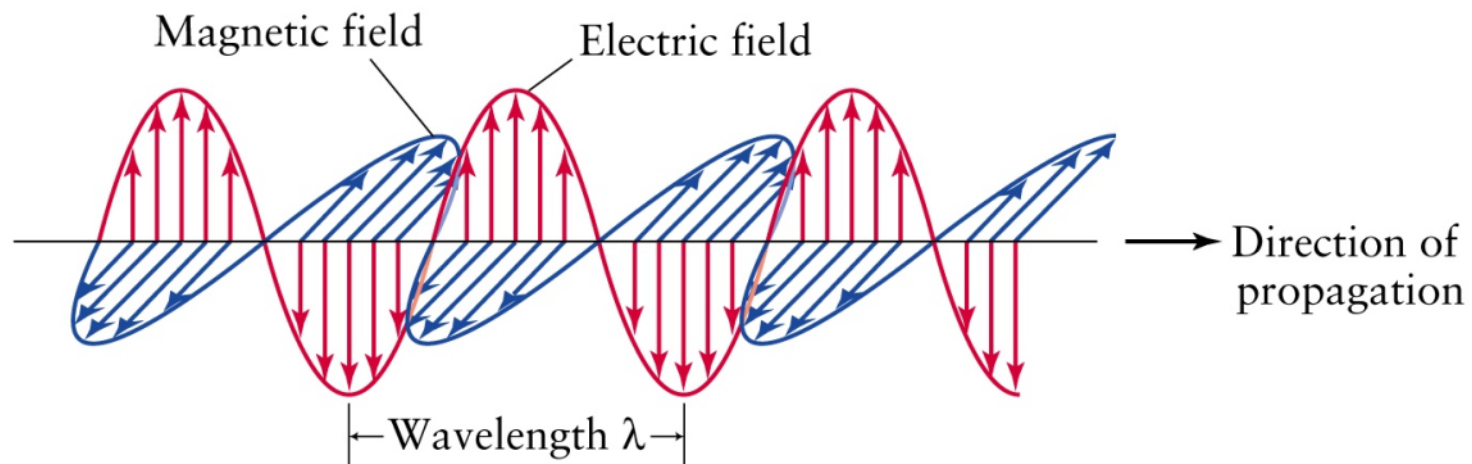
# A natureza da Luz

- 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



# 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

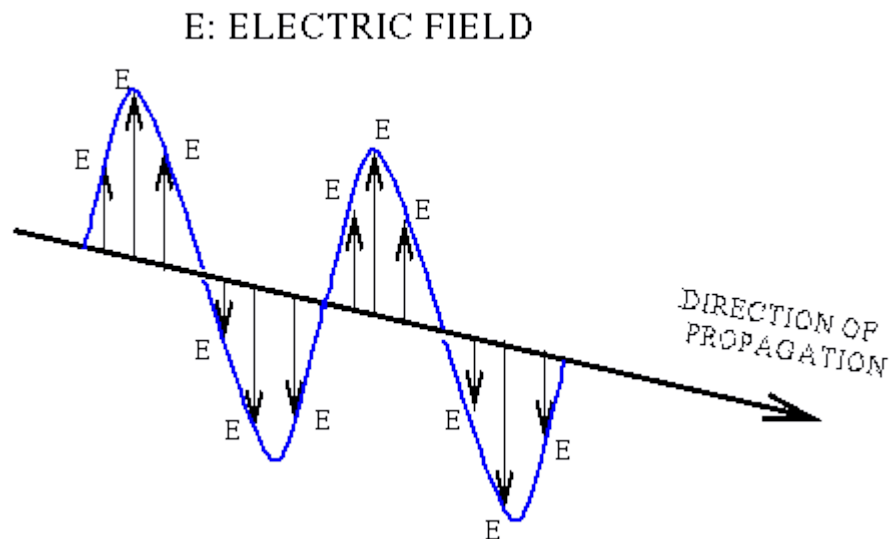


# Polarização da luz

- 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



- No caso de uma onda de frequência bem definida, podemos escrever o campo elétrico como:

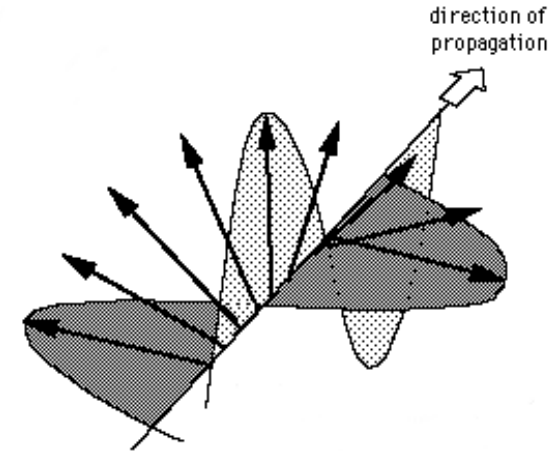
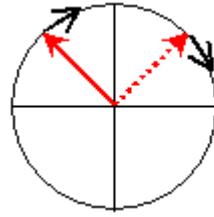
$$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{j}$$

$$k = 2\pi / \lambda$$

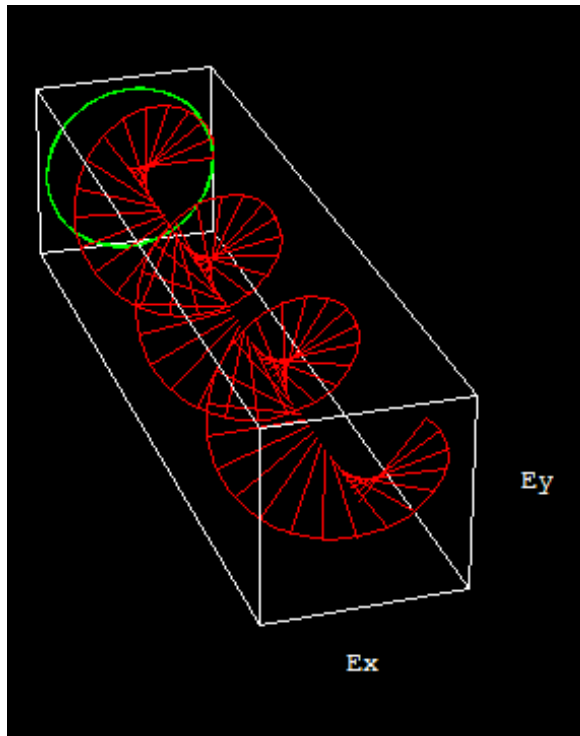
$$\omega = 2\pi f$$



# Polarização circular



- É aquela na qual a direção do campo elétrico depende do tempo mas a intensidade é constante



- No caso da polarização circular, podemos escrever o campo elétrico como a superposição de dois campos linearmente polarizados, defasados de  $90^\circ$ , ou seja:

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \begin{bmatrix} \cos(kz - \omega t) \hat{j} \\ + \\ \text{sen}(kz - \omega t) \hat{i} \end{bmatrix}$$

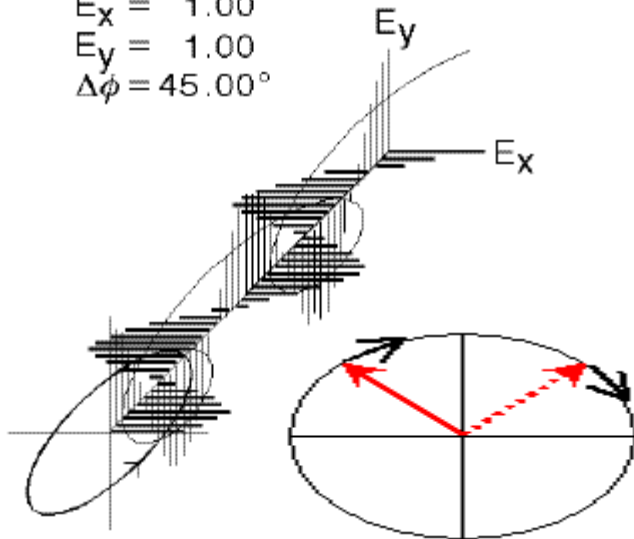


# Polarização elíptica

- É aquela na qual a direção do campo elétrico depende do tempo, bem como a sua intensidade

## Right-hand Elliptical Polarization

$$\begin{aligned} E_x &= 1.00 \\ E_y &= 1.00 \\ \Delta\phi &= 45.00^\circ \end{aligned}$$



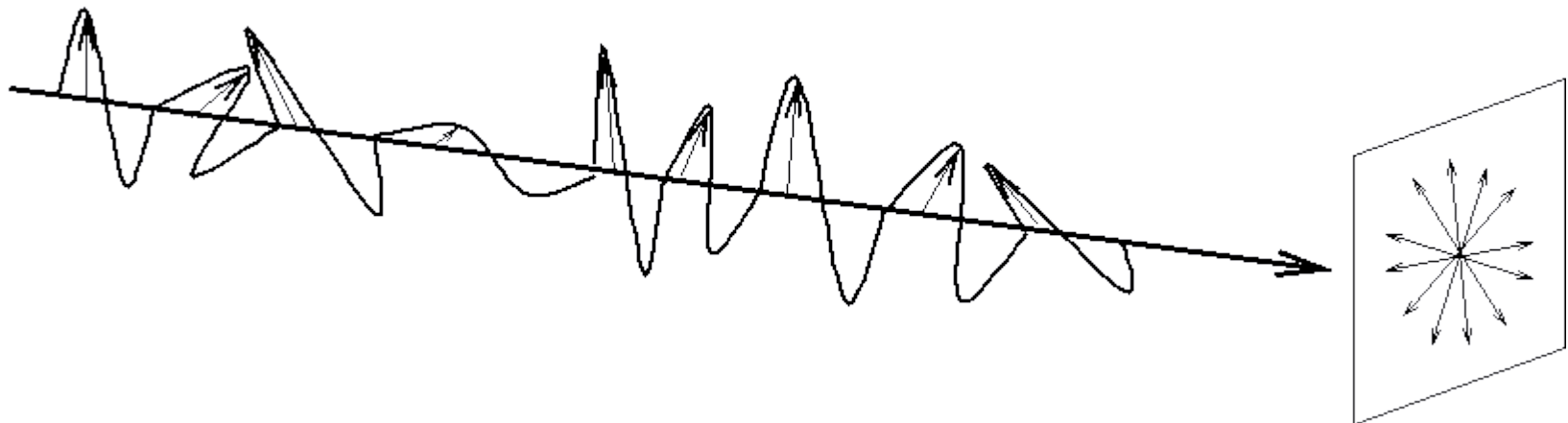
- No caso da polarização elíptica, podemos escrever o campo elétrico como a superposição de dois campos linearmente polarizados, defasados de  $90^\circ$ , ou seja:

$$\begin{aligned} \vec{E}(z,t) &= E_0^j \cos(kz - \omega t) \hat{j} \\ &+ E_0^i \sin(kz - \omega t) \hat{i} \end{aligned}$$

# 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  $i$

$$\vec{E}(z,t) = E(z,t) \left( \cos(\theta_{\text{aleatório}}(z,t)) \hat{j} + \sin(\theta_{\text{aleatório}}(z,t)) \hat{i} \right)$$



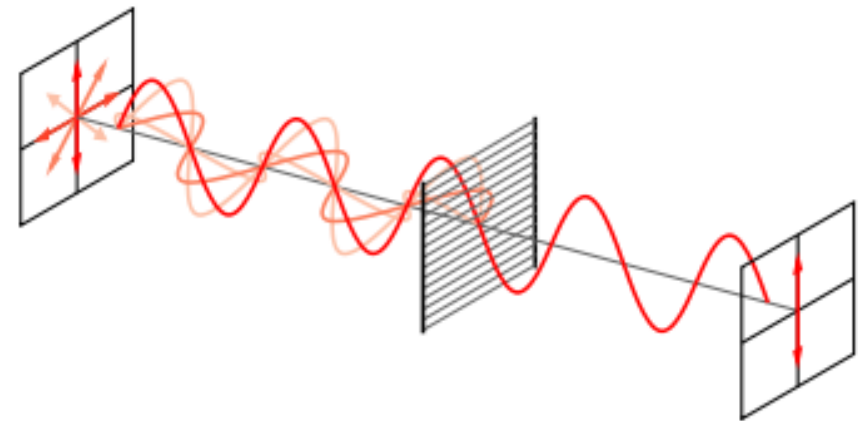
# O Polarizador



- 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

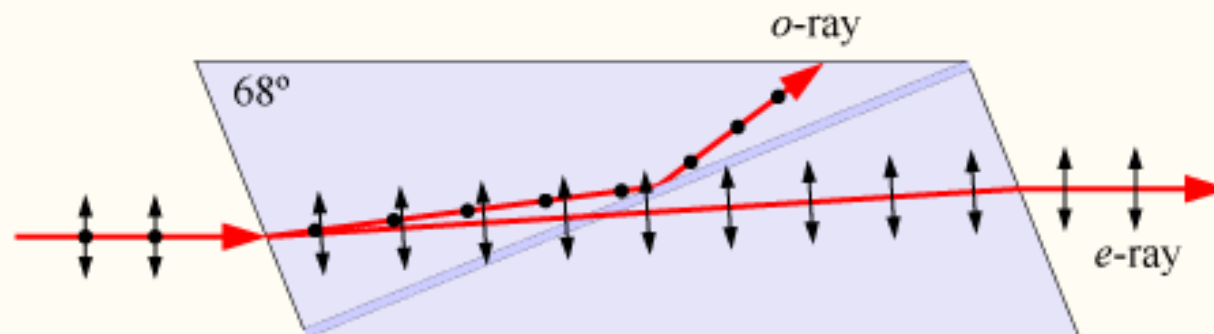
# Polarizador por absorção

- 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
- Dicroísmo
  - Alguns cristais possuem absorção diferente para cada componente da luz incidente, dependendo da estrutura da rede cristalina



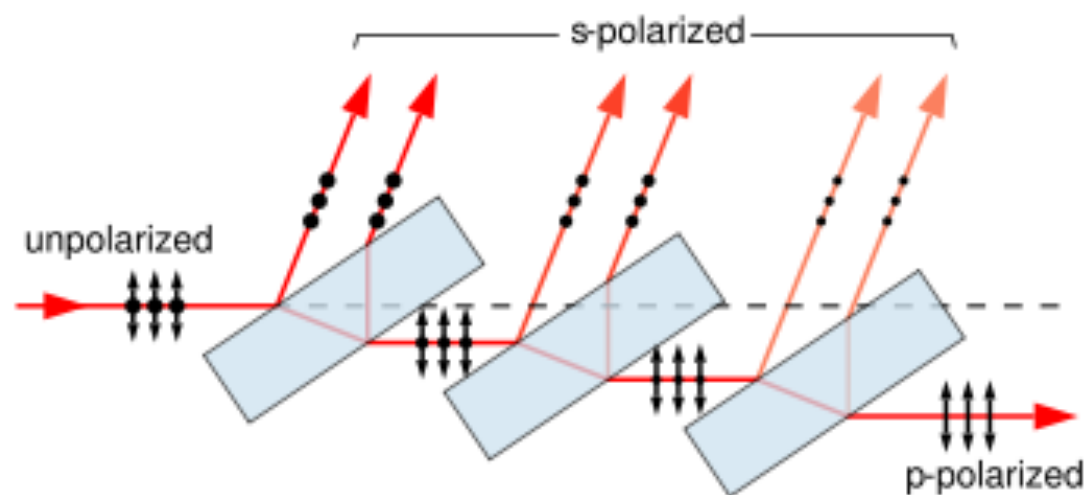
# Polarizador birrefringente

- Alguns materiais, principalmente cristais, possuem índices de refração que dependem da polarização da luz.
- Assim, uma luz não-polarizada tem o seu feixe dividido em dois, um para cada componente de polarização
- Uma segunda superfície reflete um dos feixes



# Polarizador por reflexão

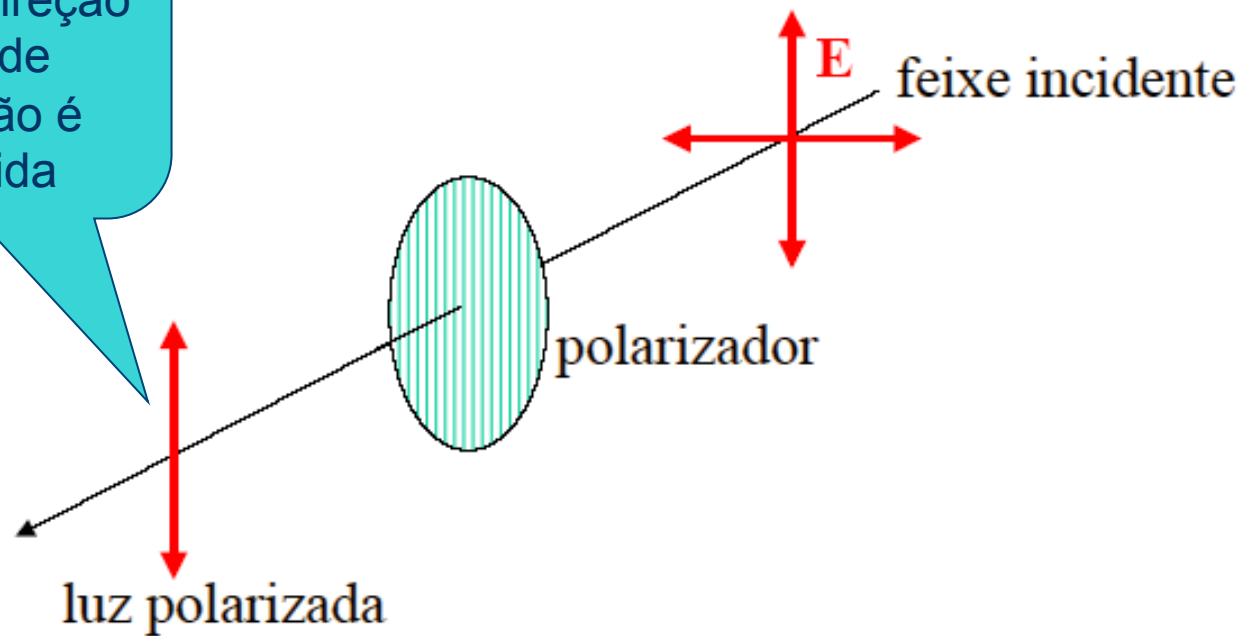
- Ao incidir sobre uma superfície refratora/refletora, dependendo do ângulo de incidência, a luz refletida e refratada são polarizadas



# Efeito de um polarizador na luz

Somente a componente do campo na direção do eixo de polarização é transmitida

Não-polarizada em polarizada

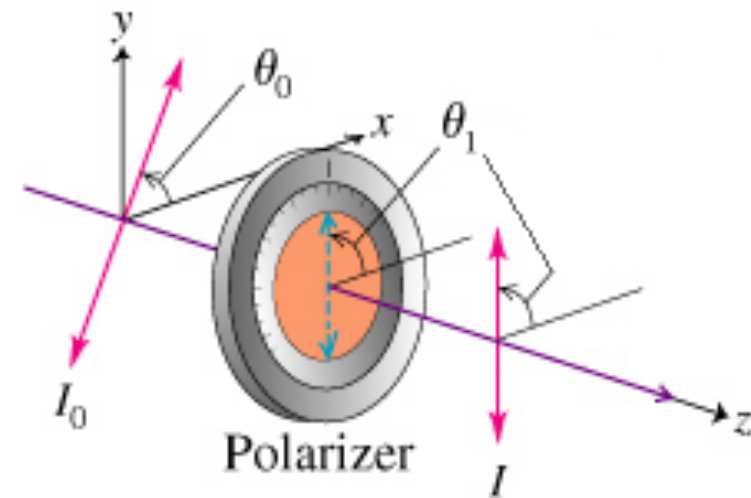




# Lei de Malus

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

$$E = E_0 \cos \theta$$



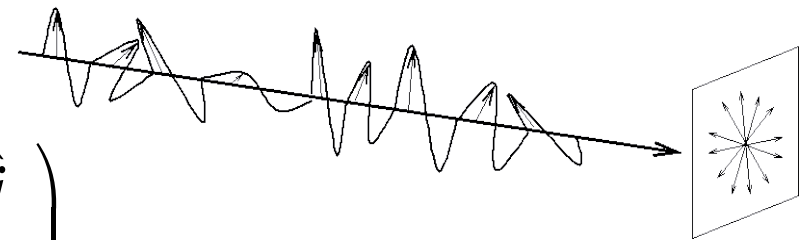
# Luz não polarizada ao atravessar um polarizador

- Campo elétrico com direção aleatória

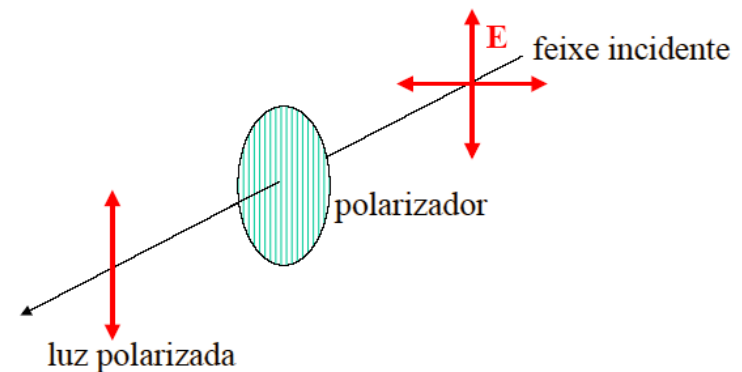
$$\vec{E}(z,t) = E \begin{pmatrix} \cos(\theta_{aleatório}(z,t)) \hat{j} \\ + \sin(\theta_{aleatório}(z,t)) \hat{i} \end{pmatrix}$$

- A intensidade inicial é dada pelo campo ao quadrado, ou seja:

$$I \propto E^2$$



Não-polarizada em polarizada



# Luz não polarizada ao atravessar um polarizador

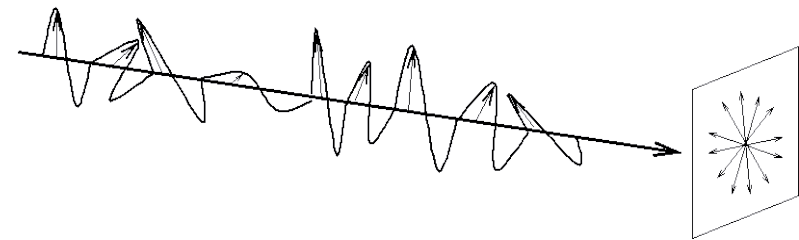
- Se o polarizador tiver direção  $j$  somente o campo  $E_j$  é transmitido (Lei de Malus)

$$\vec{E} = E \cos(\theta_{\text{aleatório}}) \hat{j}$$

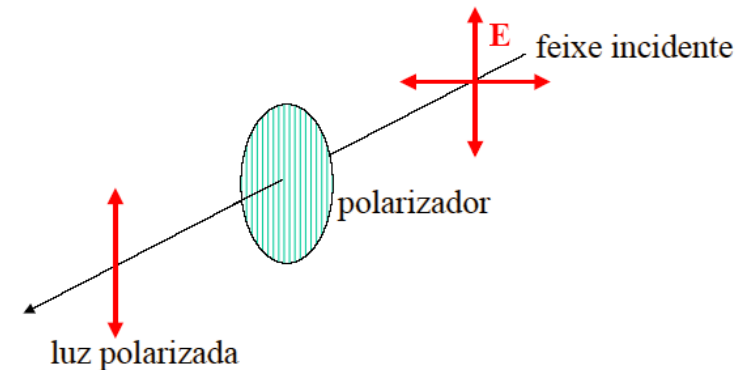
- Como a intensidade é proporcional ao campo quadrado, a intensidade transmitida é:

$$I(\theta) \propto E^2 \cos^2(\theta_{\text{aleatório}})$$

$$I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta_{\text{aleatório}})$$



Não-polarizada em polarizada

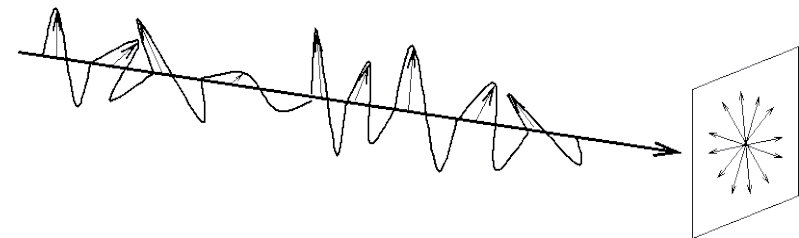


# Luz não polarizada ao atravessar um polarizador

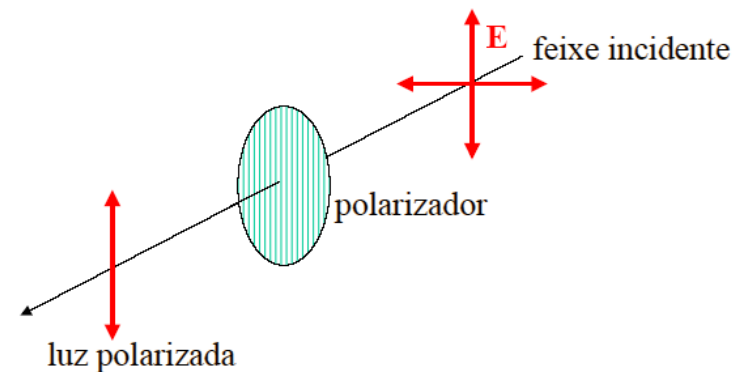
- Como o ângulo é aleatório, devemos considerar a intensidade média transmitida, ou seja, a média temporal

$$I = \langle I(\theta) \rangle = I_0 \langle \cos^2(\theta_{\text{aleatório}}) \rangle$$

$$I = \frac{1}{2} I_0$$



Não-polarizada em polarizada



# Luz não polarizada ao atravessar um polarizador

- Conclusão:
  - A intensidade luminosa transmitida por um polarizador, caso a luz incidente NÃO seja polarizada é metade da intensidade luminosa inicial, ou seja:

$$I = \frac{1}{2} I_0$$

- Contudo, a luz emergente do polarizador é polarizada, com eixo de polarização dado pelo eixo do polarizador

# Luz linearmente polarizada ao atravessar um polarizador

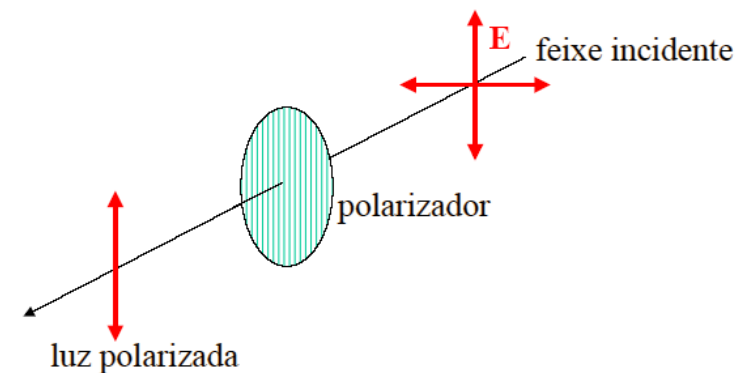
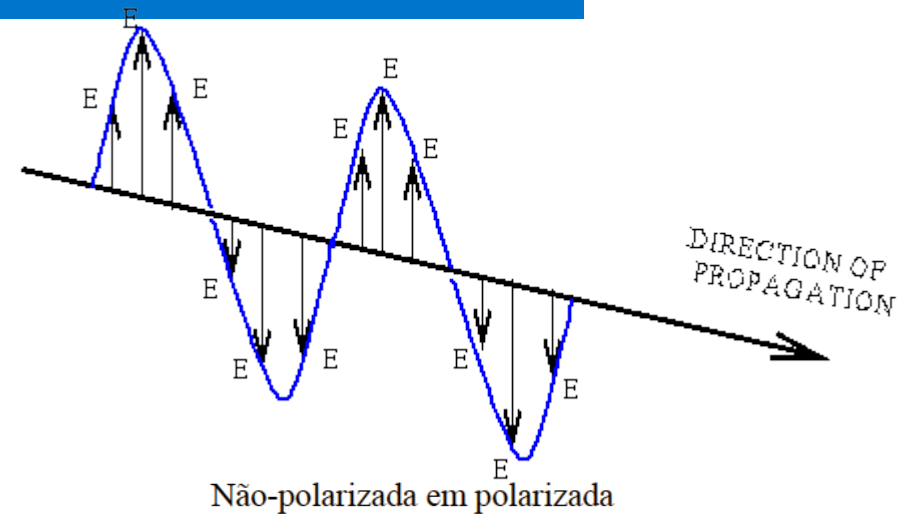
- Campo elétrico com direção fixa

$$\vec{E} = E(z,t) \begin{pmatrix} \cos(\theta) \hat{j} \\ + \sin(\theta) \hat{i} \end{pmatrix}$$

- Agora a direção  $\theta$  é fixa porque a luz está polarizada. Novamente, a intensidade luminosa é:

$$I_0 \propto E^2$$

E: ELECTRIC FIELD



# Luz linearmente polarizada ao atravessar um polarizador

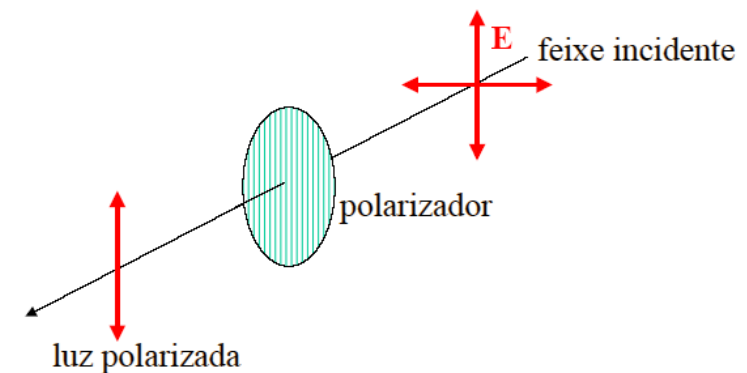
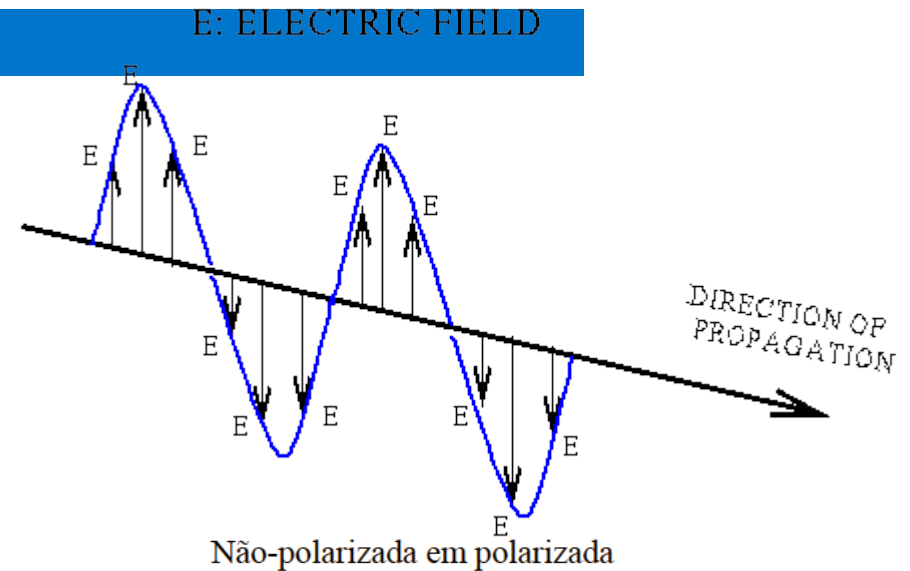
- Se o polarizador tiver direção  $j$  somente o campo  $E_j$  é transmitido (Lei de Malus)

$$\vec{E}_{depois} = E(z,t) \cos(\theta) \hat{j}$$

- A intensidade transmitida é

$$I \propto E_{depois}^2$$

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





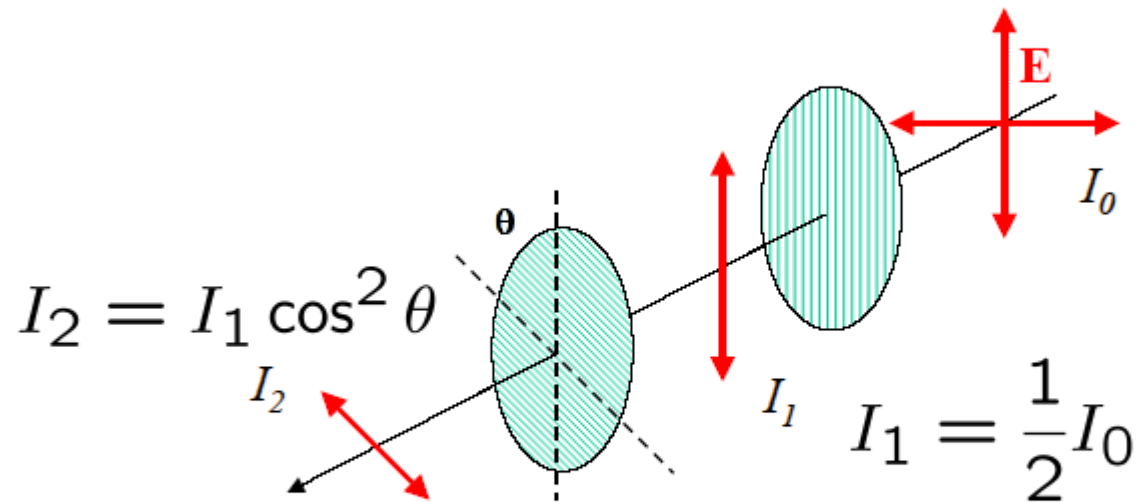
# Luz linearmente polarizada ao atravessar um polarizador

- Conclusão:
  - A intensidade luminosa transmitida por um polarizador, caso a luz incidente seja polarizada depende do ângulo do polarizador em relação ao campo elétrico incidente, ou seja:

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

- A luz emergente do polarizador também é polarizada, porém com direção de polarização diferente da inicial (caso  $\theta$  não seja 0)

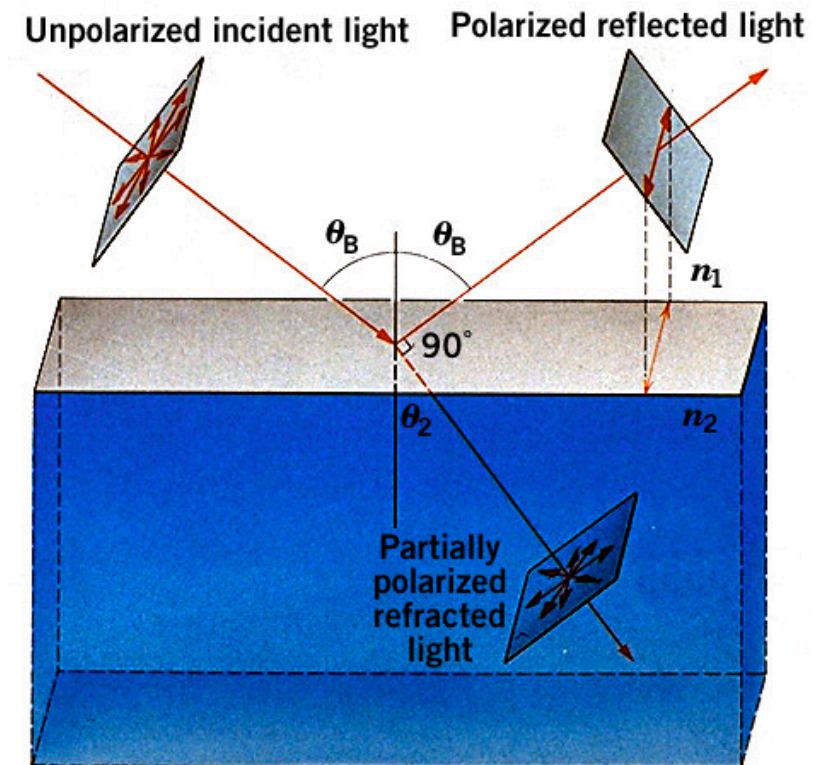
## Mais de um polarizador



$$\Rightarrow I_2 = \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta$$

# Polarização por reflexão

- Onda não polarizada incidente em uma superfície
- As ondas refletida e refratada possuem diferentes graus de polarização, dependendo das cond. contorno
  - Ângulo de incidência
  - Índices de refração



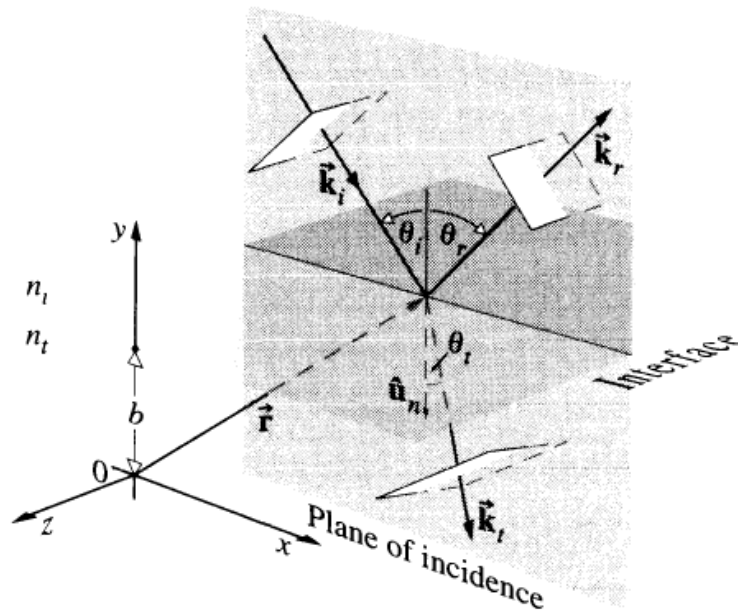
# Alguns exemplos



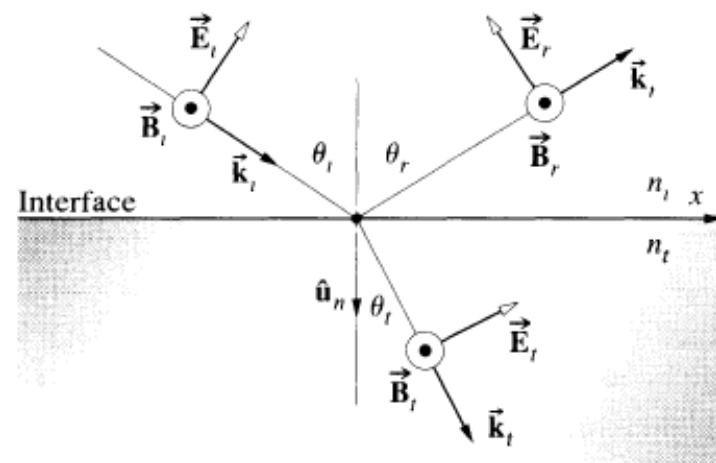
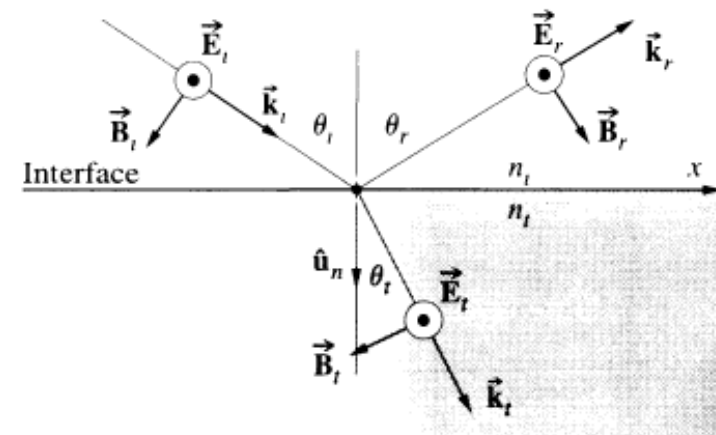
# Motivação teórica

## Ver Hecht, seção 4.6

- Uma onda não polarizada pode ser decomposta em duas componentes:



Campo transversal ao plano



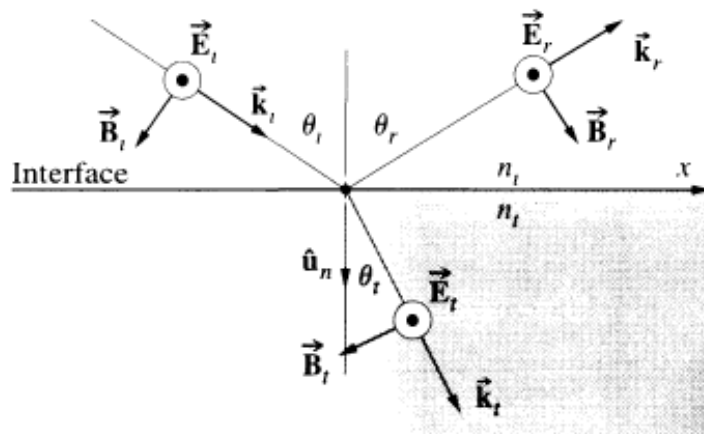
Campo paralelo ao plano



# Motivação teórica

## Ver Hecht, seção 4.6

- Condições de contorno na superfície:
  - Meios dielétricos  $\rightarrow \mu \sim \mu_0$
  - Continuidade dos campos tangenciais à superfície



$$E_{tg}^{meio1} = E_{tg}^{meio2}$$

$$E_i + E_r = E_t$$

$$B_{tg}^{meio1} = B_{tg}^{meio2}$$

$$B_i \cos \theta_i - B_r \cos \theta_r = B_t \cos \theta_t$$

$$B = E / v$$

$$n = \frac{c}{v}$$

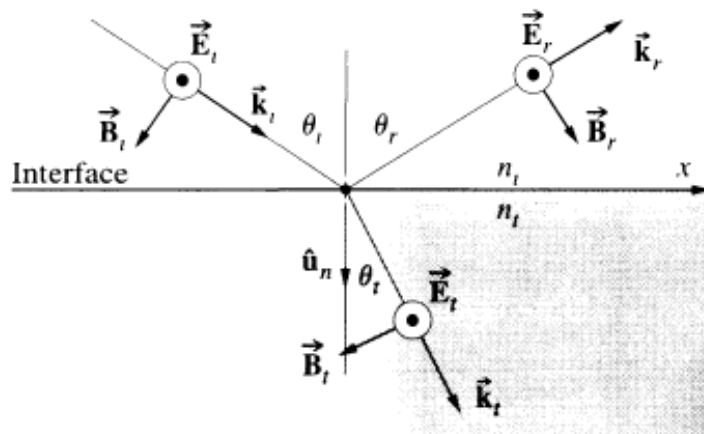
# Motivação teórica

## Ver Hecht, seção 4.6

- Define-se coeficientes de reflexão para o campo elétrico:

$$r = \frac{E_r}{E_i}$$

$$r_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}$$



- Usando a lei de Snell

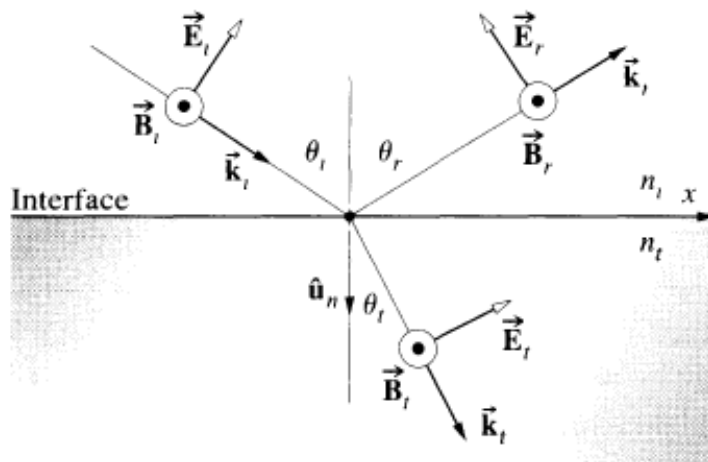
$$r_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$



# Motivação teórica

## Ver Hecht, seção 4.6

- Condições de contorno na superfície:
  - Meios dielétricos  $\rightarrow \mu \sim \mu_0$
  - Continuidade dos campos tangenciais à superfície



$$E_{tg}^{meio1} = E_{tg}^{meio2}$$

$$E_i \cos \theta_i - E_r \cos \theta_r = E_t \cos \theta_t$$

$$B_{tg}^{meio1} = B_{tg}^{meio2}$$

$$B_i + B_r = B_t$$

$$B = E / v$$

$$n = \frac{c}{v}$$

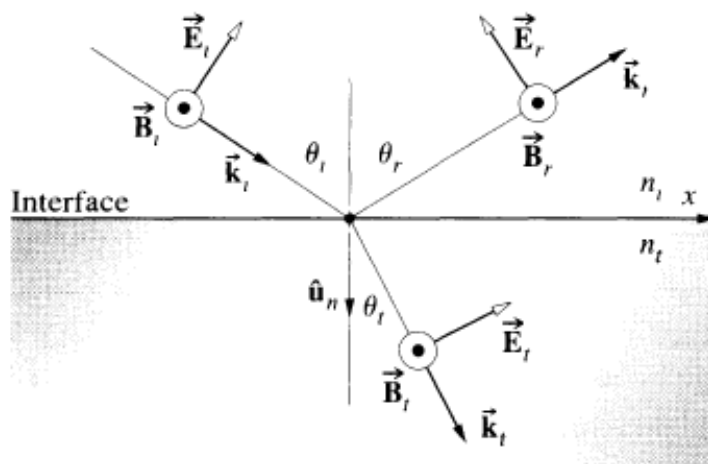
# Motivação teórica

## Ver Hecht, seção 4.6

- Pode-se calcular o coeficiente de reflexão, da mesma forma que anterior

$$r_{//} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t}$$

- Note que os índices de refração estão trocados em relação ao outro caso
- Usando a lei de Snell

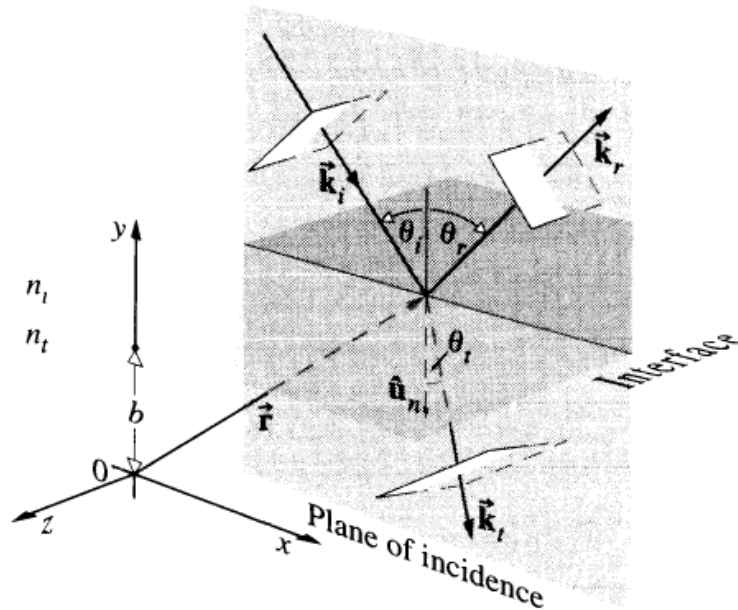


$$r_{//} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)}$$

# Motivação teórica

## Ver Hecht, seção 4.6

- Ou seja, para uma luz incidente com polarização genérica, temos:



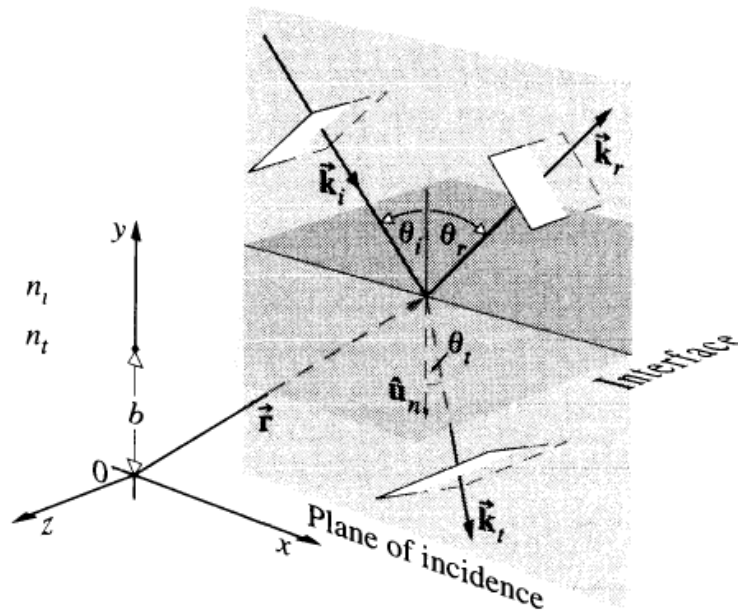
$$r_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)}$$

# Motivação teórica

## Ver Hecht, seção 4.6

- Como medimos intensidade luminosa, definimos os coeficientes de reflexão como sendo a razão entre as intensidades. Como  $I \propto E^2$



$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)}$$

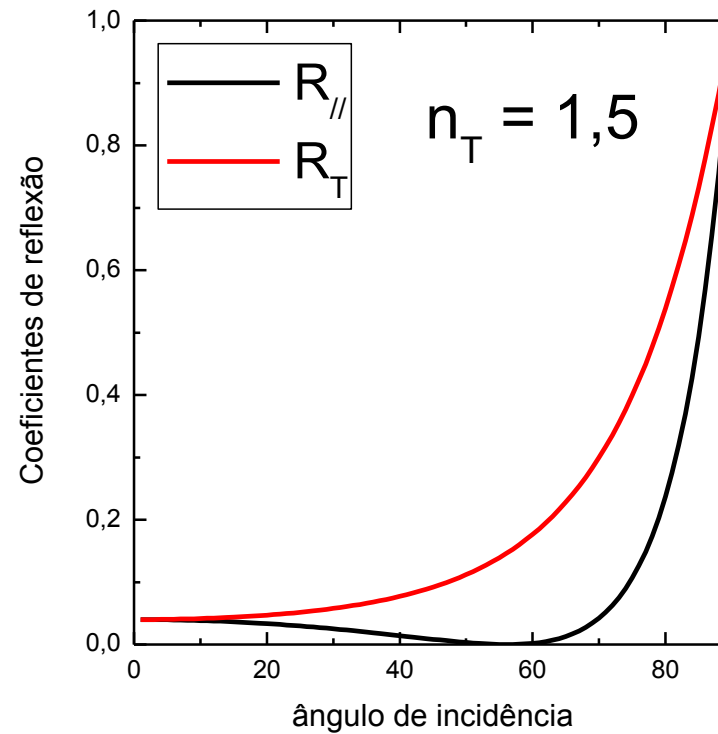
$$R_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)}$$

# Polarização por reflexão

- Coeficientes de reflexão ( $R = I/I_0$ )

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)}$$

$$R_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)}$$

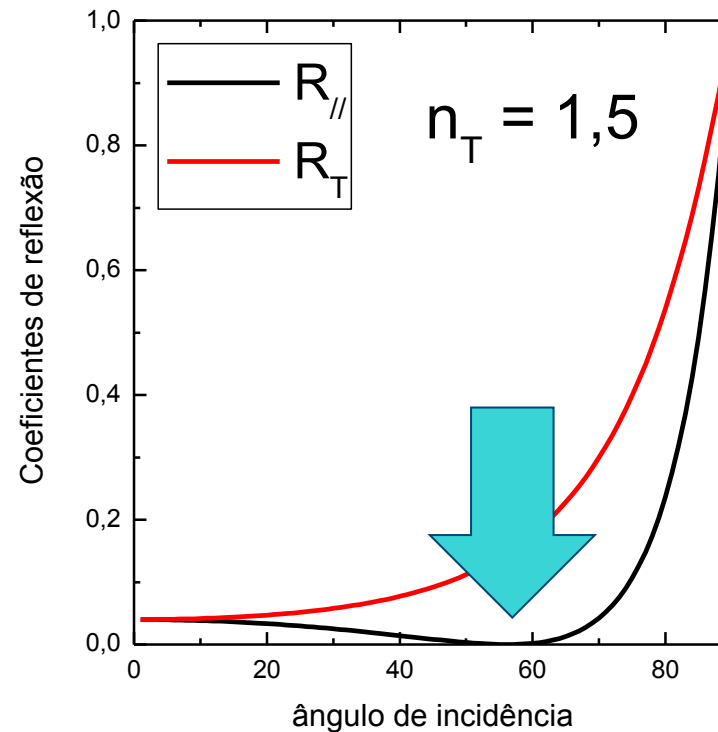


# Polarização por reflexão

- Em um dado ângulo a componente // da luz refletida tem intensidade 0
- Luz totalmente polarizada na outra direção (transversal)

$$R_{//} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)}$$

$$\theta_i + \theta_t = 90^\circ$$



# Polarização por reflexão

- O ângulo no qual a luz refletida é totalmente polarizada é chamado:

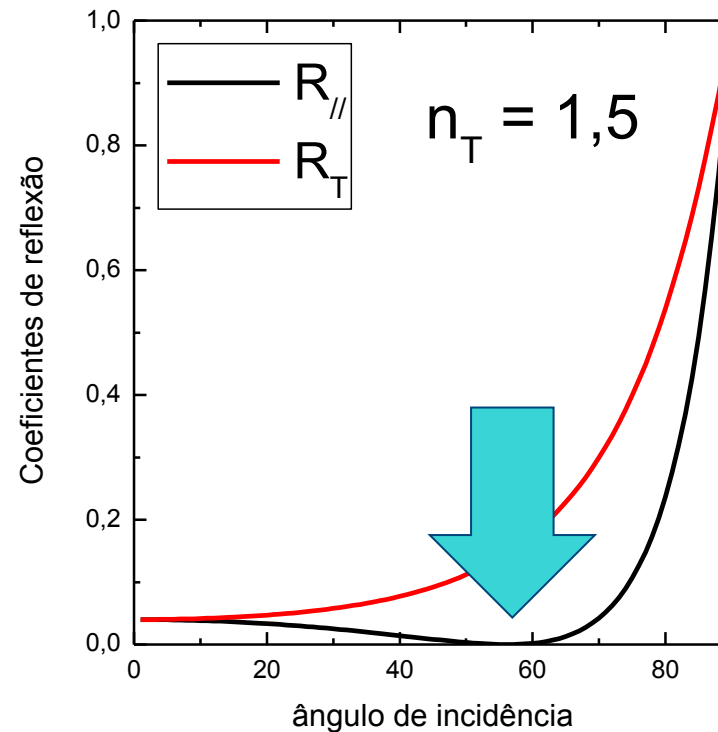
– Ângulo de Brewster

$$\theta_B + \theta_t = 90^\circ$$

$$n_i \sin \theta_B = n_t \sin \theta_t$$

$$n_i \sin \theta_B = n_t \cos \theta_B$$

$$n_t = \tan \theta_B$$





## Objetivos da semana

- Verificar experimentalmente a lei de Malus para uma luz previamente polarizada

$$I = I_1 \cos^2 \theta$$

- Estudar a polarização por reflexão em uma superfície e determinar o índice de refração do meio material no qual a luz incide

# Objetivos da semana

## Lei de Malus

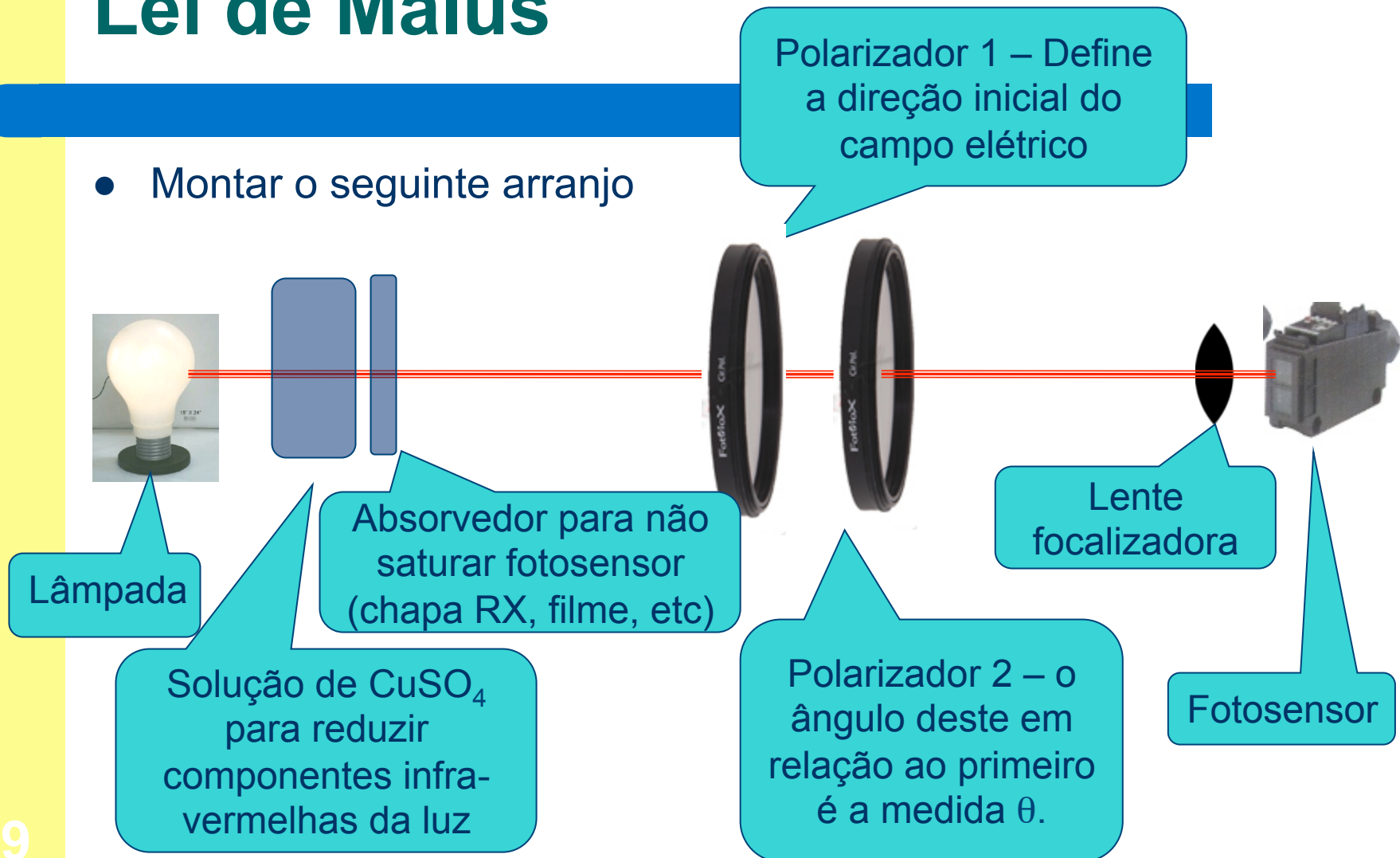
- Verificar experimentalmente a lei de Malus para uma luz previamente polarizada

$$I = I_1 \cos^2 \theta$$

- Há desvios em relação à expressão acima que podem ser medidos experimentalmente?
  - Quais as fontes destes desvios?
  - Como poderíamos modificar a Lei de Malus acima para levar em consideração possíveis desvios?

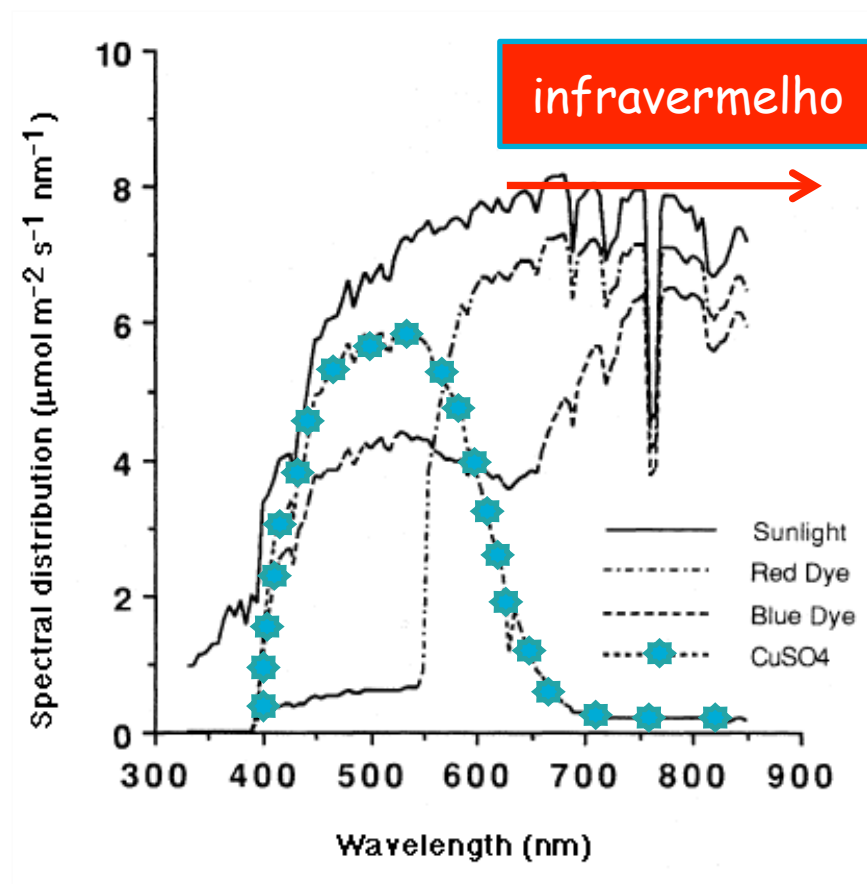
# Arranjo experimental: Lei de Malus

- Montar o seguinte arranjo

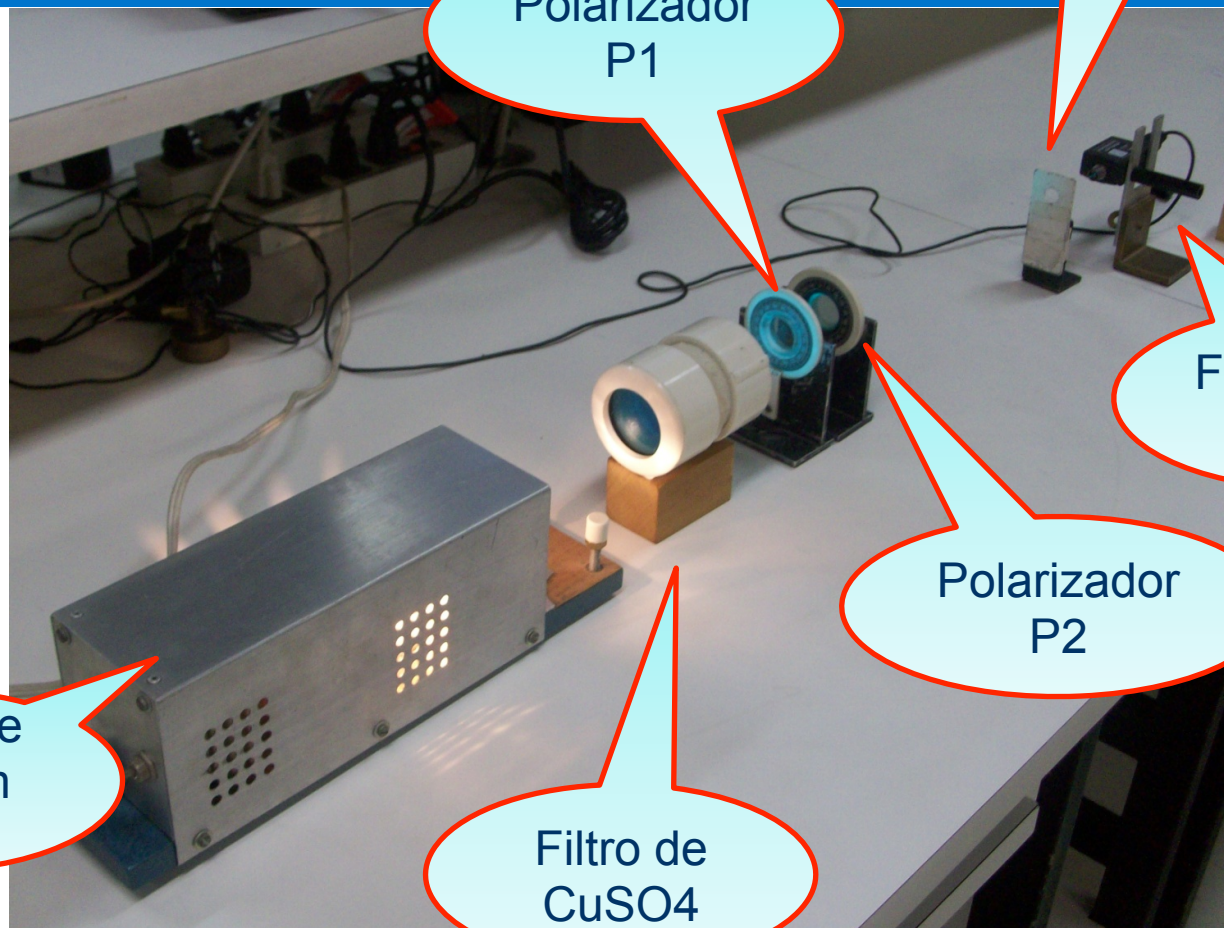


# Absorção do I.V.

- Como foi comentado em Física Experimental 3, a maior parte da radiação emitida por uma lâmpada comum é no comprimentos de onda do infravermelho.
- O detector de luz da Pasco funciona bem para o infravermelho, mas os polaróides não polarizam luz nessa faixa de comprimento de onda.
- Como resolver isso?
  - Retirando o radiação infravermelha do espectro emitido pela lâmpada
  - através de um absorvedor de infravermelho: uma solução de  $\text{CuSO}_4$ .



# Arranjo experimental



Fonte de luz com lente

Polarizador P1

Lente focalisadora do sensor

Fotosensor Pasco

Polarizador P2

Filtro de  $\text{CuSO}_4$

# Cuidados experimentais

- Fiquem atentos se o fotosensor não está saturado.
- Alinhamento do sistema óptico
- Tente focalizar a luz no fotosensor de forma apropriada
- Cuidado ao medir os ângulos entre os polarizadores
  - Qual a incerteza na medida do ângulo?
- Qual a incerteza na medida de intensidade luminosa?

# Atividades para Lei de Malus

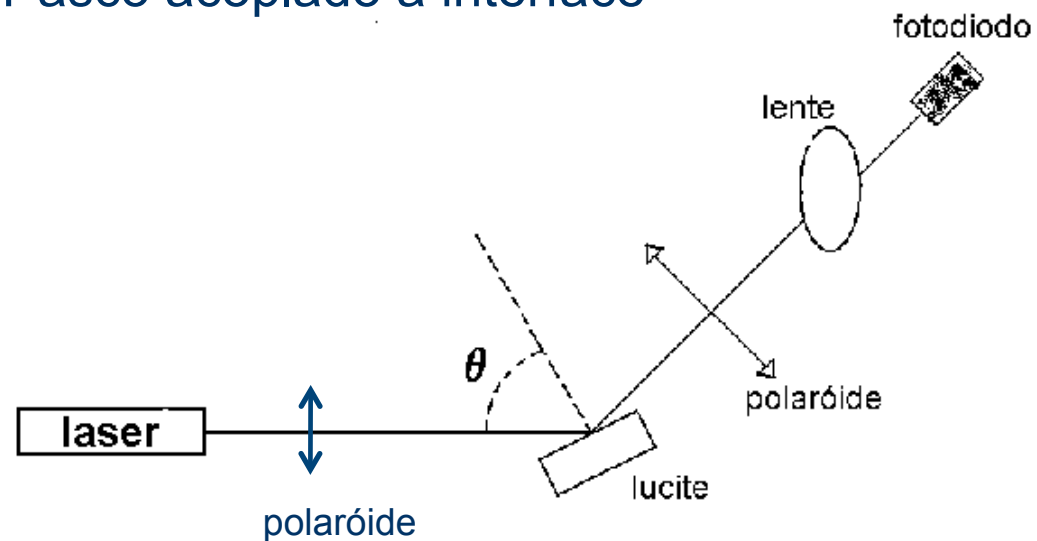
- Medir a intensidade luminosa em função de  $\theta$ . Cuidado para que a luz não seja intensa para saturar o fotosensor.

- **USE A AULA DA ELOISA**
- **PARA VER OS PEDIDOS**

- Os dados se comportam como o esperado pela teoria (ver resíduos)?
- Caso não seja validada, como podemos modificar a Lei de Malus para levar em conta outros efeitos? Quais são estes efeitos?
- Reajuste, se necessário, os dados levando em conta as modificações efetuadas na Lei de Malus.

# Polarização por reflexão: arranjo experimental

- Laser
- um suporte com escala angular com um braço fixo e um móvel
- 2 polaróides com escala angular
- sensor de luz da Pasco acoplado à interface (DataStudio)
- bloco de lucite
- lente auxiliar



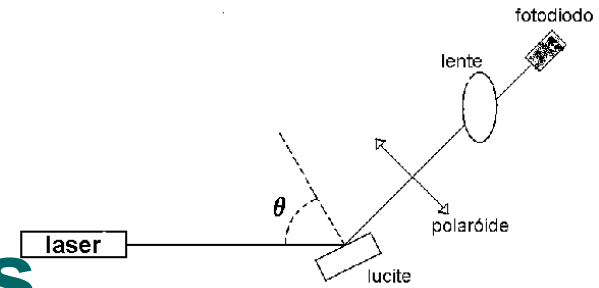


# Polarização por reflexão: arranjo experimental

- O polarizador na frente do laser deve ser colocado em  $45^\circ$ , e tem o objetivo de evitar os efeitos de uma possível polarização circular residual do laser. Se o laser estiver estável ele não precisa ser usado.
- Há dois feixes refletidos no bloco de lucite: um na primeira interface de separação entre os meios e outro na segunda. Certifique-se de estar colocando no detector o feixe correto.



# Cuidados experimentais



- Cuidado com o alinhamento do sistema
- Em geral o ganho do sensor em (x1) é adequado. Não esqueça de verificar no DataStudio se o ganho está de acordo com o escolhido no sensor.
- Se verificar algo que não está de acordo com o esperado, pense.
  - O Laser é estável? O que fazer se não for?
  - Há outros cuidados a serem tomados?

# Atividades para polarização por reflexão

- Meça as intensidades paralela e perpendicular variando o ângulo de incidência.
- Para cada ângulo, faça duas medidas:

**USE A AULA DA ELOISA  
PARA VER OS PEDIDOS**

- $R_{\parallel}$  e  $R_{\perp}$ . Isso é  $R_{\parallel}/R_{\perp}$ ? Justifique.  
– O que ocorre se o polarizador inicial não estiver a  $45^{\circ}$  ?
- Ajuste a curva teórica para essa razão à que você mediu.  
– Determine o ângulo de Brewster e o índice de refração do bloco de lucite. Compare com os resultados obtidos por seus colegas



# Extras

# Que tipo de onda é a luz?

- Equações de Maxwell

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

- Vamos supor que a luz esteja se propagando na direção  $z$ . Neste caso, os campos elétricos e magnéticos vão depender apenas do tempo e da posição  $z$  no espaço.

$$\left. \begin{array}{l} \vec{E} = \vec{E}(z,t) \\ \vec{B} = \vec{B}(z,t) \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \rightarrow 0$$

# Que tipo de onda é a luz?

- Equações de Maxwell

$$\left. \begin{aligned}
 \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\
 \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
 \nabla \vec{E} &= 0 \\
 \nabla \vec{B} &= 0
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned}
 -\hat{x} \frac{\partial}{\partial z} B_y + \hat{y} \frac{\partial}{\partial z} B_x &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z}) \\
 -\hat{x} \frac{\partial}{\partial z} E_y + \hat{y} \frac{\partial}{\partial z} E_x &= \frac{\partial}{\partial t} (B_x \hat{x} + B_y \hat{y} + B_z \hat{z}) \\
 \frac{\partial}{\partial z} E_z &= 0 \\
 \frac{\partial}{\partial z} B_z &= 0
 \end{aligned} \right. \Rightarrow E_z = B_z = 0$$



## Que tipo de onda é a luz?

- Equações de Maxwell

$$-\hat{x} \frac{\partial}{\partial z} B_y + \hat{y} \frac{\partial}{\partial z} B_x = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (E_x \hat{x} + E_y \hat{y})$$

$$-\hat{x} \frac{\partial}{\partial z} E_y + \hat{y} \frac{\partial}{\partial z} E_x = \frac{\partial}{\partial t} (B_x \hat{x} + B_y \hat{y})$$

- Tomando a componente em x da 1a. Eq. e a componente em y da 2a.

$$-\frac{\partial}{\partial z} B_y = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} E_x$$

$$\frac{\partial}{\partial z} E_x = \frac{\partial}{\partial t} B_y$$



## Que tipo de onda é a luz?

- Calculando a derivada parcial em z da primeira e a derivada parcial em t da segunda

$$-\frac{\partial^2}{\partial z^2} B_y = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial z \partial t} E_x \qquad \frac{\partial^2}{\partial t \partial z} E_x = \frac{\partial^2}{\partial t^2} B_y$$

- Substituindo uma na outra


$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} B_y - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} B_y = 0$$

## Que tipo de onda é a luz?

- O mesmo pode ser feito para o campo elétrico e para as outras componentes, ou seja:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} B_y - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} B_y = 0$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E_x - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_x = 0$$



Tanto o campo elétrico como o magnético satisfazem equações de onda.



## Que tipo de onda é a luz?

- Tão importante é notar que um campo eletromagnético que depende somente de  $(z,t)$  faz com que as equações de onda sejam apenas nas componentes  $x,y$

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}(z,t) \\ \vec{B} &= \vec{B}(z,t) \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2}{\partial z^2} E_x - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_x = 0$$

Os campos E e B  
não são  
independentes!

$$-\frac{\partial}{\partial z} B_y = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} E_x$$