



# Física Experimental IV – FAP214

[www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex](http://www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex)

[www.fap.if.usp.br/~hbarbosa](http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa)

## Aula 1, Experiência 3

## Leis de Malus e de Brewster

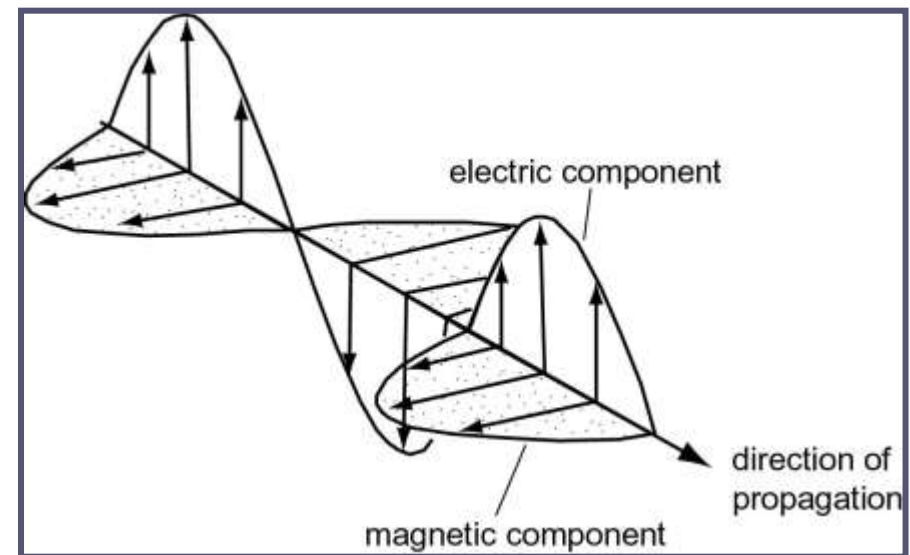
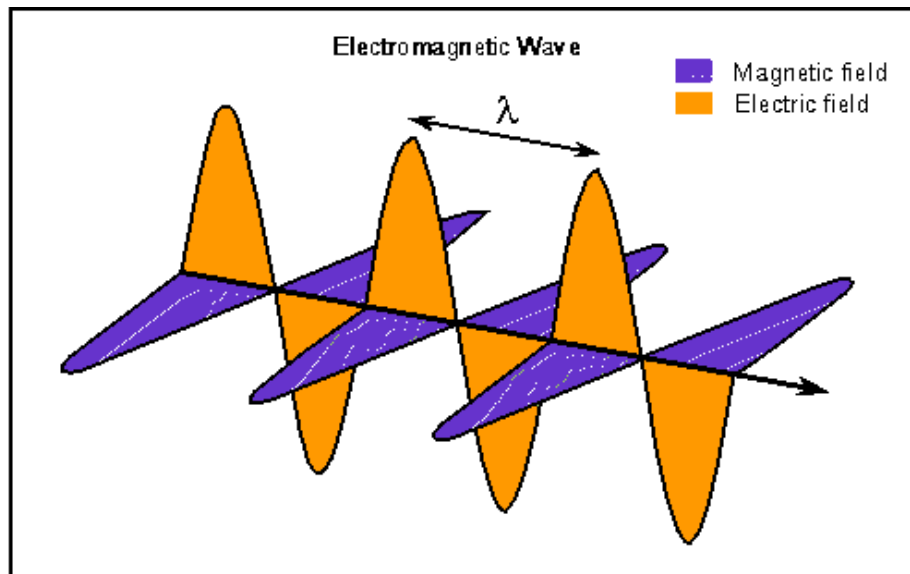
# Lei de Malus e Lei de Brewster



# Radiação eletromagnética

A radiação eletromagnética é uma onda transversal composta de um **campo elétrico** e um **campo magnético**, oscilantes no tempo, perpendiculares entre si e à direção de propagação.

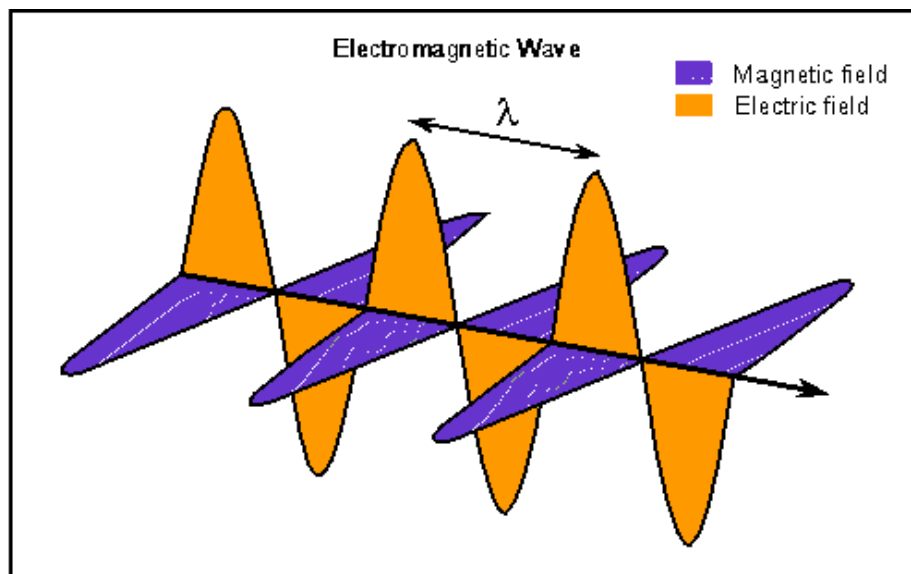
- Os campos elétrico **E** e magnético **B**, são dois aspectos de um único fenômeno que é o campo eletromagnético.



# Radiação eletromagnética

A radiação eletromagnética é uma onda transversal composta de um **campo elétrico** e um **campo magnético**, oscilantes no tempo, perpendiculares entre si e à direção de propagação.

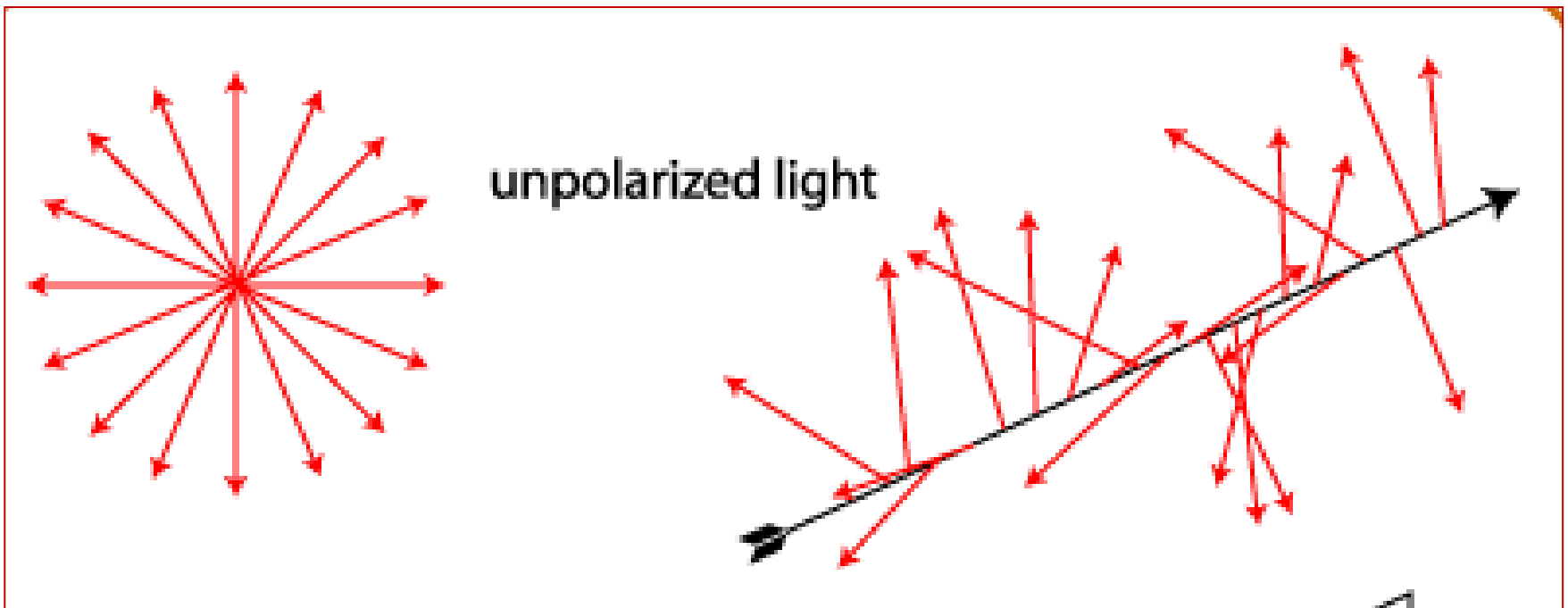
- Os campos elétrico **E** e magnético **B**, são dois aspectos de um único fenômeno que é o campo eletromagnético.



Podemos, por simplicidade nos referir somente ao campo elétrico, porque **sabendo** as leis que governam esse campo, **sabemos** também as leis que governam o campo magnético associado.

# Polarização

- A luz é dita **não polarizada** quando a plano de vibração do campo elétrico varia rapidamente e de maneira completamente aleatória no tempo



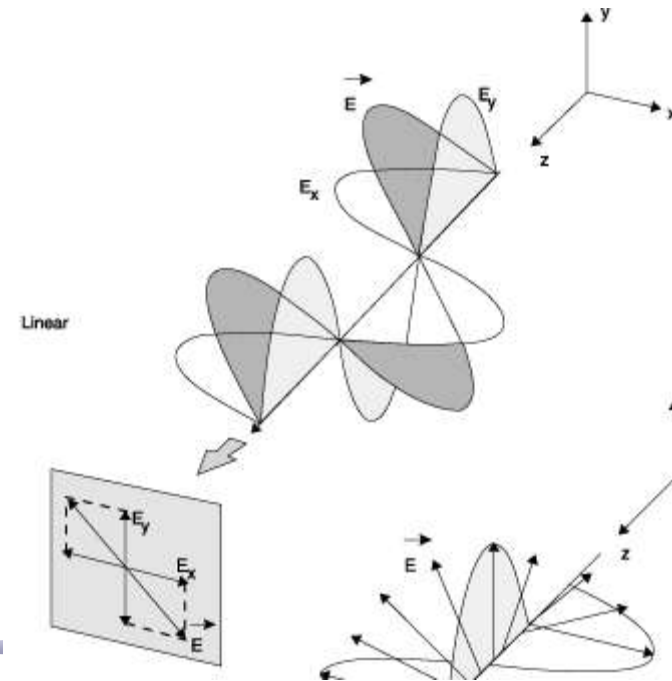
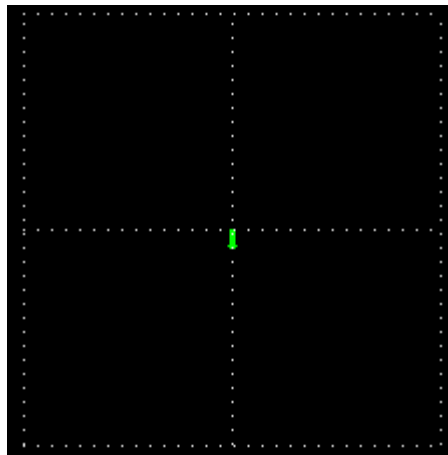
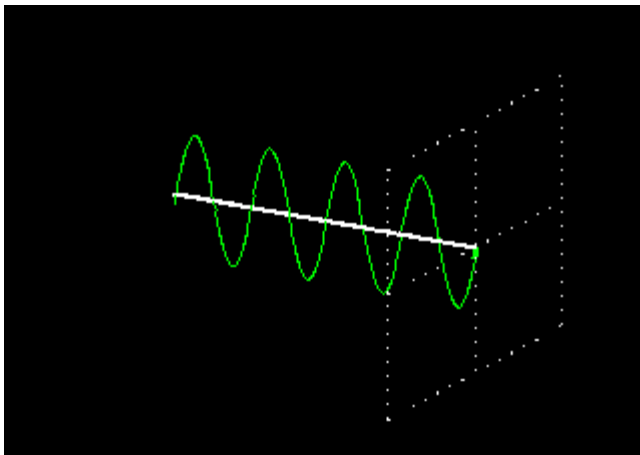
# Estados possíveis de polarização

Há vários estados possíveis de polarização:

1. **Plano polarizada** ou **linearmente polarizada** quando o campo elétrico é sempre paralelo a um plano definido, chamado plano de polarização da onda
2. **Circularmente polarizada** quando o campo elétrico da onda gira em torno da direção de propagação, tendo módulo constante. Nesse caso, pode-se dizer que, numa dada posição o vetor campo elétrico realiza um movimento circular uniforme.
3. **Elipticamente polarizada** quando o vetor campo elétrico descreve uma elipse

# Polarização linear

- Numa onda linearmente polarizada, campo elétrico vibra num único plano: **o plano de polarização da onda**



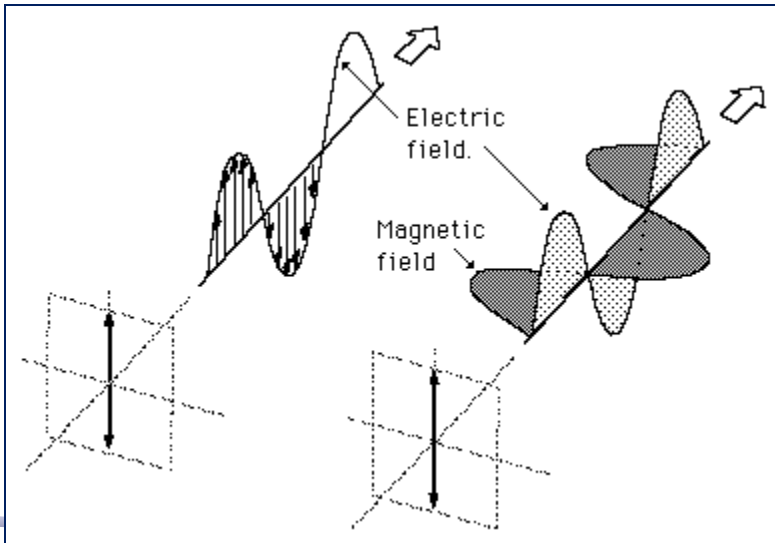
# Polarização linear

- A polarização linear é o estado mais simples de polarização da luz. Por exemplo:

$E_0$ : amplitude do campo elétrico é constante, independente de  $y$  ou  $z$ , ou seja, a onda é plana

$$E(x, t) = E_0 \cos(kx - \omega t) \hat{j}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$



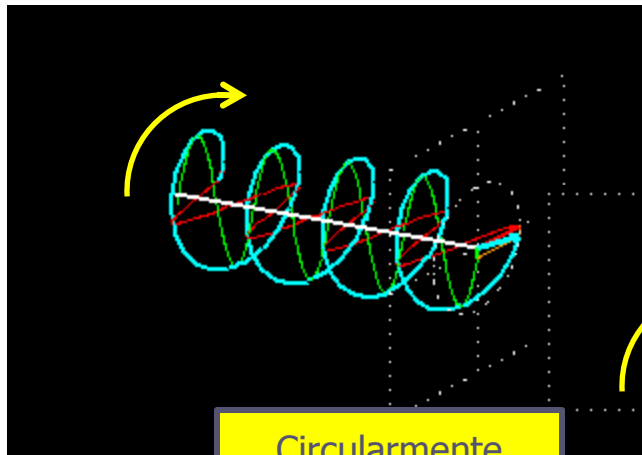
**versor  $\hat{j}$**  garante que o campo  $\mathbf{E}$  esteja só no plano  $y$ : polarizada neste sentido

**$k$  é cte:** onda monocromática

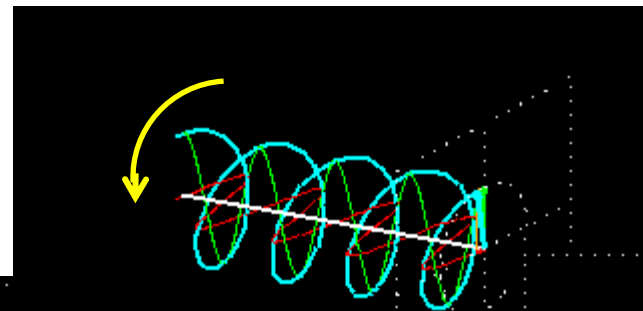


# Polarização Circular

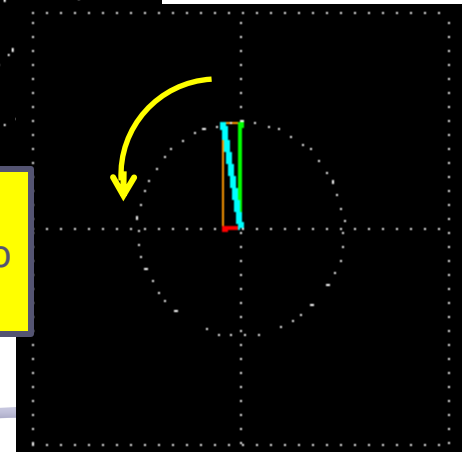
- **circularmente polarizada:** quando o campo elétrico da onda gira em torno da direção de propagação, tendo módulo constante.
  - Nesse caso, pode-se dizer que, numa dada posição, o vetor campo elétrico realiza um movimento circular uniforme.
- A polarização pode ser para a direita ou para a esquerda



Circularmente polarizada no sentido horário

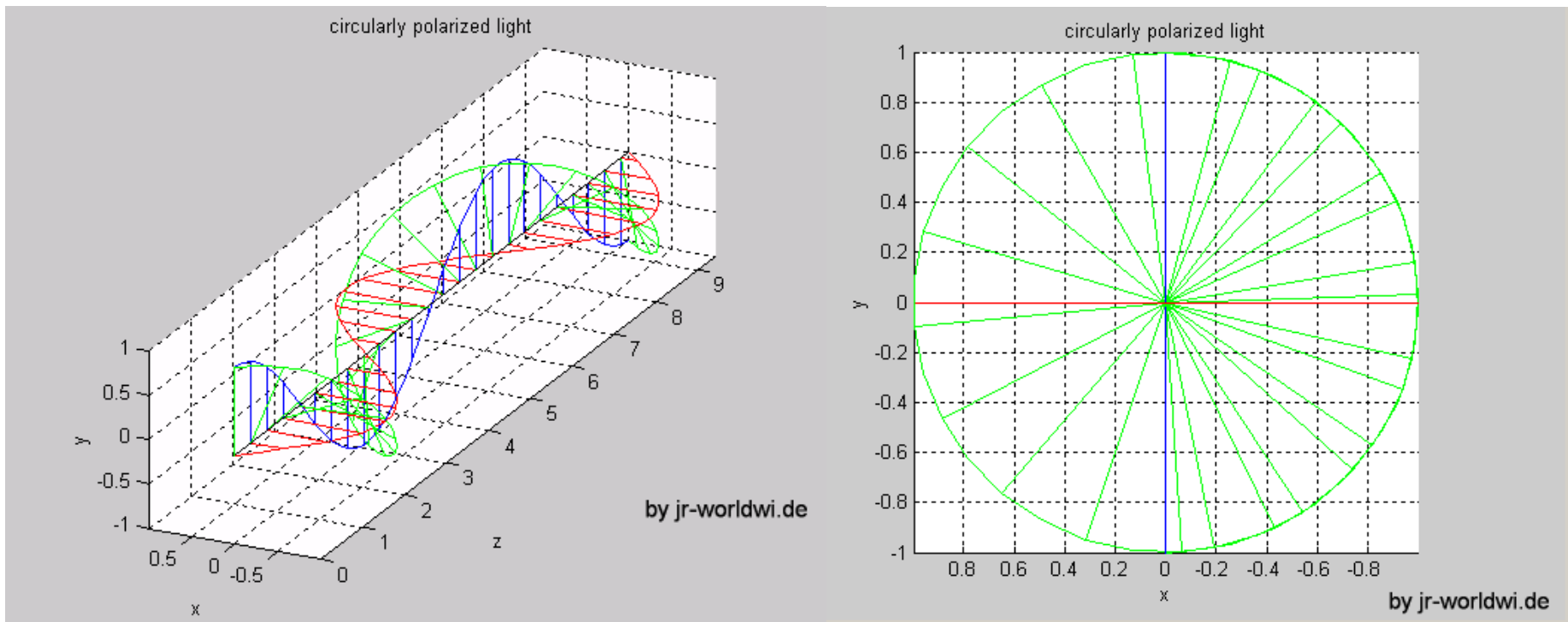


Circularmente polarizada no sentido anti-horário



# Polarização circular

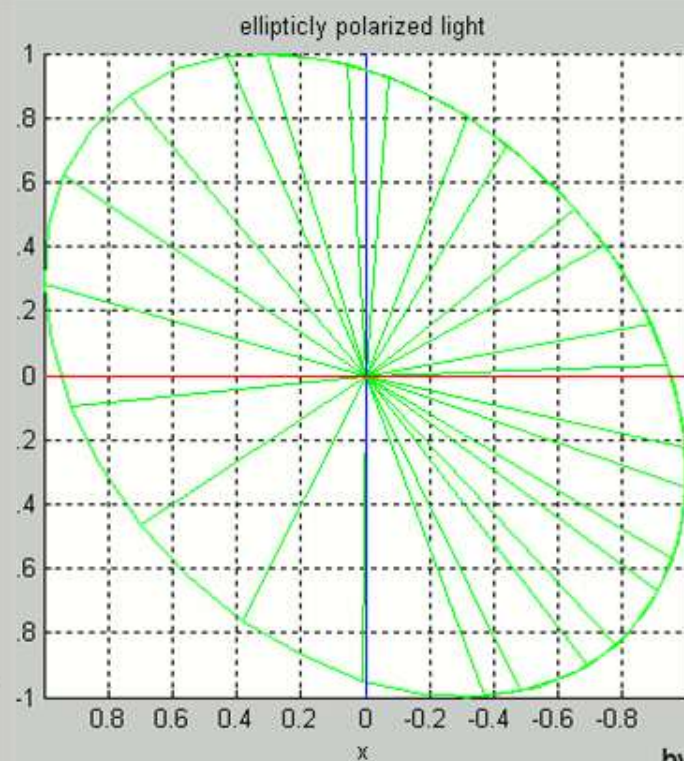
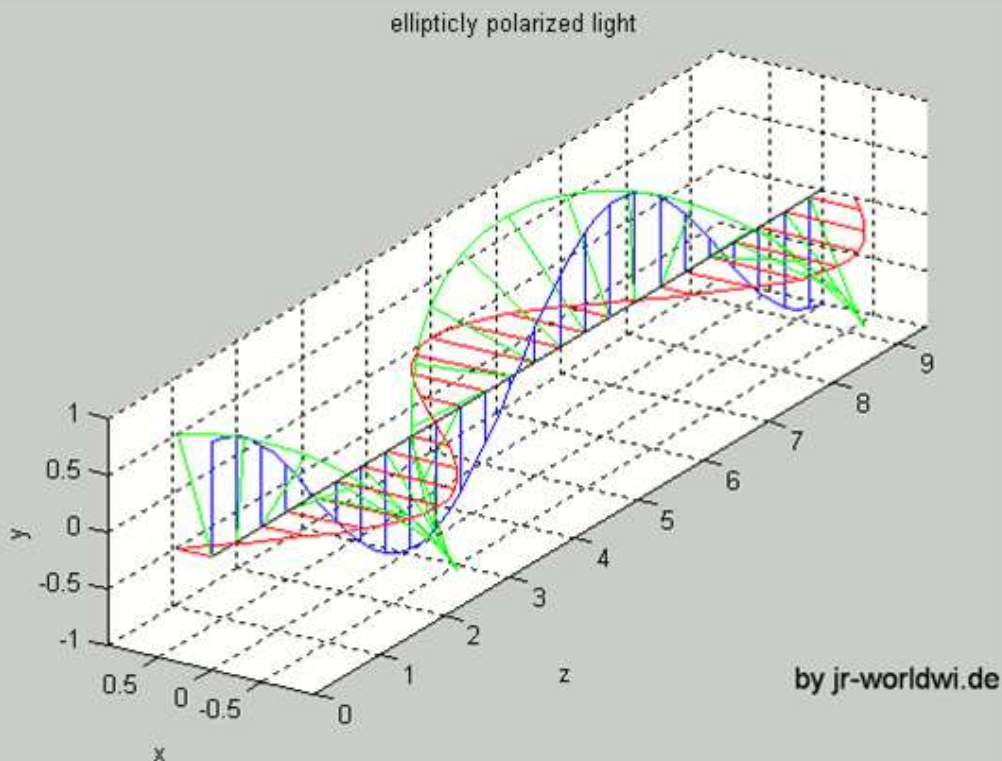
A superposição de duas ondas plano polarizadas, **de mesma amplitude, defasadas de  $90^\circ$** , resulta numa onda **circularmente polarizada**





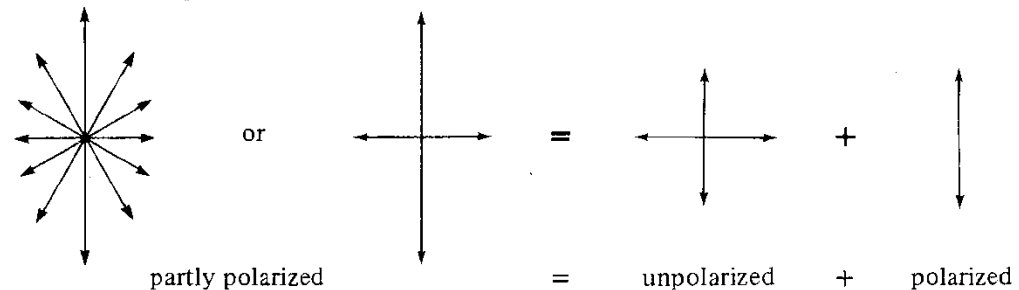
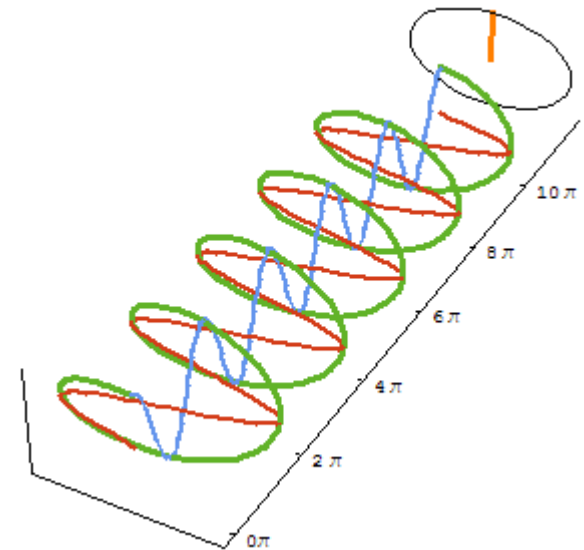
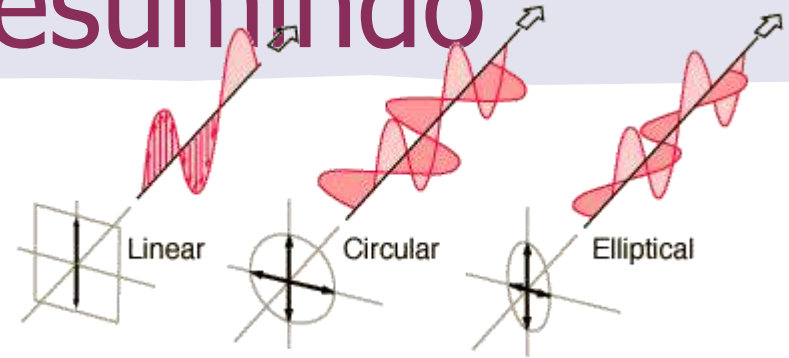
# Polarização elíptica

Matematicamente, a onda **elípticamente polarizada** pode ser descrita como a superposição de duas ondas, de **amplitudes diferentes**, linearmente polarizadas em direções perpendiculares e **defasadas de  $90^\circ$**



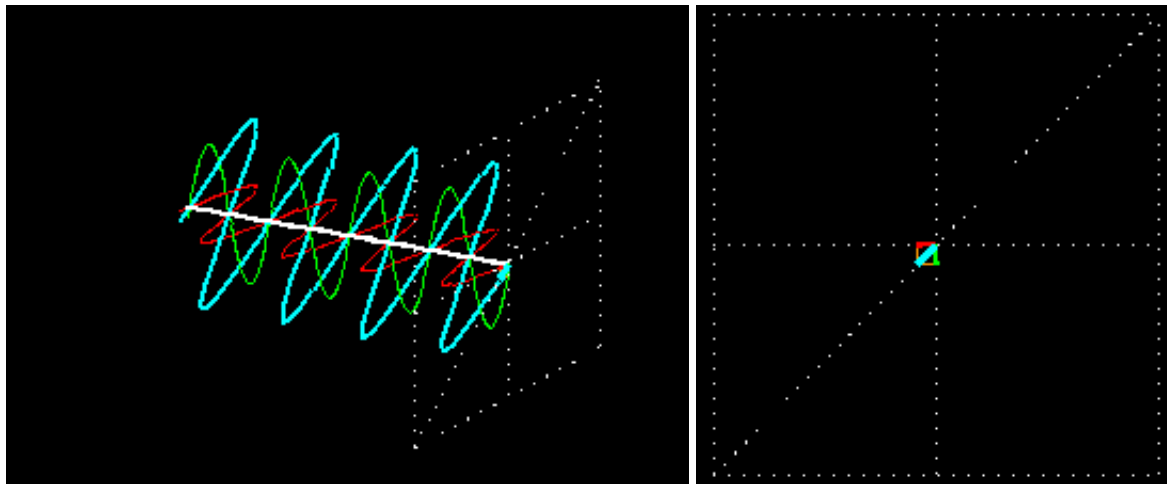
# Polarização: resumindo

1. A onda elipticamente polarizada é o estado mais geral de polarização definida para uma onda eletromagnética no espaço livre.
2. A luz pode ser **parcialmente polarizada**, que é a superposição de radiação não polarizada com radiação de polarização definida.
3. Em geral, a luz de origem artificial ou natural, não é nem completamente não polarizada, nem completamente polarizada.
4. Os casos extremos são raros: **normalmente toda luz é parcialmente polarizada**



# Luz polarizada: superposição

- Os campos elétricos de ondas eletromagnéticas polarizadas podem ser somados de acordo com as regras de soma vetorial. As propriedades da onda resultante vai depender das intensidades e da diferença de fase das componentes
- **Exemplo:** no caso de duas ondas plano polarizadas em dois planos perpendiculares entre si



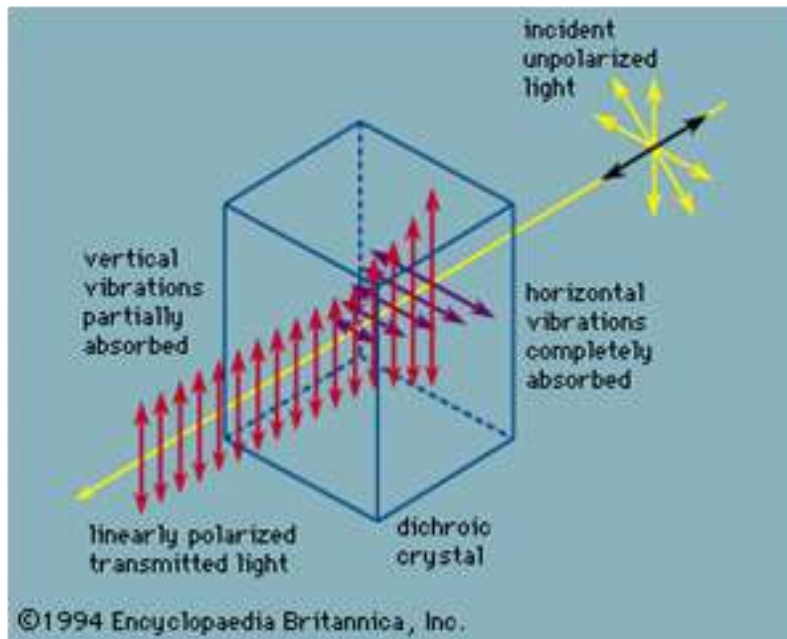
Esta é a superposição de duas ondas de mesma amplitude e comprimento de onda, polarizadas em dois planos perpendiculares entre si e oscilando com a mesma fase

# Luz não polarizada

- A luz não polarizada é usualmente representada como uma superposição de duas ondas polarizadas ortogonais, incoerentes e arbitrárias e de mesma amplitude. Este feixe é representado pela polarização paralela ao plano de incidência ( $//$ ) e pela polarização perpendicular ao plano de incidência ( $\perp$ ).
- Qualquer feixe de luz não polarizada pode ser decomposto em dois feixes, perpendiculares entre si, sendo um polarizado na direção paralela ao plano de incidência e outro na direção perpendicular ao plano de incidência

# Polarização por dicroísmo

- Certos cristais e materiais sintéticos podem apresentar diferentes graus de absorção, conforme a polarização da radiação. Esta propriedade é chamada dicroísmo. Se a absorção é bastante acentuada para um estado de polarização, o material dicroico funciona como polarizador.

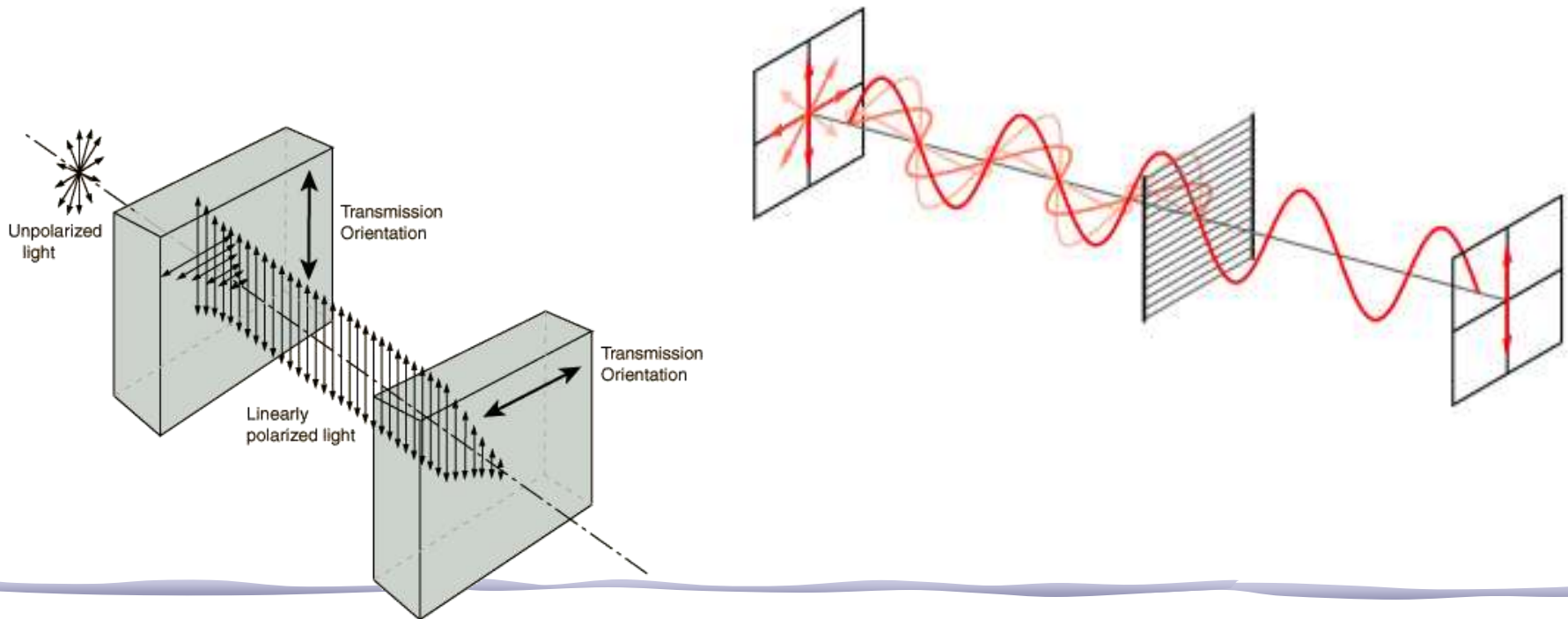


A turmalina é um poderoso polarizador. Esse cristal tem um único eixo ótico e qq componente de  $\mathbf{E}$  perpendicular a esse eixo é fortemente absorvida. Essa absorção é dependente de  $\lambda$  e o cristal parece mudar de cor quando visto de direções diferentes



# Polarização por dicroísmo: polaróides

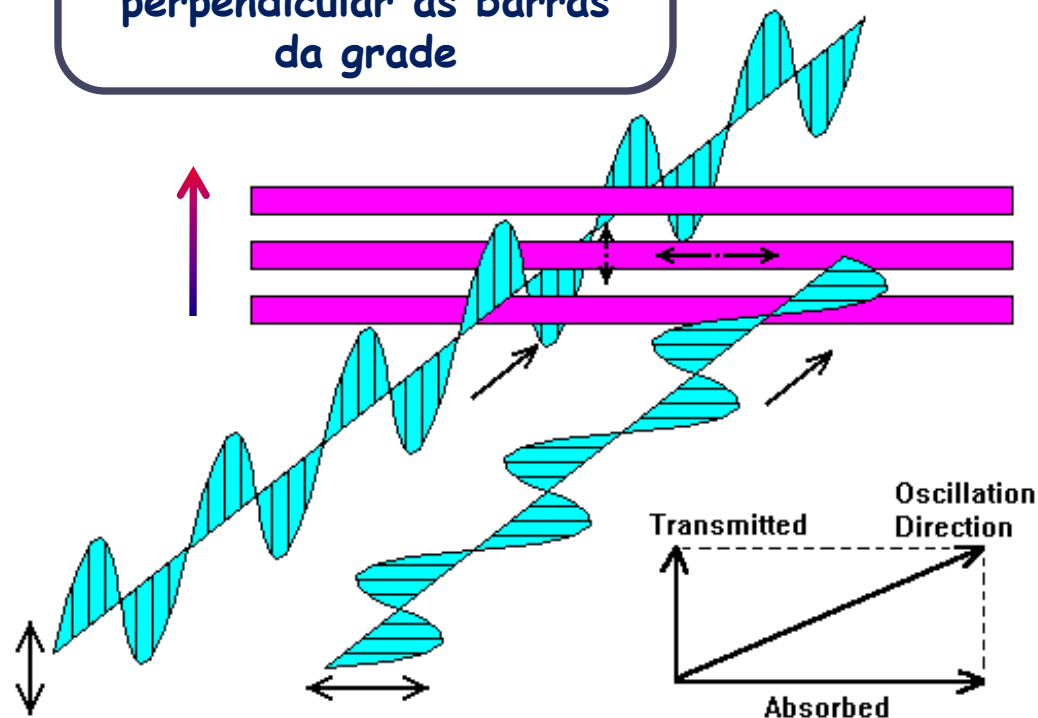
- Os materiais sintéticos chamados polaróides, só transmitem campo elétrico numa dada direção. A onda polarizada na direção perpendicular à direção de transmissão (indicada na figura) é absorvida.



# Polaróides: dicroísmo

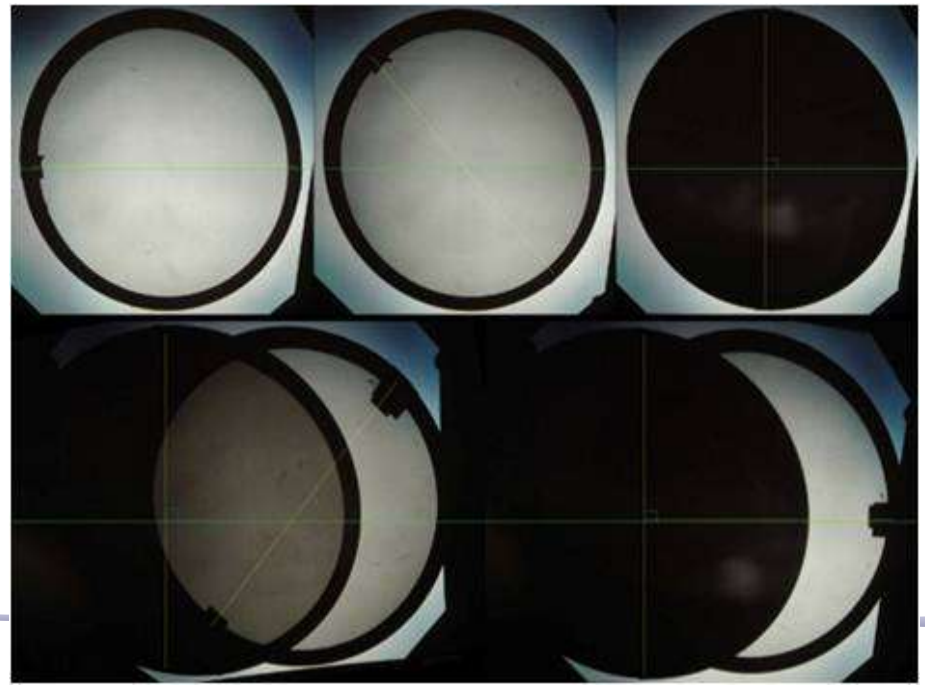
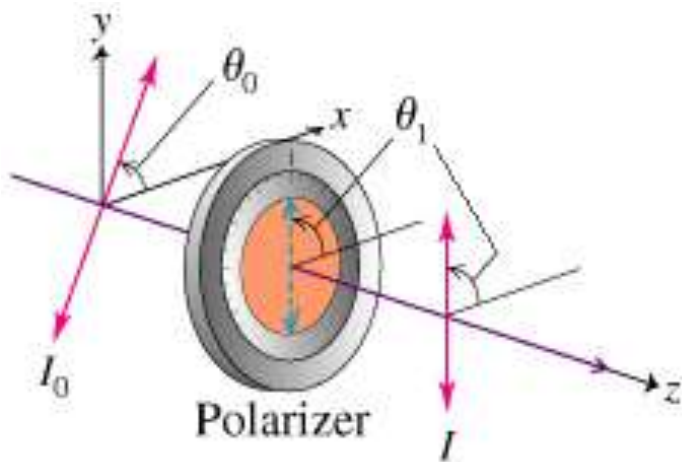
- Os polaróides são constituídos de uma série de barras horizontais metálicas. O diâmetro da grade e o espaçamento entre elas guardam uma relação de escala com o comprimento da onda a ser polarizada. Assim polaróides são fabricados para um determinado comprimento de onda.
- A transmissão ou absorção da onda tem a ver com os graus de liberdade dos elétrons na grade: se eles têm a possibilidade de serem postos em vibração pelo campo elétrico incidente ou não.
- A descrição do funcionamento desses materiais é dada na seção 8.3.3, capítulo 8 do livro Optics de E. Hecht

**Importante:** o eixo de transmissão do polaróide (ou eixo do polaróide) é perpendicular às barras da grade



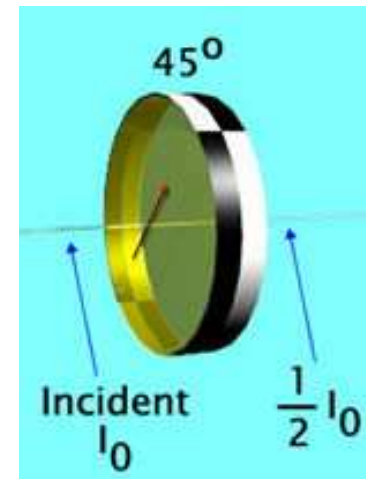
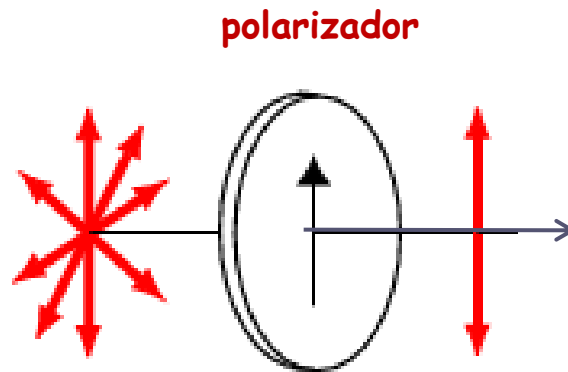
# Polaróides

- Um dos inconvenientes do polaróide comum é a absorção relativamente alta, da ordem de 50%, também para a direção de polarização que deve ser transmitida.
- Além deste problema, polaróides comuns não funcionam muito bem para luz ultravioleta e para infravermelho. Mesmo nos extremos do espectro visível (vermelho e violeta), já é possível observar a deficiência.



# Polarização: Lei de Malus

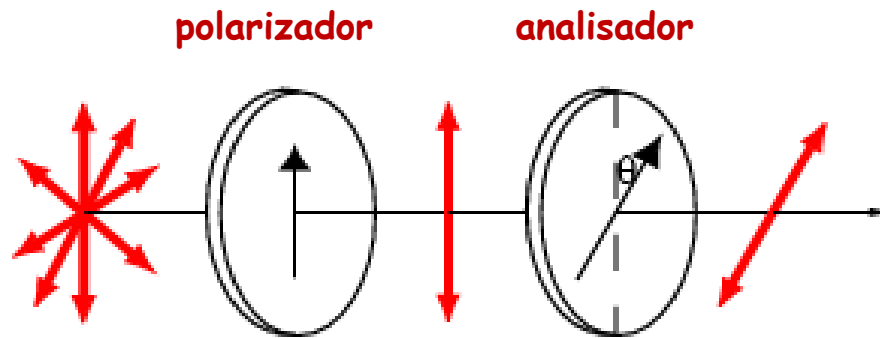
- Polaróides ou filtros podem então selecionar um único estado de polarização entre todos os estados que neles incidem.



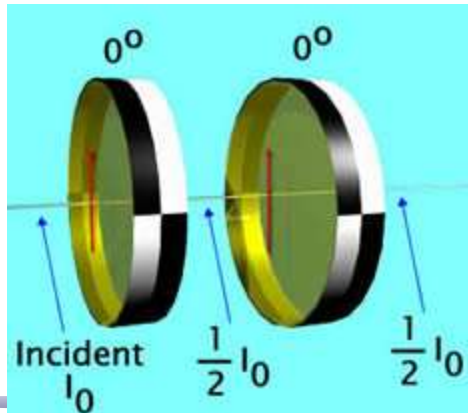
- O que acontece com a intensidade da luz transmitida?
  - Se toda a luz pode ser decomposta em 2 estados de polarização perpendiculares entre si e o polarizador seleciona um deles: a intensidade cai à metade

# Polarização: Lei de Malus

- Agora colocamos um segundo polarizador (analisador) logo depois do primeiro.



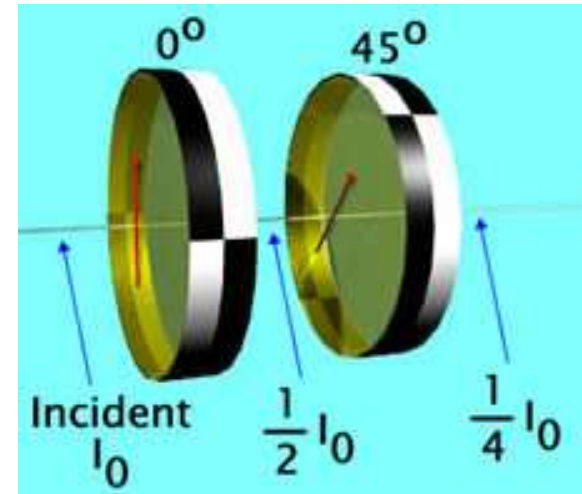
- O que acontece com a intensidade?



**Se os eixos dos dois polaróides forem paralelos não acontece nada**

# Polarização: Lei de Malus

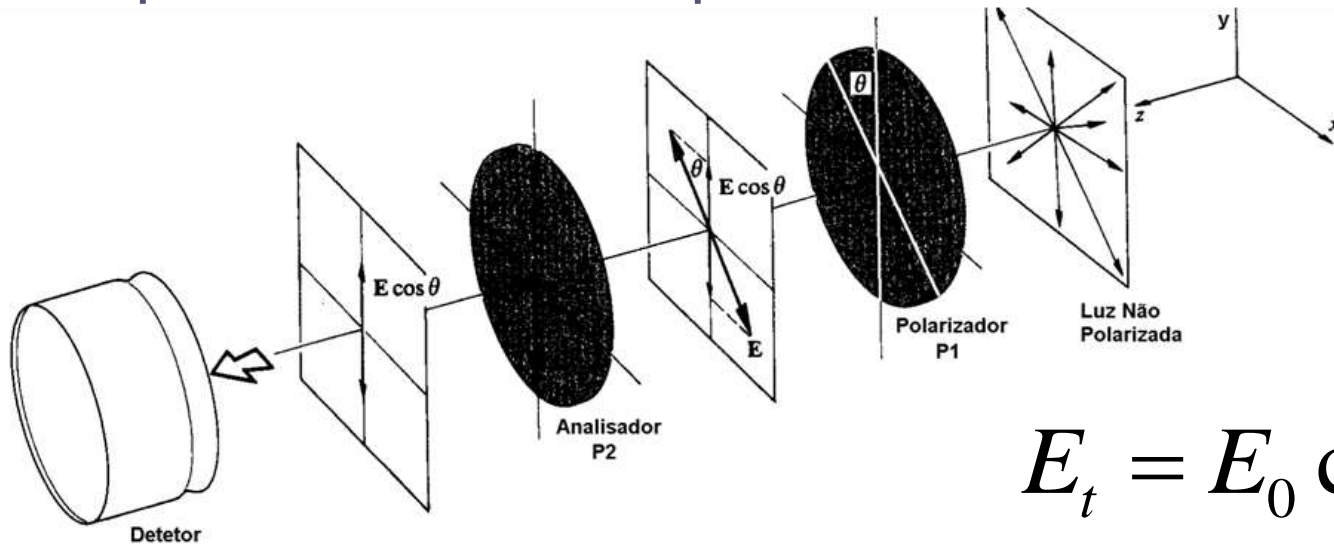
- Mas se os dois polarizadores estiverem defasados de **45°**, **só a metade da luz** que incide no segundo polarizador passa:
  - Ou seja, a metade da metade =  $\frac{1}{4}$ .
- Portanto a intensidade depende do ângulo entre os dois polarizadores e essa dependência é conhecida como **Lei de Malus**, em homenagem ao cientista que a descobriu: engenheiro, soldado e depois aluno de Fourier.



1775-1812

# Polarização: Lei de Malus

- Primeiro polarizador **P1**: seleciona uma componente de campo elétrico paralela ao eixo do polarizador:



$$E_t = E_0 \cos \theta$$

- Segundo polarizador **P2** (chamado de polarizador analisador): seu eixo de transmissão faz um ângulo  $\theta$  com o eixo de transmissão do polarizador **P1**, (direção y):
- Somente a componente de campo elétrico paralela ao eixo de transmissão desse segundo polarizador,  $\mathbf{E}_t$ , é transmitida.

# Polarização: Lei de Malus

- O detector vai medir a **irradiância** que é a energia média por unidade de área por unidade de tempo, incidente no detector.
- Mas a irradiância da onda é proporcional ao quadrado do campo elétrico, portanto a irradiância transmitida pelo polarizador analisador ideal  $\mathbf{P}_2$  é:

$$I_t = I_0 \cos^2 \theta$$

onde  $I_0$  é a irradiância máxima, que ocorre quando  $\theta = 0$ : os dois polarizadores  $\mathbf{P}_1$  e  $\mathbf{P}_2$  com os eixos de transmissão paralelos

- Este resultado, descrito pela equação acima, é conhecido como **Lei de Malus**.
- Quando  $\theta = 90^\circ$  a intensidade transmitida é **nula**, porque o campo elétrico transmitido pelo primeiro polarizador é perpendicular ao eixo de transmissão do segundo, que é o analisador (esse arranjo de polarizadores é dito cruzado).



# Polarização: Lei de Malus

- **Vida real:**

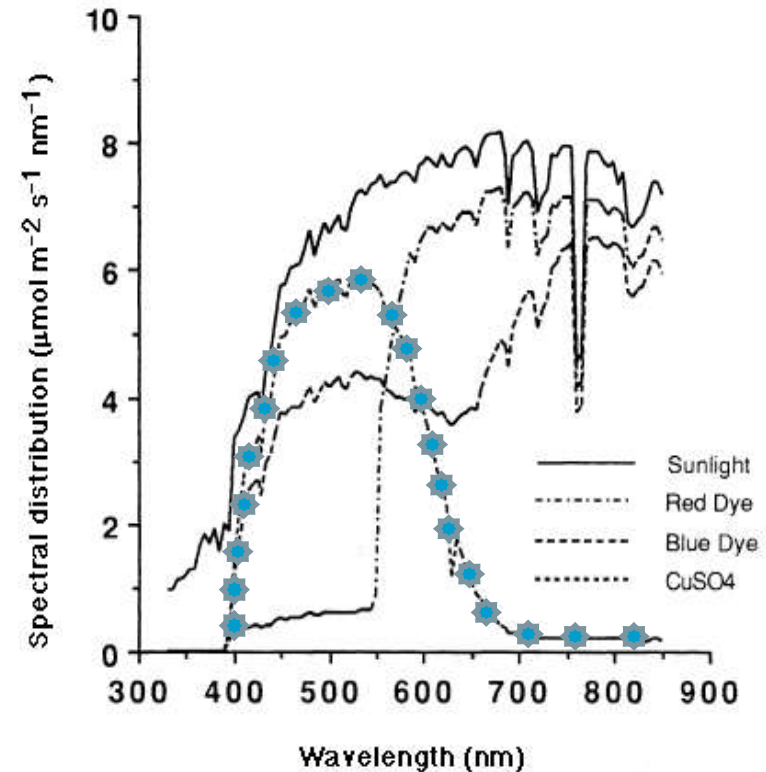
- O polaróide, por não ser bem transparente, absorve também parte da luz polarizada paralelamente ao eixo do polarizador
- O polaróide não funciona igualmente bem para todos os comprimentos de onda
- Há luz residual na sala que pode entrar no detector e que não passou pelos polaróides
- O detector é sensível ao infravermelho

- **Como vocês podem resolver isso?**

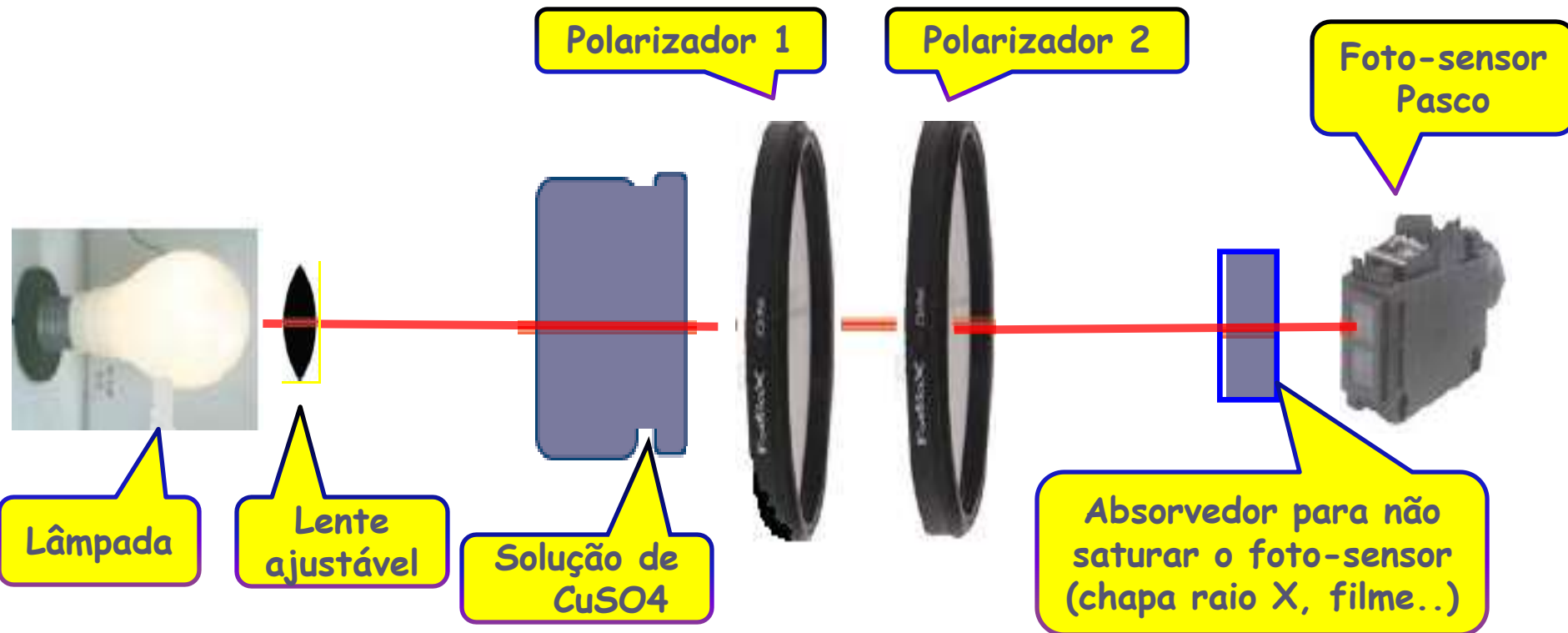
- Não esqueça de justificar

# Absorção do infravermelho

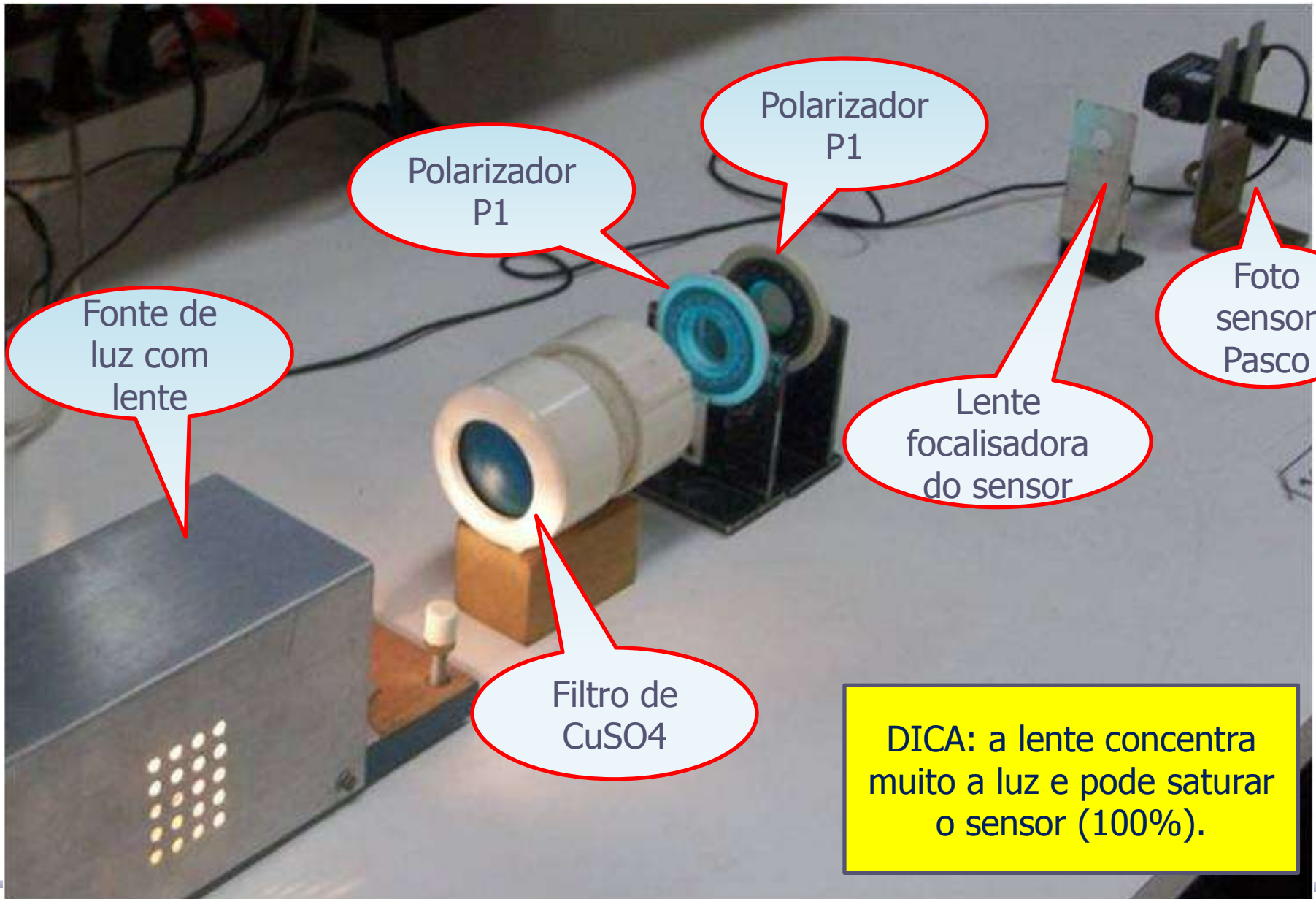
- Em Física Experimental 3, vimos que a maior parte da radiação emitida por uma lâmpada comum é no infravermelho.
- O detector de luz da Pasco funciona bem para o infravermelho, mas os polaróides não!
- Vamos usar um absorvedor de infravermelho: uma solução de  $\text{CuSO}_4$ .



# Aparato experimental: esquema



# Aparato experimental



Fonte de luz com lente

Polarizador P1

Polarizador P1

Foto sensor Pasco

Lente focalisadora do sensor

Filtro de CuSO4

DICA: a lente concentra muito a luz e pode saturar o sensor (100%).

# Sem a lente

Com o feixe desfocado para não saturar o detector

Sem a lente...



# Lei de Malus : preparação

- É importante obter um bom alinhamento de todos os elementos na figura anterior
- Verifique se o foto-sensor não está saturando (picos de intensidade máxima cortados)
- Mantenha a intensidade máxima  $\sim 90\%$
- Cuidado ao medir os ângulos entre os polarizadores
  - Qual a incerteza dessa medida? Justifique.
- Qual a incerteza na medida da intensidade luminosa?

# Para entregar – Parte 1

- Meça a intensidade luminosa  $\mathbf{I}$  em função de  $\boldsymbol{\theta}$ .
- Entregue o gráfico de  $\mathbf{I}$  por  $\boldsymbol{\theta}$ .
- Ajuste esse gráfico com a função teórica:

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

- Lembra do que foi falado sobre a vida real? Isso tem que ser levado em conta agora:
  - Talvez você vá ter que modificar o modelo teórico (Lei de Malus) para conseguir um bom ajuste.
  - Lembre que quaisquer parâmetros que introduzir devem ter significado físico.

# Polarização por reflexão

- O método mais direto de obter luz polarizada a partir de fontes luminosas comuns é por meio de reflexão em meios dielétricos.
- A luz refletida em janelas de vidro, na superfície polida de objetos plásticos, em bolas de bilhar, folhas de papel com um pouco de brilho e até no asfalto, é sempre parcialmente polarizada.

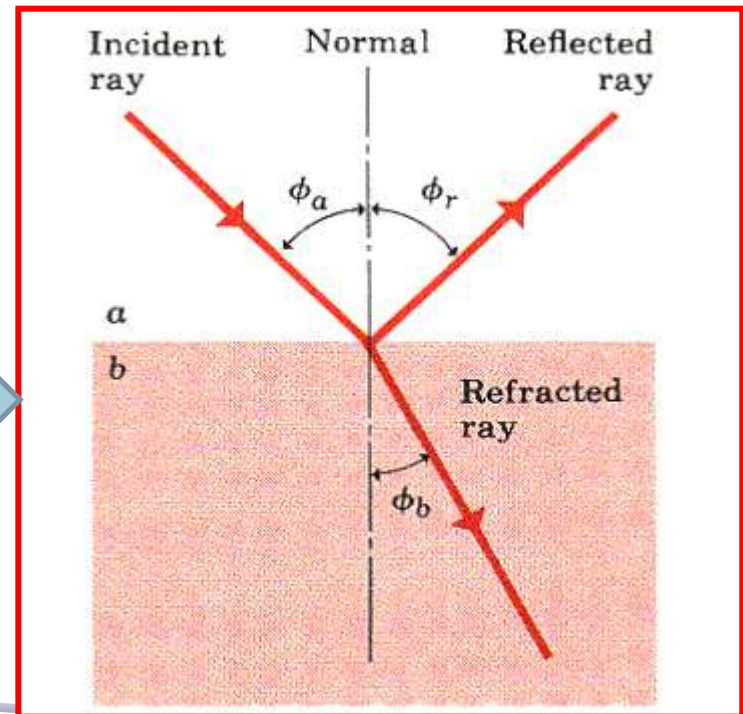




# Polarização por reflexão

- Definição: **plano de incidência** é o plano que contém os raios incidente, refletido e refratado na superfície de separação entre dois meios.

Neste caso  
é o plano  
da tela



# Polarização por reflexão

- Para explicar a polarização por reflexão, vamos utilizar o modelo de elétrons osciladores, que fornece uma explicação bastante simples do fenômeno.
  - Infelizmente esse modelo não proporciona uma descrição completa, porque ele não explica o comportamento observado com materiais magnéticos não condutores.
- Para o caso desta experiência esse modelo é razoável, por sua simplicidade e por fornecer explicações satisfatórias para as observações que vamos realizar.

# Modelo dos elétrons osciladores

- Quando a luz penetra num material dielétrico transparente, o campo elétrico dessa onda vai obrigar os elétrons ligados do meio material a vibrar na sua direção.
  - Essa configuração é, na verdade, um dipolo, de um lado uma carga negativa (elétron) que vibra em relação a uma carga positiva (o átomo onde o elétron está ligado). Essa configuração de cargas, por sua vez, re-irradia e essa radiação é, obviamente, do tipo dipolar.

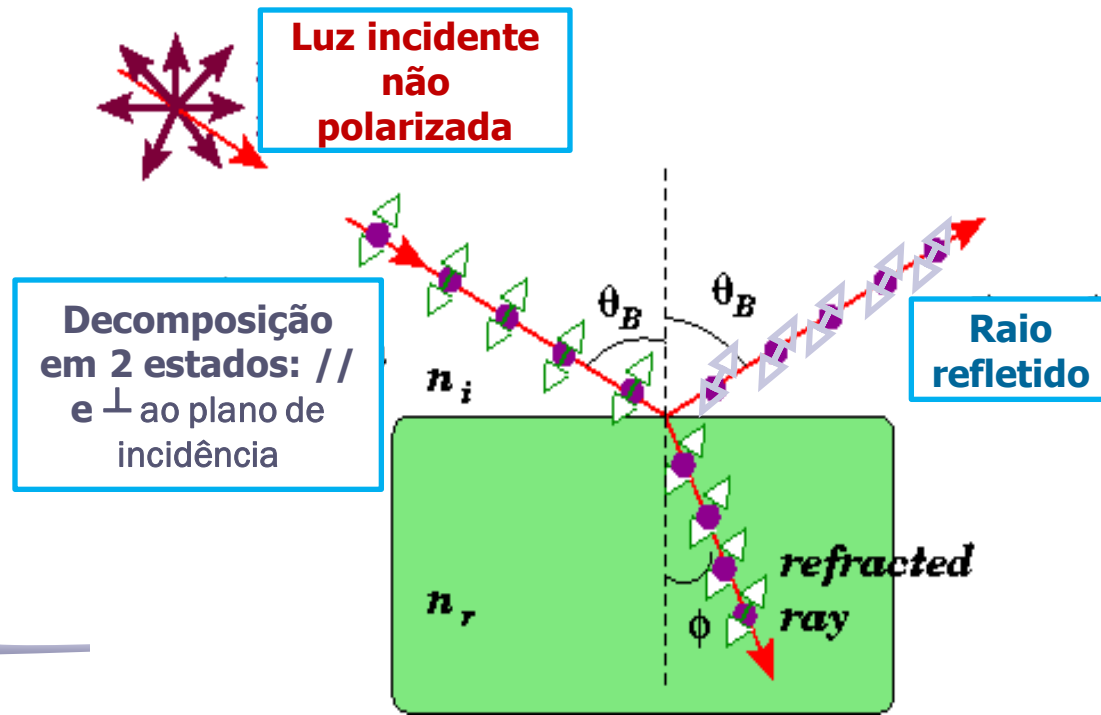


# Modelo dos elétrons osciladores

- Uma parte dessa energia re-emitida vai aparecer na forma de uma onda refletida e outra como onda refratada.
- **Como isso acontece?**
- Toda onda não polarizada pode ser decomposta em duas componentes linearmente polarizadas segundo dois eixos perpendiculares quaisquer
- Vamos escolher um eixo paralelo ao plano de incidência e o outro perpendicular ao plano de incidência.

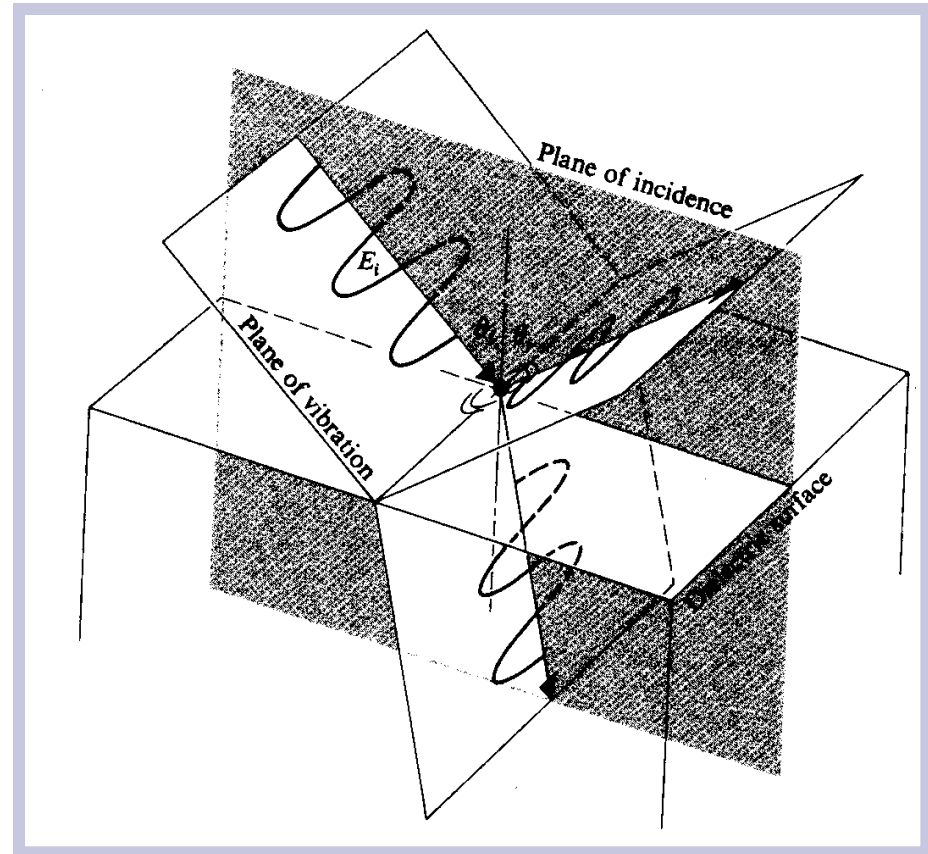
# Modelo dos elétrons osciladores

- A onda que incide no material, por exemplo, uma placa de lucite, terá 2 componentes → duas ondas planas:
  - uma linearmente polarizada perpendicularmente ao plano de incidência
  - outra linearmente polarizada paralela ao plano de incidência.



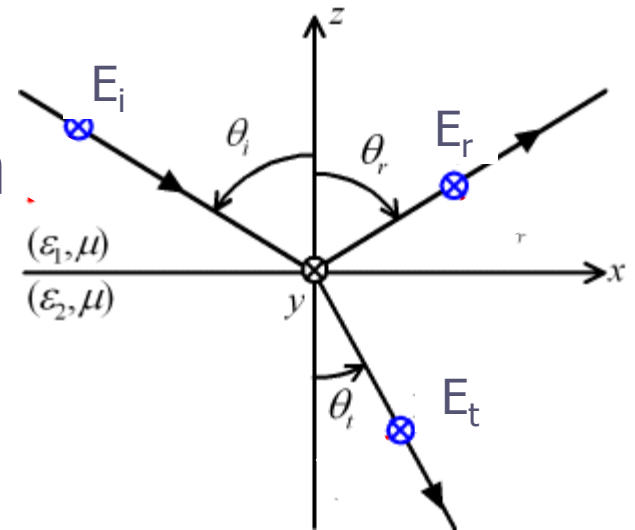
# Perpendicular

- A componente perpendicular tem o campo elétrico  $\mathbf{E}$  perpendicular ao plano de incidência.
- Parte da onda sofre refração na interface de separação entre os dois meios e entra no meio dielétrico fazendo um ângulo  $\theta_t$  (ângulo de transmissão ou de refração) com a normal à superfície dielétrica.
- A outra parte é refletida fazendo um ângulo  $\theta_r$  com a mesma normal.



# Perpendicular: dentro do material

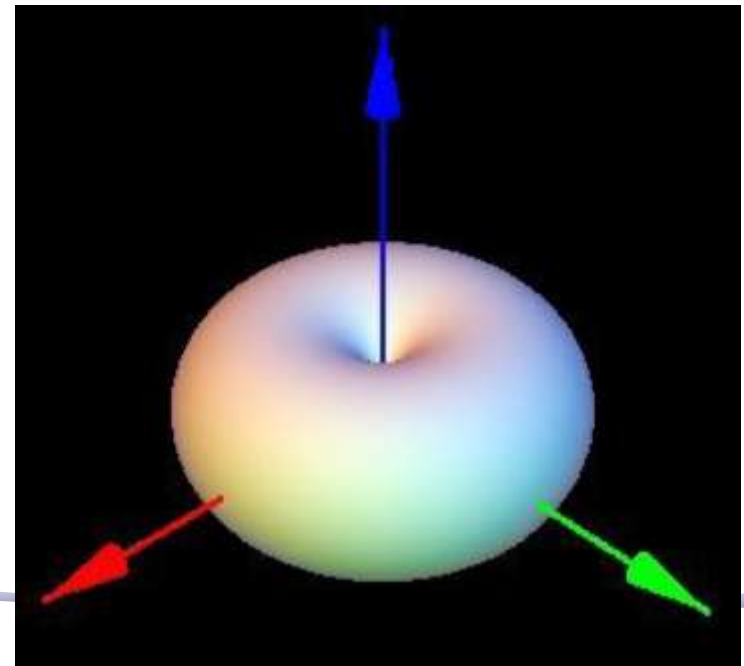
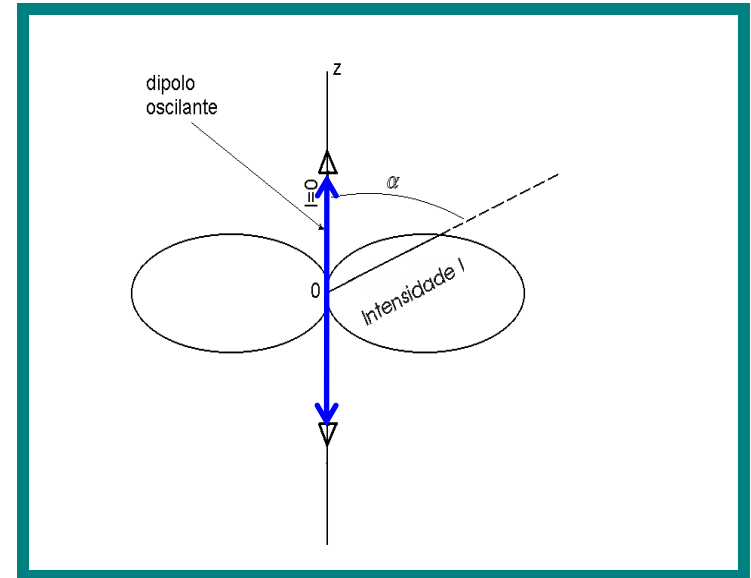
- Os elétrons ligados do material do meio vão vibrar na direção normal ao plano de incidência (a mesma direção do campo)
- Cada conjunto de elétron e seu átomo é um dipolo, que por sua vez, re-irradia e essa radiação é, obviamente, do tipo dipolar.
- Parte da energia re-emitada vai aparecer na forma de uma onda refletida e parte como a onda refratada.



# Radiação de um dipolo

## Como é a radiação bipolar?

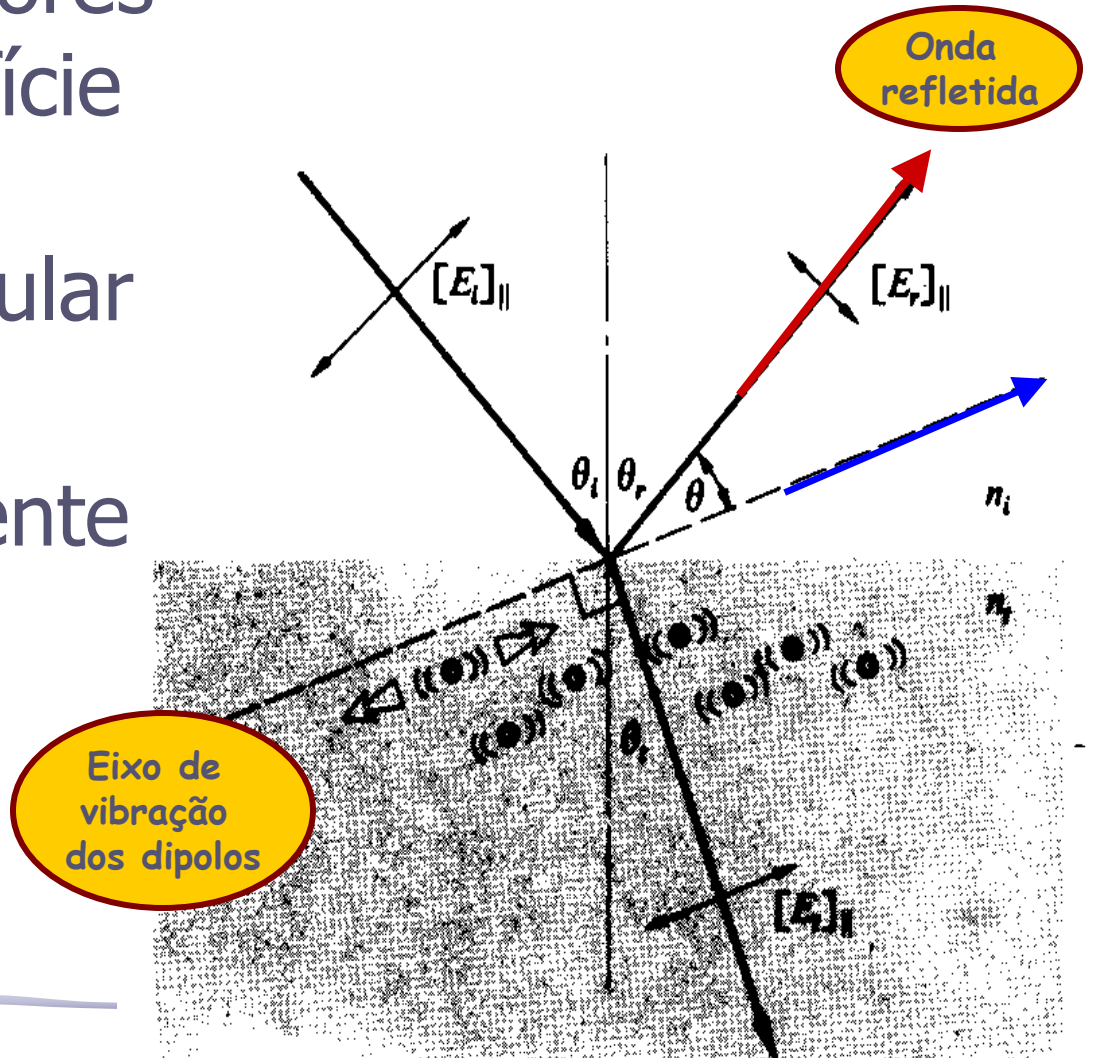
- A distribuição angular da radiação dipolar não é isotrópica:
  - ela é nula ao longo do eixo que une as cargas (azul) e máxima na direção perpendicular a esse eixo
- Portanto as intensidades das ondas refletida e refratada serão regidas pela distribuição angular da radiação bipolar





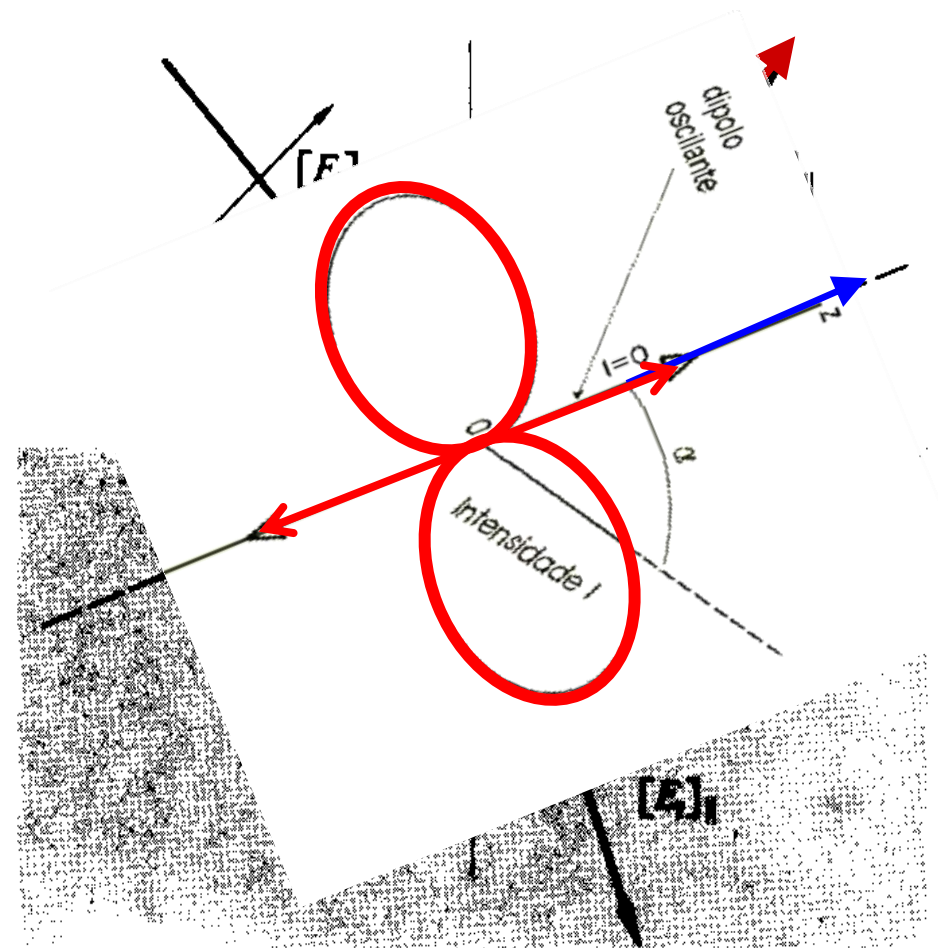
# Componente paralela ao plano

- Os dipolos osciladores próximos à superfície tem que vibrar na direção perpendicular a onda refratada.
- Assim, a componente refletida tem uma amplitude menor



# Polarização por reflexão

A intensidade da onda refletida é, agora, relativamente baixa porque a intensidade da radiação emitida cai muito à medida que a direção de vibração do campo elétrico da onda incidente se aproxima da direção do eixo dos dipolos.



# Polarização por reflexão

Se o ângulo de incidência  $\theta_i$  for tal que o ângulo  $\theta$  seja igual a **zero**, a onda refletida desaparece porque o ângulo de reflexão coincide com o eixo dos dipolos e estes não emitem nessa direção.

Nessas condições:

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

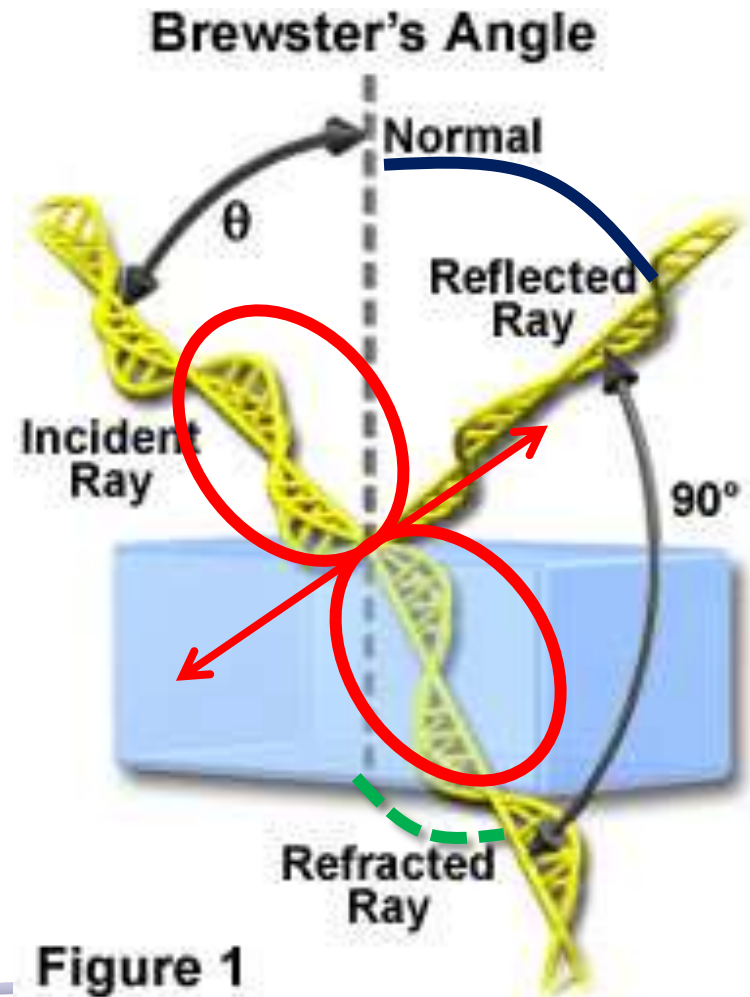


Figure 1

# ângulo de Brewster

Nessas condições, ( $\theta=0$ ) se a onda incidente for não polarizada, (lembrando que ela pode sempre ser decomposta em duas componentes polarizadas, ortogonais e incoerentes), apenas a componente polarizada na direção normal ao plano de incidência será refletida.

**A outra componente, polarizada paralelamente ao plano de incidência, desaparece.**

- Portanto no ângulo de incidência para o qual  $\theta=0$ , a luz refletida é totalmente polarizada.
- Esse ângulo é o **ângulo de Brewster** ou de polarização.

# Lei de Brewster



## Lei de Snell

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

$n_i$  é o índice de refração do ar

$n_t$  é o índice de refração do meio

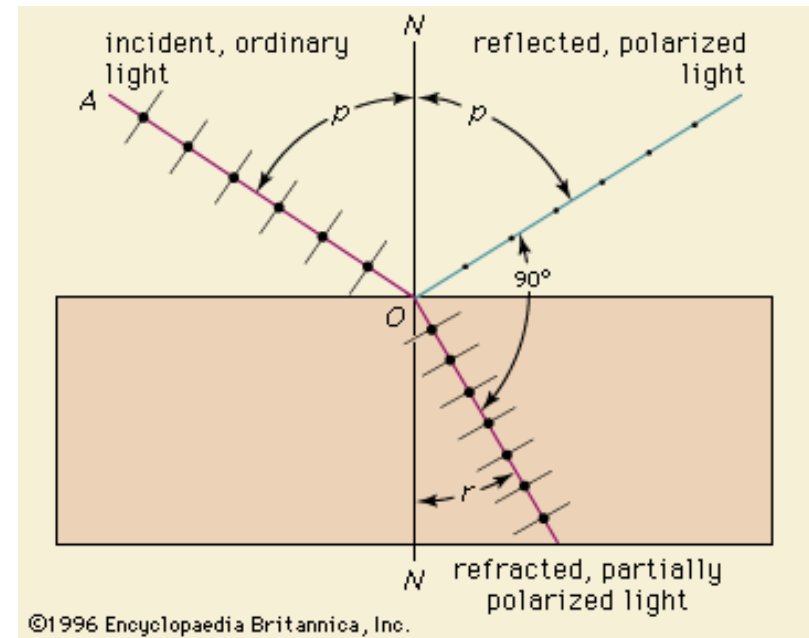
$\theta_i$  é o ângulo de incidência

$\theta_t$  é o ângulo de refração

Lei da reflexão:  $\theta_r = \theta_i$

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

$\theta_B$  ângulo de incidência para o qual a onda polarizada paralelamente ao plano de incidência desaparece



# Lei de Brewster

Obtém-se:

$$n_i \cdot \text{sen} \theta_B = n_t \cdot \text{sen} \theta_t$$

mas  $\theta_t = 90 - \theta_B$ , portanto  $\text{sen} \theta_t = \text{cos} \theta_B$ :

$$n_i \cdot \text{sen} \theta_B = n_t \cdot \text{cos} \theta_B$$

Assim, temos que:

$$\text{tg} \theta_B = \frac{n_t}{n_i}$$

ângulo de  
Brewster



David Brewster:  
1761-1868

Essa **equação** é conhecida como **Lei de Brewster** em homenagem a **Sir David Brewster**, professor da St. Andrews University e inventor do caleidoscópio, que a descobriu empiricamente na segunda metade do século XIX.

# Polarização por reflexão: resumindo

- Para incidência no ângulo de Brewster, a luz refletida é completamente polarizada na direção perpendicular ao plano de incidência
- Para um ângulo qualquer, a luz refletida em diversas superfícies é sempre **parcialmente** polarizada.

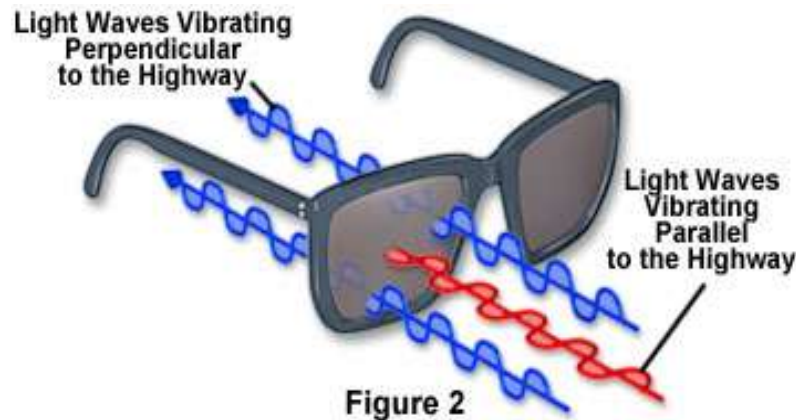


Figure 2

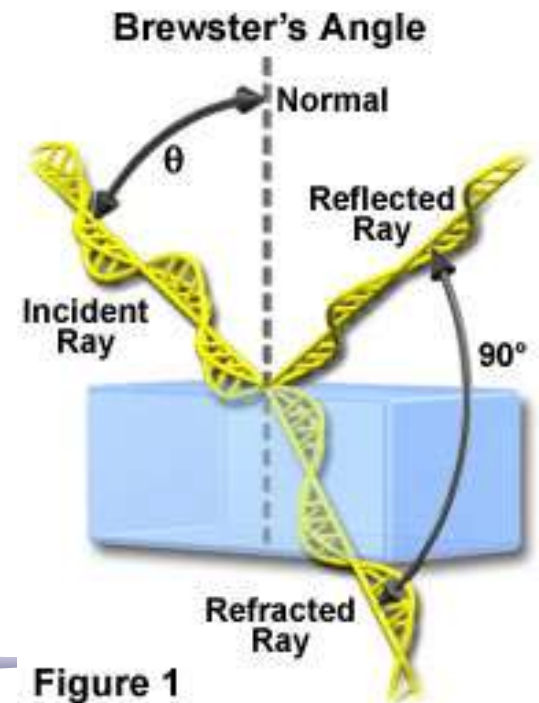


Figure 1

# Coeficientes de Reflexão

- Quando a luz, ou radiação eletromagnética, incide na interface de separação entre dois meios dielétricos com índices de refração diferentes, vamos definir o coeficiente de reflexão, **R**, ou reflectância:

$$R = \frac{\text{dens de fluxo de energia refletida na interface de separação de 2 meios}}{\text{dens de fluxo de energia incidente}}$$

- A densidade de fluxo de energia radiante é a irradiância cuja unidade é Watt/m<sup>2</sup>.

é a energia média, por unidade de tempo, cruzando uma unidade de área, perpendicularmente à direção de propagação



# Coeficientes de Transmissão

O coeficiente de transmissão  $T$ , ou **transmitância**:

$$T = \frac{\text{dens de fluxo de energia refratada na interface de separação de 2 meios}}{\text{dens de fluxo de energia incidente}}$$

Esses coeficientes podem ser decompostos em duas componentes, uma delas com estado de polarização paralelo ao plano de incidência e outra com estado de polarização perpendicular ao plano de incidência. Assim teremos  $R_{//}$  e  $R_{\perp}$  e  $T_{//}$  e  $T_{\perp}$ .

A dedução das expressões para esses coeficientes não vai ser feita aqui, mas pode ser encontrada na **seção 4.6.2, capítulo 4** e na **seção 8.6.1 do capítulo 8** do livro **Optics** de E. Hecht.

# Como obter os coeficientes

- Tanto  $\mathbf{R}$  como  $\mathbf{T}$  são deduzidos impondo condições de continuidade para os campos elétrico e magnético da radiação eletromagnética na superfície de separação entre os meios dielétricos que ela atravessa.
- As condições de continuidade para as componentes normais e tangenciais à superfície de separação fornecem as equações que levam às expressões para  $\mathbf{R}_{//}$ ,  $\mathbf{R}_{\perp}$ ,  $\mathbf{T}_{//}$ ,  $\mathbf{T}_{\perp}$ .

# Coeficientes de Reflexão

Os **coeficientes de reflexão** para polarização perpendicular ao plano de incidência ( $R_{\perp}$ ) e para polarização paralela ( $R_{//}$ ) são dados por:

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

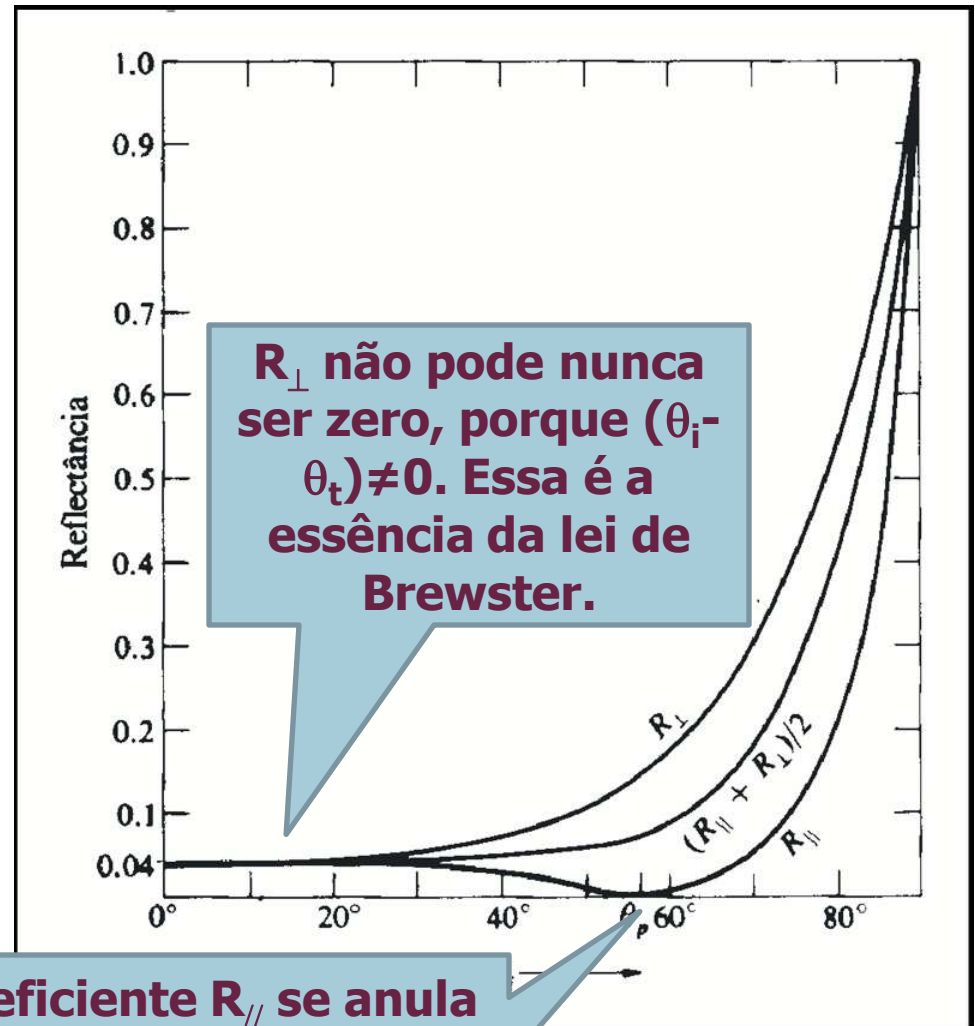
O coeficiente  $R_{//}$  se anula quando  $(\theta_i + \theta_t) = 90^\circ$ , porque o denominador se torna infinito ( $\operatorname{tg}90 = \infty$ ).

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

$R_{\perp}$  não pode nunca ser zero, porque  $(\theta_i - \theta_t) \neq 0$ . Essa é a essência da lei de Brewster.

# Coeficientes de Reflexão

Se medirmos a refletância paralela e perpendicular (ao plano de incidência), em função do ângulo de incidência, vamos obter o gráfico ao lado.



**$R_{\perp}$  não pode nunca ser zero, porque  $(\theta_i - \theta_t) \neq 0$ . Essa é a essência da lei de Brewster.**

**O coeficiente  $R_{\parallel}$  se anula quando  $(\theta_i + \theta_t) = 90^\circ$ , porque o denominador se torna infinito ( $\text{tg}90 = \infty$ ).**

# Objetivos

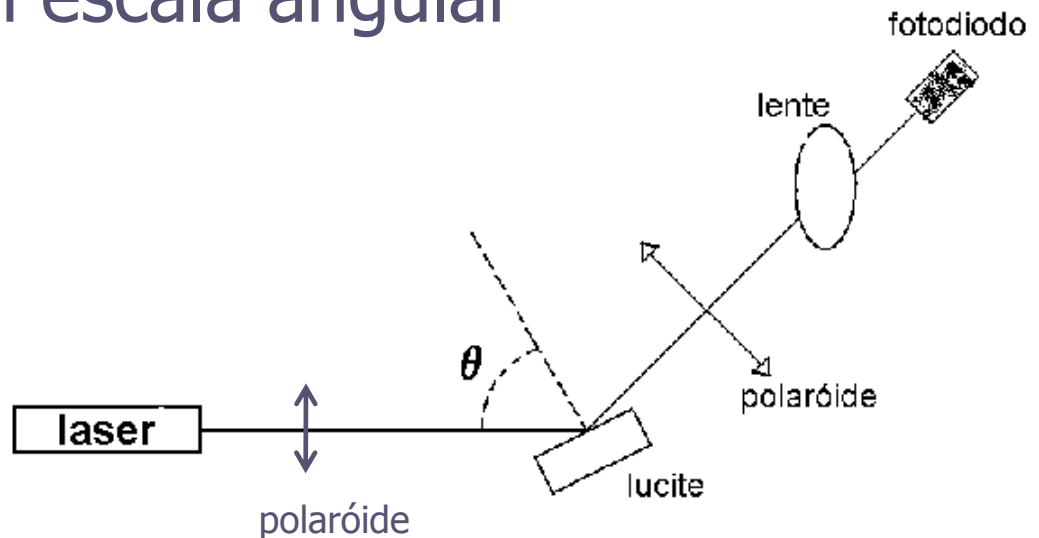
Verificar experimentalmente a polarização por reflexão no acrílico

- Medir a razão entre os coeficientes de reflexão  $R_{//}$  e  $R_{\perp}$  em função do ângulo de incidência
- Determinar o **ângulo de Brewster** e o **índice de refração** do material refletor (mínimo de  $R_{//}$ ) com boa precisão.

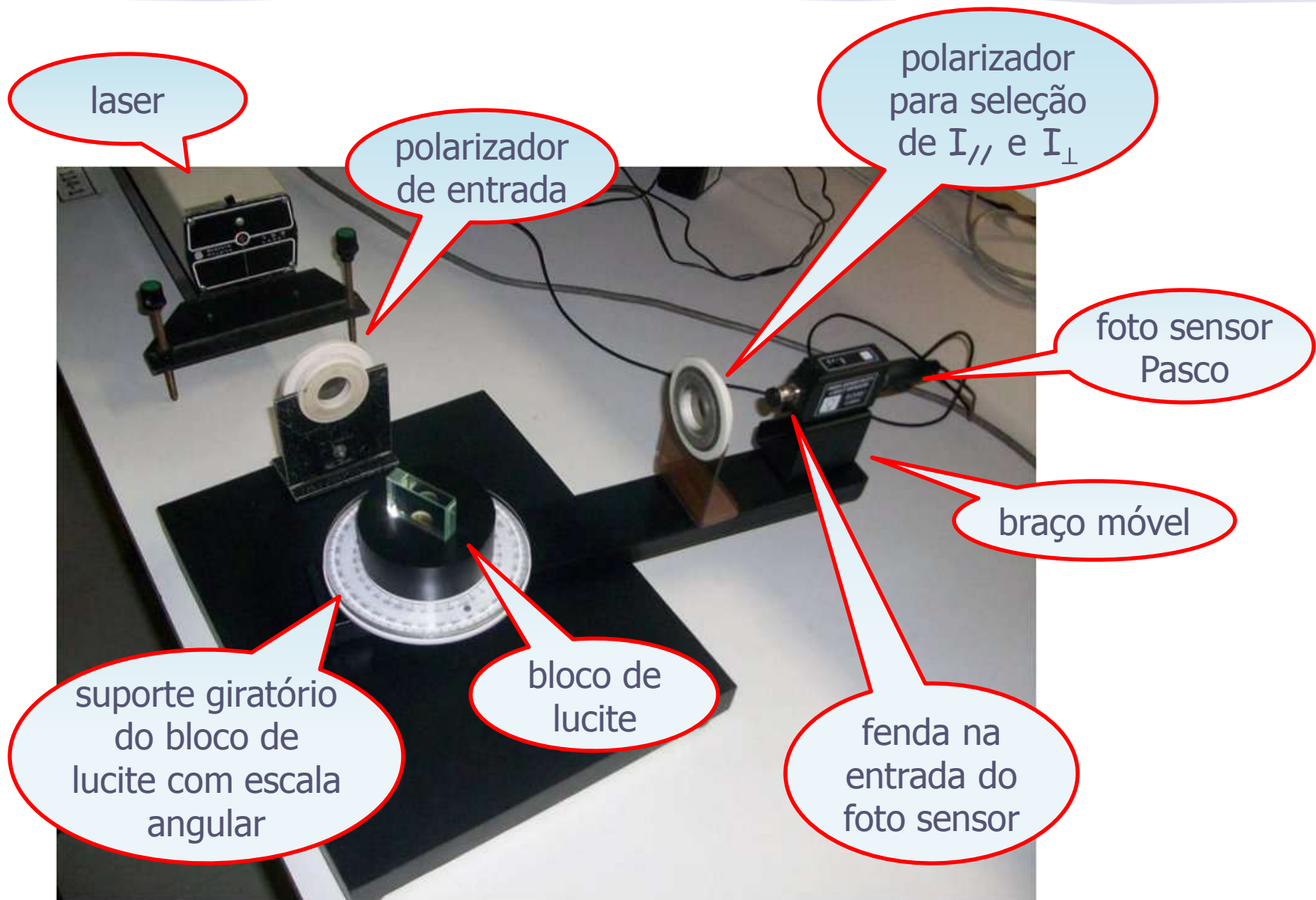
# O aparato experimental:

O aparato consiste de:

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

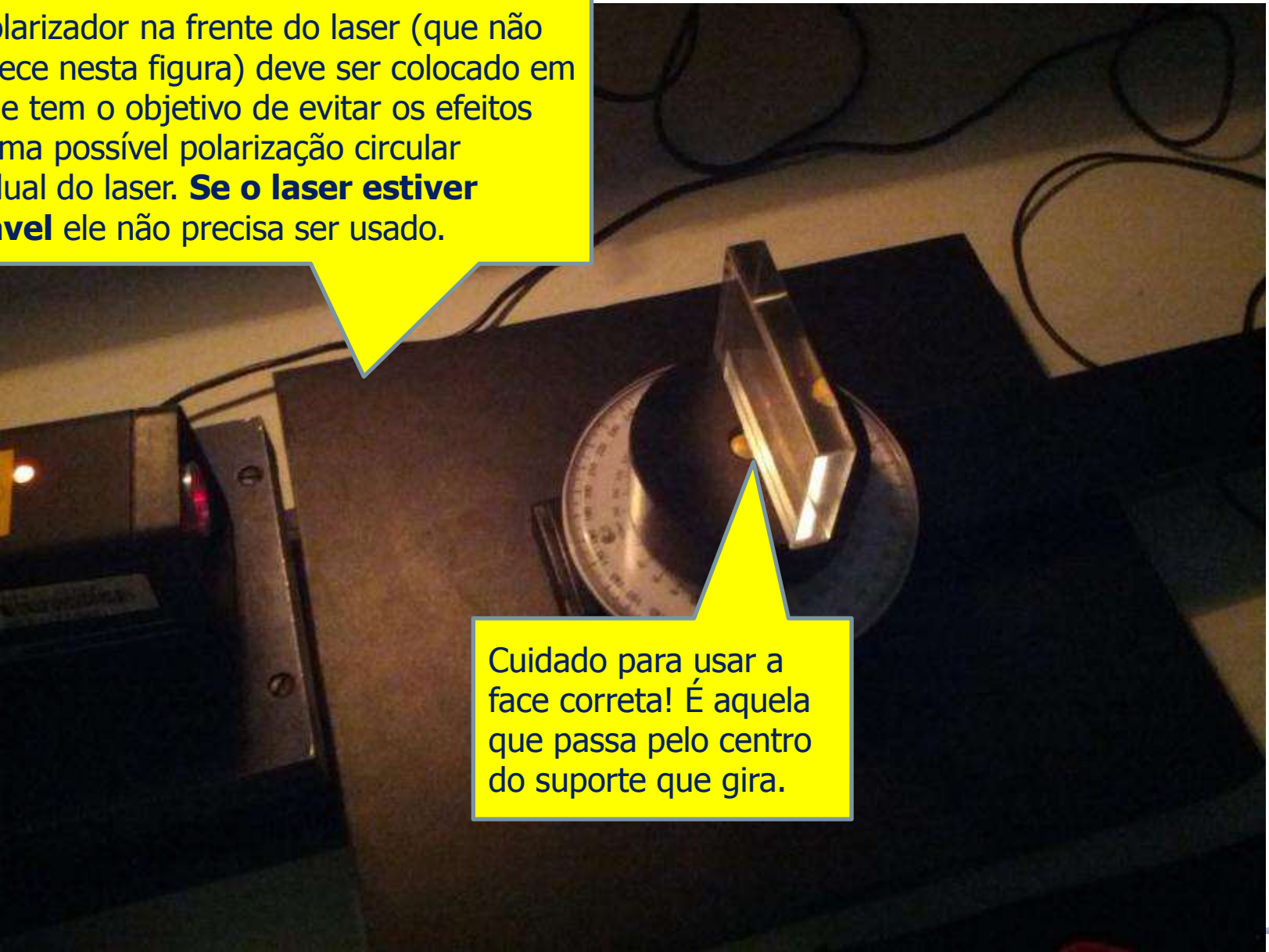


# Aparato experimental



# DICAS

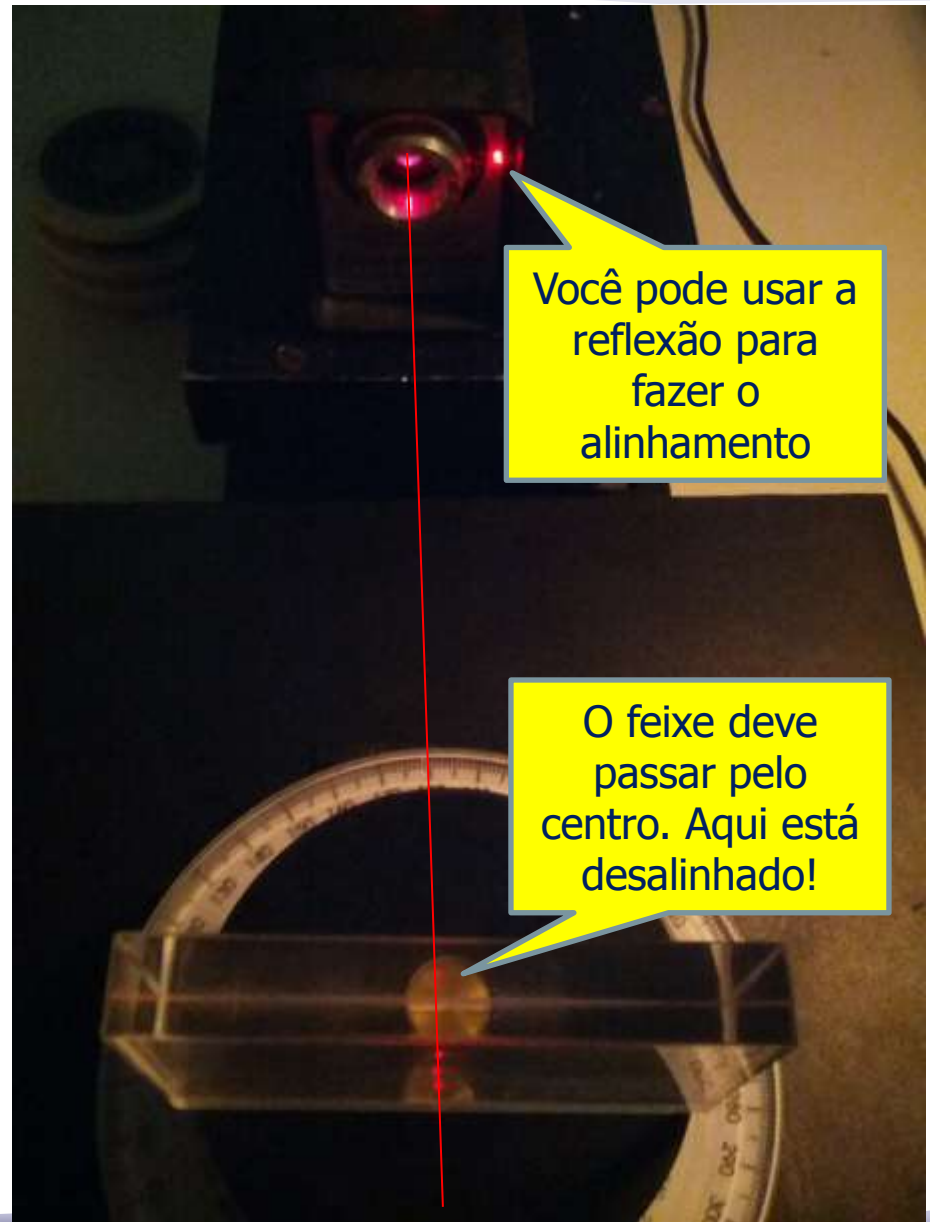
O polarizador na frente do laser (que não aparece nesta figura) deve ser colocado em  $45^\circ$ , e tem o objetivo de evitar os efeitos de uma possível polarização circular residual do laser. **Se o laser estiver estável** ele não precisa ser usado.



Cuidado para usar a face correta! É aquela que passa pelo centro do suporte que gira.



# DICAS



# Para entregar – Parte 2

1. Meça as intensidades paralela e perpendicular variando o ângulo de incidência de  $5^\circ$  em  $5^\circ$ .
2. Para cada ângulo, faça duas medidas:
  - Intensidade paralela (polarizador em  $90^\circ$ ),
  - Intensidade perpendicular (polarizador em  $0^\circ$ )
3. Você não estará medindo os coeficientes de reflexão, mas algo proporcional a eles. Para resolver esse problema, apresente a razão  $I_{//}/I_{\perp}$ . Isso é  $R_{//}/R_{\perp}$ ? Justifique.
4. Superponha a curva teórica para essa razão à que você mediu.

# Para entregar – Parte 3

1. Determine o ângulo de Brewster com boa precisão (talvez precise fazer parte das medidas com passos angulares menores)
2. Determine o índice de refração do lucite.
3. Compare com os resultados obtidos pelos colegas (todo mundo tem bloco do mesmo material).

# Mais dicas

O índice de refração do material depende do comprimento de onda (pouco), portanto o ângulo de polarização também depende.

Use a função “keep” do DataStudio.

Dê uma olhada no procedimento desta parte na apostila de polarização.

## NUNCA DESLIGAR O LASER

- O laser é não polarizado mas leva um tempo (algumas horas) para atingir essa situação e estabilizar. Alguns podem manter uma polarização circular residual.

Imagem sem polarizador



sem

com

A mesma imagem com polarizadores nas direções indicadas



without polarizer



with polarizer



**With**



**Without**





Sem polarizador

Com polarizador para amarelo e azul

