Física Experimental IV

https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=90535

2º Semestre 2021

Exp. 3 – Polarização

Atividade 4 – Placas de Onda

Semana 12 - 2/Dezembro

Prof. Henrique Barbosa
hbarbosa@if.usp.br
http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa

Exp. 3 – Polarização

- Objetivos
  - Estudar a polarização linear, circular, e elíptica
  - A reflexão e a polarização: reflexão na interface com dielétricos e com superfícies metálicas
  - Dielétricos que mudam o estado de polarização: as placas ½ onda e ¼ de onda

Cronograma

- 4 atividades:
  - **Atividade 1:** Fenômenos de polarização da luz - Lei de Malus
  - **Atividade 2:** Polarização após reflexão em dielétrico
  - **Atividade 3:** Polarização após reflexão em espelho
  - **Atividade 4:** Alteração da polarização por placa de onda

Tipos de polarizador

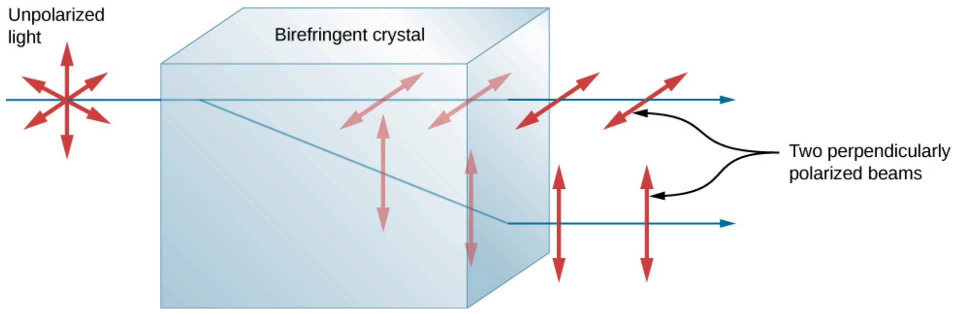
- **Absorção:** absorvem a componente dos campos EM em uma data direção

- **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 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



Birrefringência

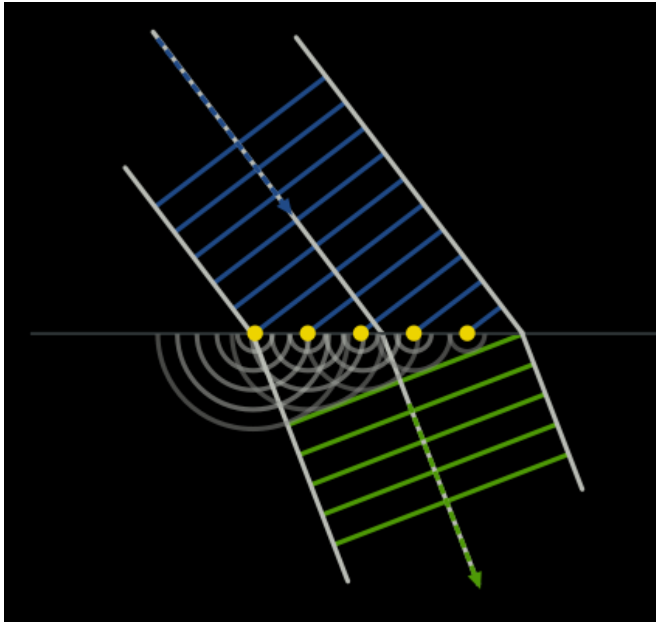
- **Birrefringência**, ou refração dupla, é a decomposição de um raio de luz em dois raios (o raio **ordinário** e o **extraordinário**), dependendo da sua **polarização**, quando ele passa por certos tipos de materiais.
- Este efeito só pode acontecer se o material for **anisotrópico**, isto é, o índice de refração não for o mesmo em todas as direções e polarizações.

Birrefringência

- Se o material tiver apenas um **eixo de anisotropia** (eixo óptico), a birrefringência pode ser tratada associando dois **índices de refração** diferentes para as duas polarizações possíveis.
- Se o material tiver dois eixos ópticos, falamos de birrefringência **biaxial.** Neste caso o índice de refração em geral é um **tensor** complexo com três autovalores distintos n_α, n_β, n_γ.

Birrefringência: Modelo Simples

- A luz se propaga numa substância transparente excitando os elétrons do meio.
- Os elétrons oscilam forçados pelo campo elétrico e reemitem a radiação absorvida.
- Estas ondas secundárias se combinam e interferem, resultando na onda refratada.



Birrefringência: Modelo Simples

- O material será opticamente anisotrópico se a força de ligação da nuvem de elétrons ao núcleo for diferente para direções diferentes (é como se tivéssemos 3 constantes de mola diferentes).

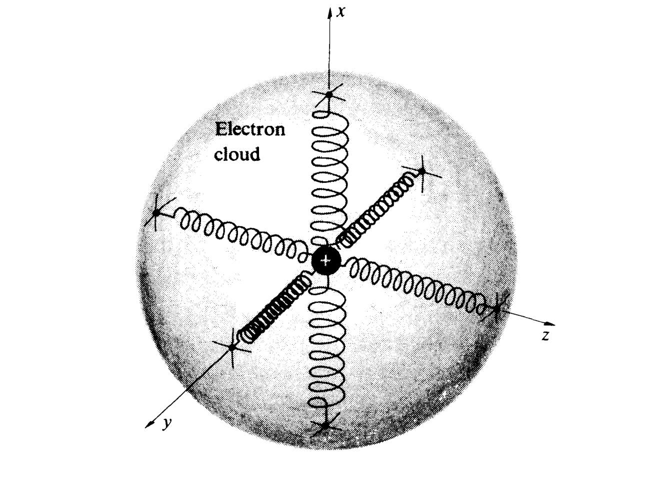


Figure 8.14 Mechanical model depicting a negatively charged shell bound to a positive nucleus by pairs of springs having different stiffness.

Calcite

- Um típico cristal birrefringente é a calcite ($CaCO_3$).

Ela tem um eixo óptico, perpendicular ao plano cristalino

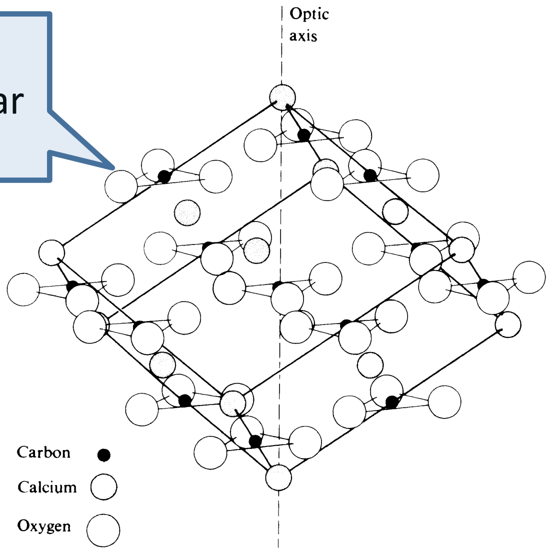


Figure 8.16 Arrangement of atoms in calcite.

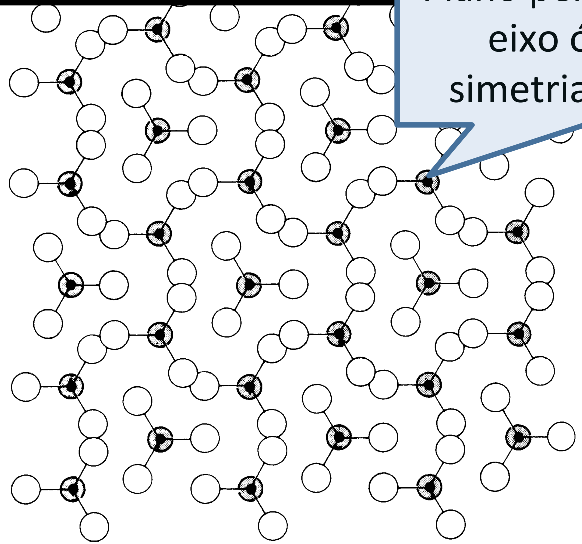


Figure 8.17 Atomic arrangement for calcite looking down the optical axis.

Plano perpendicular ao eixo óptico tem simetria de rotação.

Calcite

- Este material tem um eixo óptico.
- Qualquer onda **EM** incidente pode ser decomposta em duas componentes:
  - uma **no plano** formado pela direção da onda e do eixo óptico (**e**, extraordinário),
  - e uma **perpendicular** a ele (**o**, ordinário)

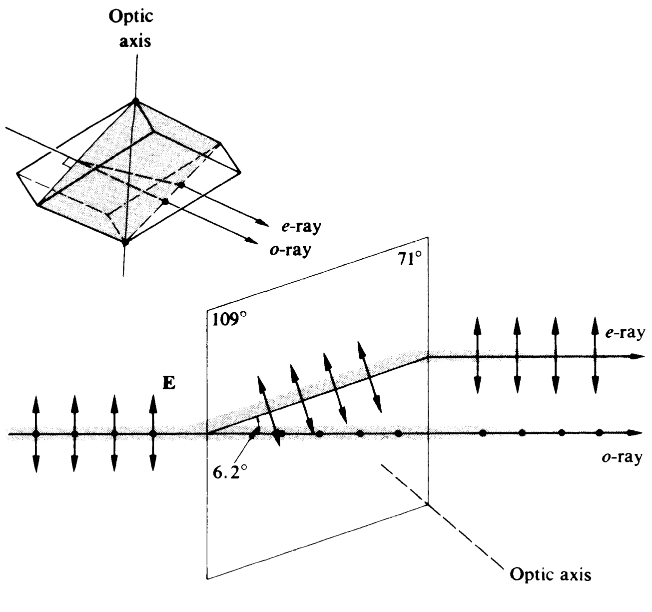


Figure 8.19 A light beam with two orthogonal field components traversing a calcite principal section.

As Duas Direções

- No plano perpendicular ao eixo óptico, as duas molas são iguais e a velocidade de propagação é mesma para qualquer orientação de ***E*** no plano. Por isso **raio-o** não sofre desvio.

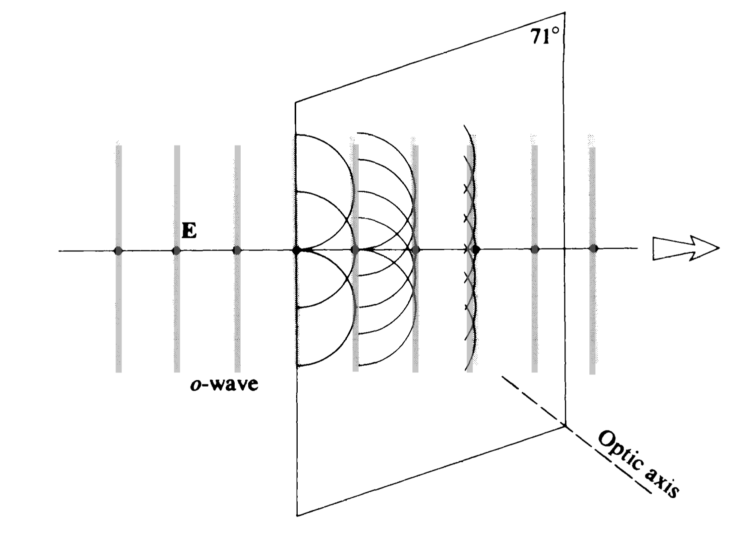


Figure 8.20 An incident plane wave polarized perpendicular to the principal section.

As Duas Direções

- O **raio-e** tem duas componentes: uma na direção do eixo e outra perpendicular.
- Cada uma tem uma velocidade diferente e por isso o **raio-e** muda de direção.

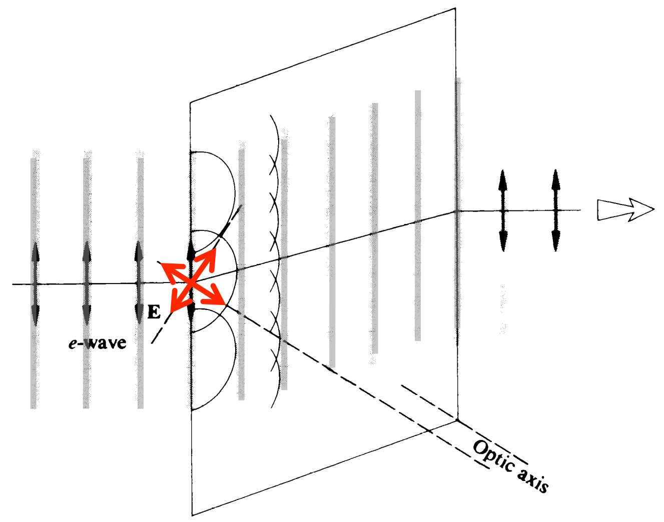


Figure 8.21 An incident plane wave polarized parallel to the principal section.

Placa de Onda

- Podemos cortar o material birrefringente com o eixo óptico **perpendicular** a face onde incidimos a luz.
- Neste caso, ***E*** será sempre perpendicular ao eixo óptico!
  - Mesma velocidade $\mathbf{v}_{\perp}$
  - Não há defasagem!

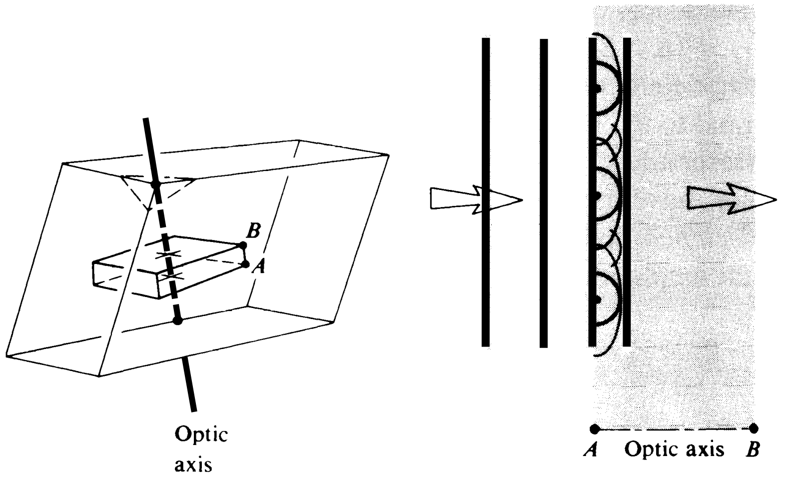


Figure 8.36 A calcite plate cut perpendicular to the optic axis.

Placa de Onda

- Podemos cortar de tal forma que o eixo óptico seja **paralelo** a face onde incidimos a luz.
- Neste caso, cada componente de ***E*** percebe um índice de refração diferente!
  - Velocidades $\mathbf{v}_{//}$ e $\mathbf{v}_{\perp}$ diferentes
  - Aparece uma defasagem (que depende da espessura do material)

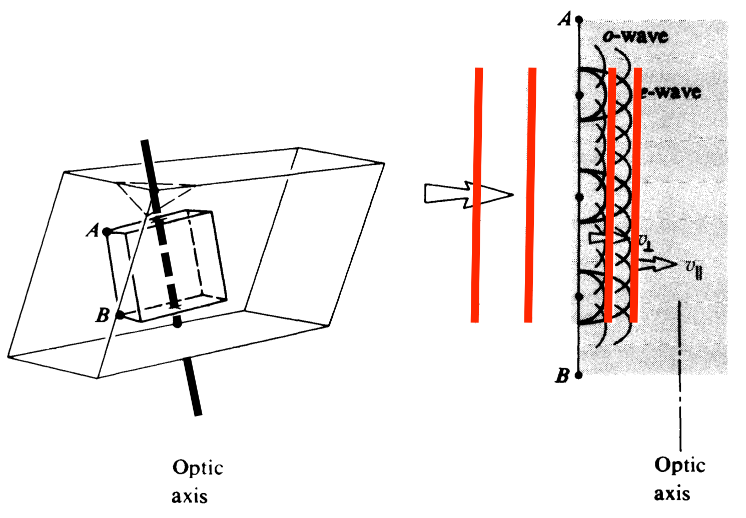
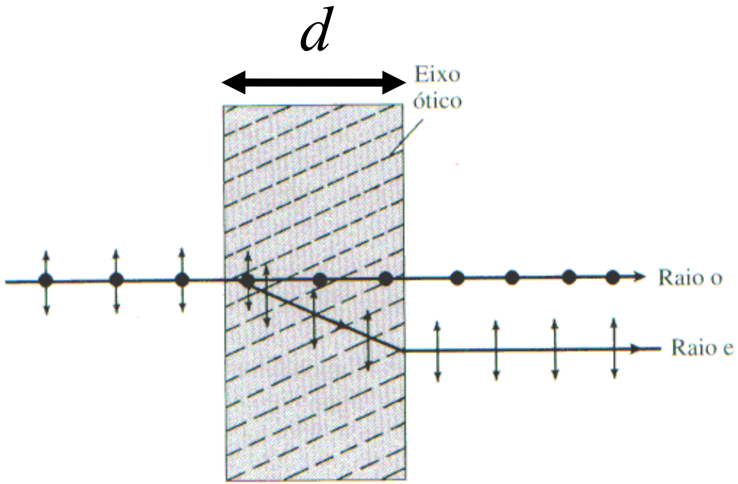


Figure 8.37 A calcite plate cut parallel to the optic axis.

Placas de onda

- São placas confeccionadas a partir de materiais birrefringentes cujo objetivo é alterar as fases entre as componentes ***o*** e ***e*** da luz incidente
- Seja uma placa de espessura **d**. Qual é a diferença de fase entre as duas componentes após sair da placa?



Placas de onda

- Índice de refração para cada componente:

$$n_o = \frac{c}{v_o} \qquad n_e = \frac{c}{v_e}$$

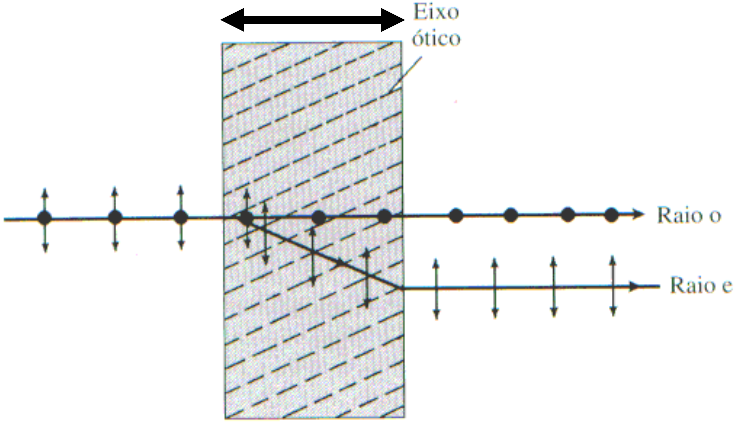
- Tempo que cada componente leva para atravessar a placa

$$t_o = \frac{d}{v_o} = d\frac{n_o}{c} \qquad t_e = d\frac{n_e}{c}$$

- Diferença de tempo:

$$\Delta t = t_o - t_e = \frac{d}{c}\left(n_o - n_e\right)$$

d



Placas de onda

- Se a diferença de tempo entre as duas ondas é

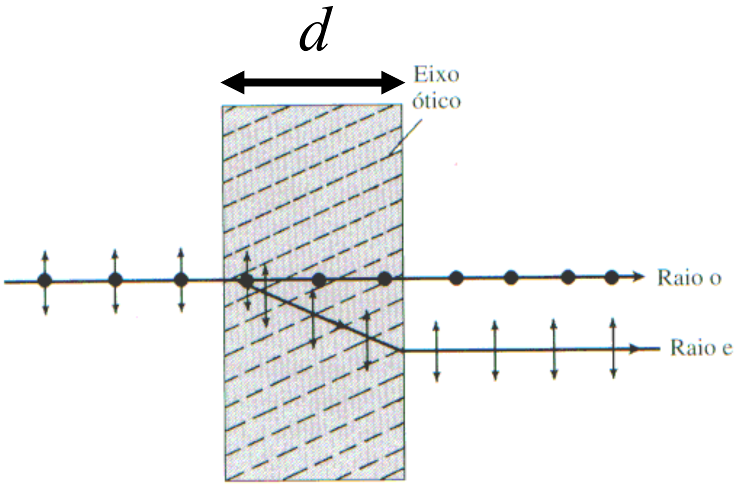
$$\Delta t = t_o - t_e = \frac{d}{c}\left(n_o - n_e\right)$$

- Então a diferença de fase é

$$\Delta\phi = 2\pi\frac{\Delta t}{T}, \quad T = \frac{\lambda}{c}$$

- Substituindo:

$$\Delta\phi = 2\pi\frac{d}{\lambda}\left(n_o - n_e\right)$$



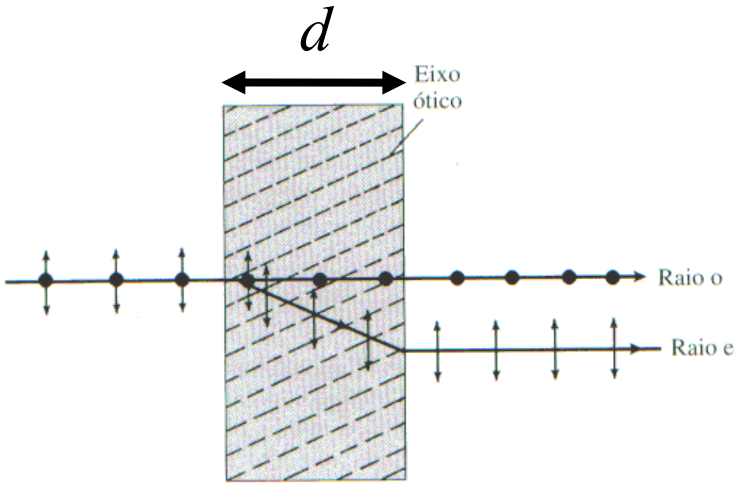
Placas de ½ onda

- A placa de ½ onda é aquela na qual a diferença de fase obtida entre as duas componentes é ½ do período, ou seja, π.

$$\Delta\phi = (2m+1)\pi$$

- Isto somente ocorre quando a espessura da placa está bem relacionada com o comprimento de onda, de tal forma que:

$$d = \frac{(2m+1)}{2(n_o - n_e)}\lambda$$

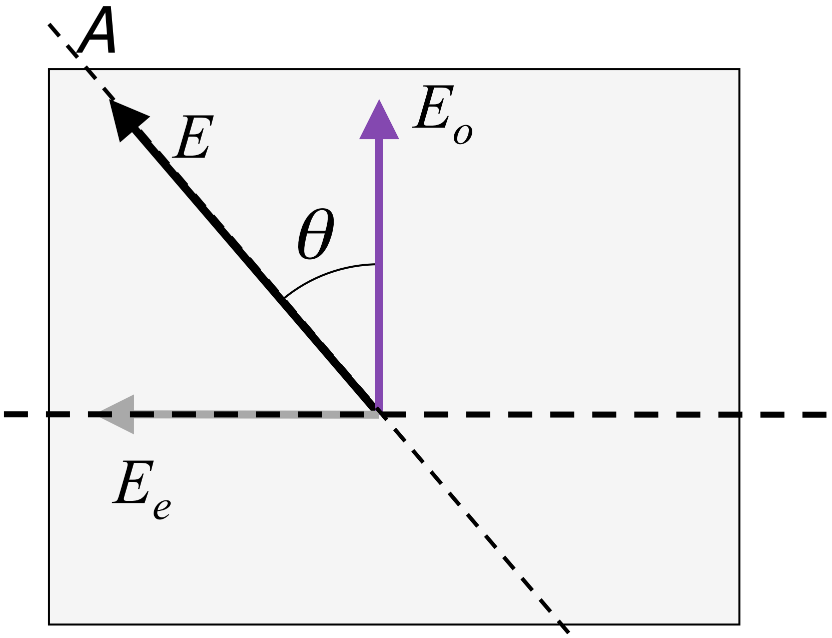


Placas de ½ onda

- Componentes do campo elétrico na entrada da placa
  - O campo elétrico esta sempre oscilando ao longo da linha A
  - O campo elétrico pode, em qualquer instante de tempo, ser escrito como

$$\vec{E}_{in} = E_o \cos(kx - \omega t)\hat{o}$$
$$+E_e \cos(kx - \omega t)\hat{e}$$

- A placa de ½ onda introduz uma fase de π na componente *e*

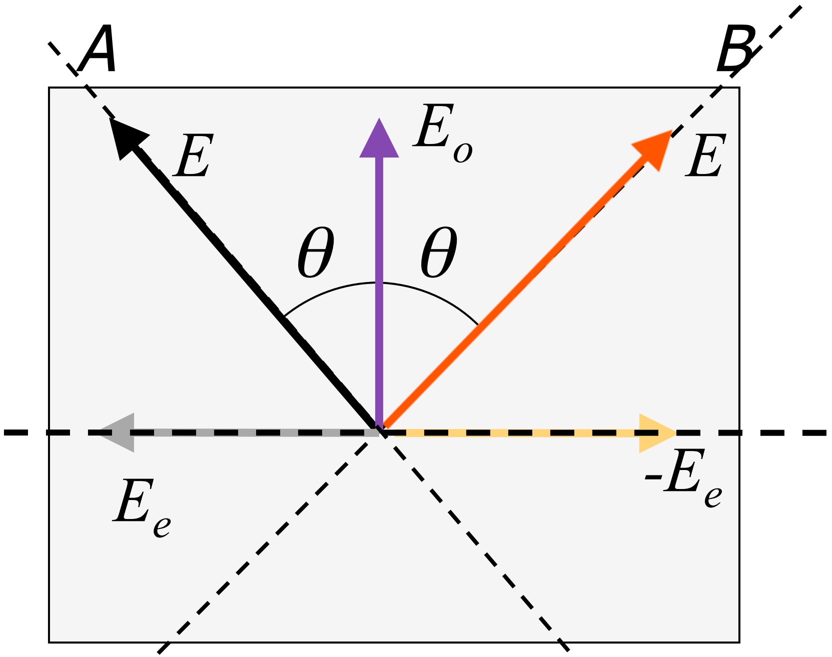


Placas de ½ onda

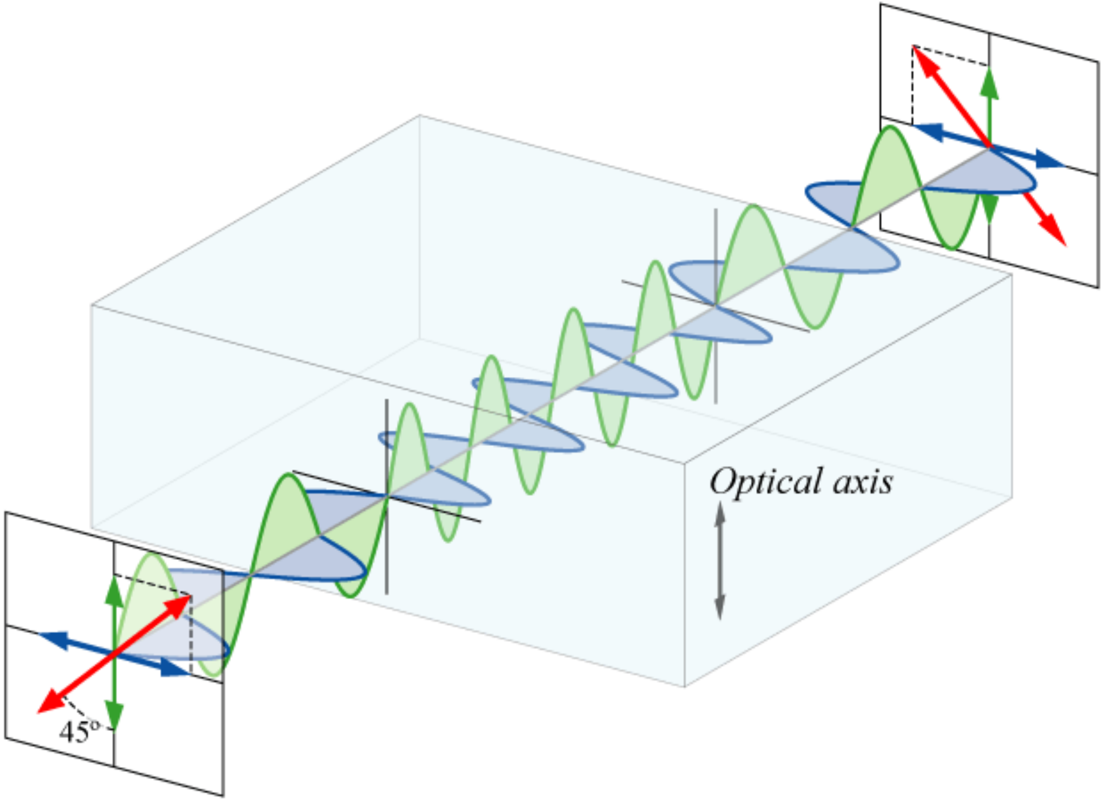
- O campo elétrico na saída da placa será

$$\vec{E}_{out} = E_o \cos(kx - \omega t)\hat{o} + E_e \cos(kx - \omega t + \pi)\hat{e}$$

- Na saída a componente ***e*** está defasada de ½ onda relativo à componente ***o***.
  - O campo elétrico vai oscilar na reta B
  - A placa de ½ onda gira ***E*** de 2θ.



Placas de ½ onda



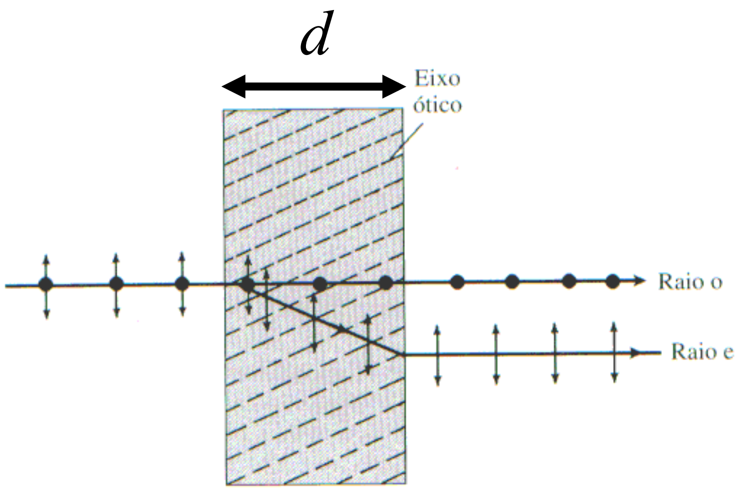
Placas de ¼ de onda

- A placa de ¼ de onda é aquela na qual a diferença de fase obtida entre as duas componentes é ¼ do período, ou seja, $\pi/2$.

$$\Delta\phi = (4m+1)\frac{\pi}{2}$$

- Isto somente ocorre quando a espessura da placa está bem relacionada com o comprimento de onda, de tal forma que:

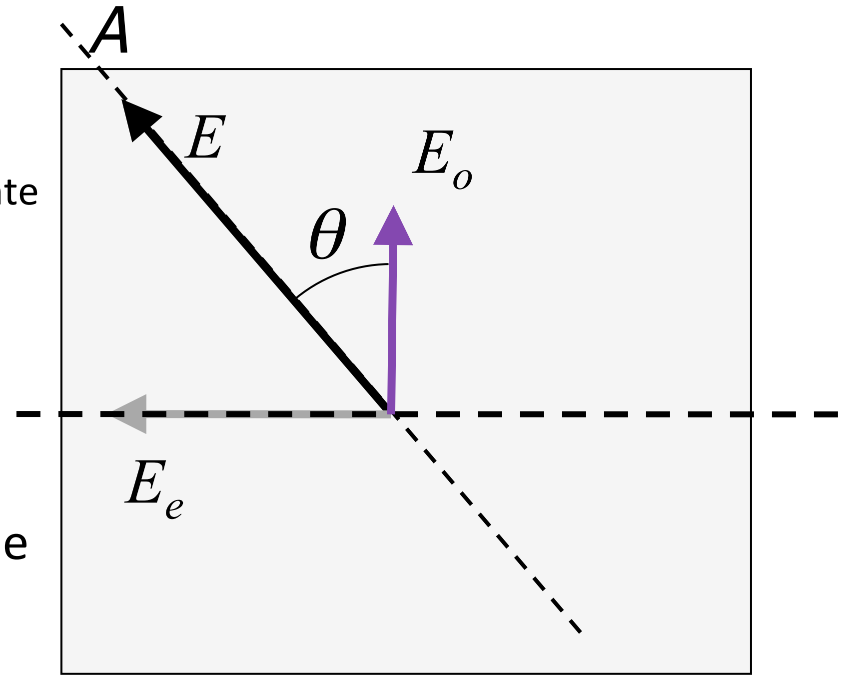
$$d = \frac{(4m+1)}{4(n_o - n_e)}\lambda$$



Placas de ¼ de onda

- Componentes do campo elétrico na entrada da placa
  - O campo elétrico esta sempre oscilando ao longo da linha A
  - O campo elétrico pode, em qualquer instante de tempo, ser escrito como

$$\vec{E}_{in} = E_o \cos(kx - \omega t)\hat{o} + E_e \cos(kx - \omega t)\hat{e}$$



- A placa de ¼ onda introduz uma fase de $\pi/2$ na componente *e*

Placas de ¼ de onda

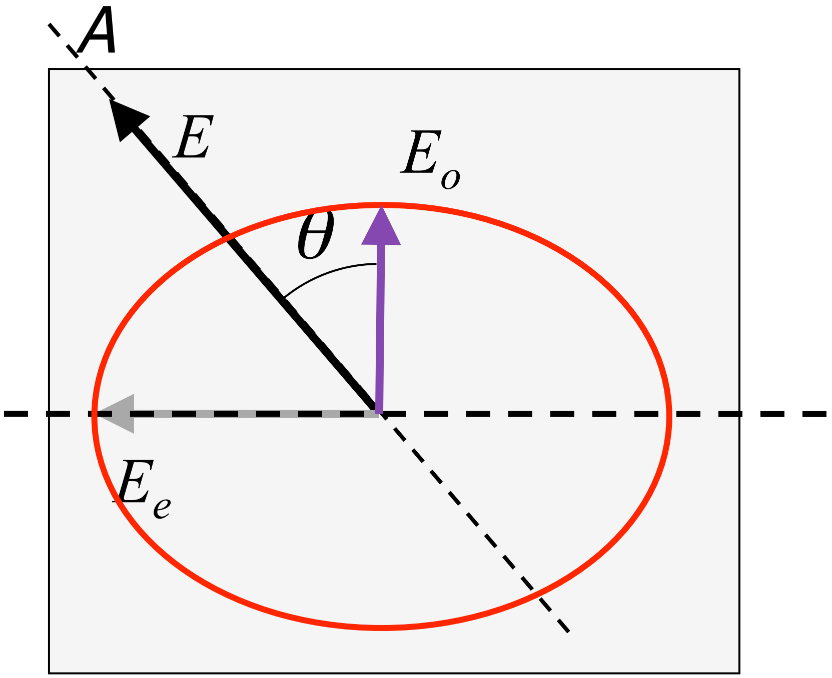
- Assim, o campo elétrico na saída da placa é

$$\vec{E}_{out} = E_o \cos(kx - \omega t)\hat{o} + E_e \cos(kx - \omega t + \pi/2)\hat{e}$$

- Ou seja

$$\vec{E}_{out} = E_o \cos(kx - \omega t)\hat{o} - E_e \sin(kx - \omega t)\hat{e}$$

- A onda que era inicialmente linearmente polarizada torna-se elipticamente polarizada



Matrizes de Jones

- Uma placa de ½ onda: se o eixo ordinário é alinhado com o eixo x, o efeito da placa placa de ½ onda é inverter a componente y.

$$\mathbf{WP}\left(\frac{\lambda}{2}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\pi} \end{pmatrix}$$

- Uma placa de ¼ de onda: Se o eixo 'rápido' é alinhado com o eixo x, o efeito da placa de ¼ de onda é descrito por:

$$\mathbf{WP}\left(\frac{\lambda}{4}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/2} \end{pmatrix}$$

Placa rotacionada

- Se a placa não é de ½ ou ¼ de onda, ela defasa a componente extraordinária de Γ

$$\mathbf{WP}(\Gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\Gamma} \end{pmatrix}$$

- Para uma placa birrefringente, com o eixo ordinário rotacionado de um angulo α com relação ao eixo x do sistema, devemos aplicar uma rotação

$$\mathbf{WP}(\Gamma,\alpha) = \mathbf{R}(\alpha)\mathbf{WP}(\Gamma,0^o)\mathbf{R}(-\alpha)$$

Placa rotacionada

- Das aulas passadas:

$$\mathbf{WP}\left(\Gamma,\alpha\right)=\begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\Gamma} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}$$

- Que resulta em:

$$\mathbf{WP}\left(\Gamma,\alpha\right)=\begin{pmatrix} \cos^2\alpha+e^{-i\Gamma}\sin^2\alpha & \sin\alpha\cos\alpha(1-e^{-i\Gamma}) \\ \sin\alpha\cos\alpha(1-e^{-i\Gamma}) & \sin^2\alpha+e^{-i\Gamma}\cos^2\alpha \end{pmatrix}$$

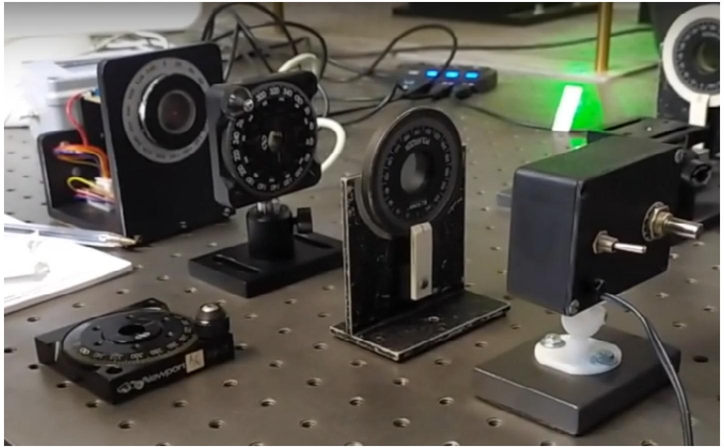
Objetivos da semana

- Verificar se, com uma placa de ½ onda conseguimos girar o eixo de polarização da onda incidente (que faz um ângulo α com o eixo ótico da placa) em 2α

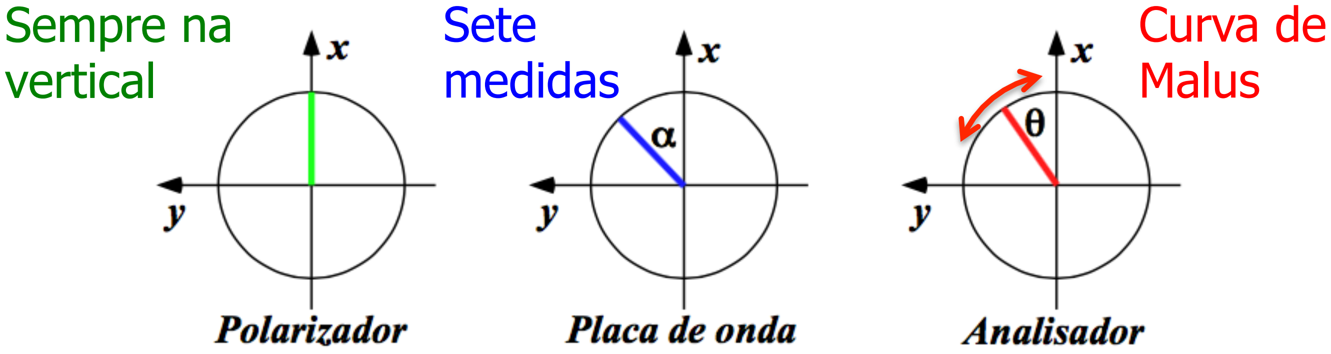
- Verificar se, com uma placa de ¼ de onda conseguimos transformar uma onda linearmente polarizada em elipticamente (circularmente) polarizada

Montagem

- O sistema consiste de um laser, o primeiro polarizador que define o ângulo de polarização linear da luz incidente, a placa de onda e o polarizador de análise



Análise



- Considerando a configuração da medida, a matriz que descreve o sistema será dada por:

$$\begin{pmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{pmatrix} \mathbf{WP}(\Gamma,\alpha) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Análise

- Temos que fazer o produto

$$\begin{pmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cos^2\alpha + e^{-i\Gamma}\sin^2\alpha & \sin\alpha\cos\alpha(1-e^{-i\Gamma}) \\ \sin\alpha\cos\alpha(1-e^{-i\Gamma}) & \sin^2\alpha + e^{-i\Gamma}\cos^2\alpha \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- E calcular a intensidade (ver Artigo sobre placas de onda no site), obtendo:

$$I = \frac{I_0}{2}\left[1 + \left(\cos^2 2\alpha + \cos\Gamma\sin^2 2\alpha\right)\cos 2\theta + \sin^2\frac{\Gamma}{2}\sin 4\alpha\sin 2\theta\right]$$

Atividade placa de ½ onda

- O arranjo montado com uma placa de ½ onda.
- Foram realizada sete medidas, com o eixo da placa em diferentes ângulos α com relação ao eixo de polarização do polarizador inicial.
- Faça o ajuste de cada curva utilizando a expressão para a intensidade apresentada acima.
  – Como apresentar os resultados na síntese?
- Verifique, para essas medidas, se a polarização inicial foi girada de 2α
  – A placa é de fato de ½ onda (Γ compatível com π)?
  – Qual o tipo de polarização observada?
- Discutir os resultados.

Atividade placa de ¼ onda

- O arranjo foi modificado trocando-se a placa de ½ onda por uma placa de ¼ onda.
- Foram realizada novamente sete medidas, com o eixo da placa em diferentes ângulos α com relação ao eixo de polarização do polarizador inicial.
- Faça o ajuste de cada curva utilizando a expressão para a intensidade apresentada acima.
  - Como apresentar os resultados na síntese?
  - A placa é de fato de ¼ onda (Γ compatível com $\pi/2$)?
  - Qual o tipo de polarização observada?
- Discutir os resultados.

https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=7176

- Cuidado na interpretação dos resultados quando a placa está paralela ou perpendicular ao polarizador inicial