



Física Experimental IV – FAP214

www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex

www.fap.if.usp.br/~hbarbosa

Aula 2 e 3, Experiência 3

Birrefringência e Atividade Óptica

Polarização da luz

- Objetivos – Estudar o fenômeno de polarização da luz
 - Aula 1 – Métodos de polarização
 - Lei de Malus
 - Lei de Brewster
 - Aulas 2+3 – Fenômenos ópticos de polarização da luz
 - Estudo do fenômeno de birrefringência
 - Alteração do estado de polarização da luz
 - Atividade óptica de elementos
 - Estudo da birrefringência em soluções de açúcares

TAREFAS SEMANA PASSADA



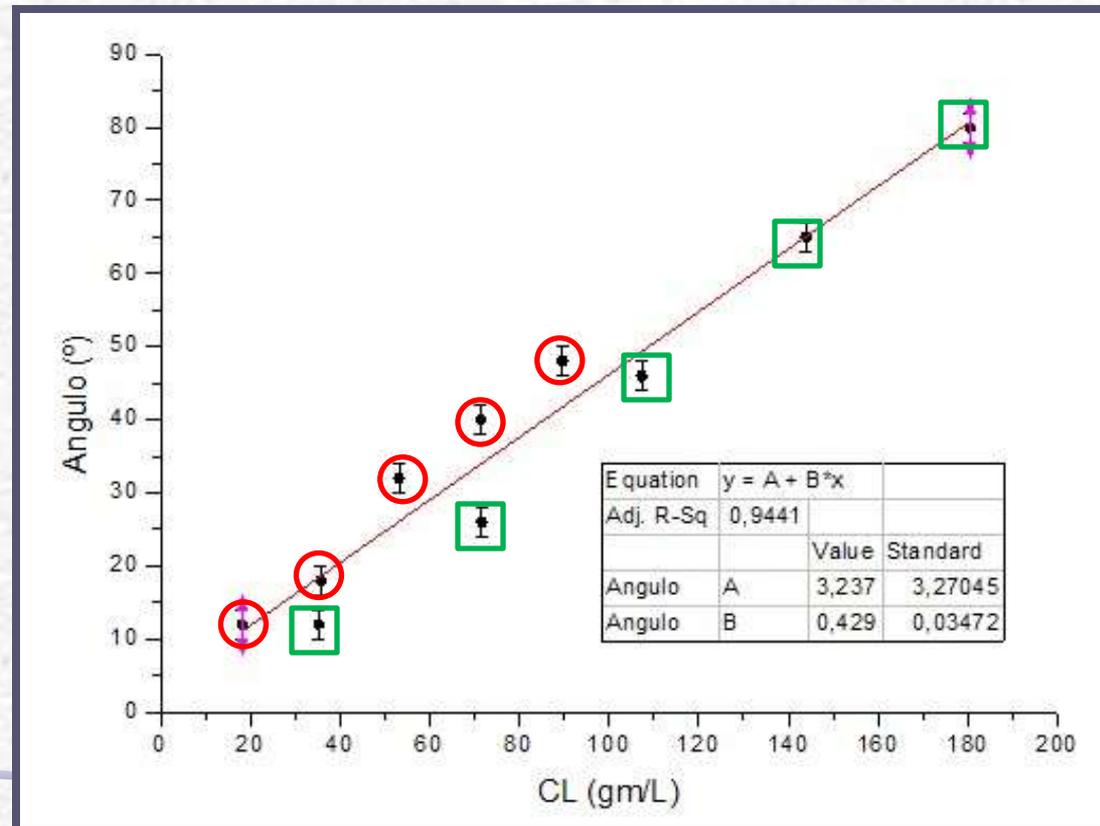
Para Entregar: Parte 1

- Mostrar que o ângulo θ varia linearmente com o comprimento L .
- Mostrar que o ângulo θ varia linearmente com a concentração da solução de açúcar (obter a constante γ).
- Obter o valor da constante a para o açúcar.
 - Vocês devem fazer um gráfico de θ contra o que?? Lembrem-se, é preciso um número de pontos suficientes para um bom ajustes linear.
- Vocês têm à disposição vários tubos contendo soluções com diferentes concentrações de açúcar
 - Combine estes tubos em seqüência para simular diferentes comprimentos, por exemplo

Apenas 2 grupos

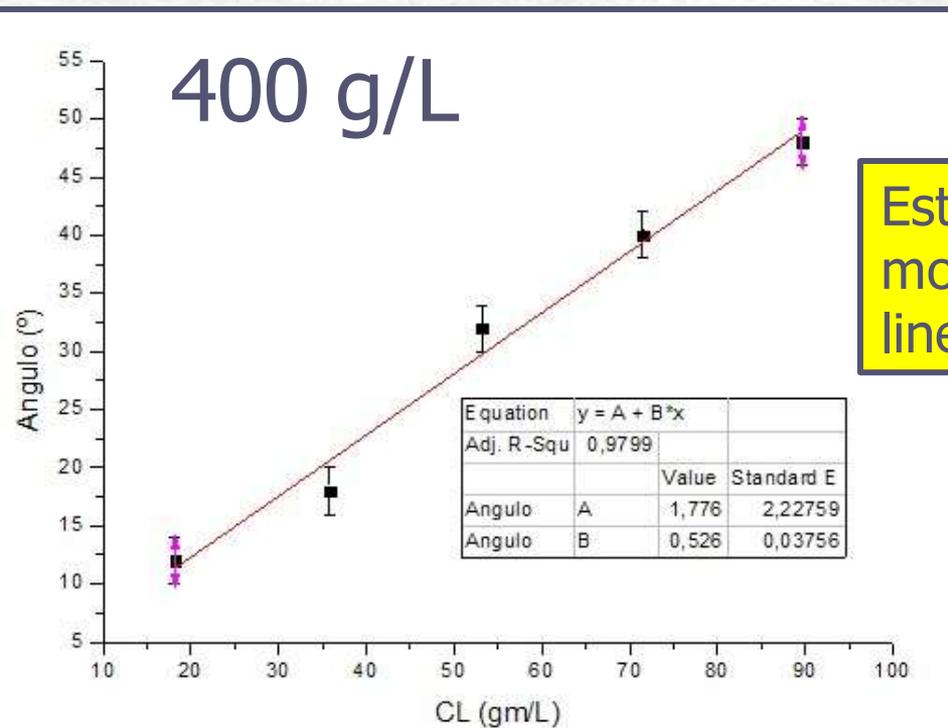
- “Apesar do ajuste linear ter sido feito, os parâmetros resultantes dele apresentados na tabela no próprio gráfico denunciam claramente que ele não está muito bom. Tentamos então fazer uma análise separando os dados de acordo com a concentração da solução(...)”

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

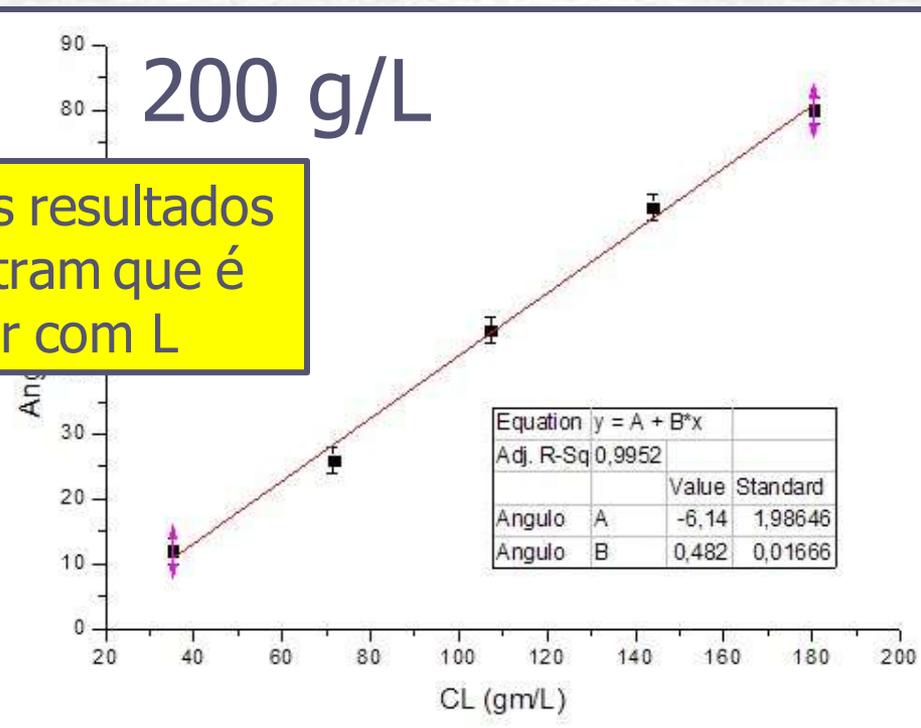


Alguns resultados

- Era de se esperar que, com menos pontos, o ajuste ficasse “melhor”, certo?
- A cte α é uma só, não depende de C ou de L... Portanto deveríamos ter apenas um valor

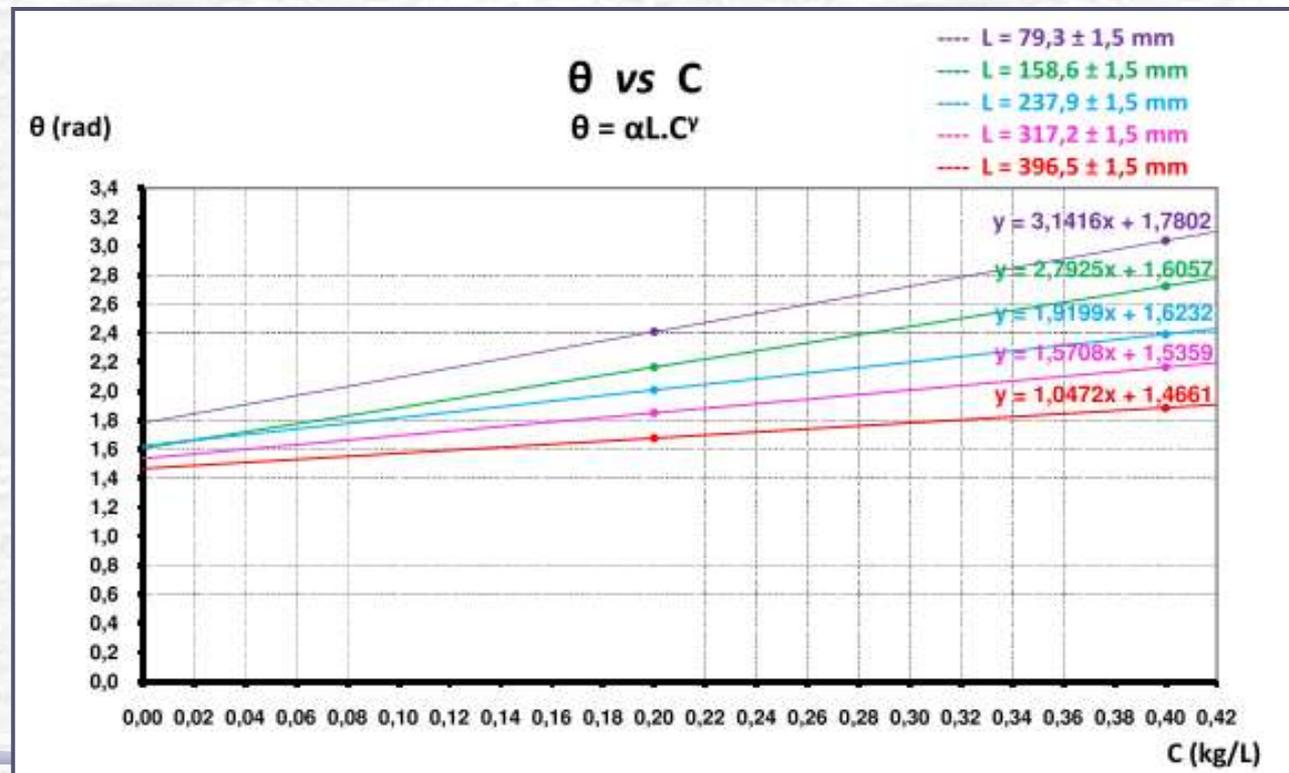


Estes resultados mostram que é linear com L



Problemas

Um dos grupos teve problemas... Para $C = \text{cte}$, eles encontraram que o ângulo diminui com o aumento do comprimento

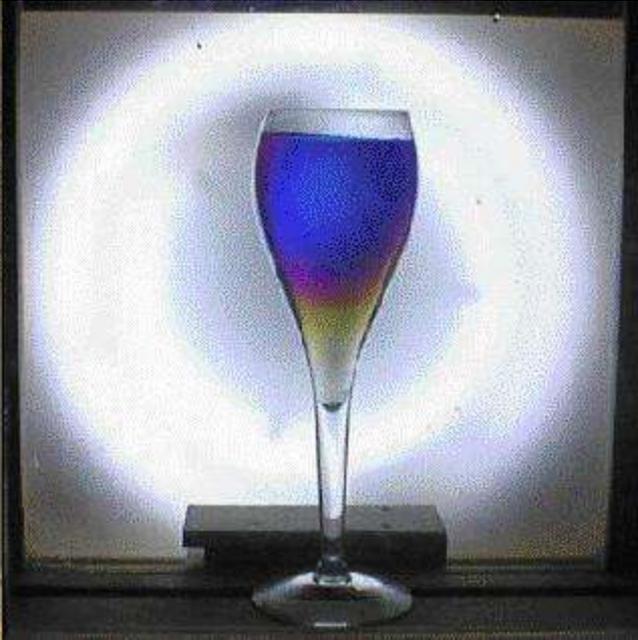


AULA DE HOJE



Birrefringência

Placas de onda



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.

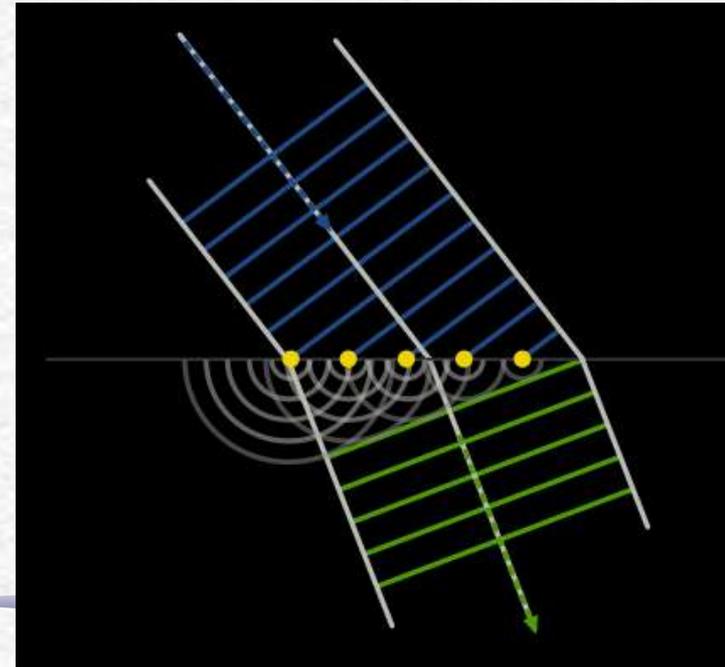


Birrefringência: 2ª parte

- 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} .
- Vamos ver dois tipos diferentes de birrefringência no Lab4
 - **Birrefringência simples (placas de onda)**
 - Rotação óptica ou dicroísmo circular

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.
- A velocidade da onda v , portanto o índice de refração, é determinada pela diferença entre as frequências do \mathbf{E} e da vibração natural dos elétrons.



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. Neste caso, um elétron posto a vibrar na direção do conjunto de molas \mathbf{k}_1 , vai oscilar com uma frequência diferente daquela que teria se estivesse vibrando ao longo de outra direção.

Lembrem-se, isto é apenas um modelo conceitual para facilitar o entendimento!

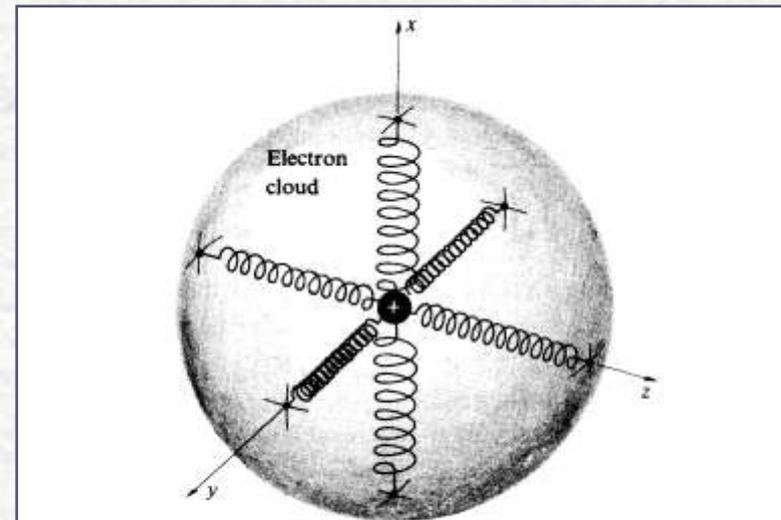


Figure 8.14 Mechanical model depicting a negatively charged shell bound to a positive nucleus by pairs of springs having different stiffness.

Calcite

- Um típico cristal birrefringente é a calcite, ou carbonato de Cálcio (CaCO_3).

Ela tem um eixo óptico, perpendicular ao plano cristalino

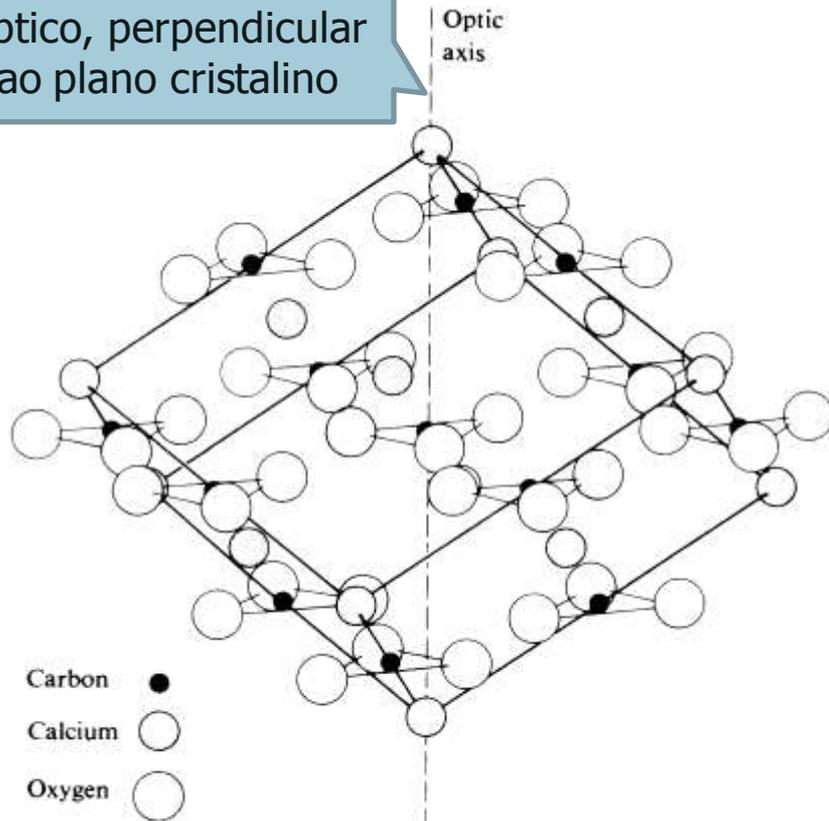


Figure 8.16 Arrangement of atoms in calcite.

Plano perpendicular ao eixo óptico tem simetria de rotação.

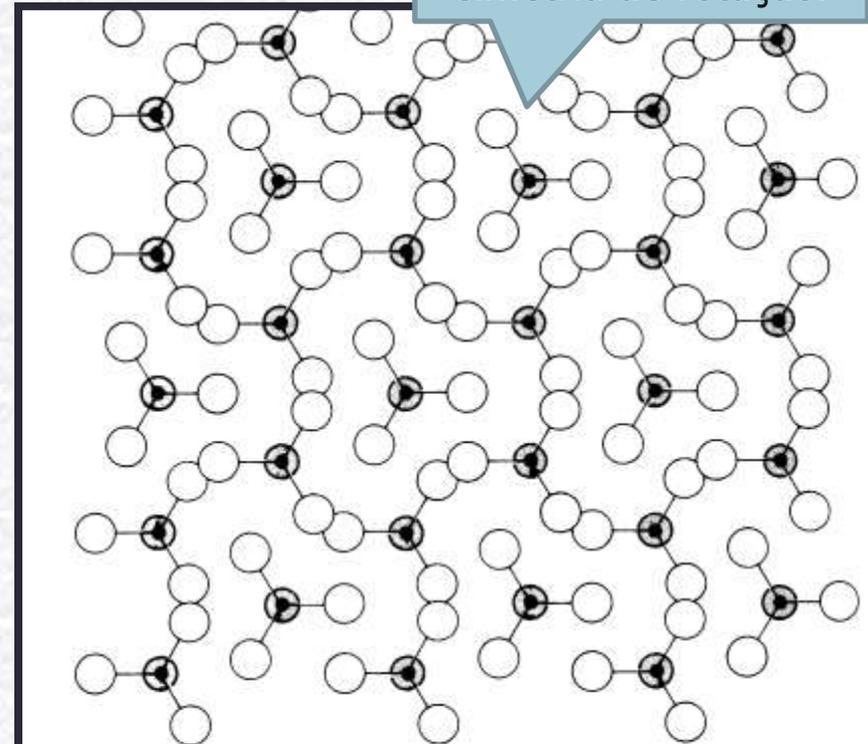
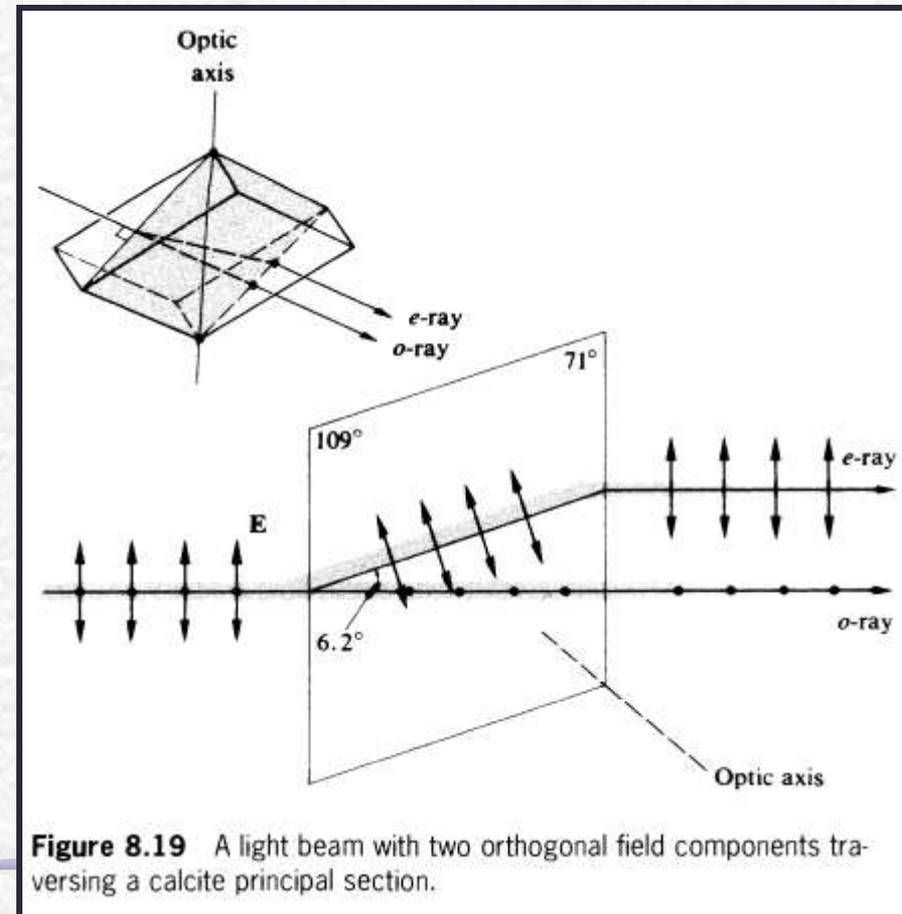


Figure 8.17 Atomic arrangement for calcite looking down the optical axis.

Calcite

- Este material tem um eixo óptico apenas.
- Qualquer onda **EM** incidente pode ser decomposta em duas componentes: uma **no plano** formado pela direção da onda e do eixo óptico (**e**), e uma **perpendicular** a ele (**o**)
- O **raio-e** é desviado enquanto que o **raio-o** passa direto.
- Por isso formam-se duas imagens refratadas (birrefringência)!



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 \mathbf{E} no plano. Por isso **raio-o** não sofre desvio.

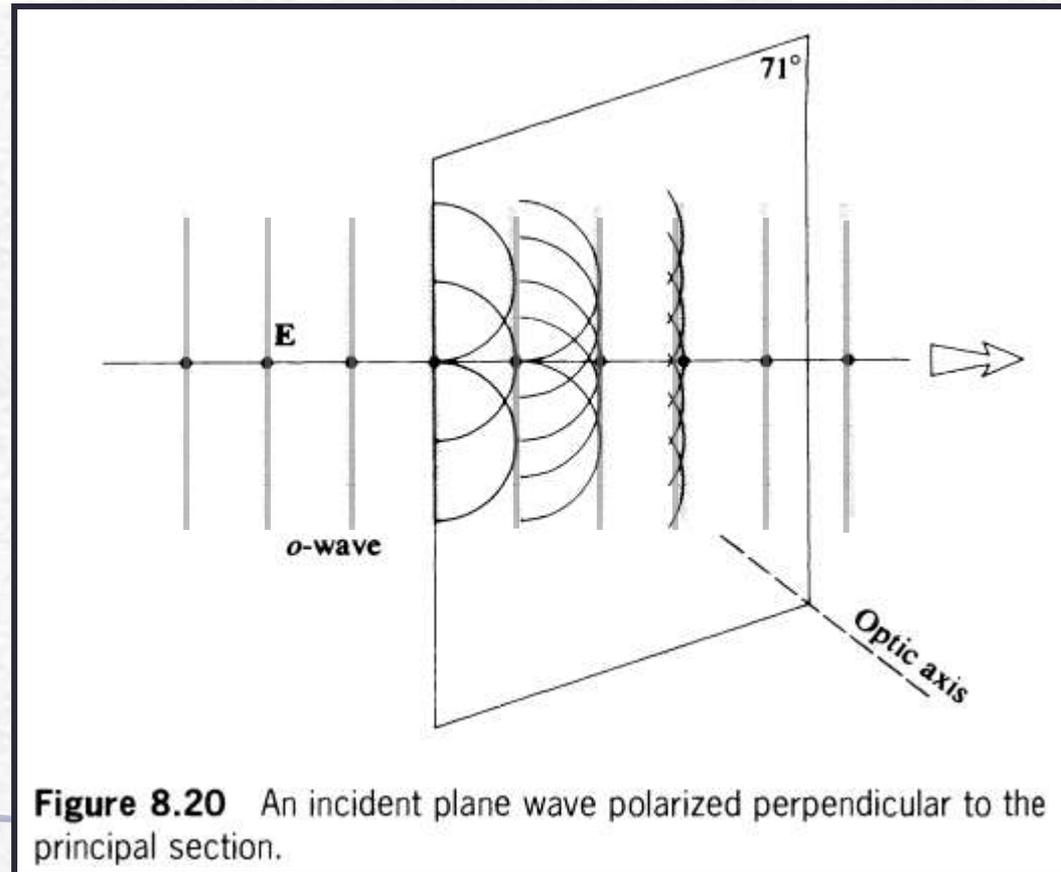


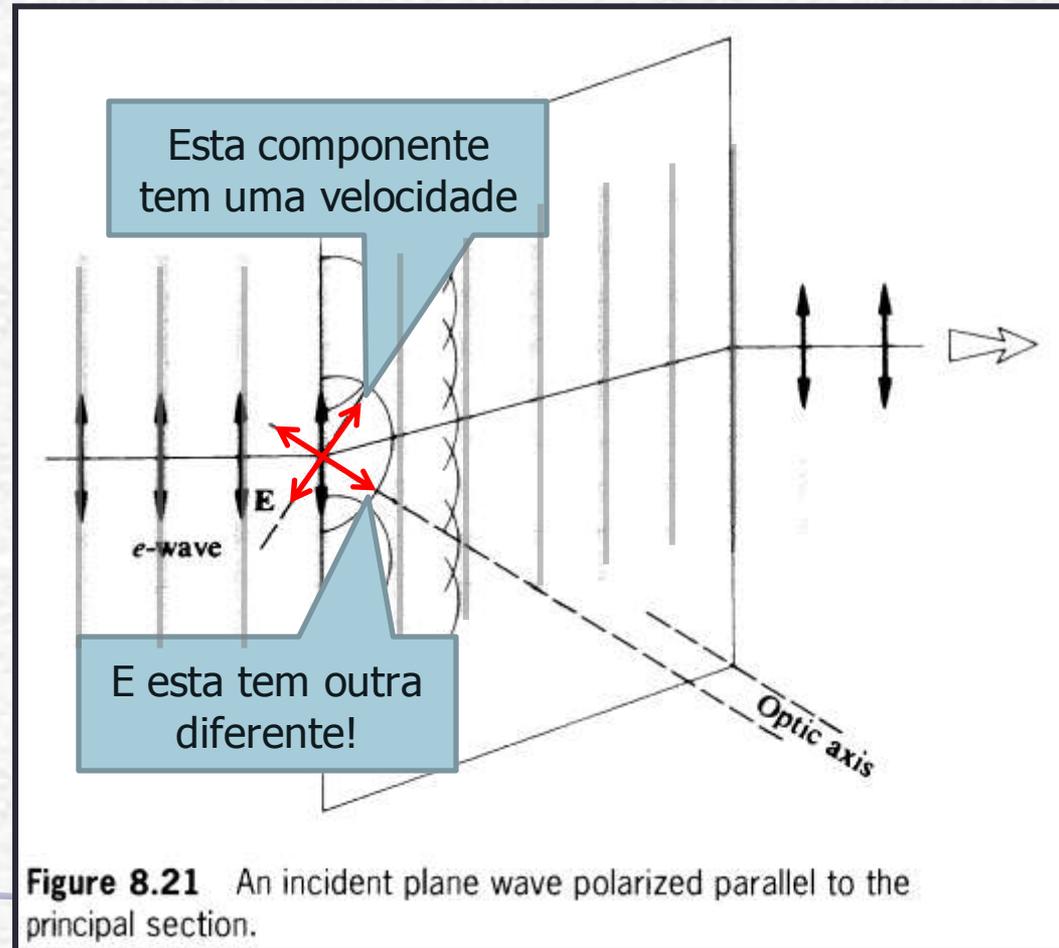
Figure 8.20 An incident plane wave polarized perpendicular to the principal section.

As Duas Direções

- No plano perpendicular ao eixo óptico, as duas molas são iguais e a velocidade de propagação é mesma para qualquer orientação de \mathbf{E} no plano.

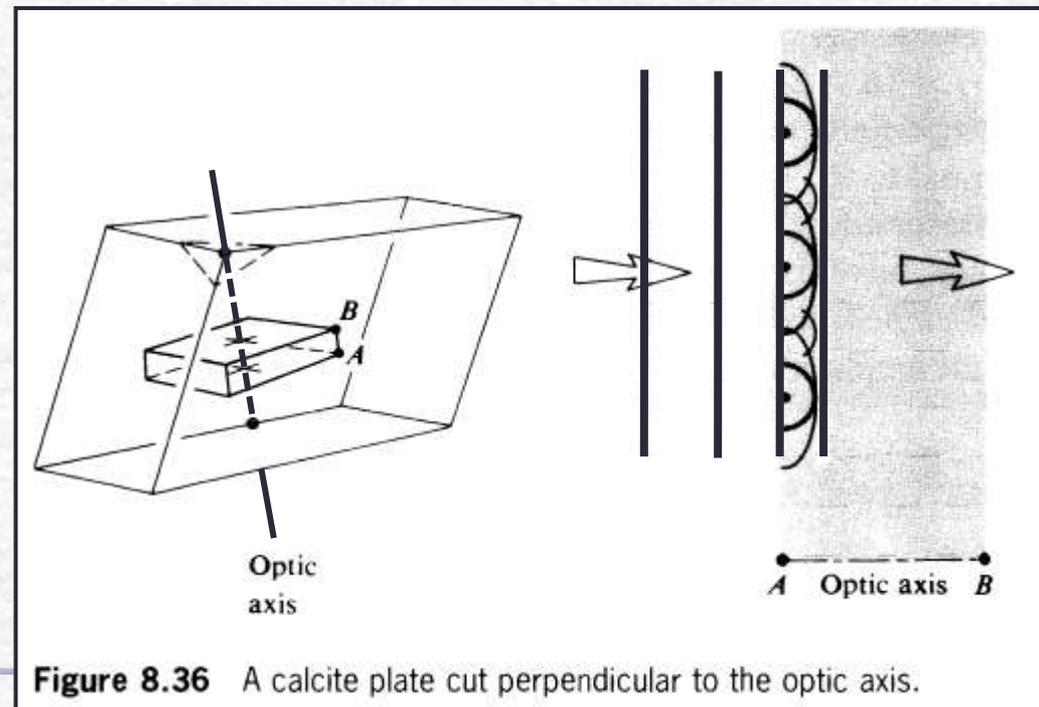
Por isso **raio-o** não sofre desvio.

- 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.



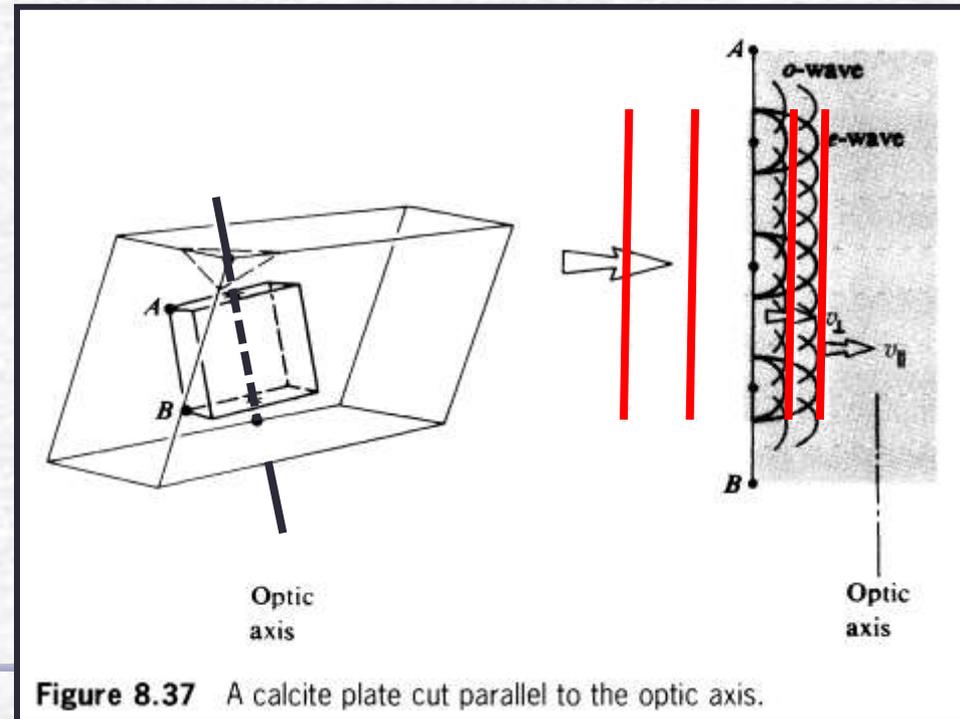
Placa de Onda

- Podemos cortar o material birrefringente de tal forma que o eixo óptico seja **perpendicular** a face onde incidimos a luz.
- Neste caso, para uma incidência perpendicular, o campo elétrico será sempre perpendicular ao eixo óptico!
- Assim, todas as componentes vão se propagar com a mesma velocidade v_{\perp} .
- Não há defasagem!



Placa de Onda

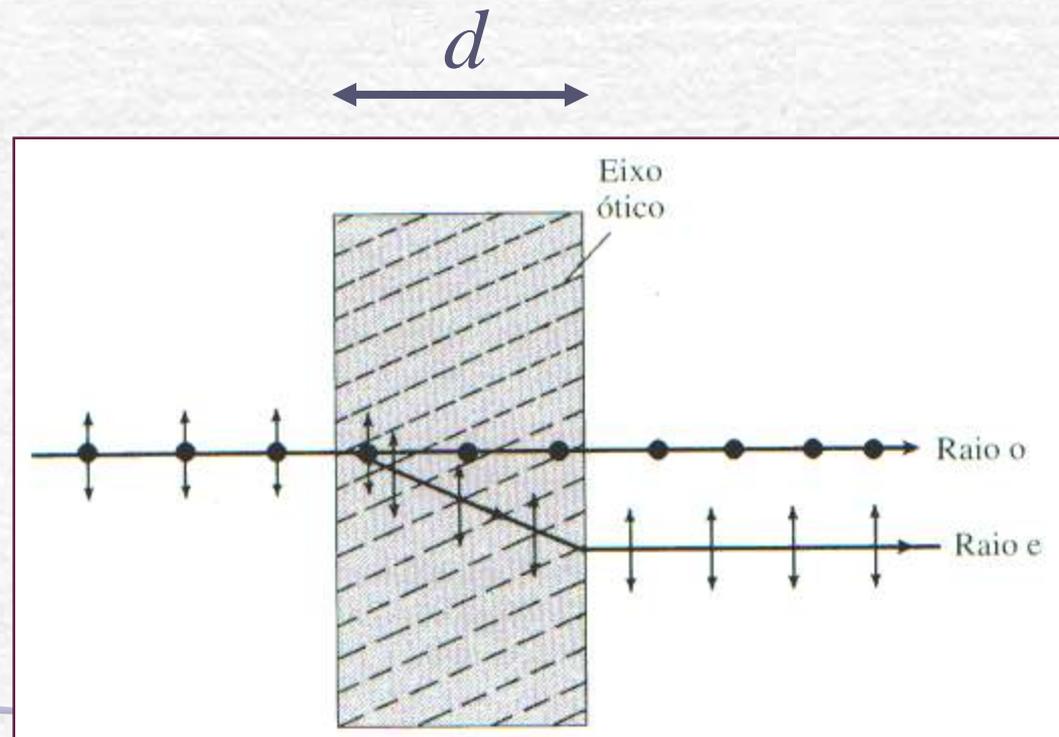
- Podemos cortar de tal forma que o eixo óptico seja **paralelo** a face onde incidimos a luz.
- Neste caso, a componente do campo elétrico na direção do eixo terá uma velocidade $\mathbf{v}_{//}$ e a componente perpendicular terá outra velocidade \mathbf{v}_{\perp} diferente!
- Mas as duas tem a **mesma** direção (não há desvio)!
- Como $\mathbf{n}_o \neq \mathbf{n}_e$, haverá uma defasagem que depende da espessura do material.



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:

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

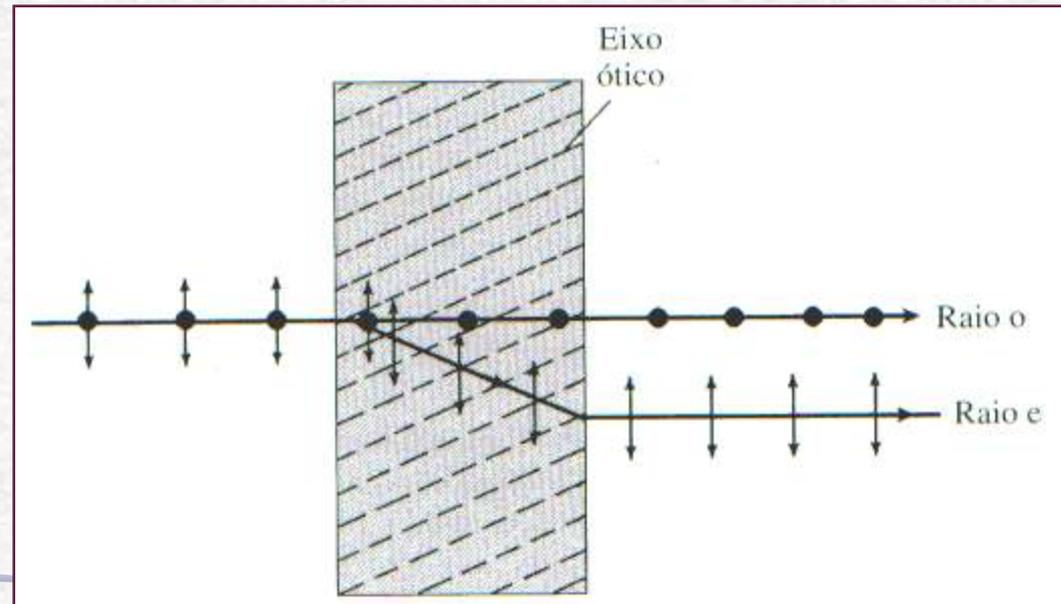
- Tempo que cada componente leva para atravessar a placa

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

- Diferença de tempo:

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

d



Placas de onda

- Se a diferença de tempo entre as duas ondas é

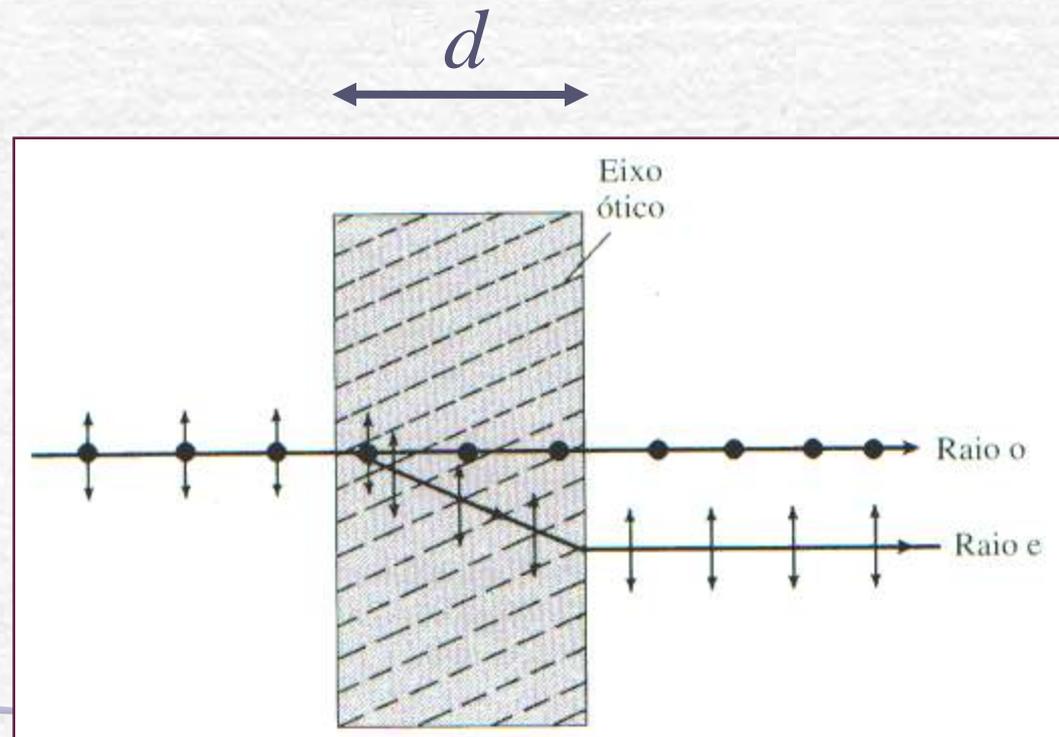
$$\Delta t = t_o - t_e = \frac{d}{c}(n_o - n_e)$$

- Então a diferença de fase é

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

- Substituindo...

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



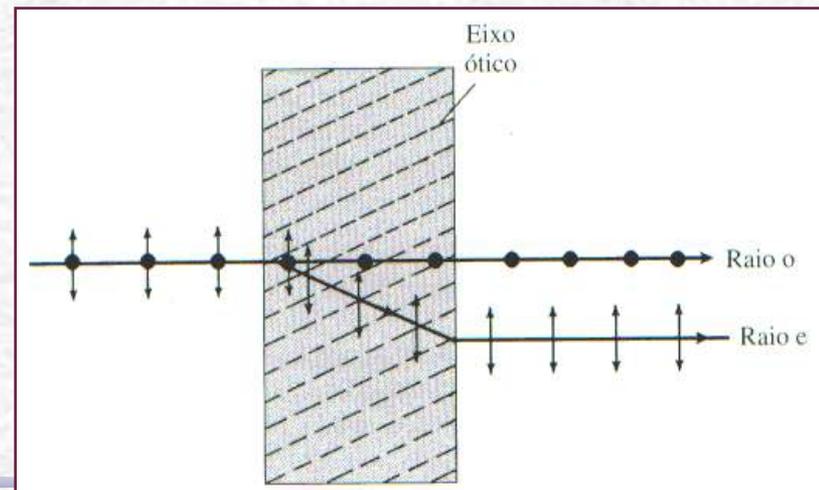
Placas de $\frac{1}{2}$ onda

- A placa de $\frac{1}{2}$ onda é aquela na qual a diferença de fase obtida entre as duas componentes é $\frac{1}{2}$ do período, ou seja, π .

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

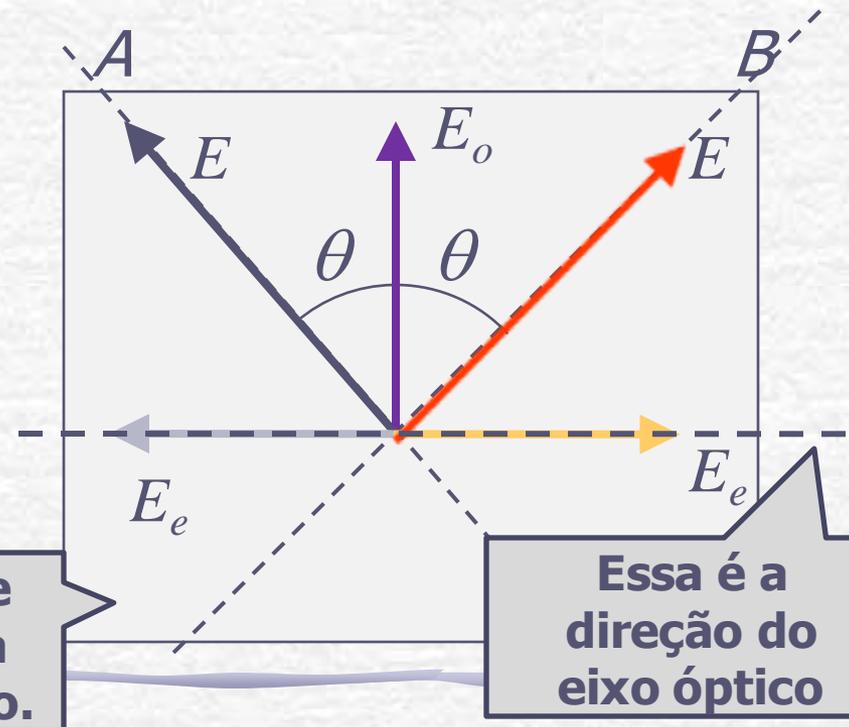
- Isto somente ocorre quando a espessura da placa está bem relacionada com o comprimento de onda, de tal forma que:

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



Placas de $\frac{1}{2}$ onda

- Vamos ver as componentes do campo elétrico na entrada da placa
 - O campo elétrico está sempre oscilando ao longo da linha A
- E na saída a componente e está defasada de meia onda relativamente à componente o .
 - O campo elétrico vai oscilar ao longo da reta B
 - Ou seja, a placa de $\frac{1}{2}$ onda gira o campo elétrico de 2θ .



Placas de $\frac{1}{4}$ de onda

- A placa de $\frac{1}{4}$ de onda é aquela na qual a diferença de fase obtida entre as duas componentes é $\frac{1}{4}$ 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:

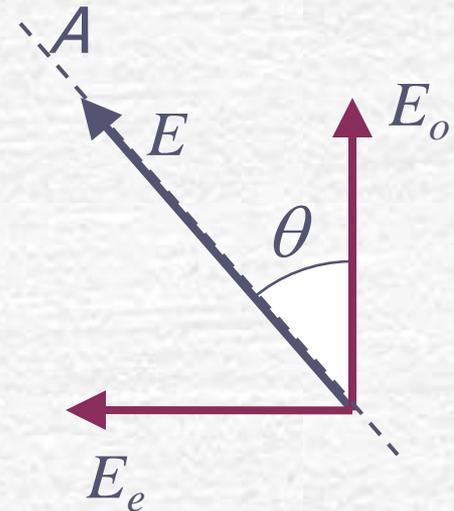
$$d = \frac{(4m + 1)}{4(n_o - n_e)} \lambda$$

Placas de $\frac{1}{4}$ de onda

- Vamos ver as componentes do campo elétrico na entrada da placa
 - O campo elétrico está sempre oscilando ao longo da linha A
 - O campo elétrico pode, em qualquer instante de tempo, ser escrito como:

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

- A placa de $\frac{1}{4}$ onda introduz uma fase de $\pi/4$ na componente e .



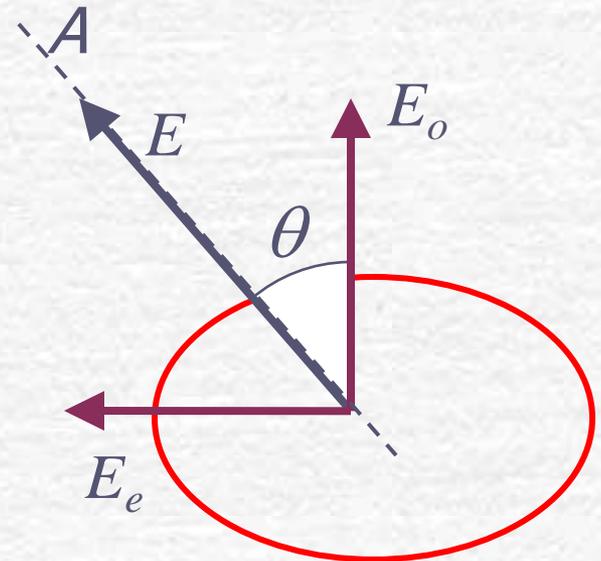
Placas de $\frac{1}{4}$ de onda

- Assim, o campo elétrico na saída da placa

$$\begin{aligned}\dot{E} &= E_o \cos(kx - \omega t) \hat{o} \\ &+ E_e \cos(kx - \omega t + \frac{\pi}{2}) \hat{e}\end{aligned}$$

- Ou seja:

$$\begin{aligned}\dot{E} &= E_o \cos(kx - \omega t) \hat{o} \\ &+ E_e \sin(kx - \omega t) \hat{e}\end{aligned}$$



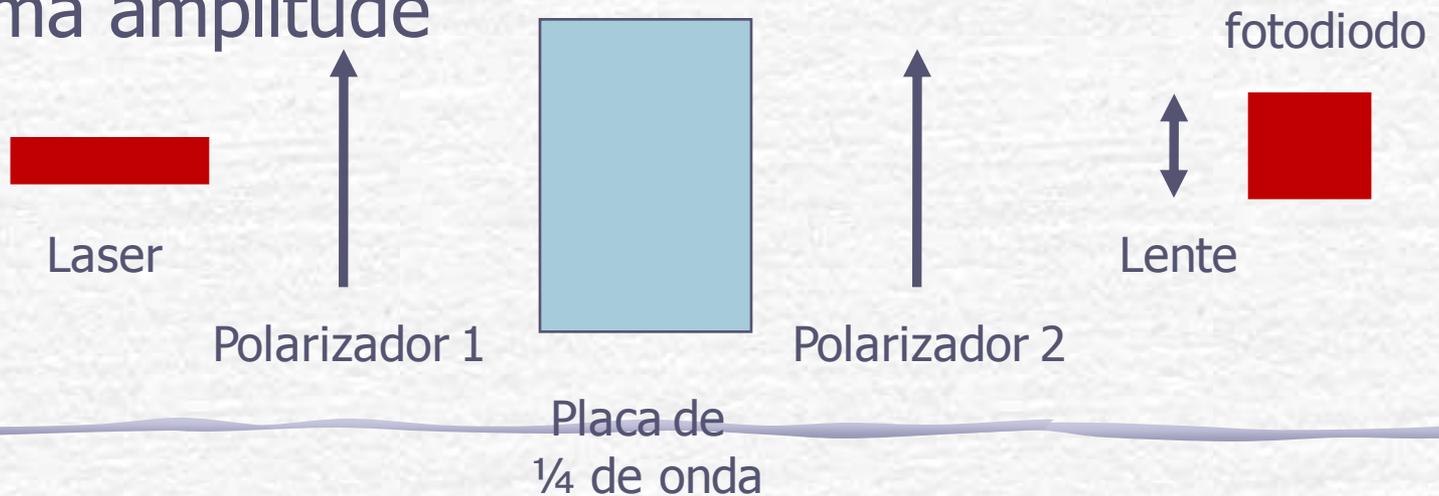
- A onda que era inicialmente polarizada torna-se elipticamente polarizada

Objetivos desta parte da aula

- Verificar se, com uma placa de $\frac{1}{4}$ de onda, conseguimos transformar uma onda linearmente polarizada em elipticamente (circularmente) polarizada
- Verificar se, com uma placa de $\frac{1}{2}$ onda conseguimos girar o eixo de polarização da onda incidente em 2θ .

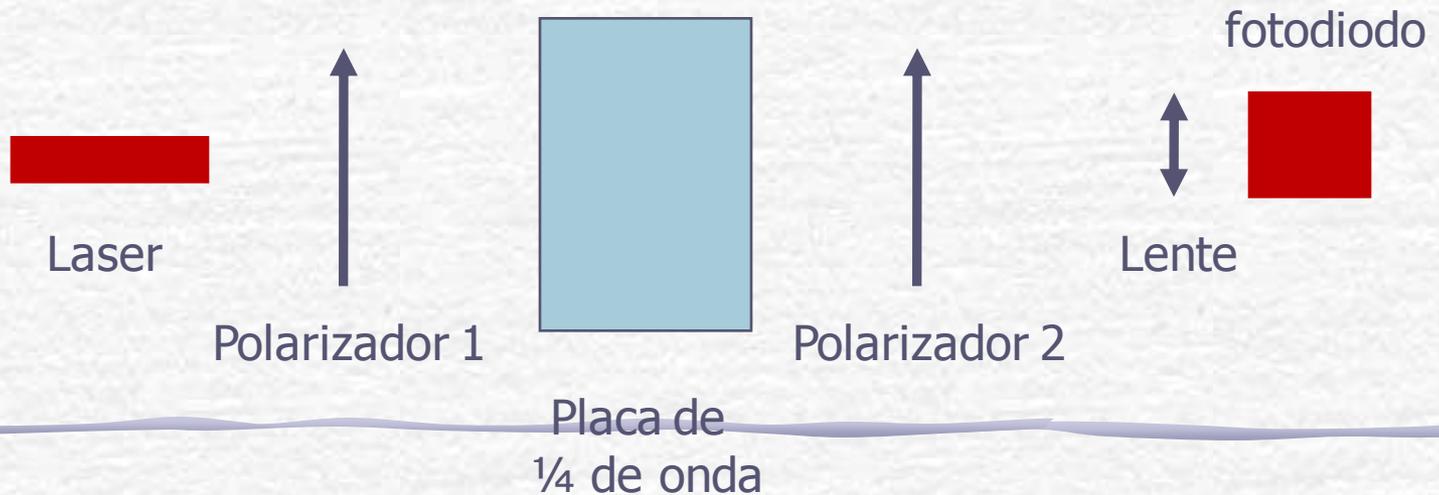
Placa de $\frac{1}{4}$ de onda

- Montar o arranjo do laser + polarizador + placa de $\frac{1}{4}$ de onda + polarizador + fotodiodo
- Ajustar o polarizador 1 para que fique a 45° em relação ao eixo óptico da placa de $\frac{1}{4}$ de onda
 - Isso garante que as componentes e e o têm a mesma amplitude



Placa de $\frac{1}{4}$ de onda

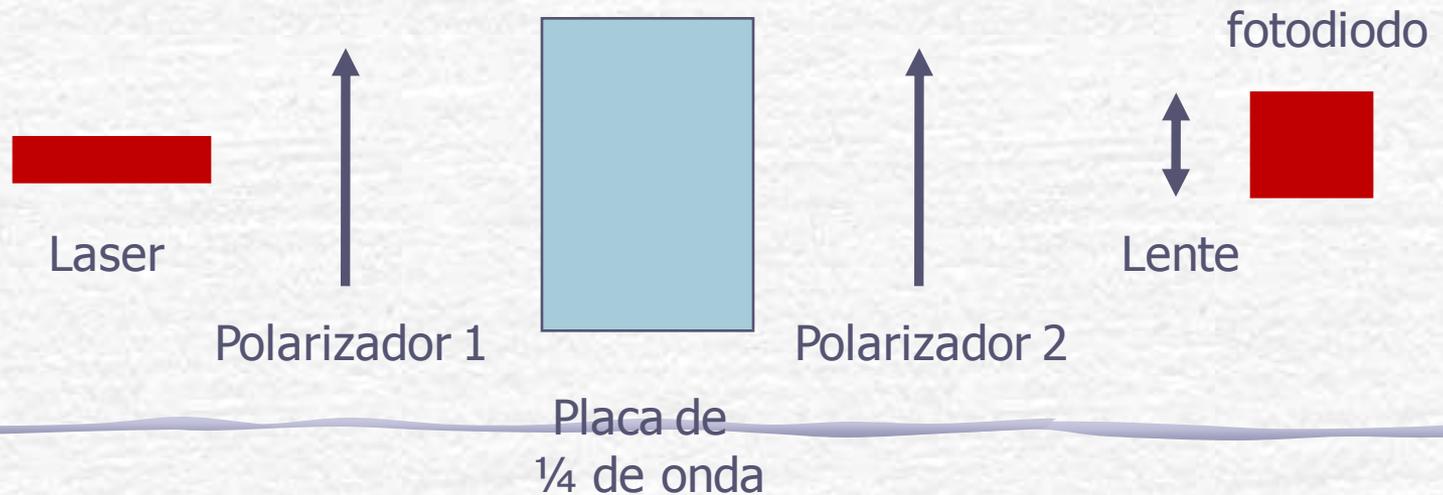
- Se a placa de $\frac{1}{4}$ de onda funciona, a onda emergente será circularmente polarizada
 - Pois as componentes e e o têm a mesma amplitude na entrada
 - Qualquer que seja a direção do polarizador 2 a intensidade no fotodiodo será a mesma



Para Entregar: Parte 1

Placa de $\frac{1}{4}$ onda

- Medir a intensidade em função da posição do polarizador 2 no data studio
 - Fazer rápido para não ser influenciado pela variação de polarização e intensidade inicial do laser.



Para Entregar: Parte 2

Placa de $\frac{1}{2}$ onda

- Montar o mesmo arranjo da placa de $\frac{1}{4}$ de onda
- Posicionar o polarizador a um ângulo θ qualquer (próximo de $30-50^\circ$).
 - Porque $30-50^\circ$? Como isto afeta as incertezas experimentais?
- Verificar se a polarização girou de 2θ graus.
 - Medir a intensidade com o polarizador 2 em vários ângulos em torno de 2θ e mostrar que o máximo ocorre, de fato, em 2θ .