

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



Atividades para Lei de Malus

- Medir a intensidade luminosa em função de θ . Cuidado para que a luz não seja intensa para saturar o fotosensor.
- Gráfico de Intensidade vs. θ .
- Ajustar por mínimos quadrados a previsão teórica da Lei de Malus.
 - 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.

Malus: radiação espúria

Expressão da aula:

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

Essa expressão não ajustava bem a curva por causa da radiação espúria entrando no sensor!

$$I_2 = I_{\text{Fundo}} + \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta$$

correção

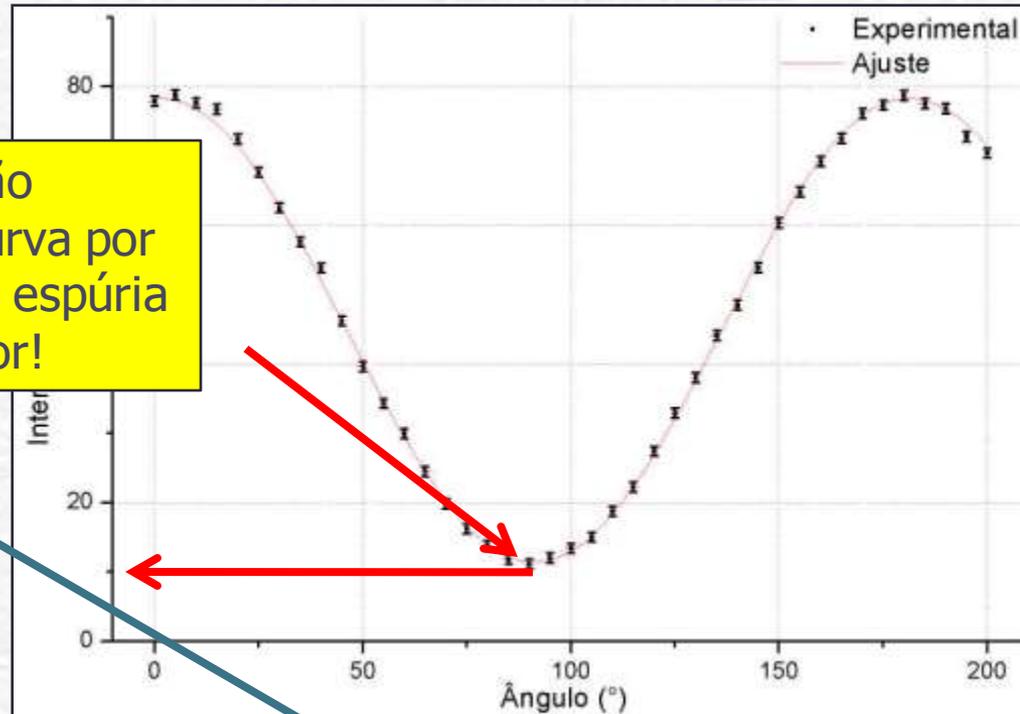
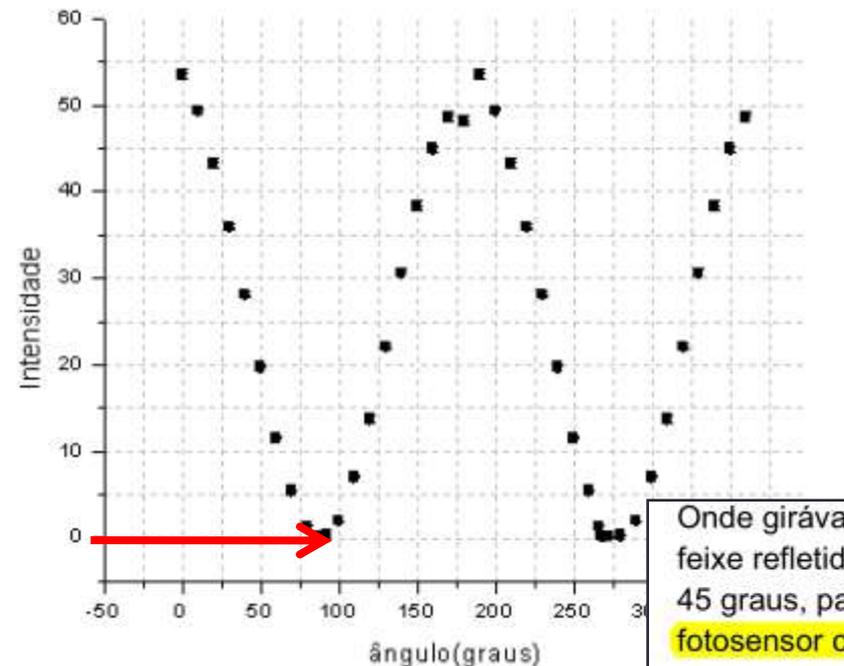


TABELA 4.1: Valores do ajuste		
	Valor	Incerteza
$I_{\text{Fundo}} (\%)$	11,40	0,21
$I_0 (\%)$	133,88	0,63
χ^2_{reduzido}	0,9991	--

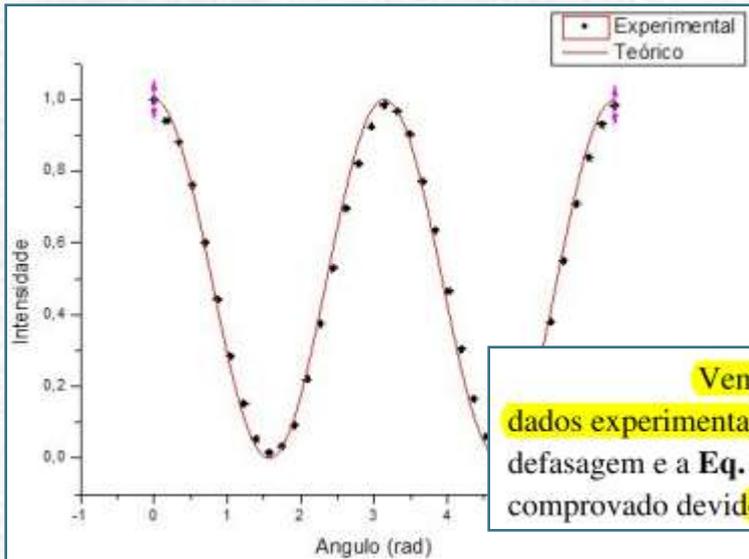
Tabela 4.1: Valores ajustados no gráfico acima.

Deviam ter mais cuidado com as medidas!

Onde girávamos o bloco de lucite e também o sensor, para que pudessemos medir o feixe refletido na superfície do bloco. Deixamos também o polarizador de entrada em 45 graus, para evitar efeitos de polarização circular. Para essa experiência cobrimos o fotosensor com um pano escuro, para diminuir o ruído no mesmo.

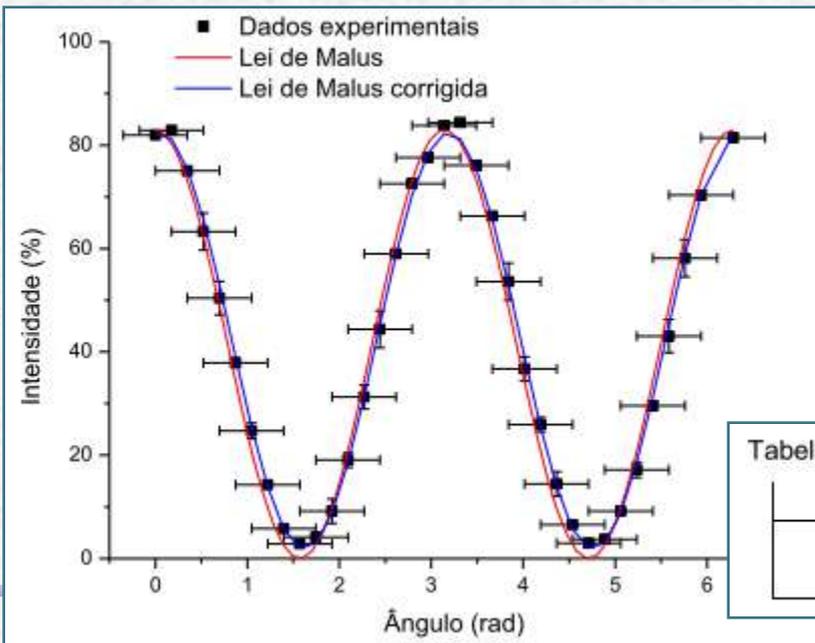


Malus: alinhamento do polaroid



Alguns grupos perceberam que o polaroid não estava bem alinhado com a escala angular.

Vemos que a curva teórica ajustada de acordo com a Eq. 6 pelo Origin representa bem os dados experimentais, porém percebemos uma pequena defasagem entre eles. Vendo a tendência dessa defasagem e a Eq. 6 podemos inferir que o problema está no ângulo, o que pode ser facilmente comprovado devido ao alinhamento do nosso sistema não ser exatamente perfeito.



Mas poucos grupos fizeram a correção necessária:

$$I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta - \theta_0) + A$$

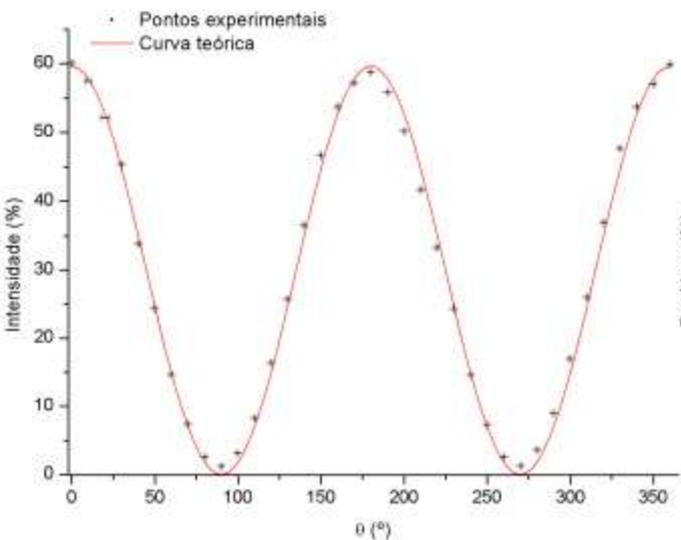
Tabela 1: parâmetros dos ajustes (1) e (6) para do dados experimentais, com os respectivos χ^2 .

Modelo	I_0	θ_0	A	χ^2
$I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta - \theta_0) + A$	-80,00(62)	1,6194(39)	82,46(38)	1,76
$I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta)$	83,00(89)	-	-	10,76

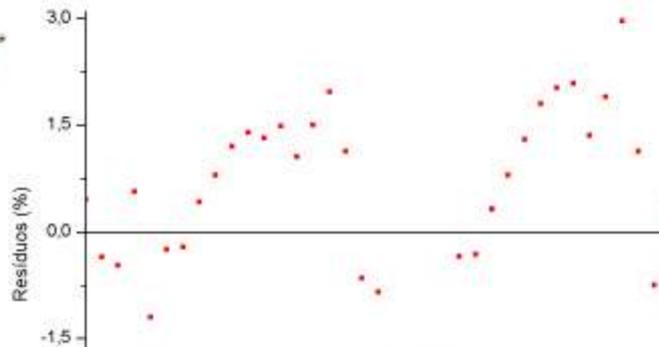
Atividades para Lei de Malus

- Medir a intensidade luminosa em função de θ . Cuidado para que a luz não seja intensa para saturar o fotosensor.
- Gráfico de Intensidade vs. θ .
- Ajustar por mínimos quadrados a previsão teórica da Lei de Malus.
 - 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.

Malus: alinhamento



Gráficos 1 e 2: Ajuste teórico aos pontos experimentais



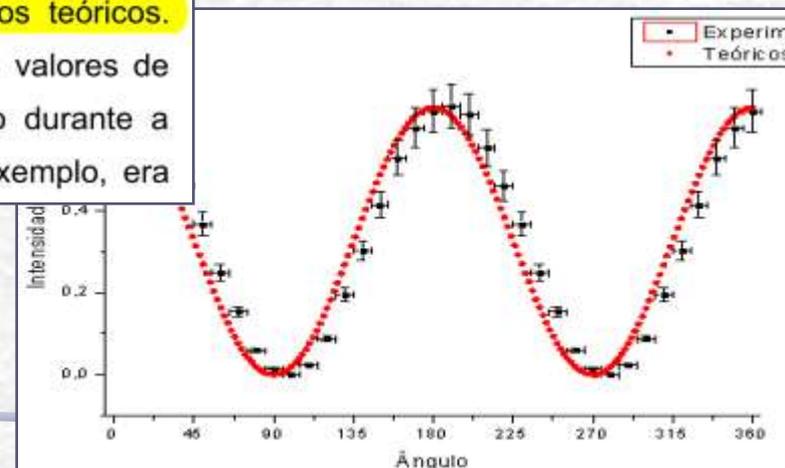
Este grupo foi o único que olhou o gráfico dos resíduos! Mesmo assim eles não corrigiram a fórmula teórica.

O ajuste pelo Origin forneceu $\chi^2_{red} = 202$, $R^2 = 0,99$ e $I_0 = 59,64 \pm 0,37\%$, o que sugere que as incertezas foram subestimadas e que a função pode ser expressa como função do cosseno ao quadrado. A análise dos resíduos permite concluir que o comportamento é tendencioso, isto é, os valores não flutuam em torno da média.

Percebe-se claramente que a intensidade não chega a zero, o que apenas mostra que o polarizador não é ideal, e que a curva está transladada para a esquerda.

Percebemos que os pontos experimentais não coincidem com os pontos teóricos.

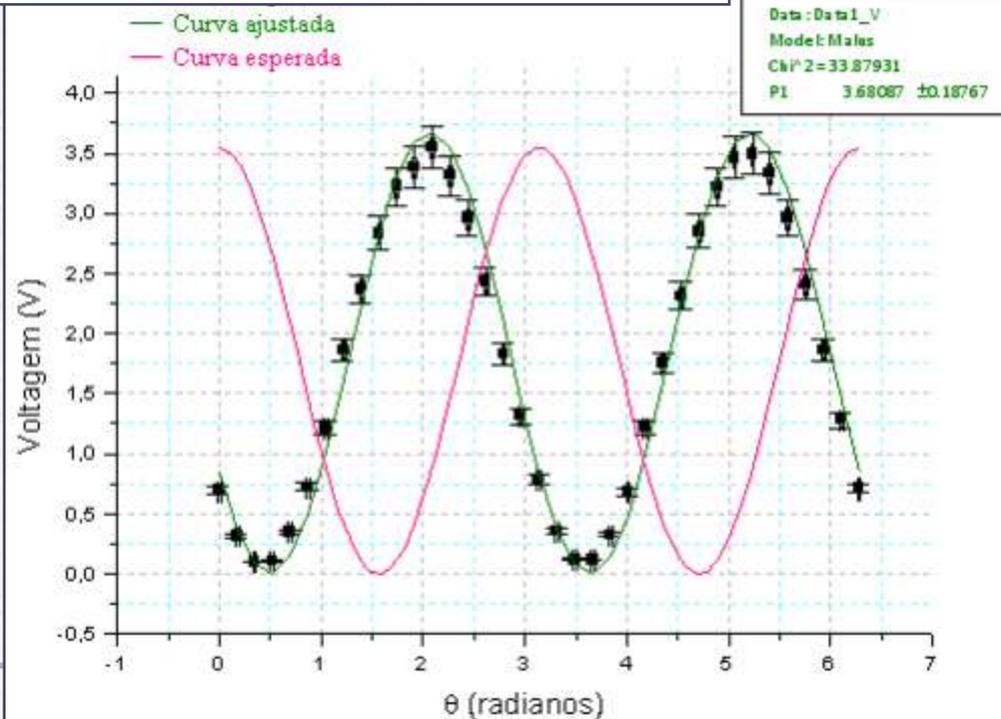
Existe um visível deslocamento dos pontos para a direita, para todos os valores de ângulo. Esta tendência pode significar que ocorreu um erro sistemático durante a tomada dos dados. O alinhamento dos componentes do arranjo, por exemplo, era



Malus: alinhamento

Variando o eixo de polarização do segundo polarizador de 10 em 10 graus e mantendo o primeiro com polarização fixa em zero grau, obtiveram-se os dados da *Figura 3*. É claramente visível nesta figura que no momento inicial, no qual ambos os polarizadores estavam teoricamente alinhados, não há um máximo de intensidade luminosa como esperado. Sabendo que de fato foi verificado que ambos os polarizadores estavam angularmente posicionados em zero grau, pode-se afirmar que um dos polarizadores não estava alinhado com seu próprio marcador.

- Em alguns casos o erro podia ser **muito grande!**



Atividades para polarização por reflexão

- Meça as intensidades paralela e perpendicular variando o ângulo de incidência.
- Para cada ângulo, faça duas medidas:
 - Intensidade paralela (polarizador em 90°),
 - Intensidade perpendicular (polarizador em 0°)
- 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.
 - O que ocorre se o polarizador inicial não estiver a 45° ?
- 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

Brewster: razão

Poucos grupos justificaram, mas:

- A razão entre os coeficientes de reflexão era o mesmo que a razão entre as intensidades:

$$\frac{R_{\parallel}}{R_{\perp}} = \left(\frac{r_{\parallel}}{r_{\perp}}\right)^2 = \left(\frac{\frac{E_{r\parallel}}{E_i}}{\frac{E_{r\perp}}{E_i}}\right)^2 = \left(\frac{E_{r\parallel}}{E_{r\perp}}\right)^2 = \frac{I_{\parallel}}{I_{\perp}}$$

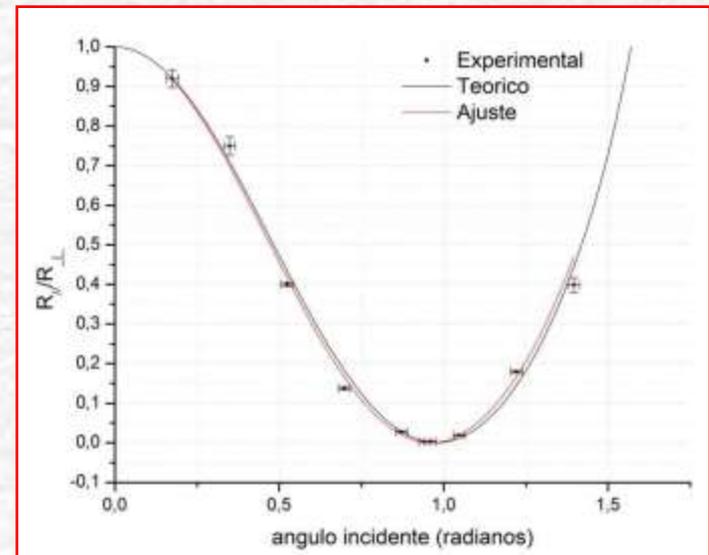
- Era só fazer a razão:

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

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

E substituir θ_t para fazer o gráfico em função apenas do ângulo de incidência:

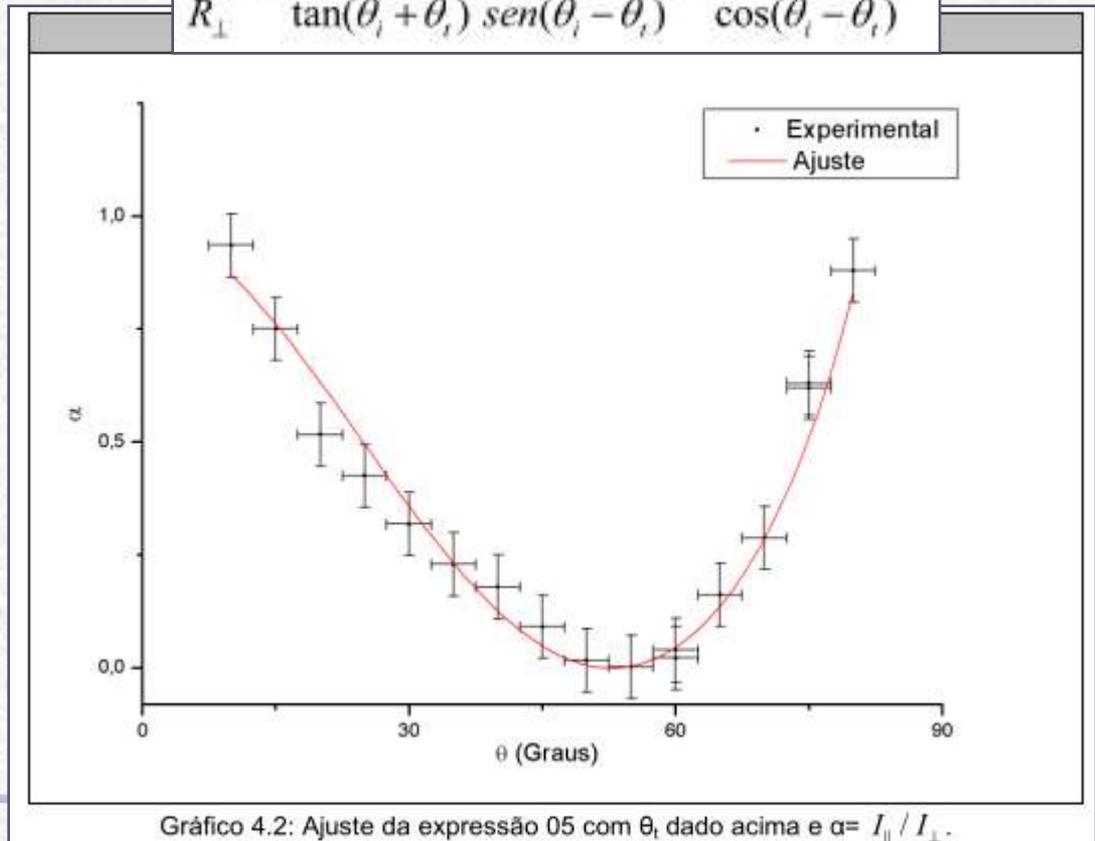
$$\theta_t = \arcsen(\sen(\theta_i) / n_t)$$



Brewster: problemas

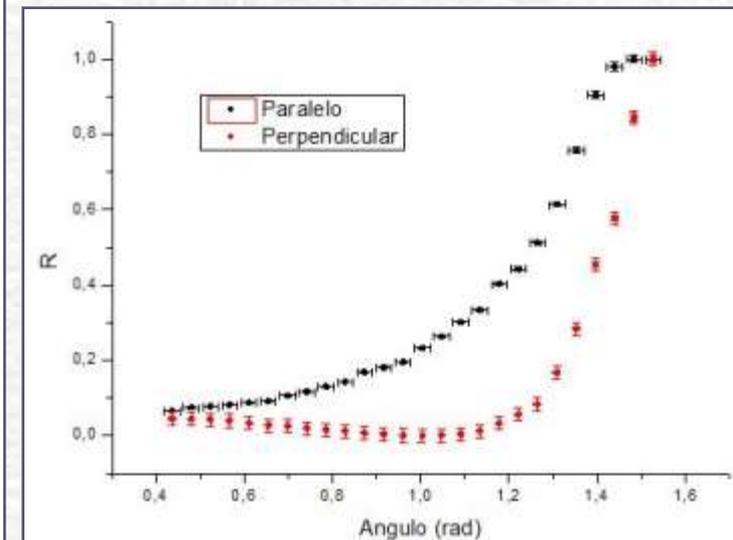
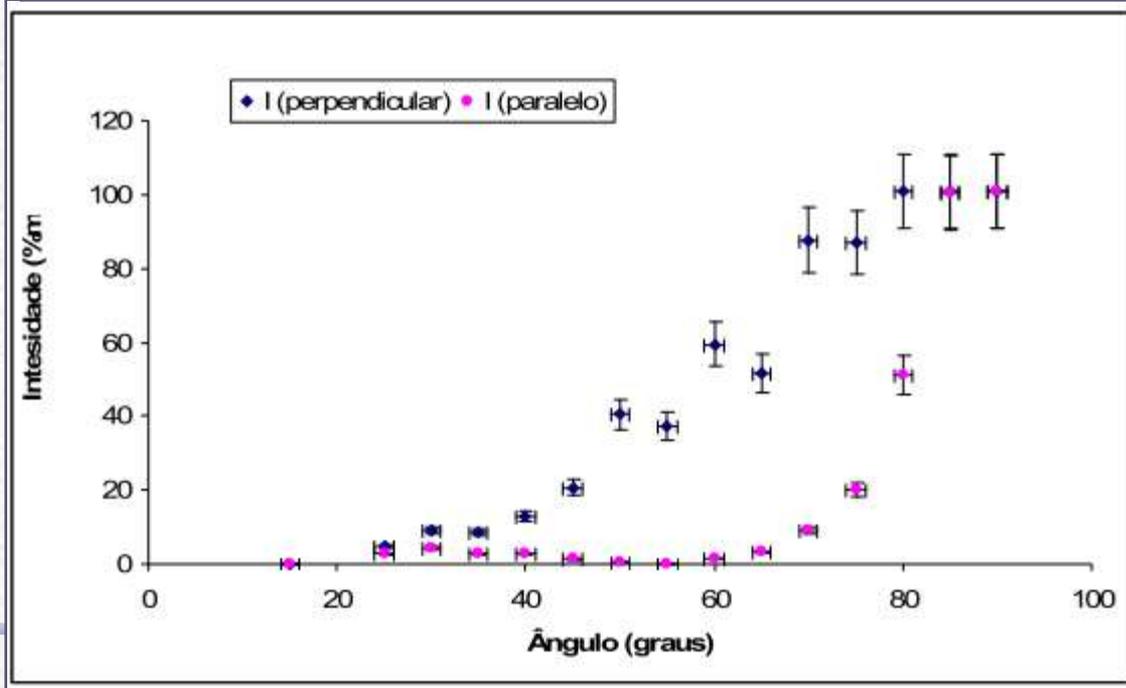
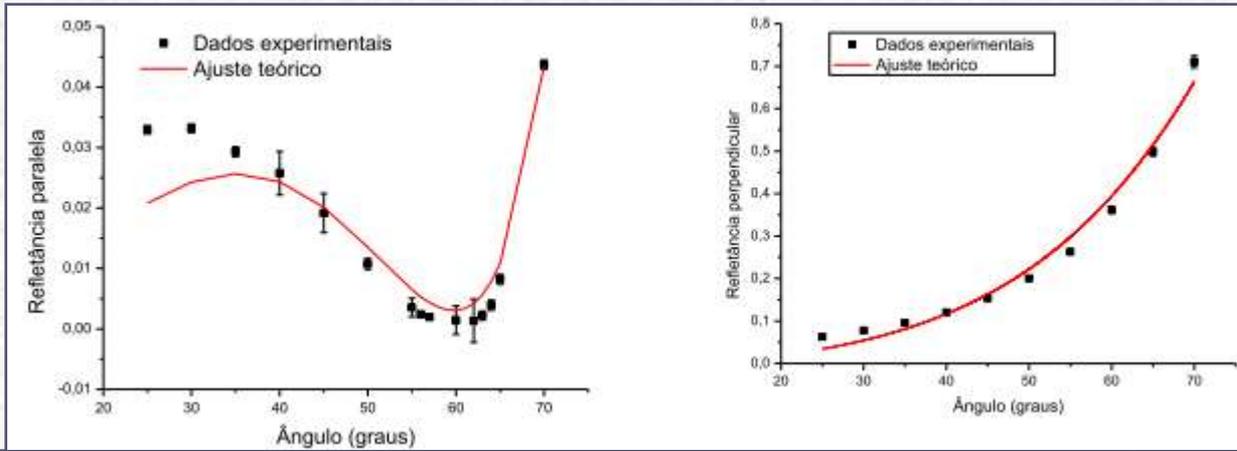
Alguns grupos fizeram a razão $r_{//}/r_{\perp}$, ao invés de $R_{//}/R_{\perp}$

$$\frac{R_{//}}{R_{\perp}} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t) \frac{\sin(\theta_i + \theta_t)}{\cos(\theta_i + \theta_t)}}{\tan(\theta_i + \theta_t) \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\cos(\theta_i - \theta_t)}} = \frac{\cos(\theta_i + \theta_t)}{\cos(\theta_i - \theta_t)}$$



Brewster: problemas

- E alguns grupos não calcularam a razão



Ângulo de Brewster

Mesmo assim, vários conseguiram determinar o ângulo de Brewster e o índice de refração do material

	Theta (deg)	Dth (deg)	n	dn
h01				
h02				
h03	55.8	0.5	1.471	0.032
h04				
h05	55.1	0.74	1.433	0.017
h06				
h07	57.5	1.76	1.569	0.106
h08				
h09	58.15	0.13	1.61	0.08
h10	56.27	0.12	1.498	0.004
h11				

AULA DE HOJE



**Atividade óptica
e
birrefringência**



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.



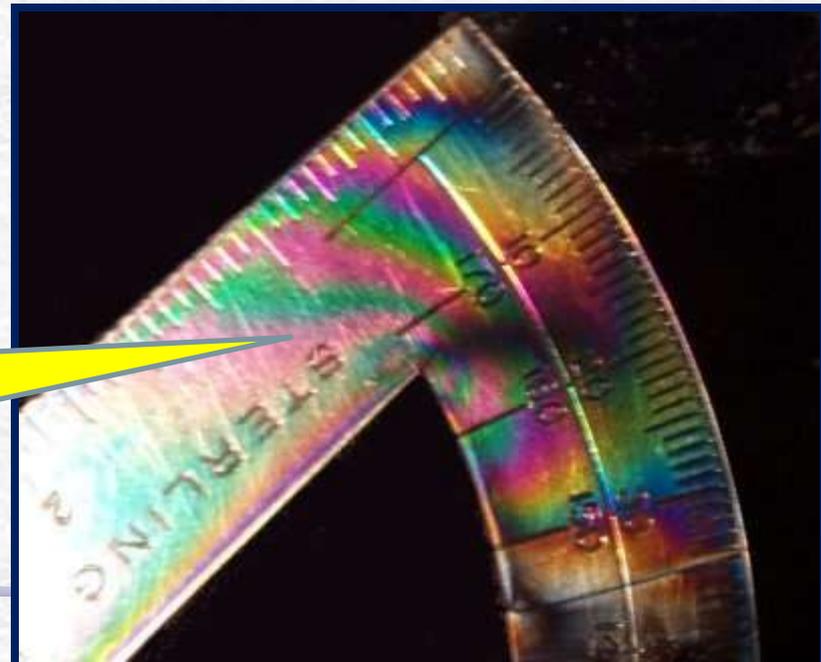
Birrefringência

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

Birrefringência

- Birrefringência pode aparecer quando:
 - Aplicando um campo elétrico no material, as moléculas são induzidas a se alinhar ou se comportar de maneira assimétrica.
 - Materiais isotrópicos são deformados tal que a isotropia do índice de refração é perdida em uma das direções.

Notem como as cores são separadas na reflexão por cause dos diferentes índices de refração.



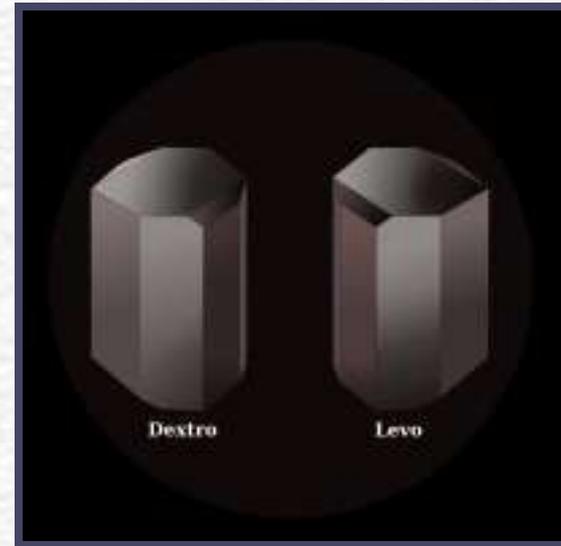
Birrefringência

- Birrefringência aparece naturalmente em:
 - Soluções de moléculas quirais
 - Sólidos com os planos cristalinos rotacionados
 - Etc...

- Aplicações:

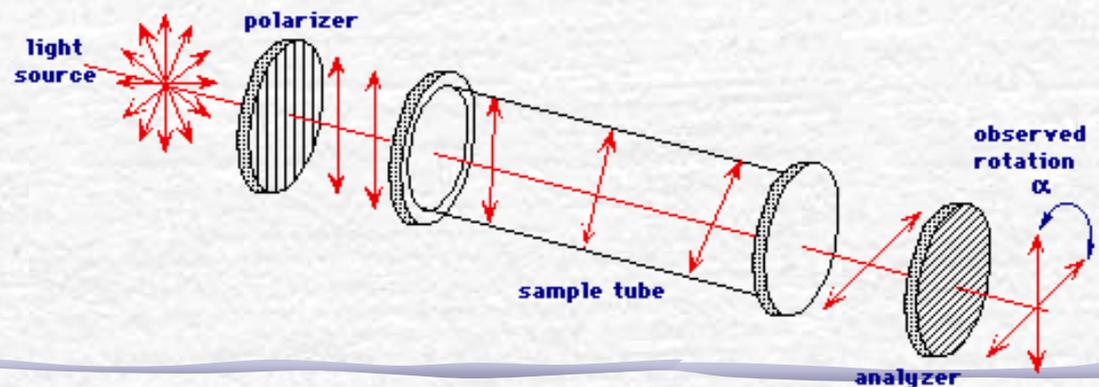
- Medida da concentração de açúcar
- Display de LCD
- Filtros de cor
- Medicina

- No tratamento do glaucoma, é preciso saber a espessura da camada fibrosa do nervo óptico (que é birrefringente). Isto é feito escaneando o olho com um laser polarizado.



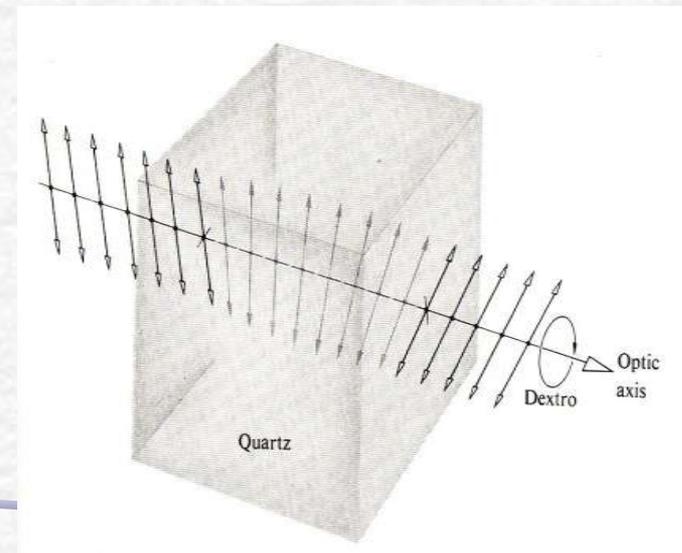
Um pouco de história

- No início do século XIX foi observado que alguns materiais tinham a propriedade de induzir uma rotação contínua no plano de vibração da luz linearmente polarizada que incidia sobre eles. Essa propriedade foi chamada de **atividade óptica**.
- **Material opticamente ativo**: qualquer material que faça com que o campo elétrico \mathbf{E} de um feixe de luz linearmente polarizado pareça ter sofrido uma rotação.



Um pouco de história

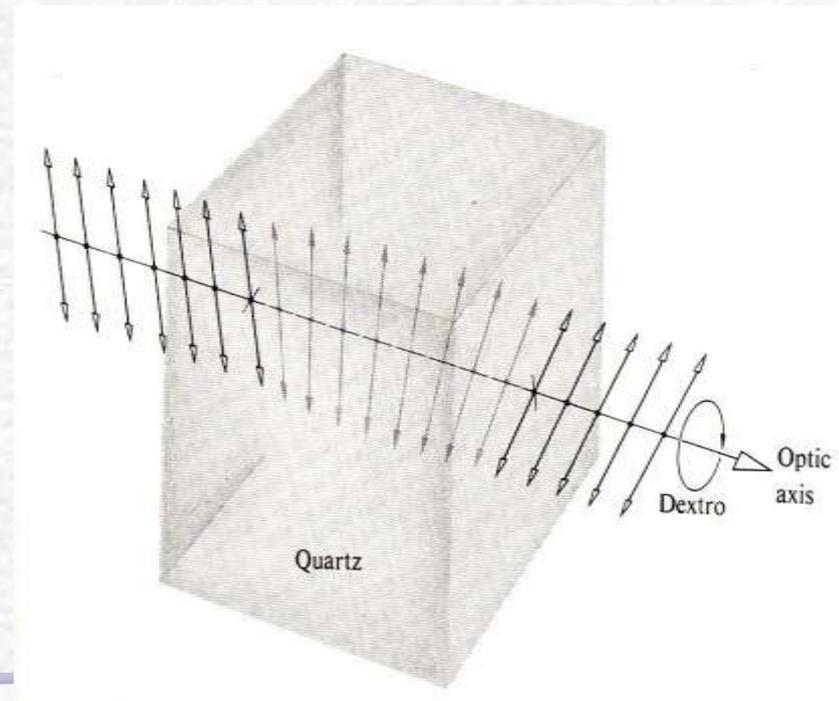
- Foi descoberto pelo físico francês D. F. J. Arago em 1811 que o plano de vibração de um feixe de luz polarizada sofria uma rotação constante à medida que se propagava dentro de um cristal de quartzo.
- Na mesma época, J. B. Biot observou que uma coluna de essência de terebintina (aguarrás) gira o plano de polarização da luz de -37° (o sinal negativo indica uma rotação anti-horária, quando se olha contra a direção de propagação).



Um pouco de história

- Nos cristais esse comportamento pode ser decorrente tanto dos átomos em si como de seu arranjo dentro do cristal.
- Em substâncias líquidas esse comportamento é um atributo das próprias moléculas.

- **Como isso ocorre?**
- **Porque algumas moléculas apresentam isso e outras não?**



Um pouco de história

- Nas moléculas, os elétrons produzem campos eletromagnéticos que interagem com o campo eletromagnético da radiação luminosa
- Em algumas moléculas essa interação indiretamente induz uma pequena rotação no plano de polarização da luz incidente, quando ela é plano polarizada.
- As moléculas que apresentam esse comportamento são moléculas chamadas de isômeros (mesma composição química) e quirais.

O que é um objeto quiral?

- Um objeto é quiral (a palavra vem do grego “mão”) quando ele e sua imagem no espelho não se superpõem:
 - Como nossas mãos:

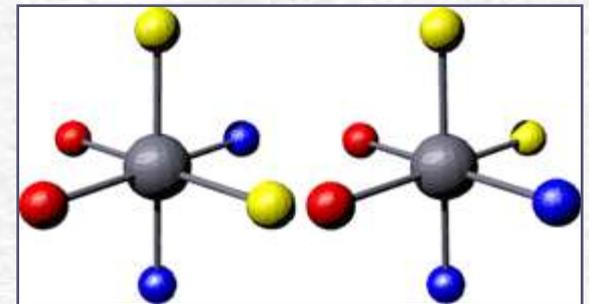


A imagem refletida da mão direita não pode ser superposta à mão direita: de fato a imagem do espelho e a mão não são idênticas

A imagem especular da mão direita é idêntica à mão esquerda, mas você não consegue superpor a mão esquerda à mão direita: essa propriedade é chamada quiralidade

Moléculas quirais e aquirais

- Há moléculas que são quirais:
 - Ela e sua imagem no espelho não podem ser perfeitamente superpostas, elas não são idênticas



- E moléculas que são aquirais (não quirais):
 - Ela e sua imagem no espelho podem ser superpostas e portanto são idênticas

Moléculas quirais

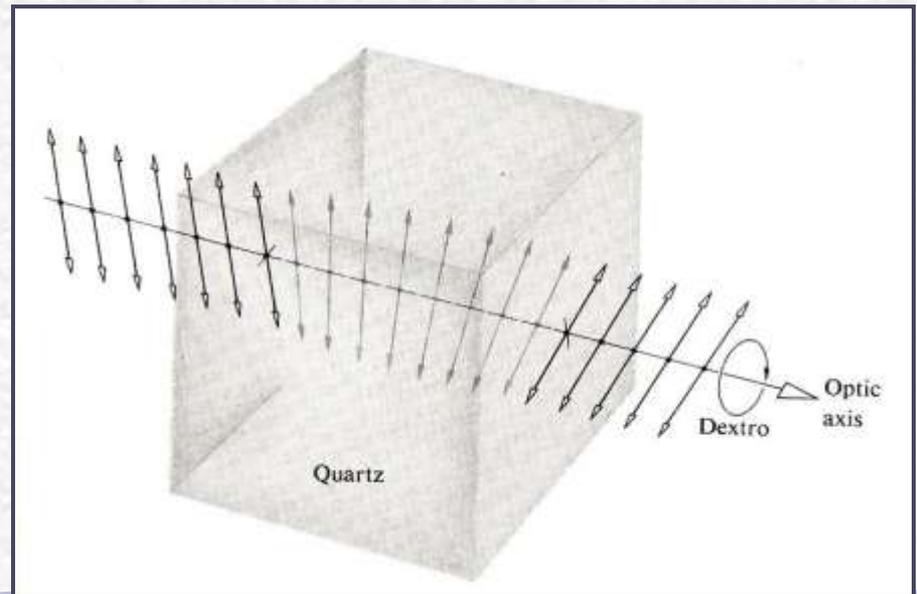
- Em geral substâncias constituídas moléculas quirais de um tipo (left handed) ou outro (right handed), tem propriedades físicas idênticas, como:
 - ponto de fusão, ponto ebulição, índice de refração, densidade
- Mas elas diferem numa propriedade física importante: elas induzem uma rotação no plano de polarização da luz polarizada que as atravessa:
 - A substância right handed faz o plano girar num sentido e a left handed faz o plano girar no sentido oposto

Atividade ótica: moléculas em solução

- Uma amostra macroscópica contém um número muito grande de moléculas, então, numa solução de moléculas aquirais, a rotação induzida por uma molécula é cancelada pela rotação produzida por uma outra, idêntica e orientada como a imagem especular da primeira
- Agora numa solução composta de moléculas quirais (mesma composição química, mas imagens especulares não passíveis de superposição) de um único tipo (left ou right handedness), a rotação não é cancelada porque não vai existir nunca uma molécula que é a imagem no espelho da outra.
- **Isso resulta numa rotação “líquida” do plano de polarização da luz incidente.**

Atividade óptica

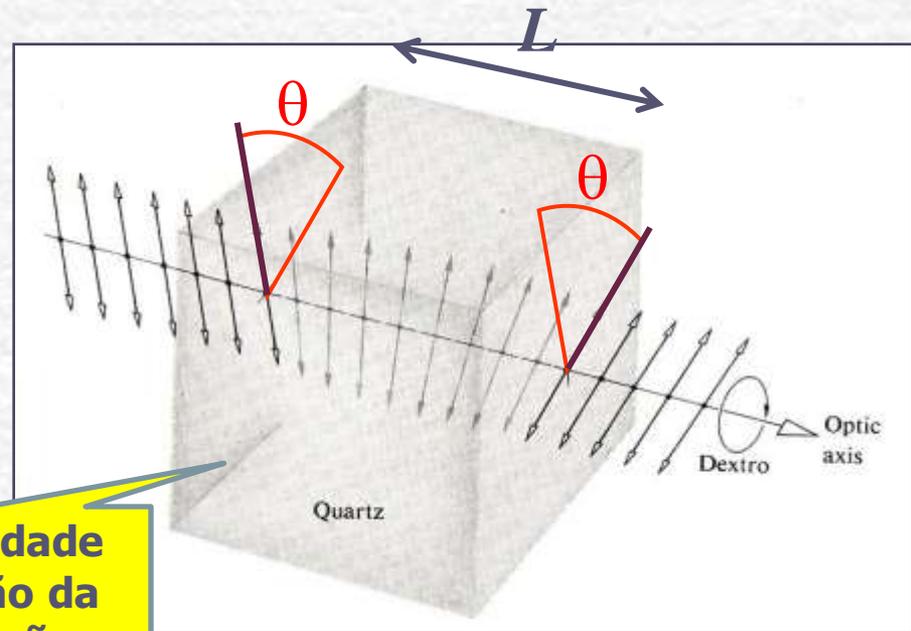
- Alguns materiais (incluindo cristais e soluções líquidas) têm a propriedade de induzir a rotação contínua da polarização da luz
 - É a **rotação óptica** ou **dicroísmo circular**
 - Dextro-rotatória
 - Para a direita
 - Levo-rotatória
 - Para a esquerda



Atividade óptica

- Qual o ângulo θ de giro da polarização?
- Este ângulo depende apenas da **estrutura do material**, que se expressa através de uma constante β (rad/cm)
- E do comprimento L
- Assim:

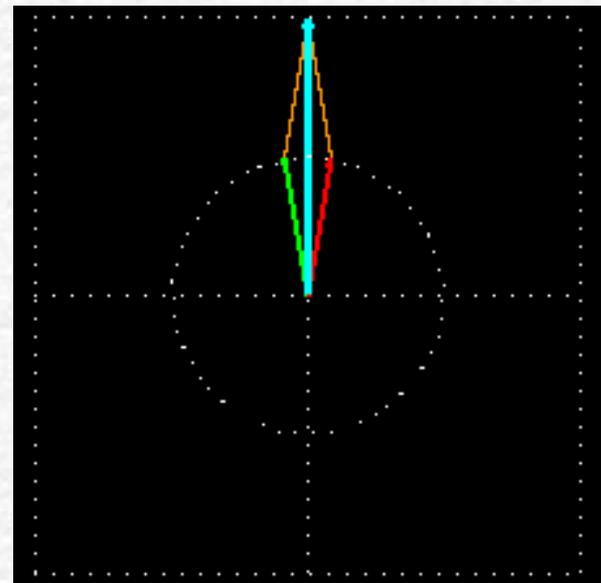
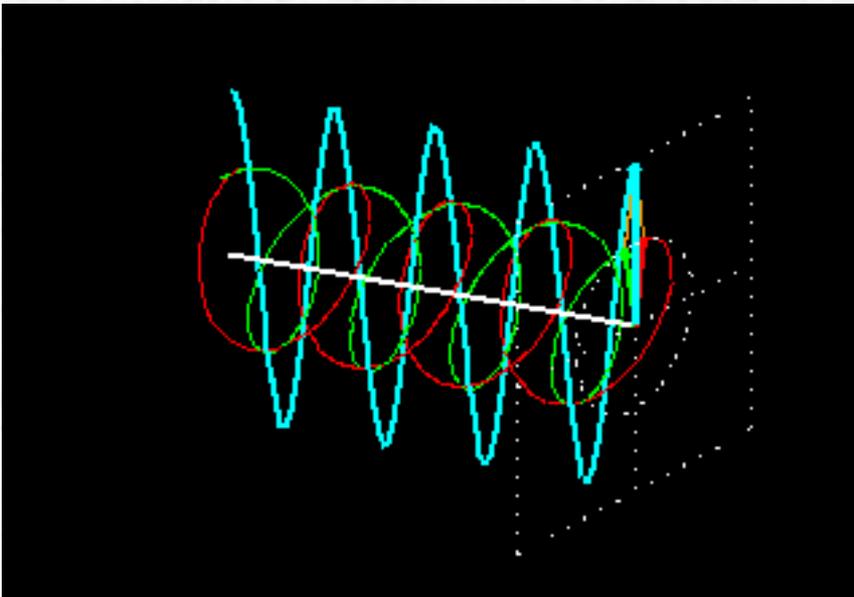
$$\theta = \beta L$$



β = capacidade de rotação da polarização

Atividade óptica

- Fresnel explicou (1825) o efeito. Ele sabia que uma onda linearmente polarizada pode ser representada como uma superposição de duas ondas circularmente polarizadas, nos sentidos horário e anti-horário.



Atividade óptica

Modelo fenomenológico do Fresnel:

- Seja uma onda linearmente polarizada

$$\vec{E} = E_0 \cos(kx - \omega t) \hat{i}$$

- Podemos escrever esta onda como sendo a superposição de duas ondas circularmente polarizadas

$$\vec{E} = \frac{E_0}{2} \left[\cos(kx - \omega t) \hat{i} + \sin(kx - \omega t) \hat{j} + \right. \\ \left. \cos(kx - \omega t) \hat{i} - \sin(kx - \omega t) \hat{j} \right]$$

Atividade óptica

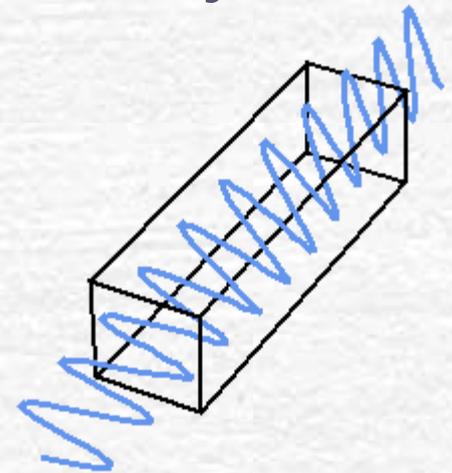
- Ou seja, podemos descrever o campo elétrico como

$$\vec{E} = \frac{E_0}{2} [\vec{d} + \vec{e}]$$

- Onde os vetores \mathbf{d} e \mathbf{e} representam ondas circularmente polarizadas para a direita e esquerda
- **Fresnel propôs** que estes materiais possuem índice de refração diferentes para cada sentido de polarização.
- Assim, a polarização em uma direção se propaga com velocidade menor que na outra direção

Atividade óptica

- Neste caso, a velocidade de propagação diferente para cada polarização acarretaria em um atraso de uma onda em relação a outra, dependendo da espessura, L , do material
 - Isto provocaria a rotação contínua da polarização da onda.
 - Ver o livro Optics de E. Hecht para demonstração deste modelo.



Objetivos da aula de hoje

- Estudar a atividade óptica de uma solução de açúcar

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

rotação

concentração de açúcar em

Rotação específica

comprimento da coluna

- No caso da solução de açúcar, a atividade óptica, ou seja a constante β , depende fortemente da concentração de açúcar na água.

Objetivos da aula de hoje

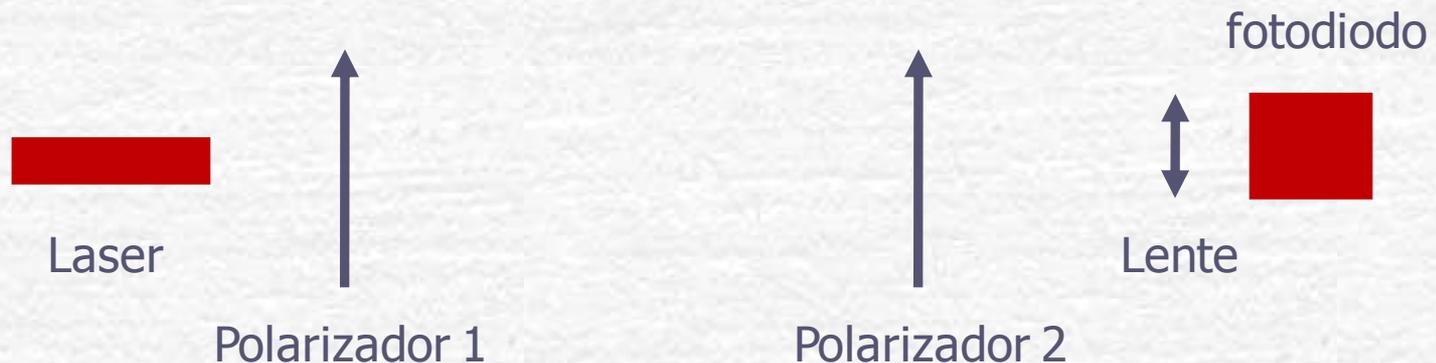
- Mostrar que a mudança na direção da polarização de um feixe linearmente polarizado depende de:

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

- Linearmente da concentração de açúcar ($\gamma = 1$)
- Linearmente do comprimento de solução (L)
- Obter a constante de proporcionalidade (α)

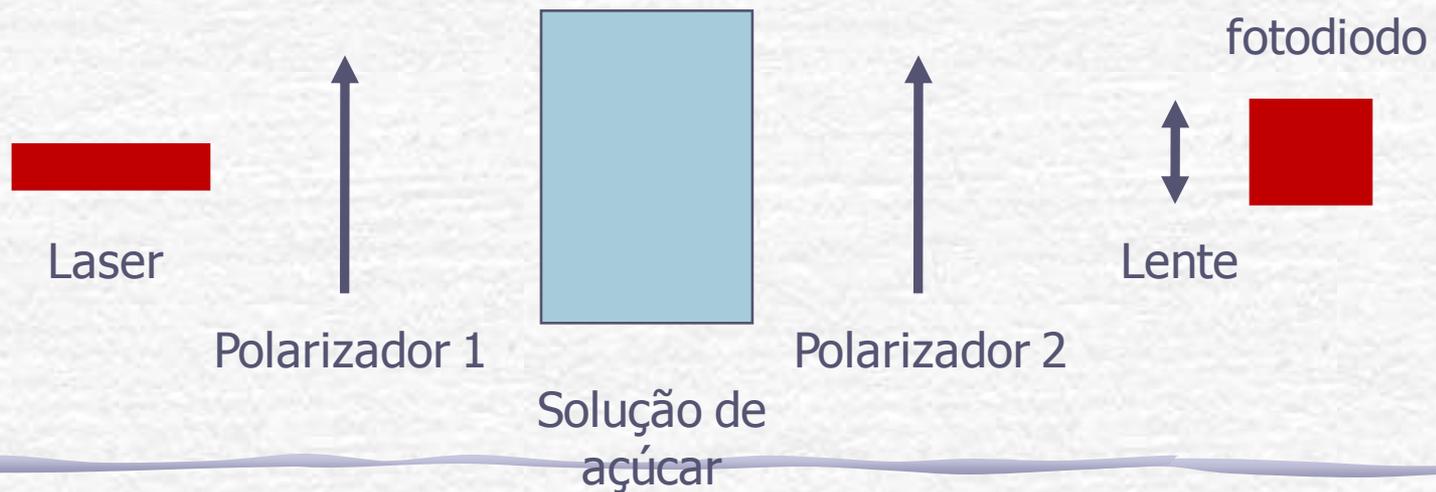
Arranjo experimental (açúcar)

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



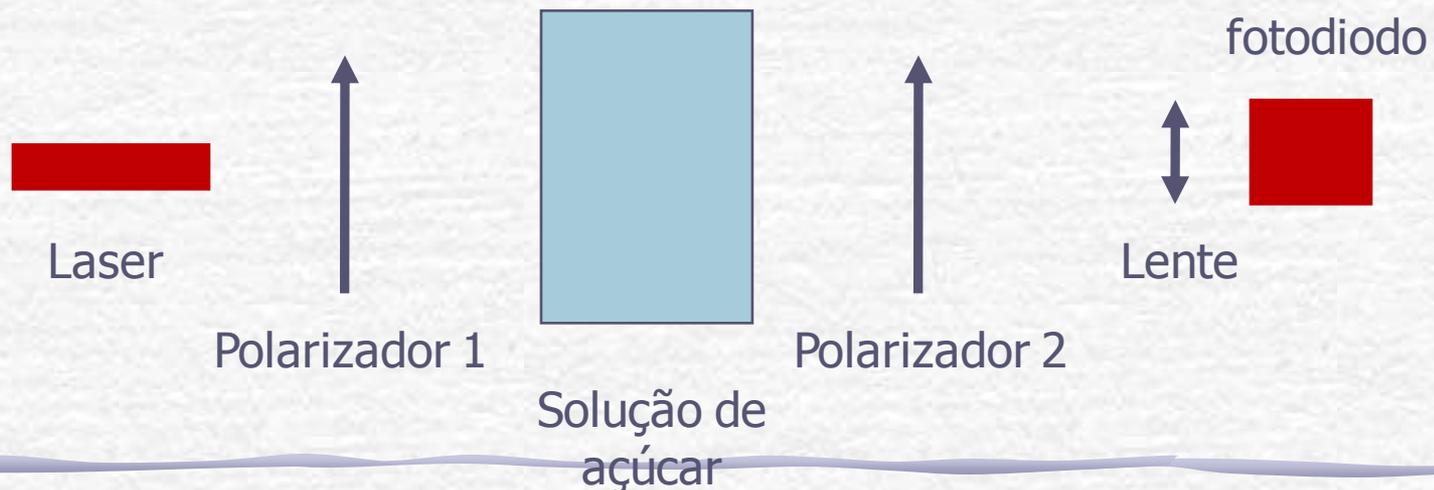
Arranjo experimental (açúcar)

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



Arranjo experimental (açúcar)

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



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

Atividade ótica: dicas

- Verifique o alinhamento.
- Não deixe saturar o foto-sensor.
- Não estamos interessados no valor absoluto da intensidade luminosa. Porque?
- Utilize a função **keep** do **DataStudio**.
- Ajuste a função teórica. Descubra o valor da constante α .
- Compare com valores de colegas ou com valores encontrados na literatura.
- O açúcar é levo ou dextro-rotatório?