

## Experimento de Efeito Kerr

### Objetivos:

- Estudo de Birrefringência
- Polarização da luz
- Interação da Luz com a matéria.

### Introdução

Alguns materiais tornam-se birrefringentes quando colocados em um campo elétrico<sup>(1,2,3,4)</sup>. A direção do campo elétrico é uma direção privilegiada dentro do meio, o fenômeno apresenta um aspecto de simetria em torno dele. As propriedades óticas do material somente podem ser aquelas de um cristal “uniaxial” (é um cristal birrefringente com um único eixo axial ao longo do qual não se manifesta a dupla refração) que tem seu eixo na direção do campo elétrico. Esse fenômeno foi observado pela primeira vez por Kerr, em 1875, sendo chamado assim de “Efeito Kerr” ou “birrefringência elétrica” ou também fenômeno de birrefringência induzida por campo elétrico.

Para nosso caso de líquidos, utilizamos uma célula na qual um campo elétrico é criado entre dois eletrodos paralelos de comprimento  $l$  e separação  $d$ , colocados dentro do líquido (por exemplo,  $\text{CS}_2$ , nitrobenzeno, etc.), formando um capacitor. A medida da diferença de potencial dá imediatamente o valor do campo elétrico  $E = \frac{V}{d}$ .

O feixe de luz incidente monocromática é polarizado pelo polarizador  $P$  (figura 1) e incide sobre a célula de Kerr com o plano de polarização da luz  $45^\circ$  em relação à direção do campo elétrico  $E$  aplicado na célula e atravessa o capacitor. A decomposição do plano de polarização da luz em duas componentes perpendiculares permite prever a propagação da luz com planos de polarização perpendicular ao campo  $E$  (eixo ordinário) e paralelo ao campo  $E$  (eixo extraordinário). Desde que a velocidade de propagação nessas duas direções podem ser diferentes, é possível observar o atraso entre as duas vibrações privilegiadas como sendo  $\delta = (n_e - n_o)l$ , onde  $n_o$  é o índice de refração ordinário (vibração perpendicular ao campo  $\vec{E}$ ) e  $n_e$  é o índice de refração extraordinário (vibração paralela ao campo  $\vec{E}$ ). Esse atraso corresponde a uma diferença de fase:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \delta = \frac{2\pi(n_e - n_o)l}{\lambda} \quad (1)$$

Se a luz entra com uma polarização linear a  $45^\circ$  em relação ao campo elétrico, a vibração que sai do líquido é elipticamente polarizada com um eixo a  $45^\circ$  (ver Apêndice I e figura 1).

$$\frac{b}{a} = \tan \frac{\phi}{2} = \tan \frac{\pi \delta}{\lambda} \quad (2)$$

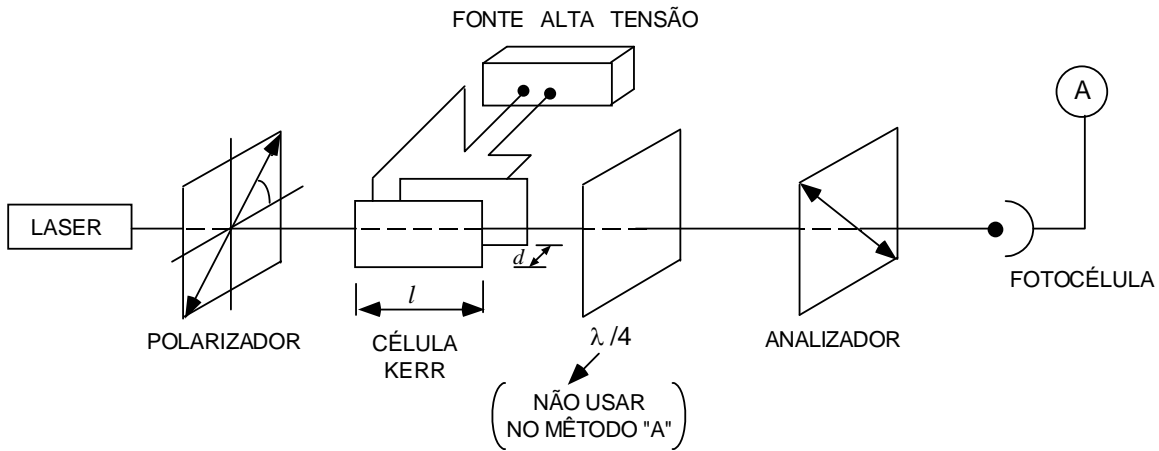


Figura 1 - Esquema de montagem para efeito Kerr.

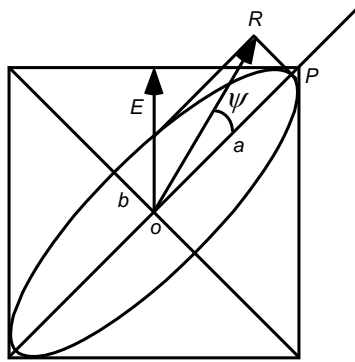


Figura 2 - Diagrama mostrando a elipse com eixos a  $45^\circ$ ,  
 $\psi = \frac{\phi}{2}$ .

A experiência mostra que a diferença  $(n_e - n_o)$  é proporcional a  $E^2$  e  $\lambda$ , tal que:

$$n_e - n_o = B \cdot \lambda \cdot E^2$$

ou

$$\frac{\delta}{\lambda} = B \cdot l \cdot E^2 \quad (3)$$

onde B é a constante de Kerr [ $mV^{-2}$ ].

Essa constante é uma função de  $\lambda$  e da temperatura  $T$ . A maior parte dos líquidos comportam-se como um cristal uniaxial positivo ( $B > 0$ ). Nota-se que o sinal de  $n_e - n_o$  independe da orientação do campo  $E$ .

## Procedimento

Estudamos o efeito Kerr usando uma célula apropriada, cujas dimensões são fáceis de medir:  $l$  (caminho ótico),  $d$  (separação entre eletrodos). Utiliza-se o Nitrobenzeno como material de pesquisa e um laser de HeNe (linha de 632,8 nm) como fonte de luz.

Esse estudo possibilita medir o atraso  $\delta$  ou o que é equivalente à determinação da razão dos eixos de vibração elíptica cuja orientação é conhecida na saída da célula. Por isso os melhores métodos usam ou um analisador em extinção ou compensador de Babinet <sup>(2)</sup> p. 288 <sup>(4)</sup> p. 419-428).

**Certifique-se que a evaporação de Nitrobenzeno ( $C_6H_5 - NO_2$ ) saia da sala através do exaustor.**

## **Aparelhagem**

1 célula de Kerr  
1 fonte de alta tensão 0 - 1 KV  
1 miliamperímetro de (0 - 10 mA)  
1 laser He-Ne  
1 polarizador  
1 analisador  
1 lâmina  $\lambda/4$  para  $\lambda = 632,8$  nm  
1 fotocélula (verificar resposta linear com a intensidade de luz, para evitar saturação do detector)  
1 milivoltímetro, Keithley 166 B  
trilho, suporte, etc.

Faça a montagem da figura 1. Verifique a orientação do polarizador em relação à escala de leitura, dica: retire o polarizador e observe a orientação utilizando a luz refletida no chão.

Ajuste o polarizador e o analisador em extinção de tal maneira que o vetor de polarização da luz polarizada incidente sobre a célula esteja a  $45^\circ$  com a direção do campo elétrico a ser aplicado. Ajuste o valor da voltagem lentamente de tal maneira que a corrente não ultrapasse 2mA.

**Método A (sem lâmina  $\lambda/4$ ):** Meça a intensidade de luz em função do ângulo do analisador para as seguintes voltagens:

$$V = 0, \quad 0,5 \text{ KV}, \quad 1,0 \text{ KV}$$

Faça um gráfico em coordenadas polares da intensidade da luz em função do ângulo do analisador. Calcule a variação de fase  $\phi$ , a variação dos índices de refração ( $n_e - n_o$ ) assim como a constante de Kerr. **Observe bem que você mediu intensidade e não amplitude do vetor de polarização.** Veja o Apêndice I para interpretar seus resultados (ver eq. 10).

Calcule e faça o desenho da elipse para cada um dos casos ( $V = 0; 0,5 \text{ KV}; 1 \text{ KV}$ ).

**Método B (com lâmina  $\lambda/4$ ):** Introduza cuidadosamente a lâmina  $\lambda/4$  entre a célula e o analisador, de tal maneira que suas linhas neutras sejam paralelas aos eixos da elipse incidente ( $45^\circ$ ). Para obter esta condição de alinhamento, basta orientar a lâmina de  $\lambda/4$  até encontrar a situação em que a extinção original (do polarizador e analisador) fique inalterada, (sem aplicar campo). Essa lâmina introduz uma nova diferença de fase  $\pi/2$ , de tal maneira que a vibração emergente fica linearmente polarizada com um ângulo igual a  $\phi/2$  com relação ao eixo maior da elipse (veja Apêndice II). O analisador será, entretanto, usado como um analisador em extinção.

Medir com precisão (1/10 de grau) em função da voltagem a variação (pelo menos 8 valores diferentes) do ângulo através do qual você extingue o feixe. Verifique graficamente a relação (3) e determine a constante de Kerr. Compare seus resultados com os da tabela<sup>(5)</sup>.

## Cuidados:

- não olhe diretamente o feixe do laser
- não ultrapasse o valor da corrente indicada (perigo de descarga e conseqüências indesejáveis)
- o Nitrobenzeno contido na célula conta com um sistema adequado de exaustão, verifique e ventile a sala freqüentemente.

## Alguns dados <sup>(5)</sup>

Os valores das tabelas da constante de Kerr são dados geralmente em u.e.s.. Para obter os valores no sistema internacional (S.I.) precisamos dividir esses valores por  $9 \cdot 10^6$ . (exemplo  $\text{CS}_2$  a  $20^\circ$  e  $6328 \text{ \AA}$ :  $B_{\text{CGS}} = 2,95 \cdot 10^{-7} \rightarrow B_{\text{SI}} = 2,95 \cdot 10^{-7} / 9 \cdot 10^6 = 3,27 \cdot 10^{-14} (\text{mV}^{-2})$ ).

	t [°C]	$\lambda$ [nm]	B( $10^{-14} \text{mV}^{-2}$ )	
$\text{CS}_2$	20	630	3.27	
	20	560	3.83	
	20	440	5.52	
$\text{C}_2\text{H}_5 - \text{NO}_2$	20	630	329.3	Nitrobenzeno
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	20630	630	16,5	Acetona
$\text{C}_7\text{H}_3 - \text{NO}_2$	20	630	225,6	P Nitrotolueno

$$B(t) = B_{20} (1 - 0,005 (t - 20)). \quad 18 < t < 28^\circ\text{C}$$

## Perguntas

1. Descreva as propriedades físicas de:
  - a) um polarizador linear
  - b) um polarizador circular
  - c) uma lâmina  $\lambda/4$
2. Descreva as funções de um compensador de Babinet.
3. Como medir a velocidade da luz utilizando o Efeito Kerr?
4. Modulando a luz com o uso do Efeito Kerr, como é possível transmitir informações utilizando o feixe de luz?

## Referências

1. E. E. Wahlstrom, *Cristalografia Óptica*, 1969, 3 ed. (Biblioteca IFSC/USP, 543.9 W 136C)
2. G. Bruhat, *Optique*, Masson e Cie, Paris, 1959, 4 ed. (Biblioteca IFSC/USP, 535, 071 B89203).
3. E. Hedet e A. Zajac, *Optics*, Addison-Wesley Co., 1974. (Biblioteca IFSC/USP, 535 H 4470, e.1).
4. M. França, *Interferências, difração e polarisations em Handbuck der Physik*, vol. XXIV, (1956), p. 380-429. (Biblioteca IFSC/USP, H 530 H 236, v. 29).

5. H. Mouton, em International Critical Tables, vol. VII, p. 109, McGraw Hill Co., New York, 1930, 1 ed. (Biblioteca IFSC/USP T530 N 277I, vol. 7).  
American Institute of Physics Handbook, 6m, p. 5-18 les. McGraw Hill Co., New York, 1957, 2<sup>nd</sup> ed. (Biblioteca IFSC/USP H 530 A 512.8).

## APÊNDICE I

### COMPOSIÇÃO DE DUAS VIBRAÇÕES RETANGULARES DE MESMA AMPLITUDE

A seguinte situação representa a polarização elíptica com que sai a luz logo após a célula de Kerr. Consideremos duas funções senoidais com um mesmo período que representem duas grandezas  $OM_1$  e  $OM_2$  segundo duas direções retangulares  $O_x$  e  $O_y$ , cujas amplitudes em função do tempo são respectivamente (figura 3):

$$OM_1 = x = a \cos \omega t \quad \quad \quad OM_2 = y = a \cos(\omega t - \phi) \quad (4)$$

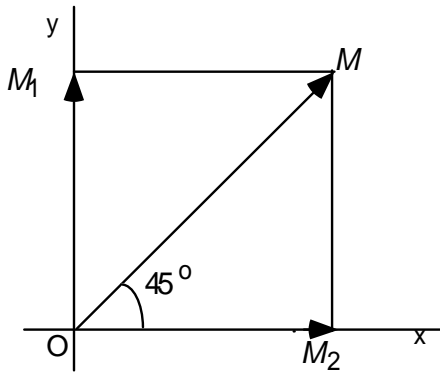


Figura 3 - Dados iniciais.

onde  $\phi$  é a diferença de fase atribuída ao efeito.

A trajetória do ponto  $M$  é obtida por eliminação do tempo  $t$  entre as duas relações, ou seja,

$$x^2 - 2xy \cos \phi + y^2 = a^2 \sin^2 \phi$$

Essa trajetória é uma elipse inscrita num quadrado de lado  $2a$ . (figura 4).

Neste caso particular em que os eixos da elipse estão sempre na bissetriz  $OX$  e  $OY$  dos eixos  $O_x$  e  $O_y$ , as componentes das vibrações elípticas segundo  $OX$  e  $OY$  podem ser calculadas facilmente:

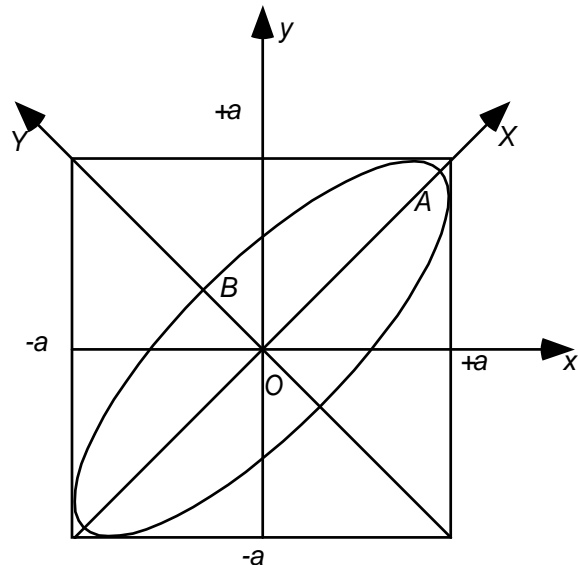


Figura 4 - Elipse resultante da composição de duas vibrações retangulares com a mesma amplitude e o mesmo período

$$X = x \frac{\sqrt{2}}{2} + y \frac{\sqrt{2}}{2} = a\sqrt{2} \cos \frac{\phi}{2} \cos(\omega t - \phi/2) \quad (5)$$

$$Y = -x \frac{\sqrt{2}}{2} + y \frac{\sqrt{2}}{2} = a\sqrt{2} \operatorname{sen} \frac{\phi}{2} \operatorname{sen}(\omega t - \phi/2) \quad (6)$$

Estas duas vibrações apresentam uma diferença de fase  $\pi/2$  e as amplitudes são:

$$OA = X = a\sqrt{2} \cos \phi/2 = a_o \cos \psi \quad (7)$$

onde  $\psi = \frac{\phi}{2}$  e  $a_o = a\sqrt{2}$

$$OB = Y = a\sqrt{2} \operatorname{sen} \phi/2 = a_o \operatorname{sen} \psi$$

(e a energia da vibração  $U = 2a^2 = a_o^2$ ).

Podemos obter a equação da elipse em coordenadas  $X$  e  $Y$  como sendo:

$$\frac{X^2}{2a^2 \cos^2 \phi/2} + \frac{Y^2}{2a^2 \operatorname{sen}^2 \phi/2} = 1 \quad (8)$$

ou

$$\frac{X^2}{a_o^2 \cos^2 \psi} + \frac{Y^2}{a_o^2 \operatorname{sen}^2 \psi} = 1$$

A razão dos eixos  $\frac{OB}{OA} = \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} = \operatorname{tg} \psi$  (elipticidade da vibração).

É importante ressaltar que as medidas são feitas em termos de intensidade de luz e não amplitude. Consideremos então a ação de um polarizador linear sobre uma polarização elíptica (procure saber como é um gráfico da luz elípticamente polarizada em papel polar).

### **Ação de um nicol (polarizador/analizador) sobre uma vibração elíptica transmitida:**

Girando-se o analisador, a amplitude da vibração transmitida é mínima quando seu eixo é perpendicular ao eixo maior da elipse. Suponhamos que o eixo  $OC$  do analisador faça um ângulo  $\theta$  com a direção  $OY$ . As duas componentes  $X$  e  $Y$  apresentam em  $OC$  duas vibrações em “quadratura” de fase  $a_o \cos \psi \operatorname{sen} \theta$  e  $a_o \operatorname{sen} \psi \cos \theta$ .

A resultante tem a intensidade:

$$I = a_o^2 \cos^2 \psi \operatorname{sen}^2 \theta + a_o^2 \operatorname{sen}^2 \psi \cos^2 \theta \quad (9)$$

$$= a_o^2 (\cos^2 \psi \operatorname{sen}^2 \theta + \cos^2 \theta \operatorname{sen}^2 \psi)$$

$$I(\theta = 0) = \operatorname{sen}^2 \psi$$

$$I\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right) = \cos^2 \psi$$

e a razão:

$$\frac{I(\theta = 0)}{I(\theta = \pi/2)} = \operatorname{tg}^2 \psi = \operatorname{tg}^2 \phi/2 \quad (10)$$

Essa relação pode ser usada para calcular a diferença de fase.

Um outro método para determinar a diferença de fase é através do método da compensação<sup>(2,3,4)</sup> onde é utilizado uma placa de  $\lambda/4$  que transforma a luz elíptica em linear. Veja o Apêndice II.

## APÊNDICE II

### AÇÃO DE UMA LÂMINA $\lambda/4$ SOBRE UMA VIBRAÇÃO ELÍPTICA COM OS MESMOS EIXOS

Fazemos incidir uma vibração elíptica sobre uma lâmina  $\lambda/4$  colocada de tal maneira que suas linhas neutras (situação quando não há variação de intensidade ao introduzir a placa de  $\lambda/4$  entre dois polarizadores em extinção) coincidem com os eixos da elipse incidente.

Sejam  $A$  e  $B$  os valores dos semi-eixos maior e menor, respectivamente, da elipse. As equações da elipse que representam a combinação de duas vibrações perpendiculares podem ser escritas como (figura 5):

$$x = A \cos \omega t \quad y = -B \sin \omega t = B \cos(\omega t + \pi/2) \quad (11)$$

A introdução de uma lâmina  $\lambda/4$ , orientada paralelamente aos eixos da elipse incidente, introduz uma nova diferença de fase  $\pi/2$ , conseqüentemente a vibração  $y$  sendo retardada. As equações da vibração emergente são:

$$x = A \cos \omega t \quad y = -B \sin(\omega t - \pi/2) = B \cos \omega t \quad (12)$$

A resultante dessas duas vibrações em fase é uma vibração linear  $OR$ , que possui a mesma intensidade  $A^2 + B^2$  que a vibração incidente e faz com  $OX$  um ângulo  $\psi$  tal que:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{B}{A} \quad (13)$$

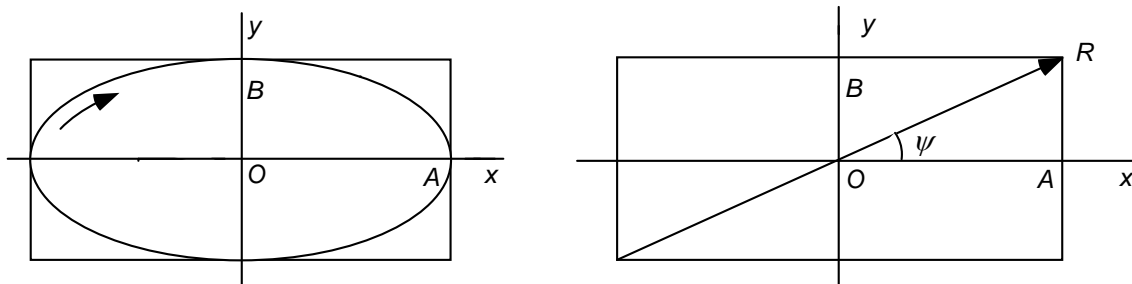
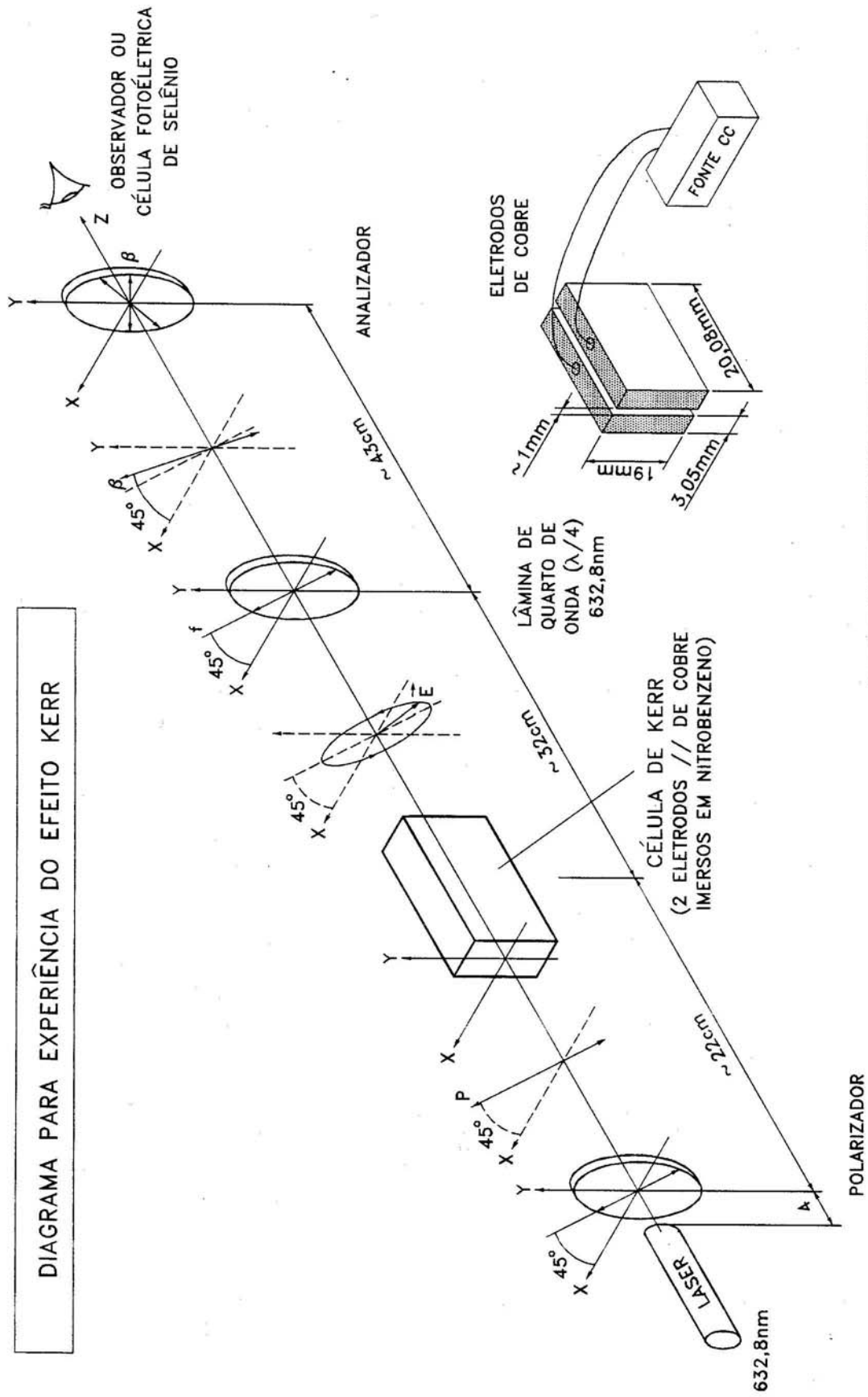


Figura 5 - Vibrações incidentes e emergentes

Desta maneira podemos determinar com uma sensibilidade e precisão razoável ( $\sim 1/10$  de grau), o atraso introduzido pela célula de Kerr, usando somente um polarizador linear como analisador (analisador em extinção). Existem, entretanto, outros métodos de maior precisão (compensador de Babinet ou compensador a penumbra)<sup>(4,5)</sup>.

DIAGRAMA PARA EXPERIÊNCIA DO EFEITO KERR



LAB. DE ENSINO AVANÇADO (1998-CLÁUDIO BRETAS/SAMUEL ENBO)