

**Trabalho**

|                                    |                                                                                                                                                        |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Título em Português:</b>        | Estudo da refração não linear de líquidos por rotação não linear da polarização elíptica: efeito da mudança da temperatura e da duração do pulso laser |
| <b>Título em Inglês:</b>           | Study of the nonlinear refraction of liquids by nonlinear ellipse rotation: temperature and pulse width change effect                                  |
| <b>Autor:</b>                      | Leonardo Santos de Castro                                                                                                                              |
| <b>Instituição:</b>                | Universidade de São Paulo                                                                                                                              |
| <b>Unidade:</b>                    | Instituto de Física de São Carlos                                                                                                                      |
| <b>Orientador:</b>                 | Lino Misoguti                                                                                                                                          |
| <b>Área de Pesquisa / SubÁrea:</b> | Física da Matéria Condensada                                                                                                                           |
| <b>Agência Financiadora:</b>       | USP - Programa Unificado de Bolsas                                                                                                                     |

## Estudo da refração não linear de líquidos por rotação não linear da polarização elíptica: efeito da mudança da temperatura e da duração do pulso laser

Leonardo Santos de Castro

Lino Misoguti

Instituto de Física de São Carlos – Universidade de São Paulo

leonardo\_castro@usp.br

### Objetivos

Determinar os impactos dos índices de refração linear e não linear em dinâmicas não lineares que ocorrem em solventes, a partir da medida da rotação não linear da polarização elíptica (RNLPE) de quatro solventes (água, metanol, álcoois isopropílico e etílico). Como, na modelagem de efeitos não lineares em solventes há a presença do índice de refração linear, é necessário averiguarmos o quanto um processo não linear é de fato devido ao índice de refração não linear, como na sua mudança devido a temperatura, por exemplo.

### Métodos e Procedimentos

A RNLPE é um efeito não linear que ocorre quando um feixe de polarização elíptica se propaga em um solvente que tenha características não linear. Neste estudo, como o meio em questão é isotrópico, a rotação da polarização será proporcional ao coeficiente B [4]. Então, um amplificador sensível a fase (Lock-in) de fase dupla será empregado para detectar a fase de entrada e saída do feixe pelo solvente. Podemos determinar a rotação do feixe como sendo uma mudança de fase de um sinal modulado [3], justificando assim o Lock-in

ser de fase dupla: um sinal corresponderá em fase X, e outro sinal em quadratura Y, o que permite determinar fases (ângulos) com  $\alpha = \text{atan}(Y/X)$ . Levando em conta nas condições do experimento feito (feixe gaussiano, amostra grossa), o ângulo medido será [2],[3]:

$$\langle \alpha(z) \rangle_{\text{Lockin}} = \frac{\omega \sin(2\varphi) B I z_0}{8 c^2 \varepsilon_0 n_0 \sqrt{2}} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{z_b}{z_0} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{z_a}{z_0} \right) \right]$$

onde:

$$z_a = z - \frac{L}{2n_0}, z_b = z + \frac{L}{2n_0}, L \text{ é o comprimento da}$$

amostra em z, I é a intensidade do laser,  $\varphi$  é o ângulo da lâmina de quarto-de-onda (22,5° para a produção de polarização elíptica), B é o coeficiente não linear. Fica evidente o cuidado que devemos cuidar aqui: uma vez que a mudança da temperatura altera não somente o B, como  $n_0$ , devemos investigar a contribuição linear para as dinâmicas não linear. Para a produção do feixe em si, utilizaremos um sistema laser amplificado comercial de Ti: safira (laser Dragon KM Labs, 1kHz)

### Resultados

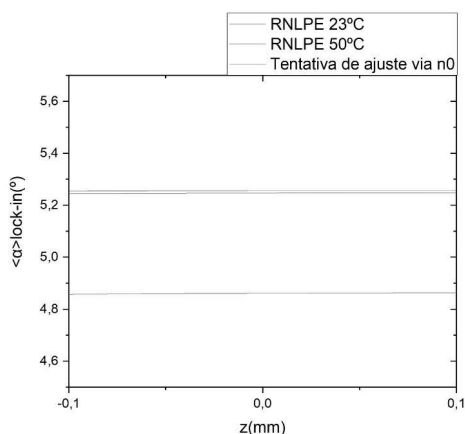


Figura 1: Gráficos de RNLPE da água.

#### Índice de refração linear

- Água:  $\Delta n_0 = 0,0025$ , com queda percentual de 0,18%.
- Metanol:  $\Delta n_0 = 0,01$ , com queda percentual de 0,75%.
- Isopropílico:  $\Delta n_0 = 0,01$ , com queda percentual de 0,72%.
- Etílico:  $\Delta n_0 = 0,01$ , com queda percentual de 0,73%.

Figura 2: tabela de variação do índice de refração linear segundo a temperatura dentro do range do nosso experimento[5][1] (20°C – 50°C).

#### Queda no sinal de RNLPE

- Água:  $\Delta n_2 = 0,15$ , com queda percentual de 11,27%.
- Metanol:  $\Delta n_2 = 0,12$ , com queda percentual de 9,02%.
- Isopropílico:  $\Delta n_2 = 0,14$ , com queda percentual de 10,1%.
- Etílico:  $\Delta n_2 = 0,15$ , com queda percentual de 11,03%.

Figura 3: tabela de variação do sinal da RNLPE segundo a temperatura dentro do mesmo range (20°C-50°C).

Podemos ver, neste exemplo, que a tentativa de ajustar o fitting da curva teórica esperada da RNLPE via índice de refração linear com os pontos experimentais à 50°C falha, o que nos resta acreditar que o papel do ajuste aos pontos experimentais seja por conta do coeficiente B, isto é, da natureza não linear do solvente. Podemos ver também que a tentativa de ajuste por efeitos puramente linear até tem sua devida magnitude, inclusive esta é diferente para a água e um álcool. Porém, em maior parte (cerca de dez vezes mais) o ajuste

da curva teórica se deve por efeitos não lineares.

## Conclusões

Finalmente, desta forma esperamos compreender um pouco mais as dinâmicas de mudança do índice de refração não linear segundo a temperatura. Não somente o índice de refração não linear é o mais efetivo para a sua mudança segundo a temperatura, como diferentes solventes mudam seu índice de refração de maneira diferente também, uma vez que, para álcoois, por exemplo, essa variação é constante, o que não vale para o índice de refração não linear.

## Referências

- [1] HODGMAN, C. D., AND LIND, S. C. Handbook of chemistry and physics. *The Journal of Physical and Colloid Chemistry* 53, 7 (1949), 1139-1139.
- [2] MELHADO, M. D. S., BARBANO, E. C., VIVAS, M. G., ZÍLIO, S. C., AND MISOGUTI, L. Absolute nonlinear refractive index spectra determination of organic molecules in solutions. *Journal of Physical Chemistry A* (2019).
- [3] MIGUEZ, M. L., BARBANO, E. C., COURA, J. A., ZÍLIO, S. C., AND MISOGUTI, L. Nonlinear ellipse rotation measurements in optical thick samples. *Applied Physics B* (2015).
- [4] MIGUEZ, M. L., BARBANO, E. C., ZÍLIO, S. C., AND MISOGUTI, L. Accurate measurement of nonlinear ellipse rotation using a phase-sensitive method. *Opt. Express* 22, 21 (Oct 2014), 25530-25538.
- [5] ORTEGA, J. Densities and refractive indices of pure alcohols as a function of temperature. *Journal of Chemical and Engineering Data - J CHEM ENG DATA* 27 (07 1982).
- [6] Míguez, M. L. (2017). Rotação não linear da polarização elíptica: novas propostas para o estudo de não linearidades refrativas. Tese de Doutorado, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. doi:10.11606/T.76.2018.tde-02022018-153758. Recuperado em 2025-03-28, de www.teses.usp.br

# Study of the nonlinear refraction of liquids by nonlinear rotation of elliptical polarization: effect of temperature change and laser pulse duration

Leonardo Santos de Castro

Lino Misoguti

Instituto de Física de São Carlos – Universidade de São Paulo

leonardo\_castro@usp.br

## Objectives

To determine the impacts of the linear and nonlinear refractive indices on nonlinear dynamics that occur in solvents, from the measurement of the nonlinear rotation of elliptical polarization of four solvents (water, methanol, isopropyl and ethyl alcohols). Since in the modeling of nonlinear effects in solvents there is the presence of the linear refractive index, it is necessary to investigate how much a nonlinear process is in fact due to the nonlinear refractive index, as in its change due to temperature, for example.

## Materials and Methods

The nonlinear rotation of elliptical polarization is a nonlinear effect that occurs when a beam with elliptical polarization propagates in a solvent that has nonlinear characteristics. In this study, as the medium in question is isotropic, the polarization rotation will be proportional to coefficient B [4]. Thus, a dual-phase lock-in amplifier will be employed to detect the input and output phase of the beam through the solvent. We can determine the beam rotation as being a phase change of a modulated signal [3], which justifies the lock-in being dual-phase: one signal will correspond to phase X, and

another signal to quadrature Y, which allows determining phases (angles). Taking into account the conditions of the experiment performed (Gaussian beam, thick sample), the measured angle will be [2],[3]:

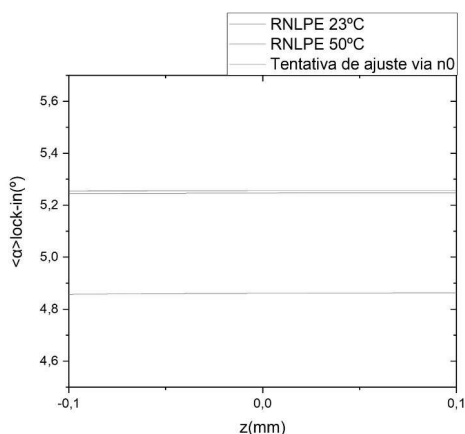
$$\langle \alpha(z) \rangle_{\text{Lockin}} = \frac{\omega \sin(2\phi) B I z_0}{8 c^2 \epsilon_0 n_0 \sqrt{2}} \left[ \text{tg}^{-1} \left( \frac{z_b}{z_0} \right) - \text{tg}^{-1} \left( \frac{z_a}{z_0} \right) \right]$$

where:

$$z_a = z - \frac{L}{2n_0}, z_b = z + \frac{L}{2n_0}, \quad L \text{ is the sample}$$

length in z, I is the laser intensity,  $\phi$  is the angle of the quarter-wave plate (22.5° for the production of elliptical polarization), B is the nonlinear coefficient. It is evident the care we must take here: since temperature change alters not only B, but also , we must investigate the linear contribution to the nonlinear dynamics. For the production of the beam itself, we will use a commercial amplified Ti:sapphire laser system (Dragon KM Labs laser, 1kHz).

## Results



**Figure 1:** nonlinear rotation of elliptical polarization graphs of water.

Índice de refração linear

- Água:  $\Delta n_0 = 0,0025$ , com queda percentual de 0,18%.
- Metanol:  $\Delta n_0 = 0,01$ , com queda percentual de 0,75%.
- Isopropílico:  $\Delta n_0 = 0,01$ , com queda percentual de 0,72%
- Etílico:  $\Delta n_0 = 0,01$ , com queda percentual de 0,73%

**Figure 2:** table of variation of the linear refractive index according to temperature within the range of our experiment [5][1] (20°C – 50°C).

Queda no sinal de RNLPE

- Água:  $\Delta n_2 = 0,15$ , com queda percentual de 11,27%
- Metanol:  $\Delta n_2 = 0,12$ , com queda percentual de 9,02%
- Isopropílico:  $\Delta n_2 = 0,14$ , com queda percentual de 10,1%
- Etílico:  $\Delta n_2 = 0,15$ , com queda percentual de 11,03%

**Figure 3:** table of variation of the NREP signal according to temperature within the same range (20°C–50°C).

We can see, in this example, that the attempt to adjust the fitting of the expected theoretical curve of the NREP via the linear refractive index with the experimental points at 50°C fails, which leaves us to believe that the role of the adjustment to the experimental points is due to coefficient B, that is, to the nonlinear nature of the solvent. We can also see that the attempt to adjust by purely linear effects does have its magnitude, and this is different for water and an alcohol. However, for the most part (about ten

times more) the adjustment of the theoretical curve is due to nonlinear effects.

## Conclusions

Finally, in this way we hope to understand a little more about the dynamics of change of the nonlinear refractive index according to temperature. Not only is the nonlinear refractive index the most effective for its change according to temperature, but different solvents also change their refractive index in different ways, since, for alcohols, for example, this variation is constant, which does not hold for the nonlinear refractive index.

## References

- [1] HODGMAN, C. D., AND LIND, S. C. Handbook of chemistry and physics. *The Journal of Physical and Colloid Chemistry* 53, 7 (1949), 1139–1139.
- [2] MELHADO, M. D. S., BARBANO, E. C., VIVAS, M. G., ZÍLIO, S. C., AND MISOGUTI, L. Absolute nonlinear refractive index spectra determination of organic molecules in solutions. *Journal of Physical Chemistry A* (2019).
- [3] MIGUEZ, M. L., BARBANO, E. C., COURA, J. A., ZÍLIO, S. C., AND MISOGUTI, L. Nonlinear ellipse rotation measurements in optical thick samples. *Applied Physics B* (2015).
- [4] MIGUEZ, M. L., BARBANO, E. C., ZÍLIO, S. C., AND MISOGUTI, L. Accurate measurement of nonlinear ellipse rotation using a phase-sensitive method. *Opt. Express* 22, 21 (Oct 2014), 25530–25538.
- [5] ORTEGA, J. Densities and refractive indices of pure alcohols as a function of temperature. *Journal of Chemical and Engineering Data - J CHEM ENG DATA* 27 (07 1982).
- [6] Miguez, M. L. (2017). Rotação não linear da polarização elíptica: novas propostas para o estudo de não linearidades refrativas. Tese de Doutorado, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. doi:10.11606/T.76.2018.tde-02022018-153758. Recuperado em 2025-03-28, de [www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)