



# Interferômetro de Michelson

Gabriel Tamashiro

Willian Matioli Serenone

# Introdução

- Introdução
- Histórico
- Parte I: Calibração do Interferômetro
- Parte II: Medida do comprimento de onda da linha verde do Hg
- Parte III: Medida do comprimento de onda do dubleto amarelo do Sódio
- Parte IV: Medida do índice de refração de um gás
- Parte V: Demonstração de espectroscopia por transformada de Fourier
- Conclusões

# Histórico



1803



Young publica o livro “*Experiments and Calculations Relative to Physical Optics*” onde descreve seu experimento de dupla fenda.

# Histórico



1803

~1861-62



James Clerk Maxwell publica seus quatro trabalhos sobre o eletromagnetismo (de onde vem as equações de Maxwell)

# Histórico



1803

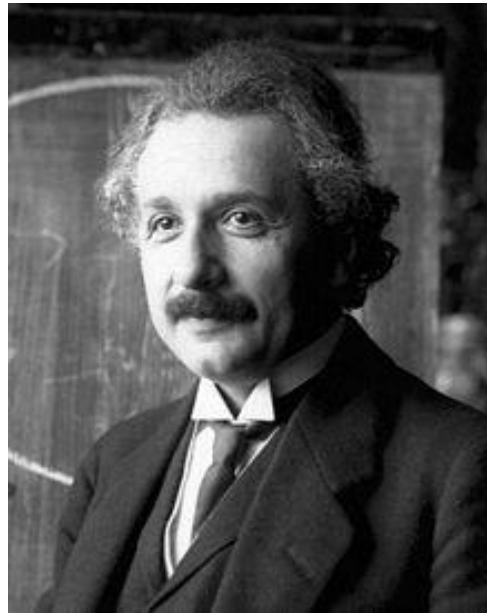
~1861-62

1887



Albert Abraham Michelson juntamente com Edward Morley refazem com maior precisão o experimento projetado por Michelson para detectar o éther. (experimento de Michelson-Morley)

# Histórico



1803

~1861-62

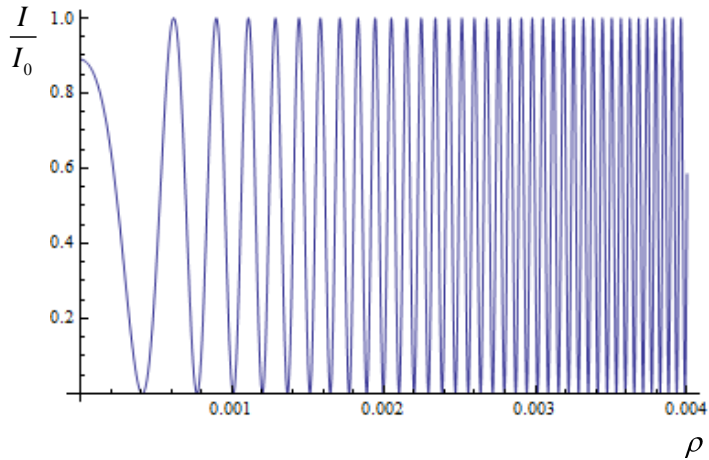
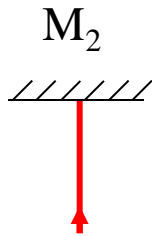
1887

1905

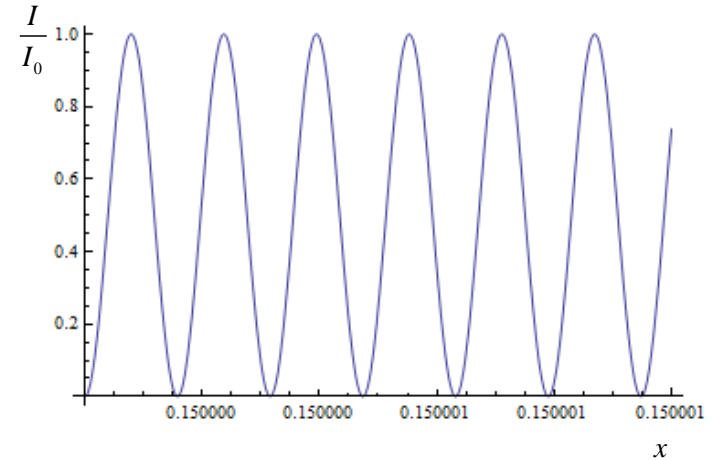
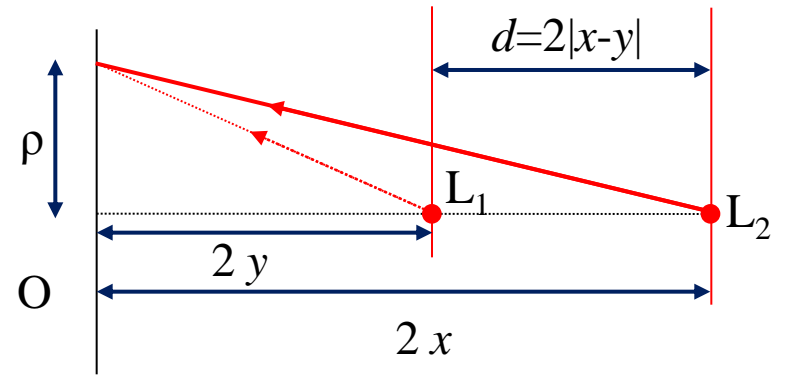


Albert Einstein publica seu trabalho sobre a relatividade restrita.

# Teoria



$$\frac{I}{O}$$



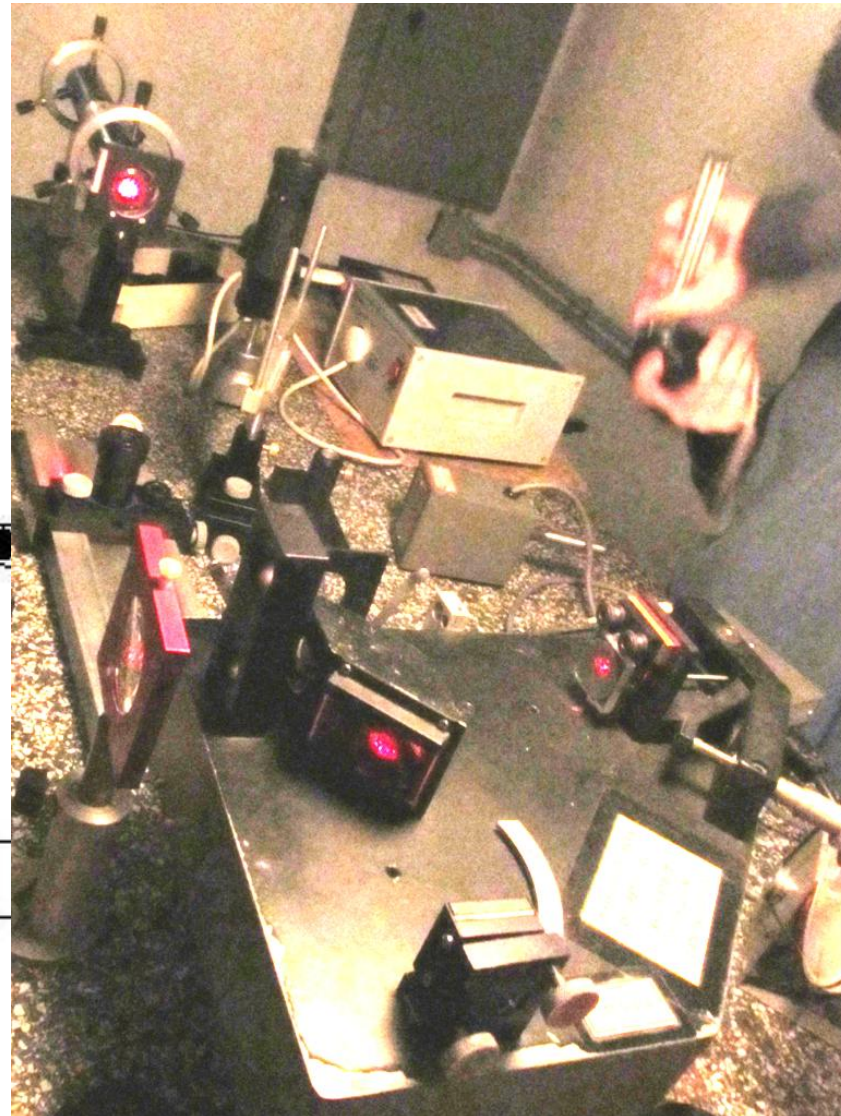
$$I = 2I_0 \sin^2 \left[ \frac{k}{2} \left( \sqrt{\rho^2 + 4x^2} - \sqrt{\rho^2 + 4y^2} \right) \right]$$

$$I \cong 2I_0 \sin^2 \left( \frac{k}{2} d \right) \Rightarrow d = n\lambda + \frac{\lambda}{2}$$

# Descrição do Experimento

Espelho "fixo"

Micrômetro acoplado  
que move o e



visor de feixes com compensador

metro

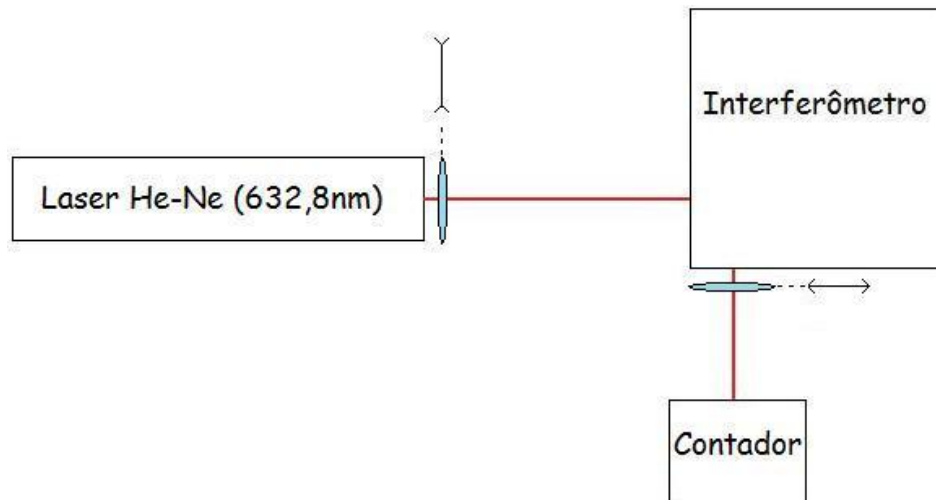


vel não ajustável

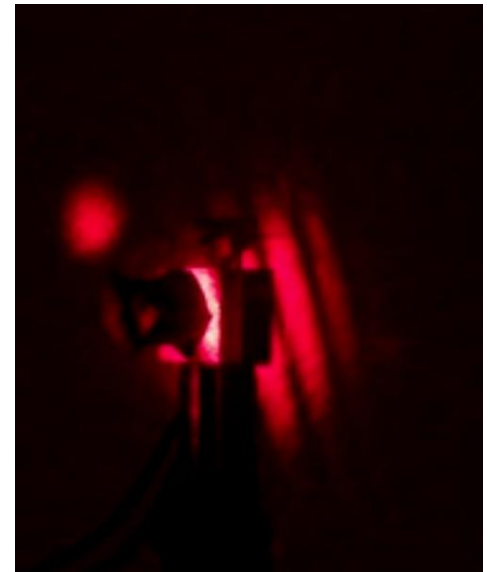


# Descrição do Experimento

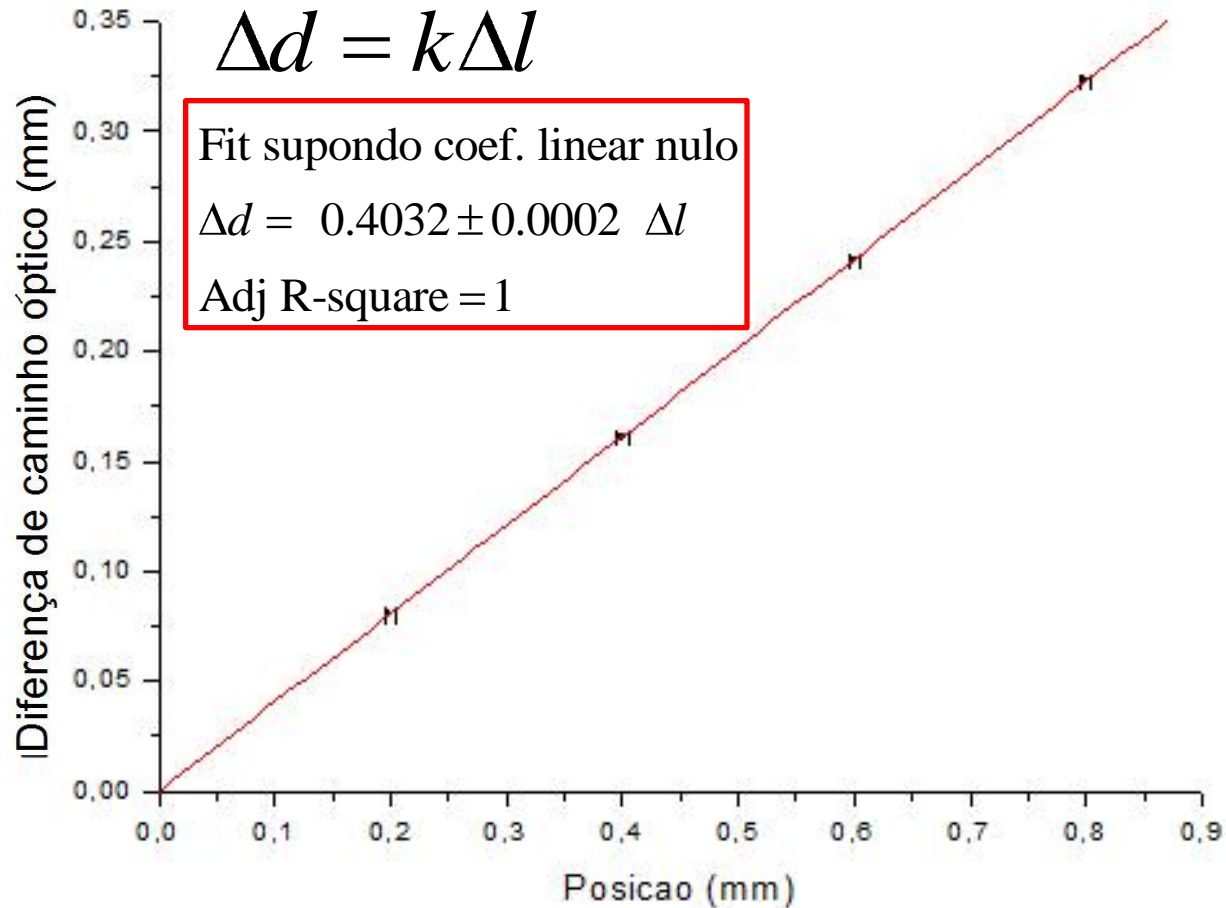
## Parte I: Calibração do micrômetro



$$\Delta d = 2 \cdot \Delta r_{\text{espelho}} = k \cdot \Delta l$$



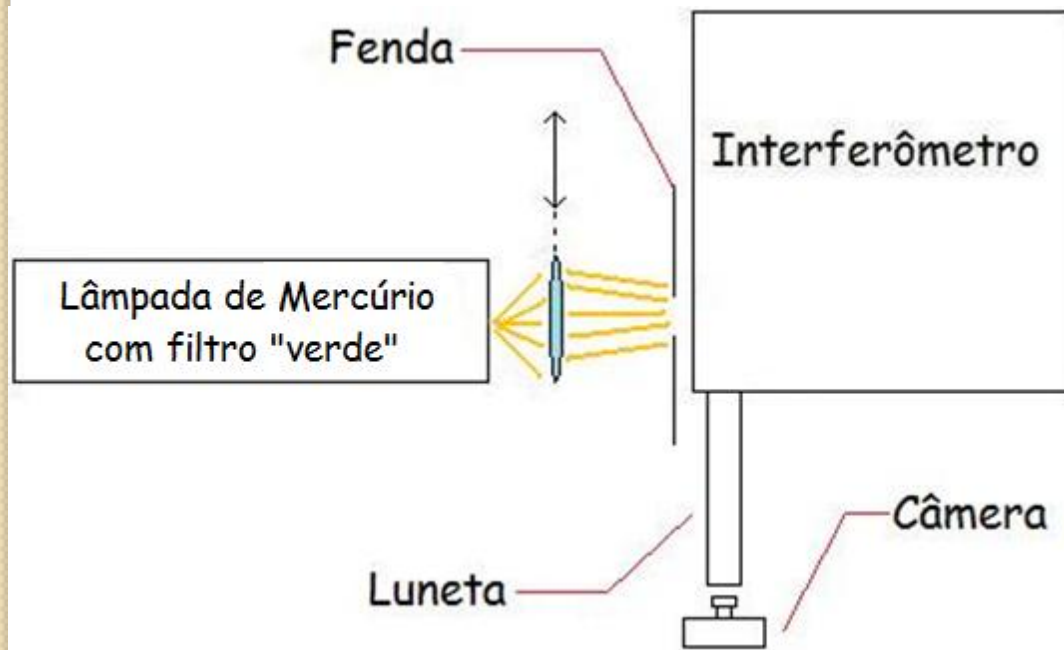
# Resultados – Calibração do Micrometro



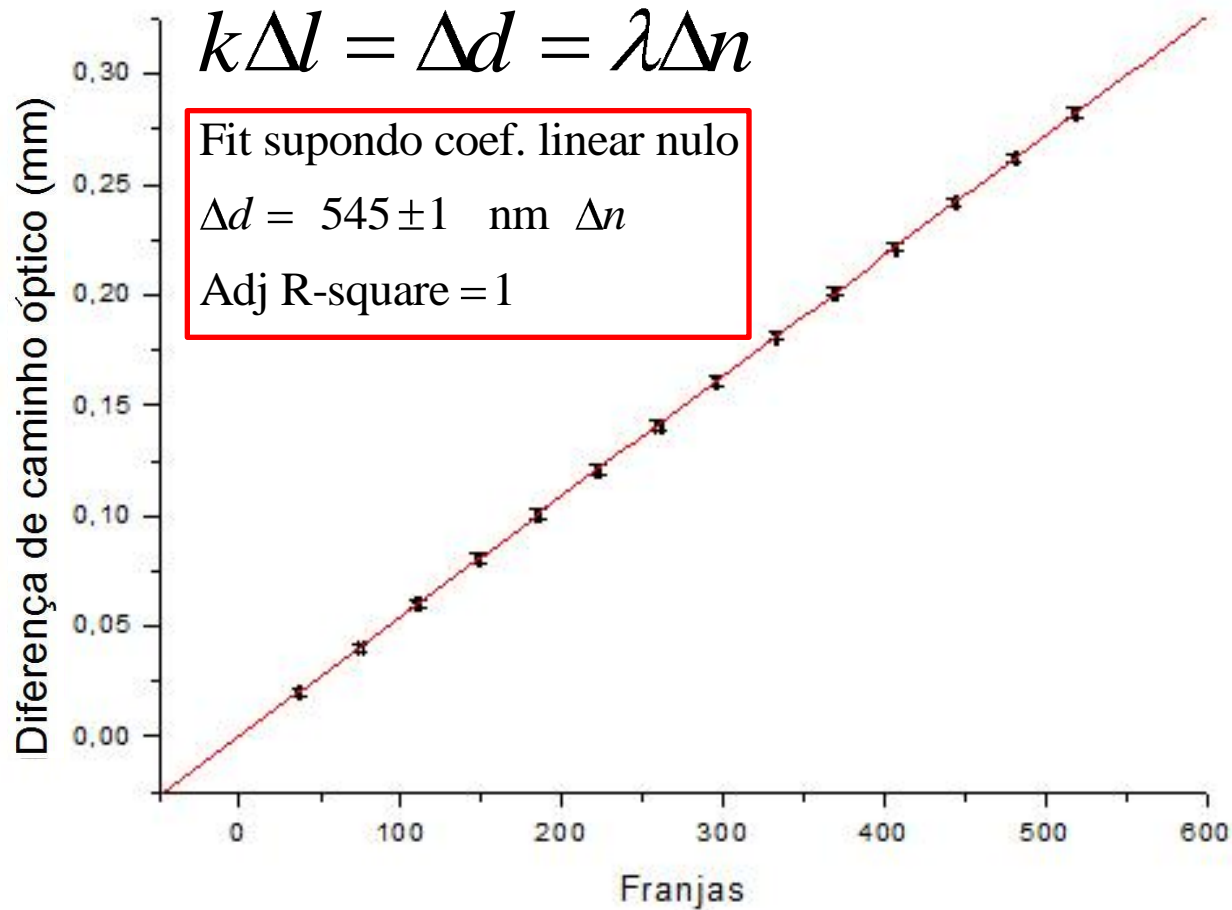
$$\lambda_{usado} = 632,8 \text{ nm}$$

# Descrição do Experimento

Parte II: Determinação do comprimento de onda de uma raia do mercúrio.



# Resultados – $\lambda_{\text{verde}}$ Hg



NIST:

$$\lambda_{\text{verde}} = 546.0750 \text{ nm} \cong 546 \text{ nm}$$

# Teoria

- E se a fonte emitir em dois comprimentos de onda?

$$k_1 = \frac{2\pi}{\bar{\lambda} - \Delta\lambda}; \quad k_2 = \frac{2\pi}{\bar{\lambda} + \Delta\lambda}$$

$$I = I_0 \left[ \sin^2 \left( k_1 \frac{d}{2} \right) + \sin^2 \left( k_2 \frac{d}{2} \right) \right] = I_0 \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \cos k_1 d + \cos k_2 d \right] \right\}$$

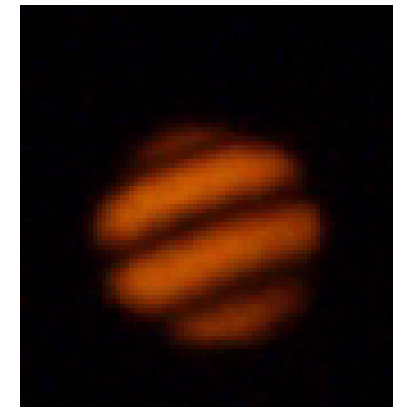
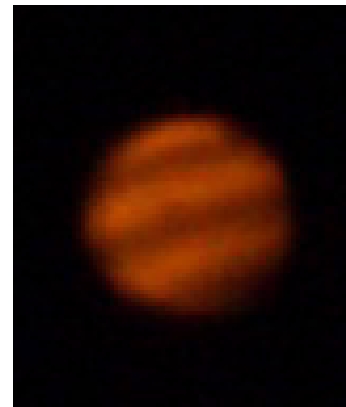
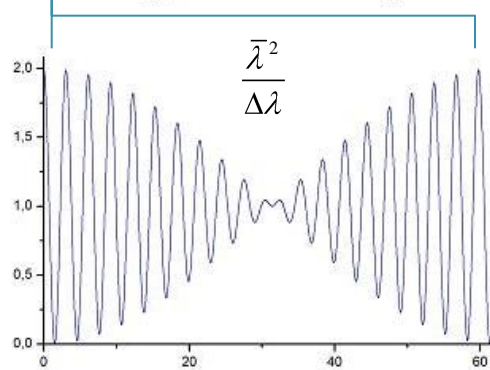
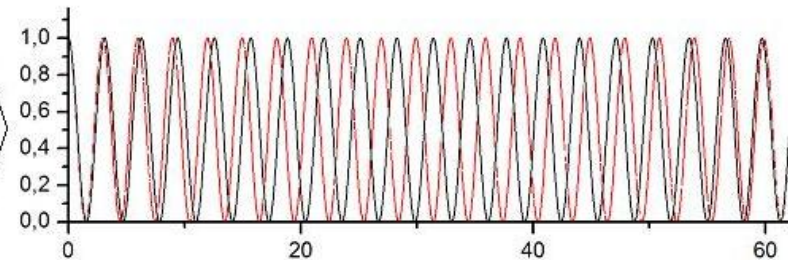
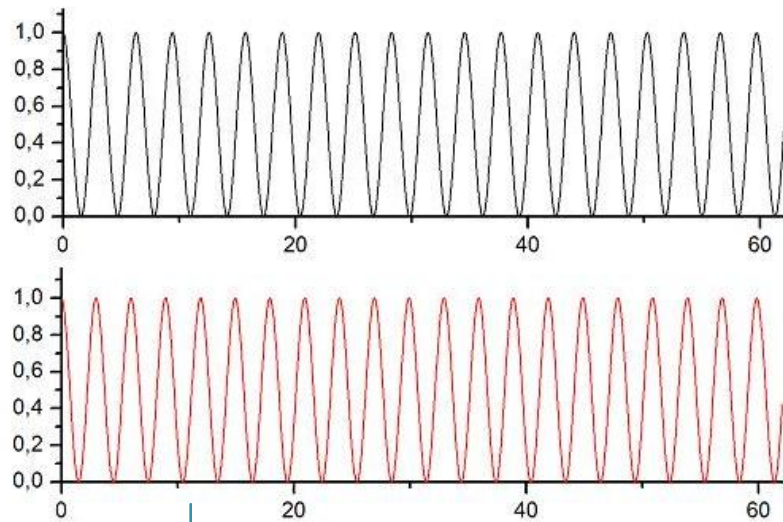
$$I = I_0 \left\{ 1 - \cos \left[ k_1 - k_2 \frac{d}{2} \right] \cos \left[ k_1 + k_2 \frac{d}{2} \right] \right\}$$

$$I = I_0 \left\{ 1 - \cos \left[ \frac{2\pi\Delta\lambda}{\bar{\lambda}^2 - \Delta\lambda^2} d \right] \cos \left[ \frac{2\pi\bar{\lambda}}{\bar{\lambda}^2 - \Delta\lambda^2} d \right] \right\}$$

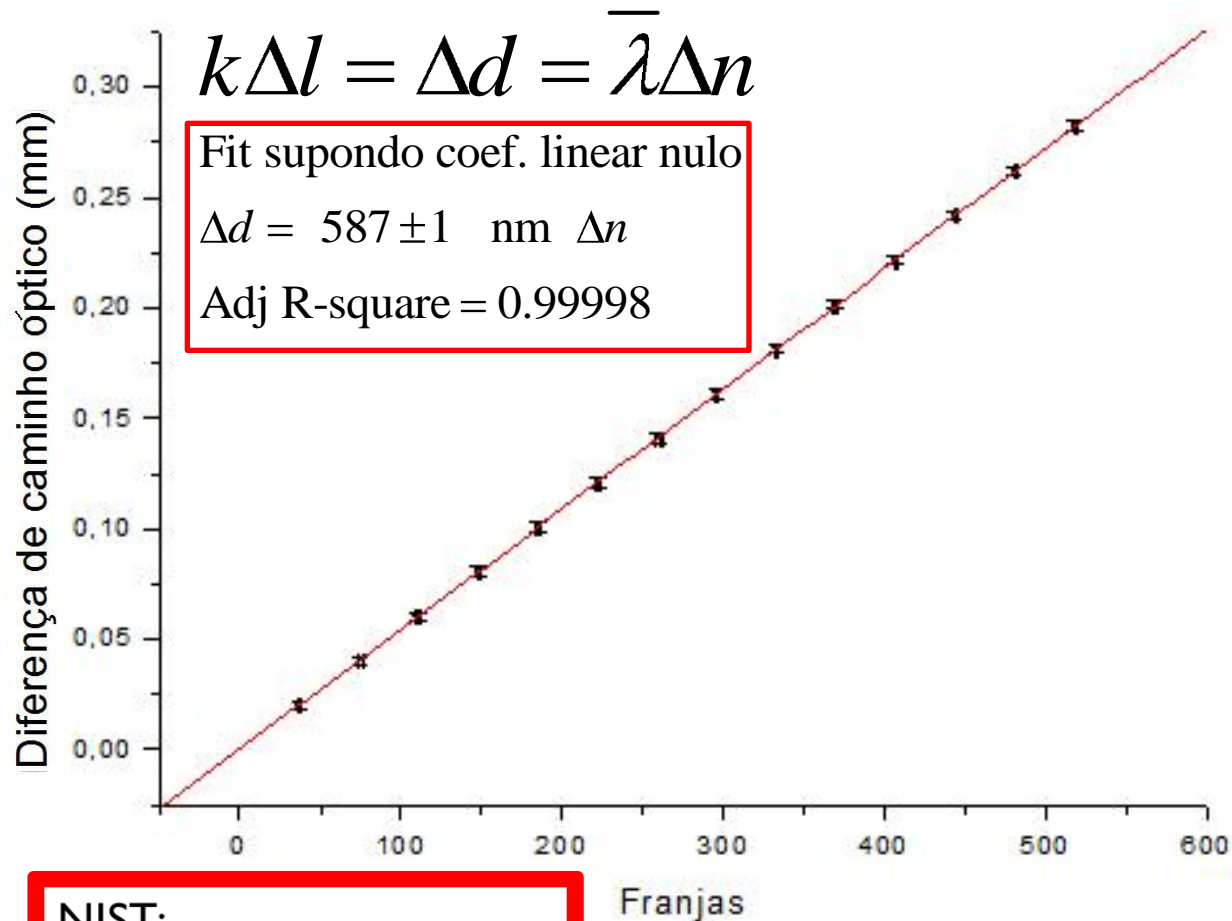
$$\Delta d_1 = \frac{\bar{\lambda}^2 - \Delta\lambda^2}{\Delta\lambda} \cong \frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta\lambda}; \quad \Delta d_2 = \frac{\bar{\lambda}^2 - \Delta\lambda^2}{\bar{\lambda}} \cong \bar{\lambda}$$

# Descrição do Experimento

Parte III Determinação da separação dos comprimentos de onda do duplete de sódio.



# Resultados – $\lambda_{\text{medio}}$ Na



NIST:

$$\lambda_{\text{Na1}} = 588.9950954 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{Na2}} = 589.5924237 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{medio}} = 589.3 \text{ nm}$$

# Resultados – $\Delta\lambda$

$$\Delta\lambda = \frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta d} \quad E_{\Delta\lambda} = \frac{2\bar{\lambda}}{\Delta d} E_{\bar{\lambda}} + \left( \frac{\bar{\lambda}}{\Delta d} \right)^2 E_{\Delta d}$$

L (baixo contraste) (mm)	$\Delta l$ (mm)	$\Delta d$ (mm)	$\Delta\lambda$ (nm)
$6,320 \pm 0,005$	$1,44 \pm 0,01$	$0,581 \pm 0,004$	$0,593 \pm 0,006$
$7,760 \pm 0,005$			
$9,200 \pm 0,005$	$1,44 \pm 0,01$		

NIST:

$\lambda_{\text{Na1}} = 588.9950954 \text{ nm}$

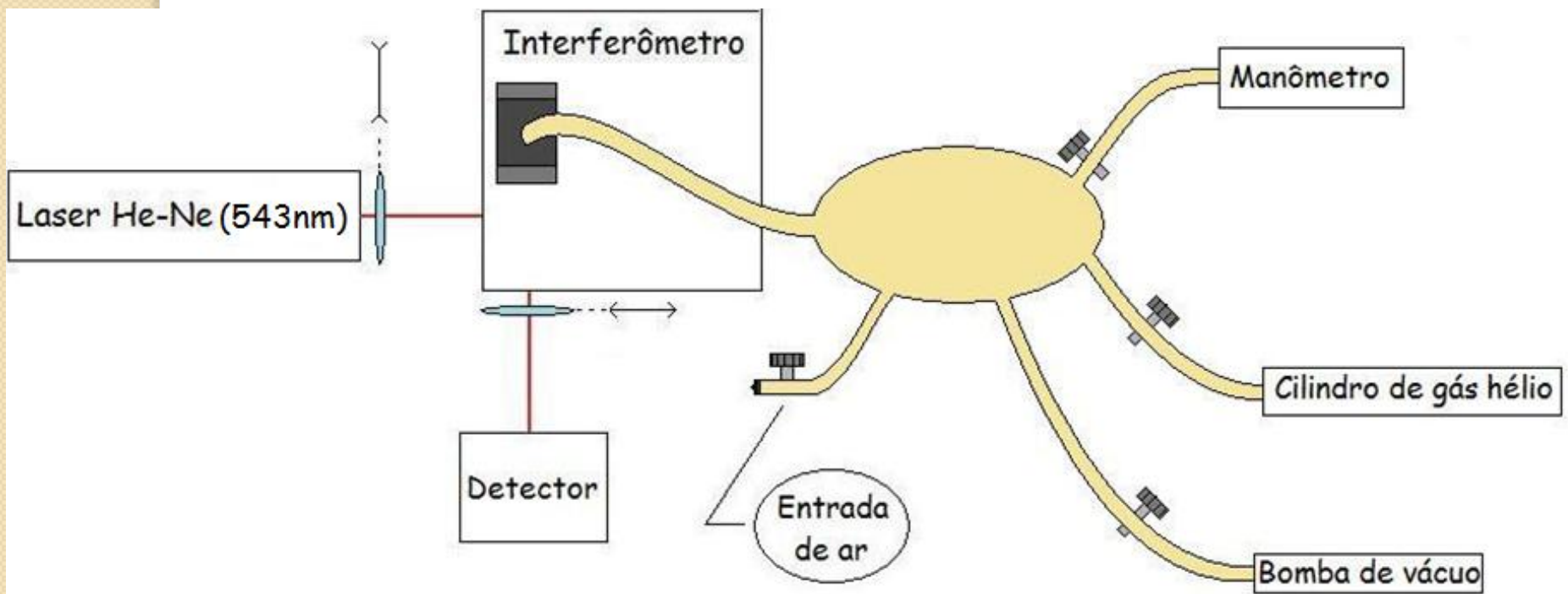
$\lambda_{\text{Na2}} = 589.5924237 \text{ nm}$

$\Delta\lambda = 0.597 \text{ nm}$



# Descrição do Experimento

Parte IV: Medida do índice de refração do He e do ar atmosférico para  $\lambda = 543 \text{ nm}$ .



# Teoria

- Lei de Gladstone

$$\frac{n-1}{\rho} = A$$

- Se em um trecho de tamanho  $L$  variarmos o índice de refração, teremos:

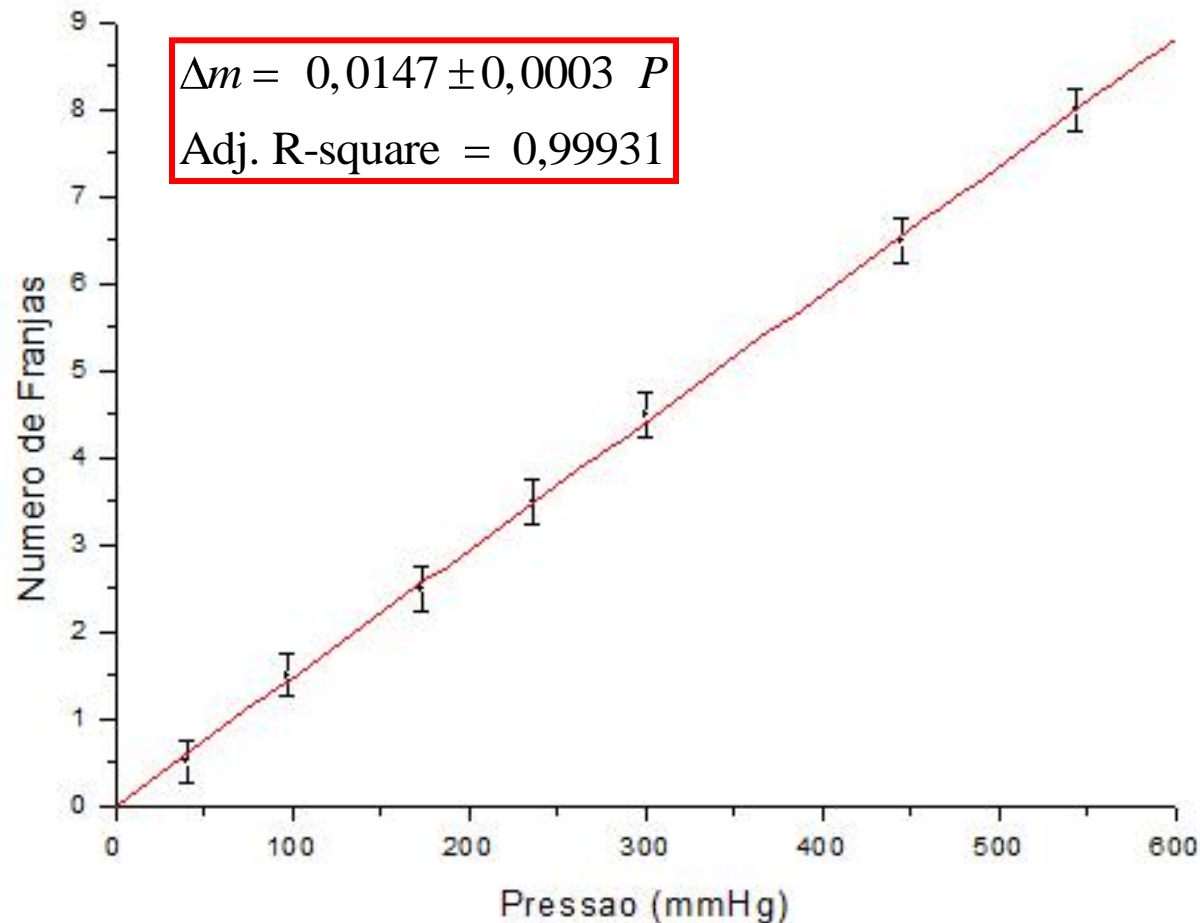
$$\Delta d = 2L\Delta n = \Delta m\lambda \Rightarrow n_{\text{He}} = 1 + \frac{\lambda}{2L} \Delta m$$

- E com a lei de Gladstone, obtemos:

$$\frac{\lambda}{2L} \Delta m = \frac{AM_{\text{mol}}}{KT} P \Rightarrow \Delta m = \frac{2ALM_{\text{mol}}}{\lambda KT} P$$

# Resultados – Índice de Refração He

$$\Delta m = \frac{2.A.L.M_{mol..He}}{\lambda.R.T} . P$$



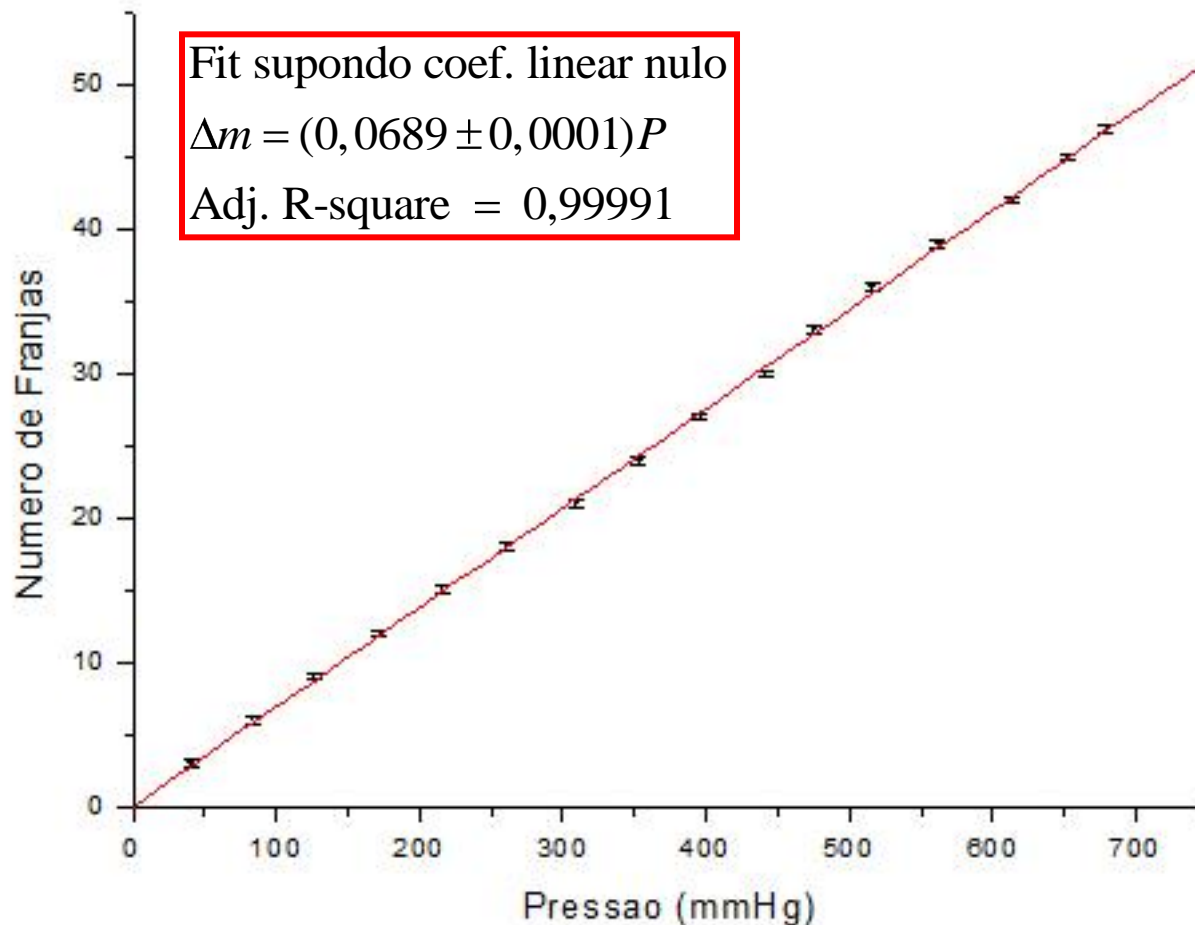
# Resultados – Índice de Refração do He

$$n_{\text{He}} = 1 + \frac{\lambda}{2.L} \Delta m$$
$$\left\{ \begin{array}{l} L = 5,00 \pm 0,05 \text{ cm} \\ \lambda = 543 \text{ nm} \\ \Delta m = 6,5 \text{ franjas} \end{array} \right.$$

$$n_{\text{He}} = 1 + 3,53 \pm 0,04 \times 10^{-5}$$

# Resultados – Índice de Refração Ar

$$\Delta m = \frac{2.A.L.M_{mol.ef}}{\lambda.R.T} . P$$



# Resultados – Índice de Refração do Ar

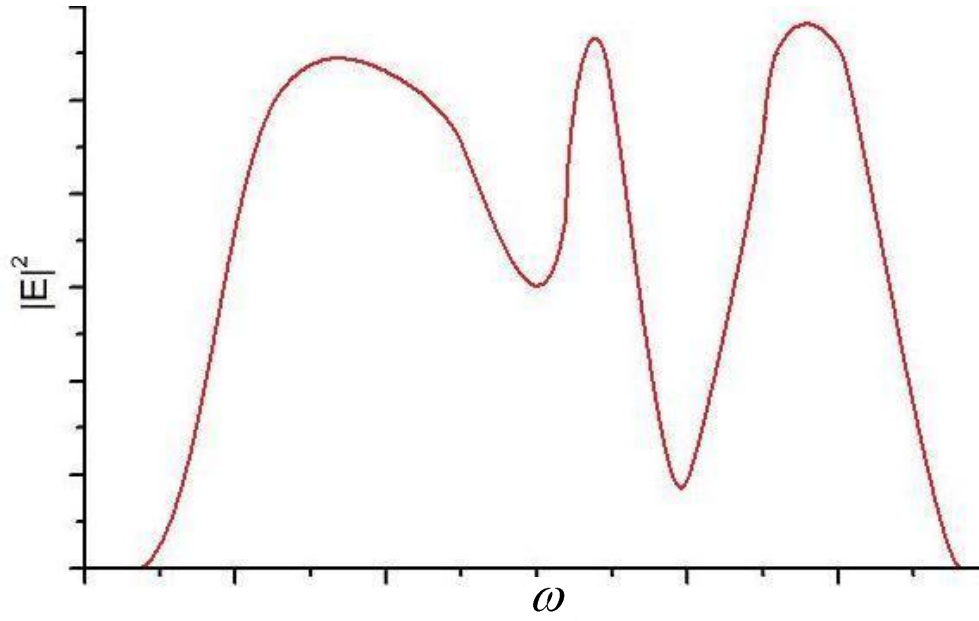
$$n_{ar} = 1 + \frac{\lambda}{2.L} \Delta m \quad \left\{ \begin{array}{l} L = 5 \pm 0,05 \text{ cm} \\ \lambda = 543 \text{ nm} \\ \Delta m = 47 \text{ franjas} \end{array} \right.$$

$$n_{ar} = 1 + 2,55 \pm 0,03 \times 10^{-4}$$

$$n_{ar-NIST} = 1 + 2,44 \cdot 10^{-4}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Humidade} = 60\% \\ T = 25^\circ\text{C} \\ P = 0,91 \text{ atm} \\ \lambda = 543 \text{ nm} \end{array} \right.$$

# Aplicações – Espectroscopia por transformada de Fourier (EFT)



$\Delta$  = Diferença de Caminho óptico

$$\omega = \frac{1}{\lambda}$$

$$I(\Delta) \sim \int_0^{\infty} |E(\omega)|^2 \sin^2 \pi\omega\Delta \, d\omega \sim \int_0^{\infty} |E(\omega)|^2 \cos 2\pi\omega\Delta \, d\omega = S(\Delta)$$

$$|E(\omega)|^2 = C \int_{-\infty}^{+\infty} S(\Delta) \cos 2\pi\omega\Delta \, d\Delta$$

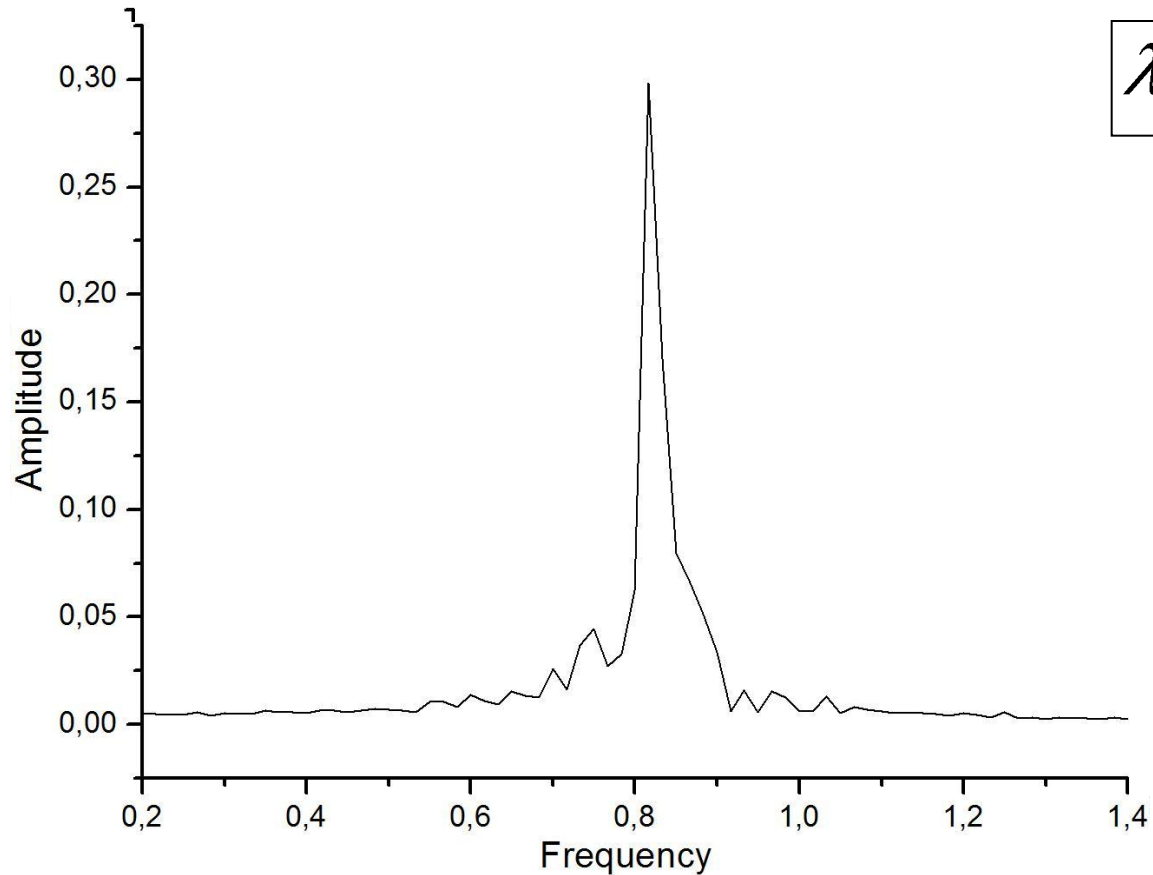
# Aplicações — Espectroscopia por transformada de Fourier (EFT)

$$\Delta = v.t$$





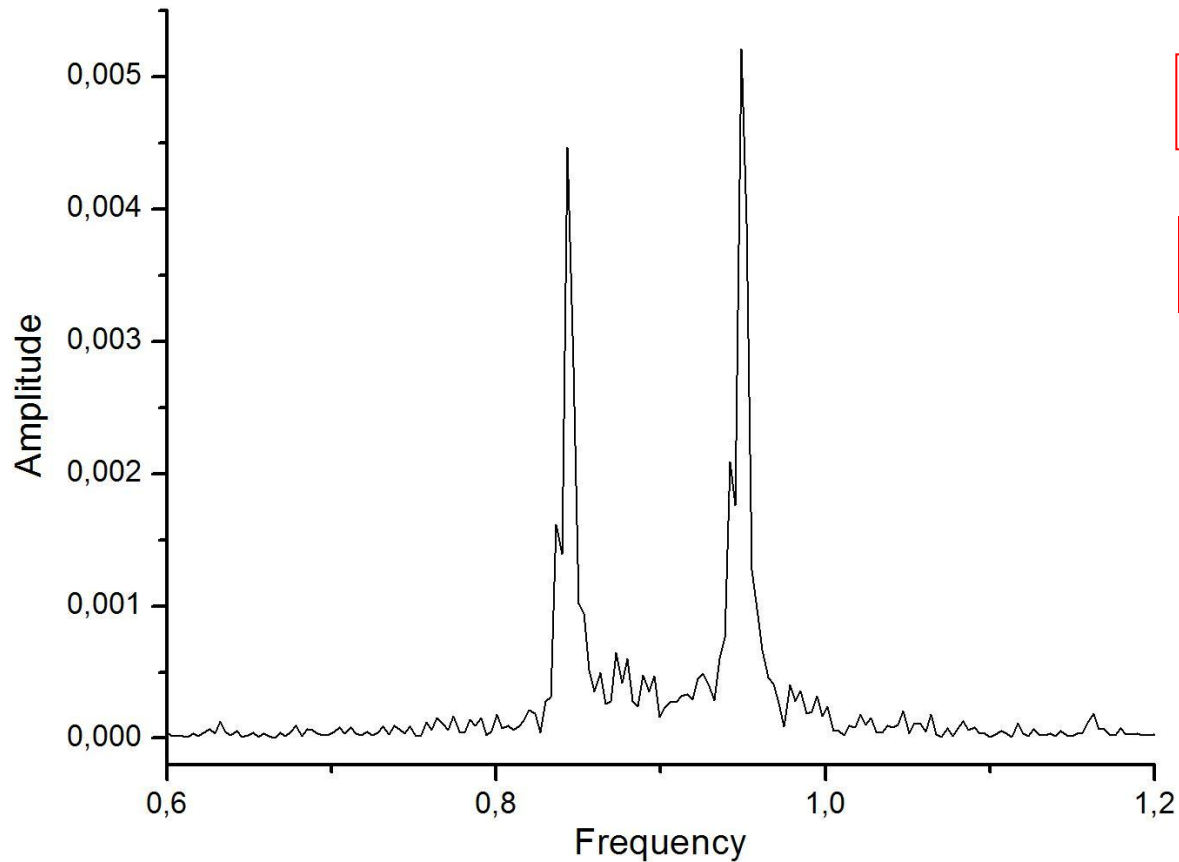
# EFT - Calibração



$$\lambda_{\text{HeNe}} = 632,8 \text{ nm}$$

$$\nu = (522 \pm 16) \frac{\text{nm}}{\text{s}}$$

# EFT – lasers laranja e verde



$$\lambda_{L\_usado} \cong 612 \text{ nm}$$

$$\lambda_{V\_usado} \cong 543 \text{ nm}$$

$$\lambda_L = (618 \pm 22) \text{ nm}$$

$$\lambda_V = (550 \pm 20) \text{ nm}$$

# Int. Michelson como gravador



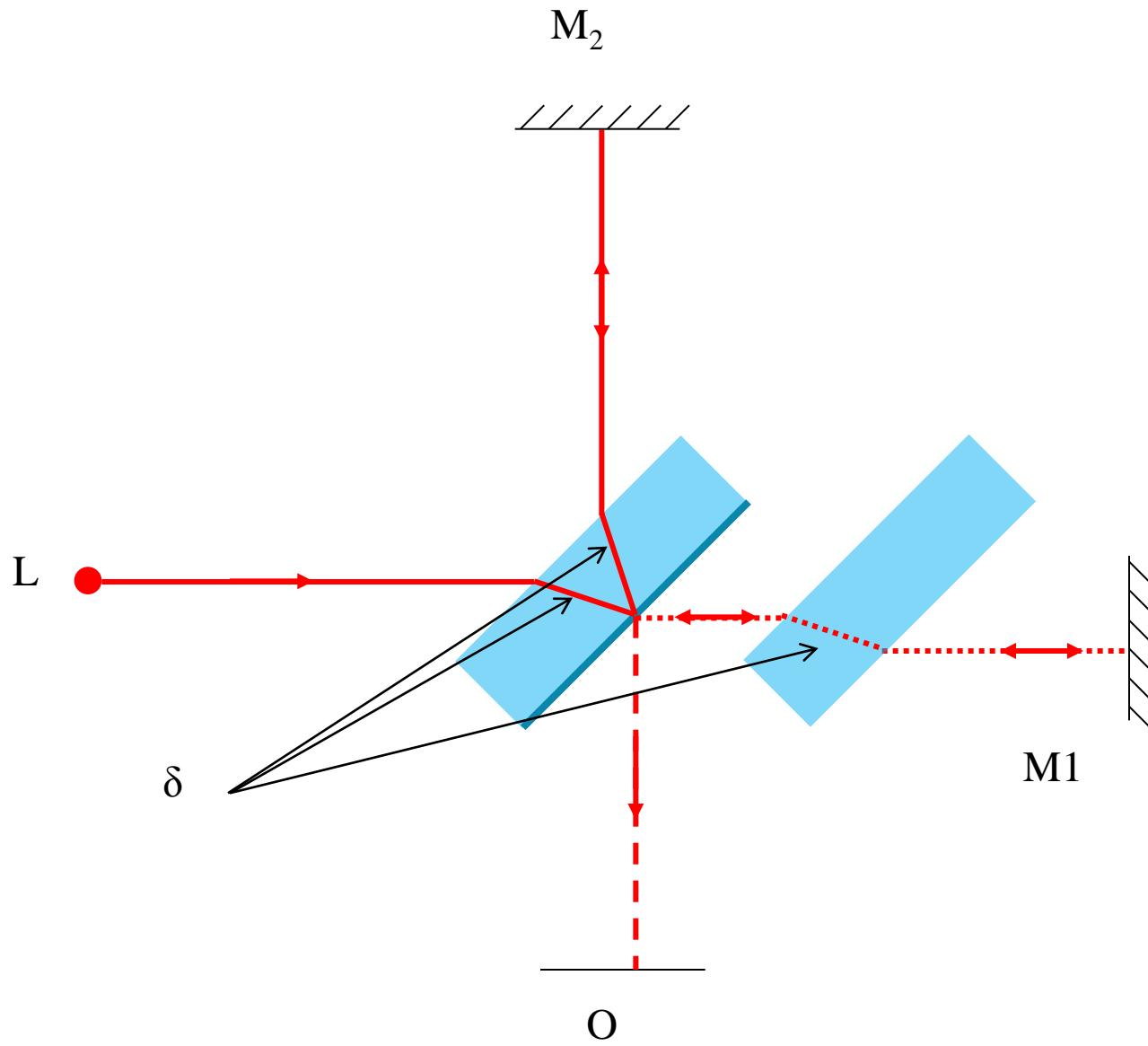
# Conclusão

- Verificou-se a eficácia do aparato na medida de comprimentos de onda;
- Aparato simples e que traz bons resultados;
- Perde precisão se a contagem das franjas for feita manualmente;
- Possibilidade de se medir índices de refração;
- Verificou-se a lei de Gladstone.
- Possibilidade de se fazer espectroscopia com o aparato

# Bibliografia

- NIST Atomic Spectra Database
  - <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>
- Nota Experimental sobre O interferômetro de Michelson
  - Antonio C. Costa, Mario B. Moraes
  - <http://www.ifi.unicamp.br/~accosta/roteiros/6/nota%2006.html>
- Livro do Zílio

Obrigado!



$$\vec{p} = \alpha \vec{E}_{loc} = \alpha \vec{E}_{ext} = \alpha \vec{E}$$

$$\vec{P} = \frac{N}{V} \vec{p} = \frac{N}{V} \alpha \vec{E} = \frac{n N_A}{V} \alpha \vec{E} = \rho \frac{N_A}{M} \alpha \vec{E}$$

$$\vec{D} = \vec{P} + \epsilon_0 \vec{E} = \left( \rho \frac{N_A}{M} \alpha + \epsilon_0 \right) \vec{E} = k \epsilon_0 \vec{E}$$

$$n \cong \sqrt{k} = \sqrt{\rho \frac{N_A \alpha}{\epsilon_0 M} + 1} \cong 1 + \rho \frac{N_A \alpha}{2 \epsilon_0 M}$$

$$\frac{n-1}{\rho} = \frac{N_A \alpha}{2 \epsilon_0 M}$$





# Int. Michelson como gravador



440 Hz: Gravado



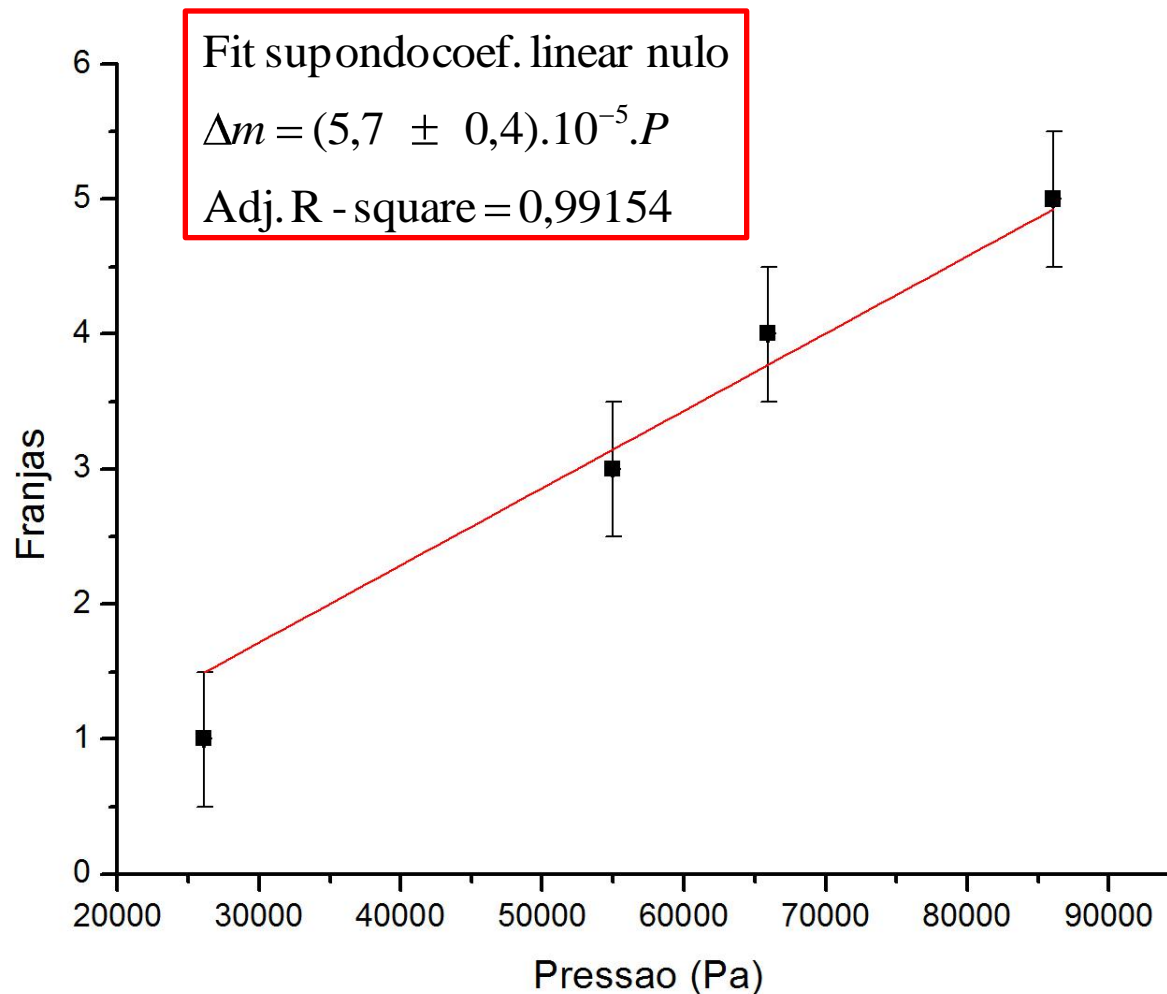
440 Hz: Simulado



Musica Clássica

# Resultados – Índice de Refração He

$$\Delta m = \frac{2.A.L.M_{mol..He}}{\lambda.R.T} . P$$



# Resultados – Índice de Refração do He

$$n_{ar} = 1 + \frac{\lambda}{2.L} \Delta m \quad \left\{ \begin{array}{l} L = 6 \pm 0,05 \text{ cm} \\ \lambda = 632,8 \text{ nm} \\ \Delta m = 40 \pm 1 \text{ franjas} \end{array} \right.$$

$$n_{ar} = 1 + 2,5 \pm 0,1 \cdot 10^{-4}$$

$$n_{ar-NIST} = 1 + 2,42 \cdot 10^{-4}$$

Humidade = 60%

T = 25°C

P = 0,91 atm

$\lambda = 632,8 \text{ nm}$