

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
LABORATÓRIO DE FÍSICA MODERNA

## Velocidade da Luz

Adão Murillo dos Santos	RA:100126
João Marcos Fávaro Lopes	RA:98327
Lucas Maquedano da Silva	RA:98901
Pedro Haerter Pinto	RA:100852
TURMA:32	Professor:Nelson Guilherme Castelli Astrath

Maringá,2018

# Sumário

<b>Sumário</b>	<b>1</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>2</b>
<b>2 Desenvolvimento Teórico</b>	<b>3</b>
2.1 Velocidade da Luz . . . . .	3
2.2 Desvios . . . . .	4
2.2.1 Desvio de Medidas Diretas . . . . .	4
2.2.2 Desvio de Medidas Indiretas . . . . .	4
<b>3 Desenvolvimento Experimental</b>	<b>5</b>
3.1 Materiais e Métodos . . . . .	5
3.2 Dados Obtidos Experimentalmente . . . . .	5
3.3 Interpretação dos Resultados . . . . .	6
<b>4 Conclusão</b>	<b>8</b>
<b>Referências</b>	<b>8</b>

# 1 Introdução

Desde os primórdios da ciência o homem se preocupa em estudar a luz. Os filósofos atomistas da Grécia Antiga já tratavam a luz como composto por pequenas partículas chamadas de "corpúsculos", que descreveriam uma trajetória em linha reta com velocidade limitada. Tal ideia foi adotada pelo físico inglês Isaac Newton que fez seus estudos de ótica baseando-se nessa teoria. Foi Christiann Huygens quem desenvolveu a teoria ondulatória da luz, ao comprovar que esta se comporta como uma onda se propagando no éter. No final do século XIX, a luz era concebida como uma onda eletromagnética, mas tal concepção passa a ser questionada quando, ao incidir com algum material, a luz se comportava como partícula, não como onda. Baseado nas ideias de Max Planck, o físico Albert Einstein demonstrou através da comprovação do efeito fotoelétrico que a luz, ao incidir sobre um material, age como pequenos pacotes de energia, os chamados fótons. Quando Arthur Compton comprovou que um fóton ao colidir com um elétron se comporta como uma partícula material, definiu-se a dualidade onda-partícula da luz - comporta-se como onda no vácuo, mas como partícula ao incidir numa superfície.

Tais estudos e avanços levaram à pergunta "qual a velocidade da luz?". Galileu Galilei tentou estimar esse valor com o seguinte experimento: um observador A e um observador B estão posicionados a alguns quilômetros de distância, tanto A quanto B carregam consigo lanternas. Galileu supôs que quando o observador A apagassem sua luz, o observador B veria este evento e também apagaria a sua luz, o observador A mediria então esse intervalo de tempo e seria capaz de determinar a velocidade da luz. Galileu chegou ao resultado de que a luz tem "velocidade infinita".

Num experimento mais complexo, o físico Fizeau mediu a velocidade da luz ao incidir um feixe luminoso sobre uma engrenagem giratória espelhada que refletiria a luz para um espelho fixo, desse espelho a luz voltaria para a engrenagem. Através da variação de posição entre a luz infringida e a refletida pela engrenagem, Fizeau foi capaz de estimar um valor aproximado para a velocidade da luz.

Numa tentativa de aperfeiçoar o experimento de Fizeau, Foucault o realizou substituindo a engrenagem por um espelho rotatório. Esse relatório apresentará uma reprodução do experimento realizado por Foucault e, posteriormente, Michelson e Morley ao estudar a difração da luz.

## 2 Desenvolvimento Teórico

### 2.1 Velocidade da Luz

O feixe de luz que sai do laser é refletido em um ângulo  $\theta$  com a reta normal do espelho rotatório ( $MR$ ), como mostrado na *Figura 1*, em direção ao ponto  $S$  do espelho fixo ( $MF$ ). Ao passo que o espelho  $MR$  rotaciona, sua reta normal irá variar em ângulo  $\Delta\theta$ , resultando em um novo ângulo de incidência  $\theta_1$ . O feixe incidirá então no ponto  $S_1$  do espelho  $MF$ . Sendo  $D$  a distância entre os espelhos, a diferença de caminho entre os feixes é

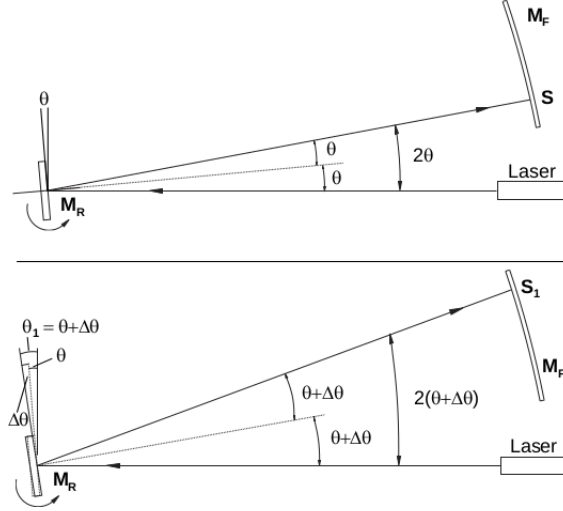


Figura 1: Diagrama do caminho óptico percorrido pelo feixe e detalhe da diferença angular decorrente da rotação do espelho  $MR$

dada por:

$$S_1 - S = D(2\theta_1 - 2\theta) = D[2(\theta + \Delta\theta) - 2\theta] = 2D\Delta\theta \quad (1)$$

Uma análise semelhante pode ser empregada na seguinte montagem:

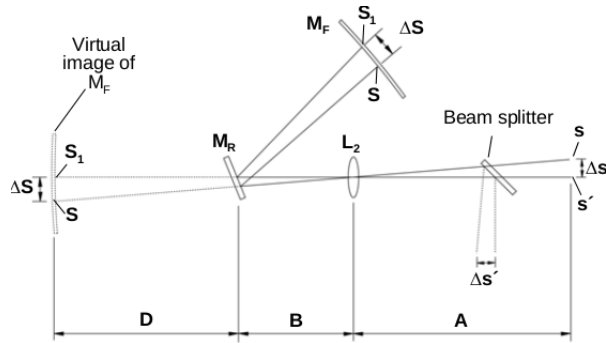


Figura 2: Diagrama do caminho óptico semelhante ao arranjo experimental [1]

Onde o deslocamento do ponto imagem ( $\Delta S'$ ) decorrente da rotação do espelho  $MR$  é igual ao deslocamento  $\Delta S$  da imagem virtual no espelho  $MF$ , a qual é determinada pela relação:

$$\Delta S' = \Delta S = (-i/o)\Delta S \quad (2)$$

Em que  $i$  é a distância da imagem até a lente e  $o$  a distância do objeto até a mesma ( $L_2$ ). Pela *Figura 2* obtém-se que:

$$(-i/o)\Delta S = \frac{A}{D+B}\Delta S \quad (3)$$

Substituindo o valor de  $\Delta S$  obtido na eq. 1:

$$\Delta S' = \frac{2DA\Delta\theta}{D+B} \quad (4)$$

Sabendo-se que o ângulo  $\Delta\theta$  depende da velocidade de rotação ( $\omega$ ) do espelho  $MR$ , do trajeto do feixe entre os espelhos ( $2D$ ) e da velocidade  $c$  da luz, resulta:

$$\Delta\theta = \frac{2D\omega}{c} \quad (5)$$

Com a igualdade da eq. 4

$$\Delta S' = \frac{4D^2 A\omega}{c(D+B)} \quad (6)$$

Isolando-se  $c$ :

$$c = \frac{4D^2 A\omega}{(D+B)\Delta S'} \quad (7)$$

substituindo  $\omega$  por  $2\pi f$

$$c = \frac{8D^2 A\pi f}{(D+B)\Delta S'} \quad (8)$$

Variando então os parâmetros  $\omega$  e, conseqüentemente,  $\Delta S'$  e conhecendo os demais valores das constantes, é possível calcular a velocidade  $c$  da luz.

## 2.2 Desvios

### 2.2.1 Desvio de Medidas Diretas

Para este experimento, tem-se como medidas diretas, as distancias entre os espelhos e lentes, e a variação da posição do feixe de luz no microscópio. Para as medidas de distancia foi utilizada uma trena com o erro associado de  $0,005m$  e para o  $\Delta s$  tem-se o erro de  $2,5mm$ , pois a menor variação que é possível medir é de  $5mm$ .

### 2.2.2 Desvio de Medidas Indiretas

Para o calculo de Velocidade da luz é utilizada a equação 8 e para o cálculo dos erros, é aplicado o logaritmo neperiano em ambos os lados da equação, tornando-se:

$$\ln(c) = \ln\left(\frac{8D^2 A\pi f}{(D+B)\Delta S'}\right) \quad (9)$$

e utilizando a propriedade de divisão de logaritmos, é obtido

$$\ln(c) = \ln(8D^2 A\pi f) - \ln((D+B)\Delta S') \quad (10)$$

$$\ln(c) = \ln(8A) + 2\ln(D) - [\ln(D+B) + \ln(\Delta S)] \quad (11)$$

diferenciando a equação

$$\frac{dc}{c} = \frac{dA}{8A} + \frac{2dD}{d} + \frac{dA}{A+B} + \frac{dB}{A+B} + \frac{d\Delta S}{\Delta S} \quad (12)$$

e fazendo  $d \rightarrow \delta$  para poder ser aplicado os erros medidos experimentalmente. Onde  $\delta$  representa o erro associado.

$$\frac{\delta c}{c} = \frac{\delta A}{8A} + \frac{2\delta D}{d} + \frac{\delta A}{A+B} + \frac{\delta B}{A+B} + \frac{\delta \Delta S}{\Delta S} \quad (13)$$

### 3 Desenvolvimento Experimental

#### 3.1 Materiais e Métodos

Foram utilizados para a realização do experimento:

- Mini-laser;
- Mesa de alinhamento;
- Uma lente de 48 mm;
- Uma lente de 252 mm;
- Um separador de feixes;
- Um espelho de alta rotação PASCO OS-9263B;
- Um espelho fixo esférico com raio de 13,5 m;

Sendo o experimento montado da seguinte forma:

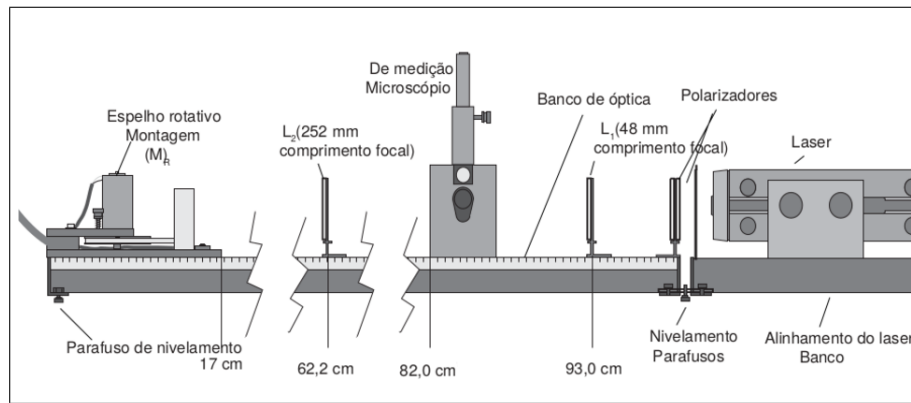


Figura 3: Montagem experimental utilizada

Primeiro o laser e o espelho rotatório são alinhados sobre a mesa com o auxílio dos gabaritos, é posto então a primeira lente (48 mm), em seguida o separador de feixes e então a segunda lente (252 mm), é fundamental que ao colocar cada objeto óptico seja revisado seu alinhamento com o plano do laser. Utilizando regras trigonométricas, é posto então o espelho fixo esférico a cerca de 9 metros do espelho giratório, formando entre eles um ângulo de aproximadamente  $12^\circ$  e, em seguida, alinhado seus centros observando se o raio de luz está retornando ao separador de feixes. Nessa última etapa, é substituído a ocular do separador por um papel de pequena gramatura e, bloqueando o feixe de luz refletido pelo espelho rotatório, pode-se ver um ponto piscando no papel, o que significa que os espelhos estão alinhados. Por fim, é recolocado a ocular e alinhado o mostrador do micrômetro com o ponto de luz.

#### 3.2 Dados Obtidos Experimentalmente

Após a realização do experimento, foram obtidos os dados que estão na Tabela 1.

Tabela 1: Dados obtidos experimentalmente com seus respectivos erros

$\Delta s' \pm 2,5(mm)$	$f \pm 1(Hz)$
14	750
30	1500
-15	-750
-30	-1500

Utilizando os dados obtidos, foi gerado em programa o gráfico da Figura 2, contendo o deslocamento do ponto ( $\Delta s'$ ) com a respectiva frequência ( $f$ ) do espelho, e calculando o ajuste linear obteve-se a equação da reta  $\Delta s = 2.00 \times 10^{-7} f$ .

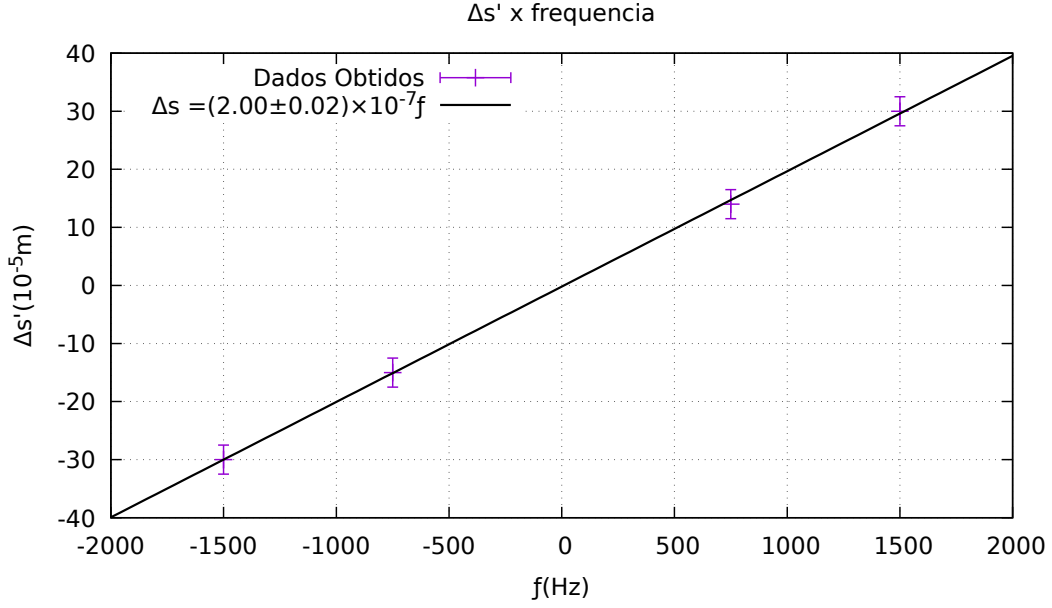


Figura 4: Relação entre deslocamento ( $\Delta s'$ ) do ponto e a frequência ( $f$ ) do espelho, com equação igual a  $\Delta s = (2.00 \pm 0.02) \times 10^{-7} f$

### 3.3 Interpretação dos Resultados

Sabendo-se que

$$c = \frac{4AD^2 2\pi f}{(D+B)\Delta s} \quad (14)$$

é possível fazer

$$\begin{aligned} \Delta s &= \frac{4AD^2 2\pi f}{(D+B)c} \\ \Delta s &= 2 \times 10^{-7} f \end{aligned} \quad (15)$$

portanto,

$$2 \times 10^{-7} = \frac{8AD^2 \pi}{(D+B)c} \quad (16)$$

$$c = \frac{8AD^2 \pi}{(D+B)2 \times 10^{-7}} \quad (17)$$

Substituindo os valores obtidos

$$\begin{aligned} A &= (0,261 \pm 0,0005)m \\ B &= (0,586 \pm 0,0005)m \\ D &= (9,485 \pm 0,0005)m \end{aligned} \quad (18)$$

na equação 17 obtem-se

$$c = \frac{8 * (0,261) * (9,485)^2 * \pi}{[9,485 + 0,586] * 2 \times 10^{-7}} \quad (19)$$

e portanto

$$c = (2,929 \pm 0,032) \times 10^8 m/s \quad (20)$$

onde o valor de 0,032 é obtido utilizando a equação 13.

Comparado ao valor de

$$c = 2,998 \times 10^8 m/s \quad (21)$$

obtido na literatura [1], resulta em um erro relativo ( $Er$ ) de:

$$Er = \left| \frac{2,929 \times 10^8 - 2,998 \times 10^8}{2,998 \times 10^8} \right| * 100\% = 2,3\% \quad (22)$$

Estes erros estão associados a montagem do experimento, sendo possível um desalinhamento dos espelhos e lentes, além do feixe não estar colidindo exatamente no centro do espelho fixo, o que acarreta uma variação do valor de  $c$  predito na literatura. Porém, mesmo com todos os fatores associados, o erro de 2,3% é aceitável dentro da precisão necessária para a realização do experimento.



## 4 Conclusão

Proposto em 1851, o experimento de Fizeau apresenta uma alta precisão para seu tempo, faltando apenas algumas refinações (como as propostas por Foucault e Michelson-Morley) para estimar a velocidade da luz. O experimento realizado em laboratório permitiu definir a velocidade da luz com uma alta precisão em relação ao valor aceito atualmente. Os valores obtidos não são exatos pois o experimento foi realizado num ambiente rodeado por ar, não em vácuo, e ainda vale atribuir as divergências de valores ao erro experimental das medidas e ao movimento das pessoas no laboratório.

## Referências

- [1] PASCO, *Speed of Light Apparatus, Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO Scientific Model OS-9261A, 62 and 63A*.