

# Exp. 16

## Medida da velocidade da luz

FSC5144 - Laboratório de Física IV

Versão de 24 de outubro de 2018

### 1 Objetivo

- Medir a velocidade da luz utilizando o método de Foucault.

### 2 Introdução

Desde o início reconhecido da ciência, muitos estudiosos têm pesquisado sobre a natureza da luz. Filósofos gregos já discutiam sobre o assunto. Uma das características interessantes da luz que aguçava a curiosidade dos estudiosos era saber a sua velocidade. Sabia-se que a velocidade era extremamente grande, sendo que alguns acreditavam que ela se propagava instantaneamente. Questionavam se ela era finita ou infinita, e como seria possível medi-la.

Galileu (1564-1642) foi o primeiro cientista a tentar medir a velocidade da luz, executando um experimento extremamente simples. No cenário, duas colinas. Ele e um assistente ficaram cada um no alto de uma colina com uma lanterna que poderia ser coberta e separados por uma distância de aproximadamente três quilômetros. Um dos dois descobria a lanterna e assim que o outro visse a luz, descobria a sua lanterna. O intervalo de tempo decorrido entre esses eventos seria o tempo necessário de ida e volta da luz entre as duas colinas. O princípio desse experimento é fisicamente válido mas, como a velocidade da luz é muito grande, as flutuações nos tempos de resposta dos dois era muito maior que o tempo de percurso da luz entre as colinas, fazendo com que Galileu não apresentasse resultados confiáveis.

A primeira medida razoável para a velocidade da luz foi feita em 1675 pelo astrônomo dinamarquês Ole Christensen Römer (1644-1710). Fazendo observações de um dos satélites de Júpiter, Io, e medindo o intervalo entre dois eclipses, Römer calculou uma velocidade de 200.000 km/s. Esta foi a primeira verificação de que a velocidade da luz era finita.

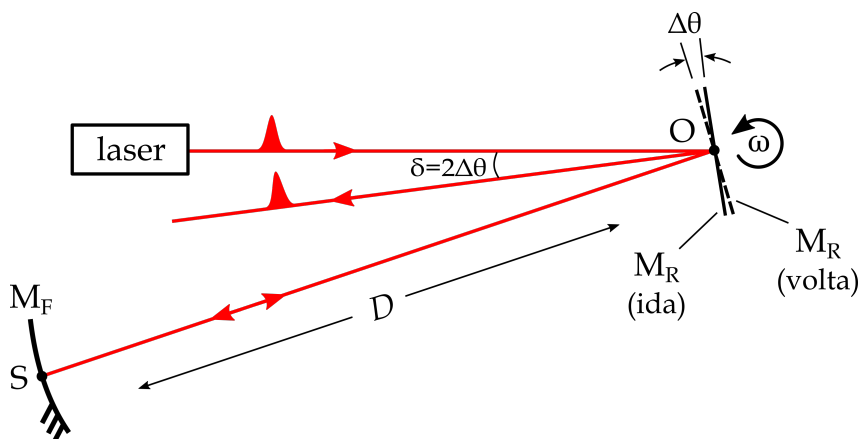
A primeira medida não astronômica, ou seja, realizada com experimento inteiramente montado na Terra, foi feita em 1849 pelo físico francês Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896), utilizando um sistema ótico composto por espelhos e lentes. Numa colina, ele posicionou uma fonte luminosa cujos raios seriam posteriormente refletidos por um espelho semitransparente e transmitidos entre os dentes de uma roda dentada até um espelho refletor distante de cerca de 8,68 km em outra colina. A velocidade da luz era determinada através da velocidade angular da roda dentada. Com este aparato, Fizeau obteve a velocidade de  $3,13 \times 10^8$  m/s.

O físico francês Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) aperfeiçoou o sistema utilizado por Fizeau, trocando a roda dentada por um espelho rotatório e obtendo, em 1862, o valor de  $2,98 \times 10^8$  m/s. Foucault também verificou que a velocidade da luz na água era menor que no ar.

O físico americano Albert A. Michelson (1852-1931), usando a técnica desenvolvida por Foucault, realizou medidas da velocidade da luz cada vez mais precisas durante 50 anos, entre 1880 e 1930. A velocidade da luz também pode ser obtida de maneira indireta por meio de medidas não-ópticas, medindo-se as constantes eletromagnéticas  $\mu_0$  e  $\epsilon_0$ . De acordo com a teoria eletromagnética lapidada e resumida por James Clerk Maxwell (1831-1879) nas famosas equações que levam seu nome, estas constantes e a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo se relacionam através da seguinte equação:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} . \quad (1)$$

A velocidade da luz no vácuo é aceita como uma constante universal vinculada à própria definição do metro. Atualmente, é convenção definir o metro como “o comprimento do caminho percorrido pela luz no vácuo num intervalo de tempo de  $1/299\,792\,458$  segundo”<sup>1</sup>. Em decorrência desta definição, a velocidade da luz está hoje fixada em *exatamente* 299 792 458 m/s.



**Figura 1** O método de Foucault para a determinação da velocidade da luz baseia-se na medida do ângulo de retorno de um feixe luminoso que, após propagar-se por um longo braço de comprimento  $D$  e voltar, reflete num espelho rotatório que, acoplado a um rotor, gira com grande velocidade angular  $\omega$ .

<sup>1</sup> O metro foi assim definido na 17ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), realizada em Paris em 1983. O segundo, por sua vez, teve sua definição contemporânea estabelecida em 1967, na 13ª CGPM, como “a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133”.

### 3 O método de Foucault

O método de Foucault para medir a velocidade da luz, esquematizado na figura 1, consiste em enviar um pulso luminoso a um espelho fixo distante ( $M_F$ ) após reflexão num espelho rotatório ( $M_R$ ). Quando o pulso luminoso é refletido de volta de  $M_F$  para  $M_R$ , este terá girado de um ângulo  $\Delta\theta$ , desviando o pulso de um ângulo  $\delta = 2\Delta\theta$  com relação à direção inicial de ida. A medida deste desvio angular  $\delta$  permite inferir a velocidade da luz  $c$ .

Dentre os principais parâmetros do experimento estão:

- $D$ : distância entre os espelhos  $M_F$  e  $M_R$ ; e
- $\omega$ : velocidade angular de rotação do espelho  $M_R$ .

De fato, se  $\Delta t$  é o intervalo de tempo que leva a luz para efetuar uma ida-e-volta entre os dois espelhos, então

$$c = \frac{2D}{\Delta t} \quad \text{e} \quad \omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}, \quad (2)$$

donde o desvio angular vale

$$\delta = 2\Delta\theta = \frac{4\omega D}{c}. \quad (3)$$

Finalmente, invertendo-se a equação acima, chega-se à velocidade da luz

$$c = \frac{4\omega D}{\delta}. \quad (4)$$

#### Observações

1. O espelho fixo  $M_F$  é côncavo e, idealmente, deve ter raio de curvatura igual à distância  $D$ , ou seja, o ponto  $O$  deve se superpor ao centro de curvatura de  $M_F$ . Desta forma, o feixe sempre será refletido de volta para o ponto  $O$ , qualquer que seja o ponto  $S$  no qual o feixe é refletido em  $M_F$ .
2. O método foi acima descrito utilizando-se a imagem de um pulso luminoso para facilitar a compreensão. Na verdade, a implementação prática do método se dá com um feixe luminoso contínuo, o que todavia não altera o princípio de funcionamento. Basta imaginar que um feixe contínuo é equivalente a uma sucessão de pulsos luminosos adjacentes, ou seja, “colados” uns aos outros. Mesmo que cada um destes “pulsos adjacentes” sejam enviados a diferentes pontos do espelho  $M_F$ , todos voltam ao mesmo ponto  $O$  e sofrem o mesmo desvio. Vale notar também que nem todos os “pulsos adjacentes” sequer chegam ao espelho  $M_F$ , já que há fases da rotação de  $M_R$  que não apontam diretamente para o espelho fixo. O resultado é que o feixe de retorno pisca na frequência de rotação de  $M_R$ .

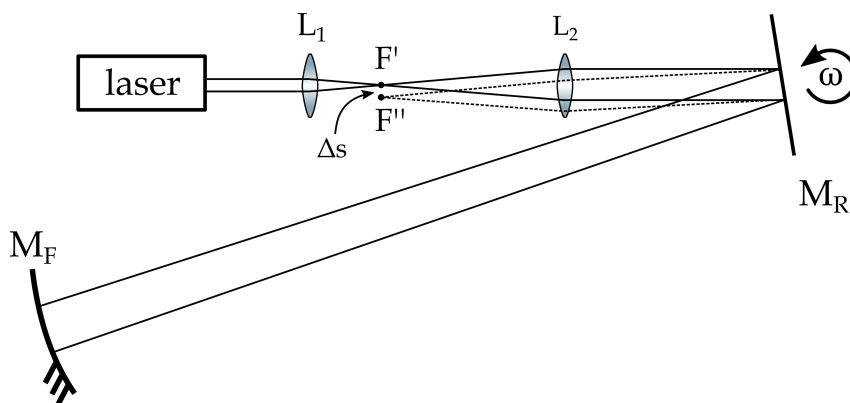
3. Observando-se a equação (3), nota-se que, quanto mais rápido o espelho  $M_R$  girar, maior será o desvio  $\delta$ . Entretanto, mesmo com o equipamento sendo capaz de produzir rotações bastante altas, o desvio na prática é ainda pequeno: da ordem de 1 mrad (um miliradiano).
4. O feixe de luz da experiência tem uma secção transversal da ordem de um milímetro. Isto significa que, para pequenos desvios, é difícil distinguir espacialmente o feixe de retorno do feixe de ida. Por esta razão, adota-se a estratégia de focalizar os feixes num certo ponto do aparato, para que se possa distinguir, com a ajuda de um microscópio, os pontos focais dos feixes de ida e de volta e medir o desvio. Mais detalhes a seguir.

## 4 Sobre a experiência

Nesta experiência, vamos implementar o método de Foucault utilizando um equipamento da Pasco Scientific (OS-9261).

O esquema da figura 2 mostra o arranjo experimental utilizando um par de lentes convergentes ( $L_1$  e  $L_2$ ) que focalizam os feixes de ida e volta, aumentando a resolução da medida de desvio.

Um laser é enviado para  $M_F$ , passando pelo sistema de lentes em configuração de telescópio<sup>2</sup> e por  $M_R$ . O feixe de luz que sai do laser é focalizado no ponto  $F'$  através da lente  $L_1$ . Com o espelho  $M_R$  parado, o feixe de retorno é focalizado pela lente  $L_2$  no mesmo ponto  $F'$ . Já com o espelho em movimento rotatório, o foco do feixe de retorno é ligeiramente deslocado para um ponto  $F''$ . O objetivo é relacionar a distância  $\Delta s$  entre os pontos  $F'$  e  $F''$  ao desvio angular  $\delta$  calculado anteriormente.

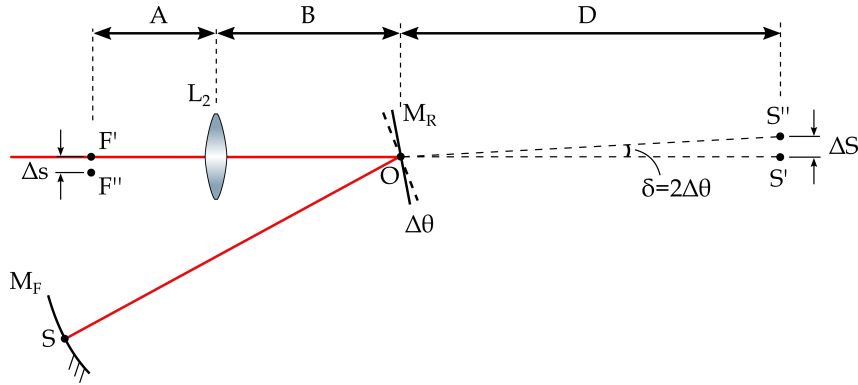


**Figura 2** Método de Foucault usando as lentes  $L_1$  e  $L_2$  em configuração de telescópio para medir o desvio angular com maior resolução óptica. O diâmetro dos feixes aparece exagerado para melhor visualização dos pontos focais.

Para o cálculo de  $\Delta s$ , observemos a figura 3, que mostra um detalhe da montagem contendo a lente  $L_2$  e os espelhos  $M_R$  e  $M_F$ . Na figura, os pontos  $F'$  e  $F''$  podem ser interpretados como as imagens dos pontos  $S'$  e  $S''$ , respectivamente, formadas pela

<sup>2</sup> Num telescópio, a distância  $b$  entre as lentes é igual à soma de suas distâncias focais:  $b = f_1 + f_2$ .

lente  $L_2$ .  $S'$  é a imagem virtual do ponto  $S$  formada pelo espelho  $M_R$  na orientação inicial, enquanto  $S''$  é a imagem virtual do ponto  $S$  formada pelo espelho  $M_R$  girado de  $\Delta\theta$ . O problema se reduz então a calcular as posições das imagens de  $S'$  e  $S''$  através de  $L_2$  para obter  $\Delta s$  em termos de  $\Delta S$ .



**Figura 3** Detalhe da montagem para o cálculo da distância  $\Delta s$  entre os pontos  $F'$  e  $F''$ .  $F'$  e  $F''$  são as imagens dos pontos  $S'$  e  $S''$ , respectivamente, formadas pela lente  $L_2$ .  $S'$  é a imagem virtual do ponto  $S$  formada pelo espelho  $M_R$  na orientação inicial, enquanto  $S''$  é a imagem virtual do ponto  $S$  formada pelo espelho  $M_R$  girado de  $\Delta\theta$ .  $D$  é a distância entre  $M_R$  e  $M_F$ .  $B$  é a distância entre a lente  $L_2$  e o espelho rotatório.  $A$  é a distância entre as lentes  $L_2$  e  $L_1$  menos a distância focal da lente  $L_1$ .

No problema da formação de imagens através de uma lente delgada (ver Experiência 9), um objeto de tamanho  $o$  forma uma imagem de tamanho  $i$  dada por

$$\frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}, \quad (5)$$

onde  $p$  é a distância do objeto à lente e  $p'$  é a distância da imagem à lente. O sinal negativo expressa o fato de que a imagem é invertida em relação ao objeto se  $p$  e  $p'$  são números positivos.

As imagens  $F'$  e  $F''$  dos pontos  $S'$  e  $S''$  são formadas no plano focal da lente  $L_2$  e distam  $\Delta s$  entre si. Aplicando a equação (5), portanto, tem-se:

$$\Delta s = \left| -\frac{p'}{p} \right| \Delta S = \frac{A}{D+B} \Delta S \quad (6)$$

onde  $A$  é a distância entre as lentes  $L_1$  e  $L_2$  menos a distância focal de  $L_1$ ;  $B$  é a distância entre o espelho rotatório e a lente  $L_2$ .

Com a ajuda da figura 3, é fácil ver que a distância  $\Delta S$  entre  $S'$  e  $S''$  vale

$$\Delta S \simeq D\delta. \quad (7)$$

Substituindo a equação (7) na equação (6), obtemos:

$$\Delta s = \frac{AD}{D+B} \delta. \quad (8)$$

Resgatando a equação (3) da seção anterior, podemos então relacionar o tamanho  $\Delta s$  com a velocidade da luz  $c$ :

$$\Delta s = \frac{4\omega AD^2}{c(D+B)} \Rightarrow c = \frac{4\omega AD^2}{\Delta s(D+B)}. \quad (9)$$

A distância  $\Delta s$  será medida usando um microscópio. Um divisor de feixe permite que esta imagem possa ser visualizada pelo microscópio (ver figura 4). O divisor de feixe é um espelho semitransparente, que permite que metade da potência luminosa seja transmitida diretamente e a outra metade seja refletida.

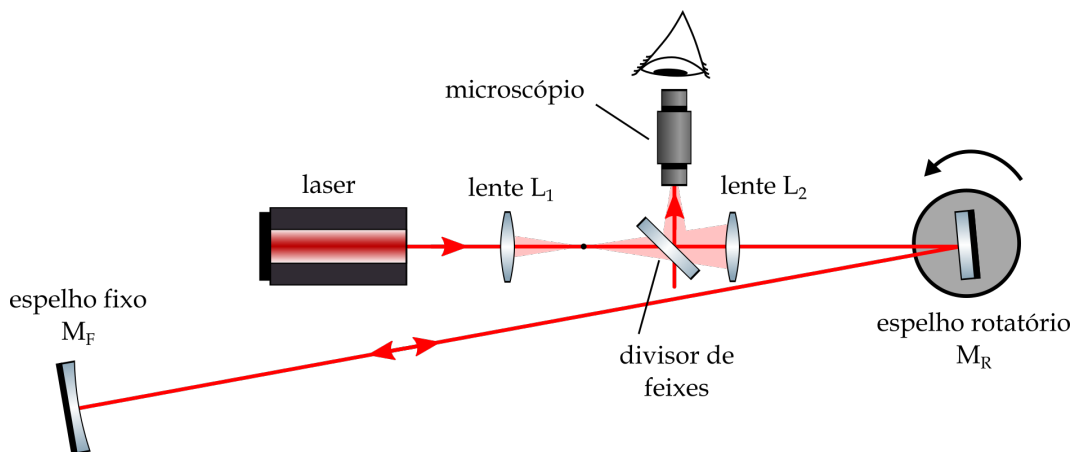
## 5 Referências Bibliográficas

- Halliday, Resnick e Walker, *Fundamentos de Física*, Vol.3, Ed. LTC
- Sears, Zemansky, Young e Fredman, *Física III*, Ed. Pearson, Addison Wesley.
- Tipler, *Física, Eletricidade e Magnetismo, Ótica*, Vol.2, 4 Edição, Ed.LTC
- Piacentini, Grandi, Hofmann, de Lima e Zimmerman, *Introdução ao Laboratório de Física*, Ed. da UFSC.

## 6 Relação do material

- 01 Trena
- 01 Régua de 50 cm
- 01 Equipamento completo para Velocidade da Luz OS-9261:
- 01 Espelho fixo esférico (raio de curvatura 13,5m )
- 01 Microscópio
- 02 Placas de alinhamento
- 01 Espelho rotatório de alta velocidade – OS9263A
- 0L<sub>1</sub>aser de He - Ne ( $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ) não polarizado de 0,5 mW de potência – OS-9171
- 01 Bancada óptica de 1m de comprimento, com escala métrica – OS-9103
- 01 Bancada para o alinhamento do laser – OS-9172
- Acopladores para as bancadas óptica e do laser – OS-9142
- 0L<sub>1</sub>ente com distância focal de 48 mm – OS-9133
- 0L<sub>2</sub>ente com distância focal de 252 mm – OS-9135
- 02 Polarizadores – OS-9109
- 03 Suportes para componentes ópticos – OS-9107

## 7 Esquema Experimental



**Figura 4** Esquema experimental da montagem do método de Foucault para determinação da velocidade da luz.

## 8 Procedimento Experimental

### 8.1 Alinhamento

**ATENÇÃO:** O alinhamento do equipamento é parte essencial deste experimento. Não só para obter bons resultados, mas sim para conseguir algum resultado. Se o alinhamento não for bem feito, não será possível realizar a medida da velocidade da luz. Portanto tome cuidado no posicionamento e no alinhamento dos componentes ópticos. Antes de iniciar a montagem, lave bem as mãos para retirar qualquer resíduo de gordura, e não toque nas superfícies dos espelhos e lentes. Antes de iniciar a montagem do equipamento, leia todo o procedimento experimental para se ter uma ideia geral do que deve ser feito e verificar as possíveis dificuldades, para só depois seguir o procedimento experimental item por item.

1. Coloque a bancada óptica em uma superfície plana. A bancada óptica possui uma escala métrica de 1 m, quatro parafusos niveladores, e sua superfície é magnética, para a fixação dos componentes ópticos.
2. Coloque o laser na sua bancada sendo que a fixação do laser com a sua bancada também é feita magneticamente. Conecte a bancada do laser com a bancada óptica, utilizando os acopladores e os parafusos. Nesta etapa não aperte totalmente os parafusos.
3. Monte o sistema do espelho rotatório ( $M_R$ ) no lado oposto da bancada óptica, posicionando a extremidade da base (a parte mais próxima do espelho) na posição 17,0 cm (ou 83,0 cm dependendo se o zero da escala métrica da bancada for mais próxima ao laser). Encoste bem a base do sistema na guia da bancada óptica.
4. Ligue o laser.

**PRECAUÇÃO:** NUNCA olhe diretamente para o feixe do laser, nem para o feixe refletido pelos espelhos. Certifique-se também que o caminho óptico do laser não atinja a região dos olhos das pessoas em volta do experimento.

5. Verifique se o eixo de rotação do espelho rotatório está na vertical, observando a rotação do espelho ao ligá-lo em baixa velocidade.
6. Alinhe o feixe do laser para que atinja o centro do espelho rotatório. Para isso utilize duas placas de alinhamento e os parafusos niveladores da bancada do laser. A placa de alinhamento consiste de uma placa em formato de L, com um pequeno orifício de 2 mm de diâmetro. Coloque uma placa próxima ao laser e outra próxima ao espelho rotatório. Encoste bem as placas na guia da bancada. Ajuste a altura do laser com os parafusos niveladores da bancada do laser e a posição lateral do feixe movendo o laser lateralmente. Quando o feixe estiver totalmente alinhado, o mesmo deve passar e voltar pelos orifícios após incidir sobre o espelho rotatório.
7. Aperte bem os parafusos fixadores da conexão da bancadas do laser com a bancada óptica. Verifique se o nivelamento permanece o mesmo.
8. Remova a placa de alinhamento mais próxima ao laser.
9. Coloque a lente  $L_1$ , de distância focal de 48 mm, no banco óptico, posicionando a linha central do suporte da lente na marca 93,0 cm (ou 7,0 cm). Se necessário



desloque a lente do suporte, sem tirar o suporte da posição da bancada, de tal modo que o feixe ao passar pela lente, continue centralizado no furo da placa de alinhamento próxima a  $M_R$ .

10. Coloque a Lente  $L_2$ , de distância focal 252 mm, na bancada óptica, posicionando a linha central do suporte da lente na marca 62,2 cm (ou 37,8 cm) da escala métrica. Verifique se o feixe continua centralizado no furo da placa de alinhamento.
11. Posicione o microscópio na bancada óptica entre as lentes  $L_1$  e  $L_2$ , de tal forma que a borda da base do suporte do microscópio mais próxima ao espelho rotatório fique na marca 82,0 cm (ou 18,0 cm). A alavanca que ajusta a inclinação do divisor de feixe do microscópio deverá ficar ao lado esquerdo de quem vai de  $L_1$  para  $L_2$ .

**ATENÇÃO:** NÃO olhe através do microscópio antes que seja colocado os polarizadores próximos ao laser para diminuir a intensidade do mesmo.  
**OBSERVAÇÃO:** Você pode verificar se o feixe será dirigido ao microscópio, sem colocar os polarizadores, retirando a ocular e colocando um pedaço de papel no seu lugar e observando a formação ou não de uma pequena mancha vermelha sobre o papel.

12. Coloque dois polarizadores (anexados um com outro) com o seu respectivo suporte na bancada óptica entre o laser e a lente  $L_1$ . Inicialmente deixe os polarizadores cruzados, ou seja, com polarização perpendicular entre eles. Nesta configuração, a transmissão do laser será mínima. Varie a direção de polarização dos polarizadores até obter uma imagem facilmente visível no microscópio, mas que não cause desconforto aos olhos.
13. Movimente a alavanca verificando se o feixe do laser continua centralizado no espelho rotatório e que o outro feixe é direcionado para o microscópio. O feixe de laser que deve ser direcionado ao microscópio é o que retorna do espelho rotatório, e não o que vem diretamente do laser. Caso o feixe não atinja mais o centro do espelho rotatório, reajuste a posição vertical da lente  $L_2$ .
14. Se quiser pode retirar os polarizadores. Os polarizadores devem ser colocados sempre que for necessário fazer alguma observação no microscópio.
15. Coloque o espelho fixo ( $M_F$ ) entre 10 e 15 m de distância do espelho rotatório. Posicione  $M_F$  de tal forma que o eixo imaginário que liga  $M_F$  a  $M_R$  e o eixo da bancada óptica forme um ângulo aproximado de  $12^\circ$ . A configuração dos espelhos está esquematizada na figura 4.
16. Certifique-se de que o espelho fixo e o micrômetro do microscópio estejam em lados opostos da bancada, para evitar que o feixe do laser seja bloqueado.
17. Ajuste a posição do espelho fixo de tal modo que o feixe atinja a parte central do espelho. Para facilitar o ajuste, utilize um pequeno pedaço de papel e acompanhe a trajetória do laser em direção do espelho, ajustando tanto a posição de  $M_F$  como a orientação do espelho rotatório.
18. Com um pedaço de papel colocado sobre o espelho fixo, mova a lente  $L_2$  para frente e para trás na bancada óptica até focalizar um feixe com o menor diâmetro possível.
19. Através de dois parafusos atrás do espelho fixo, ajuste a sua posição para que o feixe refletido volte para a parte central do espelho rotatório.

20. Coloque novamente os polarizadores entre o laser e a lente  $L_1$  para observar no microscópio.
21. Focalize a cruz do microscópio sobre a imagem formada, movendo para cima e para baixo a ocular do microscópio.
22. Obtenha a imagem (ponto) mais nítida possível, alterando o foco da mesma, movendo para cima e para baixo o tubo do microscópio, após soltar o parafuso fixador. Aperte o parafuso ao obter a melhor imagem.
23. Para tentar melhorar a imagem formada, desloque um pouco a posição das lentes  $L_1$  e  $L_2$ . Mova uma de cada vez. A lente  $L_2$  também pode ser girada um pouco ( $1^\circ$  ou  $2^\circ$ ) para que não forme um ângulo reto com o feixe de luz.
24. Para verificar se a imagem observada no microscópio é a imagem desejada, bloqueie o feixe refletido entre o espelho fixo e o espelho móvel. Se a imagem observada no microscópio desaparecer, significa que é a imagem desejada. Se não desaparecer, é necessário rever a posição de todos os elementos ópticos.

## 8.2 Medidas

1. Com o equipamento alinhado e a imagem pontual focalizada, modifique um pouco a inclinação do divisor de feixe do microscópio e ajuste também o micrômetro para que o ponto fique centralizado na cruz do microscópio.
2. Anote o valor indicado no micrômetro do microscópio, com seu respectivo erro.
3. Verifique com a mão se o espelho rotatório gira livremente.

**ATENÇÃO:** Ao ligar o motor do espelho rotatório na velocidade máxima, faça as medidas o mais rápido possível. Não deixe o espelho nesta velocidade por mais de 60 segundos. Sempre que ligar o motor na velocidade máxima por um certo tempo, aguarde a mesma quantidade de tempo antes de ligá-lo novamente na velocidade máxima. Isto é importante para não superaquecer o motor.

4. Ligue o motor para girar no sentido horário (CW) e aperte o botão de velocidade máxima de rotação (MAX REV / S). Após a luz vermelha que indica a aceleração apagar, verifique se a imagem pontual vista no microscópio se deslocou. Ajuste o micrômetro para posicionar novamente o ponto no centro da cruz e anote novamente o valor do micrômetro. Este será chamado de  $x_{CW}$ .
5. Anote a velocidade de rotação máxima. A medida da rotação é obtida com erro de 1 Hz (um hertz = uma revolução por segundo).
6. Desligue o motor.
7. Mude o sentido de rotação para anti-horário (CCW). Ligue o motor e aperte o botão de velocidade máxima. Espere apagar a luz indicativa de aceleração. Ajuste o micrômetro para posicionar novamente a imagem no centro da cruz do microscópio. Anote o valor indicado no micrômetro. Este será chamado de  $x_{CCW}$ . Anote também a velocidade de rotação máxima.
8. Desligue o motor.

Substituindo convenientemente os parâmetros medidos na equação (9), obtém-se a equação para a medida da velocidade da luz:

$$c = \frac{8\pi AD^2 (f_{CW} + f_{CCW})}{(D + B) (x_{CW} - x_{CCW})}. \quad (10)$$

## 9 Questionário

1. Com os dados obtidos e através da equação (10) determine a velocidade da luz.
2. (a) Aplique o método de propagação de erro com derivadas parciais à eq. (10) para obter o erro relativo  $\sigma_c/c$  em termos dos parâmetros experimentais e de seus respectivos erros.  
(b) Utilize os dados obtidos para calcular numericamente  $\sigma_c/c_{\text{exp}}$  e escreva o resultado final no formato  $c_{\text{exp}} \pm \sigma_c$ .
3. O resultado obtido é compatível com  $c$ ? Comente, tentando apontar as principais fontes de erro no experimento e o que poderia em tese ser feito para melhorar o resultado.

## Exp. 16 - Medida da velocidade da luz

GRUPO: \_\_\_\_\_

ALUNOS: \_\_\_\_\_

TURMA: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

DATA: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**OBS:** Escreva todas as medidas com suas respectivas unidades e seus respectivos erros.

➤ **Tabela I.** *Posição dos componentes na bancada óptica*

Lente $L_1$ (48 mm)	
Lente $L_2$ (252 mm)	
Borda da base do microscópio	
Espelho rotatório $M_R$	
Polarizadores	

➤ **Tabela II.** *Variáveis medidas*

$\theta$ (°)	
$D$	
$A$	
$B$	
$x_{CW}$	
$x_{CCW}$	
$f_{CW}$	
$f_{CCW}$	