

Exp. 15

Medida da velocidade da luz

FSC2144 - Laboratório de Física IV

Versão de 12 de maio de 2024

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 μ_0 e ϵ_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”¹. Em decorrência desta definição, a velocidade da luz está hoje fixada em *exatamente* 299 792 458 m/s.

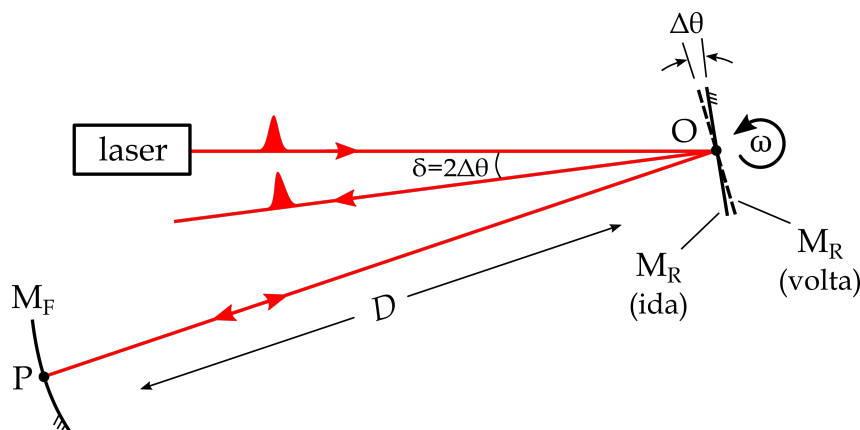


Figura 1 O método de Foucault para a determinação da velocidade da luz baseia-se na medida do ângulo de retorno de um feixe luminoso que, após propagar-se por um longo braço de comprimento D e voltar, reflete num espelho rotatório que, acoplado a um rotor, gira com grande velocidade angular ω .

¹ 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 δ 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
- ω : velocidade angular de rotação do espelho M_R .

De fato, se Δt 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 P 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 δ . 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 seção 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 telescópio² 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 Δx entre os pontos F e F' ao desvio angular δ calculado anteriormente.

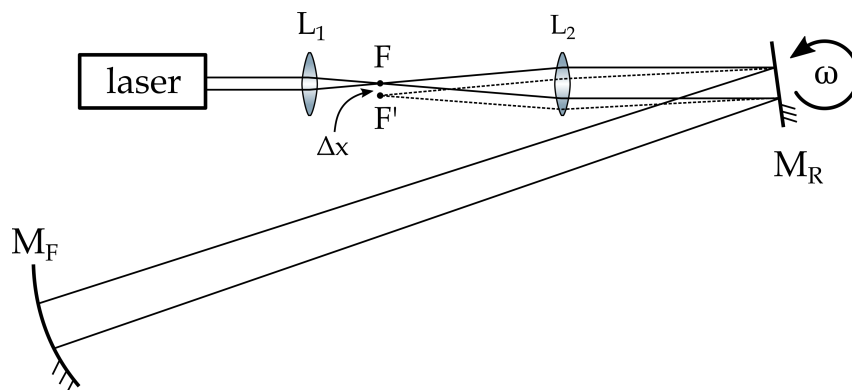


Figura 2 Método de Foucault usando as lentes L_1 e L_2 em configuração de telescópio para medir o desvio angular com maior resolução óptica. O diâmetro dos feixes aparece exagerado para melhor visualização dos pontos focais.

Para o cálculo de Δx , 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

² 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 P formada pelo espelho M_R na orientação inicial, enquanto S' é a imagem virtual do ponto P 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 Δx em termos de ΔS .

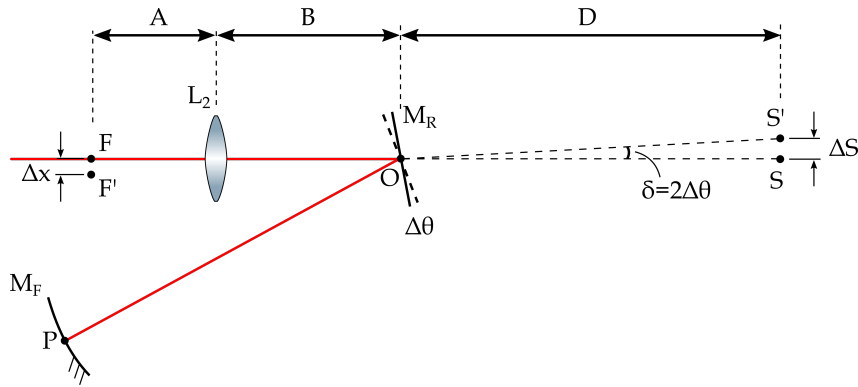


Figura 3 Detalhe da montagem para o cálculo da distância Δx entre os pontos F e F' . F e F' são as imagens dos pontos S e S' , respectivamente, formadas pela lente L_2 . S é a imagem virtual do ponto P formada pelo espelho M_R na orientação inicial, enquanto S' é a imagem virtual do ponto P formada pelo 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 Δx entre si. Aplicando a equação (5), portanto, tem-se:

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

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 ΔS entre S e S' vale

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

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

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

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

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

A distância Δx 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

- *Speed of light Experiment EX-9932*, Manual do aparato, Pasco Scientific.
- Halliday, Resnick e Walker, *Fundamentos de Física*, Vol.3, Ed. LTC

6 Relação do material

- 01 Trena
- 01 Equipamento completo para Velocidade da Luz OS-9261:
- 01 Espelho fixo esférico (raio de curvatura 13,5m)
- 01 Espelho plano
- 01 Microscópio
- 02 Placas de alinhamento
- 01 Espelho rotatório de alta velocidade – OS9263A
- 01 Laser 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
- 01 Lente com distância focal de 48 mm – OS-9133
- 01 Lente com distância focal de 252 mm – OS-9135
- 02 Polarizadores – OS-9109
- 03 Suportes para componentes ópticos – OS-9107

7 Esquema Experimental

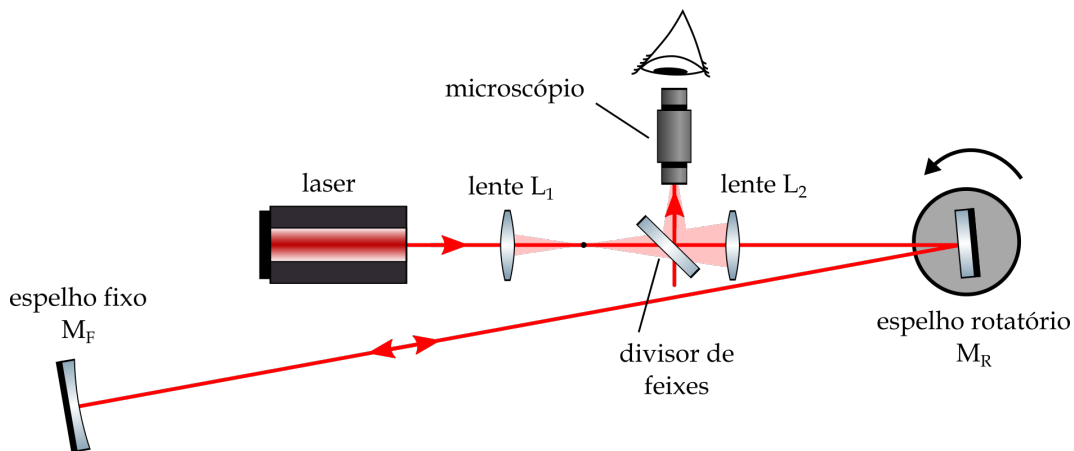


Figura 4 Esquema experimental da montagem do método de Foucault para determinação da velocidade da luz.

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 óticos. 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 óticos.
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 de laser. 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° . 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° ou 2°) 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. 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.

3. 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, em seguida, anote o valor lido no micrômetro. Este será chamado de x_{CW} .
4. Anote a velocidade de rotação máxima. A medida da rotação é obtida com incerteza de 1 Hz (um hertz = uma revolução por segundo).
5. Desligue o motor.
6. 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.
7. Desligue o motor.

Substituindo convenientemente os parâmetros medidos na equação (9), obtém-se a equação que será utilizada para a determinação experimental da velocidade da luz:

$$c_{\text{exp}} = \frac{8\pi AD^2 (f_{CW} + f_{CCW})}{(D + B)(x_{CW} - x_{CCW})}, \quad (10)$$

cujo resultado deverá ser comparado com o valor hoje fixado para a velocidade da luz: $c = 299\,792\,458$ m/s.

9 Questionário

1. Com os dados obtidos e através da equação (10) determine o valor experimental da velocidade da luz, c_{exp} .
2. (a) Aplique o método de propagação de incertezas com derivadas parciais à eq. (10) para obter uma *expressão analítica* para a incerteza relativa Δ_c/c em termos dos parâmetros experimentais e de suas incertezas
(b) Utilize os dados obtidos para calcular numericamente Δ_c/c_{exp} e escreva o resultado final no formato $c_{\text{exp}} \pm \Delta_c$.
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. 15 - Medida da velocidade da luz

GRUPO: _____

ALUNOS: _____

TURMA: _____

DATA: _____

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

➤ **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*

θ (°)	
D	
A	
B	
x_{CW}	
x_{CCW}	
f_{CW}	
f_{CCW}	