

## DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DA LUZ

### Introdução

Após as primeiras determinações da velocidade da luz, a partir de observações astronômicas feitas por Romer (1670) e Bradley (1723), Arago sugeriu em 1838 medidas pioneiras terrestres que foram realizadas por Fizeau em 1849 e mais tarde por Foucault em 1850. Descreveremos aqui um método similar introduzido por Michelson (1878), o qual experimentalmente é mais simples, ao invés do arranjo original descrito por Foucault. O objetivo da experiência não é obter-se alta precisão nos resultados, porém ilustrar um problema cuja solução experimental nem sempre é fácil<sup>(1,2,3)</sup>.

### Objetivos

- Determinação da velocidade da luz
- Técnicas de alinhamento óptico usando laser
- Uso de espelho giratório e medida de sua rotação

### Aparelhagem

1 espelho rotante com motor da Leybold, (EG)  
1 varivolt 0-220 VAC para variar a rotação do espelho  
1 lente convergente  $f = 5\text{m}$ ,  $\phi = 20\text{ cm}$ , (L1)  
1 espelho plano  $\phi = 20\text{ cm}$  fixo (E1)  
1 espelho plano  $\phi = 5\text{ cm}$  montado sobre sistema direcional ajustável (E2)  
1 laser He-Ne  
1 separador de feixe de luz SF  
1 escala milimétrica transparente  
1 estroboscópio  
1 fotodetector com fonte de alimentação  
1 osciloscópio  
suportes, trena

### Procedimento

O experimento procura determinar o espaço percorrido e o tempo de vôo de um pulso de luz provocado por um espelho giratório (EG), e, portanto calcular sua velocidade. A montagem da prática está mostrada na figura 1. Verifique as distâncias anotadas no esquema.

O alinhamento óptico é crítico, mas não difícil de realizar.

- Com o motor do espelho EG desligado e utilizando a borda de um pedaço de papel como anteparo para acompanhar o alinhamento, ligue o laser de HeNe (632,8nm vermelho) e faça chegar o feixe até o espelho  $E_2$  passando pelos componentes ópticos da montagem. O espelho giratório EG pode ser manipulado com uma chave presa ao suporte do espelho, movimentando normalmente poderá fazer com que o feixe atinja  $E_2$ . Logo a seguir o feixe refletido de  $E_2$  deve percorrer o mesmo caminho de volta até EG, para que isso aconteça

utilize os parafusos de alinhamento tanto de  $E_2$  como  $E_1$  e acompanhe a volta do feixe com a borda do papel utilizando como anteparo até que finalmente a imagem da abertura do laser esteja formada na escala transparente.

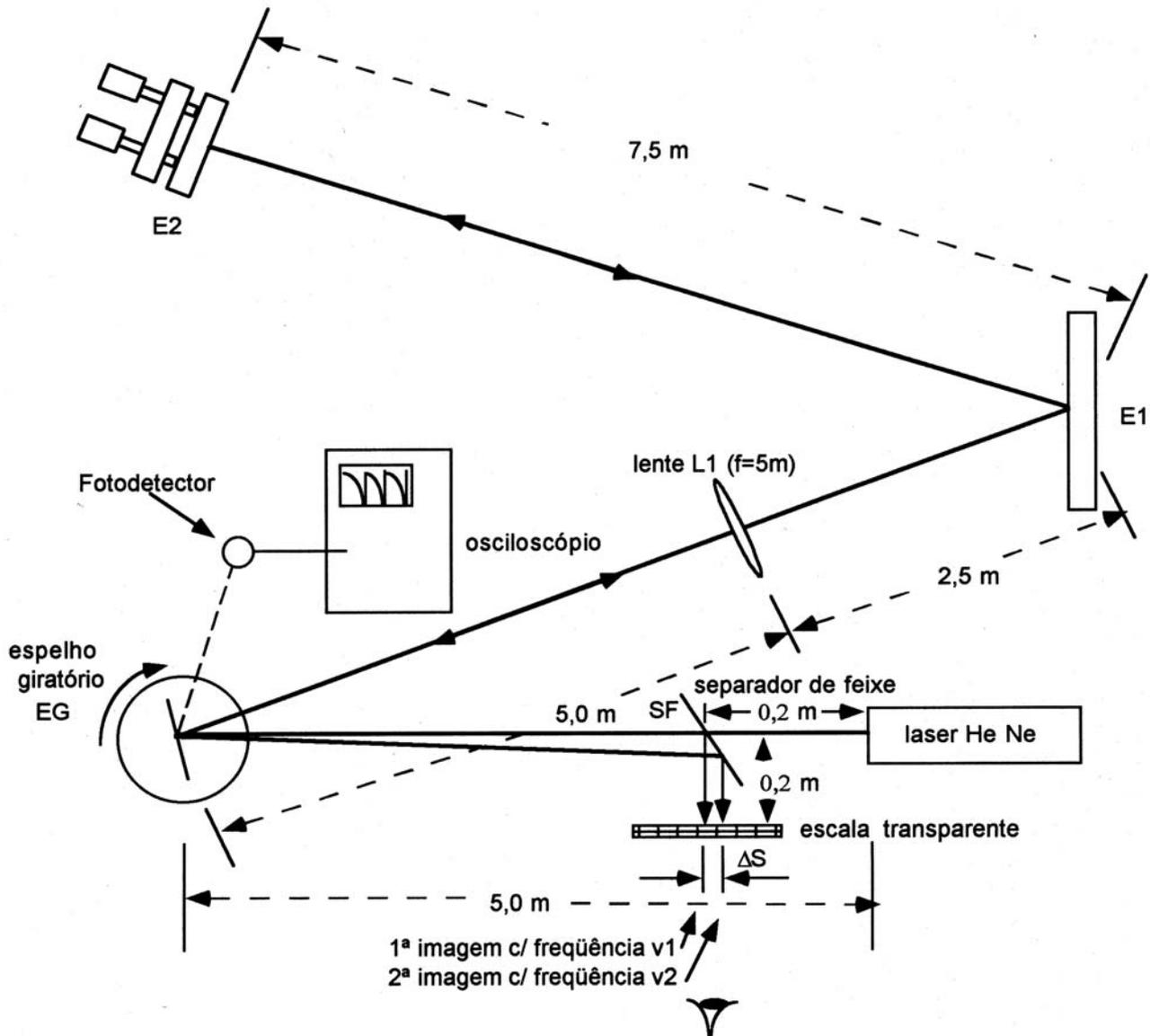


Figura 1: Esquema de montagem.

- Antes de ligar o espelho giratório EG, retire a chave utilizada para o alinhamento. Após ligar o motor do espelho EG, teremos pulsos de luz que percorrem, uma distância  $d = 15\text{m}$  e voltam sobre o próprio caminho ao mesmo espelho. Mas, no entanto o espelho já virou um ângulo  $\phi$ , veja a figura 2, dado pela rotação do motor ao qual está preso o espelho EG, o tempo de vôo do pulso fica em  $\cong 10^{-7}\text{s}$ , cujo valor exato depende da frequência com que o espelho gira. A frequência de rotação é regulada através de um varivolt. O pulso de luz que volta refletido do espelho giratório EG será refletido por um ângulo  $2\phi$  com relação ao feixe inicial. Certamente é difícil medir  $\phi$ , mas é fácil medir  $\Delta s$ , a separação entre duas imagens tomadas com diferentes frequências do espelho giratório. Para uma frequência  $\nu$  do motor, o tempo de vôo  $t$  será dado por

$$\omega t = \phi \rightarrow t = \frac{\phi}{2\pi\nu} [S] \quad (1)$$

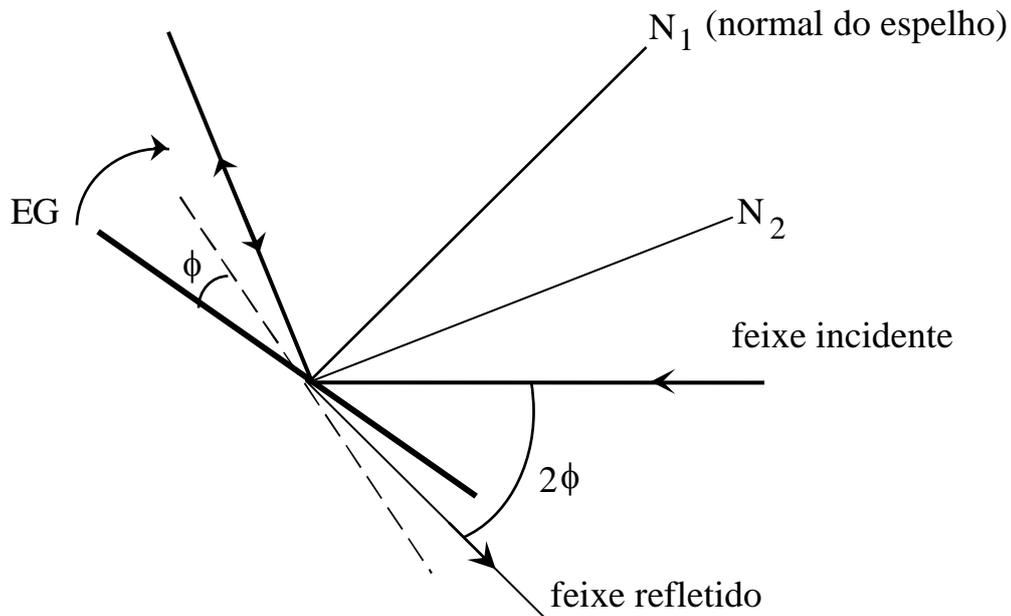


Figura 2: Reflexões no espelho giratório EG, após girar um ângulo  $\phi$ , o feixe refletido que volta de  $E_2$  sai com ângulo  $2\phi$

A frequência do motor pode ser medida com um fotodetector colocado fora do caminho óptico e ligado a um osciloscópio com base de tempo calibrada. **Lembre-se que o espelho tem duas faces e que você observará dois pulsos de luz por uma revolução do espelho!** Registrando a posição  $S(\nu)$  da imagem sobre a escala em função da frequência  $\nu$  de rotação do espelho giratório é fácil mostrar que

$$\frac{\Delta S}{\Delta \nu} = \frac{S - S_o}{\nu}$$

ou  $\frac{\Delta S}{\Delta \nu} \nu + S_o$  (2)

Onde  $S_o$  é uma constante dada pela posição do feixe sobre a escala quando  $\nu \rightarrow 0$ . Com  $R =$  distância entre o espelho giratório EG e a escala transparente ( $R = 5$  m), temos:

$$2\phi(\nu) = \frac{S(\nu) - S_o}{R}$$
 (3)

A velocidade da luz é finalmente dada por:

$$\nu = \frac{2d}{t} = \frac{8\pi dR}{\frac{\Delta S}{\Delta \nu}}$$
 (4)

Instale o sistema óptico cuidadosamente e faça medidas da posição das imagens  $S$  para diferentes velocidades de rotação do espelho giratório EG (varie a voltagem do motor entre 0 e 220 Vmax). **Tome cuidado, retire antes a chave usada para virar manualmente o espelho giratório antes de ligar o motor.** Lembre-se que a luz do laser é potencialmente perigosa para você e seus colegas, por isso evite que entre diretamente, ou por reflexão intensa, sobre seus olhos. Faça um gráfico de  $\Delta S$  em função da frequência do motor  $\nu$  e determine a velocidade da luz usando a fórmula (4) e o método dos mínimos quadrados para determinar  $\frac{\Delta S}{\Delta \nu}$ . Compare seus resultados com os valores

encontrados na literatura. Explique qualquer discrepância.

### Sugestões para ajustar o sistema ótico

Ajuste primeiro a distância entre o espelho giratório EG e o laser para 5 m.

Vire manualmente o espelho EG com a chave, de maneira que a luz refletida incida no centro da lente projetora L1 colocada a uma distância de 5 m (distância focal da lente). Por trás desta lente coloque um espelho E1 com superfície frontal refletora a uma curta distância e ajuste de maneira que o feixe refletido incida fora do espelho giratório. Ajuste agora a posição da lente L1 até se conseguir uma imagem nítida (a mesma distância entre espelho giratório-lente e imagem-lente).

Ajuste agora o separador de feixe SF (em  $45^\circ$ ) e a escala transparente de acordo com a figura 1 (distância 20 cm).

Coloque agora o espelho regulável E2 e o espelho E1 de maneira que a distância entre E2 e a lente L1 seja igual a  $2f = 10\text{m}$  (veja figura 1). Assim, a luz que vem de volta e é refletida pelo espelho EG produz uma imagem nítida na carcaça por onde sai o laser. Ajuste o plano do espelho E2 com 2 dos 3 micrômetros de maneira que o feixe refletido passe pelo centro da lente e volte sobre seu próprio caminho. Para observar o caminho de volta, pode-se usar um papel semitransparente para fazer os ajustes. Se o alinhamento estiver correto, poderá observar uma imagem nítida do laser sobre a escala transparente.

### Perguntas

- 1- Qual a diferença entre velocidade de fase e de grupo da luz? Explique.
- 2- Que correção deve-se fazer no caso em que o meio onde foi feita a experiência tiver um índice de refração  $n \neq 1$ ? Calcular o valor da correção no caso do ar ( $n - 1 = 2700 \times 10^{-7}$  a  $15^\circ\text{C}$ , 76 cm de Hg e  $\lambda = 630\text{ nm}$ ).
- 3- Discutir brevemente métodos mais recentes e acurados usados para determinar a velocidade da luz  $c = 299792458 \pm 1,2\text{ ms}^{-1}$  (valor recomendado agora para uso geral).
- 4- Qual é a velocidade de propagação de uma onda acústica em gás? Em um líquido? Em um sólido? Discuta as fórmulas.
- 5- O que é efeito Doppler?
- 6- Descreva o experimento de Michelson-Morley para observar a velocidade da luz.
- 7- Calcule o valor do ângulo  $\phi$  para um de seus dados.

### Referências

- 1- A. DiCurcio, The Physics Teacher, 326, May 1978.
- 2- G. Bruhat, Optique, ed. Masson et Cie, 1947, Cap. 1 (Biblioteca IFSC, 535.071 B 89203).
- 3- R.W. Ditchburn, Light, Academic Press, 1976, vol. 1, cap. 11 (Biblioteca IFSC).

Versão atualizada de outras apostilas: M. A. Aegerter, M. Siu Li