

Velocidade da Luz - 1

Introdução

Até o século XVII, e tendo por base observações astronômicas como os eclipses lunares, por exemplo, acreditava-se que a luz era transmitida instantaneamente. Já que tal afirmação necessitava de uma comprovação contundente, várias foram as tentativas para determinar a velocidade da luz. Dentre elas, costuma-se citar a de *Galileu Galilei* e o seu experimento das duas lanternas separadas por uma grande distância. Nada consta a respeito do valor obtido ou, até mesmo, se o experimento foi de fato realizado. A primeira tentativa bem sucedida (e documentada) é atribuída a *Ole Rømer* a partir da observação das luas de Júpiter [1]. O valor encontrado para a velocidade da luz c , em 1676, foi de 2.20×10^5 km/s e foi determinado por *Christiaan Huygens* com os dados experimentais fornecidos por *Rømer* [2]. À dupla *Rømer-Huygens* seguiram-se vários ilustres cientistas, os quais se utilizaram dos mais diferentes métodos [3]: *James Bradley* em 1729 ($c = 3.01 \times 10^5$ km/s, a partir da aberração da luz), *Hippolyte Fizeau* em 1849 (3.15×10^5 km/s, "roda dentada"), *Léon Foucault* em 1862 (2.98×10^5 km/s, espelho giratório), *Rosa&Dorsey* em 1906 (2.99710×10^5 km/s, $(\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$), *Albert Michelson* em 1826 (2.99796×10^5 km/s, espelho giratório), *Essen&Gordon-Smith* em 1950 (2.99792×10^5 km/s, cavidade ressonante), *Froome* em 1958 (2.99792×10^5 km/s, interferometria com ondas de rádio), *Evenson & Colab.* em 1972 (2.99792×10^5 km/s, interferometria laser), até o valor atualmente aceito de 299 792.458 km/s.

Objetivos

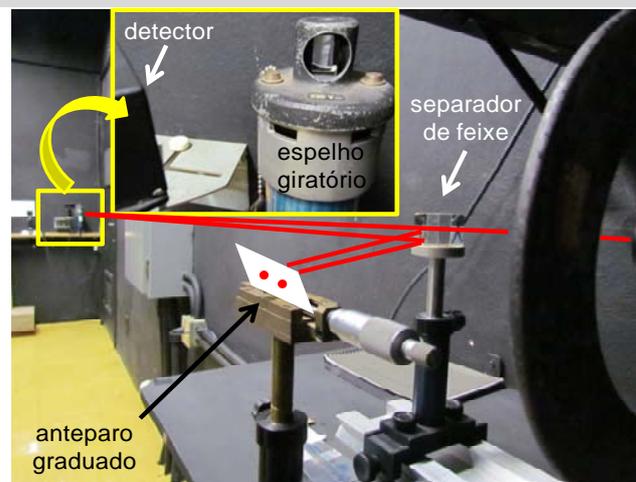
☞ Determinação experimental da velocidade da luz.

(Para tanto, o estudante deverá familiarizar-se com técnicas de alinhamento óptico, e com a utilização do conjunto fotodetector–osciloscópio para determinar a velocidade de rotação de um espelho giratório.)

☞ Comparar o resultado obtido com o esperado e discuti-los.

Equipamentos

- 1 espelho giratório (EG) – *Leybold*
- 1 laser de HeNe
- 1 separador de feixe (SF)
- 1 lente convergente (L1) – $f = 5\text{m}$, $\phi = 20\text{cm}$
- 1 auto-transformador (Varivolt)
- 1 fotodetector
- 1 anteparo graduado (escala transparente)
- 1 osciloscópio
- Lentes, espelhos, suportes, trena, etc.



OBS – Esta foto-montagem é apenas uma idealização do experimento. Nela foram omitidas as reflexões devidas ao espelho E2.

Descrição do Experimento

O método a ser utilizado foi proposto por *Foucault* no século XIX e posteriormente melhorado por *Michelson*. Essencialmente, o experimento consiste em se determinar o “tempo de vôo” de um pulso de luz ao longo de uma trajetória pré-definida. De acordo à montagem adotada (ver Figura 1), um feixe de laser HeNe é dividido em duas componentes: uma delas incide diretamente sobre um anteparo graduado, enquanto a outra percorre uma distância de cerca de 30 m antes de retornar ao mesmo anteparo graduado. O “tempo de vôo” da componente que percorre a maior trajetória é imposto por intermédio de um espelho giratório (EG), e está associado à separação espacial (no anteparo graduado) entre as duas componentes do laser de HeNe. Sabendo-se a distância percorrida e o “tempo de vôo”, podemos determinar a velocidade da luz.

O alinhamento óptico é crítico, e dele depende a qualidade dos seus resultados. Procure seguir as instruções a seguir para realizá-lo adequadamente.

Procedimento Experimental

Considere o diagrama da Figura 1 para fazer o alinhamento óptico do sistema e para realizar as suas medidas experimentais.

Alinhamento óptico

1 – Ligue o laser de HeNe e confirme a distância entre o espelho giratório (EG) e o laser (~ 5 m). Nesta situação o feixe de laser já estará atravessando o separador de feixes (SF).

Ainda que de baixa potência, a radiação emitida pelo laser de HeNe é potencialmente perigosa. Nunca permita que esta radiação (sob a forma direta ou refletida) incida sobre os seus olhos, ou nos olhos de qualquer pessoa que estiver presente no laboratório.

2 – Com o auxílio de uma chave, gire manualmente o espelho EG de maneira que a luz por ele refletida incida no centro da lente L1 ($f \sim 5\text{ m}$).

- 3 – Ajuste o espelho E1 (em outra sala!), de forma que o feixe por ele refletido incida sobre o espelho E2 (ao lado do espelho giratório).
- 4 – A fim de garantir a mesma distância entre espelho giratório-lente e imagem-lente, ajuste a lente L1 até obter uma imagem nítida.
- 5 – Posicione o separador de feixe SF e o anteparo graduado (ou escala transparente) de modo a reproduzir, aproximadamente, as distâncias indicadas na Figura 1.
- 6 – Garanta que a distância entre o espelho E2 e a lente L1 seja igual a $2f = 10\text{m}$ (Figura 1). Se o conjunto estiver próximo da situação de alinhamento, deve-se observar uma reflexão do *laser* em sua carcaça.
- 7 – Ajustes adicionais podem ser conseguidos com o espelho E2. Idealmente, o feixe refletido por E2 deve passar pelo centro da lente L1 e voltar. Para observar o caminho de volta, faça uso de um pequeno pedaço de papel.
- 8 – A presença de um único *spot* no anteparo graduado (ou escala transparente) indica que o sistema está alinhado.

 **Antes de ligar o espelho giratório EG, garanta que este encontre-se destravado.**

- 9 – Ligue o espelho giratório EG e observe a formação de um segundo *spot* à medida que a frequência de rotação é aumentada.

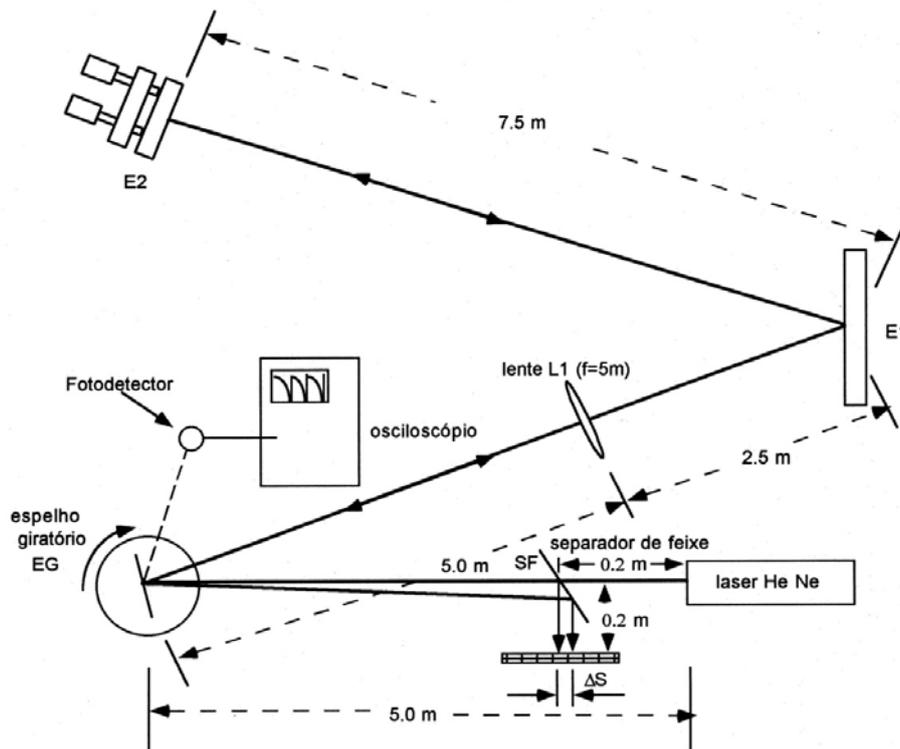


Figura 1 – Diagrama da montagem para a determinação experimental da velocidade da luz. As distâncias indicadas no diagrama são apenas ilustrativas: procure determiná-las com precisão.

Conceitos envolvidos

Com o espelho EG em ação, teremos pulsos de luz que percorrem uma distância $2d \sim 30\text{ m}$ antes de retornar ao ponto de partida: $EG \rightarrow E1 \rightarrow E2 \rightarrow E1 \rightarrow EG$. Neste ínterim, contudo, o espelho EG girou um ângulo ϕ (Figura 2), o qual é dado pela rotação do motor ao qual está acoplado. Para as distâncias tipicamente adotadas neste experimento, o "tempo de vôo" do

pulso é da ordem de centésimos de μs . O seu valor exato depende da frequência com que o espelho gira, a qual é determinada pelo Varivolt, e medida pelo osciloscópio a partir do sinal que recebe do fotodetector.

Vale lembrar que o espelho giratório EG possui duas faces refletoras. Logo, para cada revolução do espelho giratório, serão observados dois pulsos de luz.

Conforme representado na Figura 2, em seu retorno ao espelho EG, o pulso de luz será agora refletido por um ângulo 2ϕ em relação à situação original. Ainda que a medida do ângulo ϕ seja praticamente impossível, é relativamente simples determinar a separação ΔS entre as duas componentes do *laser* de HeNe. De fato, uma maneira rápida de verificar o alinhamento do sistema consiste em observar que $\Delta S \propto f$.

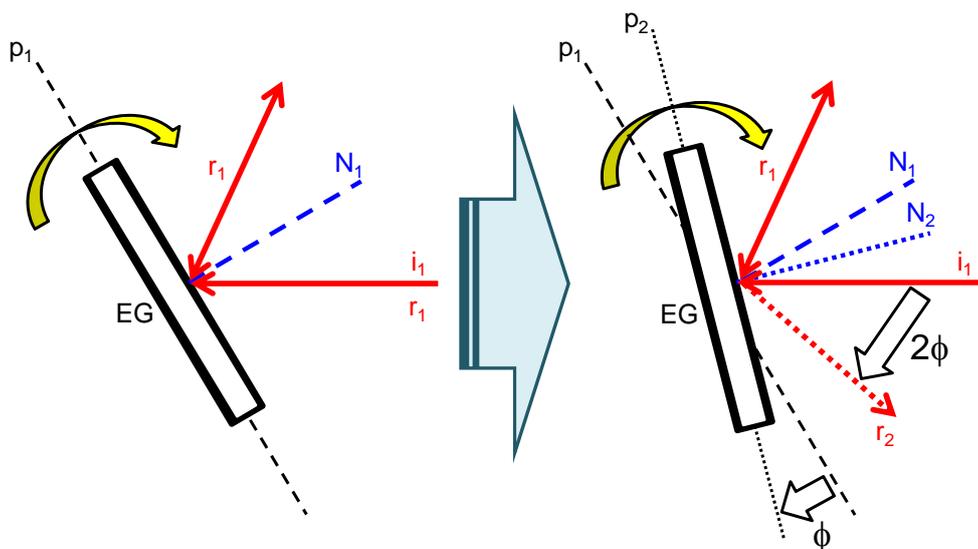


Figura 2 – Representação de duas posições (p_1 e p_2) do espelho giratório EG, com as correspondentes indicações dos feixes de *laser* de HeNe: incidente (i) e refletido (r). De acordo ao diagrama, após girar um ângulo ϕ , o feixe proveniente do espelho E1 será defletido de 2ϕ em relação à incidência original.

Para uma dada frequência f do espelho giratório, o "tempo de vôo" t será dado por:

$$\omega t = \phi \Rightarrow t = \frac{\phi}{2\pi f} \quad (1)$$

Logo, para a situação considerada, a velocidade da luz pode ser obtida a partir da razão entre o espaço percorrido $2d$ (~ 30 m) e o "tempo de vôo" t , conforme determinado pela separação ΔS . Ou seja:

$$v = \frac{2d}{t} \quad \text{e} \quad \Delta S = 2\phi R, \quad (2)$$

onde R corresponde à distância percorrida pelo feixe *laser* entre o espelho giratório EG e a escala graduada (~ 5 m). Note que, o valor de ΔS foi obtido para valores de ϕ muito pequenos – como ocorre no presente experimento. O valor exato para ΔS pode ser obtido a partir de semelhança de triângulos (Figura 1). Tente chegar a este resultado!

Combinando as Eqs. (1) e (2) chegamos, finalmente, ao valor da velocidade da luz:

$$v = \frac{8\pi Rfd}{\Delta S} \quad (3)$$

Medidas experimentais

Variando a tensão do Varivolt (entre 0 e 220 V), construa uma tabela com os valores de frequências e seus respectivos ΔS 's. Lembre-se que a precisão da velocidade da luz, assim determinada, depende da qualidade e da quantidade de dados experimentais obtidos. Assim sendo, procure fazer várias medidas de f e ΔS (ainda que repetidas) para melhorar a análise estatística dos seus resultados.

De posse dos valores de f e ΔS , a velocidade da luz pode ser determinada de duas formas independentes:

- (1) a partir da análise da representação gráfica de ΔS em função da frequência f [Eq. (3)], ou
- (2) a partir de um histograma das velocidades obtidas com cada valor de f e ΔS .

Em ambos os casos, utilize o método dos mínimos quadrados. Compare, e discuta, os resultados obtidos (a partir das duas formas propostas) com aqueles encontrados na literatura.

Questões

! Qual o valor atualmente aceito para a velocidade da luz, e como foi determinado? Discuta brevemente acerca das principais técnicas utilizadas para a determinação de c .

! Explique os conceitos de velocidade de grupo e de velocidade de fase. No experimento em questão, qual velocidade foi medida?

! Caso o presente experimento tivesse sido realizado sob outras circunstâncias tal que o índice de refração fosse diferente de 1, por exemplo, qual correção deveríamos fazer? Faça uma estimativa desta correção para $n = 1.00027$, correspondente ao ar a $15\text{ }^\circ\text{C}$ e 10^5 Pa . Considere $\lambda = 630\text{ nm}$ em seus cálculos.

! Quais os parâmetros envolvidos na velocidade de propagação de uma onda acústica nos meios sólido, líquido e gasoso? Discuta.

! O que é o efeito *Doppler*?

! Discuta a respeito das fotos-figuras apresentadas na primeira página deste roteiro. Você consegue identificá-las todas? O que significam e a que se referem?

Referências

Física Moderna

College Physics (OpenStax College, 2012) <http://cnx.org/content/col11406/latest/>.

Paul Tipler, *Física Moderna* (Guanabara Dois, 1981) – **539^T595f**

Robert Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica* (Ed. Campus, 1979) – **530.12^E36f**

Eletromagnetismo & Óptica

R. Reitz, F. J. Milford, e R. W. Christy, *Fundamentos da Teoria Eletromagnética* (Campus, 1982) – **530.141^R379ft**

E. Hecht, *Optics* (Addison-Wesley, 1974) – **535^H4470**

G. R. Fowles, *Introduction to Modern Optics* (Dover Publications, 1989) – **535^F789i**

História (conforme apresentadas na Introdução)

[1] http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/ama09/pages_idsc/pages_idsc_1676_lumiere.pdf (em Francês) & <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/12/133-142/893> (em Inglês).

[2] [http://www.jstor.org/sici?sici=0021-1753\(194004\)31:2%3C327:RATFDO%3E2.0.CO;2-4](http://www.jstor.org/sici?sici=0021-1753(194004)31:2%3C327:RATFDO%3E2.0.CO;2-4)

[3] http://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_light

Experimento

R. A. DiCurcio, Speed of light with a rotating mirror and a laser, *Phys. Teach.* **16**, 326 (1978) – (<http://dx.doi.org/10.1119/1.2339963>)

Simulações

<http://www.crodog.org/animate/fanimate.html>

<http://www.cabrillo.edu/~jmccullough/Applets/Flash/Optics/RotatingMirror.swf>

Créditos

Ao longo dos anos, este roteiro passou por diversas atualizações e melhorias. Neste processo, tiveram participação ativa os Profs M. A. Aegerter, M. Siu Li, e A. R. Zanatta.

O diagrama apresentado neste roteiro foi extraído do catálogo da *Leybold*.

A foto da montagem experimental (com o detalhe do espelho giratório + detector) foi feita pelo Prof. A. R. Zanatta.

As fotos-figuras apresentadas na pg. 1 foram obtidas da *internet*.