

Interferômetro de Michelson

Introdução

Assim como o interferômetro de *Fabry-Perot*, o interferômetro idealizado por *Albert Michelson* representa uma das configurações ópticas mais comuns para experimentos envolvendo interferência óptica. *Michelson*, em conjunto com *Edward Morley*, utilizou este tipo de aparato para investigar a influência do “éter luminoso” sobre a velocidade da luz [1]. O evento, realizado entre 1880 e 1890 e conhecido como experimento de *Michelson-Morley* deixou clara e inexistência de um meio especial para a propagação da luz e serviu de inspiração para a teoria da relatividade especial, levada a cabo por *Albert Einstein* em 1905 [2]. Em reconhecimento às suas contribuições científicas, *Michelson* foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física em 1907 [3].

Na prática, o interferômetro de *Michelson* consiste de um separador de feixe (espelho semi-refletor) e de dois espelhos planos (um fixo e um móvel) – todos dispostos sobre uma mesma base (Figura 1). A radiação proveniente de uma fonte extensa incide sobre o separador de feixe onde é dividida em duas partes iguais. Estas são dirigidas aos dois espelhos planos onde refletem e tornam a se combinar novamente no separador de feixe. O resultado deste processo é a formação de um padrão de interferência da radiação, o qual é sensível à diferença de caminho óptico entre os dois feixes de radiação. Como o caminho óptico é determinado pelo produto entre o índice de refração (n) e o caminho geométrico (d), é claro que se muitos feixes atravessam um meio de índice de refração n , é possível medir o caminho óptico d . Por outro lado, se o caminho d é igual (ou constante) então é possível determinar o índice de refração n .

Desta forma, o interferômetro de *Michelson* (assim como qualquer interferômetro) pode ser usado para determinar: variações do caminho geométrico (e óptico), bem como o índice de refração do meio de propagação da radiação.

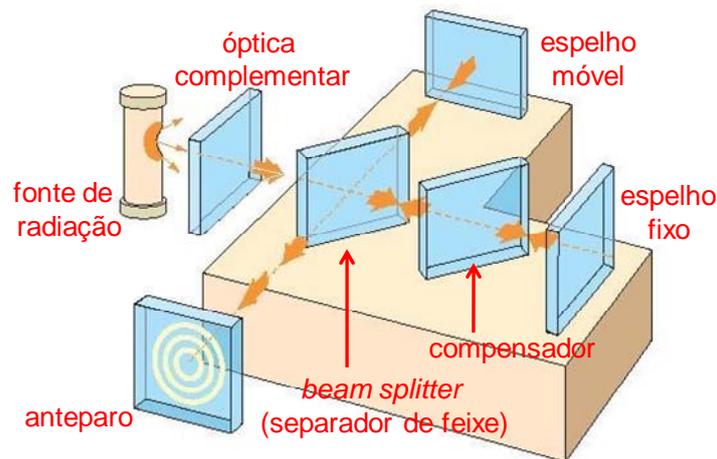


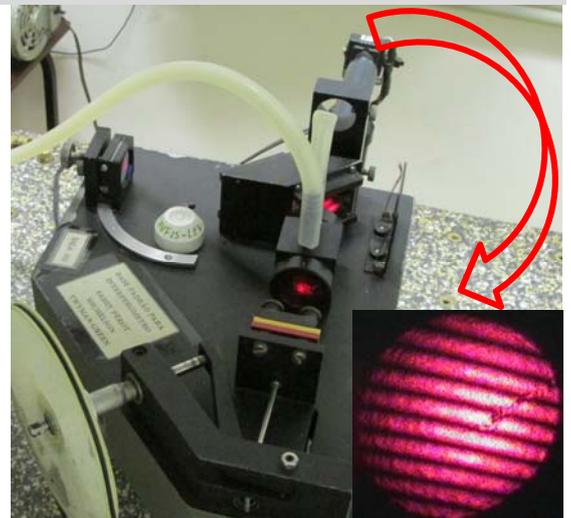
Figura 1 – Representação do interferômetro de *Michelson* e seus principais componentes.

Objetivos

- ☞ Familiarizar-se com técnicas de alinhamento óptico.
- ☞ Caracterizar o interferômetro de *Michelson* (determinação da constante K).
- ☞ Determinação de alguns comprimentos de onda (*laser* de HeNe e lâmpada de Hg filtrada).
- ☞ Investigar a radiação produzida por uma lâmpada de Na (dubleto de Na).
- ☞ Determinar a dependência do índice de refração do gás He e do ar atmosférico em função da pressão (lei de *Gladstone*).

Equipamentos

- 1 interferômetro de *Michelson*
- 1 *laser* de HeNe ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)
- 1 lâmpada de Hg
- 1 filtro para lâmpada de Hg
- 1 lâmpada de Na
- 1 telescópio (câmara CCD)
- 1 cubeta transparente para o gás He
- Lentes, suportes, gás He, bomba de vácuo, manômetro de pressão, etc.



Descrição do Experimento

Este experimento é dividido em três partes principais, conforme será apresentado a seguir. Antes, contudo, façamos uma breve descrição da montagem experimental e o procedimento para alinhar o interferômetro de *Michelson*.

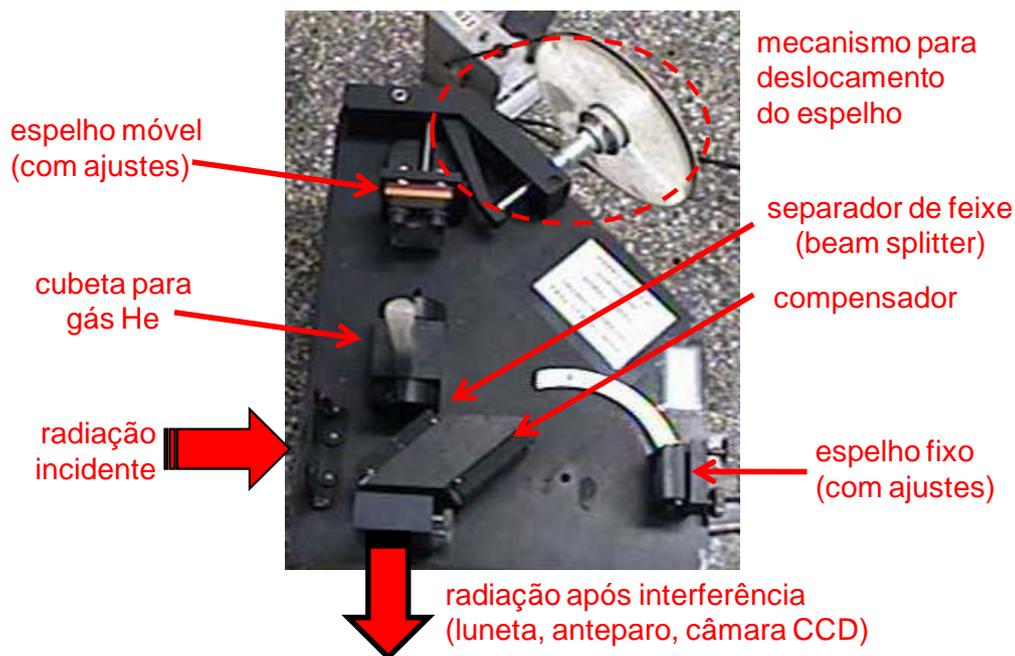


Figura 2 – Representação dos principais componentes do interferômetro de *Michelson*.

Procure fazer com que os dois espelhos (fixo e móvel) tenham suas superfícies refletoras perfeitamente verticais. Ligue o *laser* de HeNe e faça-o incidir, aproximadamente, sobre o centro do separador de feixe. Note que, dada a configuração do interferômetro, o feixe incide sob um ângulo de aproximadamente 45° . Observe as reflexões (múltiplas) produzidas e faça com que estas coincidam ajustando os parafusos de ajuste de um dos espelhos. Na medida em que o interferômetro for se aproximando da condição de alinhamento, deve-se observar a formação de um padrão de franjas.

Nunca observe diretamente a radiação *laser*. Veja o padrão formado em um anteparo (folha de papel, por exemplo) ou, até mesmo, na parede da sala.

Para garantir que o interferômetro esteja alinhado, movimente o mecanismo para deslocar o espelho móvel e verifique se o padrão de franjas se “movimenta”. Caso isto não aconteça, repita o procedimento de alinhamento das reflexões múltiplas. O padrão pode se apresentar sob a forma de franjas paralelas ou circulares. Este último é obtido com o interferômetro perfeitamente alinhado, e é alcançado com o auxílio dos parafusos de ajuste. Uma vez que o interferômetro estiver alinhado evite tocar nos parafusos de ajuste dos espelhos.

Procedimento Experimental

1 – Medida do comprimento de onda de fontes de radiação monocromática

Laser de He-Ne

Eventualmente, será necessário colocar um sistema de lentes entre o *laser* e a entrada do interferômetro para expandir o feixe de radiação. Tente projetar o padrão de interferência em uma tela ou na parede da sala. Anote a leitura do micrômetro que controla o deslocamento de um dos espelhos. Vire-o para valores de leitura maiores, enquanto observa o padrão das franjas – verá que vão desaparecendo no centro. Conte ao menos $m = 100$ franjas de

deslocamento e faça uma nova leitura do micrômetro. Feito isto, temos condições de verificar o comprimento de onda λ do *laser* de HeNe através da seguinte relação:

$$\lambda = \frac{2(d_1 - d_2)}{\Delta m} = \frac{2K(D_1 - D_2)}{\Delta m}, \quad (1)$$

onde: d e D correspondem às distâncias do espelho móvel ao separador de feixe (esta última multiplicada por um fator de correção K) – em duas situações distintas (1 e 2). Verifique que o procedimento resulta no comprimento de onda esperado para o *laser* de HeNe como, também, fornece um valor de K próximo ao fornecido pelo fabricante do interferômetro (neste caso, verifique a informação contida no manual). Enquanto este procedimento ilustra o princípio de funcionamento do interferômetro, valores mais precisos para K e para λ são conseguidos a partir de uma representação gráfica: $\Delta m \times \Delta D$ (assumindo-se $\lambda_{\text{HeNe}} = 632.8 \text{ nm}$) para determinar K , e $\Delta D \times \Delta m$ (com o valor de K conhecido) para a determinação do λ_{HeNe} . Como sugestão, procure fazer 7–10 contagens de franjas anotando os Δm 's correspondentes. (Nota: embora possa parecer estranho... este procedimento iterativo serve para garantir que o valor de K encontrado experimentalmente produzirá bons resultados no decorrer da prática).

Luz de Hg filtrada

Repita a experimento anterior substituindo o *laser* de HeNe por uma lâmpada de Hg de baixa pressão acoplada a um filtro verde ($\sim 546 \text{ nm}$). Um bom padrão de franjas de interferência é conseguido na medida em que boa parte do separador de feixe estiver iluminado, sugerindo a necessidade de lentes apropriadas para consegui-lo. Assim como no caso anterior, nunca olhe diretamente para a radiação produzida pela lâmpada. Além disto, faça uso de um anteparo para ver as franjas de interferência, ou atenua a intensidade da lâmpada de forma a poder observá-las diretamente. Com as franjas de interferência evidentes, conte-as em números regulares (Δm 's), sempre anotando os deslocamentos (ΔD 's) correspondentes. A partir da Eq.(1), e de uma representação gráfica adequada, determine o λ_{Hg} .

Em ambos os casos (*laser* de HeNe e lâmpada de Hg) compare os resultados obtidos com aqueles esperados.

Refleta se é possível realizar o experimento sem o filtro óptico verde. Qual é a relação com a coerência temporal? O mesmo experimento pode ser feito sem filtro óptico ou utilizando outros filtros.

2 – Medida da separação do dubleto de Na

A emissão produzida pelo chamado dubleto de Na consiste de duas linhas espectrais (muito próximas) na região do amarelo: em 589.0 e 589.6 nm (Figura 3). Nesta parte do experimento, portanto, pretendemos determinar os λ 's emitidos por uma lâmpada de Na e verificar o poder de resolução do interferômetro utilizado.

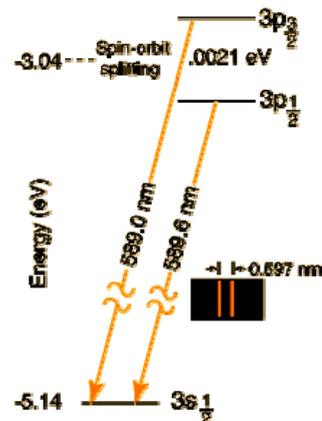


Figura 3 – Níveis de energia do Na.

Assim que substituimos a lâmpada de Hg pela de Na veremos a formação de um novo padrão de franjas de interferência. Neste caso, no entanto, é possível observar pares de

Analise a importância do pinhole posicionado em frente à lâmpada e discuta sua relação com a coerência espacial da luz. É possível comparar diferentes situações, tanto sem o uso do pinhole quanto com pinholes de diferentes diâmetros.

franças (muito próximas), devido à interferência dos λ_1 's e λ_2 's do dubleto de Na. Qualquer deslocamento do espelho móvel fará com que as franças de interferência se movimentem. A contagem do número de franças (Δm), contudo, deve ser feita levando-se em consideração situações de alto e baixo contraste. O primeiro caso (alto contraste ou pares de franças muito nítidas) ocorre quando λ_1 e λ_2 encontram-se exatamente em fase. Considerando-se que $\lambda_1 \sim \lambda_2$, a condição de baixo contraste corresponde à situação em que λ_1 e λ_2 estão fora de fase, porém não se anulam completamente, ou seja, os pares de frança ficam "borrados". Uma vez identificada esta alternância entre situações de alto e baixo contraste, passe a anotar os ΔD 's (ou Δd 's) correspondentes. Repita o procedimento várias vezes e calcule o valor médio da distância D (ou d) entre as condições de baixo contraste.

Na primeira vez em que isto ocorrer, teremos (considerando-se $\lambda_1 > \lambda_2$):

$$2d_1 = m_1\lambda_1 = (m_1 + n + 1/2)\lambda_2, \quad (2)$$

e para a segunda vez:

$$2d_2 = m_2\lambda_1 = (m_2 + n + 3/2)\lambda_2, \quad (3)$$

Combinando-se as Eqs. (2) e (3) temos, finalmente:

$$2(d_2 - d_1) = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (4)$$

Como λ_1 e λ_2 são próximos:

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d}. \quad (5)$$

O valor médio de λ pode, então, ser determinado a partir de um procedimento análogo ao adotado na 1ª parte da prática. Compare o valor assim obtido com o indicado pela literatura.

3 – Dependência do índice de refração de um gás com a pressão

Gás He

Em adição aos equipamentos usados até então (interferômetro+fontes de radiação), nesta parte da prática também serão necessários: cubeta para gás He, uma bomba (rotativa) de vácuo, um manômetro, uma válvula tipo agulha ou semelhante, conexões para vácuo, etc.

Com o interferômetro devidamente alinhado, em um dos seus braços, monte a cubeta e faça vácuo em seu interior. A partir desta condição, insira gás He no interior da cubeta e libere-o logo em seguida (*flushing*). Repita este processo (vácuo + gás He + liberação) por 2–3 vezes a fim de garantir a "limpeza" da cubeta. Feito isto, o experimento pode ser iniciado: evacue a cubeta e preencha-a com gás He até uma determinada pressão. Anote este valor e (muito lentamente) permita que o gás He deixe a cubeta. Registre a variação no número de franças durante o processo. Repita o processo até esvaziar a cubeta – sempre registrando as variações observadas. Neste caso, o índice de refração n do gás He será dado por:

$$2t(n-1) = \lambda\Delta N, \quad (6)$$

onde t corresponde ao caminho geométrico através da cubeta, λ é o comprimento de onda da fonte de radiação utilizada (idealmente, $\lambda_{\text{HeNe}} = 632.8$ nm), e ΔN indica a variação do número de franças à medida que a pressão é variada.

Considerando que a densidade de um gás é função linear da pressão, verifique em uma representação gráfica a linearidade da lei de Gladstone:

$$\frac{n-1}{\rho} = \text{const} . \quad (7)$$

Ar atmosférico

No caso do ar atmosférico, o procedimento é similar ao que acabamos de fazer. Evacue a cubeta e alinhe o interferômetro de forma a ter um bom padrão de franjas de interferência. Isole a cubeta fechando a válvula que a conecta à bomba de vácuo e, muito lenta e gradativamente, permita que o ar atmosférico preencha a cubeta. Na medida em que o ar atmosférico for preenchendo a cubeta, fica evidente a movimentação das franjas de interferência. Conte o número de franjas registrando, ao mesmo tempo, a pressão indicada pelo manômetro. Com estes resultados em mãos, pode-se fazer uma análise semelhante à do gás He. Além disto, podemos determinar o índice de refração do ar atmosférico sob condições normais (i.e., $T = 0^\circ\text{C}$ e $P = 760\text{ mmHg}$).

Em ambos os casos considerados (He e ar), os valores encontrados e os comportamentos observados concordam (dentro da precisão experimental) com o esperado? Se não, por quê? (Lembre que a lei de *Gladstone* é linear e que a Teoria Cinética de um gás perfeito – onde o ar pode ser enquadrado – mostra que, à pressão constante, a densidade ρ é inversamente proporcional à temperatura absoluta do gás.)

Questões

- ! Justifique a Equação (1), a partir da condição para ter interferência construtiva.
- ! Discuta o uso do interferômetro de *Michelson* para definir o metro padrão em termos do comprimento de onda do Kriptônio 86.
- ! Discuta a experiência de *Michelson-Morley* e sua função na Teoria Especial da Relatividade.
- ! Descreva a montagem de um interferômetro de microondas. Comente outros tipos de interferômetros.
- ! Por que é mais fácil observar franjas de interferência com uma fonte *laser* ao invés de uma fonte convencional?
- ! Mencione outros possíveis métodos para medir o comprimento de onda da luz. Que outros tipos de medida pode-se fazer com um interferômetro?
- ! Comente a variação do índice de refração com o comprimento de onda.
- ! Compare os interferômetros *Fabry-Perot* e *Michelson* em termos do poder de resolução.
- ! Identifique e discuta a respeito das figuras apresentadas na primeira página deste roteiro.

Referências

Física Moderna

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

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

A. C. Melissinos, *Experiments in Modern Physics* (Academic Press, 1966) – **539^M523e**

Óptica e Interferômetros

A. F Jenkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics* (Mc. Graw-Hill, 1950) – **535^J52f2**

M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (Cambridge University Press, 1999) – **535^B736p**

M. Françon, *Optical Interferometry* (Academic Press, 1966) – **535.4^F826o**

J. R. Meyer-Arendt, *Introduction to Classical and Modern Optics* (Prentice Hall, 1989) – **535^M612i**

História (conforme apresentadas na Introdução)

[1] http://en.wikisource.org/wiki/The_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Luminiferous_Ether,
https://en.wikisource.org/wiki/Index:On_the_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Luminiferous_Ether.djvu

[2] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1905_17_891-921.pdf,
<http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/>

[3] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1907/michelson.html

Simulações

Site da Universitat de Barcelona (<http://www.ub.edu/javaoptics/applets/MichelEn.html>)

Site do Dr Tim McIntyre (*School of Physical Sciences, The University of Queensland, Brisbane, Australia*) <http://www.physics.uq.edu.au/people/mcintyre/applets/michelson/michelson.html>

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.

A foto da montagem experimental (com o detalhe do padrão de interferência do *laser* de HeNe) foi feita pelo Prof. M. Siu Li.

Os padrões de interferência e foto-figuras apresentadas na pg. 1 foram obtidos da *internet*.