

Exp. 14

Interferômetro de Michelson

FSC2144 - Laboratório de Física IV

Versão de 12 de maio de 2024

1 Objetivos

Utilizar um interferômetro de Michelson para determinar

- o comprimento de onda da luz do laser de He-Ne;
- o índice de refração do ar.

2 Um pouco de história: experimento de Michelson-Morley

Inúmeros experimentos objetivando a comprovação da existência do *éter*, suposto meio de propagação da luz, foram realizados no fim do século XIX e início do XX. O principal articulista destes experimentos foi o físico polonês naturalizado estadunidense Albert A. Michelson, primeiro estadunidense a ser contemplado com o prêmio Nobel de Física, em 1907. O prêmio lhe foi concedido graças a uma série de medidas realizadas em 1887 que ficaram conhecidas como experimento de Michelson-Morley¹. Neste experimento, utilizando um interferômetro ótico, pretendia-se detectar desvios na velocidade da luz a depender da sua direção de propagação e da época do ano. A ideia era conseguir captar o movimento da Terra (que efetua órbita aproximadamente circular em torno do Sol) em relação ao suposto éter presente no espaço. Tal movimento relativo geraria pequenos desvios na velocidade da luz, detectáveis pelo interferômetro. Entretanto, nenhum resultado experimental, em nenhuma época do ano, mostrou os esperados desvios na velocidade da luz nas várias direções possíveis relativamente ao éter.

O resultado negativo da experiência enfraqueceu a hipótese (amplamente aceita na época) da existência do éter. A hipótese foi testada novamente nos anos seguintes, com experimentos cada vez mais precisos e sensíveis, porém sempre dando resultado negativo. As evidências experimentais levaram Albert Einstein a propor, em 1905, a Teoria da Relatividade Especial, a partir da hipótese de que a velocidade da luz era constante em todos os referenciais inerciais.

Na atualidade, este tipo de experimento preserva sua importância enquanto teste fundamental. Experimentos recentes usando ressonância ótica, capazes em tese de medir variações relativas da ordem de 10^{-17} na velocidade da luz, nada detectaram, confirmando até o presente momento a ausência do éter.

¹ Edward W. Morley, físico estadunidense.

3 Descrição de um Interferômetro de Michelson

Um interferômetro ótico é um dispositivo que se presta à observação de franjas de interferência entre feixes de luz. Em geral, num interferômetro, toma-se um feixe de luz proveniente de uma fonte, divide-se o feixe em dois e, finalmente, recombina-se espacialmente os feixes para que eles interfiram entre si. A figura de interferência pode ser observada num anteparo ou através de uma câmera, por exemplo.

Um feixe pode ser dividido em dois utilizando-se um semiespelho, elemento ótico que reflete a luz apenas parcialmente, transmitindo o restante. Um semiespelho 50/50, por exemplo, reflete 50% da potência luminosa e transmite os outros 50%. Um semiespelho pode também ser chamado separador (ou divisor) de feixes.

Existem diversas formas de implementar um interferômetro ótico, com diferentes geometrias de trajeto. Três exemplos são mostrados na figura 1. O interferômetro de Michelson, o mesmo utilizado no experimento de Michelson-Morley, será o objeto do nosso estudo nesta experiência.

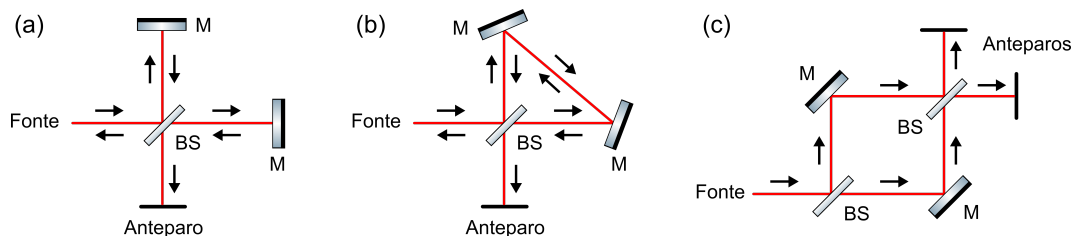


Figura 1 Tipos de interferômetro. (a) Interferômetro de Michelson, (b) Interferômetro de Sagnac e (c) Interferômetro de Mach-Zehnder. BS (beam splitter) = divisor de feixes; M (mirror) = espelho.

Um interferômetro de Michelson, como ilustra a figura 2a, tem dois *braços*, de comprimentos d_1 e d_2 . Entende-se por braço o trajeto percorrido pela luz entre o ponto de divisão de feixes e o ponto de recombinação. A luz proveniente da fonte é dividida em dois feixes por um semiespelho 50/50. A porção refletida é direcionada a um espelho e refletida de volta em direção ao divisor de feixes. O mesmo acontece com a luz transmitida, que é enviada de volta ao divisor de feixes por um segundo espelho. Cada feixe é, portanto, enviado a um braço do interferômetro, para em seguida serem recombinados e interferirem entre si. Uma parte da luz recombinada volta em direção à própria fonte, enquanto a outra pode ser projetada sobre um anteparo e analisada, dando informações sobre o processo de interferência.

3.1 Interferência construtiva ou destrutiva?

O padrão de interferência é composto por franjas luminosas. Franjas claras correspondem a regiões onde ocorre *interferência construtiva*. Já franjas escuras correspondem à *interferência destrutiva*.

A interferência **construtiva** é resultado da superposição de duas ondas *em fase* (ou seja, com a mesma fase). Isto ocorre quando a diferença de caminho ótico, a qual

denotaremos ΔL , desde o ponto de separação dos feixes até o ponto de observação (anteparo) é nula ou múltipla de λ :

$$\Delta L = m\lambda, \quad m \in \mathbb{Z}. \quad (1)$$

A interferência **destrutiva** é resultado da superposição de duas ondas *em oposição de fase* (ou seja, com uma diferença de fase de π), o que ocorre quando a diferença de caminho óptico desde o ponto de separação dos feixes até o ponto de observação (anteparo) é de meio comprimento de onda (mod λ), ou seja:

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2} + m\lambda, \quad m \in \mathbb{Z}. \quad (2)$$

Note que, num interferômetro de Michelson perfeitamente alinhado, a diferença de *caminho* é o dobro da diferença de *comprimento* entre os braços,

$$\Delta L = 2(d_1 - d_2), \quad (3)$$

já que a luz vai e volta ao percorrer um braço, indo do divisor de feixes até o espelho e de este até o divisor de feixes novamente.

3.2 Padrões de interferência

Dependendo da maneira como os dois feixes são alinhados, as figuras de interferências obtidas podem mostrar franjas na forma de anéis concêntricos (figura 2a) ou linhas paralelas (figura 2b).

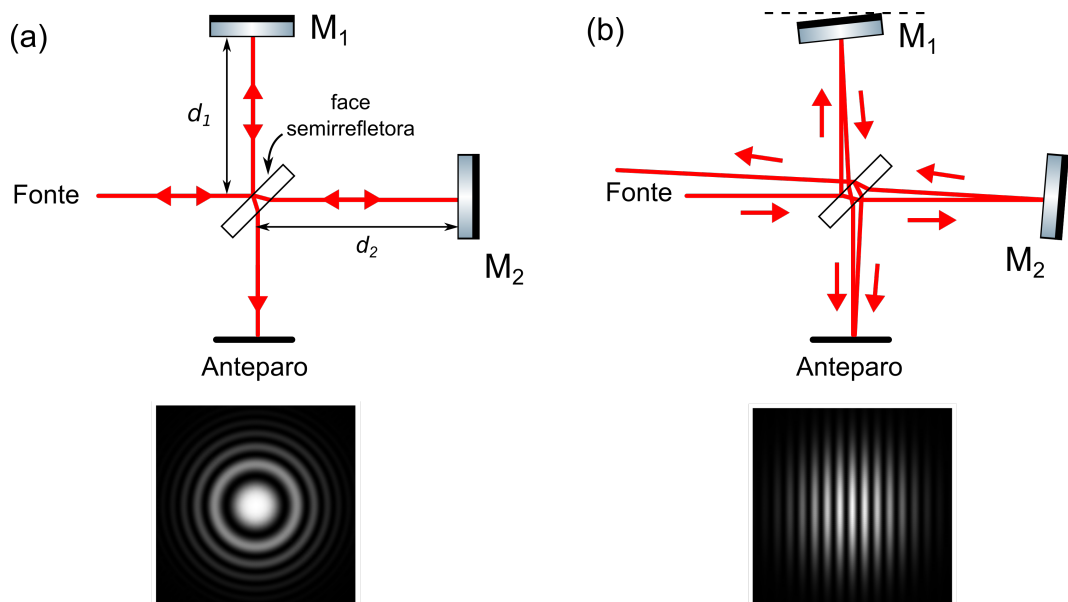


Figura 2 Interferômetro de Michelson. As franjas podem se apresentar em formato de (a) anéis concêntricos, caso os feixes estejam perfeitamente alinhados após recominação, ou de (b) linhas paralelas, caso haja ligeiro desalinhamento entre os feixes após recominação.

3.2.1 Franjas anelares concêntricas

Franjas anelares formam-se quando os feixes provenientes de cada braço chegam ao anteparo perfeitamente alinhados entre si. Por razões ligadas à difração de feixes de laser no espaço livre, quanto maior a diferença de comprimento dos braços, maior o número de anéis visíveis². Quando os braços têm tamanhos suficientemente próximos, os anéis desaparecem e forma-se uma figura uniforme: totalmente clara em caso de interferência construtiva ou totalmente escura em caso de interferência destrutiva.

3.2.2 Franjas paralelas

Franjas paralelas ocorrem quando os feixes provenientes de cada braço chegam ao anteparo formando um pequeno ângulo entre si. As franjas formadas alinham-se com a direção perpendicular ao plano que contém os dois feixes.

4 Sobre o experimento

A fonte utilizada no experimento é um laser de He-Ne, que fornece luz quase monocromática na cor vermelha. Realizaremos duas medidas: a do comprimento de onda do laser (λ) e a do índice de refração do ar nas condições ambientes de temperatura e pressão (n_{ar}).

O comprimento de onda do laser é especificado pelo fabricante: 632,8 nm. O valor do índice de refração do ar nas condições normais de temperatura e pressão é cerca de 1,00029, ou seja, muito próximo do índice de refração do vácuo, que vale 1, por definição.

4.1 Determinação do comprimento de onda, λ

Como vimos acima, a disposição das franjas no anteparo depende do alinhamento do interferômetro e também da diferença de caminho percorrido entre os feixes. É possível variar esta diferença (transladando um dos espelhos, por exemplo) e observar as franjas se deslocarem no anteparo.

Uma variação de $\Delta d = \lambda/2$ no comprimento de um dos braços, desloca as franjas de exatamente um período, recuperando o padrão de interferência. Isto ocorre pois a variação na diferença de *caminho* é de $\Delta L = \lambda$. Já uma variação de $\Delta d = \lambda/4$, ou

² Ao se propagarem, os feixes perdem colimação naturalmente, tendo seu diâmetro aumentado e conferindo uma certa curvatura à sua frente de onda. Na interferência de dois feixes que se originaram da mesma fonte, mas se propagaram por distâncias suficientemente distintas, as frentes de onda que se encontram têm curvaturas distintas. Assim, elas não “casam” perfeitamente e surge o padrão de interferência anelar.

seja, diferença de caminho $\Delta L = \lambda/2$, faz aparecer franjas claras onde antes havia franjas escuras (e vice-versa).

Estas propriedades fazem com que possamos usar o interferômetro ótico para medir o comprimento de onda da luz nele injetada.

Na nossa montagem, a distância entre os espelhos 1 e 2 pode ser variada movimentando-se o espelho 1 através de um micrômetro (parafuso micrométrico) acoplado a uma alavanca. Esta alavanca permite reduzir o deslocamento do micrômetro por um fator 20. Assim, ao mover o espelho 1, sempre que N franjas de interferência passarem por um ponto de referência determinado por uma das franjas do padrão inicial,

- a diferença de caminho entre os feixes terá variado de $\Delta L = N\lambda$;
- o espelho terá se deslocado de $\Delta d = N(\lambda/2)$; e
- o parafuso micrométrico terá avançado $\Delta x = 20N(\lambda/2)$.

Medir o deslocamento do parafuso do micrômetro em função de N permite que o comprimento de onda λ seja determinado.

4.2 Determinação do índice de refração do ar, n_{ar}

No vácuo ($n = 1$), a fase acumulada por uma onda plana que se propaga por uma distância ℓ é $\phi = k\ell$, onde $k = 2\pi/\lambda$ é o conhecido *número de onda*. Porém, se a propagação ocorre num meio material de índice de refração $n > 1$, a fase acumulada é maior: $\phi = nk\ell$, o que pode ser reescrito como $\phi = kL$, onde $L = n\ell$ é o comprimento ótico e ℓ o comprimento geométrico.

O caminho ótico do trajeto luminoso pode ser alterado independentemente de manipulação mecânica dos espelhos e dos comprimentos geométricos dos braços. Se um objeto transparente, de comprimento ℓ e índice de refração n , for inserido no caminho do feixe luminoso, por exemplo, entre o espelho 1 e o separador de feixe, haverá mudança no caminho ótico, deslocando as franjas de interferência. Se o índice de refração do ar é n_{ar} , a inserção do objeto causará um aumento de caminho ótico igual a $\Delta L = 2\ell(n - n_{ar})$. Em termos de defasagem adicional, isto corresponde a

$$\Delta\phi = k\Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} 2\ell(n - n_{ar}); \quad (4)$$

e, em número de “franjas deslocadas”,

$$N = \frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{2\ell(n - n_{ar})}{\lambda}. \quad (5)$$

Nesta experiência, vamos determinar o índice de refração do ar, n_{ar} , inserindo num dos braços do interferômetro um recipiente de vidro transparente (cuba) de comprimento ℓ preenchido com ar e acoplado a uma pequena bomba de vácuo manual. Ao bombear parte do ar para fora da cuba, diminuimos a pressão dentro dela, o que também diminui o índice de refração em seu interior. Isto causará um deslocamento de franjas descrito pela Eq. (5) acima.

O índice de refração do ar depende linearmente da pressão p , de acordo com a equação

$$n(p) = n(0) + \alpha p, \quad (6)$$

onde $n(0) = 1$ é o índice de refração do vácuo e $\alpha \equiv \Delta n / \Delta p = \text{cte}$ é a taxa de variação do índice de refração em relação às variações de pressão.

A estratégia para obter n_{ar} será determinar experimentalmente a constante α e substituí-la na expressão:

$$n_{\text{ar}} = n(p_{\text{atm}}) = 1 + \alpha p_{\text{atm}}, \quad (7)$$

onde p_{atm} é a pressão atmosférica.

Para determinar α experimentalmente, basta causar uma variação de pressão Δp negativa no interior da cuba usando uma bomba de vácuo manual e medir a variação correspondente no índice de refração, Δn , que também será negativa. Esta é obtida através da observação do número de franjas deslocadas, como prevê a Eq. (5):

$$\Delta n = -\frac{\lambda}{2\ell} N, \quad (8)$$

o que dá

$$\alpha \equiv \frac{\Delta n}{\Delta p} = -\frac{\lambda}{2\ell} \frac{N}{\Delta p}, \quad (\Delta p < 0). \quad (9)$$

5 Referências Bibliográficas

- Eisele, Ch; Nevsky, A. Yu.; Schillerv, S. (2009). *Laboratory Test of the Isotropy of Light Propagation at the 10^{-17} level*. Physical Review Letters **103** (9): 090401. doi:10.1103/PhysRevLett.103.090401
- Halliday, Resnick e Walker, *Fundamentos de Física*, Vol.3, Ed. LTC

6 Relação do material

- 01 laser de gás de Hélio-Neônio
- 01 lente de distância focal $f_1 = 50$ mm
- 01 lente de distância focal $f_2 = 100$ mm
- 01 lâmina separadora de feixes
- 02 espelhos planos em suportes com regulagem de ângulo
- 01 parafuso micrométrico com alavanca
- 01 cuba de vidro com ar
- 01 bomba de vácuo manual

7 Esquema Experimental

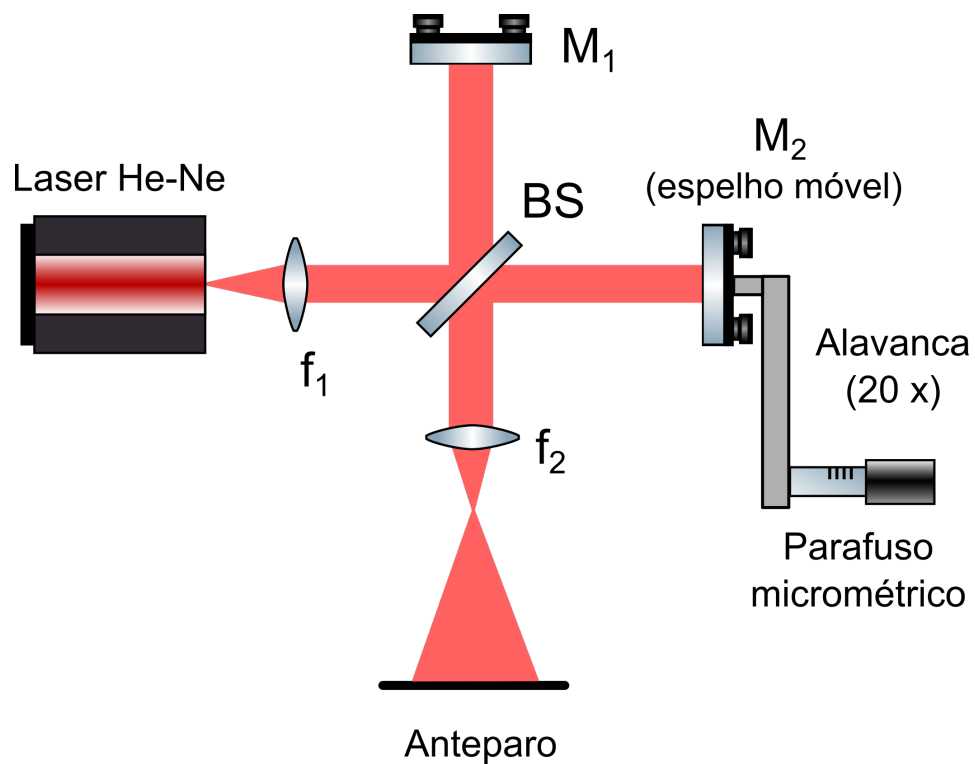


Figura 3 Esquema de montagem do interferômetro de Michelson.

8 Procedimento Experimental

8.1 Ajustes iniciais

1. Ligue o laser. Posicione a lente de foco $f_1 = 50$ mm de modo a colimar o feixe.
2. Faça o alinhamento do feixe colimado dirigindo-o diretamente ao espelho 1. Ajuste o espelho 1 de modo que o feixe retorne sobre si mesmo e que a propagação seja em um plano paralelo ao plano da bancada.
3. Coloque o semiespelho no caminho do feixe, produzindo um segundo feixe. Ajuste o semiespelho para que o segundo feixe se propague formando um ângulo de 90° com o primeiro.
4. Coloque o outro espelho (espelho 2) no caminho do segundo feixe, fazendo-o refletir de volta sobre si mesmo e sobre o semiespelho. Mantenha as distâncias entre os espelhos e o semiespelho iguais ($d_1 = d_2$).
5. Utilizando os parafusos localizados atrás dos espelhos, faça com que os feixes se recombinem em um anteparo. Use a lente de focal $f_2 = 100$ mm antes do anteparo para expandir o feixe e obter melhor visualização das franjas.
6. Tente observar as franjas inicialmente em linhas paralelas e, com alinhamento fino, observar os anéis concêntricos.

8.2 Medida do comprimento de onda do laser

1. Utilizando o parafuso micrométrico (de deslocamento longitudinal), movimente o espelho 1 e veja o deslocamento das franjas de interferência em anéis concêntricos. O objetivo será medir o número de franjas deslocadas em função do deslocamento Δx do parafuso micrométrico.
2. Faça a leitura da posição inicial no parafuso micrométrico, x_{inicial} . Anote, na tabela I, as posições x para as quais são observados os deslocamentos de N franjas com $N = 10, 20, 30, 40, 50$ e 60 .

8.3 Medida do índice de refração do ar

1. Coloque a cuba de vidro contendo ar no seu interior no caminho do feixe em um dos braços do interferômetro.
2. Faça gradativamente vácuo na cuba com o auxílio da bomba de vácuo manual.

ATENÇÃO. Em hipótese alguma reduza a pressão abaixo de 200 mbar! (A pressão atmosférica é de 1000 mbar. A pressão de 200 mbar recebe a marca de -800 mbar no manômetro, valor que é medido em relação à pressão atmosférica.)

3. Meça a pressão p na cuba em função do número N de franjas deslocadas. Anote os valores de p e N na tabela II.

9 Questionário

1. Faça um gráfico do deslocamento Δx versus o número de franjas deslocadas N . Efetue a regressão linear e verifique se os dados experimentais são compatíveis com uma relação linear.
2. Sabendo que o fator de alavanca, ou seja, a razão entre o deslocamento do parafuso e o deslocamento do espelho, é de 20:1, calcule o comprimento de onda do feixe luminoso do laser de He-Ne e sua incerteza. O resultado final é compatível com o valor de λ fornecido pelo fabricante (632,8 nm)?
3. Faça um gráfico da pressão p versus número de franjas deslocadas N e determine o coeficiente $\Delta p/\Delta N$. Qual a interpretação física deste coeficiente?
4. Determine, a partir do gráfico, a equação experimental que mostra a dependência de n para com p .
5. Calcule n_{ar} e sua incerteza. Compare o valor obtido com o tabelado ($n_{\text{ar}} = 1,00029$ nas CNTP). Estes valores são compatíveis? Tente explicar o motivo de eventuais diferenças encontradas.
6. O índice de refração de um gás depende da temperatura e da pressão. Descreva um experimento que evidenciaria a dependência do índice de refração do ar com a temperatura.

