

Laboratório de Estrutura da Matéria II

Interferômetro de Michelson

PRINCÍPIO E OBJETIVOS

Franjas de interferência são observados no arranjo do interferômetro de Michelson, permitindo a medida de comprimentos de onda e índices de refração.

TÓPICOS RELACIONADOS

Interferência, coerência, propagação de ondas eletromagnéticas, laser, interferômetro de Michelson, caminho ótico, índice de refração.

EQUIPAMENTO

Laser de He-Ne, interferômetro de Michelson (formado por espelhos semi e totalmente refletivos), trilho ótico, lentes e suportes, anteparo, bomba de vácuo manual, manômetro, célula para armazenamento de gás, mangueira de silicone.

TAREFAS EXPERIMENTAIS

1. Determinar o comprimento de onda de um laser de He-Ne utilizando o interferômetro de Michelson.
2. Determinar o índice de refração do ar utilizando o interferômetro de Michelson e a célula de gás contendo ar a pressões variáveis.

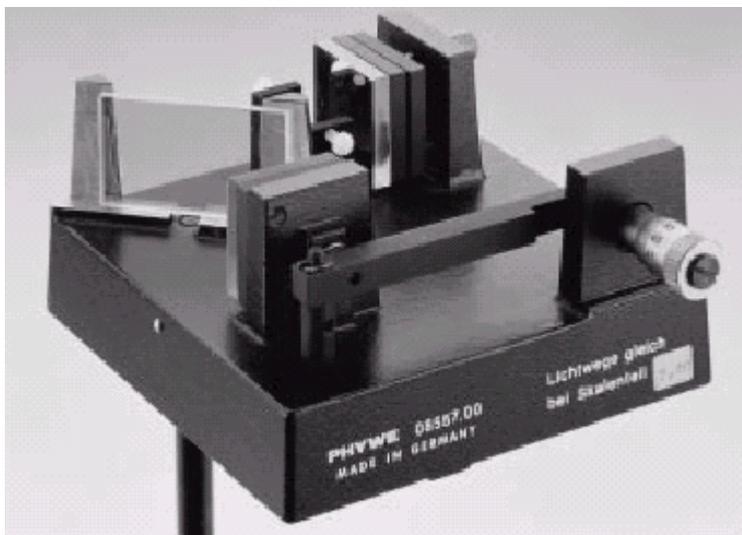
PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

A. Ajustes preliminares:

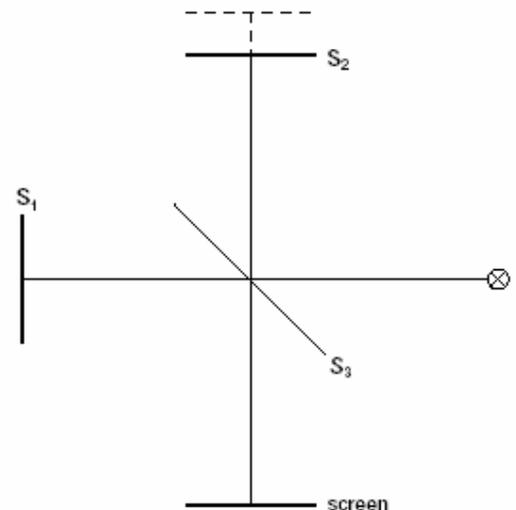
1. O arranjo experimental está esquematizado na Fig. 1 e uma visão detalhada do interferômetro encontra-se na Fig. 2a. A trajetória dos feixes que causam o padrão de interferência está ilustrada na Fig. 2b. O feixe laser incide sobre o espelho semi-refletor S_3 central segundo um ângulo de incidência de 45° , sendo então dividido em dois feixes perpendiculares. Estes são refletidos pelos outros dois espelhos cruzados (S_1 e S_2) e a seguir direcionados para o anteparo de observação.
2. Para estabelecer o alinhamento do sistema, remova inicialmente a lente, de modo que os feixes laser que chegam à tela produzam imagens pontuais. Ajuste os dois parafusos localizados atrás do espelho S_1 (localizado ao longo da direção inicial do feixe), de modo que essas duas imagens coincidam na tela de observação.



Fig. 1: Arranjo experimental para utilização do interferômetro de Michelson.



(a)



(b)

Fig. 2: (a) Visualização detalhada do interferômetro de Michelson. (b) Trajetória dos feixes que dão origem ao padrão de interferência. \otimes = fonte laser; S_1 = espelho fixo; S_2 = espelho móvel; S_3 = espelho semi-refletor divisor do feixe.

3. Posicione a lente convergente (distância focal = +20 mm) no trilho óptico aproximadamente a meio caminho entre o laser e o interferômetro, de forma a produzir uma imagem real pontual que será a fonte de luz para o interferômetro (ver Fig. 3). Com isso os dois feixes produzirão na tela imagens circulares estendidas. Com um reajuste fino dos dois parafusos de controle do espelho S_1 , um padrão

de interferência deverá ser agora observado com nitidez, formado por franjas circulares concêntricas. Reduza a iluminação ambiente para facilitar a visualização das franjas.

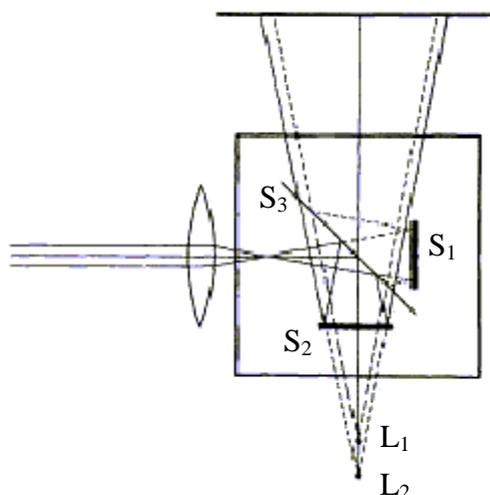


Fig. 3: Ilustração do processo de formação de franjas circulares de interferência, mostrando as imagens virtuais da fonte formadas a partir das reflexões sucessivas nos três espelhos.

B. Determinação do comprimento de onda do laser de He-Ne:

4. A distância entre o espelho S_2 e o espelho semi-refletor central pode ser ajustada através de um parafuso micrométrico concatenado ao espelho S_2 . Gire este parafuso até que o centro da figura de interferência seja formado por uma franja escura (interferência destrutiva).
5. Prossiga girando o parafuso micrométrico no mesmo sentido e observe a alternância de máximos e mínimos de interferência no centro da figura projetada. (Se o sentido de rotação for invertido podem ocorrer erros de medida devido à possível presença de algum atraso de sincronismo entre os movimentos do parafuso micrométrico e do espelho.) A distância percorrida pelo espelho S_2 durante a rotação do parafuso micrométrico é determinada dividindo-se a leitura do micrômetro por 10, devido ao fator de redução da conexão em alavanca entre espelho e o parafuso micrométrico (Fig. 2a). Uma graduação na escala do parafuso micrométrico corresponde portanto a um deslocamento de $1 \mu\text{m}$ do espelho.
6. Anote a distância percorrida pelo espelho S_2 a cada 5 alternâncias de mínimos no centro da figura de interferência, até completar o maior número possível de alternâncias. Se eventualmente o centro da figura de interferência deslocar-se para fora da área iluminada reajuste os parafusos de controle do espelho S_1 . Repita essa série de medidas no mínimo três vezes.

C. Determinação do índice de refração do ar:

7. Reajuste o parafuso micrométrico para obter novamente um mínimo no centro da figura de

interferência.

8. Posicione a célula para armazenamento de gás, contendo ar à pressão atmosférica, no espaço apropriado localizado diante do espelho S_1 (ver Fig. 2a). Mantenha a saída da célula fechada e conecte a entrada à bomba de vácuo manual, através de uma mangueira de silicone.
9. Reduza gradualmente a pressão dentro da célula, utilizando a bomba manual. Durante esse processo, verifica-se uma alternância de máximos e mínimos no centro da figura de interferência projetada no anteparo de observação.
10. Anote a variação de pressão Δp (lida diretamente no manômetro) correspondente a cada mínimo detectado.
11. Repita o procedimento acima no mínimo três vezes para obter medidas precisas das pressões em que ocorrem os mínimos. Abra a válvula da bomba manual no princípio de cada série de medidas, de forma que o ar na célula retorne à pressão ambiente.

CUIDADOS QUE DEVEM SER TOMADOS EM LABORATÓRIO

1. Nunca olhe diretamente para o feixe laser, o que pode causar danos irreversíveis ao sistema visual do observador.
2. O interferômetro é um equipamento delicado e preciso, cujo manuseio requer *atenção e cuidado* para evitar danos ao equipamento e prejuízo na qualidade das medidas efetuadas.
3. O bom funcionamento do interferômetro depende fundamentalmente do alinhamento e nivelamento do sistema. Procure evitar portanto qualquer fonte de perturbações mecânicas nas proximidades no interferômetro.
4. Nunca toque com os dedos nas superfícies dos espelhos e nem na célula para armazenamento de gás.
5. Mantenha o interferômetro coberto por sua tampa protetora sempre que encerrar a sua utilização.

EXPRESSÕES E RELAÇÕES NUMÉRICAS ENVOLVIDAS

1. A superposição dos feixes refletidos pelos espelhos S_1 e S_2 na tela de observação dá origem a um padrão de franjas de interferência circulares devido à diferença de caminho ótico de cada feixe. Quando todos os feixes se propagam no mesmo meio (itens *A* e *B*), essa diferença de caminho ótico é causada unicamente pela diferença de trajetória entre os dois feixes, o que causa uma diferença de fase entre as funções de onda que se superpõem na tela.
2. Como mostrado na Fig. 3, o feixe de luz proveniente da fonte pontual formada diante da lente sofre sucessivas reflexões nos espelhos S_1 , S_2 e S_3 , dando origem às imagens virtuais L_1 e L_2 , que atuam como fontes pontuais a partir das quais pode ser feita toda a descrição da formação do padrão de interferência observado na tela.

3. Sejam d_1 e d_2 as distâncias entre o ponto médio do divisor central S_3 e os espelhos S_1 e S_2 , respectivamente, e d a diferença entre essas duas distâncias ($d = d_2 - d_1$). Então a distância entre as imagens virtuais L_1 e L_2 será dada por:

$$\Delta L = 2d = 2(d_2 - d_1) \quad (1)$$

4. Se θ representa o ângulo formado por um par de raios paralelos que partem de L_1 e L_2 e se superpõem na tela (na aproximação de longas distâncias de observação) para formar os anéis de interferência (medido em relação ao eixo de simetria perpendicular à tela e passando pelo centro dos anéis), então a diferença de fase entre esses raios ao chegarem à tela pode ser escrita como:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(2d \cos \theta) + \Delta\phi_0, \quad (2)$$

onde $\Delta\phi_0$ representa a diferença global de fase (constante em relação a θ) entre os raios devida às reflexões múltiplas que eles sofrem e ao fato de tais raios atravessarem o divisor central S_3 um número diferente de vezes.

5. Os máximos são obtidos na tela para os ângulos que satisfazem a condição

$$2d \cos \theta = m\lambda - \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi_0, \quad (3)$$

enquanto os mínimos são obtidos quando

$$2d \cos \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda - \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi_0, \quad (4)$$

sendo λ o comprimento de onda do laser e $m = 1, 2, 3, \dots$. Essas expressões justificam a formação das franjas circulares de interferência para cada valor de m , para as quais θ é fixo.

6. Se o espelho S_2 é deslocado de uma distância Δx_2 , a distância entre L_1 e L_2 muda para:

$$\Delta L' = 2d \pm 2\Delta x_2 \quad (5)$$

7. Suponha que d satisfaça inicialmente uma condição de máximo (ou mínimo) para um dado m . O anel correspondente vai passar de uma condição de máximo (ou mínimo) para outra cada vez que Δx_2 for um múltiplo inteiro de $\lambda/2$. Assim, observando-se a sucessão de máximos ou mínimos num dado ponto fixo (o centro dos anéis, por exemplo), pode-se obter uma relação direta entre o comprimento de onda e o deslocamento do espelho. Se o espelho for deslocado de uma distância total D_2 enquanto são contados N mínimos no centro da tela, então:

$$\lambda = \frac{2D_2}{N} \quad (6)$$

8. Para a medida do índice de refração do ar (item C), as distâncias d_1 e d_2 são mantidas fixas e a célula contendo ar à pressão atmosférica é introduzida diante do espelho S_1 . A variação do índice de

refração do ar n com a pressão p pode ser escrita numa primeira aproximação segundo uma função linear:

$$n(p) = n_0 + \frac{\Delta n}{\Delta p} p, \quad (7)$$

onde $n_0 = 1$ é o índice de refração do vácuo e a razão $\Delta n/\Delta p$ (positiva por definição) é o parâmetro a ser determinado experimentalmente.

9. Se a célula cheia de ar à pressão p possui uma espessura t , então o caminho ótico percorrido dentro da célula pelo raio que é refletido em S_1 , após atravessá-la duas vezes, é dado por:

$$x = n(p) \cdot 2t, \quad (8)$$

10. Se a pressão dentro da célula for alterada de p para $p + \Delta p$, então o caminho ótico do mesmo raio sofrerá uma alteração de:

$$\Delta x = [n(p + \Delta p) - n(p)] \cdot 2t \quad (9)$$

11. Iniciando à pressão ambiente com um ponto de mínimo no centro da figura de interferência observada no anteparo e reduzindo progressivamente a pressão dentro da célula, são observadas N alterações de mínimo para mínimo no centro da tela e anotados os valores correspondentes de pressão p . Como cada alteração de mínimo para mínimo corresponde a uma mudança no caminho ótico de um comprimento de onda, então a contagem do número de alterações entre os valores de pressão p e $p + \Delta p$, representado por $N(p + \Delta p) - N(p)$, está relacionada à variação no caminho ótico por:

$$|\Delta x| = [N(p + \Delta p) - N(p)] \cdot \lambda, \quad (10)$$

(Esta expressão foi escrita em termos de valores absolutos já que variações positivas ou negativas do caminho ótico levam à mesma alteração qualitativa no padrão de interferência.)

12. Combinando as Eqs. 9 e 10 obtém-se:

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = \left| \frac{\Delta N}{\Delta p} \right| \cdot \frac{\lambda}{2t} \quad (11)$$

QUESTÕES A SEREM RESPONDIDAS NO PRÉ-RELATÓRIO

1. Explique o que você entende por caminho ótico, enfatizando claramente a diferença entre caminho ótico e caminho geométrico.
2. Explique o que você entende por coerência e qual sua importância na observação de fenômenos de interferência.
3. Quais são as principais características de um laser? Explique de maneira simplificada como funciona um laser a gás, como o laser de He-Ne utilizado na experiência.

4. Deduza as equações 1–4.
5. Discuta a experiência de Michelson-Morley e sua importância na teoria da relatividade restrita.
6. A lei de Gladstone (de origem empírica) estabelece que a quantidade $n - 1$, onde n é o índice de refração do ar, é diretamente proporcional à densidade do ar, em uma dada temperatura. Discuta qualitativamente a correlação entre essa lei e a variação de n com a pressão descrita na Eq. 7. De que outros parâmetros físicos você espera que o índice de refração do ar dependa?

PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS A SEREM EFETUADOS NO RELATÓRIO

Determinação do comprimento de onda do laser de He-Ne:

1. Organize em uma tabela os dados de N (número de alternâncias de mínimos no centro da figura de interferência) em função de D_2 (distância percorrida pelo espelho S_2). Utilize as várias medidas efetuadas para obter valores médios e incertezas para D_2 .
2. Monte um gráfico de N em função de D_2 e determine a partir de um ajuste linear o valor do comprimento de onda do laser de He-Ne utilizado (com incerteza). Compare com o valor esperado, fornecido no aparelho (632,8 nm).

Determinação do índice de refração do ar:

3. Organize em uma tabela os dados de N (número de alternâncias de mínimos no centro da figura de interferência) em função de Δp (variação de pressão correspondente a cada mínimo). Utilize as várias medidas efetuadas para obter valores médios e incertezas para Δp .
4. Monte um gráfico de N em função de Δp e determine a partir de um ajuste linear o valor da razão $\Delta N/\Delta p$ (com incerteza).
5. Utilize a Eq. 11 para obter $\Delta n/\Delta p$ (com incerteza), empregando os valores fornecidos para a espessura da célula de gás ($t = 10,00$ mm) e para o comprimento de onda do laser de He-Ne ($\lambda = 632,8$ nm).
6. Utilize a Eq. 7 para determinar o índice de refração do ar à pressão atmosférica (1013 mbar) e temperatura ambiente. Compare com valores tabelados em livros e handbooks.

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

1. O interferômetro de Michelson e outros tipos de interferômetros podem ser usados para medidas muito precisas de distâncias, empregando-se radiação monocromática com comprimento de onda conhecido. Utilizando o valor do comprimento de onda do laser usado nesta prática, estime qual a menor distância que pode ser medida com um interferômetro de Michelson e com qual precisão essa medida pode ser feita.

2. O físico americano A. A. Michelson ganhou o prêmio Nobel em 1907 por seu trabalho na aferição do metro padrão utilizando um interferômetro similar ao empregado nesta prática. A partir de 1961 a definição de metro passou a ser feita com base no comprimento de onda de uma certa radiação emitida por átomos do elemento ^{86}Kr . Discuta quais as vantagens de se adotarem medidas baseadas num interferômetro para o estabelecimento do padrão de comprimento. (Atualmente o padrão de comprimento é definido a partir da velocidade da luz.)
3. Mostre que os raios dos anéis circulares visualizados na tela de observação diante do interferômetro de Michelson são, para pequenos valores do ângulo θ , proporcionais à raiz quadrada de números inteiros (isso é similar ao que ocorre com os anéis de Newton).
4. O interferômetro de Michelson pode ser usado para a determinação da separação do dubleto D do Na (duas radiações amarelas com comprimentos de onda iguais a 589,10 e 589,59 nm). Explique detalhadamente como isso pode ser feito, fornecendo as expressões matemáticas pertinentes. De quanto deve ser deslocado o espelho móvel no interferômetro de Michelson para que as franjas correspondentes a um dos comprimentos de onda do dubleto se desloquem exatamente uma posição a mais do que as franjas observadas para o outro comprimento de onda?
5. Existem vários outros tipos de interferômetros com funcionamento similar em muitos aspectos ao interferômetro de Michelson, tais como os interferômetros de Fabry-Perot, de Twyman-Green, de Jamin, de Mach-Zehnder, de Rayleigh, etc. Descreva dois desses outros interferômetros, evidenciando as similaridades e diferenças em relação ao interferômetro de Michelson e citando suas principais aplicações.

BIBLIOGRAFIA

1. Halliday, Resnick & Walker, Fundamentos de Física, Vol. 4.
2. J. Goldemberg, Física Geral e Experimental, Vol. 3.
3. Melisinos, Experiments in Modern Physics.
4. Jenkins & White, Fundamentals of Optics.
5. Laboratory Experiments in Physics, Phywe.
6. Página do Laboratório de Espectrofotometria e Ensino de Óptica – Instituto de Física – UNICAMP
<http://www.ifi.unicamp.br/~accosta>.