



Universidade de Brasília

Física Experimental 4

Experimento IV

Interferômetro de Michelson

28 de Junho de 2013

Professora Nadia Maria de Liz Koche

Alunos:

| | |
|--------------------------------|------------|
| Juarez A.S.F | 11/0032829 |
| Sérgio Fernandes da Silva Reis | 11/0140257 |
| Jedhai Pimentel | 09/0007883 |



Conteúdo

| | | |
|----------|-------------------------|-----------|
| 1 | Objetivos | 3 |
| 2 | Materiais | 3 |
| 3 | Introdução | 4 |
| 4 | Procedimentos | 7 |
| 5 | Dados | 8 |
| 6 | Análise de Dados | 9 |
| 7 | Conclusão | 12 |



1 Objetivos

Utilizar o interferômetro de Michelson para determinar o comprimento de onda de um laser e o índice de refração do ar à pressão de laboratório.

2 Materiais

O experimento faz uso de:

- Interferômetro de Michelson
- Laser de He-Ne
- Célula de pressão de 10mm
- Bomba de vácuo manual
- Lente com distância focal de 20 mm
- Tela



3 Introdução

Interferência é um fenômeno físico que ocorre quando duas ondas se superpõem. A onda resultante é a soma vetorial ponto a ponto das amplitudes das duas ondas iniciais. Se a onda 1 pode ser representada por $\psi_1(\underline{x}, t)$ e a 2 por $\psi_2(\underline{x}, t)$ então a onda resultante é simplesmente $\psi_t = \psi_1(\underline{x}, t) + \psi_2(\underline{x}, t)$. Podem aqui ocorrer duas situações: a amplitude de ψ_t é maior ou menor que a amplitude das duas ondas iniciais individualmente. No primeiro caso a interferência é dita construtiva, no segundo, destrutiva. A figura 1 ilustra esses dois tipos de interferência. Esse fenômeno é portanto característico de ondas e sua ocorrência com feixes de luz indica a natureza ondulatória desta.

O objetivo do interferômetro é dividir um feixe coerente ¹ em dois, criar uma diferença de fase entre os dois e reuni-los novamente em um tela de captura. A diferença de fase entre os dois feixes pode ser feita basicamente de duas formas. Primeiramente pode-se alterar o caminho ótico percorrido pela luz, isso é feito alterando-se a distância percorrida. Além disso, assim como em uma corda de extremidade fixa, uma reflexão gerada quando a luz passe de um meio com menor índice de refração para um com maior causa uma inversão de fase. Para o estudo da interferência é vantajoso estudar a diferença de fase pelo número de comprimentos de onda percorridos. Dessa forma, o número de comprimentos de onda percorridos em um caminho homogêneo de comprimento D que sofre r reflexões é:

$$n_t = n_D + n_r = \frac{D}{\lambda} + r \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

Considere o esquema na figura 2a. O laser representa uma luz coerente. A superfície O é o divisor de feixe e consiste em uma superfície semi-espelhada que permite que parte do feixe passe por ela e parte seja refletida. Digamos que O esteja a 45° com a direção definida pelo laser incidente, nesse caso os feixes divididos são perpendiculares. O feixe 1 da figura se divide em 2 e 3. O feixe 2 é gerado por reflexão na interface ar-espelho e sofre inversão de fase, o feixe 3 é gerado por transmissão e não altera a fase. O feixe 2 ao incidir em M_2 tem sua fase novamente invertida e volta a configuração inicial. O feixe 3 ao refletir em M_1 tem sua fase invertida. Parte do feixe 2' é transmitida por O e o feixe 2'' possui fase 0. Parte de 3' é transmitida para o vidro e é refletida na interface vidro-ar ao tentar sair. Essa reflexão ocorre numa interface onde a luz tenta ir de um alto índice de refração (vidro) para um baixo índice de refração (ar) e aqui não ocorre mudança de fase. Por isso 3'' mantém a mesma fase de 3' e chega com meio comprimento de onda de diferença em relação a 2''. Nessa análise consideramos apenas feixes responsáveis pelo padrão de interferência. A figura 2b focaliza a reflexão que causa as diferenças de fase resultantes.

¹ todas as suas frentes de onda estão em fase



Note que consideramos apenas as mudanças de fase devido a reflexão, ou seja, sem que haja mudança de caminho a diferença de fase já é de $\frac{\lambda}{2}$ e temos interferência destrutiva!

Vamos considerar agora as diferenças de fase causada por diferenças de caminho, para isso deixemos **M1** fixo e movamos **M2**. Veja que se **M2** se afasta em **d** o raio de luz terá sua trajetória adicionada em **2d** uma vez que devem ser considerados os caminhos de ida e de volta. Sempre que a diferença de caminho total for de λ voltaremos a situação da destrutividade gerada pelas reflexões. Caímos então em interferência destrutiva caso:

$$\Delta d = N \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Contando-se a variação nas franjas de interferência podemos usar essa equação para obter com muita precisão o comprimento de onda de uma onda estudo.

Um outro modo de gerar diferença de fase entra os dois feixes é fazê-los percorrer mesmas distâncias porém em meios com índices de refração diferentes. Por exemplo podemos inserir no caminho de um feixe uma câmara de vácuo. Quando o ar for rarefeito teremos menos partículas por volume em média e o índice de refração deve ser mais baixo. Podemos estimar a variação de índice de refração do ar com a pressão pela forma linear:

$$n(p) = n_0 + \frac{\Delta n}{\Delta p} \cdot p \quad (3)$$

onde $n_0 \approx 1$ é o índice de refração do ar quando a pressão é zero e $\frac{\Delta n}{\Delta p}$ é um coeficiente a ser determinado.

Considere que na montagem do interferômetro tenhamos uma câmara de vácuo de comprimento **S** no percurso de apenas um dos feixes. A diferença de caminho ótico Δx entre as duas ondas é causado exclusivamente pela diferença de índice de refração do ar dentro da câmara e do ar a pressão de laboratório.

$$\begin{aligned} \Delta x &= S(n(p + \Delta p) - n(p)) & (\div \Delta p) \\ \Rightarrow \frac{\Delta x}{\Delta p} &= \frac{S(n(p + \Delta p) - n(p))}{\Delta p} \end{aligned} \quad (4)$$

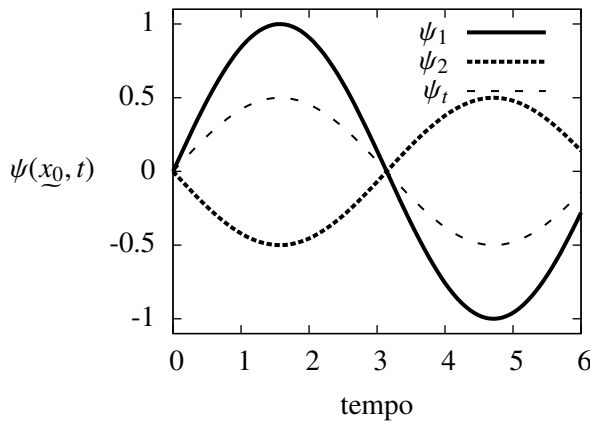
Quando sairmos de situação de interferência destrutiva para outra estamos andando λ . Quando andarmos **N** franjas teremos:

$$\frac{\Delta x}{\Delta p} = \frac{N\lambda}{\Delta p} \quad (5)$$

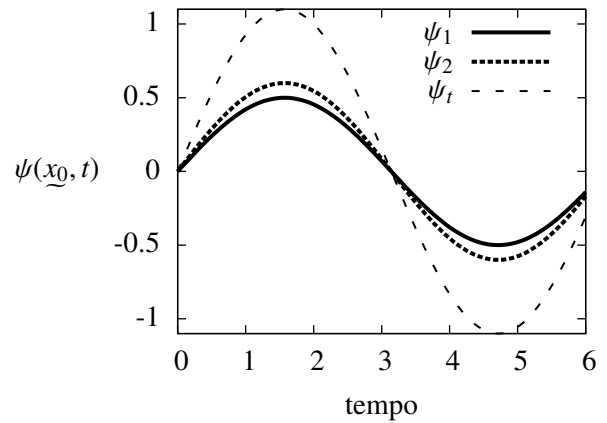
igualando as duas últimas igualdades e lembrando que o caminho **S** é multiplicado por dois pois a luz o transpassa 2 vezes obtemos:

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = -\frac{N}{\Delta p} \cdot \frac{\lambda}{2S} \quad (6)$$

Essa equação nos dá o coeficiente que precisávamos na fórmula 3. Pode-se então usar a fórmula 3 para determinar o índice de refração do ar a pressão ambiente.

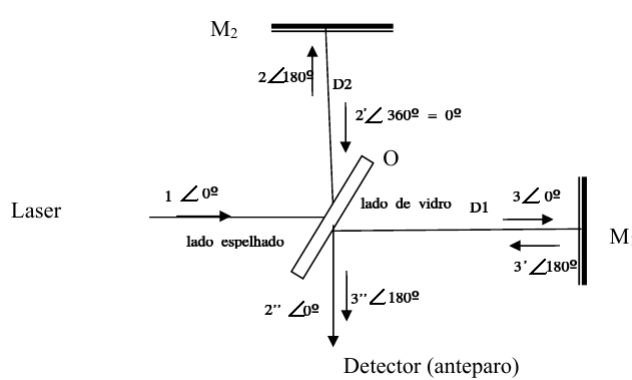


(a) Interferência destrutiva

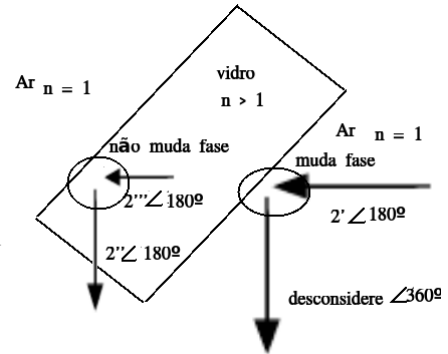


(b) Interferência construtiva

Figura 1: Diferentes formas de interferência



(a) Interferômetro de Michelson



(b) Foco na interface de reflexão para o feixe 2

Figura 2: Reflexões causam diferença de fase

4 Procedimentos

Primeiramente ajusta-se o espelho divisor para que o feixe incidente o atinja em 45° . Antes mesmo de colocar a lente ajusta-se os espelhos para que os dois pontos vermelhos causados pelas reflexões estejam próximos. Colocamos a lente entre a fonte de laser e o espelho divisor e é feito um ajuste fino dos espelhos procurando o formato de interferência na tela de captura. O ajuste deve ser feito ainda de forma que a figura de interferência esteja no centro do *spot* luminoso. Chamemos de espelho 1 aquele acoplado ao micrometro e 2 aquele de ajuste simples. A partir de agora o espelho 2 está fixo e somente alteraremos o parafuso micrométrico do espelho 1. Ajusta-se o espelho 1 até que se obtenha uma figura de interferência com centro escuro. Nessa posição anota-se a medida do parafuso micrométrico, ela será considerada o zero das nossas medidas. Gira-se agora o parafuso sempre na mesma direção e a cada vinte aparições de centro escuro na figura de interferência anota-se o valor medido no micrômetro. Deve-se ter em mente que a redução utilizada no sistema parafuso micrométrico é de 1:10, portanto um incremento de 10 mm no parafuso corresponde um avanço ou recuo de 1mm do espelho 1. Um gráfico $d(N)$ vs N é feito.

Agora coloca-se a câmera de vácuo acoplada com bomba manual entre o espelho divisor e o espelho 2. Novamente o ajuste é feito de modo a visualizar a figura de interferência com centro escuro na tela. Reduz-se gradualmente a pressão na câmera e para cada novo centro escuro que obtermos anotamos o número de franjas observadas desde o início processo e a pressão manométrica. O processo é feito até que se atinja a menor pressão possível. As medidas são então refeitas para garantir confiabilidade dos dados. Entre uma medida e outra a câmera deve ser aberta e ventilada. Mede-se ainda a pressão atmosférica ambiente e o comprimento geométrico interno a câmera, se essa medida não for possível anota-se o valor nominal do fabricante. A figura 3 ilustra a montagem dos dois procedimentos.

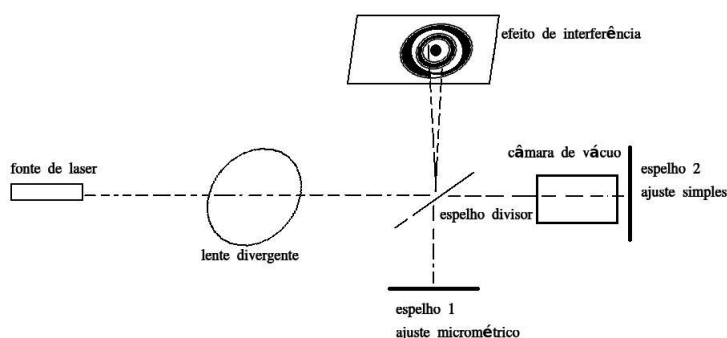


Figura 3: Montagem do interferômetro



5 Dados

Os dados do procedimento 1 são mostrados na tabela 1 e do 2º procedimento na tabela 2

| n | d($\pm 0.00005\text{cm}$) |
|-----|-----------------------------|
| 0 | 0.72800 |
| 20 | 0.73450 |
| 40 | 0.74100 |
| 60 | 0.74650 |
| 80 | 0.75300 |
| 100 | 0.75950 |
| 120 | 0.76600 |
| 140 | 0.77200 |
| 160 | 0.77850 |
| 180 | 0.78500 |
| 200 | 0.79050 |

Tabela 1: Dados do procedimento 1

| n | $P_1 \pm 5\text{mBar}$ | $P_2 \pm 5\text{mBar}$ |
|---|------------------------|------------------------|
| 1 | -100 | -120 |
| 2 | -230 | -240 |
| 3 | -340 | -370 |
| 4 | -460 | -480 |
| 5 | -570 | -600 |
| 6 | -680 | -720 |
| 7 | -810 | -840 |

Tabela 2: Dados do procedimento 2

A pressão atmosférica e o comprimento geométrico informado pelo fabricante da câmara de vácuo são:

$$\begin{aligned} P_{\text{atm}} &= 678.0\text{mmHg} \pm 0.5\text{mm} \\ S &= 10\text{mm} \end{aligned} \quad (7)$$



6 Análise de Dados

Os dados da tabela 1 são plotados no gráfico 4a. A regressão da curva obtida é:

$$d(N) = (0.7281 \pm 0.0002) + (0.000314 \pm 0.000001)N \quad (8)$$

Comparamos com a fórmula 2 para obter o comprimento de onda da onda em estudo:

$$\lambda = 2 * (0.000314 \pm 0.000001)mm$$

$$\lambda = (628 \pm 2)nm \quad (9)$$

A média dos dados do segundo procedimento é plotada no gráfico 4b e a regressão obtida é:

$$N(p) = (0.031 \pm 0.028) + (-0.00847 \pm 0.00005)p \quad (10)$$

O coeficiente angular dessa reta nos dá quanta franjas andamos por variação de pressão, portanto:

$$\frac{\Delta N}{\Delta p} = -0.00847 \pm 0.00005 \frac{1}{\text{mBar}} \quad (11)$$

com esses dois dados temos:

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = -\frac{\Delta N}{\Delta P} \cdot \frac{\lambda}{2S} = (0.00847 \pm 0.00005) \frac{1}{\text{mBar}} \cdot (628 \pm 2)nm \cdot \frac{1}{2 \cdot 10mm}$$

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = (2.66 \pm 0.02)10^{-7} \frac{1}{\text{mBar}} \quad (12)$$

Onde a propagação do erro foi feito utilizando a fórmula:

$$\Delta \left(\frac{\Delta n}{\Delta p} \right) = \frac{1}{2S} \cdot \left(\frac{\Delta N}{\Delta P} \Delta \lambda + \Delta \left(\frac{\Delta N}{\Delta P} \right) \lambda \right)$$

A equação 12 é justamente o coeficiente que precisávamos para usar a fórmula 3. Precisamos agora usar a pressão ambiente medida:

$$P_{\text{amb}} = (670.0 \pm 0.5)\text{mmHg} = 890.4 \pm 0.7\text{mbar}$$

Onde o erro foi obtido por:

$$\Delta P_{\text{mbar}} = \frac{1010\text{mbar}}{760\text{mmHg}} \Delta P_{\text{mmHg}}$$



Obtemos finalmente o índice de refração do ar a pressão atmosférica ambiente:

$$n_{p\text{ amb}} = n_0 + \frac{\Delta n}{\Delta p} \cdot p_{\text{amb}} = 1 + (2.66 \pm 0.02)10^{-7} \frac{1}{\text{mbar}} \cdot (890.4 \pm 0.7)\text{mbar}$$

$$\boxed{n_{p\text{ amb}} = 1.000237 \pm 0.000002} \quad (13)$$

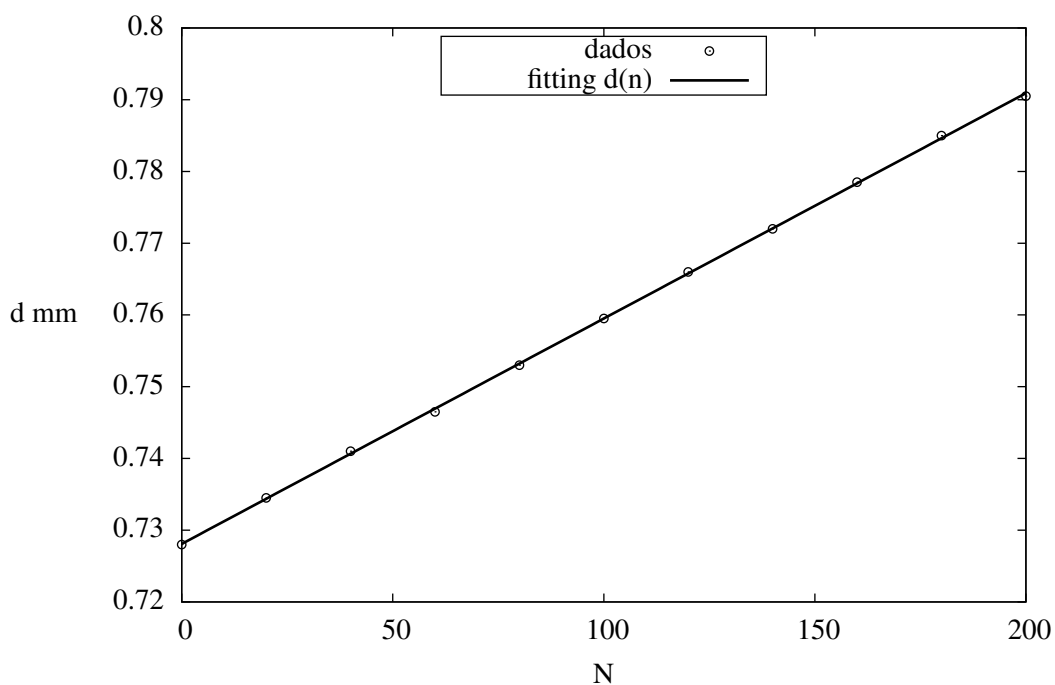
onde o erro foi calculado com a fórmula:

$$\Delta n = p_{\text{amb}} \Delta \left(\frac{\Delta n}{\Delta p} \right) + \frac{\Delta n}{\Delta p} \Delta (p_{\text{amb}})$$

Para o comprimento de onda a razão erro-medida é de 3.2% e para o índice de refração 0.0002%. Nota-se que ambas as medidas obtidas, λ e n , são muito precisas. Observando o caminho da propagação do erro vê-se que sua ordem se deve a grande precisão instrumental do parafuso micrométrico. Quanto a medida do λ , apesar de precisa, não se pode dizer que foi acurada, pois o valor nominal indicado pelo fabricante de 632 nm está fora da margem de erro. Alguns fatores podem ter contribuído para isso. Em primeiro lugar a contagem das franjas foi feita a olho nu e não se considerou um erro associado a essa medida. Além disso as medidas foram feitas uma única vez, não considerando portanto o erro aleatório. A repetição das medidas daria mais confiabilidade aos dados e mais um erro a ser considerado. Essas duas fontes de erro poderiam ser incluídas na propagação e poderiam resultar em uma margem de erro maior que englobasse o valor nominal.

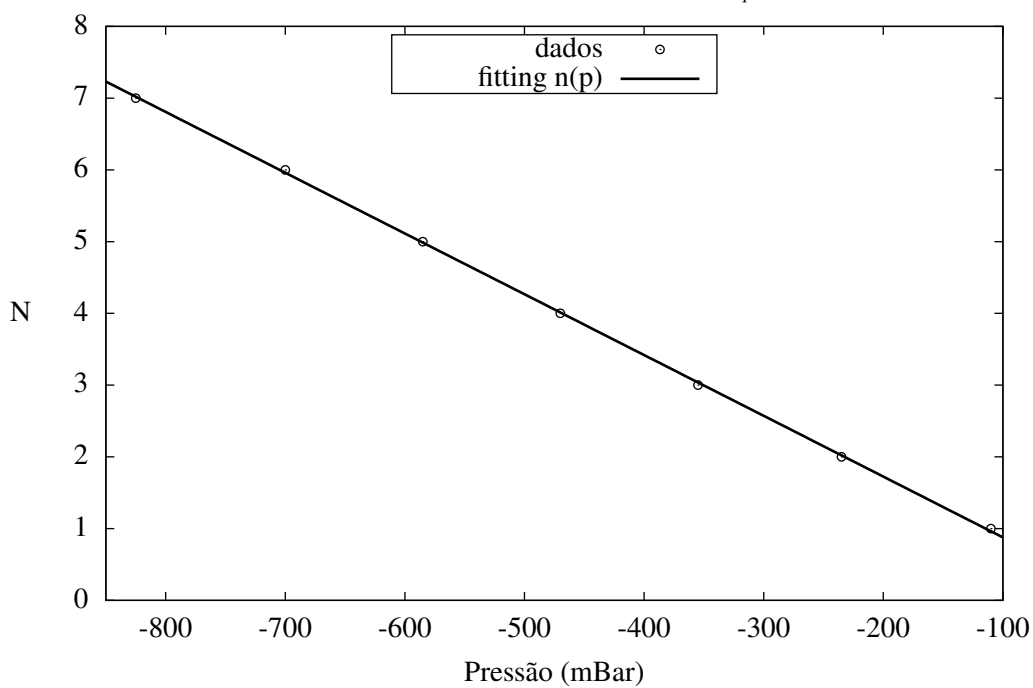


Procedimento 1 - determinando o comprimento de onda



(a) Dados do procedimento 1

Procedimento 2 - determinando $\frac{\Delta N}{\Delta p}$



(b) DADOSs do procedimento 1



7 Conclusão

O experimento permitiu utilizar o interferômetro de Michelson para medir algumas constantes com grande precisão. Mediu-se o comprimento de onda do laser em estudo $\lambda = (628 \pm 2)\text{nm}$ e o índice de refração da luz a pressão ambiente $n = 1.000237 \pm 0.000002$. O valor obtido para λ não bate com o valor nominal de 632nm e o erro esperado para n na ordem de 10^{-5} . As medidas obtidas foram bastante precisas mas não acuradas. No cálculo do erro não foi considerado o erro aleatório, o que poderia aumentar a margem de erro e a acurácia das medidas. Por último, e quem sabe mais importante, a observação do efeito de interferência demonstra o caráter ondulatório da luz.

Referências

- [1] JEWETT, J.W.; SERWAY, R.A. *Física para cientistas e engenheiros* volume 4 : Luz, Óptica e Física Moderna. 8ª ed. São Paulo : Cengage Learning, 2012.