

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Instituto de Física  
Departamento de Física Nuclear e Altas Energias

## Estrutura da Matéria II

# Interferometria de Precisão

Versão 2.2

(2017)

Helio Nogima, Luiz Mundim

(Revisado e ampliado por Wagner Carvalho e Dilson Damião)

# 1 Objetivos

Estudar o índice de refração do ar em função da pressão usando a técnica de interferometria desenvolvida por Albert Michelson.

## 2 Introdução

No século XIX era bem estabelecido que as ondas mecânicas precisavam de um meio para se propagar. Era, portanto, natural imaginar que a luz, sendo onda eletromagnética, propagasse-se por algum meio não observado. Este meio que permearia todo o universo era o chamado “éter”. Maxwell considerou várias formas em que o movimento da Terra em relação ao éter poderia ser determinado. Porém, este efeito seria muito pequeno para ser medido, observável apenas na segunda ordem em  $v^2/c^2$ , onde  $v$  é a velocidade da Terra em relação ao éter e  $c$  a velocidade da luz.

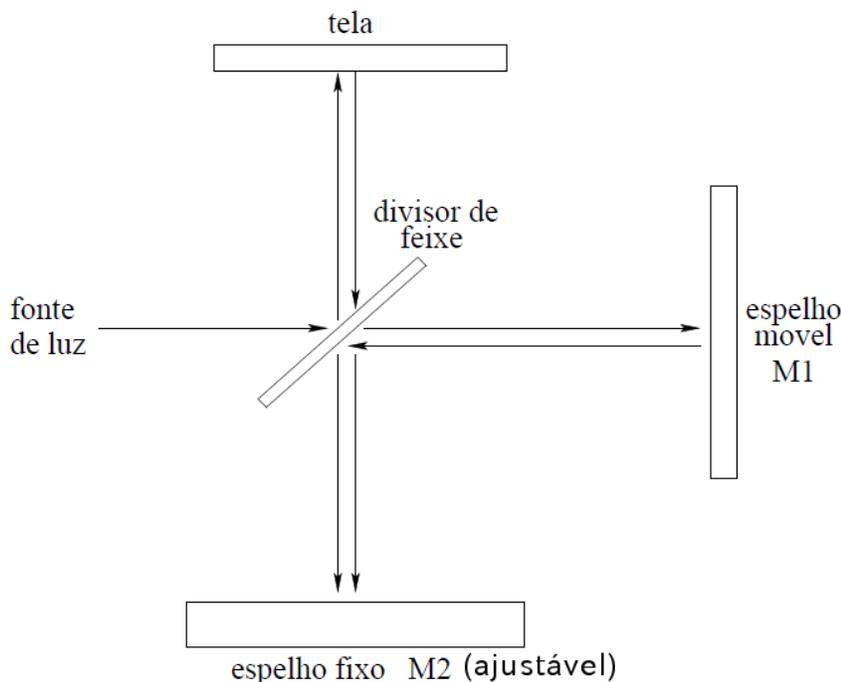


Figura 1: Esquema do interferômetro de Michelson. (Obs: O divisor de feixe está representado com uma rotação incorreta e deve ser rotacionado de  $90^\circ$  em relação à ilustração.)

Albert Michelson acreditava ser possível medir este efeito através de um sistema de interferência de luz. O diagrama básico do sistema experimental encontra-se na figura 1. Uma fonte projeta a luz, passando por um divisor de feixe, em um espelho móvel. O feixe dividido atinge também um espelho fixo (ajustável), que tem orientação perpendicular ao espelho móvel. Os feixes refletidos pelos espelhos são então projetados em um anteparo (tela), gerando uma imagem de interferência devido à diferença de fase existente entre eles. O movimento da Terra em relação ao éter poderia ser detectado alterando a orientação deste sistema em relação à direção do movimento. O efeito esperado seria o deslocamento das franjas de interferência

devido ao encurtamento ou alongamento da onda que se propaga na direção do movimento terrestre.

A experiência foi realizada pela primeira vez em 1881 sem, entretanto, nenhuma evidência do éter. Michelson concluiu que isto era devido à insuficiente precisão do experimento. Em 1887, com o auxílio de Edward Morley, Michelson melhorou a precisão de seu interferômetro aumentando o trajeto percorrido pela luz. Com isto o experimento permitiria a observação do movimento da Terra em relação ao éter. Porém, novamente nenhuma diferença foi detectada. Surpresos, concluíram que não havia nenhuma prova física do movimento da Terra em relação ao éter.

Este resultado foi extensamente discutido por Hendrik Lorentz que, junto a Georges Fitzgerald, procurou explicá-lo em termos da contração do braço do interferômetro ao longo da direção do movimento da Terra. Além deles, outros tentaram explicar este resultado, mas somente em 1905, com o trabalho de Einstein “Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento”, a irrelevância do éter para o eletromagnetismo foi compreendida.

Além de ter proporcionado uma evidência contundente da não existência de um éter para a propagação das ondas eletromagnéticas, a técnica de Michelson é importante por ter originado a interferometria de precisão. Faremos nesta experiência o uso desta técnica para a medida da relação da pressão do ar com o seu índice de refração.

### 3 Interferometria

Usando uma fonte monocromática de luz, a imagem formada num interferômetro de Michelson é constituída de anéis concêntricos, como ilustra a figura 2. Os feixes que sofrem interferência são obtidos de uma mesma fonte, logo eles estão em fase após serem divididos pelo espelho semi-reflexivo. A posição das franjas de interferência será determinada pela diferença no comprimento do trajeto percorrido por cada um dos feixes até que se encontrem no anteparo. A posição em que cada franja aparece deverá se repetir quando a trajetória for acrescida de 1 comprimento de onda ( $\lambda$ ). Visto que o feixe que sai do divisor e incide no espelho móvel passa duas vezes por este caminho, uma variação de  $1/2\lambda$  na posição deste espelho corresponderá a  $1\lambda$  na trajetória da luz. Se o espelho móvel for deslocado lentamente na direção do feixe, verificar-se-á o movimento das franjas de interferência e figuras idênticas à figura inicial se formarão em várias posições do deslocamento. Estas posições correspondem a múltiplos de  $1/2\lambda$  em relação à posição original. Podemos, portanto, estabelecer a equação 1, que relaciona  $\lambda$  com o comprimento  $d_N$  do deslocamento do espelho móvel em função do qual  $N$  figuras idênticas à inicial foram formadas.

$$\lambda = \frac{2d_N}{N} \quad (1)$$

Além da modificação da fase através da variação relativa do comprimento percorrido pelos feixes, o padrão de interferência pode ser modificado também pela mudança do meio pelo qual um dos feixes passa. Uma forma de se fazer isso é através da introdução de uma câmara (ou célula) de vácuo entre o divisor de feixe e o espelho móvel, conforme mostrado na figura 3, a qual permite a variação da pressão do ar em seu interior. A esta variação de pressão está associada uma variação do índice de refração do ar e a correspondente alteração do comprimento de onda da

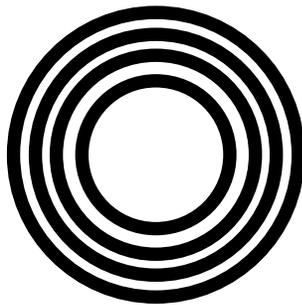


Figura 2: Ilustração da imagem produzida pela interferência dos dois feixes de luz.

luz que atravessa a célula. Para luz de comprimento de onda específico no vácuo  $\lambda_0$ , o comprimento de onda alterado será

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}, \quad (2)$$

onde  $n$  é o índice de refração do ar na célula.

Para pressões razoavelmente baixas, o índice de refração de um gás varia linearmente com a sua pressão  $P$ , sendo  $n = 1$  quando  $P = 0$ . Logo, determinando o coeficiente angular da relação entre o índice de refração e a pressão do gás pode-se determinar o índice de refração para pressões diversas. Mostraremos a seguir que tal coeficiente pode ser obtido através da técnica de interferometria.

Como mostra a figura 3, ao passar pelo divisor de feixe, a luz atravessa duas vezes a célula de vácuo. Quando a luz atravessa a célula o comprimento de onda torna-se maior quanto menor é a pressão. Supondo que inicialmente a célula de largura  $d$  comportasse  $10\lambda$ , à medida que o ar interno for bombeado em algum momento o número atingirá  $9,5\lambda$ . Como a luz passa duas vezes na célula, neste momento haverá a variação de um comprimento de onda. Ou seja, a transição de uma franja se completou, e a figura de interferência é idêntica à inicial.

Inicialmente haverão  $N_i = 2d/\lambda_i$  comprimentos de onda dentro da célula. Ao final haverão  $N_f = 2d/\lambda_f$ . A diferença entre eles,  $N = N_f - N_i$ , será a quantidade de franjas que passam por um ponto de referência à medida que o ar é bombeado. Portanto

$$N = \frac{2d}{\lambda_f} - \frac{2d}{\lambda_i}. \quad (3)$$

Usando a equação 2 teremos

$$N = \frac{2d(n_f - n_i)}{\lambda_0}. \quad (4)$$

Onde  $n_i$  e  $n_f$  são os índices de refração do momento inicial e final respectivamente.

O coeficiente angular da relação linear entre  $n$  e a pressão absoluta do gás  $P$ , pode ser calculado portanto por

$$\frac{n_f - n_i}{P_f - P_i} = \frac{N\lambda_0}{2d(P_f - P_i)}. \quad (5)$$

Com este parâmetro, mais o índice de refração do vácuo ( $n = 1$ ), obtém-se a relação entre o índice de refração do ar e a sua pressão .

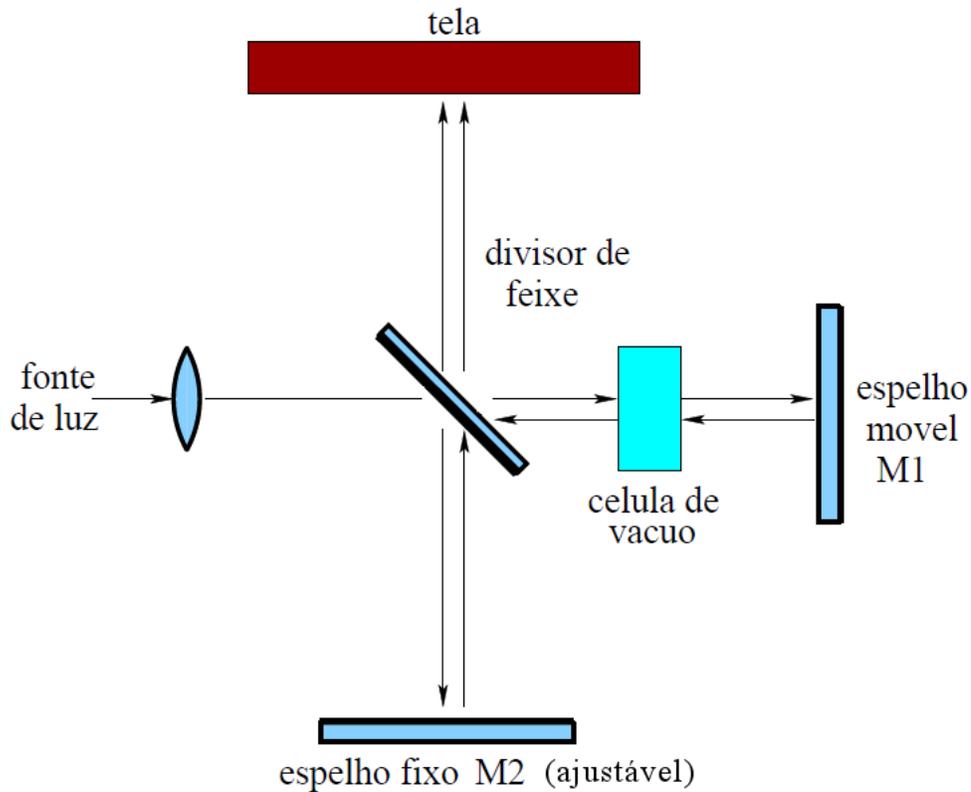


Figura 3: Interferômetro de Michelson montado com uma célula de vácuo.

## 4 Material Utilizado

- Base para o Interferômetro
- Fonte laser de He-Ne ( $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ )
- Espelhos:
  - 1) móvel
  - 2) ajustável (base fixa)
- Lente de  $f = 18 \text{ mm}$
- Divisor de feixe
- Tela de projeção com escala
- Suportes para componentes óticos
- Ponteiro para suporte de componentes
- Célula de vácuo translúcida ( $d = 3,0 \text{ cm}$ )
- Bomba manual de vácuo

## 5 Procedimentos de Montagem

Use a figura 4 ao fim do roteiro como referência para auxiliar a montagem.

1. Coloque a base do interferômetro numa bancada com o micrômetro apontando para você.
2. Identifique todos os componentes que irão sobre a base do interferômetro.
3. Coloque o laser sobre uma base de alinhamento e posicione-o à esquerda do interferômetro de forma que o feixe incida na direção dele. Deixe um espaço da ordem de 2 cm entre o laser e o início da base do interferômetro.
4. Monte o espelho móvel na base do interferômetro obedecendo à marcação existente.
5. Ligue o laser. Usando os parafusos de nivelamento da base do laser, ajuste sua altura de forma que o feixe atinja o centro do espelho móvel. Certifique-se de que o feixe esteja paralelo à base do interferômetro.
6. Ajuste a posição e o alinhamento horizontal de forma que o feixe refletido pelo espelho móvel retorne ao orifício de emissão do laser.
7. Monte o espelho fixo (ajustável) na base do interferômetro obedecendo a marcação existente.
8. Fixe através dos parafusos correspondentes um suporte de componentes em frente ao laser. Fixe outro no extremo oposto ao espelho ajustável e acople nele a tela de projeção com fixação magnética.
9. Monte o divisor de feixe (espelho semi-reflexivo) orientando-o em um ângulo de 45 graus em relação ao feixe laser de forma que parte do feixe seja refletida em direção ao espelho ajustável. Faça os ajustes para que o feixe atinja o centro do espelho ajustável.
10. A esta altura dois pontos brilhantes devem ser vistos na tela de projeção, um vindo do espelho móvel, outro do espelho ajustável. Cada um deles pode ter anexo dois ou mais pontos de luz menos brilhantes correspondentes a reflexões múltiplas. Ajuste novamente a orientação do divisor de feixe até que os pontos fiquem o mais próximos possível.
11. Usando os parafusos da parte de trás do espelho ajustável, ajuste-o para que os pontos de luz se sobreponham um ao outro.
12. Coloque uma lente com  $f = 18$  mm no suporte de componente em frente ao laser. Ajuste sua posição de forma que o feixe divergente atinja o centro do divisor de feixe.
13. A este ponto, franjas circulares devem estar visíveis na tela de projeção. Caso contrário, ajuste cuidadosamente a inclinação do espelho ajustável até que apareçam.

14. Ligue uma ponta da mangueira à célula de vácuo, onde o ar fica contido. Coloque o ponteiro em um suporte de componentes e acople a ele a célula de vácuo. Instale o conjunto entre o divisor de feixe e o espelho móvel.
15. Faça o alinhamento do espelho ajustável de forma que o centro do padrão de interferência fique claramente visível na tela de projeção.
16. Certifique-se que a célula esteja à pressão atmosférica. Para isto use a chave de liberação de vácuo existente na bomba.
17. Anote  $P_i$ , o valor inicial de pressão lido do manômetro. Bombeie lentamente o ar da célula, contando o número  $N$  de franjas que transicionam por um ponto de referência previamente estabelecido. Ao final, anote o número  $N$  e o valor final  $P_f$  do manômetro.
18. Repita o item anterior ao menos 5 vezes, procurando diferentes valores de  $N$  e de  $\Delta P = P_f - P_i$ .

## 6 Tarefas

1. A partir do exposto na seção 3, apresente uma equação que relacione o índice de refração e a pressão absoluta do ar.
2. Explore a correlação entre os valores medidos de  $N$  e  $\Delta P$  para obter valores numéricos para a equação do item anterior.
3. Faça o gráfico de  $n$  vs  $P_{ar}$ .
4. Usando seus resultados experimentais, encontre o índice de refração do ar à pressão atmosférica e o compare com o valor esperado, que pode ser obtido em livros e *sites* de organizações que mantêm registros de padrões, constantes e grandezas físicas. Um exemplo é o *site* do NIST (*National Institute of Standards and Technology*), órgão do governo dos EUA.

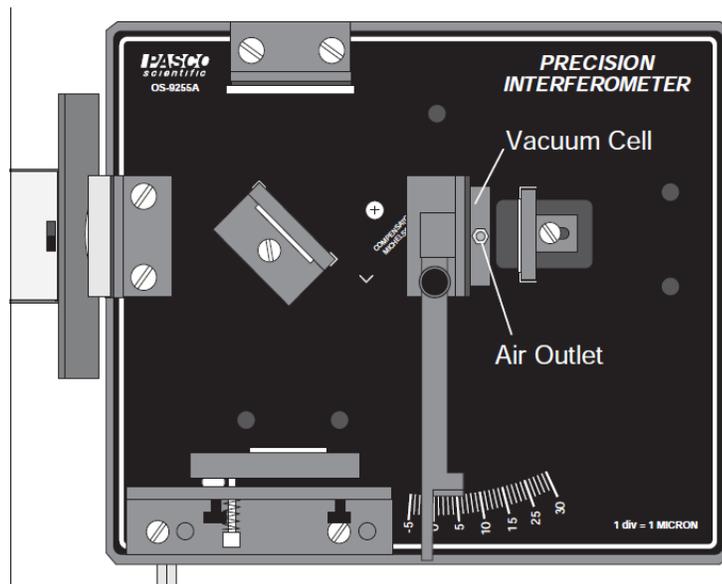


Figura 4: Interferômetro da Pasco.

## Bibliografia Complementar

1. Caruso, F., Oguri, V., Física Moderna - Origem Clássica e Fundamentos Quânticos, Elsevier/Editora Campus, 2006.
2. Santoro, A, Mahon, J. R., Oliveira, J. U. C. L., Mundim Filho, L. M., Oguri, V., Prado da Silva, W, Estimativas e Erros em Experimentos de Física, Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2005.
3. Vuolo, J. H., Fundamentos da Teoria de Erros, Edgard Blücher Ltda, 1996.
4. Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO Scientific Models OS-9255A thru OS-9558A.
5. <http://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp> .