

# Relatório 6: Interferômetro de Michelson

F429 - G.5 2º semestre 2016

Prof. Lázaro Padilha

Giovani Nascimento Pereira - 168609

Seong Eun Kim - 177143

Renan Adriani Sterle - 176536

Carlos Augusto Figueiredo Freire de Carvalho - 165684

*Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação,  
Campinas, SP*

5 de dezembro de 2017

## Resumo

Nesse experimento, estudamos a interferência da luz e investigamos a usabilidade do interferômetro de Michelson. Para isso, montamos o interferômetro utilizando um feixe de luz de comprimento de onda conhecido e realizamos medições. Assim, calculamos o fator de redução ( $f = 0.2061 \pm 0.0003$ ) da alavanca no movimento do espelho. Com esse dado, trocamos a lâmpada para uma de Sódio e pudemos calcular seu comprimento de onda ( $\lambda = (573 \pm 3)nm$ ). Por fim, analisamos as linhas de interferência do sódio e medimos a separação entre regiões de visibilidade nula ( $\Lambda = (0.298 \pm 0.03)mm$ ) e utilizamos isso para calcular o campo magnético do átomo de sódio e a separação espectral dos níveis de energia ( $|B| = (18.00 \pm 0.01)T$  e  $\delta E = (0.002087 \pm 0.000001)eV$ ).

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Análise de Dados</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>Discussão</b>	<b>8</b>
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>9</b>
<b>8</b>	<b>Instrumentos utilizados</b>	<b>9</b>
<b>9</b>	<b>Propagação de erros</b>	<b>10</b>

# 1 Introdução

O experimento 6 - Interferômetros foi feito com o intuito de estudar o funcionamento de interferômetros ópticos e algumas de suas aplicações. Para isso, calculamos o fator de redução  $f$  da alavanca no movimento do espelho. Com essa informação, pudemos determinar o comprimento de onda de uma fonte de luz desconhecida. Por fim, analisamos o dubleto da lâmpada de Na e, assim, determinamos a densidade de fluxo magnético dos elétrons da camada 3p do Sódio.

## 2 Objetivos

Estudar os efeitos de interferência da luz, através de seu comportamento ondulatório, e a utilização de interferômetro de Michelson como equipamento para medição precisa de deslocamentos e para determinação de um comprimento de onda desconhecido.

## 3 Metodologia

Para a primeira parte do experimento, foi feito o alinhamento do interferômetro com o laser que incidia no primeiro espelho semi-refletor.

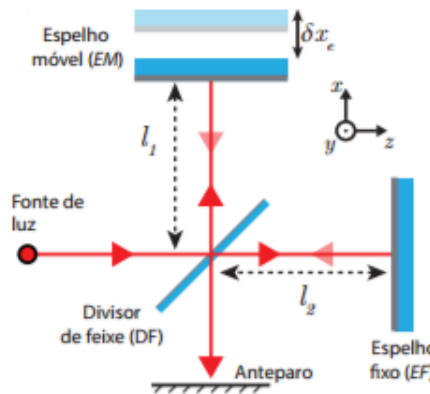


Figura 1: Esquema de um interferômetro de Michelson.

A fig. 1 descreve a montagem do interferômetro utilizado. O anteparo utilizado para o experimento foi a parede da sala.

É importante notar que o interferômetro é um instrumento altamente preciso e delicado. Quando utilizado para tomar medidas, o ar condicionado da sala foi desligado, para evitar variações de temperatura e a equipe se afastava e evitava ao máximo tocar na mesa de onde se encontrava o interferômetro para não invalidar as medidas.

Depois de alinhado corretamente, foi colocada uma lente divergente de forma a espalhar o raio de luz incidente, assim, foi possível observar no anteparo a projeção das franjas de interferência da luz (Os métodos de alinhamento podem ser melhor observados no guia do experimento [1]).

Então, foram feitas as medidas para se determinar o deslocamento do espelho móvel. No interferômetro utilizado, o espelho móvel estava ligado a uma alavanca conectada a um micrômetro. Ao abrir ou fechar o micrômetro o espelho móvel se movia.

Ao mover o espelho, as figura de interferência era alterada, ocorrendo uma movimentação das franjas de interferência. O número de franjas que se deslocaram é diretamente proporcional ao deslocamento do espelho.

$$x_e = N \frac{\lambda_{HeNe}}{2} \quad (1)$$

Onde  $x_e$  é o deslocamento do espelho, N o número de franjas e  $\lambda_{HeNe}$  é o comprimento de onda o laser de Hélio-Neônio, que é conhecido com uma boa precisão.

Para medir o número de franjas, foi colocado no lugar do anteparo um sensor conectado ao *Contador automático de franjas*, ligado na função de detecção do laser. Esse conjunto também era ligado ao osciloscópio e permitia a observação da variação da intensidade da luz no sensor (variação das franjas).

O micrômetro do espelho móvel foi ligado a um motor, que girava levemente o parafuso do micrômetro e movimentava o espelho ( $x_e$ ).

A medição foi feita ligando-se o contador e o motor, deixando o experimento rodar até que o número de franjas contadas fosse maior do que 500, e associando ao número de franjas, o deslocamento do parafuso do micrômetro ( $x_p$ ).

Como no experimento medimos  $x_p$  e não  $x_e$  diretamente, precisamos de uma relação entre o deslocamento da alavanca do espelho e do parafuso do micrômetro. Essa relação é dada em termos de f, o fator de deslocamento, onde:

$$x_e = f x_p \quad (2)$$

Dessa forma, podemos combinar com a eq. (1) e montar a seguinte expressão:

$$f = N \frac{\lambda_{HeNe}}{2x_p} \quad (3)$$

Que permite com os valores do número de franjas e do deslocamento do micrômetro, encontrar o deslocamento do espelho móvel com bastante precisão.

Na próxima parte do experimento, o interferômetro foi utilizado para identificação de um comprimento de onda desconhecido.

O laser de Hélio-Neônio foi trocado por uma lâmpada de sódio, ligada próxima a lente de entrada do interferômetro.

A lâmpada de vapor de sódio (Na 11) os elétrons são excitados do estado fundamental (1s) para um estado excitado (3p) e decaem liberando a luz de cor amarela, referente a diferença de energia entre esses dois níveis.

O procedimento de medida é o mesmo para calibrar o interferômetro e medir o deslocamento do espelho. A diferença é que aqui, o interferômetro já foi calibrado e o fator f calculado. Dessa forma, o valor desconhecido passa a ser o comprimento de onda da luz incidente do sódio ( $\lambda_{Na}$ ). Assim, a expressão fica:

$$\lambda_{Na} = \frac{2f x_p}{N} \quad (4)$$

Ajustamos a intensidade da lâmpada de sódio para facilitar a visualização dos padrões de interferência nessa parte, pois a luz da lâmpada de sódio é bem mais difícil de ser medida que do laser de HeNe, assim, tentamos reduzir ao máximo as interferências durante as medições.

Para a última parte do experimento, foram feitas medidas a fim de determinar a separação de frequência do dubleto do Sódio.

Isso ocorre pois a luz emitida pela lâmpada de sódio não é monocromática, mas apresenta 2 frequências principais (na faixa do amarelo, por isso são bem próximas), em decorrência de decaimentos de elétrons entre níveis distintos do átomo.

Para realizar esse medição, foi necessário notar o efeito de batimento que ocorria nas franjas de interferência da lâmpada de sódio.

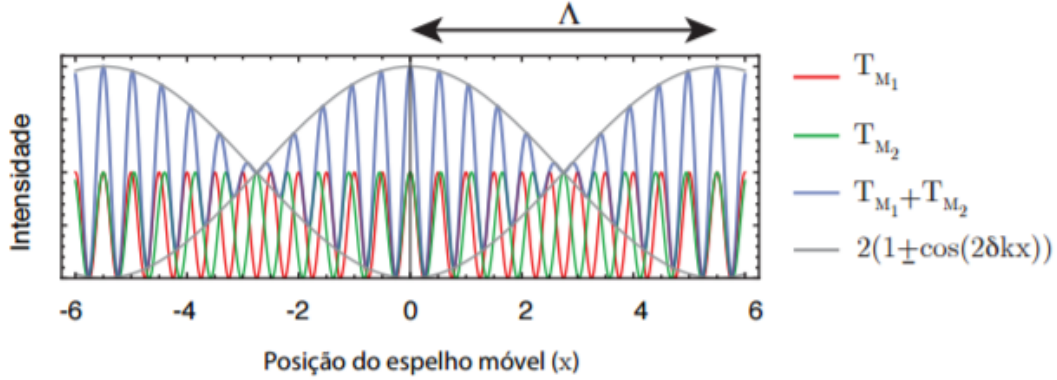


Figura 2: Esquematização de um batimento gerado por uma fonte luminosa bicromática incidindo no interferômetro. Nesta figura foram utilizados  $\lambda = 1$  e  $\delta\lambda = 0.1$ , o meio período de oscilação lenta é indicado por  $\Lambda$

Conforme se variava a posição do espelho móvel, a intensidade das franjas variava num comportamento semelhante ao descrito na fig. 2.

Então para medir o comprimento de onda da oscilação lenta, um observador olhava para o espelho móvel, observando as faixas de interferência, enquanto outro operador movimentava o espelho, até que as franjas sumissem (o que indicava um nó do batimento). A partir daí, repetindo as medições para outros nós de batimento, foi possível encontrar o  $\Lambda$ , o que permitiu encontrar o  $\delta\lambda$ , a diferença entre os comprimentos de onda emitidos pela lâmpada de sódio.

Através de manipulação de equações conhecidas [1], é possível mostrar que o  $\Lambda$  pode ser descrito como:

$$\Lambda = \frac{\pi}{\delta k} = \frac{\bar{\lambda}^2}{2\delta\lambda} \quad (5)$$

Onde  $k$  é a diferença entre os número de onda das duas frequências de emissão.

É possível mostrar que ao transladarmos o espelho por uma distância equivalente a um período completo de oscilações das franjas, poderemos calcular a separação espectral dos níveis de energia do Na referentes às emissões espectrais.

A separação de energia entre os níveis de emissão pode ser estimada como:

$$\delta E = g m_B B \quad (6)$$

Onde  $m_B = 9.27 \cdot 10^{-24} J/T$  é o magneton de Bohr que representa o momento magnético associado à órbita eletrônica,  $g \simeq 2$  é o *Fator de Landé* do elétron, e  $B$  é a densidade de fluxo magnético.

A relação entre a separação de energia e a separação entre os comprimentos de onda da luz pode ser deduzido lembrando que a energia do fóton é dada por  $E = hf = hc/\lambda$ , sendo que  $h$  é a constante de Planck. Tomando o diferencial da energia dos fótons obtemos,

$$\delta E = (-E/\lambda)\delta\lambda \quad (7)$$

portanto pode-se calcular a densidade de fluxo magnético experimentada pelo elétron no núcleo átomo de sódio através da relação:

$$|B| = \frac{hc}{gm_B\lambda^2}\delta\lambda \quad (8)$$

Combinando as equações eq. (5) eq. (8) obtemos:

$$|B| = \frac{hc}{2\Lambda gm_B} \quad (9)$$

Que é uma expressão que permite calcular a densidade do fluxo magnético  $B$  através de  $\Lambda$  obtido experimentalmente e de constantes,  $h, c, g, m_B$ .

## 4 Resultados

Comprimento de onda do Laser de Hélio-Neônio:  $\lambda_{HeNe} = (632.82 \pm 0.05)mm$

Medidas do número de franjas ( $N$ ) e deslocamento do parafuso do micrômetro ( $x$ ), onde  $x_i$  é a posição inicial medida, e  $x_f$  a posição final:

- Laser de Hélio-Neônio
  - Medição 1
    - $N = 650.0 \pm 0.5$  franjas
    - $x_i = 0.600 \pm 0.005mm$
    - $x_f = 1.600 \pm 0.005mm$
    - $\Delta x = 1.000 \pm 0.004mm$
  - Medição 2
    - $N = 1110.0 \pm 0.5$  franjas
    - $x_i = 0.000 \pm 0.005mm$
    - $x_f = 1.700 \pm 0.005mm$
    - $\Delta x = 1.700 \pm 0.004mm$
- Lâmpada de Sódio
  - Medição 1
    - $N = 568.0 \pm 0.5$  franjas
    - $x_i = 0.510 \pm 0.005mm$
    - $x_f = 1.300 \pm 0.005mm$
    - $\Delta x = 0.790 \pm 0.004mm$

- Medição 2  
 $N = 667.0 \pm 0.5$  franjas  
 $x_i = 0.400 \pm 0.005mm$   
 $x_f = 1.300 \pm 0.005mm$   
 $\Delta x = 0.900 \pm 0.004mm$

Tabela 1: Medições das posições dos nós do batimento observado para a lâmpada de sódio (Na)

Posição	Medida do micrômetro
1	$1.420 \pm 0.005mm$
2	$2.820 \pm 0.005mm$
3	$4.310 \pm 0.005mm$
4	$5.770 \pm 0.005mm$
5	$7.200 \pm 0.005mm$
6	$8.640 \pm 0.005mm$

## 5 Análise de Dados

Com os dados obtidos para as medições com o laser de Hélio-Neônio, podemos calcular o fator  $f$  através da eq. (3).

Usando o primeiro conjunto de dados:

$$\begin{aligned}
 N &= 650.0 \pm 0.5 \\
 \Delta x &= x_p = 1.000 \pm 0.004mm \\
 f_1 &= N \frac{\lambda_{HeNe}}{2x_p} = 650.0 \frac{632.82 * 10^{-9}}{2 * 1.000 * 10^{-3}} = 0.20566975 \\
 f_1 &= (0.2057 \pm 0.0005)
 \end{aligned}$$

Usando o segundo conjunto de dados:

$$\begin{aligned}
 N &= 1110.0 \pm 0.5 \\
 \Delta x &= x_p = 1.700 \pm 0.004mm \\
 f_2 &= N \frac{\lambda_{HeNe}}{2x_p} = 1110.0 \frac{632.82 * 10^{-9}}{2 * 1.700 * 10^{-3}} = 0.20659716 \\
 f_2 &= (0.2066 \pm 0.0004)
 \end{aligned}$$

Podemos notar que os valores de  $f_1$  e  $f_2$  estão bem próximos dentro de suas faixas de erro. Dessa forma, podemos utilizar o valor de  $f$  como sendo  $(0.2061 \pm 0.0003)$ , uma media entre os 2 valores obtidos.

Agora para a lâmpada de sódio, podemos utilizar os dados da tabela 1 para encontrar o comprimento de onda de emissão da lâmpada de sódio. Isso através da eq. (4). O fator  $f$  é o mesmo

calculado anteriormente com o uso do laser de HeNe, onde o comprimento de onda do laser era bem conhecido. Calculando-se o comprimento de onda de emissão da lâmpada de Sódio.

Usando o primeiro conjunto de dados:

$$\begin{aligned} f &= 0.2061 \pm 0.0003 \\ N &= 568.0 \pm 0.5 \\ x_p = \Delta x &= 0.790 \pm 0.004mm \\ \lambda_{Na} &= \frac{2fx_p}{N} = \frac{2 * 0.2061 * 0.79 * 10^{-3}m}{568.0} = (573 \pm 3)nm \end{aligned}$$

Usando o segundo conjunto de dados:

$$\begin{aligned} f &= 0.2061 \pm 0.0003 \\ N &= 667.0 \pm 0.5 \\ x_p = \Delta x &= 0.900 \pm 0.004mm \\ \lambda_{Na} &= \frac{2fx_p}{N} = \frac{2 * 0.2061 * 0.9 * 10^{-3}m}{667.0} = (556 \pm 3)nm \end{aligned}$$

Então obtivemos experimentalmente dois valores para o comprimento de onda emitido pela lâmpada de sódio:

$$\lambda_{Na,1} = (573 \pm 3)nm$$

$$\lambda_{Na,2} = (556 \pm 3)nm$$

Agora, dentro dos dados obtidos do comportamento de interferência da luz da lâmpada de sódio, podemos estudar o efeito do batimento que surge na emissão da lâmpada de sódio.

A partir dos dados da tabela 1, podemos determinar o período de deslocamento médio do batimento, como sendo a média dos deslocamentos da Tabela:

$$\overline{x_p} = (1.44 \pm 0.02)mm$$

Com este valor e o conhecimento do fator  $f$ , determinamos  $\Lambda = (0.298 \pm 0.03)mm$  através da eq. (2), onde  $x_e = \Lambda$  nesse caso.

Aplicando-os na eq. (9), com  $\Lambda$  determinamos  $|B| = (18.00 \pm 0.01)T$ .

Tendo  $|B|$ , é fácil determinar a separação espectral dos níveis de energia do átomo de Na, pela eq. (6). Obtivemos então:  $\delta E = (3336 \pm 2)J = (0.002087 \pm 0.000001)eV$ .

## 6 Discussão

Durante a realização do experimento, foi possível observar o comportamento esperado de interferência da luz, conforme descrito na literatura [2] [1], dos padrões de franjas no anteparo, quando as fontes de luz passavam pelo interferômetro.

Dos valores obtidos na Análise de Dados, o fator de correção,  $f = (0.2061 \pm 0.0003)$ , está bem próximo do valor esperado de  $f \simeq 0.2$  [1]. É importante obter  $f$  com alta precisão pois o experimento é muito sensível e preciso, e outras conclusões dependem do valor de  $f$ .



Durante a realização das medições com a lâmpada de sódio (Na), foi colocado um vidro difrator na entrada de luz do interferômetro. Isso porque o vidro ajudava a *espalhar* a luz, aumentando o raio do feixe de luz que era propagado pelo interferômetro, o que ajudava na observação a olho nu do efeito de interferência.

Os valores obtidos para o comprimento de onda emitido pela lâmpada de sódio, não foram condizentes entre si. Um dos valores obtidos foi de  $(573 \pm 3)nm$  e o outro foi  $(556 \pm 3)nm$ , e não são abrangidos pelas suas faixas de erro.

O valor esperado para o  $\lambda_{Na}$  era de aproximadamente  $589nm$  [1], o valor mais próximo obtido foi o de  $(573 \pm 3)nm$  que não é condizente com o valor esperado. Contudo, o valor ainda está próximo daquele esperado. Com isso podemos inferir que o experimento foi realizado de maneira correta, mas esteve muito susceptível a variações e erros de medição que acabaram por interferir no resultado final esperado.

Nesse caso, da lâmpada de Sódio (Na), uma das principais fontes de erro está associada ao contador de franjas automático, que tinha uma precisão meio ruim ao tentar contar as franjas do sódio (principalmente se ocorriam próximas a um comprimento de onda de batimento, que reduzia a intensidade das franjas).

Através da observação do fenômeno de batimento, pudemos determinar o campo magnético do átomo de sódio  $|B| = (18.00 \pm 0.01)T$  e a separação espectral dos níveis de energia  $\delta E = (3336 \pm 2)J = (0.002087 \pm 0.000001)eV$ .

Ambos os valores estão de acordo com a literatura [4]. De fato, os valores esperados seriam  $|B| = 18.00T$  e  $\delta E = 0.0021eV$ .

O interferômetro de Michelson é utilizado como equipamento de medições extremamente precisas. Mas podemos notar no caso que as medidas apesar de bem próximas apresentaram algumas divergências com os resultados esperados. Isso decorre principalmente por ser um experimento extremamente sensível, isso implica que na sua realização, muitos fatores poderiam atuar como fontes de erro. A variação da temperatura ambiente que alterava o índice de refração do ar, movimentação do ar que deslocava sensivelmente os aparelhos utilizados, vibrações na mesa de apoio que interferia nas medições. Variações mínimas poderiam alterar as franjas sendo contadas pelo contador de franjas, o que implica num aumento considerável do erro do experimento realizado dessa forma.

## 7 Conclusão

Nesse experimento, observamos o fenômeno da interferência da luz e investigamos as aplicações do interferômetro de Michelson. Através de sua montagem, obtivemos o valor do fator de correção condizente com o esperado,  $f \simeq 0.2$ , e, a partir dele, pudemos calcular o comprimento de onda emitido pela lâmpada de sódio,  $\lambda_{Na} = (573 \pm 3)nm$ , que não foi de acordo com o esperado na literatura ( $589nm$ ). Com os valores obtidos no estudo do batimento da interferência das ondas geradas pela lâmpada de sódio, pudemos calcular o campo magnético ( $|B| = 18.00 \pm 0.01)T$ , o que é de acordo com o da literatura. Assim, concluímos que o interferômetro de Michelson pode ser usado para o cálculo desses valores, e com cuidados maiores, com muita precisão.

## 8 Instrumentos utilizados

- Laser
- Interferômetro de Michelson

- Lâmpada de Sódio (Na)
- Osciloscópio Tektronix
- Medidor automático de franjas
- Vidro difrator
- Motor (*motorzinho* para mover o micrômetro do espelho móvel)

## 9 Propagação de erros

- Erro do fator  $f$  (eq. (3))  

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2x_p}\right)^2 \Delta N^2 + \left(\frac{N}{2x_p}\right)^2 \Delta \lambda^2 + \left(\frac{N\lambda}{2x_p^2}\right)^2 \Delta x_p^2}$$
- Erro do comprimento de onda  $\lambda$   

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left(\frac{2x_p \Delta f}{N}\right)^2 + \left(\frac{2f \Delta x_p}{N}\right)^2 + \left(\frac{2fx_p \Delta N}{N^2}\right)^2}$$
- Erro do período de batimento  $\Lambda$   

$$\Delta \Lambda = \sqrt{(\bar{x}_p \Delta f)^2 + (f \Delta \bar{x}_p)^2}$$
- Erro do campo magnético  $|B|$   

$$\Delta |B| = \frac{\delta \Lambda}{\Lambda} \sqrt{\frac{hc}{gm_b}}$$

## Referências

- [1] Gustavo Wiederhecker e colaboradores, *Roteiros de F429 - Corrente alternada e óptica*. Compilado em 21 de outubro de 2016.
- [2] Halliday, *Fundamentos da Física, Volume IV*
- [3] <http://www.tablesgenerator.com>
- [4] Site HyperPhysics <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/sodzee.html>
- [5] Thornton and Rex, *Modern Physics for Scientists and Engineers*, Saunders College Publishing, 1993.