

# ROTEIRO p SIMULAÇÃO: INTERFERÔMETRO DE MICHELSON

Prof. Nildo Loiola Dias

## 1 OBJETIVOS

- Conhecer e manipular o interferômetro de Michelson.
- Determinar o comprimento de onda da luz.
- Medir o índice de refração de um gás.

## 2 MATERIAL

Para a realização dos procedimentos acesse à simulação Interferômetro de Michelson:

<https://www.laboratoriovirtual.fisica.ufc.br/interferometro-de-michelson>

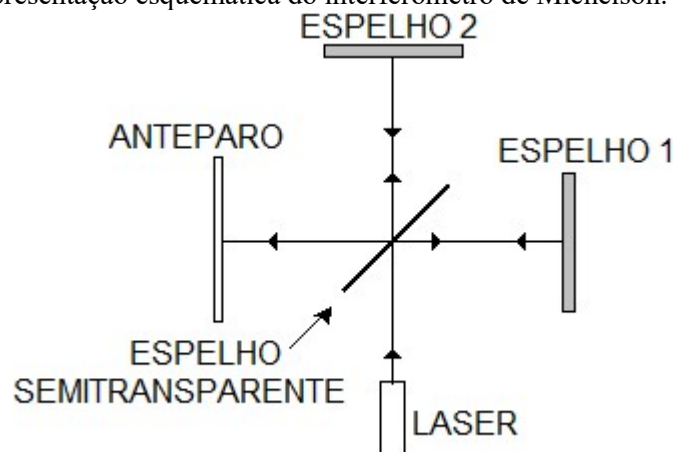
## 3 FUNDAMENTOS

O **interferômetro** projetado por A. A. Michelson em 1881 tinha como objetivo medir a velocidade da Terra em relação ao “Éter”, uma substância hipotética a qual se imaginava ter a propriedade de transmitir radiação eletromagnética, incluindo a luz, e a qual se pensava permear todo o espaço. O resultado do experimento foi inteiramente inesperado: a velocidade da Terra através do “Éter” era zero em qualquer época do ano, mesmo em situações em que a Terra tinha velocidade em orientações opostas. Nesta prática não tentaremos reproduzir os resultados negativos obtidos por Michelson e Morley, mas, fazendo uso da grande sensibilidade do interferômetro, determinaremos o comprimento de onda da luz emitida por um LASER e também determinaremos o índice de refração de alguns gases.

### DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA DA LUZ

Na Figura 1 está representado esquematicamente o interferômetro de Michelson; podemos ver que a luz de um Laser incide em um espelho semitransparente e se divide em dois feixes. Um feixe é refletido em direção ao espelho 1 e o outro feixe é transmitido na direção do espelho 2. Os dois feixes são refletidos de volta e dependendo da diferença de fase entre os mesmos o grau de interferência será maior ou menor quando os dois feixes forem superpostos.

Figura 1 – representação esquemática do interferômetro de Michelson.

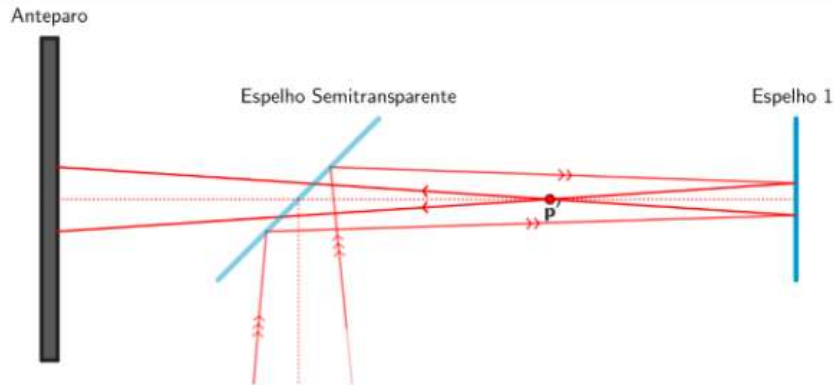


Fonte: próprio autor.

A introdução de uma lente convergente na saída do Laser transforma o feixe em convergente, então as reflexões nos espelhos se comportarão como duas fontes de luz puntiformes virtuais. Na figura

3 mostramos a formação de uma fonte P'. Parte do feixe convergente da luz que incidir no espelho semitransparente é refletido em direção ao espelho 1 colocado à direita. O feixe convergente ao ser refletido neste espelho converge para o ponto P', Figura 2, que se comporta como uma fonte puntiforme de luz que se propaga em direção ao anteparo.

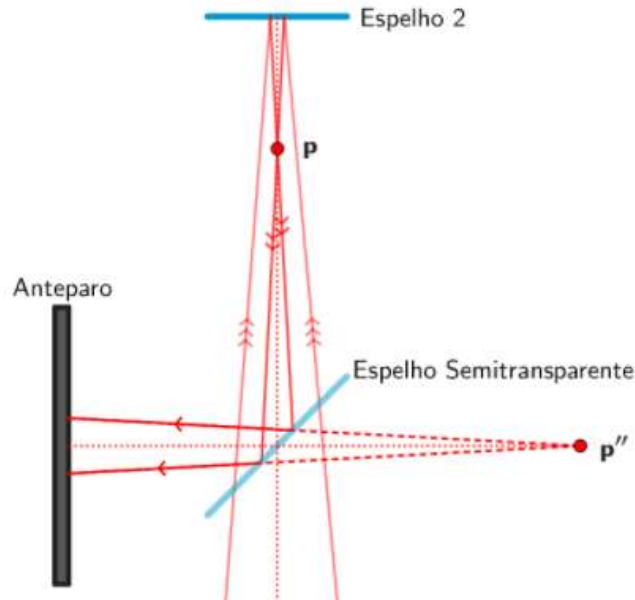
Figura 2 – Formação da fonte de luz divergente p'.



Fonte: próprio autor.

Na figura 4 mostramos a formação da fonte P''. A outra parte do feixe convergente da luz que incidi no espelho semitransparente é transmitida em direção ao espelho 2 colocado acima. O feixe convergente ao ser refletido neste espelho converge para um ponto p, Figura 3, e se propaga em direção ao espelho semitransparente. Ao ser refletido no espelho semitransparente em direção ao anteparo, o prolongamento da luz refletida determina o ponto P'' (imagem virtual do ponto p formada pelo espelho semitransparente), que se comporta como uma segunda fonte puntiforme de luz, p''.

Figura 3 – Formação da fonte de luz divergente p''.

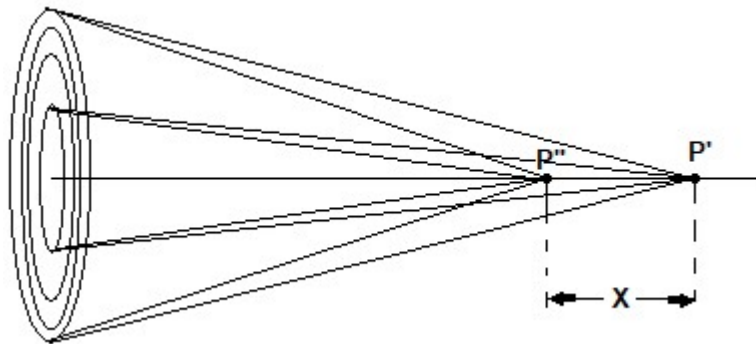


Fonte: próprio autor.

As duas fontes de luz, P' e P'', Figura 4, de mesmo comprimento de onda  $\lambda$  e em fase, produzirão no centro do anteparo um máximo na intensidade luminosa toda vez que a diferença de caminho for igual a um número inteiro de comprimento de onda, assim:

$$x = m \lambda ; \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Figura 4 – Representação das fontes de luz,  $p'$  e  $p''$ , geradas pelas reflexões nos espelhos do interferômetro.



Fonte: próprio autor.

Deslocando-se um dos espelhos com um parafuso micrométrico, enquanto o outro permanece fixo, observaremos no centro do padrão de interferência projetado no anteparo, uma alternância entre interferências construtivas e destrutivas. Uma nova interferência construtiva é observada toda vez que o espelho se desloca de uma distância  $L = \lambda/2$ , pois a cada deslocamento do espelho de  $L$  corresponde um deslocamento  $2L$  da fonte de luz virtual. Desta forma, deslocando o espelho lentamente e contando-se um grande número de repetições de interferências construtivas no centro da figura, é possível determinar o comprimento de onda da luz no ar.

Devido à presença da lente convergente, cada fonte virtual produzirá um feixe de luz cônico, assim, devido às diferenças de fase entre os raios que chegam ao anteparo, haverá a formação de círculos claros de interferências construtivas e círculos escuros de interferências destrutivas.

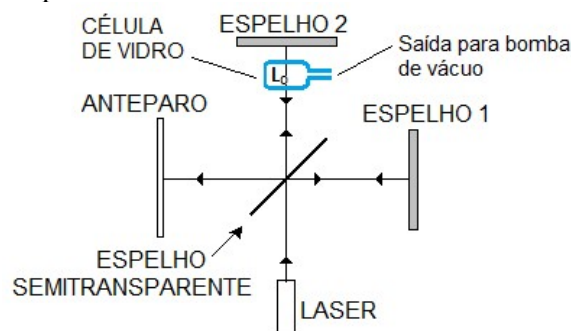
Para aumentar a sensibilidade do interferômetro o parafuso micrométrico empurra uma alavanca que por sua vez empurra o espelho móvel numa razão de 10:1 (no interferômetro da simulação), assim, para uma observação de  $m$  ciclos de alternâncias entre interferência construtivas e destrutivas, teremos um deslocamento total do parafuso micrométrico de  $\Delta s$ , o espelho se desloca de  $\Delta s/10$  e a fonte virtual (imagem refletida no espelho), se desloca de  $2(\Delta s/10)$ :

$$2 \left( \frac{\Delta s}{10} \right) = m\lambda \quad (2)$$

#### DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO DE UM GÁS

Para a determinação do índice de refração de um gás consideraremos a introdução, em um dos braços do interferômetro, de uma célula de vidro de espessura  $L_0$  contendo o gás para estudo, Figura 5.

Figura 5. Representação esquemática do Interferômetro de Michelson com célula de vidro.



Fonte: próprio autor.

O índice de refração de um gás depende linearmente da pressão de acordo com:

$$n(p) = n_0 + kp \quad (3)$$

Para o vácuo absoluto,  $p = 0$  e portanto,  $n(0) = n_0 = 1$ . Por outro lado, o caminho ótico da luz,  $x$ , é dado por:

$$x = n(p).L_0 \quad (4)$$

onde  $L_0$ , em nosso caso, será a espessura interna da célula de vidro que será percorrida pela luz ( $L_0 = 10$  mm).

Para se determinar o índice de refração do gás, diminuiremos a pressão na célula de vidro e observaremos uma alternância no padrão de interferência como consequência da variação do caminho ótico. Assim, de acordo com a Equação 4, teremos:

$$\Delta x = \Delta n(p).2L_0 = -N.\lambda \quad (5)$$

onde  $2L_0$  representa a distância percorrida pela luz dentro da célula de vidro, levando-se em consideração o percurso de ida e de volta e  $N$  é o número de comprimentos de onda observado através da alternância do padrão de interferência. Observe que para uma variação de pressão para valores cada vez menores, o índice de refração do ar diminui e o número  $N$  de comprimentos de onda observados aumenta; daí o sinal negativo na Equação 5.

Combinando-se as Equações 3 e 5 temos,

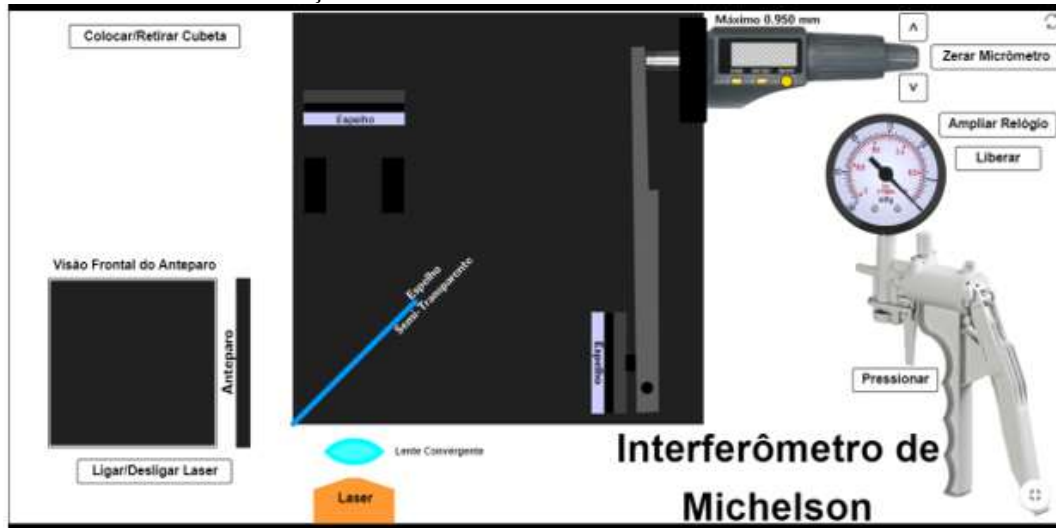
$$k = -\frac{N\lambda}{\Delta p 2L_0} \quad (6)$$

Desta forma, registrando-se a variação da pressão que ocorre para que sejam observados  $N$  ciclos completos no padrão de interferência, podemos determinar  $k$ . Para determinar o índice de refração de um gás basta então substituir os valores de  $n_0$ ,  $k$  e  $p$  (pressão atmosférica) na Equação 3. Consideraremos que na simulação a pressão inicial é sempre a pressão de 1atm corresponde a 1,013 bar.

## DESCRIÇÃO DA SIMULAÇÃO

Na Figura 6 podemos ver a tela inicial da simulação. Na simulação o interferômetro está representado visto de cima; um parafuso micrométrico digital substitui o micrômetro analógico presente no interferômetro real; podemos ver a fonte de luz Laser e uma lente convergente bem em frente da saída da fonte de luz. É possível ver também uma bomba manual de vácuo para medidas dos índices de refração de gases.

Figura 6 – Tela inicial da simulação do Interferômetro de Michelson.

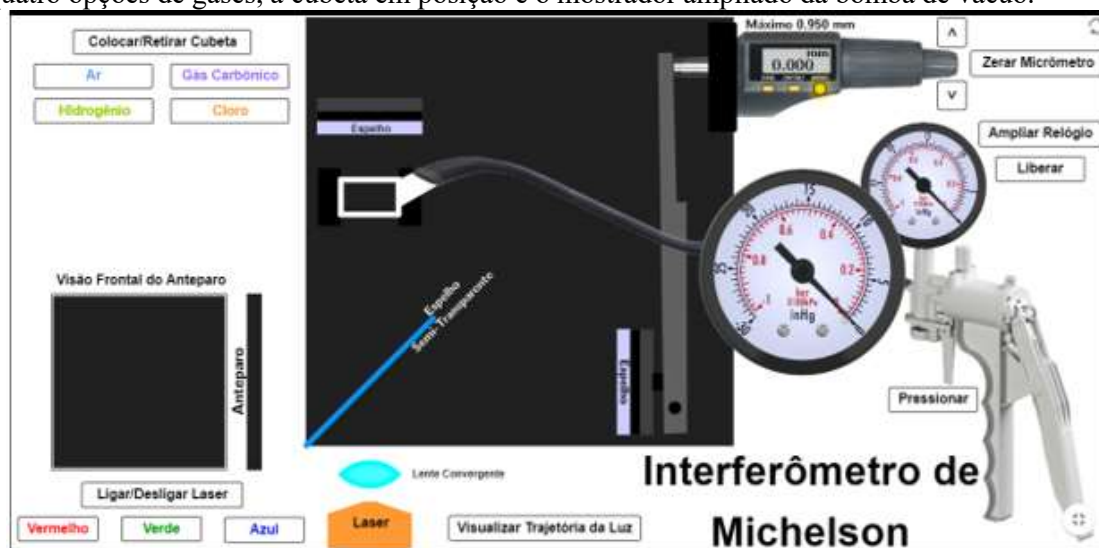


Fonte: próprio autor.

Ao clicar em “Ligar/Desligar Laser” a simulação mostra três opções de cores (da luz do laser) e aparece um botão “Visualizar Trajetória da luz”. Ao clicar em visualizar trajetória da luz a simulação apresenta uma pequena animação em que um ponto luminoso, saindo do laser, se desloca verticalmente até encontrar o espelho semitransparente. Ao atingir esse espelho o ponto luminoso se divide em dois pontos menores, sendo que um dos pontos é refletido para a esquerda, atinge o espelho colocado à direita e reflete de volta em direção ao anteparo; o outro ponto atravessa o espelho semitransparente, atinge o espelho superior, reflete de volta em direção ao espelho semitransparente. Ao chegar no espelho semitransparente é refletido para a esquerda em direção ao anteparo. Os dois raios de luz se sobrepõem no anteparo onde haverá interferência que dependendo da diferença de caminho percorrido poderá ser destrutiva, parcialmente construtiva ou construtiva.

Ao clicar em “Colocar/Retirar Cubeta”, uma cubeta é posicionada em frente ao espelho superior. Essa cubeta se liga à bomba de vácuo por uma mangueira. Também aparecem 4 opções de gases. Ao clicar em “Ampliar Relógio” podemos ver o mostrador da bomba de vácuo ampliado de modo a facilitar as leituras. A Figura 7 mostra a tela da simulação após realizados os procedimentos descritos acima.

Figura 7 – Tela da simulação mostrando as três opções de cores, o botão “Visualizar Trajetória da Luz”, as quatro opções de gases, a cubeta em posição e o mostrador ampliado da bomba de vácuo.



Fonte: próprio autor.

O ponto amarelo no micrômetro, liga/desliga o mesmo. As setas para cima e para baixo, próximas ao micrômetro, permitem a rotação do parafuso micrométrico no sentido de avançar ou retroceder, respectivamente. Na simulação há um limite máximo de 0,950 mm na leitura do micrômetro. Esse limite não compromete em nada as medidas que podem ser simuladas.

O botão “Pressionar” aciona a bomba de vácuo que mede a queda de pressão em relação à pressão normal de 1 atmosfera (1,013 bar). O botão “Liberar” restaura a pressão inicial de 1,013 bar ( $\Delta p = 0$ ). As setas no canto superior direito permitem reiniciar a simulação.

## 4 PROCEDIMENTOS

Para a realização dos procedimentos acesse à simulação Interferômetro de Michelson: <https://www.laboratoriovirtual.fisica.ufc.br/interferometro-de-michelson>

### PROCEDIMENTO 1: Determinação do comprimento de onda da luz.

Para a determinação do comprimento de onda da luz, após escolher o laser da cor desejada e ligar o micrômetro digital, o usuário deverá acionar o micrômetro, repetidas vezes, enquanto observa a evolução do padrão da figura de interferência que pode ser visualizada no anteparo (em: Visão Frontal do Anteparo). Para minimizar o erro “experimental” recomendamos que observem uma sequência de pelo menos 20 ciclos e que repita a medida três vezes, começando preferencialmente em fases diferentes da figura de interferência de modo que as medidas subsequentes não sejam influenciadas pelos valores obtidos anteriormente. Os resultados obtidos, assim como ocorre no experimento real, apresentam pequenos erros experimentais, principalmente devido à dificuldade de reconhecer o momento exato em que um ciclo se completa em relação à configuração inicial. Anotando o valor do deslocamento do micrômetro ( $\Delta s$ ) para completar os 20 ciclos observados ( $m = 20$ , nossa sugestão) e substituindo na Eq. 2 é possível determinar o comprimento de onda da luz em estudo.

1.1 Escolha a cor vermelha.

1.2 Anote na Tabela 1 a leitura do micrômetro para uma posição inicial qualquer,  $s_o$ . Girando sempre no mesmo sentido, conte o número de repetições de interferências construtivas (ou destrutivas) observadas no centro da figura de interferência. Conte pelo menos 20 repetições e anote a posição final,  $s_f$ . A distância  $L$  (deslocamento do espelho) é igual a  $\Delta s$  dividido por 10, devido à razão da alavanca (10:1). Lembre-se também que a um deslocamento  $L$  do espelho, corresponde a um deslocamento  $2L$  da imagem da fonte de luz produzida por este espelho, então:

$$2 \left( \frac{\Delta s}{10} \right) = m \lambda \quad (2)$$

1.3 Repita o procedimento anterior pelo menos mais duas vezes (começando preferencialmente em fases diferentes da figura de interferência e/ou em outro valor de  $s_o$ ). Determine o comprimento de onda da luz e anote.

Tabela 1 - Resultados experimentais para a luz vermelha.

|          | $s_o$<br>(mm) | $s_f$<br>(mm) | $\Delta s$<br>(mm) | $L = \frac{\Delta s}{10}$<br>(mm) | $2L$<br>(mm) | $m$ | $\lambda$<br>(nm) |
|----------|---------------|---------------|--------------------|-----------------------------------|--------------|-----|-------------------|
| Medida 1 |               |               |                    |                                   |              |     |                   |
| Medida 2 |               |               |                    |                                   |              |     |                   |
| Medida 3 |               |               |                    |                                   |              |     |                   |

Onde  $m$  é o número inteiro de comprimentos de onda contados.

1.4 Repita o procedimento anterior para a luz verde.

Tabela 2 - Resultados experimentais para a luz verde.

|          | $s_o$<br>(mm) | $s_f$<br>(mm) | $\Delta s$<br>(mm) | $L = \frac{\Delta s}{10}$<br>(mm) | $2L$<br>(mm) | $m$ | $\lambda$<br>(nm) |
|----------|---------------|---------------|--------------------|-----------------------------------|--------------|-----|-------------------|
| Medida 1 |               |               |                    |                                   |              |     |                   |
| Medida 2 |               |               |                    |                                   |              |     |                   |
| Medida 3 |               |               |                    |                                   |              |     |                   |

## PROCEDIMENTO 2: Determinação do índice de refração de gases.

2.1 Coloque a cubeta de vidro no local apropriado do interferômetro; para isso clique em “Colocar/Retirar Cubeta”.

2.2 Escolha o gás **Cloro**.

2.3 Clique em “Ampliar Relógio” para ampliar o mostrador da bomba de vácuo.

2.4 Clique seguidas vezes em “Pressionar” para retirar progressivamente o gás de dentro da cubeta, enquanto observa o padrão de interferência. Conte 15 ciclos de variação no padrão de interferência e anote a queda de pressão,  $\Delta p$ , correspondente. Anote na Tabela 3.

2.5 Clique em “Liberar” para restabelecer a pressão inicial do gás.

2.6 Repita os procedimentos anteriores para as outras cores indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Variação da pressão do **Cloro** em 15 ciclos do padrão de interferência.

|  | Vermelho | Verde | Azul |
|--|----------|-------|------|
| $\Delta p$ (bar)   |          |       |      |
| $k = -\frac{N\lambda}{\Delta p 2L_o}$ (bar <sup>-1</sup> ) |          |       |      |

OBS 1: Anote a queda de pressão  $\Delta p$  (leitura do manômetro da bomba de vácuo) com o sinal negativo indicativo de que a pressão está caindo.

OBS 2: As medidas realizadas com a simulação não são capazes de discriminar os índices de refração das diferentes cores. Considere um único índice de refração médio.

2.7 Repita os procedimentos anteriores para o **ar** e anote os resultados na Tabela 4.

Tabela 4 - Variação da pressão do **ar** em 15 ciclos do padrão de interferência.

|  | Vermelho | Verde | Azul |
|--|----------|-------|------|
| $\Delta p$ (bar)   |          |       |      |
| $k = -\frac{N\lambda}{\Delta p 2L_o}$ (bar <sup>-1</sup> ) |          |       |      |

## 5 QUESTIONÁRIO

- Qual o comprimento de onda da luz da luz vermelha e da luz verde utilizada neste experimento? Indique os valores utilizados nos cálculos.
- Qual seria o deslocamento esperado  $\Delta s$  (deslocamento do parafuso micrométrico) para a luz amarela de sódio ( $\lambda = 589$  nm) para a observação de 30 ciclos no padrão de interferência? Indique os valores utilizados nos cálculos.
- Determine os índices de refração do cloro e do ar com base nos dados das Tabelas 3 e 4. Considerando a pressão normal de 1,013 bar.
- A partir do índice de refração do ar obtido experimentalmente nesta prática, determine a velocidade da luz no ar com 6 algarismos significativos.
- Considerando que o índice de refração do ar determinado nesta prática é válido para uma pressão de 1,013 bar, calcule com base nos resultados experimentais desta prática o índice de refração do ar para uma pressão de 0,5065 bar.