

# Interferômetro de Fabry-Perot

## Introdução

Uma das cavidades ópticas (ou ressonador óptico) mais simples que podemos imaginar foi proposta por *Charles Fabry* e *Alfred Perot* em 1899 [1]. Tinha como propósito original sua utilização em medidas espectroscópicas e, além destas, atualmente pode ser encontrado em diversos instrumentos de metrologia de grande precisão. Tal cavidade óptica, também chamada de interferômetro de *Fabry-Perot* (FP), é constituída por dois espelhos planos semi-transparentes, os quais encontram-se dispostos ao longo de um eixo comum de modo que suas superfícies semi-refletoras sejam paralelas entre si. Um dos espelhos é mantido fixo enquanto o outro está montado sobre um suporte móvel – similar àquele usado no interferômetro de *Michelson*. O espelho “móvel” pode ser aproximado ou afastado do espelho fixo com o auxílio de um micrômetro acoplado. Isto é feito de forma a garantir que os espelhos permaneçam paralelos com precisão de até um segundo de arco. Na condição de os espelhos estarem separados por uma distância fixa, o interferômetro passa a ser denominado de *etalon*.

Um esquema simplificado do interferômetro de FP é apresentado na Figura 1. Neste caso, entre os dois espelhos temos uma fina camada de ar onde podem ocorrer reflexões (raios BC, CE, EF) devidas à incidência do raio A (sob um ângulo  $\theta$ ). Enquanto alguns raios luminosos podem emergir do interferômetro diretamente ( $A \rightarrow BC \rightarrow CD \rightarrow Q$ ), outros são resultado de reflexões no interior do interferômetro ( $A \rightarrow BC \rightarrow CE \rightarrow EF \rightarrow FG \rightarrow Q$ , por exemplo). Todos os raios são coletados por uma lente L e direcionados ao seu plano focal (Q) – mantendo a diferença de fase que possuíam quando no plano RS, que é perpendicular ao plano OQ. Como resultado, obtém-se um padrão de interferência de máximos e mínimos de intensidade luminosa. Consideremos em detalhe esta questão:

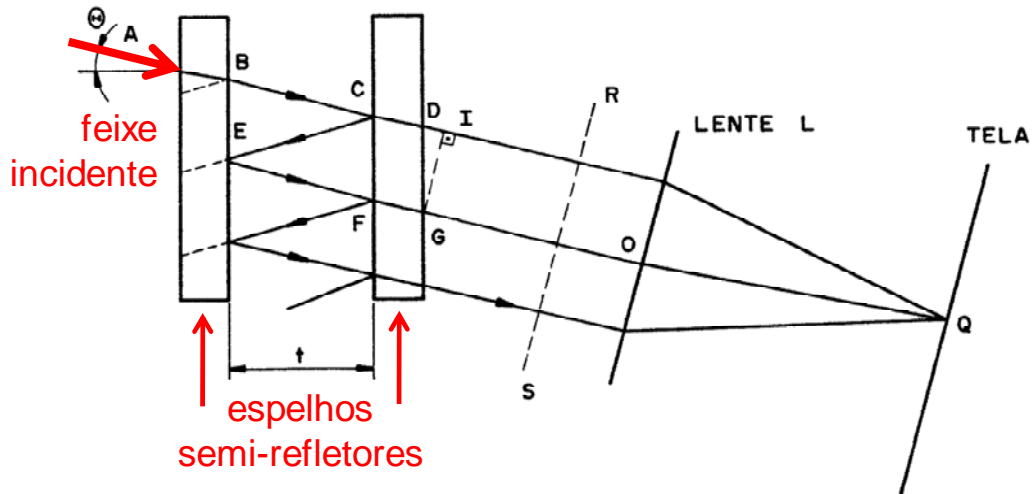


Figura 1 – Representação esquemática do interferômetro de Fabry-Perot.

A diferença de caminho óptico entre as frentes de ondas associadas a dois raios adjacentes, ABCDQ e ABCEFGQ, por exemplo, é dada por (ver Fig. 1):

$$\delta = CE + EF - DI \quad (1)$$

$$\delta = 2t \cos \theta . \quad (2)$$

Para que a interferência seja construtiva temos que todos os raios devem estar em fase em Q, o que equivale a

$$n\lambda = 2t \cos \theta . \quad (3)$$

Se o índice de refração do meio entre as placas é  $\mu (\neq 1)$  teremos

$$n\lambda = 2\mu t \cos \theta . \quad (4)$$

Como todos os raios que chegam em Q originam-se de um raio incidente sob o ângulo  $\theta$ , o padrão de interferência também pode ser observado com uma fonte extensa. A ordem de interferência no centro do padrão está definida pelo número  $p$  tal que ( $\cos \theta = 1$  ou  $\theta = 0$ ).

$$p = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{2\mu t}{\lambda} . \quad (5)$$

Se  $p$  é um número inteiro, a  $k$ -ésima franja brilhante corresponderá a uma interferência de ordem  $p-k$ . Esta possuirá, então, um raio angular dado por:

$$(p-k)\lambda = 2\mu t \cos \theta_k \approx 2\mu t \left( 1 - \frac{\theta_k^2}{2} \right) \quad \text{tal que} \quad \theta_k = \sqrt{\frac{2k}{p}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\mu t}} \sqrt{k} . \quad (6)$$

De onde fica evidente que o raio angular da franja varia com a raiz quadrada de um número inteiro sucessivo. No telescópio (ou anteparo), isto corresponde a uma franja com raio:

$$r = f \tan \theta \approx f \theta_k = f \sqrt{\frac{\lambda}{\mu t}} \sqrt{k} , \quad (7)$$

onde  $f$  é a distância focal da lente utilizada. Assim a diferença entre os quadrados de raios de franjas consecutivas é uma constante, que estará dada por:

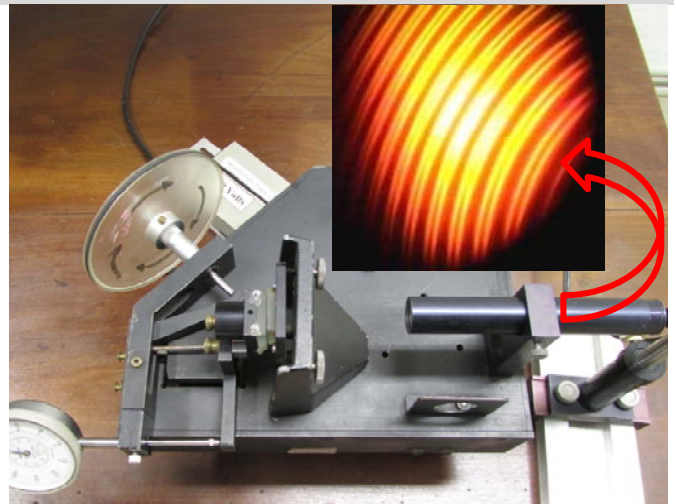
$$r_{k+1}^2 - r_k^2 = f^2 \frac{\lambda}{\mu t} . \quad (8)$$

## Objetivos

- ☞ Familiarizar-se com técnicas de alinhamento óptico.
- ☞ Familiarizar-se com o interferômetro de FP (funcionamento, determinação da constante K).
- ☞ Determinação de alguns comprimentos de onda (*laser* de HeNe e lâmpada de Hg filtrada).
- ☞ Investigar a radiação produzida por uma lâmpada de Na (dubleto de Na).

## Equipamentos

- 1 interferômetro de *Fabry-Perot*
- 1 *laser* de HeNe ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )
- 1 lâmpada de Hg
- 1 filtro para lâmpada de Hg
- 1 lâmpada de Na
- 1 telescópio (câmara CCD)
- 1 relógio comparador
- Lentes, suportes, anteparo, etc.

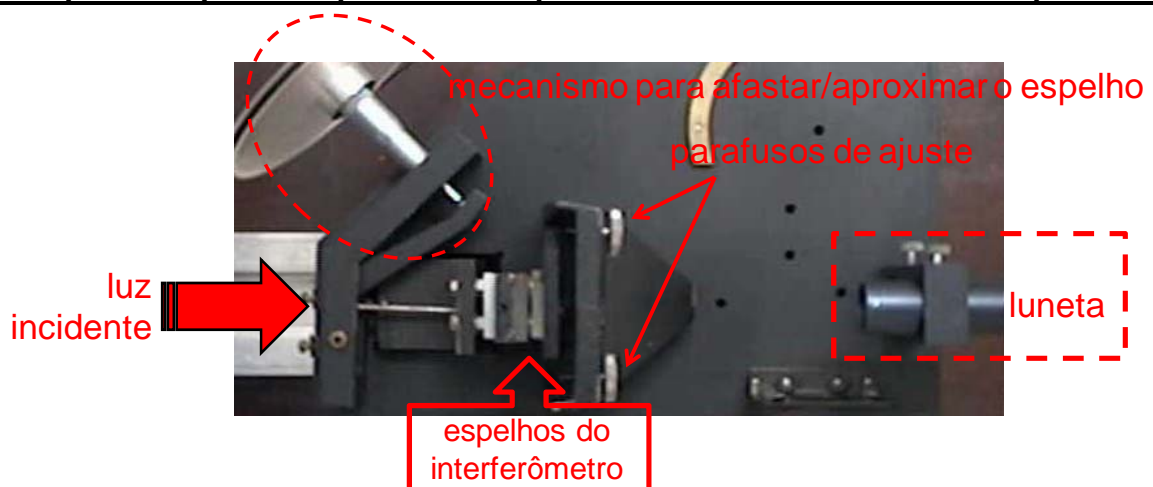


## Descrição do Experimento

Este experimento é dividido em três partes principais, conforme será apresentado a seguir. Antes, contudo, façamos uma breve descrição da montagem experimental e o procedimento para alinhar o interferômetro de FP.


Observe os componentes da montagem do instrumento acompanhando a Figura 2 e ajuste o interferômetro de maneira que a separação entre os espelhos seja da ordem de 1mm.

**Jamais permita que os espelhos se toquem e evite tocá-los em suas superfícies.**



**Figura 2** – Representação dos principais componentes do interferômetro de *Fabry-Perot*.

Ligue o *laser* de HeNe e faça-o incidir sobre o centro do primeiro espelho do interferômetro. Observe as reflexões (múltiplas) produzidas e faça com que estas coincidam ajustando os dois parafusos que regulam o plano de um dos espelhos. Na medida que os espelhos estiverem com suas superfícies refletoras paralelas, deve-se observar um padrão de franjas.

 **Nunca observe diretamente a radiação *laser*. Veja o padrão formado em um anteparo (folha de papel, por exemplo) ou, até mesmo, na parede da sala.**

Para garantir que o interferômetro esteja alinhado, movimente o mecanismo para deslocar um dos espelhos (parafuso micrométrico) e verifique se o padrão de franjas se “movimenta”. Caso isto não aconteça, repita o procedimento de alinhamento das reflexões múltiplas. O padrão pode se apresentar sob a forma de franjas paralelas ou circulares. Este último é obtido com o interferômetro perfeitamente alinhado, e é alcançado com o auxílio dos parafusos de ajuste. Uma vez que o interferômetro estiver alinhado evite tocar nos parafusos de ajuste.

## Procedimento Experimental

### 1 – Medida do comprimento de onda de fontes de radiação monocromática

#### *Laser de He-Ne*

Eventualmente, será necessário colocar um sistema de lentes entre o *laser* e a entrada do interferômetro para expandir o feixe de radiação. Tente projetar as franjas de interferência assim obtidas em uma tela ou na parede da sala. Anote a leitura do micrômetro que controla o deslocamento de um dos espelhos. Vire-o para valores de leitura maiores, enquanto observa o padrão das franjas – verá que vão desaparecendo no centro. Conte ao menos  $m = 100$  franjas de deslocamento e faça uma nova leitura do micrômetro.

Considerando-se que a radiação incidente seja normal ( $\theta = 0$ ) teremos as seguintes relações:

$$1^{\text{a}} \text{ leitura} \rightarrow n\lambda = 2t_1 \quad (9)$$

$$2^{\text{a}} \text{ leitura} \rightarrow (n+m)\lambda = 2t_2 \quad (10)$$

$$\text{Subtraindo uma expressão da outra} \rightarrow m\lambda = (t_2 - t_1) = K(D_2 - D_1), \quad (11)$$

onde  $t_1$  e  $t_2$  correspondem às separações dos espelhos (ver Fig. 1), e  $D_1$  e  $D_2$  são as leituras fornecidas diretamente pelo parafuso micrométrico (ou, em alguns interferômetros, pelo relógio comparador). Desta forma,  $K$  é uma constante (dada pelo fabricante do interferômetro) que estabelece a proporcionalidade entre a real separação entre os espelhos ( $t$ ) e uma leitura indireta (do parafuso micrométrico e/ou do relógio comparador).

O valor de  $K$  pode, então, ser determinado a partir de um comprimento de onda de referência ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  para o *laser* de HeNe) e da Eq.(11). Para melhorar a qualidade dos seus resultados: (1) repita a contagem de franjas (em grupos de 100) e anote o deslocamento correspondente, (2) obtenha o valor de  $K$  a partir de uma representação gráfica destes valores.

A fim de confirmar o valor de  $K$  assim obtido, adote o caminho inverso: suponha que  $\lambda$  seja desconhecido e, a partir de 3–5 contagens de grupos de 100 franjas, verifique se:

$$\lambda = \frac{2K}{m}(D_2 - D_1). \quad (12)$$

#### *Luz de Hg filtrada*

Com o interferômetro devidamente caracterizado, determine o  $\lambda$  da radiação proveniente de uma lâmpada de mercúrio acoplada a um filtro colorido. O procedimento é o mesmo descrito

anteriormente e envolve a contagem de franjas e verificação do deslocamento correspondente (várias vezes) e a utilização da Eq.(12).

Em ambos os casos (*laser* de HeNe e lâmpada de Hg) compare os resultados obtidos com aqueles esperados.

### Dubleto de Na

A emissão produzida pelo chamado dubleto de Na consiste de duas linhas espectrais (muito próximas) na região do amarelo: em 589.0 e 589.6 nm (Figura 3). Nesta parte do experimento, portanto, pretendemos determinar os  $\lambda$ 's emitidos por uma lâmpada de Na e verificar o poder de resolução do interferômetro utilizado.

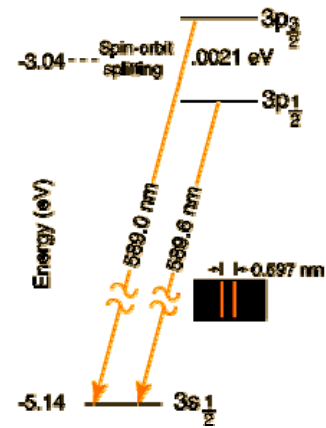


Figura 3 – Níveis de energia do Na.

Posicione a lâmpada de Na de modo a observar um bom padrão de interferência com os espelhos separados de  $\sim 1$  mm. Nesta condição, você deve ser capaz de notar a existência de dois conjuntos de franjas: um forte e outro fraco. Gire o parafuso micrométrico até que a linha mais fraca fique entre duas mais intensas – anote a leitura do micrômetro. Continue girando o parafuso micrométrico para valores maiores de leitura até que as franjas mais fracas coincidam com as mais fortes (situação de alto contraste) e novamente separe-as até que a linha mais fraca esteja no meio das fortes (situação de baixo contraste) – anote a leitura do micrômetro. Como o meio entre os espelhos é ar ( $\mu = 1$ ), no centro do padrão de interferência  $\cos\theta = 1$ . Desta forma teremos:

$$\text{situação inicial} \rightarrow m\lambda = 2t \quad (13)$$

$$1^{\text{a}} \text{ leitura} \rightarrow 2t_2 = m_1\lambda_1 = \left(m_1 + n + \frac{1}{2}\right)\lambda_2, \quad (14)$$

(Neste caso  $\lambda_1 > \lambda_2$  e a ordem do sistema de franja de menor comprimento de onda difere do sistema de maior comprimento de onda por um número ímpar semi-inteiro).

$$2^{\text{a}} \text{ leitura} \rightarrow 2t_2 = m_2\lambda_1 = \left(m_2 + n + \frac{3}{2}\right)\lambda_2, \quad (15)$$

$$\text{Por subtração é fácil verificar que: } 2(t_2 - t_1) = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (16)$$

$$\text{Como } \lambda_1 \approx \lambda_2 \Rightarrow \lambda_1 - \lambda_2 \approx \frac{\lambda^2}{2(t_2 - t_1)}. \quad (17)$$

$$\text{Lembrando da Eq.(11) que } (t_2 - t_1) = K(D_2 - D_1) \text{ teremos finalmente que: } \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2K(D_2 - D_1)}. \quad (18)$$

Repita a medida de alto–baixo contraste ao menos 2–3 vezes e determine o valor médio de  $\lambda$  como também o de  $\Delta\lambda$ . Compare seus resultados com aqueles indicados pela literatura.



## Questões

- ! Justifique a Equação (2).
  - ! Procure idealizar uma experiência onde seja possível comparar um padrão de comprimento óptico e um mecânico.
  - ! Calcule a intensidade relativa das franjas, tomando em conta que o feixe incidente está dado por  $\xi = ae^{i(\omega t - kx)} = ae^{i\phi}$ .
  - ! O que acontecerá quando um feixe de luz branca incidir sobre o interferômetro de FP e a luz transmitida for vista através de um espectrômetro (instrumento capaz de separar diferentes componentes espectrais)?
  - ! Como funciona um filtro de interferência? Compare-o com um interferômetro de FP.
  - ! Qual é o poder de resolução  $\Delta\lambda/\lambda$  do interferômetro utilizado? Discuta este valor frente à separação e a refletividade dos espelhos? Veja o artigo de Juvells e colaboradores (*Eur. J. Phys.* **27**, 1111 (2006) – <http://stacks.iop.org/EJP/27/1111>) para uma discussão estendida do assunto.
  - ! Discuta a respeito das figuras apresentadas na primeira página deste roteiro: porque são de cores diferentes? o que representam?
-

## Referências

### *Física Moderna*

*College Physics* (OpenStax College, 2012) <http://cnx.org/content/col11406/latest/>.

Paul Tipler, *Física Moderna* (Guanabara Dois, 1981) – **539^T595f**

A. C. Melissinos, *Experiments in Modern Physics* (Academic Press, 1966) – **539^M523e**

### *Interferômetros*

G. Hernandez, *Fabry-Perot Interferometers* (Cambridge University Press, 1986) – **535.4^H557**

J. M. Vaughan, *Fabry-Perot Interferometer: History, Theory, Practice and Applications* (Adam Hilger, 1989) – **535.4^V367f**

### *História* (conforme apresentadas na Introdução)

[1] Artigo original de C. Fabry and A. Perot na revista *Annales de Chimie et de Physique* [*Ann. Chim. Phys.* **16**, 366 (1899) – <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k34916d/f113.image.langPT> ]

### *Simulações*

Site da Universitat de Barcelona ([http://www.ub.edu/javaoptics/docs\\_applets/Doc\\_FabryEn.html](http://www.ub.edu/javaoptics/docs_applets/Doc_FabryEn.html))

Site do Dr Tim McIntyre (*School of Physical Sciences, The University of Queensland, Brisbane, Australia*) <http://www.physics.uq.edu.au/people/mcintyre/applets/fabry/fabry.html>

## Créditos

Ao longo dos anos, este roteiro passou por diversas atualizações e melhorias. A atual versão foi editada e revisada pelo Prof. A. R. Zanatta.

A foto da montagem experimental (com o detalhe do padrão de interferência do dubleto de Na) foi feita pelo Prof. M. Siu Li.

Os padrões de interferência e figuras apresentados na pg. 1 foram obtidos da *internet*.