

Exp. 12

Interferência e Difração

FSC2144 - Laboratório de Física IV
FSC5123 - Física experimental II

lemo.ufsc.br
Versão de 1 de abril de 2024

1 Objetivos

As medidas de comprimento de onda λ têm grande importância, pois permitem identificar elementos químicos, uma vez que o espectro ótico é uma característica particular de cada elemento, constituindo-se numa espécie de “impressão digital”. Por este processo, pesquisadores podem identificar elementos químicos de uma estrela, analisar componentes de um dado produto, a composição química de um fio de cabelo, etc. Nesta experiência, serão explorados os fenômenos básicos de interferência e difração, nos quais se apoiam essas técnicas de identificação.

Os principais objetivos são

- Usando uma lâmpada de sódio, observar os padrões de difração de fenda única, de fenda dupla e de fenda múltipla (ou rede de difração);
- Medir os comprimentos de onda de uma lâmpada espectral de mercúrio.

2 Teoria Básica

O fenômeno de difração ocorre tipicamente quando uma onda encontra um obstáculo ou uma abertura. Ele se aplica a todos os tipos de ondas, como ondas sonoras, ondas na água e ondas eletromagnéticas. Aqui, nos dedicaremos à difração da luz.

A difração é marcada pelo desvio da luz ao redor de um obstáculo ou abertura, invadindo a região da sombra geométrica do obstáculo. A difração ocorre para variados tamanhos de obstáculos, mesmo obstáculos grandes, embora seja mais pronunciada quando a luz atinge obstáculos pequenos, de dimensões comparáveis ao seu comprimento de onda λ , que está compreendido entre 0,4 e 0,7 μm no caso da luz visível.

Na Física Clássica, o fenômeno de difração é explicado pelo princípio de Huygens-Fresnel, que postula que, durante a propagação, cada ponto de uma frente de onda atua como uma fonte pontual de ondas esféricas. Essa coleção de ondas esféricas originárias (digamos) na entrada de uma fenda, interferem entre si num anteparo gerando uma figura de difração.

2.1 Fenda única

Quando uma onda plana ilumina uma fenda estreita o suficiente para que o fenômeno da difração seja observável, produz num anteparo distante uma imagem central intensa, acompanhada de imagens de intensidade menor, distribuídas simetricamente em relação à imagem central. Este conjunto de franjas projetado no anteparo recebe o nome de *padrão de difração de fenda única*. A figura 1 representa os vários níveis de intensidade luminosa ao longo do anteparo para a difração de fenda única. A máxima intensidade da luz projetada no anteparo está em seu centro, alinhada com fenda única na direção de propagação original da luz.

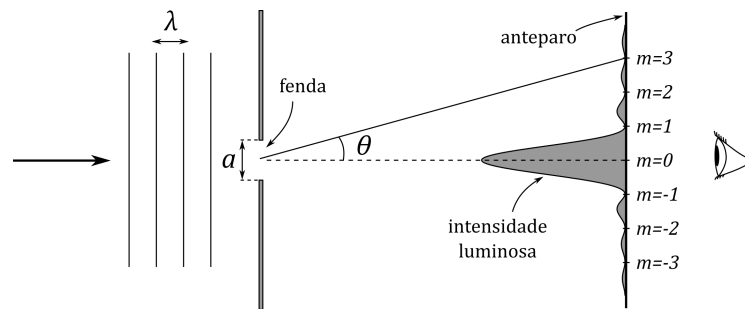


Figura 1 Padrão de difração de uma **fenda única** de largura a .

As chamadas *ordens de difração* são os diferentes picos de intensidade que aparecem no padrão de difração projetado no anteparo. No caso da fenda única, usamos os *mínimos* de intensidade para localizar as diferentes ordens. Assim, a primeira ordem à direita do pico central está localizada no ponto de mínimo $m = 1$. A segunda, no ponto de mínimo denominado $m = 2$, e assim por diante. O padrão de difração é simétrico e, do outro lado do pico central, aparecem as ordens de difração negativas, $m < 0$.

As ordens de difração também podem ser definidas em termos do ângulo θ_m formado entre o eixo original de propagação da luz e o eixo que liga a fenda a uma dada ordem m . Na difração de fenda única, a expressão que relaciona m e θ_m ao comprimento de onda λ e à largura a da fenda é

$$\boxed{a \operatorname{sen} \theta_m = m\lambda}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (1)$$

Esta equação mostra que as diferentes ordens de difração estão dispostas regularmente no anteparo. Por exemplo, a distância entre a ordem 0 (pico central) e o primeiro mínimo à direita é igual à distância entre o primeiro mínimo e o segundo mínimo; e assim sucessivamente. Vemos também que, quanto menor a largura da fenda, a , mais espaçadas entre si ficam as diferentes ordens de difração. O fenômeno, portanto, fica mais pronunciado quando a luz encontra pequenos obstáculos.

2.2 Fenda dupla

Analisemos o que ocorre quando substituímos uma fenda por duas. Historicamente, o experimento da fenda dupla ganhou grande destaque pois permitiu a Thomas Young (1773 - 1829) corroborar experimentalmente a teoria ondulatória da luz e realizar medições de seus comprimentos de onda.

Colocando uma fenda dupla na trajetória da luz, formam-se franjas claras e escuras no anteparo, originando uma *figura de interferência*. Na Figura 2, é representada a distância d entre os centros das duas fendas e a figura de interferência no anteparo, onde um pico mais alto significa maior intensidade luminosa (franja clara mais brilhante).

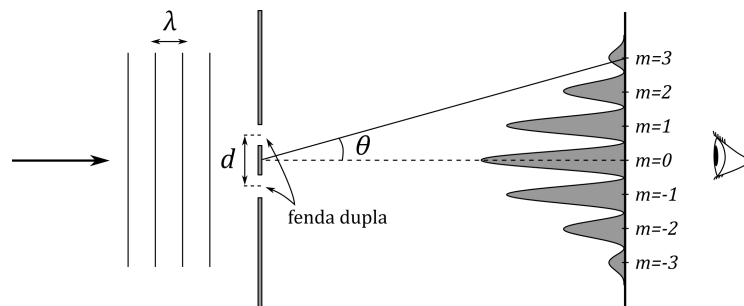


Figura 2 Padrão de difração de uma **fenda dupla** com espaçamento d entre as fendas.

Dois raios luminosos coerentes, isto é, em fase, que atravessam as fendas 1 e 2, encontram-se sobre o anteparo num certo ponto P, onde ocorre interferência. Se a diferença de percurso dos raios desde as fendas 1 e 2 até o ponto P for um múltiplo inteiro do comprimento de onda, $n\lambda$, a interferência será construtiva, resultando numa franja clara em torno de P. Se a diferença de percurso for igual a um número ímpar de meios comprimentos de onda, $(2n + 1)\lambda/2$, a interferência no ponto P será destrutiva, originando uma franja escura.

O cálculo das posições onde se formam as franjas claras no anteparo revela uma equação muito similar à equação (1) obtida para a fenda única. Devemos somente substituir a largura a da fenda única pela distância d entre os centros das fendas 1 e 2 e lembrar que, no caso da fenda dupla, a m -ésima ordem de difração é marcada pelo m -ésimo máximo de intensidade à direita (ou esquerda) do pico central. A equação para a fenda dupla é

$$d \sin \theta_m = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (2)$$

A Figura 3 mostra uma relação interessante entre os padrões de difração de fenda única e fenda dupla. O padrão de difração de fenda dupla possui um “envelope” (linha pontilhada) no formato do padrão de difração de fenda única. Dentro do envelope, encontram-se franjas de interferência devido à superposição das ondas provenientes das fendas 1 e 2. A posição dos máximos de intensidade está ligada, *não* à largura de cada fenda, a , mas ao espaçamento entre elas, d . Se, por exemplo, aproximamos as duas fendas uma da outra (diminuindo d), mas mantendo a largura individual a de cada uma delas, o número de picos de luminosidade dentro do envelope pontilhado diminui, embora tenhamos mantido a largura do envelope. Isto

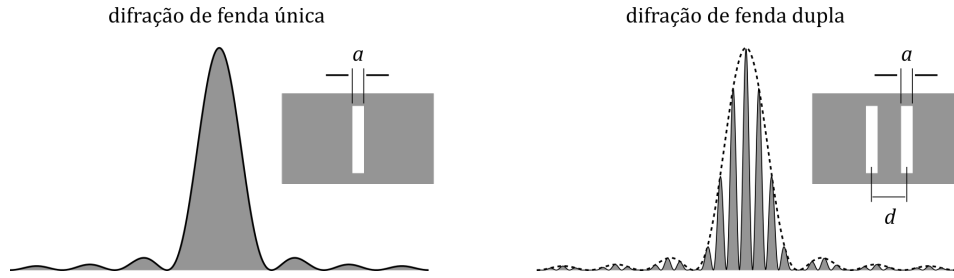


Figura 3 O padrão da fenda dupla é uma composição do padrão de fenda única com um padrão de interferência.

ocorre porque, ao diminuirmos d , afastamos as ordens de difração umas das outras, conforme a equação (2).

2.3 Fenda múltipla (rede de difração)

Se o número de fendas for aumentado de dois para um número suficientemente grande, teremos o que se conhece por *fenda múltipla* ou *rede de difração*. Uma rede de difração é, portanto, uma lâmina contendo um número elevado de fendas paralelas entre si. Estas fendas têm a mesma largura e estão espaçadas a intervalos regulares. A distância entre duas fendas consecutivas quaisquer é denominada espaçamento da rede e é representada por d .

O padrão de difração produzido num anteparo por uma rede de difração é composto por uma coleção de franjas cujas intensidades luminosas diminuem à medida que se afastam do máximo central. Neste sentido, ele é muito parecido com o padrão de fenda dupla. De fato, a equação que determina o ângulo das ordens de difração de uma rede é idêntica à de uma fenda dupla:

$$d \sin \theta_m = \frac{1}{N} \sin \theta_m = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (3)$$

Note que usamos $d = 1/N$, onde N o número de fendas por unidade de comprimento da rede (quanto mais fendas por unidade de comprimento, menor o espaçamento entre elas). N é geralmente o número fornecido pelos fabricantes. Por exemplo, se uma rede possui $N = 250$ fendas/mm, o espaçamento desta rede será $d = 1/250$ mm = 4,00 μ m.

Apesar da semelhança entre rede e fenda dupla, podemos apontar também diferenças marcantes. Uma delas é que, conforme construímos uma rede com mais e mais fendas, os picos de intensidade (ordens de difração) vão ficando cada vez mais finos. O efeito visual resultante é de que as franjas claras ficam estreitas e as escuras, largas.

Toda a discussão acima é válida para luz monocromática, de uma cor só. Se a luz incidente na rede de difração for branca, por exemplo, o máximo central ($m = 0$) também será branco. O máximo de 1ª ordem ($m = 1$) é um espectro completo, iniciando com a cor violeta e concluindo com a vermelha. O máximo de 2ª ordem é outro espectro completo; e assim sucessivamente. Estes espectros completos cor-

respondentes a ordens diferentes da difração são observados tanto à direita como à esquerda do máximo central.

3 Sobre a experiência

Nesta experiência, além das medidas iniciais com uma lâmpada de sódio, medem-se os comprimentos de onda de uma lâmpada de mercúrio (Hg). Na Tabela 1, tem-se a parte principal do espectro de mercúrio, com uma indicação da intensidade de cada linha espectral, para facilitar a identificação.

Cor	Intensidade	λ (Å)
amarela I	muito forte	5791
amarela II	muito forte	5770
verde	forte	5461
azul-verde I	fraca	4960
azul-verde II	média	4916
azul	forte	4358
violeta I	média	4078
violeta II	forte	4047

Tabela 1 Espectro da lâmpada de mercúrio (Hg) O angstrom (Å) é uma unidade frequentemente utilizada para expressar comprimentos de onda ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$). Outra unidade comum é o nanômetro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10 \text{ Å}$).

Pela teoria das redes de difração, cada cor que constituir o espectro da lâmpada será difratada em diversas ordens, cada ordem numerada por um inteiro m ($m = 0$ para a ordem central e, digamos, $m > 0$ para as ordens à direita). Conhecendo-se o parâmetro d da rede, o ângulo θ_m medido para uma dada ordem de difração m de uma dada cor, permite calcular o comprimento de onda λ desta cor: basta empregar a equação (3).

Espectrômetro Ótico

O espectrômetro ótico é o instrumento utilizado nesta experiência para medir os espectros fornecidos pelas fontes luminosas. Suas partes essenciais são:

- Colimador, cuja função é produzir um feixe de luz paralela;
- Plataforma suporte para as fendas e redes;
- Telescópio, que permite examinar os padrões de difração e espectros;
- Plataforma goniométrica, escala graduada que permite a medida das posições angulares de cada ordem de difração.

O telescópio e a plataforma graduada podem ser girados de maneira independente em torno de um eixo vertical comum, que passa pelo centro da plataforma. O telescópio possui uma ocular que permite a focalização da imagem da fenda do colimador, com um fio visível que serve de referência. Fixo ao braço do telescópio há um nônio que permite leituras sobre a plataforma graduada com precisão de 1' de arco.

4 Relação do material

- 01 espectrômetro ótico;
- 01 fonte de luz espectral de vapor de mercúrio;
- 01 fonte espectral de sódio;
- 01 fenda única (lâmina A);
- 01 fenda dupla (lâmina B);
- 02 redes de difração (lâminas C e D).

5 Esquema Experimental

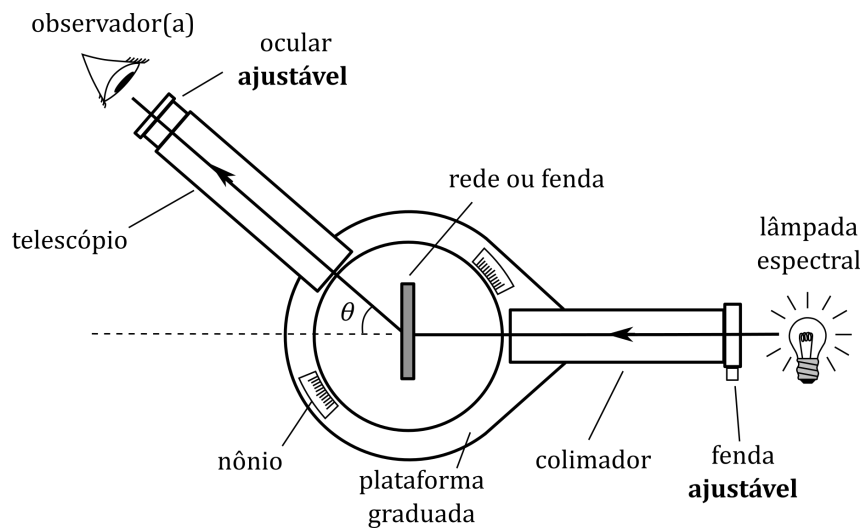


Figura 4 Representação esquemática da montagem experimental. Uma placa com uma, duas ou múltiplas fendas é posicionada no centro da plataforma. O ângulo θ de observação do telescópio pode ser ajustado livremente.

6 Procedimento Experimental

PRIMEIRA PARTE - Fenda única, dupla e múltipla

1. Ligue a lâmpada de sódio (Na). Usando o telescópio, verifique se a lâmpada está iluminando perfeitamente a **fenda do colimador**. Esta deve estar tão próxima da janela da lâmpada quanto possível (ver Figura 4).
2. A ocular do telescópio pode ser deslocada para dentro ou para fora na direção do tubo do telescópio. Olhe através da ocular e ajuste-a até obter uma imagem nítida e brilhante da **fenda do colimador**. A fenda possui uma largura que também pode ser ajustada, por meio de um parafuso no instrumento (ver Figura 4).
3. Posicione a **fenda única** (lâmina A) verticalmente no suporte especial sobre a plataforma do espectrômetro. Se necessário, ajuste mais uma vez a abertura do colimador e a ocular do telescópio até observar nitidamente o **padrão de difração** de fenda única, composto de franjas verticais, sendo a franja central mais larga que as demais.
4. Ajuste o fio de referência da ocular para a posição vertical e alinhe-o com a franja central. Usando o fio de referência, conte m mínimos de difração (m linhas escuras) para a esquerda, com m tão grande quanto a visibilidade das franjas permitir. Meça a posição angular (θ_-) do m -ésimo mínimo à esquerda. Faça o mesmo para o m -ésimo mínimo à direita (posição angular θ_+). Anote m , θ_- e θ_+ na Tabela I.
5. Calcule e anote na Tabela I o ângulo $\theta_m = \Delta\theta/2$, que é a metade do ângulo subtendido pelas duas posições medidas: $\Delta\theta = |\theta_+ - \theta_-|$. Baseando-se nos dados obtidos, determine a largura a da fenda única.
6. Substitua a fenda única pela **fenda dupla** (lâmina B) e observe seu padrão de difração, notando que a franja central agora tem a mesma largura que as demais.
7. Usando o fio de referência da ocular, meça a posição angular θ_- da m -ésima linha clara à esquerda da linha clara central, bem a posição θ_+ da m -ésima linha à direita. Anote m , θ_- e θ_+ na Tabela I. *OBS: em caso de dificuldade de identificar a franja central, basta tomar um número ímpar X de linhas claras adjacentes; a posição da primeira será θ_- , a posição da última será θ_+ e a ordem de difração será $m = (X - 1)/2$.*
8. Calcule o espaçamento d entre as fendas.
9. Substitua a fenda dupla pela **fenda múltipla** ou **rede de difração** (lâmina C). E repita o procedimento realizado para a fenda dupla.

SEGUNDA PARTE - Espectro do mercúrio

1. Troque a lâmpada de sódio pela lâmpada de mercúrio, verifique se a lâmpada está iluminando corretamente a fenda do colimador e alinhe o telescópio com a fenda do colimador.
2. Posicione a rede de difração de Rowland (lâmina D, com centenas de fendas **por milímetro**) verticalmente no suporte sobre a plataforma do espectrômetro.

Tenha cuidado ao manipular esta lâmina. Não toque diretamente na rede!

3. Gire o telescópio à esquerda e à direita. Você deve observar o espectro do Hg, constituído por linhas coloridas na primeira, segunda e terceira ordens. Identifique as linhas, conferindo-as com aquelas da Tabela 1 do texto, no que se refere a cor, intensidade e ordem de difração.
4. Inicie as medidas com a 1ª ordem da linha espectral Violeta II (a mais forte das duas linhas violetas). θ_- é a posição da linha à esquerda do centro ($m = -1$) e θ_+ a da primeira linha à direita do centro ($m = +1$). Anote os resultados na Tabela II.
5. Calcule o ângulo θ_m como anteriormente e determine o comprimento de onda correspondente a esta cor. Continue com as outras cores de acordo com a tabela.
6. Após todas as medidas com $m = 1$, escolha uma das cores para realizar uma medida com $m = 2$ (2ª ordem), conforme indicado na tabela.
7. Calcule todos os comprimentos de onda. Verifique seus resultados comparando-os com os valores fornecidos na Tabela 1 do texto.

7 Questionário

1. (a) Calcule a razão a/λ para a fenda única utilizada na experiência. Não é raro encontrar em livros didáticos a afirmação de que só é possível observar difração quando a dimensão a do obstáculo ou fenda tem a mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda λ , ou seja, quando $a \sim \lambda$. Baseando-se nas suas observações experimentais, responda: esta afirmação é verdadeira ou falsa?
(b) Que alteração haveria no padrão de difração da fenda única, no que se refere ao espaçamento entre as franjas, se a largura da fenda fosse duplicada?
2. Na experiência de Young (fenda dupla), porque a franja central do padrão de difração é um máximo de luminosidade?
3. Compare os resultados experimentais da Tabela I para a , d e N com seus respectivos valores fornecidos. Os resultados foram satisfatórios? Justifique baseando-se na precisão das medidas de ângulo com o espectrômetro ótico.
4. Calcule o erro percentual entre o comprimento de onda medido e o tabelado para cada uma das linhas da Tabela II (lâmpada de mercúrio). Apresente os resultados em forma de tabela no relatório.
5. Utilize seus dados experimentais para calcular o número de fendas por centímetro que deve ter uma rede de difração para que se obtenha o máximo de primeira ordem do violeta II a um ângulo $\theta_1 = 10^\circ$.

Exp. 12 - Interferência e Difração

GRUPO: _____

ALUNOS: _____

TURMA: _____

DATA: _____

➤ Primeira Parte - Fenda única, dupla e múltipla

TABELA I

Objeto	m	θ_-	θ_+	$\theta_m = \Delta\theta / 2$	$\text{sen } \theta_m$	RESULTADO
fenda única						$a =$
fenda dupla						$d =$
fenda múltipla						$N =$

Nota: Fenda única: a é a largura da fenda.

Fenda dupla: d é a distância entre os centros das duas fendas.

Fenda múltipla: N é o número de fendas por unidade de comprimento.

➤ Segunda Parte - Espectro do mercúrio

TABELA II

Cor	m	θ_-	θ_+	$\theta_m = \Delta\theta / 2$	$\text{sen } \theta_m$	λ (nm)
Violeta II	1					
Azul	1					
Azul-verde II	1					
Verde	1					
Amarela II	1					
Amarela I	1					
	2					