

Conteúdo

1	Polarização da Luz	9
1.1	Introdução	9
1.2	Polarizador e a Lei de Malus	11
1.3	Ângulo de Brewster	13
1.4	Procedimento Experimental	14
1.5	Polarizador	15
1.6	Calibração dos polarizadores em relação ao laser	16
1.7	Lei de Malus	16
1.8	Luz transmitida por dois polarizadores	17
1.9	Ângulo de Brewster	18
2	Reflexão e Refração	19
2.1	Medida do índice de refração do prisma	22
2.2	Medida do ângulo crítico no prisma	22
2.3	Medida do índice de refração da água	23
2.4	Medida do ângulo crítico da água	23
3	Espectroscopia por refração em um prisma	25
3.1	Introdução	25
3.2	Refração através de um prisma	26
3.3	Medidas de refração da luz em um prisma	29
3.4	Medida de D_{min}	31
3.5	Tratamento dos dados	32
4	Ótica Geométrica	33
4.1	Introdução	33
4.2	Formação da imagem em lentes delgadas	34
4.3	Noções sobre o olho humano	37

4.4	Defeitos da visão: miopia e hipermetropia	38
4.5	Noções sobre instrumentos óticos	39
4.6	Projeter	41
4.7	Microscópio composto	42
4.8	Determinação direta da distância focal de uma lente convergente	43
4.9	Determinação da distância focal de uma lente convergente através do método de Bessel	44
4.10	Determinação indireta do diâmetro da lâmpada	44
4.11	Estimativa do ponto próximo médio do grupo	45
4.12	Ampliação da imagem em um projetor	45
5	Interferência e difração da luz	47
5.1	Interferência em fenda dupla	47
5.2	Difração em Fenda Simples	48
5.3	Rede de Difração	49
5.4	Difração em Fenda Simples	51
5.5	Interferência com Fenda Dupla	52
5.6	Rede de Difração	53
6	Espectroscopia Ótica por Difração	55
6.1	Introdução	55
6.2	Calibração da Rede	56
6.3	Dispersão Angular	56
6.4	Procedimento Experimental	57
6.4.1	Ajustes iniciais	57
6.4.2	Tomada de Dados: Determinação de N_l	57
6.4.3	Tratamento dos dados	59
6.4.4	Tomada de dados: Determinação de um comprimento de onda desconhecido	59
6.4.5	Tratamento dos dados	59
7	Interferômetro de Michelson	61
7.1	Introdução	61
7.2	Medida de pequenos deslocamentos	63
7.3	Medida do índice de refração do ar	64

Informações Gerais

Aulas e prova

O período letivo será dividido em duas partes. Ao final de cada parte será realizada uma avaliação de laboratório (prova).

Presença

O número máximo de faltas é de 25% das aulas práticas.

Experimentos

Os alunos deverão se preparar previamente lendo e entendendo o roteiro correspondente ao experimento a ser realizado no laboratório, uma vez que não haverá tempo para uma explicação detalhada durante a aula. O roteiro será disponibilizado na primeira aula do curso.

Preferencialmente devem haver no máximo 3 alunos por bancada. Em cada horário poderão existir duas turmas (A e B). Como as experiências são independentes, devido à insuficiência de equipamento, as turmas A e B terão algumas práticas alternadas conforme o cronograma disponível.

Horário das aulas

As aulas de laboratório devem iniciar rigorosamente no horário estabelecido. O estudante que se atrasar mais do que 15 minutos, além do horário da aula, receberá falta e não poderá ingressar no laboratório.

Caderno de Laboratório e Relatórios

Deverão ser entregues no final da aula o caderno de laboratório **individual** com todas as anotações e procedimentos tomados.

Cada bancada deverá entregar, na aula subsequente, um relatório sobre a experiência anterior.

Os cadernos e os relatórios serão receberão nota. A média das notas dos cadernos e relatórios entrarão na composição da nota final, conforme os critérios descritos no item **Critério de Aprovação**.

Avaliação

Provas (P): 100 minutos Consiste da realização de uma experiência, com o equipamento disponível na sala, relacionada com aquelas feitas durante o curso (não necessariamente idêntica a elas). O aluno terá no máximo 50 minutos para montar a experiência e/ou obter os resultados solicitados. Terá ainda 50 minutos (ou o restante do tempo) para responder a questões sobre a experiência realizada e também sobre aspectos teóricos ou práticos de qualquer uma das experiências realizadas em sala.

Os roteiros das experiências, o caderno de laboratório e os relatórios NÃO poderão ser utilizados como fonte de consulta durante as provas.

Na prova, serão solicitados: realização de experimento e medidas, tratamento dos dados, montagem de gráficos, tratamento de erros, conclusões e críticas sobre os dados apresentados, cálculos e demonstrações sobre a parte teórica. O aluno deverá trazer lápis, caneta, régua e calculadora.

As provas serão realizadas no dia e horário normal de aula. Em caso de impedimento, por uma razão forte, o aluno deverá solicitar previamente à Coordenação a possibilidade de realizá-la em um outro dia e/ou horário. Mesmo tendo faltado a alguma das práticas experimentais, o aluno pode ser avaliado sobre a matéria correspondente a esta prática.

Serão realizadas duas provas ($P1$ e $P2$). A prova $P1$ corresponderá ao primeiro grupo de experiências, e a Prova $P2$ corresponderá ao grupo restante. Cada prova terá nota máxima igual a 10. Cadernos de Laboratório (C) e Relatórios (R): Como comentado acima, os mesmos serão corrigidos e receberão nota, que irá compor a nota final (N) do curso.

Critério de Aprovação

Serão aprovados os alunos que satisfizerem aos seguintes critérios:

- (a) Comparecerem a pelo menos 75% das aulas.

(b) Obtiverem nota final (N) superior ou igual a 5.

A nota final (N) será computada da seguinte maneira:

$$N = 0,4 \times P1 + 0,4 \times P2 + 0,2 \times M,$$

onde M é a média das notas dos relatórios e do caderno de laboratório (10 pontos no total).

Sobre a Apresentação e a Análise de Dados

1. **Toda** medida tem uma incerteza (estatística) associada a ela:

- incerteza da medida direta: associada ao processo de medida em si: instrumento + processo de medida.
- incerteza propagada: quando calculamos uma grandeza f que é função de uma ou mais grandezas (x, y, \dots) que possuem incertezas ($\sigma_x, \sigma_y, \dots$), estas incertezas são propagadas para f usando-se a expressão:

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \sigma_y\right)^2 + \dots$$

onde supomos que as variáveis x, y, \dots são independentes

- incerteza proveniente do ajuste de uma função (nos nossos estudos, normalmente uma reta): método dos mínimos quadrados.
- melhor aproximação para N resultados de medições de uma mesma grandeza y : se realizarmos N medições de uma grandeza y e obtivermos os resultados y_i com respectivas incertezas σ_i ($i = 1, \dots, N$), a melhor aproximação para o valor de y é a média ponderada:

$$\langle y \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N p_i y_i}{\sum_{i=1}^N p_i}; \quad p_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$$

e a incerteza $\sigma_{\langle y \rangle}$ é dada por $\sigma_{\langle y \rangle}^2 = 1 / \sum_{i=1}^N p_i$. Notem que, se os resultados das N medições tiverem incertezas idênticas $\sigma_i = \sigma$, a melhor aproximação para o valor de y se reduzirá 'a média simples $\langle y \rangle = \sum_{i=1}^N y_i / N$, com incerteza $\sigma_{\langle y \rangle} = \sigma / \sqrt{N}$.

- incerteza de medidas idênticas: Quando se realizam N medições idênticas de uma grandeza, espera-se que a incerteza estatística de cada medição seja a mesma. Se pudermos desprezar as incertezas relacionadas aos instrumentos de medida, tomamos como incerteza de cada medição o desvio padrão:

$$\sigma_{DP} \sim \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2}$$

A incerteza de cada medição, neste caso, é $\sigma = \pm \sigma_{DP}$. Note, no entanto, que a incerteza relacionada ao valor médio das N medições é dado por σ_{DP}/\sqrt{N} , conforme a discussão no item anterior.

Tabelas

Todas as grandezas devem vir acompanhadas das incertezas e unidades.

Exemplo:

i (cm)	o (cm)	f (cm)
39,6±0,3	5,4±0,2	3,8±0,2
17,3±0,4	8,3±0,3	4,0±0,1

onde o valor de f foi obtido a partir da expressão

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o} \rightarrow f = \frac{io}{i+o} \quad (1)$$

Algarismos significativos

- calcular incerteza
- apresentar incerteza com 1 ou **no máximo** 2 algarismos significativos.
- apresentar a medida com o número de algarismos significativos correspondente à incerteza.

Comparação do valor obtido através de medidas com um valor esperado

A resposta “está próximo do valor esperado” não é aceitável!!!

Comparações devem ser feitas de forma quantitativas. Por exemplo, vamos supor que para uma grandeza f temos o valor de referência $f_{ref} = 10,3$ cm, e o valor medido $f_{med} = 11,0 \pm 0,3$ cm. Aqui assumimos

que o desvio padrão da medida é igual a incerteza: $\sigma = 0,3$ cm. A **discrepância** é

$$D_f = |f_{med} - f_{ref}| = 0,7 = 2,3\sigma$$

Podemos dizer que o valor medida é compatível dentro de 3σ , ou seja, dentro de 3 desvios padrões.

Podemos também calcular a **discrepância relativa**:

$$DR_f = \frac{|f_{med} - f_{ref}|}{f_{ref}} = 0,07$$

ou seja, os valores são diferentes por 7% do valor de referência. Podemos comparar com o erro relativo de $\delta = 0,3$ cm / 11,0 cm = 0,03, e concluir que a discrepância relativa foi 2,3 δ .

Gráficos

Gráficos devem conter:

- grandeza e unidades nos eixos
- escolha adequada de escala
- barras de erro
- marcar nos eixos valores redondos e não os pontos da tabela
- usar pontos da reta para obter coeficiente angular e não os pontos da tabela
- **Atenção:** o coeficiente angular a da reta $y = ax + b$ geralmente tem unidade, já que $a = \Delta y / \Delta x$, e as grandezas Δy e Δx podem ter unidades diferentes. Por exemplo, considere o gráfico $x \times t$, onde x é a posição, em metros (m), no instante de tempo t , medido em segundos (s), de uma partícula em movimento retilíneo uniforme. Esse gráfico será uma reta, e seu coeficiente angular $\Delta x / \Delta t$ (velocidade da partícula) será dado em metros por segundo (m/s).
- a incerteza no coeficiente angular sai do método dos mínimos quadrados. Em alguns casos sugeriremos uma porcentagem do valor do coeficiente angular.

1.1 Introdução

Em geral, podemos descrever a luz que se propaga em meios transparentes como uma onda eletromagnética transversal. Isso significa que, a cada instante, os campos elétrico e magnético associados a essa onda são descritos por vetores ortogonais à direção de propagação da mesma, como mostra a Fig. 1.1:

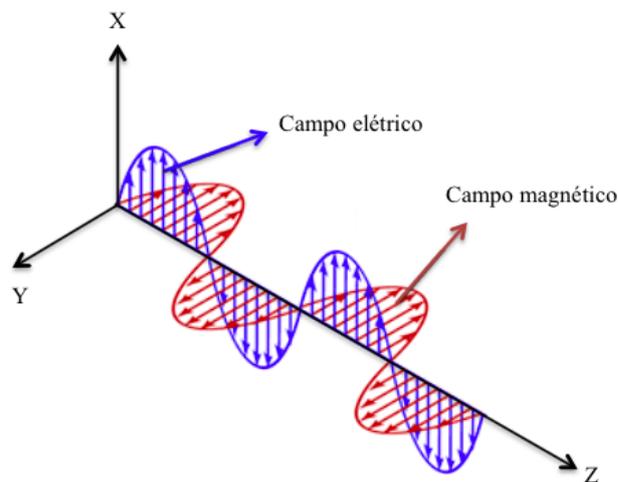


Figura 1.1: Onda eletromagnética se propagando ao longo da direção z.

Para descrevermos completamente tal onda, precisamos, a cada instante, especificar não só o módulo, mas também, a direção desses vetores. O estado de polarização da luz é determinado pelo comportamento temporal da orientação do vetor campo elétrico, em qualquer plano ortogonal a sua direção de propagação. Se, por exemplo, em uma dada posição ao longo da direção

de propagação da luz, apenas o módulo e o sentido do vetor campo elétrico mudam no tempo, enquanto sua direção permanece fixa, dizemos que a luz é linearmente polarizada. A direção da polarização é dada pela direção do vetor campo elétrico. A Fig. 1.2 ilustra luz linearmente polarizada a 45° com relação ao eixo X (curva vermelha):

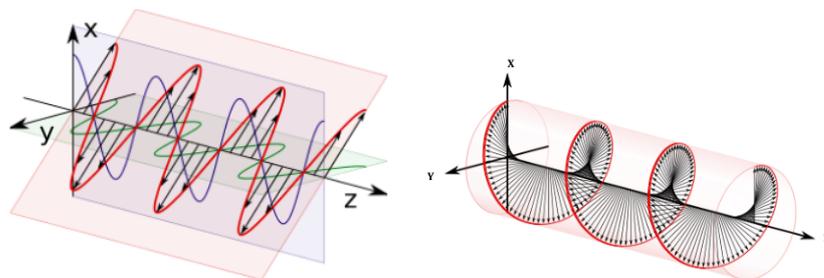


Figura 1.2: Onda eletromagnética linearmente polarizada à 45 graus e circularmente polarizada

A luz polarizada a 45° é uma superposição de luz linearmente polarizada na horizontal (curva verde) com luz linearmente polarizada na vertical (curva azul). Dependendo das amplitudes das componentes horizontais e verticais A_H e A_V , poderemos ter o vetor campo elétrico formando um ângulo θ com o eixo X dado por:

$$\tan\theta = \frac{A_H}{A_V} \quad (1.1)$$

onde $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. No caso de luz polarizada verticalmente (horizontalmente) temos $\theta = 0^\circ$ ($\theta = 90^\circ$). O que caracteriza a luz linearmente polarizada é o fato de a componente horizontal oscilar em fase ou em oposição de fase (defasagem de meio comprimento de onda) com a componente vertical. Quando este comportamento não se verifica temos luz elipticamente polarizada. Neste caso, tanto o módulo, quanto a direção do campo elétrico variam no tempo, em uma dada posição. Resulta que a extremidade do vetor campo elétrico descreve uma elipse ou um círculo (caso particular em que a defasagem entre a componente horizontal e vertical é um quarto do comprimento de onda e as amplitudes A_H e A_V são iguais). A Fig. 1.2 ilustra a luz circularmente polarizada.

Dependendo do sentido de percurso do círculo pelo vetor campo elétrico, a polarização da luz pode ser classificada em circular esquerda (mostrada na Fig. 1.2) ou direita, se em sentido contrário. Muitas vezes, a direção do vetor campo elétrico varia aleatoriamente no tempo, em uma dada posição, como mostra a Fig. 1.3. Nesses casos, dizemos que a luz é não polarizada.

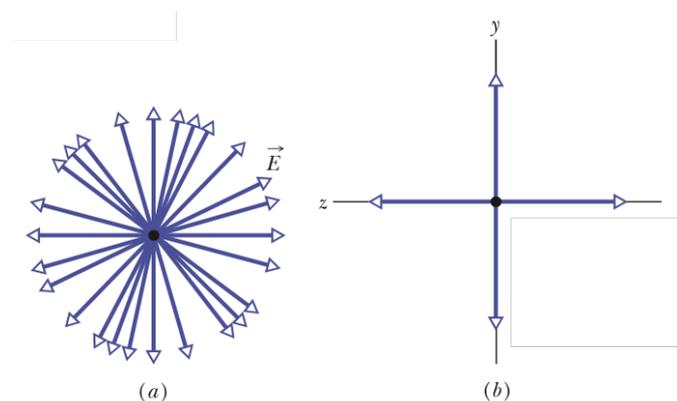


Figura 1.3: (a) Luz não polarizada e (b) representação mais simples da luz não polarizada.

1.2 Polarizador e a Lei de Malus

A orientação do campo elétrico da luz é fundamental na determinação de seu comportamento na interação com a matéria. Alguns materiais transmitem toda a luz polarizada em uma dada direção refletindo ou absorvendo toda a luz polarizada na direção perpendicular. Estes materiais são utilizados para construir polarizadores. O eixo de polarização define a direção da luz transmitida pelo polarizador, como mostra a Fig. 1.4.

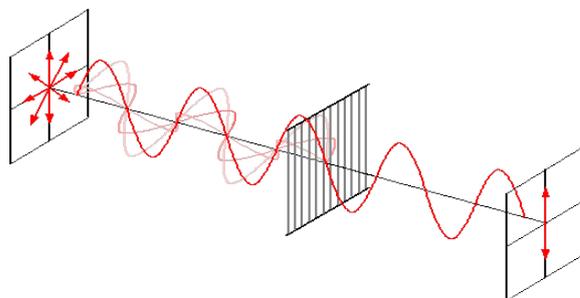


Figura 1.4: Comportamento da luz ao passar por um polarizador de acordo com a orientação do seu eixo.

Lei de Malus

Consideraremos um feixe de luz inicialmente polarizado linearmente numa direção θ_0 . (Na experiência que faremos no laboratório, utilizaremos um laser de diodo que já emite um feixe de luz linearmente polarizado). Após passar através de um polarizador que tem seu eixo de polarização ao longo da direção θ_1 , a parte do feixe que é transmitida fica polarizada na direção θ_1 , como mostra a Fig. 1.5.

A intensidade do feixe transmitido por um polarizador ideal (sem perdas)

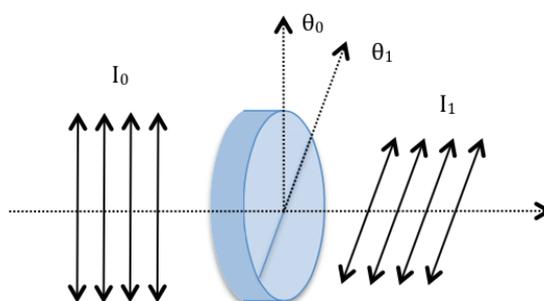


Figura 1.5: Transmissão de um feixe de luz inicialmente polarizada através de um polarizador.

e dada pela Lei de Malus:

$$I_1 = I_0 \cos^2(\theta_1 - \theta_0), \quad (1.2)$$

onde I_0 é a intensidade incidente no polarizador e I_1 a intensidade transmitida pelo mesmo. Na prática, a intensidade transmitida I_1 quando o polarizador está alinhado com a polarização do feixe incidente ($\theta_1 = \theta_0$) será menor que I_0 devido a perdas. No caso dos polarizadores utilizados neste experimento, a maior parte das perdas será por reflexão.

No caso de luz não polarizada, apenas a componente paralela ao eixo do polarizador é transmitida conforme a Fig. 1.6:

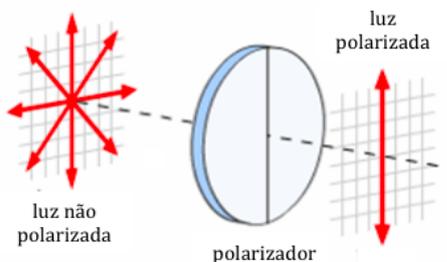


Figura 1.6: Incidência de luz não polarizada em um polarizador.

A intensidade da luz transmitida neste caso é uma média do lado direito da Eq. (1.3) para todos os ângulos ($\theta_1 - \theta_0$) variando entre $0 \leq (\theta_1 - \theta_0) \leq 2\pi$. Neste caso, teremos:

$$I_1 = \frac{I_0}{2} \quad (1.3)$$

Para uma associação de dois polarizadores em sequência, a intensidade da luz que passa pelo segundo polarizador é:

$$I_2 = I_0 \cos^2(\theta_1 - \theta_0) \cdot \cos^2(\theta_2 - \theta_{02} - [\theta_1 - \theta_0]). \quad (1.4)$$

Os óculos de sol com lentes polarizadoras utilizam este efeito para atenuar a luz natural, que em geral é não polarizada.

1.3 Ângulo de Brewster

Há várias maneiras de se produzir luz polarizada a partir de luz não polarizada, além da utilização de polarizadores. Uma destas maneiras é a polarização por reflexão. É sempre possível decompor a polarização da luz incidente sobre uma superfície de separação entre dois meios em uma componente paralela ao plano de incidência (plano formado pela direção da luz incidente e a direção normal) e outra perpendicular ao mesmo, como mostra a Fig. 1.7.

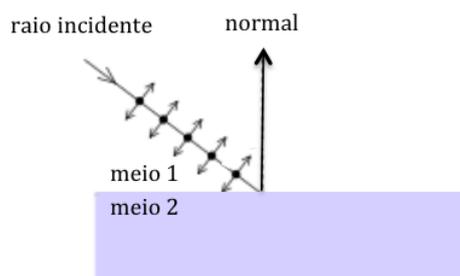


Figura 1.7: Luz incidente na superfície de separação entre dois meios.

Na Fig. 1.7, a seta dupla corresponde à componente paralela e o ponto (representando um vetor perpendicular à folha de papel, apontando para fora) corresponde à componente perpendicular ao plano de incidência.

Para estudar a reflexão e a refração é necessário saber como o campo eletromagnético se comporta na interface entre dois meios. Usando as leis do eletromagnetismo clássico, é possível mostrar que na reflexão, a componente de polarização paralela ao plano de incidência se anula completamente para um determinado ângulo de incidência θ_B denominado ângulo de Brewster, como mostra a Fig. 1.8:

Portanto, se um raio de luz não polarizada atingir à superfície no ângulo de Brewster, a luz refletida será polarizada na direção perpendicular ao plano de incidência. O ângulo de Brewster deve satisfazer a relação:

$$\theta_B + \theta_2 = 90^\circ \quad (1.5)$$

onde θ_2 é o ângulo entre a direção do raio refratado e a normal à superfície de separação.

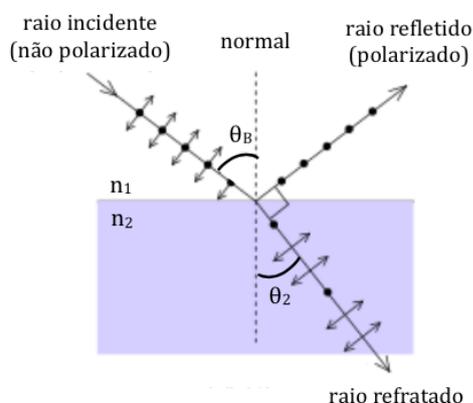


Figura 1.8: Ângulo de Brewster.

Como o ângulo entre o raio de incidência e a normal é sempre igual ao ângulo entre o raio refletido e a normal, resulta que nesta situação, a direção do raio refletido e o raio refratado são perpendiculares, como mostra a Fig. 1.8. Usando a lei de Snell e sabendo que:

1. O raio incidente I , o raio refletido I' , o raio refratado R e a normal N no ponto de incidência, estão no mesmo plano;
2. O ângulo de reflexão i' é igual ao ângulo de incidência i ;
3. A relação entre os ângulos de incidência (i) e de refração (r) é dada por :

$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r), \quad (1.6)$$

é possível estabelecer uma relação entre o ângulo de Brewster e os índices de refração n_1 e n_2 dos meios:

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.7)$$

Esta propriedade física pode ser utilizada para se fotografar objetos embaixo da água. A luz do sol incidente no ângulo de Brewster se reflete com polarização paralela à superfície da água (perpendicular ao plano de incidência). Usando um filtro polarizador e girando-o para que seu eixo fique ortogonal a esta direção de polarização, elimina-se a luz do sol refletida e pode-se fotografar os objetos imersos na água, como mostra a Fig. 1.9:

1.4 Procedimento Experimental

Confira todo o material antes de iniciar e o organize depois que finalizar a experiência. Avise ao professor no início da aula se faltar algum item. O



Figura 1.9: Eliminação do reflexo com filtro polarizador.

aparato para a realização da primeira parte da experiência é mostrado na Fig. 1.10.



Figura 1.10: Aparato experimental para estudo da polarização da luz.

1.5 Polarizador

1. Observe a luz da luminária no teto da sala, olhando através de um polarizador. Agora gire o polarizador. O que acontece com a intensidade

da luz que passa pelo polarizador enquanto ele é girado? Podemos concluir que a luminária emite luz polarizada ou não polarizada? Por quê?

2. Agora observe a luz da luminária da sala olhando através de dois polarizadores. O que acontece quando você gira um polarizador em relação ao outro? O que podemos concluir sobre a polarização da luz que passa por um polarizador?
3. Agora coloque um polarizador na frente do laser e gire-o. Podemos concluir que o laser emite luz polarizada ou não polarizada? Por quê?

1.6 Calibração dos polarizadores em relação ao laser

Sabemos que o laser é polarizado, mas não sabemos qual a orientação de sua polarização. O procedimento a seguir visa determinar os ângulos θ_{01} e θ_{02} para os quais os eixos dos polarizadores 1 e 2 ficam alinhados com a direção de polarização do laser, respectivamente.

1. Usaremos um detector para medir a intensidade da luz. Alinhe o feixe de laser para que ele atinja diretamente o detector, maximizando o sinal detectado. Anote o valor da intensidade I_0 e sua incerteza σ_{I_0} ;
2. Posicione o polarizador 1 na direção do feixe do laser. Gire o polarizador até que a intensidade detectada seja máxima. Anote os valores do ângulo do polarizador θ_{01} , de sua incerteza $\sigma_{\theta_{01}}$, da intensidade transmitida I_{01} e de sua incerteza $\sigma_{I_{01}}$;
3. Compare esse valor com I_0 . Por quê eles são diferentes? Calcule o fator de atenuação do polarizador $A_{P_1} = \frac{I_{01}}{I_0}$;
4. Retire o polarizador 1 e repita o procedimento acima para o polarizador 2. Anote os valores de θ_{02} , $\sigma_{\theta_{02}}$, I_{02} , $\sigma_{I_{02}}$ e A_{P_2} .

1.7 Lei de Malus

1. Retire o polarizador 2 e coloque o polarizador 1 na montagem;
2. Varie o ângulo θ_1 do polarizador e meça os respectivos valores de intensidade I_1 ;
3. Para cada linha da tabela, calcule o valor de $\cos^2(\theta_1 - \theta_{01})$ e sua incerteza $\sigma_{\cos^2(\theta_1 - \theta_{01})}$;
4. Faça um gráfico de I_1 em função de $\cos^2(\theta_1 - \theta_{01})$;

5. Desenhe a reta que melhor se ajusta aos dados experimentais e obtenha graficamente o valor da intensidade máxima transmitida, I_{01}^g ;
6. Calcule a discrepância relativa DR em relação ao valor esperado I_{01} . Considere compatível um resultado menor ou igual a 5%.

1.8 Luz transmitida por dois polarizadores

1. Retire o polarizador 1 e coloque o polarizador 2 na montagem perto do detector. Alinhe o polarizador 2 com o ângulo $\theta_{02} + 90^\circ$, que corresponde ao mínimo de intensidade;
2. O que você espera que aconteça se colocar o polarizador 1 entre o laser e o polarizador 2?
3. Ajuste o ângulo do polarizador 1 para $\theta_{01} + 45^\circ$ e insira o polarizador 1 entre o laser e o polarizador 2. O que acontece?
4. Gire o ângulo do polarizador 1. O que acontece?
5. Explique como é possível que a introdução do polarizador 1 entre o laser e o polarizador 2 possa fazer a intensidade transmitida voltar a ser diferente de zero;
6. Varie o ângulo θ_1 do polarizador 1 e determine para que valor de θ_1 a intensidade transmitida é máxima, bem como o valor desta intensidade;
7. Demonstre, aplicando sequencialmente lei de Malus que, para esta situação específica, a intensidade transmitida através do conjunto de dois polarizadores ideais é dada pela relação:

$$I_2 = \frac{I_0}{4} \sin^2(2[\theta_1 - \theta_0]), \quad (1.8)$$

onde I_0 é a intensidade inicial;

8. Varie o ângulo θ_1 entre θ_{01} e $\theta_{01} + 45^\circ$ e meça os valores da intensidade I_2 ;
9. Para cada linha da tabela, calcule o valor de $\sin^2(2[\theta_1 - \theta_0])$ e sua incerteza $\sigma_{\sin^2(2[\theta_1 - \theta_0])}$;
10. Faça um gráfico de I_2 em função de $\sin^2(2[\theta_1 - \theta_0])$;
11. Desenhe a reta que melhor se ajusta aos dados experimentais e obtenha graficamente o valor da intensidade máxima transmitida, I_2^g ;

12. Para polarizadores não ideais, I_0 da expressão (1.8) deve ser substituído por I'_0 , onde:

$$I'_0 = I_0 A_{P_1} A_{P_2}, \quad (1.9)$$

resultando em:

$$I_2 = \frac{I'_0}{4} \sin^2(2[\theta_1 - \theta_0]); \quad (1.10)$$

13. Calcule a discrepância relativa DR entre I_2^g e valor esperado I'_0 . Considere compatível um resultado menor ou igual a 5%;
14. Qual a relação entre I_{02} e I'_0 ?
15. Explique fisicamente a expressão (1.9).

1.9 Ângulo de Brewster

O objetivo desta experiência é determinar o índice de refração de uma lâmina de vidro, medindo-se o ângulo de Brewster.

1. Certifique-se de que o polarizador está na posição correta na base. Isto garante que a luz incidente só possui componente na direção paralela ao plano de incidência;
2. Gire a base da lâmina até que a luz refletida praticamente se extinga. Anote o ângulo θ correspondente a esta posição e sua incerteza σ_θ ;
3. Sem mexer na posição da lâmina, gire o polarizador de um ângulo de 90° . O que aconteceu? Explique;
4. Com base na Fig. 1.8 e no ângulo θ medido, determine o ângulo de Brewster θ_B e sua incerteza σ_{θ_B} ;
5. Considerando o índice de refração do ar n_{ar} igual a 1, determine através da Eq. 1.7, o índice de refração da lâmina de vidro n_v e sua respectiva incerteza σ_{n_v} ;
6. Calcule a discrepância absoluta D entre n_v e o valor de referência $n_{v_{ref}} = 1,54$.

Reflexão e Refração

A reflexão da luz é um dos fenômenos mais comuns envolvendo a propagação da luz. Esta ocorre quando a luz incide sobre a superfície de separação entre dois meios com propriedades distintas.

Quando a luz incide sobre uma superfície que separa dois meios, podem ocorrer dois fenômenos distintos: parte da luz volta e se propaga no mesmo meio no qual a luz incidiu (reflexão da luz), outra parte da luz passa de um meio para o outro propagando-se nesse segundo (refração da luz).

Os dois fenômenos ocorrem concomitantemente, podendo haver a predominância de um fenômeno sobre o outro dependendo das condições de incidência e da natureza dos dois meios.

Se a superfície de separação entre os dois meios for plana e polida, então para um feixe incidente de raios luminosos e paralelos teremos um feixe refletido de raios luminosos e igualmente paralelos. Neste caso teremos uma reflexão dita regular.

Se a superfície de separação apresentar rugosidades a reflexão será difusa, ou seja, a luz será espalhada em todas as direções. Desta forma, se considerarmos um feixe de raios luminosos incidentes paralelos, os raios refletidos irão tomar as mais diversas direções. A grande maioria dos objetos reflete a luz desta maneira e isso nos permite vê-los em muitas posições com relação a ele.

A luz pode ainda, ser parcialmente ou totalmente absorvida pelo objeto. Diferentes materiais absorvem luz de formas diferentes e por isso vemos objetos das mais variadas cores.

Nesta unidade, trataremos os fenômenos de reflexão e refração sob o ponto de vista geométrico, usando o conceito de raio de luz (ótica geométrica). Esse tratamento é adequado, uma vez que as superfícies encontradas pela onda eletromagnética têm dimensões muito maiores do que o comprimento de onda λ . Na situação em que um raio se propaga num meio de índice de refração n_1 e, após incidir numa superfície de separação, continua

a propagar-se num meio de índice de refração n_2 (vide Figura 2.1), as relações entre as direções de propagação dos raios incidente, refletido e refratado são determinadas pela lei de Snell, onde, como já vimos:

1. O raio incidente I , o raio refletido I' , o raio refratado R e a normal N no ponto de incidência, estão no mesmo plano;
2. O ângulo de reflexão i' é igual ao ângulo de incidência i ;
3. A relação entre os ângulos de incidência (i) e de refração (r) é dada por :

$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r), \quad (2.1)$$

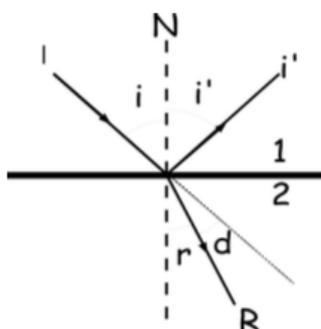


Figura 2.1: Reflexão e refração da luz.

A Figura 2.2 mostra vários raios de luz monocromática sendo emitidos por uma fonte pontual S , propagando-se na água e incidindo na interface da água com o ar.

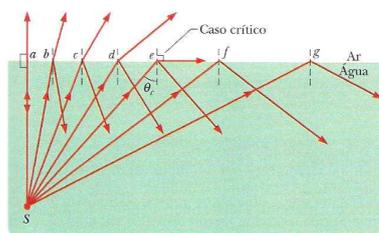


Figura 2.2: A reflexão interna total da luz acontece para ângulos maiores do que o ângulo crítico θ_c .

No caso do raio a , que incide perpendicularmente à interface, parte da luz é refletida nesta interface e parte é transmitida pelo ar sem mudar de direção. Para o caso dos raios b à e , que chegam a interface com ângulos

cada vez maiores, também existem um raio refletido e um raio refratado. À medida que o ângulo de incidência aumenta, o ângulo de refração também aumenta, ao ponto que, para o raio e o ângulo de refração é de 90° , o que significa que o raio refratado é paralelo à interface.

O ângulo de incidência para o qual isso acontece é chamado de **ângulo crítico** e é representado pelo símbolo θ_c . Para ângulos de incidência maiores do que θ_c , como os dos raios f e g , não existe raio refratado e *toda* luz é refletida. Esse fenômeno é conhecido como **reflexão interna total**.

Para determinar o valor do ângulo θ_c usamos a Equação 2.1 atribuindo o índice 1 ao vidro e o 2 ao ar e fazendo $\theta_1 = \theta_c$ e $\theta_2 = 90^\circ$, obtendo:

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ, \quad (2.2)$$

assim,

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.3)$$

- LEIA ATENTAMENTE O PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ATÉ O FINAL, ANTES DE COMEÇAR A TRABALHAR EM SUA MONTAGEM.

- EVITE O CONTATO MANUAL COM A SUPERFÍCIE DAS LENTES E DO PRISMA!

- Confira todo o material antes de iniciar e o organize depois que finalizar a experiência. Avise ao professor no início da aula se faltar algum item.

2.1 Medida do índice de refração do prisma

Este experimento tem como objetivo a obtenção do valor do índice de refração do prisma utilizando a Lei de Snell descrita acima [Equação (2.1)].

1. Coloque o prisma “meia lua” no centro do transferidor;
2. Ligue o laser e incida o feixe na face curva do prisma, com um ângulo θ_1 com relação a normal a esta face;
3. Confira se o feixe refletido faz um ângulo θ'_1 com a mesma normal;
4. Meça o ângulo θ_T que o feixe transmitido faz com a normal;
5. Utilizando a Equação (2.1) calcule o índice de refração n_2 do prisma;
6. Repita o procedimento anterior para os outros dez ângulos de incidência diferentes;
7. Faça uma média aritmética com os valores obtidos para n_2 e estime a incerteza desse valor.

2.2 Medida do ângulo crítico no prisma

Este experimento tem como objetivo a obtenção do valor do ângulo crítico utilizando a Lei de Snell na forma da equação (2.3).

1. Coloque o prisma “meia lua” no centro do transferidor;
2. Ligue o laser e incida o feixe na face reta do prisma, com um ângulo θ_1 com relação a normal a esta face;
3. Confira se o feixe refletido faz um ângulo θ'_1 com a mesma normal;

4. Meça o ângulo θ_T que o feixe transmitido faz com a normal;
5. Utilizando a Equação (2.1) calcule o índice de refração n_1 do prisma;
6. Repita o procedimento anterior para outros ângulos de incidência diferentes;
7. Faça uma média aritmética com os valores obtidos para n_1 e estime a incerteza desse valor;
8. Meça o valor do ângulo crítico e de acordo com a equação (2.3) obtenha o valor índice de refração do prisma considerando o do ar como sendo 1 e estime a incerteza deste valor;
9. Compare os valores do índice de refração do prisma obtidos aqui com o obtido na seção anterior. Qual deve estar mais correto e porque?

2.3 Medida do índice de refração da água

1. Preencha metade do círculo com água;
2. Coloque o círculo com a metade cheia de água no centro do transferidor;
3. Ligue o laser e incida o feixe na metade vazia de água, com um ângulo θ_1 com relação a normal ao círculo;
4. Confira se o feixe refletido faz o mesmo ângulo θ'_1 com a normal;
5. Meça o ângulo θ_1 que o feixe refletido faz com a normal;
6. Meça o ângulo θ_T que o feixe transmitido faz com a normal;
7. Gire o transferidor de forma a aumentar o ângulo de incidência;
8. Repita o procedimento anterior para os outros dez ângulos de incidência;
9. Utilizando a Equação (2.1) calcule o índice de refração n_2 do prisma;
10. Faça uma média aritmética com os valores obtidos para n_2 e estime a incerteza desse valor.

2.4 Medida do ângulo crítico da água

1. Ligue o laser e incida o feixe na metade cheia de água, com um ângulo θ_1 com relação a normal ao círculo;
2. Confira se o feixe refletido faz o mesmo ângulo θ'_1 com a normal;

3. Meça o ângulo θ_T que o feixe transmitido faz com a normal;
4. Utilizando a Equação (2.1) calcule o índice de refração n_1 da água;
5. Repita o procedimento anterior para outros ângulos de incidência diferentes;
6. Faça uma média aritmética com os valores obtidos para n_1 e estime a incerteza desse valor;
7. Meça o valor do ângulo crítico e de acordo com a equação (2.3) obtenha o valor índice de refração da água considerando o do ar como sendo 1 e estime a incerteza deste valor;
8. Compare os valores do índice de refração da água obtidos aqui com o obtido na seção anterior. Qual deve estar mais correto e porque?

Espectroscopia por refração em um prisma

3.1 Introdução

Espectroscopia é o estudo da interação entre radiação e matéria em função do comprimento de onda (ou frequência) da luz. Em seus primórdios, a espectroscopia esteve intimamente ligada ao fenômeno da dispersão da luz por um meio refrativo, como um prisma, por exemplo. A refração é o desvio que um feixe de luz sofre ao atravessar a superfície entre dois meios. Isto acontece porque a sua velocidade varia conforme o meio em que se propaga. Se este feixe for composto de radiação de diversos comprimentos de onda (λ) os desvios para cada um desses comprimentos de onda serão diferentes entre si, porque cada um deles propaga-se no meio com uma velocidade diferente, que depende do valor de λ . Isso resulta na dispersão do feixe, dado que as componentes de diferentes comprimentos de onda sofrerão desvios diferentes. Todos os meios transparentes são mais ou menos dispersivos. Apenas o vácuo, no qual a luz se propaga sempre com a velocidade $c \sim 2,998 \times 10^8$ m/s, independente de seu comprimento de onda, é não-dispersivo. A um meio transparente associamos um índice de refração n , que é definido como sendo a razão entre a velocidade c da luz no vácuo e a velocidade v da luz naquele meio:

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.1)$$

Como a velocidade de propagação da luz em um dado meio depende de seu comprimento de onda, o índice de refração n de um meio não é constante e depende do comprimento de onda da luz. Para ondas eletromagnéticas em geral, e para a luz em particular, uma expressão satisfatória aproximada para o índice de refração em função do comprimento de onda é dada pela fórmula de Cauchy :

$$n(\lambda) = b\lambda^{-2} + a \quad (3.2)$$

onde a e b são constantes características do meio em que as ondas se propagam.

Na tabela abaixo, são mostrados, a título de ilustração, índices de refração para gases, líquidos e sólidos a temperaturas específicas. Estes dados foram obtidos para luz com um comprimento de onda específico.

Gases(0°C)	n	Gases(0°C)	n
Ar	1,000293	Hélio	1,000036
Hidrogenio	1,000132	Dióxido de carbono	1,000490
Líquidos (20°C)	n	Líquidos (20°C)	n
Benzeno	1,501	Água	1,333
Etanol	1,361	Tetracloro de carbono	1,461
Sólidos (25°C)	n	Sólidos (25°C)	n
Diamante	2,419	Âmbar	1,550
Sílica fundida	1,458	Cloreto de sódio	1,500

3.2 Refração através de um prisma

Podemos estudar a refração da luz, medindo o índice de refração $n(\lambda)$ em função do comprimento de onda λ . Para isto, basta escrevermos a 3ª lei de Snell para cada comprimento de onda λ :

$$n_2(\lambda) = n_1(\lambda) \frac{\sin(i)}{\sin[r(\lambda)]} \quad (3.3)$$

Frequentemente o meio 1 é o ar, com $n_{ar} \sim 1$. Suponhamos que um feixe de luz, que se propaga no ar, incide na superfície S_1 de um meio 2. Veja a Figura 3.1. O feixe será parcialmente refletido em S_1 e parcialmente refratado em 2, propagando-se neste último, numa direção que faz um ângulo d com a direção de incidência.

Se o meio 2 for limitado por uma superfície S_2 , o feixe refratado em 2 será parcialmente refletido em 2 e parcialmente refratado em 1. Dependendo do ângulo A entre S_1 e S_2 , o ângulo de dupla refração D , correspondendo ao desvio total entre as direções inicial e final do feixe no meio 1, poderá ser maior do que o ângulo d . Veja Fig. 3.1a).

Considere a configuração mostrada na Fig. 3.1a), para a refração através de um prisma de base triangular. Vamos relacionar os ângulos de incidência i_1 e de refração r_2 , com o ângulo D . O raio incidente percorre a direção PQ e emerge na direção RS . Usando geometria elementar, pode-se demonstrar que

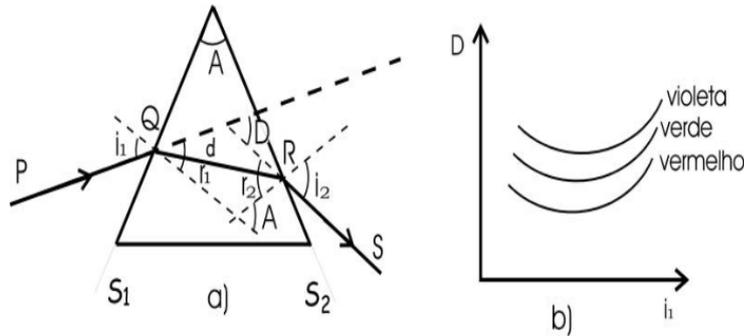


Figura 3.1: Refração da luz através de um prisma.

$$A = r_1 + r_2 \quad e \quad D = i_1 + i_2 - A \quad (3.4)$$

O ângulo de desvio D , depende do ângulo de incidência i_1 . Podemos escolher um ângulo de incidência, de tal maneira que o ângulo de desvio D seja mínimo. Veja o gráfico D versus i_1 na Fig. 3.1b). Nesta situação, temos que

$$i_1 = i_2 = i \quad e \quad r_1 = r_2 = r \quad (3.5)$$

Como consequência das Equações (3.5), obtemos as relações :

$$i = \frac{(D_{min} + A)}{2} \quad (3.6)$$

$$r = \frac{A}{2} \quad (3.7)$$

A vantagem em escolher a situação de $D = D_{min}$ é que se obtém uma relação entre as variáveis n , D e A . Com isto, podemos determinar experimentalmente o índice de refração do prisma para cada cor (λ):

$$n(\lambda) = \frac{\sin\{\frac{1}{2}[D_{min}(\lambda) + A]\}}{\sin(\frac{A}{2})}. \quad (3.8)$$

Assim, para se medir o índice de refração de um prisma para um dado comprimento de onda, basta medir o ângulo D_{min} e conhecer o ângulo A .

Como o ângulo D (ou D_{min}) depende de λ , esperamos ver as diferentes componentes espectrais da luz em direções distintas. A separação de uma onda em várias componentes espectrais com diferentes frequências (ou comprimentos de onda), por causa da dependência da velocidade com a frequência, é conhecida como dispersão. Usando a dispersão de um prisma, somos

capazes de fazer espectroscopia, estudando a decomposição de uma fonte de luz em suas componentes espectrais.

A dispersão de um prisma é definida por:

$$D_{disp}(\lambda) = \frac{dD_{min}}{d\lambda} = \frac{dD_{min}}{dn} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (3.9)$$

Usando as equações (3.2) e (3.8) temos:

$$D_{disp}(\lambda) = -\frac{2b}{\lambda^3} \left(\frac{2 \sin[\frac{A}{2}]}{\cos\{\frac{1}{2}[D_{min}(\lambda) + A]\}} \right). \quad (3.10)$$

O primeiro fator depende do material do qual o prisma é feito, enquanto o segundo fator depende da geometria do sistema. Observe que o sinal negativo significa que o desvio decresce quando λ cresce de forma que o vermelho é menos desviado que o violeta.

A performance de um espectrômetro é caracterizada pelo seu poder de resolução R , que mede a capacidade de medirmos duas linhas espectrais, muito próximas, separadamente. É geralmente definido pelo inverso da menor variação fracionária ($d\lambda/\lambda$) no comprimento de onda de uma linha espectral λ , ainda detectável pelo aparelho:

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} \quad (3.11)$$

onde $d\lambda$ é a variação no comprimento de onda da linha. Dados dois comprimentos de onda λ_1 e λ_2 muito próximos, o menor poder de resolução de um espectrômetro capaz de medi-los separadamente pode ser dado por

$$R \sim \frac{1}{2} \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}. \quad (3.12)$$

- LEIA ATENTAMENTE O PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ATÉ O FINAL, ANTES DE COMEÇAR A TRABALHAR EM SUA MONTAGEM.

- EVITE O CONTATO MANUAL COM A SUPERFÍCIE DAS LENTES E DO PRISMA!

- Confira todo o material antes de iniciar e o organize depois que finalizar a experiência. Avise ao professor no início da aula se faltar algum item.

3.3 Medidas de refração da luz em um prisma

O aparato para a realização desta experiência é mostrado na Figura 3.2, onde se vê, em primeiro plano, o goniômetro. Esse aparelho permite medir ângulos de desvio com alta precisão.



Figura 3.2: Espectrômetro de refração.

Medida do ângulo de desvio com o goniômetro

O goniômetro possui dois conjuntos de escalas onde pode ser feita a medição do ângulo. Essas escalas aparecem nos dois lados do aparelho. Escolhido um dos lados, vamos mostrar agora como se efetua a leitura correta do ângulo. Usaremos como exemplo a configuração mostrada na Figura 3.3.

A escala superior (móvel) compreende ângulos de 0° a 359° e cada grau está dividido em três partes, de modo que a menor divisão dessa escala corresponde a $20'$. A escala inferior (fixa) compreende valores entre $0'$ e $20'$

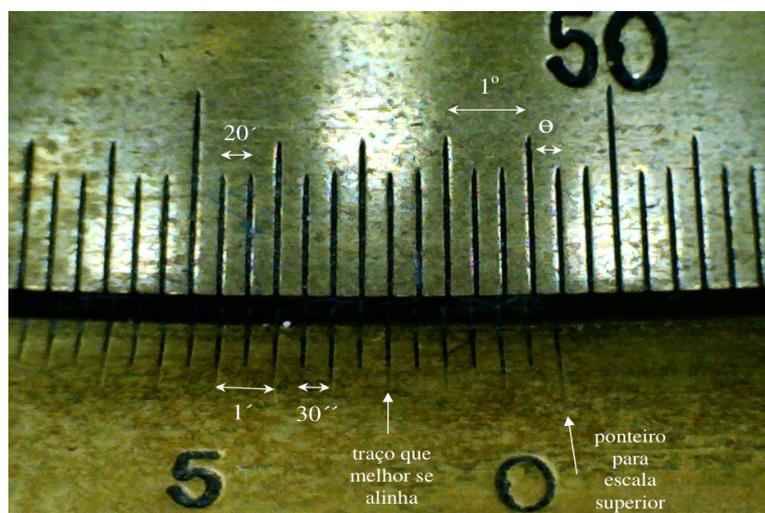


Figura 3.3: Leitura do ângulo no goniômetro.

e cada minuto está dividido em duas partes, de modo que a menor divisão corresponde a $0,5'$ ($30''$). O zero da escala inferior indica a medida da escala superior. Então para a configuração da Figura 3.3 a leitura seria:

$$50^{\circ}40' + \theta \quad (3.13)$$

onde θ corresponde a algum valor entre $0'$ e $20'$, cujo valor será determinado através da escala inferior. O valor θ a ser somado na expressão acima é obtido procurando-se o traço da escala inferior que melhor se alinha com um traço da escala superior. Dado que a largura das raias espectrais não é desprezível, desprezaremos as frações de minuto na leitura da escala inferior.

Na configuração mostrada na Figura 3.3, $\theta = 3'$. Com efeito a leitura final com a incerteza é:

$$50^{\circ}40' + 3' \rightarrow 50^{\circ}43,0' \pm 0,5' \quad (3.14)$$

Ajustes iniciais

1. Coloque o goniômetro em frente à lâmpada de modo a maximizar a iluminação da fenda;
2. Ajuste a largura da fenda para uma abertura pequena o suficiente para que se possa olhar diretamente para ela;
3. Ajuste os focos dos dois telescópios de tal modo a ter uma imagem nítida da fenda, através de ambos;
4. Alinhe a fenda na mesma direção da mira no telescópio de observação;

5. Meça a posição angular da direção de propagação da luz sem prisma e anote o valor obtido como referência para as medidas de ângulos;
6. Coloque o prisma na posição indicada na Figura 3.2;
7. Verifique, a olho nu, se os feixes coloridos emergem da face do prisma;
8. Verifique agora com o telescópio cada uma das linhas (cores) da tabela abaixo. A figura 3.4 mostra as linhas coloridas que devem ser observadas. As setas indicam as linhas na tabela.

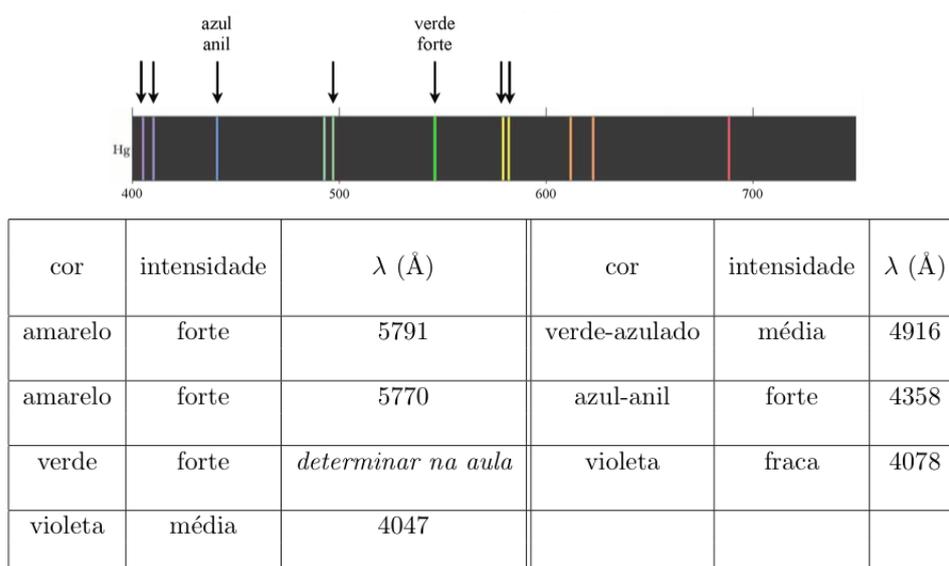


Figura 3.4: Linhas espectrais da lâmpada de Hg.

3.4 Medida de D_{min}

1. Observe através do telescópio uma das raias. Varie o ângulo de incidência da luz sobre o prisma girando com sua mão a base onde se encontra o mesmo, de tal forma a reduzir o ângulo de desvio desta raia;
2. Verifique que existe uma posição, e conseqüentemente um ângulo de incidência, para o qual o ângulo de desvio é mínimo;
3. Meça o ângulo de desvio nesta posição. Isto corresponde à medida de D_{min} para esta cor. Faça uma tabela com as medidas de D_{min} para cada uma das cores da tabela anterior, **inclusive a linha “verde forte”**.

3.5 Tratamento dos dados

1. Calcule através da Eq. (3.8) os valores de $n(\lambda)$ para cada D_{min} medido;
2. Acrescente à sua tabela os valores dos índices de refração $n(\lambda)$ e de λ^{-2} ;
3. Faça um gráfico de $n(\lambda)$ versus λ^{-2} ;
4. Ajuste uma reta através dos pontos e obtenha os valores dos parâmetros a e b para a Eq. (3.2);
5. Descreva uma maneira de utilizar os dados obtidos para medir o comprimento de onda das raias de uma fonte de luz desconhecida;
6. Determine experimentalmente o comprimento de onda λ da linha verde (intensidade forte) emitida pela lâmpada usada para fazer as medidas anteriores;
7. Considerando as duas linhas espectrais do amarelo, determine o poder de resolução necessário para separá-las, a partir da Eq. (3.12);
8. A partir de seus valores de $n(\lambda)$, e dos dados para os vidros tipo *flint* e tipo *crown*, apresentados abaixo, determine o tipo de vidro utilizado na fabricação do prisma.

DADOS ÚTEIS

- Ângulo de abertura A dos prismas utilizados nos experimentos: $A = 60^\circ$
- Linha verde forte: $\lambda = 5461 \text{ \AA}$
- Valores típicos de índice de refração:
 n (vidro *flint*) = 1.60 - 1.65
 n (vidro *crown*) = 1.52 - 1.54
- Valores para a região espectral do amarelo:
 $dn/d\lambda$ (vidro *flint*) = 1000/cm
 $dn/d\lambda$ (vidro *crown*) = 400/cm

Ótica Geométrica

4.1 Introdução

Ótica é parte da física que estuda o comportamento da luz. Este estudo compreende a propagação, a interação com a matéria e a construção de instrumentos que utilizam ou detectam a luz. Sendo a luz uma onda eletromagnética, a maior parte dos fenômenos óticos podem ser descritos pelo eletromagnetismo clássico. Em particular, a ótica descreve o comportamento da radiação na faixa de frequências que inclui o visível, o ultravioleta e o infravermelho de acordo com o diagrama espectral da Figura 4.1. No entanto, a descrição eletromagnética nem sempre é a mais conveniente para se descrever o comportamento da luz. Em certas aplicações práticas, podemos utilizar um modelo simplificado denominado ótica geométrica. Neste modelo, a luz é tratada como um conjunto de raios que se propaga em linha reta e cuja direção pode ser alterada pela transmissão ou reflexão em superfícies como lentes e espelhos. Nas situações onde o caráter quântico da matéria e/ou da luz (conceito de fóton) precisam ser levados em conta, se faz necessário o uso da ótica quântica, que se utiliza da eletrodinâmica quântica para tratar sistemas óticos.

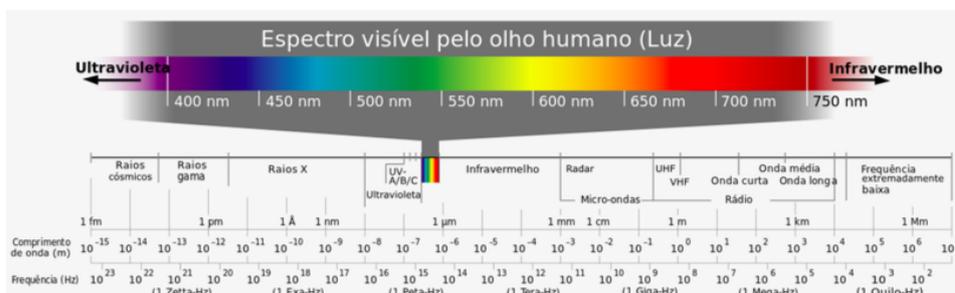


Figura 4.1: Espectro eletromagnético

Neste módulo nos concentraremos na ótica geométrica, mais especificamente no estudo de alguns instrumentos óticos simples. Introduziremos alguns conceitos básicos a respeito da formação de imagens em lentes delgadas e o funcionamento do olho humano, para posteriormente discutir o princípio de funcionamento do projetor e do microscópio composto.

4.2 Formação da imagem em lentes delgadas

Dentro dos limites da ótica geométrica, a equação que determina a posição em que se formará uma imagem nítida de um objeto através de uma lente fina esférica é:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \quad (4.1)$$

onde o é a distância do objeto à lente, i é a distância da imagem à lente e f é a distância focal da lente, como mostra a Figura 4.2.

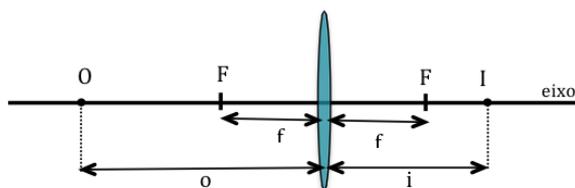


Figura 4.2: Relação entre as distâncias o , i e f .

A distância focal da lente corresponde à distância entre a lente e o foco F , que é a posição no eixo onde se forma a imagem de objetos muito distantes. As lentes simétricas, como a da Figura 4.2, possuem dois focos em posições espelhadas. Na configuração desta figura, o foco à esquerda (direita) da lente é denominado foco objeto (imagem). A denominação é invertida caso o objeto esteja à direita da lente. O uso dessa equação é limitado ao caso de raios que incidem na lente sob pequenos ângulos (raios paraxiais). Quando esta condição não é satisfeita, o objeto não dará origem a uma imagem nítida. Este efeito denomina-se aberração esférica. Para o uso correto da Eq. (4.1), a seguinte convenção de sinais deve ser utilizada: distância objeto o positiva à esquerda da lente, distância imagem i positiva à direita da lente e distância focal f positiva à direita da lente. A distância focal de uma lente convergente é positiva e de uma lente divergente é negativa.

Podemos localizar a imagem de qualquer ponto do objeto fora do eixo através da interseção de raios traçados de acordo com as regras a seguir:

- Um raio paralelo ao eixo da lente converge para o foco.
- Um raio que passa pelo centro da lente não altera sua direção.

- Um raio que passa pelo foco emerge da lente paralelo ao eixo.

A seguir veremos alguns exemplos de formação de imagem pelo método de raios.

Exemplo 1: Lente convergente, objeto posicionado antes do foco.

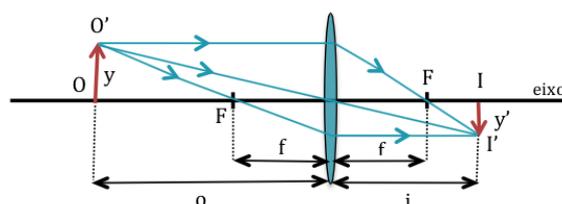


Figura 4.3: Formação da imagem pela lente convergente. Distância do objeto $o > f$.

Verifica-se que neste caso a imagem formada é real (pode ser projetada sobre um anteparo), invertida e menor que o objeto, como mostra a Figura 4.3. Nesta situação nem sempre a imagem é menor que o objeto. Se o objeto estiver a uma distância $f < o < 2f$ da lente, sua imagem será maior, como veremos mais adiante.

De fato, apenas dois raios são suficientes para determinar a imagem de um objeto, então a partir de agora utilizaremos apenas os raios traçados de acordo com as duas primeiras regras. No entanto, vale notar que o traçado de um único raio, de acordo com a terceira regra, determina completamente o tamanho da imagem, embora não saibamos sua posição.

Exemplo 2: Lente convergente, objeto posicionado depois do foco.

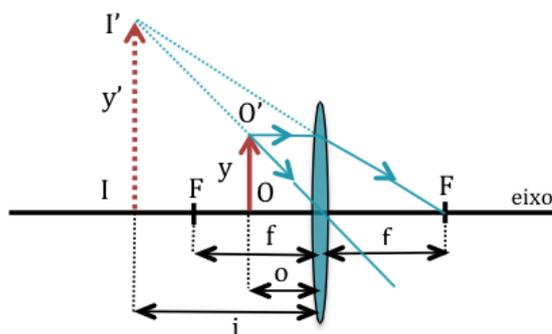


Figura 4.4: Formação da imagem pela lente convergente. Distância do objeto $o < f$.

Verifica-se que neste caso a imagem formada é virtual (pelo prolongamento dos raios), não invertida e maior que o objeto, como mostra a Figura 4.4.

Exemplo 3: Lente divergente, objeto posicionado antes do foco.

Verifica-se que neste caso a imagem formada é virtual (pelo prolongamento dos raios), não invertida e menor que o objeto, como mostra a Figura 4.5. As propriedades da imagem são as mesmas se o objeto estiver posicionado depois do foco.

Usando semelhança de triângulos, é possível mostrar que, em qualquer caso, o aumento lateral m da imagem é dado por:

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{i}{o}, \quad (4.2)$$

onde m positivo (negativo) significa imagem não invertida (invertida).

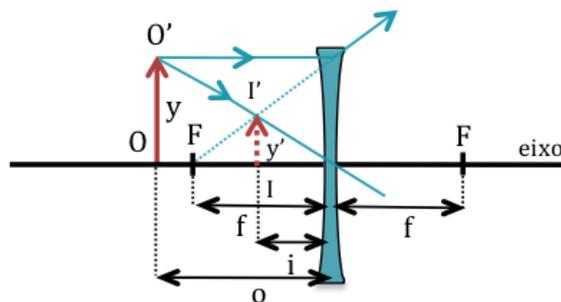


Figura 4.5: Formação da imagem pela lente divergente.

É usual se caracterizar uma lente, através da chamada potência da lente, definida como o inverso de sua distância focal, *medida em metros*. A unidade de potência de uma lente é, portanto, m^{-1} , que é chamada de dioptria.

Exemplo 4: O método de Bessel.

A Figura 4.6 mostra esquematicamente um objeto que está a uma distância A de um anteparo, e uma lente convergente de distância focal f . Para $A > 4f$ existem duas posições para a lente nas quais se forma uma imagem real sobre o anteparo.

Onde a separação D entre as posições é:

$$D = \sqrt{A(A - 4f)} \quad (4.3)$$

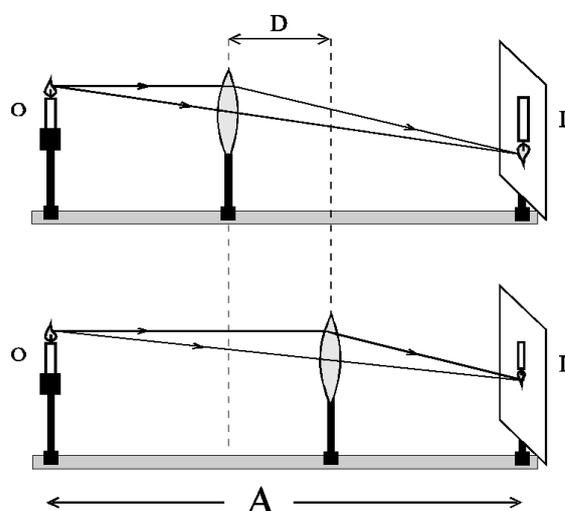


Figura 4.6: Diagrama esquemático do Método de Bessel. Imagens nítidas são formadas no anteparo para duas posições distintas da lente.

4.3 Noções sobre o olho humano

O olho é constituído por uma lente fixa denominada *córnea* e outra flexível denominada *cristalino*, cujo foco pode ser variado através dos *músculos ciliares*. A *íris* é um diafragma, cuja abertura, denominada *pupila*, aumenta ou diminui conforme a luminosidade. A *retina*, constituída de células fotossensíveis, faz o papel de anteparo onde a imagem real dos objetos é projetada. Um esquema simplificado do olho humano pode ser visto na Figura 4.7.

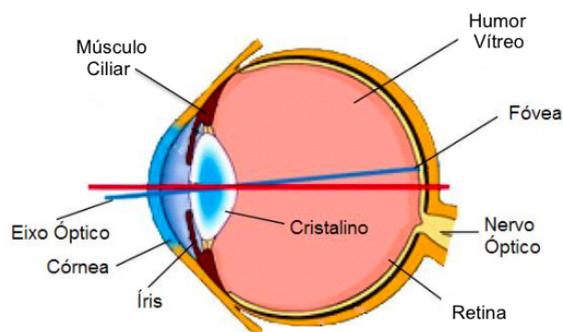


Figura 4.7: Olho humano.

Essa informação é transmitida para o cérebro através do nervo ótico. Em um olho normal, quando o músculo ciliar está relaxado, a imagem de objetos localizados no infinito (muito distantes) é focalizada na retina. Quando o olho está relaxado, a posição o dos objetos que têm sua imagem focalizada

na retina é chamada de *ponto distante* p_d . Portanto, para um olho normal, p_d está localizado no infinito (na prática, todos os pontos localizados a uma distância maior que cerca de 5 m satisfazem essa condição). Quando o objeto se aproxima do olho, a partir do ponto distante, o músculo ciliar se contrai, aumentando a curvatura do cristalino, que se comporta como uma lente convergente, diminuindo sua distância focal, de modo que a imagem permaneça nítida na retina (se isso não acontecesse, a imagem do objeto seria focalizada após a retina). Este processo, denominado de acomodação, permite que uma pessoa normal possa ver com nitidez objetos localizados em posições que vão desde distâncias muito grandes até um ponto próximo d_0 que em geral aumenta com a idade da pessoa, sendo em torno de $d_0 \sim 25$ cm para uma visão normal.

4.4 Defeitos da visão: miopia e hipermetropia

Em uma pessoa míope (hipermétrope), mesmo com o músculo ciliar completamente relaxado, a imagem de objetos localizados no infinito (muito distantes) é focalizada antes (depois) da retina, o que pode ser corrigido através de lentes divergentes (convergentes), conforme mostra a Figura 4.8. A causa mais comum desses defeitos é uma deformação do olho, que modifica a distância entre a retina e o cristalino. Tornando-a maior, no caso da miopia, e menor, no caso da hipermetropia.

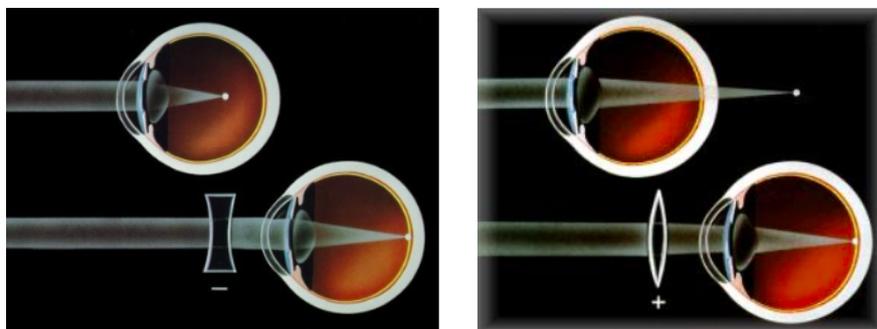


Figura 4.8: Esquerda: Miopia e correção. Direita: Hipermetropia e correção.

Correção da miopia: Como, no olho míope, a imagem de objetos muito distantes é focalizada antes da retina, quando o olho está relaxado, isso significa que o ponto distante p_d não está localizado no infinito. Qualquer objeto localizado a uma distância maior que esse ponto parecerá desfocado, já que o olho não tem mais como diminuir sua distância focal (já está completamente relaxado). No entanto, objetos localizados a uma distância menor que p_d aparecerão nítidos, devido ao processo de acomodação (contração do músculo ciliar). Para corrigir a miopia, precisamos, então, de uma lente de óculos que produza uma imagem virtual (não invertida) de objetos muito

distantes na posição p_d do ponto distante do olho mópe. Essa imagem virtual servirá de objeto para o olho, que poderá, então, formar uma imagem nítida do mesmo na retina, mesmo quando o nervo ciliar estiver relaxado. De fato, verifica-se, pela equação (4.1), que uma lente divergente, de distância focal f , forma uma imagem virtual de objetos localizados no infinito em um ponto à sua esquerda, a uma distância $|f|$ de seu centro.

Se um olho mópe tem um ponto distante igual a p_d , necessitamos, então, de uma lente divergente que satisfaça duas condições:

1. Forme uma imagem virtual de objetos muito distantes a uma distância p_d do olho.
2. Não altere o tamanho aparente dos objetos (os objetos distantes devem ficar nítidos, mas não devem parecer maior ou menor que na ausência da lente).

A segunda condição é satisfeita, se escolhermos adequadamente a distância entre a lente e a córnea. Se voltarmos à Figura 4.3, veremos que o raio que sai da extremidade do objeto, passa pelo foco de uma lente, e emerge paralelo a seu eixo, determina sozinho o tamanho da imagem. Além disso, na mesma figura, vemos que um raio que passa pelo centro de uma lente não tem sua direção de propagação modificada. Logo, se posicionarmos a lente divergente em cima do foco objeto F do olho, sua presença não modificará a direção de propagação do raio que sai da extremidade do objeto, passa por F , e emerge do cristalino paralelo ao eixo do sistema ocular. Como esse raio determina o tamanho da imagem, ela continuará com o mesmo tamanho. A distância focal da lente divergente que corrige o problema de miopia de um olho que tem um ponto distante igual a p_d e o foco objeto a uma distância f é, portanto, $f_{div} = -(p_d - f)$. Tipicamente, $f \sim 16$ mm. Se, por exemplo, o ponto distante de um olho é $p_d = 2$ m, a distância focal da lente divergente corretora deverá ser $f \sim -1,98$ m. Essa lente tem uma potência de, aproximadamente, $-0,5$ dioptria. É esse valor que aparece na prescrição de óculos.

4.5 Noções sobre instrumentos óticos

São denominados instrumentos óticos aqueles que têm por finalidade captar, ampliar ou reduzir a imagem de objetos. Nesta seção discorreremos brevemente sobre instrumentos comumente utilizados quando o objeto de interesse se encontra a uma pequena distância (em comparação com as distâncias focais envolvidas) dos elementos óticos.

Lupa ou microscópio simples

O tamanho aparente de um objeto está diretamente relacionado ao tamanho de sua imagem na retina e é tanto maior quanto mais próximo o objeto estiver da vista, como ilustra a Figura 4.9.

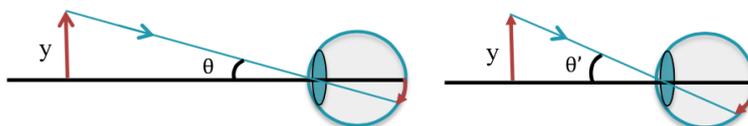


Figura 4.9: Tamanho aparente de um objeto.

Sendo assim, uma medida adequada para a dimensão da imagem é dada pelo ângulo visual θ , o ângulo subtendido pelo objeto no olho. Conforme a Figura 4.10, no caso de objeto de altura y no ponto próximo d_0 , teremos, supondo $y \ll d_0$:

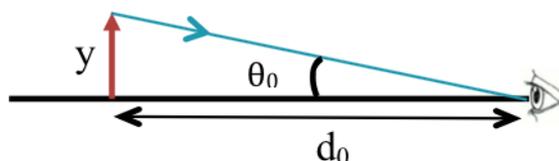


Figura 4.10: Ângulo visual.

$$\theta \sim rctan\theta_0 = \frac{y}{d_0} \quad (4.4)$$

É possível aumentar o tamanho aparente de um objeto utilizando uma lente convergente, que nesta configuração recebe a denominação de lupa ou microscópio simples. A posição do objeto é tal que $o < f$ e a imagem ampliada virtual se situa a uma distância maior que o ponto próximo d_0 , de acordo com a Figura 4.11.

O novo ângulo visual θ e a magnificação M com relação à situação anterior serão dados, respectivamente, por:

$$\theta \sim rctan\theta = \frac{y}{o} \quad (4.5)$$

$$M = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{d_0}{o} \quad (4.6)$$

Se posicionarmos o objeto no foco, de acordo com a Eq. (4.1), a imagem se formará no infinito e teremos:

$$M = \frac{d_0}{f} \quad (4.7)$$

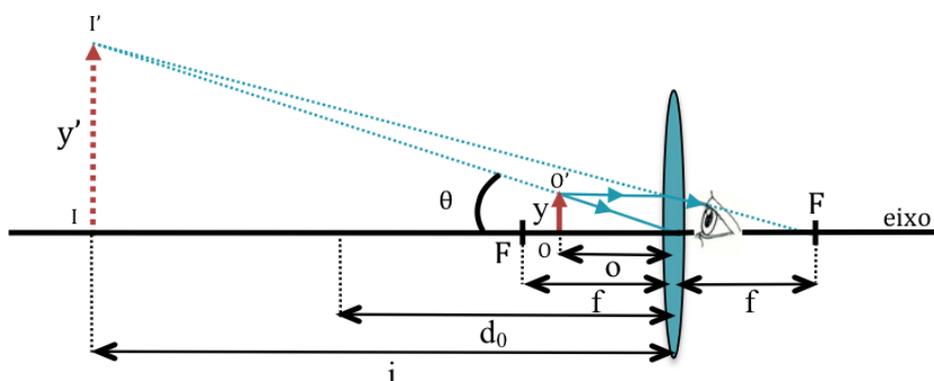


Figura 4.11: Lupa ou microscópio simples.

O interessante de colocar o objeto no foco é que o olho quando relaxado está focalizado no infinito. Pela expressão de M , dada pela Eq. (4.7), verifica-se que quanto menor a distância focal f , maior a magnificação. Entretanto, as aberrações esféricas aumentam quando f diminui limitando a utilização da lupa. Veremos adiante que esta limitação de aumento pode ser contornada utilizando duas lentes convergentes.

4.6 Projetor

A ideia básica de um projetor é produzir uma imagem real ampliada de um objeto próximo, de modo que possa ser projetada em uma tela. Em sua forma mais elementar, consiste de uma lente convergente, sendo o objeto posicionado a uma distância da lente $f < o < 2f$, como ilustra a Figura 4.12. Para se obter uma imagem direta o objeto deve ser invertido.

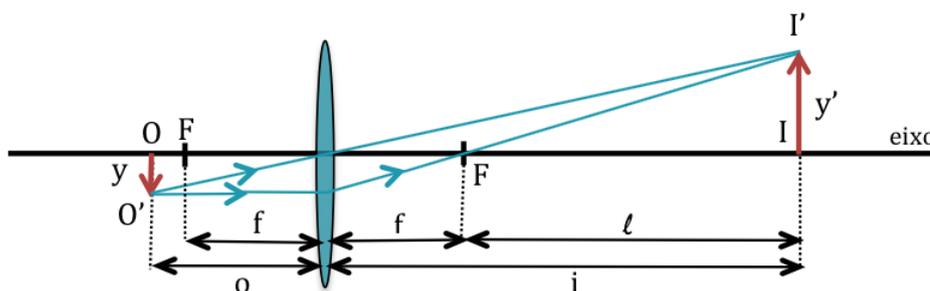


Figura 4.12: Ampliação da imagem em um projetor.

Por semelhança de triângulos, verifica-se que a magnificação, além da Eq. (4.2), pode ser calculada como:

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{(f - i)}{f} = -\frac{l}{f} \quad (4.8)$$

4.7 Microscópio composto

Se associarmos um projetor e uma lupa obteremos o microscópio composto. A função do projetor é produzir uma imagem ampliada que funciona como o objeto para a lupa, conforme ilustra a Figura 4.13. Esta configuração permite ampliações maiores que a lupa.

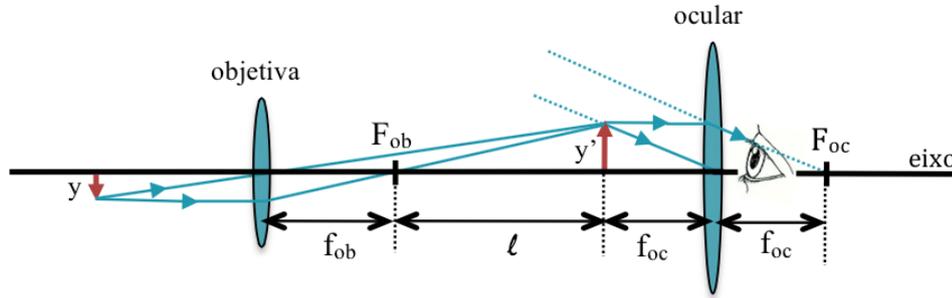


Figura 4.13: Microscópio composto.

Por estar mais próxima do objeto, a lente do projetor denomina-se objetiva, ao passo que a lente que funciona como lupa, que está mais próxima do olho, é denominada ocular. Utilizando as Eqs. (4.7) e (4.8), sendo f_{ob} e f_{oc} as distâncias focais da objetiva e da ocular respectivamente, a magnificação correspondente ao projetor e à lupa são dadas por:

$$m = -\frac{l}{f_{ob}}, \quad (4.9)$$

$$M = \frac{d_0}{f_{oc}}, \quad (4.10)$$

de forma que a ampliação total do microscópio A é dada pelo produto das duas:

$$A = mM = -\frac{ld_0}{f_{ob}f_{oc}}, \quad (4.11)$$

onde l é aproximadamente o comprimento do tubo do microscópio. De fato, tanto a objetiva como a ocular correspondem a um sofisticado conjunto de lentes que têm por objetivo corrigir as aberrações.

- LEIA ATENTAMENTE O PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ATÉ O FINAL, ANTES DE COMEÇAR A TRABALHAR EM SUA MONTAGEM.

- EVITE O CONTATO MANUAL COM A SUPERFÍCIE DAS LENTES!

- Confira todo o material antes de iniciar e o organize depois que finalizar a experiência. Avise ao professor no início da aula se faltar algum item.

4.8 Determinação direta da distância focal de uma lente convergente

1. Coloque a fonte de luz, que atuará como objeto, com sua saída voltada para o trilho;
2. Procure alinhar o feixe de luz com a direção definida pelo trilho;
3. Coloque uma das lentes convergentes a uma distância fixa da fonte;
4. Mova o anteparo após a lente, de forma a obter uma imagem nítida do objeto;
5. Mova agora o anteparo e observe que dentro de um pequeno intervalo a imagem permanece nítida. Use para i a distância entre a lente e o centro desse intervalo e considere a incerteza σ_i como sendo a metade do comprimento deste intervalo.
6. Meça a distância o entre o objeto e a lente (o). A incerteza σ_o será determinada pela incerteza na leitura da sua posição;
7. Repita a medida variando o e encontrando o respectivo valor de i . Repita o procedimento até obter um mínimo de cinco valores.
8. Faça uma tabela com os valores de o , i , e f , sendo f dado pela equação (4.1);
9. Faça uma média aritmética com os valores obtidos para f e estime a incerteza desse valor. Calcule a discrepância relativa com relação ao valor fornecido pelo fabricante.

4.9 Determinação da distância focal de uma lente convergente através do método de Bessel

1. Coloque a fonte de luz, que atuará como objeto, com sua saída voltada para o trilho;
2. Procure alinhar o feixe de luz com a direção definida pelo trilho;
3. Coloque o anteparo em uma distância fixa A com relação a fonte;
4. Mova a lente convergente entre a fonte e o anteparo, de forma a obter uma imagem nítida do objeto, para duas posições diferentes (o_+ e o_-) da lente, tal que $D = |o_+ - o_-|$;
5. Repita o procedimento até obter um total de três posições, reduzindo gradualmente a distância A .
6. Faça uma tabela com os valores de D , A , e f , sendo f dado pela equação (4.3);
7. Faça uma média aritmética com os valores obtidos para f e estime a incerteza desse valor. Calcule a discrepância relativa com relação ao valor fornecido pelo fabricante.
8. Compare os valores obtidos pelos dois métodos.

4.10 Determinação indireta do diâmetro da lâmpada

Vamos supor que não é possível acessar diretamente a lâmpada utilizada como objeto e usar um paquímetro para determinar o diâmetro da mesma $d_{lâmpada}$.

1. Com base nas Eqs. (4.2) e (4.2), configure o aparato experimental com a lente convergente para medir o diâmetro $d_{lâmpada}$ em uma imagem no anteparo cujas dimensões sejam exatamente as da lâmpada. Estime a incerteza na sua medida ($\sigma_{d_{lâmpada}}$);
2. Calcule a discrepância D_f entre o valor de $d_{lâmpada}$ obtido experimentalmente e o valor de referência $d_{ref} = 8.42$ mm????
3. Faça um desenho em escala 4:1 do esquema experimental apresentando o valor real de todas as distâncias envolvidas. No próprio desenho, faça o traçado dos raios que permitam determinar geometricamente a imagem do objeto.

4.11 Estimativa do ponto próximo médio do grupo

1. Escolha um objeto de pequenas dimensões, como por exemplo a ponta de um lápis;
2. Afaste o objeto o máximo possível de seus olhos e aproxime-o gradativamente até que não seja mais possível visualizar uma imagem nítida;
3. Meça aproximadamente a distância entre o objeto e seu olho (ponto próximo) e estime a incerteza na sua medida;
4. Repita o procedimento anterior para os outros membros do grupo;
5. Determine a média dos valores obtidos d_0 . Para os cálculos a seguir considere este como o valor de referência para o ponto próximo. Assuma como a incerteza σ_{d_0} o maior valor obtido para a incerteza dos valores usados para o cálculo da média.

4.12 Ampliação da imagem em um projetor

O princípio de um projetor é apresentar uma imagem ampliada de um determinado objeto.

1. Com base nas equações (4.1) e (4.2), determine a distância entre o objeto e a lente convergente de distância focal $f_{ref} = 10$ cm e entre a lente e a imagem de modo que a imagem da lâmpada apresente uma ampliação por um fator de 3;
2. Posicione a lente e o anteparo de acordo com os cálculos do item anterior e meça com a régua o diâmetro do bulbo d_{amp} na imagem projetada. Estime a incerteza na sua medida $\sigma_{d_{amp}}$. Determine o aumento m obtido em relação ao diâmetro de referência do objeto $d_{ref} = 8.42$ mm???
3. Calcule a discrepância relativa DR_f entre o valor de m obtido experimentalmente e o valor esperado (vide a seção: Sobre a apresentação e a análise de dados, no início do roteiro de Física Experimental IV). Considere compatível se obtiver $DR_f \leq 5\%$.

Interferência e difração da luz

Neste experimento vamos estudar efeitos da luz que não podem ser explicados usando a aproximação de raios. Tratam-se de efeitos cuja explicação física implica no tratamento da luz como um fenômeno ondulatório.

5.1 Interferência em fenda dupla

A luz é uma onda eletromagnética e como tal está sujeita ao processo de interferência. A interferência ocorre com qualquer tipo de onda. Ondas sonoras, ondas de rádio, microondas, etc. são outros exemplos de ondas mecânicas e eletromagnéticas com as quais podemos ter interferência.

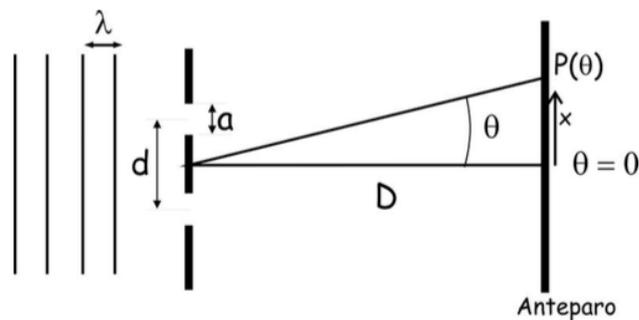


Figura 5.1: Interferência em fenda dupla.

Uma maneira simples de observar a interferência da luz é realizando o experimento de fenda- dupla, veja a Fig. 5.1. Neste experimento, um feixe de luz monocromática ilumina as duas fendas e a luz que as atravessa forma um padrão de interferência, ou seja tem uma distribuição de intensidades como função da posição no plano de observação, que depende do comprimento de onda e da geometria do problema. Na Fig. 5.1, os parâmetros relevantes

para a determinação deste padrão de interferência são definidos. A separação entre os orifícios é d , o ângulo de observação é θ e λ é o comprimento de onda. O ângulo de observação pode ser relacionado à coordenada x e à separação D entre o plano das fendas e o plano de observação, por:

$$\sin \theta = \frac{x}{\sqrt{x^2 + D^2}} \simeq \text{tg} \theta = \frac{x}{D} \quad \text{se } x \ll D. \quad (5.1)$$

A posição angular dos máximos de interferência é dada pela equação:

$$\sin \theta_{max}^m = \lambda \frac{m}{d}; \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.2)$$

m é um número inteiro que especifica a ordem do máximo de interferência. O máximo central em $\theta = 0$, corresponde a $m = 0$, o primeiro máximo adjacente à direita corresponde a $m = +1$ e à esquerda a $m = -1$ e assim por diante. As posições dos mínimos de interferência, que correspondem aos pontos do plano de observação em que a intensidade é nula, também podem ser calculadas:

$$\sin \theta_{min}^m = \pm \lambda \frac{(m + \frac{1}{2})}{d}; \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (5.3)$$

Note que conseguimos relacionar parâmetros mensuráveis, como os ângulos dos máximos de interferência com o comprimento de onda da luz utilizada. Desta forma, se conhecemos d podemos medir o comprimento de onda e vice-versa.

5.2 Difração em Fenda Simples

A difração é outro fenômeno ondulatório, ou seja, característico das ondas. Assim como a interferência, também temos difração com qualquer tipo de onda. Ela se torna observável quando uma onda atravessa uma abertura cujas dimensões não são muito maiores do que o comprimento de onda.

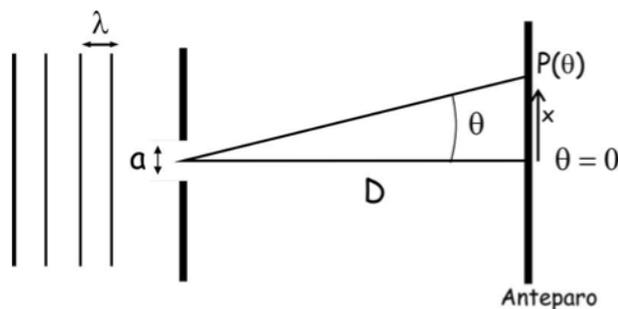


Figura 5.2: Difração em fenda simples.

Com o auxílio da Fig. 5.2, definimos os parâmetros relevantes para o processo de difração. No caso ilustrado consideramos a difração de uma onda de comprimento de onda λ através de uma fenda vertical de largura a . O plano de observação fica a uma distância D do plano da fenda e o ângulo θ se relaciona com a posição do ponto de observação x , da mesma maneira que no caso da interferência com fenda dupla. Teremos mínimos de difração, cujas posições são dadas por:

$$m\lambda = a \sin \theta_{min}^m ; m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.4)$$

onde m é um número inteiro que especifica a ordem do mínimo de difração.

5.3 Rede de Difração

As redes de difração são dispositivos que combinam os efeitos da difração e da interferência.



Figura 5.3: Rede de difração.

A Figura 5.3 mostra o esquema de uma rede de difração que consiste em uma sequência de fendas igualmente espaçadas. Após a realização da experiência com fenda dupla, poderíamos nos perguntar o que ocorre se ao invés de utilizar duas fendas, utilizássemos três ou mais fendas. A Figura 5.4, mostra o padrão de intensidades para a difração em N fendas, para diferentes valores de N . Existem máximos primários (intensidade maior) e secundários (intensidade menor). A posição angular dos máximos primários ainda é dada pela Equação (5.2), que determina a posição angular dos máximos na fenda dupla, independente do número N de fendas. Veja por exemplo, que à medida em que N aumenta, os máximos primários se estreitam. A largura

angular do máximo central está relacionada ao número de fendas através da equação:

$$\Delta\theta = \frac{2}{N} \frac{\lambda}{d}, \quad (5.5)$$

onde λ é o comprimento de onda e d é o espaçamento entre fendas. Veja também que o número de máximos secundários (de intensidade mais baixa) cresce com N , e que a intensidade destes máximos secundários diminui com N .

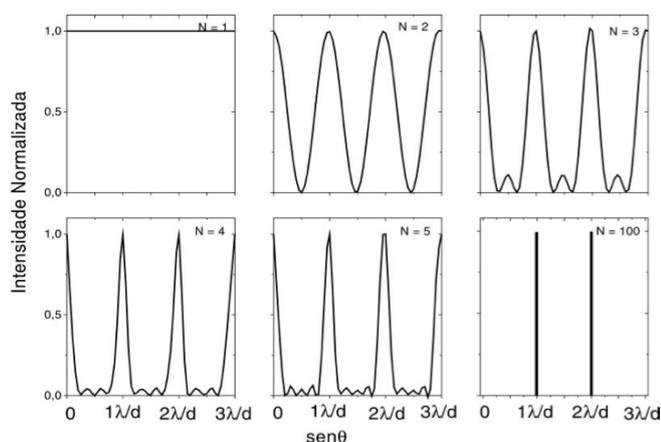


Figura 5.4: Padrão de intensidade para difração em redes com diferentes valores de N .

No limite em que $N \gg 2$ temos a rede de difração. Nesse limite, a largura das fendas se torna desprezível e falamos de linhas, em vez de fendas. O parâmetro que caracteriza uma rede de difração é o número de linhas por unidade de comprimento N_l . Dado que as linhas são igualmente espaçadas, temos que $N_l \approx 1/d$. Note que quanto maior o valor de N_l , maior será a separação entre máximos de intensidade adjacentes para um mesmo feixe incidente. A relação matemática entre N_l e a posição dos máximos é dada por:

$$\sin \theta_{max}^m = N_l m \lambda; \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.6)$$

- LEIA ATENTAMENTE O PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ATÉ O FINAL, ANTES DE COMEÇAR A TRABALHAR EM SUA MONTAGEM.

- EVITE O CONTATO MANUAL COM A SUPERFÍCIE DAS LENTES!

- Confira todo o material antes de iniciar e o organize depois que finalizar a experiência. Avise ao professor no início da aula se faltar algum item.

5.4 Difração em Fenda Simples

- Coloque a placa com as fendas calibradas no suporte e faça com que o feixe de laser atravessasse uma das fendas. Anote a largura da fenda;
- Para que a distância entre mínimos adjacentes do padrão de difração seja grande o suficiente para ser medida com uma régua, é necessário que o feixe se propague por uma distância compatível, que depende da largura da fenda. Portanto, projete o padrão de difração na parede oposta à sua bancada ($x \ll D$). Anote a distância I entre o suporte e a parede próxima ao laser, para posteriormente calcular D ;
- Cole uma fita na parede na posição da figura de difração e faça com lápis um contorno nas regiões iluminadas. Isso servirá, mais tarde, para identificar os mínimos de intensidade mais facilmente. Não se esqueça de identificar o máximo central;
- Meça na fita as posições dos três primeiros mínimos adjacentes, à direita e à esquerda do máximo central. Sugestão: atribua a coordenada $x = 0$ à posição do máximo central;
- Construa uma tabela com 4 colunas. Uma para m , a ordem dos mínimos, outra para m/a , outra para x , a posição dos mínimos e outra para o seno dos ângulos dos mínimos $\sin \theta_{min}$, onde a posição x medida é convertida no ângulo θ com relação à direção frontal. A largura da sala é de $L = (??? \pm ???)$ m;
- Faça o gráfico de $\sin \theta_{min} \times m/a$. Obtenha o valor de λ usando o gráfico. Verifique se o seu resultado é compatível dentro do critério de 3σ , calculando a discrepância em relação ao valor do comprimento de onda fornecido pelo fabricante na base do laser.

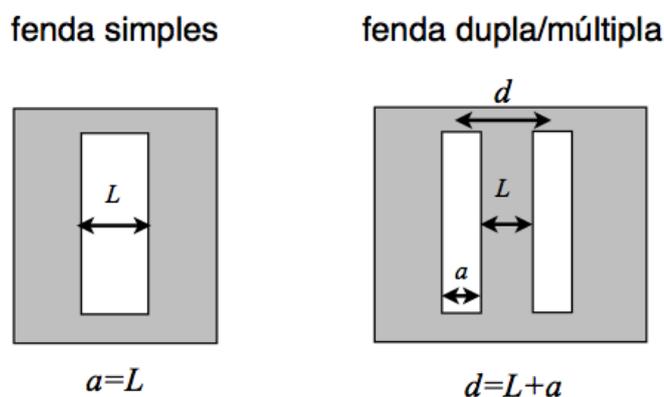


Figura 5.5: Dimensões das fendas utilizadas nos experimentos. L é a distância entre as fendas fornecida pelo fabricante, a é a largura das fendas e d é a distância centro a centro para as fendas duplas.

5.5 Interferência com Fenda Dupla

- Coloque a placa com as fendas duplas calibradas no suporte e faça com que o feixe de laser atravesse uma delas. Anote a distância L entre as fendas, fornecida pelo fabricante, de acordo com a Figura 5.5, e determine a distância d entre os centros das fendas. Anote este valor;
- Anote a distância l entre o suporte e a parede próxima ao laser;
- Cole uma fita na parede na posição da figura de interferência e faça com lápis um contorno nas regiões iluminadas. Isso servirá, mais tarde, para identificar os máximos de intensidade mais facilmente. Não se esqueça de identificar o máximo central. Atenção: como a largura das fendas não é desprezível, uma figura de difração pode se sobrepor a figura de interferência tornando alguns máximos não observáveis;
- Meça na fita as posições dos três primeiros máximos adjacentes, à direita e à esquerda do máximo central. Atenção: se você tiver uma região escura à direita (esquerda) onde deveria esperar um máximo de ordem m ($-m$) anote a distância do próximo máximo cuja ordem será $m + 1$ ($-m - 1$). Eventualmente um mínimo de difração, pode obscurecer mais de um máximo de interferência. Neste caso, m ($-m$) deve ser ajustado de acordo com o número de máximos não observáveis;
- Construa uma tabela contendo a ordem m do máximo, m/d , a posição x e $\sin \theta_{max}$, onde θ especifica a posição x convertida em ângulo com relação à direção frontal;
- Faça o gráfico de $\sin \theta_{max} \times m/d$. Obtenha o valor de λ usando o gráfico. Verifique se o seu resultado é compatível dentro do critério

de 3σ , calculando a discrepância em relação ao valor fornecido pelo fabricante.

5.6 Rede de Difração

- Coloque a rede de difração no suporte e faça com que o feixe de laser a atravesse. Anote o número de linhas N_l por milímetro fornecido pelo fabricante;
- Anote a distância l entre o suporte e a parede próxima ao laser. Atenção: se o número de linhas da rede for $N_l \gg 10$, o anteparo deve ser a parede próxima ao laser. Neste caso, $D = l$ e os valores do seno dos ângulos medidos nessa experiência não podem ser aproximados pelos valores da tangente;
- Cole uma fita na parede na linha horizontal central da figura produzida pela rede de difração e faça com lápis um contorno nas regiões iluminadas. Isso servirá, mais tarde, para identificar os máximos de intensidade mais facilmente. Não se esqueça de identificar o máximo central. Atenção: como a largura das fendas da rede pode não ser desprezível, uma figura de difração pode se sobrepor a figura de interferência tornando alguns máximos não observáveis;
- Meça na fita as posições dos três primeiros máximos adjacentes, à direita e à esquerda do máximo central. Atenção: se você tiver uma região escura à direita (esquerda) onde deveria esperar um máximo de ordem m ($-m$) anote a distância do próximo máximo cuja ordem será $m + 1$ ($-m - 1$). Eventualmente um mínimo de difração, pode obscurecer mais de um máximo de interferência. Neste caso, m ($-m$) deve ser ajustado de acordo com o número de máximos não observáveis;
- Construa uma tabela contendo a ordem m do máximo, m/λ , a posição x e $\sin \theta_{max}$, onde θ especifica a posição x convertida em ângulo com relação à direção frontal;
- Faça o gráfico de $\sin \theta_{max} \times m/\lambda$. Obtenha o valor de N_l usando o gráfico. Verifique se o seu resultado é compatível dentro do critério de 3σ , calculando a discrepância em relação ao valor fornecido pelo fabricante.

Espectroscopia Ótica por Difração

6.1 Introdução

Nesta experiência faremos a montagem e calibração de um espectrômetro, o qual poderia ser utilizado para determinar o comprimento de onda da luz emitida por uma fonte qualquer. O espectrômetro que estudaremos é baseado no uso de uma rede de difração. Já sabemos que as posições angulares dos máximos de intensidade da luz difratada por uma rede são dadas por:

$$\sin \theta_{max}^m = N_l m \lambda ; m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6.1)$$

onde m é um número inteiro e $|m|$ define a ordem do máximo, N_l é o número de linhas por unidade de comprimento da rede, e λ é o comprimento de onda da luz incidente. A equação acima é conhecida como equação da rede de difração para incidência normal. Se a luz incidente sobre a rede tiver um único comprimento de onda, teremos regiões completamente escuras entre dois máximos adjacentes. Entretanto, se a luz que incide sobre a rede for composta de vários comprimentos de onda diferentes, teremos um padrão de intensidades diferente após a fenda. De fato, analisando a Eq. 6.1, verificamos que as posições dos máximos de interferência dependem do comprimento de onda. Assim, cada cor (ou comprimento de onda) produzirá máximos em ângulos diferentes, ou seja, um feixe incidente contendo várias componentes de cor será decomposto e cada cor passará a propagar-se em uma direção diferente, atingindo o anteparo em um ponto diferente. Por meio de medidas destas posições, somos capazes de determinar os valores dos comprimentos de onda, se conhecermos os parâmetros da rede de difração. O padrão de intensidades resultante dessa decomposição de um feixe de luz em seus componentes de comprimento de onda é chamado de espectro do feixe de luz. O espectro de um feixe pode fornecer muitas informações sobre a fonte de luz. Em particular, se a fonte de luz for um gás de átomos ou moléculas, obteremos informações sobre a estrutura destes átomos e mo-

l culas. Em outros casos, quando conhecemos previamente a estrutura de determinados átomos ou moléculas, podemos determinar a composição de um gás que contenha vários tipos de átomos e moléculas.

6.2 Calibração da Rede

A calibração de uma rede consiste na determinação do seu número de linhas por unidade de comprimento N_l ou da separação entre linhas $d = 1/N_l$. Utilizaremos uma lâmpada de vapor de mercúrio, que é uma fonte de luz cujas características nós conhecemos previamente. Esta fonte emite luz de várias cores diferentes. No entanto, a variação entre o maior e o menor comprimento de onda não   contínua. No feixe produzido por esta lâmpada encontraremos apenas alguns comprimentos de onda específicos, característicos do vapor de mercúrio e cujos valores nós conhecemos e estão listados na tabela abaixo. Enviaremos um feixe produzido por esta lâmpada através da rede de difrac o e mediremos os ângulos dos máximos de interferência para cada uma das cores. Por meio de uma regressão linear gráfica, encontraremos o valor de N_l para a nossa rede. A partir da , estaremos aptos a medir o comprimento de onda de qualquer feixe de luz com nosso sistema calibrado.

6.3 Dispersão  ngular

Analogamente ao caso da espectroscopia por um prisma, define-se a dispersão angular de uma rede de difrac o como $d\theta_{max}/d\lambda$. Diferenciando-se a Eq. 6.1 obt m-se:

$$\frac{d\theta_{max}}{d\lambda} = \frac{mN_l}{\cos \theta_{max}} \quad (6.2)$$

Isso mostra que a dispersão da rede aumenta com o número de linhas por unidade de comprimento N_l e com a ordem do máximo considerado.

- LEIA ATENTAMENTE O PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ATÉ O FINAL, ANTES DE COMEÇAR A TRABALHAR EM SUA MONTAGEM.

- EVITE O CONTATO MANUAL COM A SUPERFÍCIE DAS LENTES!

- Confira todo o material antes de iniciar e o organize depois que finalizar a experiência. Avise ao professor no início da aula se faltar algum item.

6.4 Procedimento Experimental

O aparato experimental é mostrado na figura abaixo.

6.4.1 Ajustes iniciais

1. Coloque o goniômetro em frente à lâmpada de mercúrio de modo a maximizar a iluminação da fenda;
2. Ajuste a largura da fenda para uma abertura pequena o suficiente para que se possa olhar diretamente para ela;
3. Ajuste os focos dos dois telescópios de modo a ter uma imagem nítida da fenda através de ambos;
4. Alinhe a fenda na mesma direção da mira no telescópio de observação;
5. Coloque a rede de difração no centro da base do goniômetro, no caminho do feixe de luz, de tal forma que o ângulo de incidência seja o mais próximo possível de 90° ;
6. Verifique com o telescópio, se os feixes coloridos emergem da rede;
7. Identifique agora cada uma das linhas (cores) da tabela abaixo, para a lâmpada de mercúrio (Hg). A figura 6.1 mostra as linhas coloridas que devem ser observadas. As setas indicam as linhas na tabela.

6.4.2 Tomada de Dados: Determinação de N_l

1. Observe através do telescópio que cada uma das cores (linhas) à direita da direção frontal pode também ser vista do lado esquerdo. Veja Figura 6.2;

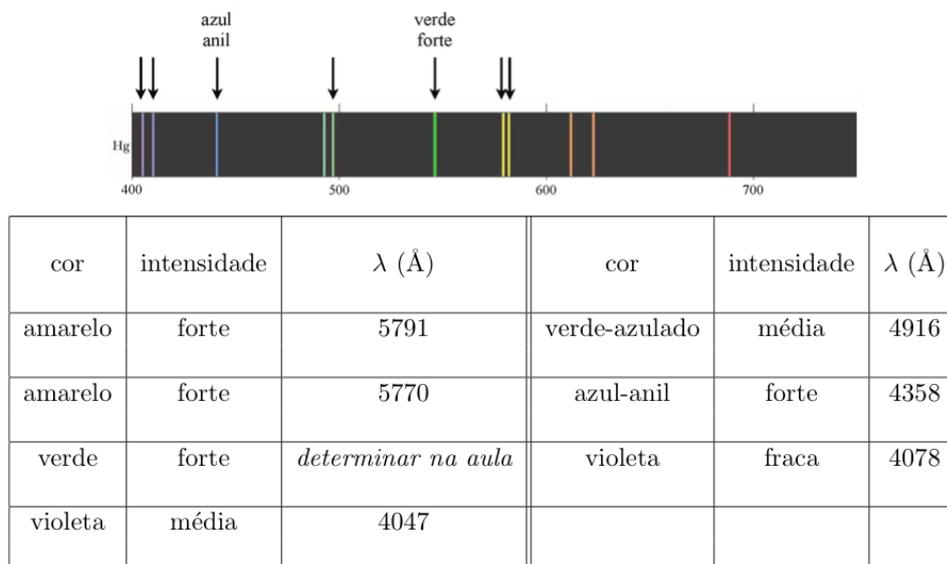


Figura 6.1: Linhas espectrais da lâmpada de Hg.

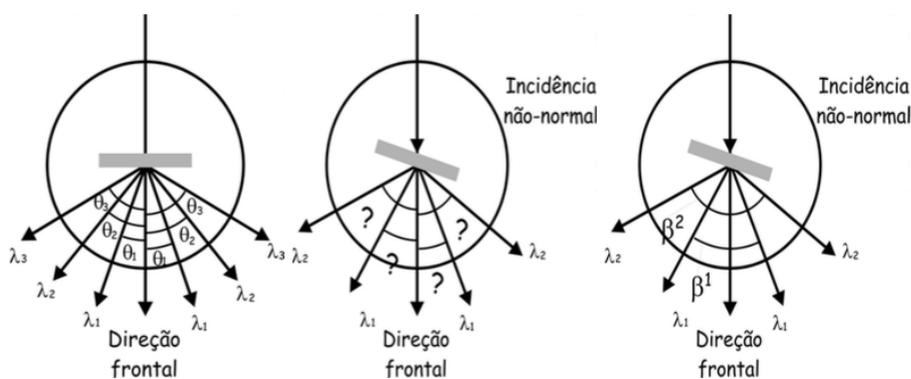


Figura 6.2: Diagrama esquemático para o espalhamento em uma rede de difração para primeira ordem.

- Para cada uma das linhas, ou cores, meça o ângulo total β entre as direções em que cada linha aparece à direita (o ângulo da ordem $m = 1$) e à esquerda (o ângulo da ordem $m = -1$), conforme indicado na Fig. 6.2. Assumiremos que o ângulo de difração de ordem 1 para cada cor será dado por $\theta_{max} = \beta/2$. Com este esquema, podemos minimizar erros devidos a incidência com ângulos ligeiramente diferentes de 90° .

6.4.3 Tratamento dos dados

1. Utilizando os dados do item anterior faça um gráfico de $\sin \theta_{max}$ em função de $m\lambda$, com $m = 1$;
2. Determine, a partir do gráfico, o valor de N_l e compare-o com o valor fornecido pelo fabricante da rede. Qual a distância d entre as fendas da rede de difração?

6.4.4 Tomada de dados: Determinação de um comprimento de onda desconhecido

Se tivermos um feixe de luz cujo comprimento de onda desejamos medir, podemos utilizar o espectrômetro de rede de difração. Dado que conhecemos o valor de N_l para a rede, basta medir o ângulo θ_{max} para vários valores de m , por exemplo, para obter o valor de λ .

1. Determine experimentalmente o comprimento de onda λ da linha verde (intensidade forte) emitida pela lâmpada usada para fazer as medidas anteriores. Meça o ângulo das ordens $m = -2, -1, 1, 2$ em relação a direção frontal e faça uma tabela com os valores de m e $\sin \theta_{max}$.

6.4.5 Tratamento dos dados

1. A partir dessas medidas, conclua se o posicionamento da rede em relação ao ângulo de incidência era normal;
2. Faça um gráfico de $\sin \theta_{max} \times mN_l$ e determine o valor de λ graficamente.

Interferômetro de Michelson

7.1 Introdução

O Interferômetro de Michelson, mostrado na Fig. 7.1, é um dos sistemas ópticos mais importante que utiliza técnicas interferométricas para medidas de índice de refração, deslocamentos, ou vibrações, com grande precisão. Um raio de luz coerente incide sobre um semi-espelho (divisor de feixe), onde é parcialmente refletido e parcialmente transmitido. O feixe transmitido (identificado como o primeiro “braço” do Interferômetro) é refletido por um espelho M_1 e, em seguida, novamente refletido pelo divisor de feixe até atingir um anteparo. O segundo feixe (identificado como o segundo “braço” do interferômetro) é refletido por um espelho M_2 e também atinge o anteparo, onde é gerado o padrão de interferência.

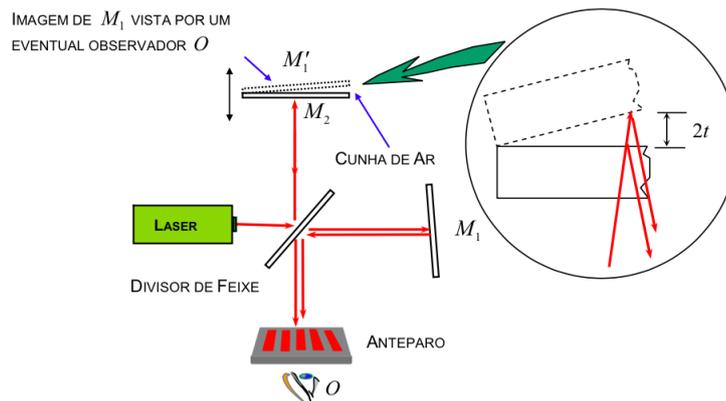


Figura 7.1: Configuração do interferômetro de Michelson para medida de pequenos deslocamentos..

Geralmente, o espelho M_1 é fixo e o espelho M_2 pode ser deslocado,

utilizando-se um micrômetro na direção do feixe de luz.

A figura de interferência, observada sobre o anteparo, pode ser melhor compreendida notando-se que o semi-espelho gera uma imagem M'_1 do espelho M_1 na região do espelho M_2 , vista por um eventual observador O .

A cunha de ar formada pelas duas superfícies planas de M'_1 e M_2 é responsável pela formação padrão de interferência. Se o espelho M_2 for ligeiramente deslocado, por exemplo de $t = \lambda/2$, a espessura da cunha será modificada ponto a ponto, por este mesmo valor, introduzindo uma diferença de percurso adicional de $2t = \lambda$ no feixe de luz, pois este atravessa a cunha duas vezes. Esta diferença de percurso será observada na figura de interferência pelo **deslocamento completo** de uma franja clara. De um modo geral, se houver um deslocamento de N franjas claras no padrão de interferência, o deslocamento t correspondente do espelho M_2 será dado, por

$$2t = N\lambda \quad (7.1)$$

Quando se considera N um número inteiro, a Eq. (7.1) descreve a condição de **interferência construtiva** dos raios refletidos nos espelhos M_2 e M'_1 quando o segundo atravessa a cunha de ar. Em ambos os casos ocorre mudança de fase π durante a reflexão das ondas, pois saem de um meio menos refringente (ar) para outro mais refringente (espelho).

O Interferômetro de Michelson pode também ser utilizado para medir o índice de refração de materiais transparentes construídos na forma de uma lâmina de espessura bem definida, como mostra a Fig. 7.2. A lâmina transparente deve ser colocada no caminho de um dos feixes do interferômetro. Como o índice de refração n do material é maior que o índice do ar, ou vácuo, o comprimento de onda da luz no interior da lâmina diminui para $\lambda' = \frac{\lambda}{n}$, onde λ é o comprimento de onda da luz no vácuo.

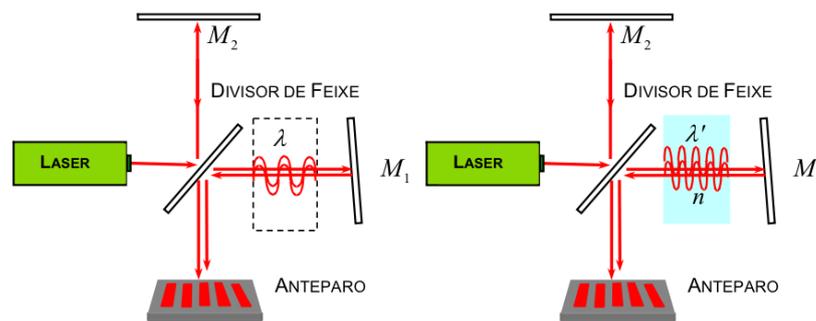


Figura 7.2: Configuração do interferômetro de Michelson para medida de índice de refração.

Dessa forma, o número de ondas no interior da lâmina aumenta de $N_1 = \frac{2t}{\lambda}$ para $N_2 = \frac{2t}{\lambda'} = \frac{2nt}{\lambda}$, que pode ser medido com boa precisão, observando

o número de franjas N claras, ou escuras, que se deslocam no padrão de interferência sobre o anteparo, uma vez que $N = N_2 - N_1 = \frac{2t}{\lambda}(n - 1)$, ou

$$n = N \frac{\lambda}{2t} + 1 \frac{1}{4} \quad (7.2)$$

Note que o índice de refração n do material pode ser encontrado por esta experiência desde que se conheça com precisão o comprimento de onda λ da luz e a espessura t do material. Os índices de refração de gases (como o ar por exemplo) e líquidos podem ser medidos utilizando-se lâminas ocas, com espessuras calibradas.

7.2 Medida de pequenos deslocamentos

1. Monte o experimento do Interferômetro de Michelson sobre a bancada utilizando os instrumentos disponíveis. Procure superpor os dois feixes de luz sobre o anteparo atuando sobre os parafusos micrométricos do espelho M_1 ;
2. Introduza a lente convergente entre o interferômetro e o anteparo para ampliar o padrão interferométrico. Atue nos parafusos micrométricos do espelho M_1 para que se tenha um número entre quatro e seis franjas no padrão interferométrico, e ao mesmo tempo que elas se posicionem na horizontal ou vertical;
3. Posicione o anteparo para que o centro de uma franja clara ou escura fique sobre a linha de referência do mesmo. Atue no micrômetro do interferômetro até que este fique no zero de sua escala. Perceba que a menor divisão de escala do micrômetro é de 0,01mm, e conseqüentemente, tem uma precisão da ordem de $\Delta t_{mic} = 0,005$ mm;
4. Desloque o espelho M_2 para frente atuando no micrômetro do interferômetro até a contagem de 35 franjas sobre a referência do anteparo. Anote, com o maior número possível de algarismos significativos, a nova leitura do micrômetro t_{mic} em mm e, por conseguinte, o deslocamento $(t_{m_2})_{mic}$ do espelho previsto por esse instrumento. A construção do interferômetro é tal que o deslocamento do espelho $(t_{m_2})_{mic}$ é 1/10 do deslocamento promovido pelo micrômetro t_{mic} , isto é $(t_{m_2})_{mic} = t_{mic}/10$. Nesse caso, a precisão da medida aumenta, uma vez que $(\Delta t_{m_2})_{mic} = \frac{1}{10} \Delta t_{mic} = 0,0005$ mm;
5. Repita essa experiência por mais duas vezes atuando no micrômetro a partir do ponto onde parou. É conveniente que cada experiência seja realizada por diferentes componentes da equipe de trabalho. Assuma o valor médio $\langle (t_{m_2})_{mic} \rangle$ como resultado da medida do deslocamento

registrado pelo micrômetro, mantendo sempre o número apropriado de algarismos significativos;

6. Utilize o número de franjas deslocadas $N = 35,0$ e o comprimento de onda do laser de He-Ne $\lambda = 633$ nm para calcular, por meio da Eq. (7.1), o deslocamento $(t_{m_2})_{int}$ do espelho M_2 previsto pelo método interferométrico, também com o número apropriado de algarismos significativos;
7. Repita toda a experiência para contagens de $N = 40,0$ e $45,0$ franjas de interferência;
8. Faça uma estimativa dos erros gerados pelo micrômetro e pelo interferômetro de Michelson e discuta a precisão dos dois métodos.

7.3 Medida do índice de refração do ar

1. Novamente, posicione o anteparo para que o centro de uma franja clara ou escura fique sobre a linha de referência do mesmo;
2. Atue cuidadosamente na pistola de vácuo para retirar o ar da célula de ar lentamente e, ao mesmo tempo, conte o número N de franjas que se deslocam no anteparo até que o movimento cesse. Adote a medida de N com o número apropriado de algarismos significativos. Lembre-se que N não precisa ser necessariamente um número inteiro;
3. Utilize o número de franjas deslocadas N , a espessura $t = 10$ mm da célula de ar calibrada e o comprimento de onda do laser de He-Ne $\lambda = 633$ nm para calcular, por meio da Eq. (7.2), o índice de refração n do ar;
4. Libere o ar na célula de ar e repita a experiência por mais quatro vezes;
5. Calcule o valor médio de $\langle n \rangle$ e o erro padrão δ_n , com o maior número possível de algarismos significativos.