# Parte V

# FÍSICA EXPERIMENTAL ÓTICA

# CAPÍTULO 1

#### Diâmetro de feixes de luz

#### 1.1 Introdução

Um feixe de luz de uma lanterna, por exemplo, ao iluminar um anteparo, a área mais central apresenta uma maior intensidade do que as regiões laterais, que apesar de iluminadas apresentam uma nítida diminuição na intensidade. Isto ocorre porque a parte central da área irradiada pelo feixe de luz possui mais fótons por área, quando comparado com áreas laterais (Figura 1.1). Tal comportamento ocorre em qualquer fonte de luz, desde LEDs até lasers que possuem uma menor divergência. A diferença entre as fontes é o perfil de decaimento radial que pode apresentar diferentes comportamentos. O exemplo apontado na Figura 1.1 mostra o perfil do número de fotons ao londo do eixo x, que corta diametralmente o feixe de luz da lanterna. Com este número é possível calcular a energia total do feixe em cada ponto  $E_t = n.E_f$ , onde n é o número de fótons e  $E_f$  a energia do fóton. Dividindo este termo pela área temos a densidade de energia D e dividindo pelo tempo, temos a densidade de potência I. Estas densidades podem ser obtidas em qualquer ponto (x, y) da área iluminada pela lanterna. Quando não ha detectores calibrados é possível empregar uma medida relativa da luminosidade e obter o mesmo perfil transversal apresentado.

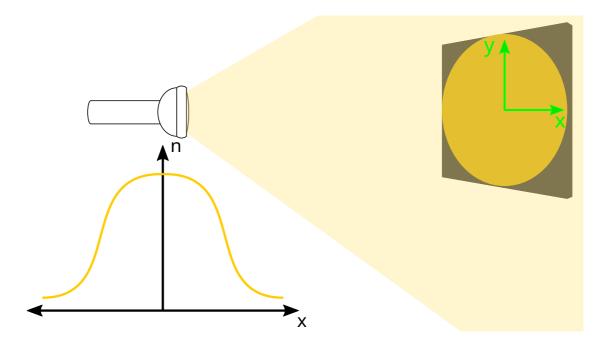


Figura 1.1: Perfil transversal de um feixe de luz produzido por uma lanterna. A parte central possui mais fótons, logo também possui uma maior densidade de energia D e densidade de potência I. Estes perfis serão uma função das coordenadas espaciais (x, y).

A densidade de energia D do feixe pode ser avaliada a partir da equação 1.1 abaixo:

$$D = \frac{nE_f}{A} \tag{1.1}$$

onde D corresponde a densidade de energia e n o número de fótons que incidem no anteparo em uma determinada área A.

Para avaliar a densidade de potência basta dividir a equação 1.1 pelo intervalo de tempo que deseja avaliar, obtendo-se a densidade de potência como na equação 1.2 abaixo:

$$I = \frac{nE_f}{At} \tag{1.2}$$

onde I corresponde a densidade de potência do feixe e n o número

1.2 Teoria 317

de fótons que incidem no anteparo em uma determinada área A durante um intervalo de tempo t.

#### 1.2 Teoria

Se considerarmos um feixe laser com uma distribuição transversal de potência, esta distribuição poderá assumir diferentes perfis, podendo ser uma distribuição Gaussiana ou uma distribuição retangular, particularmente associada a perfis transversais de lasers de diodo.

É comumente encontrado em laboratórios didáticos de óptica lasers de He-Ne que possuem perfis muito próximos à função Gaussiana ou lasers de diodo que possuem uma assimetria transversal com valores de diâmetros diferentes para os dois eixos.

Considere um feixe laser com um perfil de densidade de potência próximo ao perfil da função gaussiana da equação 1.3 e apresentado na figura 1.2.

$$I(x,y) = I_0 \exp^{-\frac{1}{2} \left( \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{w^2} \right)}$$
(1.3)

onde I(x,y) corresponde a densidade de potência no ponto (x,y),  $I_0$  a densidade de potência máxima no ponto  $(x_0,y_0)$  e w o diâmetro do feixe.

A densidade de potência I(x,y) pode ser correlacionada com a potência P do laser como descrito na equação 1.4.

$$I(x,y) = \frac{dP}{dA} \tag{1.4}$$

onde a potência pode ser obtida pela integração da densidade de potência sobre a área transversal A do feixe, como apresentado na equação 1.5.

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) \, dx \, dy \tag{1.5}$$

Esta equação pode ser aproximada à uma função empírica como a

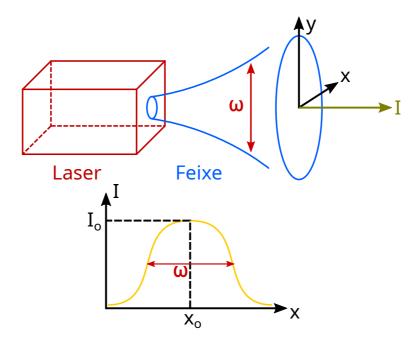


Figura 1.2: Perfil de emissão transversal de um feixe laser com diâmetro w. O perfil é geralmente descrito por uma função Gaussiana.

equação 1.6 ou pode ser a função erro (equação 1.7) ou ainda um perfil qualquer que possa ser resolvido por integração numérica. Assim, podemos associar uma função para o perfil transversal da irradiância de um feixe laser apresentado na equação 1.3.

#### 1.3 Objetivo

O objetivo desta prática é montar um sistema óptico simplificado contendo uma fonte laser, lentes e deslocadores para introduzir o estudante na montagem de sistemas ópticos. Adicionalmente o estudante aplicará a técnica borda-da-lâmina para determinação do diâmetro e a posição de feixes lasers.

## 1.4 Metodologia

Neste experimento será empregado um kit de componentes mecânicos que serão utilizados para fazer a montagem. Na figura 1.3 há uma sugestão para montagem, mas o aluno pode explorar outras configurações, visando sempre a praticidade e qualidade dos resultados a serem obtidos. Agora, especificamente para este experimento é necessário centralizar um laser com o detector. Para concentrar toda a luz do laser no detector será empregado uma lente para focalizar o feixe sobre a área útil do detector de luz. Para interceptar o feixe laser será empregado uma lâmina acoplada a um deslocador.

1. Alinhe o sistema óptico conforme a figura 1.3. Tenha em mente que você utilizará estes sistema para outros experimentos, assim monte-o sem a presença de folgas, desalinhamentos, etc.. Não desmonte-o ao final da aula. Este experimento é composto por um laser, transadores tridimensional (vertical, horizontal e longitudinal), suporte com uma lâmina para obstrução do feixe laser, lente colimadora e detector com voltímetro.



Figura 1.3: Montagem experimental da técnica borda-da-lâmina aplicada na determinação do diâmetro do feixe laser.

- 2. Certificado o alinhamento, obstrua o feixe com a lâmina na direção horizontal numa posição z próxima à fonte e avalie o alinhamento com o detector, ganho do amplificador, curso útil do translador. Importante: Anote sempre todos os valores utilizados para evitar erros na análise dos resultados. Considere z como eixo de propagação do laser e z=0mm para a saída do laser.
- 3. Após os testes do item anterior obtenha a tensão no detector (que é proporcional a potência do laser) em função do deslocamento transversal da lâmina. Obtenha estes valores obstruindo o feixe horizontalmente e depois verticalmente. Os

deslocamentos podem ser realizados inicialmente com passos de x=0,25mm nas extremidades do feixe e passos de x=0,1mm quando a borda da lâmina estiver efetivamente bloqueando o feixe, situação em que a tensão no detector muda mais drasticamente. Caso você não tenha um deslocador micrométrico, empregue um paquímetro para certificar os deslocamentos que você esta executando.

- 4. Obtenha o perfil da tensão em função do deslocamento transversal nas direções x e y; repita estes deslocamentos para 3 diferentes valores de z, aproximadamente com a lâmina posicionada a 2cm, 40cm e 80cm distante da fonte.
- 5. Faça os gráficos da tensão no detector em função do deslocamento da lâmina nas duas direções x e y.
- 6. Para obter o diâmetro é necessário ajustar funções específicas que possuem o perfil assintótico observado experimentalmente. Empregue duas funções.

A primeira função é a equação 1.6, denominada como equação de Khosrofian. Ajuste inicialmente esta função aos valores experimentais obtidos utilizando a ferramenta do Origin, de ajuste não-linear. Com este ajuste obtenha o diâmetro do feixe  $d_x$  e a posição do feixe  $x_0$ :

$$P(x) = P_{BK} + \frac{P_0}{1 + exp\left[-(a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3)\right]}$$
 (1.6)

As constantes dessa equação possuem os seguintes valores:  $a_0 = -6,71387.10^{-3}$ ;  $a_1 = -1,55115$ ;  $a_2 = -5,13306.10^{-2}$ ;  $a_3 = -5,49164.10^{-2}$  e t a variável paramétrica, uma relação do diâmetro e a posição,  $t = (2/d_x)(x - x_0)$ ; onde  $P_{BK}$  é a potência detectada de fundo, a  $P_0$  a potência máxima,  $d_x$  o diâmetro na direção transversal horizontal e  $x_0$  a posição do feixe onde observa-se a potência máxima. Nesta equação as constantes  $P_{BK}$ ,  $P_0$ ,  $d_x$  e  $x_0$  serão obtidas pelo ajuste. Para os deslocamentos verticais teremos variáveis correspondentes.

7. Utilizando os mesmos dados experimentais obtenha o diâmetro do feixe laser a partir do ajuste da equação 1.7.

$$P(x) = P_{BK} + \frac{P_0}{2} \left[ 1 \pm erf\left(\frac{\sqrt{2}(x - x_0)}{d}\right) \right]$$
 (1.7)

Apresente os resultados obtidos e os gráficos das duas funções ajustadas de forma legível, preservando sempre a visibilidade dos eixos, valores experimentais, grandezas e unidades corretas.

- 8. É bem provável que você tenha observado divergência no valor do diâmetro encontrado pela função do Khosrofian e a função Erro. Como você explica esta divergência? Sabendo que a distribuição de potência no espaço pode obedecer a função Gaussiana, onde começa e termina o feixe, para definir um diâmetro? Qual foi a definição que o Programa Origin usou para definir o valor do diâmetro?
- 9. Com base apenas nos valores experimentais obtenha o perfil da densidade de potência do feixe derivando pontualmente os valores experimentais, empregue a ferramenta derivative do programa Origin. Estes novos valores corresponderão à densidade de potência do seu feixe ao longo do eixo transversal.
- 10. Caso os novos valores sejam negativos, explique este comportamento e troque o sinal para prosseguir.
- 11. Ajuste uma função Gaussiana e determine os parâmetros do feixe, incluindo o seu diâmetro.
- 12. Compare este valor com os encontrados com o ajuste das funções apresentadas nas equações 1.6 e 1.7.

# CAPÍTULO 2

Divergência de feixes lasers e seus perfis transversais

#### 2.1 Introdução

O senso comum nos diz que toda a radiação quando gerada por um filamento incandescente ou por um LED será divergente. Lasers podem ser uma particularidade e serem caracterizados como uma fonte não divergente, mas basta avaliar o diâmetro de um laser pointer a 1m de distância e quando ele esta projetado numa parede distante, que mesmo os lasers possuem divergência angular no seu feixe. A divergência de um laser pode ser alterada por lentes acopladas as suas cavidades e leds podem ser focalizados por espelhos côncavos, como observado em lanternas. Nestas situações o sistema apresentará outro valor de divergência devido a adição destes componentes ópticos.

#### 2.2 Objetivo

Determinar a divergência do feixe do laser de He-Ne 632nm nos dois eixos transversais empregando a técnica borda-da-lâmina; e determinar o perfil 3D do laser de diodo empregando duas metodologias diferentes.

#### 2.3 Teoria

A divergência de uma fonte de luz num sistema óptico pode ser aproximada para a equação 2.1, onde  $\theta$  é o ângulo de divergência do feixe,  $\Delta r = r - r_0$  a variação do raio após a propagação da distância  $\Delta z = z - z_0$ , como apresentado na figura 2.1. Esta divergência pode ser diferente para os dois eixos ortogonais ao eixo de propagação e desta forma é importante determinar esta divergência para ambos os eixos.

$$\tan\left(\theta/2\right) \cong \frac{\Delta r}{\Delta z} \tag{2.1}$$

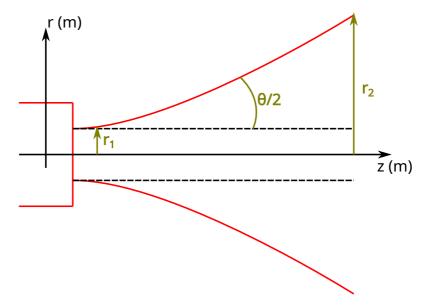


Figura 2.1: Divergência de um feixe laser

#### 2.4 Metodologia

1. Monte o experimento sobre o trilho óptico de 1m similar ao apresentado na figura 2.2. Neste experimento será empregado um feixe do laser de He-Ne, se propagando na direção z, um deslocador transversal com movimentos nas direções horizontais x e transversais y, onde será posicionado inicialmente a lâmina. (Importante: Neste momento o detector estará sem a máscara preta furada e o laser de diodo tera a sua lente de saída desacoplada. Consulte o professor ou o técnico de laboratório para se certificar que o seu laser esteja sem a lente.)



Figura 2.2: Aparato para se obter a divergência de um feixe laser.

- 2. Empregue a técnica borda-da-lâmina para determinar o raio do feixe nas duas direções transversais x e y e para 4 diferentes valores de z sobre o maior range possível.
- 3. Ajuste a equação 2.1 aos valores experimentais e obtenha a divergência do seu feixe na direção  $\boldsymbol{x}$  e  $\boldsymbol{y}$ .
- 4. Agora para o laser de diodo, a uma certa distância z, obtenha o perfil 3D da tensão registrada no detector em função do deslocamento da lâmina nas direções x e y. Distintamente do experimento anterior, aqui sera determinado a tensão para todos os valores de x e y que corresponderão à obstrução do

feixe. Ou seja, para um determinado valor de y desloque a lâmina transversalmente ao feixe e obtenha m valores de x. Estes valores comporão a primeira linha de uma matriz de dados experimentais e corresponderá ao valor da linha  $y_1$ . Desloque a lâmina verticalmente e posicione em um novo valor de  $y_2$ , meça novamente os valores de tensão para todos os mesmos m valores de x. Repita isto até cobrir todo o feixe laser na direção y, que deve corresponder a um total de nvalores. Estes valores comporão um matriz mxn. É muito importante que os valores de tensão nas extremidades da matriz sejam aproximadamente constantes e com valores próximos a zero ou ao valor máximo de tensão (Potência), para garantir que você cobriu e descobriu totalmente o feixe laser com a lâmina. Empregue deslocamentos transversais adequados para que os valores experimentais reproduzam um perfil assintótico suave e permita ajustar a função teórica. Para visualizar o deslocamento e obter a matriz mxn acompanhe a explicação anterior com a figura 2.3.

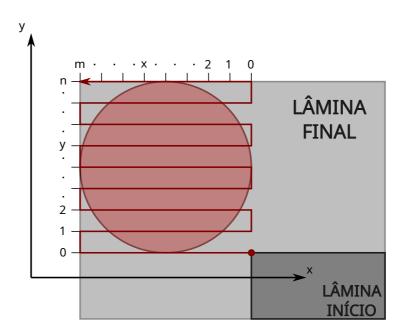


Figura 2.3: Diagrama para montar a matriz mxn e obter o perfil 3D usando a técnica borda-da-lâmina.

5. Faça um gráfico 3D deste perfil transversal e ajuste a função

Khosrofian para duas variáveis, similar a equação 1.6 mas com a definição paramétrica de  $\boldsymbol{t}$  valendo conforme a equação 2.2.

$$t = \{(2/d_x)(x - x_0) + (2/d_y)(y - y_0)\}$$
 (2.2)

- 6. Insira a máscara preta com o furo na entrada do detector e de forma similar ao deslocamento da lâmina, posicione agora o detector (com a máscara e o furo) no mesmo suporte onde estava a lâmina. Fazendo isto podemos agora deslocar o furo sobre uma matriz mxn em vez de deslocar a lâmina. Neste item empregue passos próximos ou ligeiramente superior a 0,5mm. Determine a tensão no detector para diferentes valores de x e y e monte uma matriz mxn similar ao item anterior.
- 7. Faça o gráfico com o perfil de tensão e ajuste a equação Gaussiana em 3D.

# CAPÍTULO 3

Refração

#### 3.1 Introdução

A mudança de trajetória da luz, ao passar por diferentes meios, não é facilmente perceptível, porque ao detectá-la visualmente, aquela direção corresponde àquele meio e não traz nenhuma informação sobre o meio anterior. Por exemplo, se a luz do sol sofre refração ao entrar na atmosfera terrestre a sua confirmação experimental fica prejudicada, pois estamos justamente inseridos no meio (atmosfera).

A refração observada em objetos como um lápis dentro de um copo com água produz uma imagem de um "lápis quebrado" representa a imagem e não a trajetória da luz entrando na água, refletindo no objeto, saindo da água para o ar e formando a imagem. Para o estudo da refração se torna importante identificar a mudança de trajetória dos raios de luz quando estes passam pelos diferentes meios. E esta configuração é mais facilmente elaboradora e observada quando se dispõem os raios paralelos sobre uma bancada e que os objetos (meios) não sejam totalmente translúcidos e permi-

330 Refração

tam espalhar um pouco de luz, dando o indicativo de onde o raio de luz está passando e incidindo.

## 3.2 Objetivo

O objetivo deste experimento é determinar o índice de refração de diferentes materiais disponíveis na bancada empregando a lei de refração. Empregar os valores obtidos para determinar o ângulo crítico da reflexão interna total e obter a dependência espectral do índice de refração para 3 comprimentos de onda (azul, verde e vermelho).

#### 3.3 Teoria

A luz ao passar por uma interface que separa dois meios sofre uma mudança na direção de propagação conforme apresentado na figura 3.1 e equação 3.1.

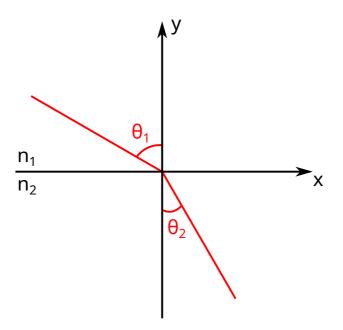


Figura 3.1: Refração de um feixe de luz passando do meio 1 ao meio 2; esta representação corresponde para valores de  $n_1 < n_2$ 

$$n_1 sen(\theta_1) = n_2 sen(\theta_2) \tag{3.1}$$

onde  $n_1$  é o índice de refração do primeiro meio,  $\theta_1$  o ângulo do raio com a normal ao passar pela interface,  $n_2$  é o índice de refração do segundo meio,  $\theta_2$  o ângulo do raio com a normal saindo da interface e entrando no segundo meio.

A ilustração da figura 3.1 é uma visualização típica e didática para apresentar a lei de Snell, mas na prática laboratorial ocorre a propagação da luz em diferentes situações que podem gerar confusão no momento de nomear as variáveis. Assim é importante sempre fazer diagramas experimentais e correlacionar esta equação com cada interface onde o feixe de luz atravessa.

Vamos considerar um feixe de luz no ar e atravessando uma lâmina de determinado material, conforme a figura 3.2. Nesta, ocorre duas refrações, ao entrar e ao sair da lâmina. O feixe emergente é paralelo ao feixe incidente e possui um deslocamento lateral d, dependente do índice de refração n, do ângulo de incidência no material  $\theta_1$  e da espessura da lâmina. Esta dependência possui duas relações (3.2 e 3.3), onde a 3.3 é válida apenas para pequenos valores de  $\theta_1$ .

$$d = \frac{tsen(\theta_1 - \theta_2)}{cos(\theta_2)} \tag{3.2}$$

$$d = \frac{t\theta_1(n-1)}{n} \tag{3.3}$$

## 3.4 Metodologia

Será empregado tês lasers, goniômetro com uma cuba de água, peças de acrílico e vidro com formas de paralelepípedo e semicirculo.

1. Considere o índice de refração do ar igual a 1,0 para todos os comprimentos de onda no visível. Empregue o semi-circulo do acrílico (no ar) e empregue diferentes ângulos (10 valores) de

332 Refração

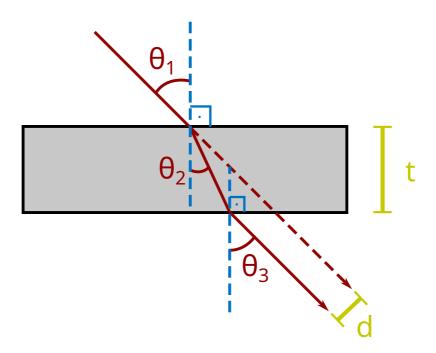


Figura 3.2: Desvio d do feixe de luz ao atravessar uma lâmina de determinado material com índice de refração n e espessura t.

raios incidentes e obtenha experimentalmente os raios refratados sobre o range de 0° a 90° de incidência. A partir deste valores calcule os índices de refração do acrílico. Repita este item, bem como os demais itens para os 3 comprimentos de onda disponíveis, violeta, verde e vermelho.

- 2. Propague as incertezas das medidas experimentais dos ângulos de incidência e refração e calcule a incerteza final do índice de refração do acrílico para os 3 comprimentos de onda.
- 3. Calcule o ângulo crítico da reflexão interna total que ocorre no acrílico, quando disposto no ar;
- 4. Determine experimentalmente o ângulo crítico do acrílico (semicírculo) e compare com os valores calculados na questão anterior.
- 5. Calcule o índice de refração da água. Lembrando que estes itens deverão ser repetidos para os 3 comprimentos de ondas como já mencionados anteriormente.

- 6. Propague as incertezas das medidas experimentais dos ângulos de incidência e refração e calcule a incerteza final do índice de refração da água para os 3 comprimentos de onda. Não se esqueça que agora você tem o índice de refração do acrílico ja calculado e ja com uma incerteza associada.
- 7. Com o valor experimental do índice de refração da água determine o ângulo crítico do acrílico (semicírculo) quando este está mergulhado na água.
- 8. Determine experimentalmente o ângulo crítico do acrílico mergulhado na água e compare com os valores calculados na questão anterior.
- 9. Escolha um laser e determine experimentalmente o desvio lateral d para diferentes ângulos de incidência no paralelepípedo de vidro e de acrílico. Cubra 10 valores de ângulo de incidência entre  $0^{\circ}$  e  $90^{\circ}$ .
- 10. Determine graficamente o erro correspondente ao empregar as duas equações da figura 3.2 e mostre para qual faixa de valores de  $\theta_1$  a segunda equação pode ser válida.

334 Refração

# CAPÍTULO 4

Lentes

## 4.1 Introdução

Há alguns métodos que podemos empregar para determinar a distância focal de lentes. Nas figuras a seguir serão apresentados dois métodos para lentes convergentes, denominado como método de pontos conjugados (figura 4.1), método de Bessel (figura 4.2) e um método para determinar a distância focal de lentes divergentes (figura 4.3).

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \tag{4.1}$$

$$f = \frac{A^2 - D^2}{4A} \tag{4.2}$$

A equação 4.2 é válida apenas para A>4f.

$$O_D = i_c - l \tag{4.3}$$

336 Lentes

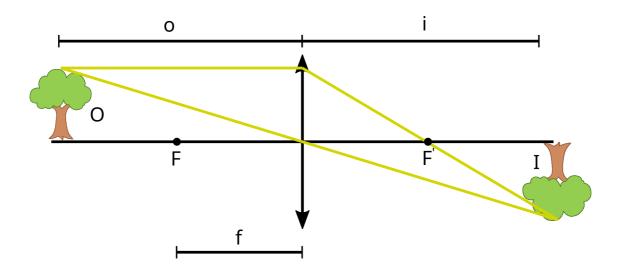


Figura 4.1: Método de pontos conjugados para determinar a distância focal de uma lente convergente. Ao projetar a imagem (I) do objeto (O) sobre o anteparo é possível mensurar as distâncias "o"e "i", e determinar a distância focal da lente.

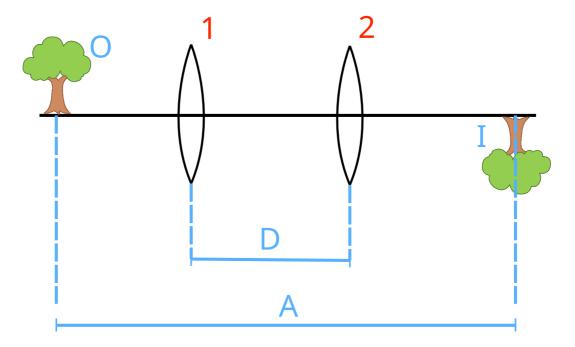


Figura 4.2: Método de Bessel para determinar a distância focal de uma lente convergente. Há a posição 1 e a posição 2 que a mesma lente pode projetar uma imagem no anteparo, para uma distância fixa entre o objeto e a imagem projetada no anteparo.

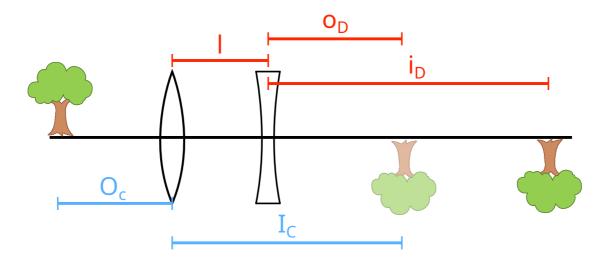


Figura 4.3: Método para determinar a distância focal de uma lente divergente, pela associação de uma lente convergente com uma divergente. Posicionando inicialmente o objeto e a lente convergente, se obtém a imagem  $(I_C)$ , ao inserir a lente divergente, esta imagem se torna objeto para a lente divergente e projeta uma imagem a  $i_D$ 

338 Lentes

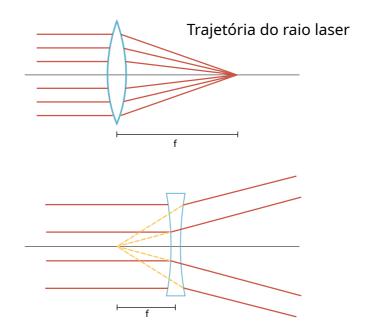


Figura 4.4: Diagrama dos raios de luz (feixes lasers) passando por duas lentes de acrílico "planas" (convergente e divergente). Determinando a trajetória destes raios é possível obter experimentalmente as suas distâncias focais.

Mas antes de empregar os métodos anteriores com lentes de vidro se utilizará um laser e lentes de acrílicos "planas" para visualizar a trajetória da luz ao passar pelas lentes, conforme pode ser visto na figura 4.4. O termo "plana" se deve porque estas lentes representam uma seção diametral de uma lente com simetria circular. Esta última converge ou diverge, radialmente a luz; enquanto as lentes "planas" produzem este efeito apenas sobre um eixo.

Para as lentes de acrílico planas vale lembrar que além da convergência, ou divergência, da lente que é oriunda do raio de curvatura das duas faces, ocorre uma reflexão de cada face similar a um espelho côncavo ou convexo. Para melhor visualizar acompanhe os raios das figura 4.5 e figura 4.6 que correspondem a reflexão de um espelho côncavo e convexo, respectivamente.

Assim, ao passar o raio laser pela lente, parte do laser é refletida pela face e o restante refratado; ao chegar na segunda face, novamente parte é refletida e a parte restante é refratada e transmitida pela lente. É importante saber que ha então um feixe refletido e

refratado em cada face da lente, os quais deverão ser utilizados para achar o raio de curvatura da face e o foco da lente.

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \tag{4.4}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r} \tag{4.5}$$

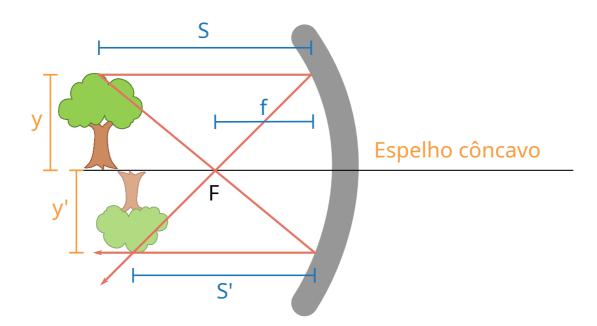


Figura 4.5: Diagrama dos raios de luz (feixes lasers) refletidos na face de uma superfície côncava que pode ser de um espelho côncavo ou da face de uma lente. Na lente a reflexão é geralmente mais tênue, pois a intensidade refletida são poucos % do feixe incidente.

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \tag{4.6}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r} \tag{4.7}$$

340 Lentes

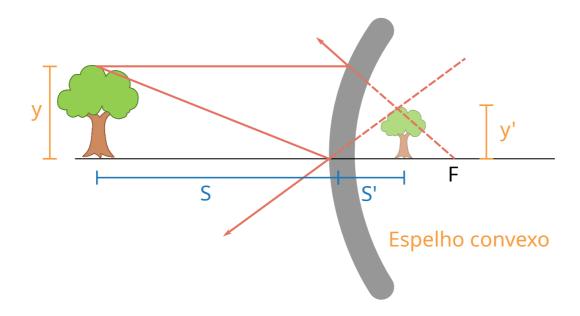


Figura 4.6: Diagrama dos raios de luz (feixes lasers) refletidos na face de uma superfície convexa que pode ser de um espelho convexo ou da face de uma lente. Na lente a reflexão é geralmente mais tênue, pois a intensidade refletida são poucos % do feixe incidente.

#### 4.2 Objetivo

Caracterizar dois conjuntos de lentes disponíveis no kit de óptica.

#### 4.3 Metodologia

Serão empregados dois conjuntos de lentes, sendo o primeiro um conjunto de lentes de acrílico e o segundo um conjunto de lentes de vidro. O primeiro grupo de lentes são unidades que refratam a luz apenas num determinado plano enquanto o segundo conjunto refrata a luz produzindo desvios com simetria radial. Para a montagem destas lentes serão empregados os componentes optomecânicos e uma bancada elevada para a disposição das lentes de acrílico. As fontes de luz serão uma lâmpada incandescente e um laser de diodo com emissão no vermelho.

- 1. Empregando o laser como fonte de raios paralelos determine a distância focal das quatro lentes de acrílico: plano-côncava; plano-convexa; bicôncava e biconvexa. Utilize uma folha de papel branca sob as lentes para registrar a trajetória dos raios de luz laser. Para o mesmo conjunto de lentes, determine a distância focal e o raio de curvatura das faces que compõem cada lente. Atenção que a reflexão na face e a refração pelo acrílico acontece simultaneamente, sendo a primeira de menor intensidade.
- 2. Sabendo que a distância focal de cada lente é resultado da refração do raio de luz nas duas faces, calcule a distância focal de cada lente utilizando as distâncias focais das faces obtidas experimentalmente na questão anterior e o índice de refração do acrílico obtido na aula passada. Compare este valor calculado com a distância focal obtida experimentalmente no primeiro item.
- 3. Determine experimentalmente a distância focal das lentes convergentes de vidro empregando o método dos pontos conjugados; Identifique as lentes de acordo com o seu número, 1 a 7. Para cada lente repita este item para 3 distâncias diferentes de o.
- 4. Repita o item anterior empregando o método de Bessel, empregando 3 diferentes valores de *o* também.
- 5. Deduza a equação de Bessel que foi empregado no item anterior para calcular o valor da distância focal.
- 6. Compare as distâncias focais obtidas pelos dois métodos e aponte o melhor.
- 7. Empregue o método descrito na figura 4.3 para determinar a distância focal da lente de vidro divergente. Repita para 3 diferentes valores de o.
- 8. Utilizando apenas uma lente convergente para projeção de imagens no anteparo, determine as dimensões do filamento

342 Lentes

da lâmpada incandescente e o espaçamento entre as espiras que a formam;

9. Monte um sistema óptico que permita ampliar ao máximo a imagem do filamento no anteparo. Determine a ampliação final, as dimensões do filamento da lâmpada e o espaçamento entre as espiras para este novo sistema óptico.

# CAPÍTULO 5

#### Propagação por uma lente

#### 5.1 Introdução

O raio de um feixe Gaussiano deformado por uma lente apresenta um perfil que pode ser descrito como na equação 5.1; onde r é o raio do feixe,  $r_0$  o menor valor de raio observado na região focal, também denominado como cintura do feixe; e  $z_R$  o comprimento de Rayleigh e  $z_0$  a posição da lente. A divergência deste feixe pode ser descrita como 5.2.

$$r^{2} = r_{0}^{2} \left[ 1 + \frac{M^{2}(z - z_{0})^{2}}{z_{R}} \right]$$
 (5.1)

onde 
$$z_R = \frac{\pi r_0^2}{\lambda}$$
 
$$\theta_0 = \frac{\lambda M^2}{\pi r_0^2}$$
 (5.2)

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $M^2$  um fator de qualidade que mede quão gaussiano é o feixe, M=1 corresponde a um feixe

gaussiano.

## 5.2 Objetivo

Estudar o perfil de propagação do laser ao passar por uma lente bi-convexa (f = 15cm) e uma lente bi-côncava (f = -25cm). Mais especificamente objetiva-se observar experimentalmente a propagação do feixe no espaço e ajustar o perfil de propagação de um feixe gaussiano para determinar a cintura do feixe  $(2r_0)$ , o range de Rayleigh  $(z_R)$ , a profundidade de foco do sistema óptico  $(2z_R)$ , o fator de qualidade do feixe  $(M^2)$ , a posição do foco da lente  $(z_0)$ e a divergência do feixe  $(\theta)$  ao passar pela lente.

#### 5.3 Metodologia

- 1. Considere um sistema experimental como apresentado na figura 5.1. Monte um diagrama similar ao apresentado e avalie os deslocamentos nos 3 eixos, o alinhamento com o detector antes de passar para a próxima atividade.
- 2. Determine o perfil transversal em torno do foco da lente número 1 para 12 valores de z. O diagrama correspondente pode ser observado na figura 5.2. Considere z=0 na posição da lente número 1. É importante que os deslocamentos em z cubram duas vezes o valor do foco da lente que se deseja analisar.
- 3. Anote todos as incertezas instrumentais associadas a este experimento.
- 4. Repita o experimento anterior empregando uma lente divergente conforme o diagrama apresentado na figura 5.3.
- 5. Faça o gráfico do diâmetro do feixe laser em função do eixo de propagação z para os dois eixos transversais ao feixe.
- 6. Obtenha a divergência do feixe, ao passar pela lente, a partir da equação 5.2 e compare com os valores experimentais

mensurados pela técnica borda da lâmina e com a equação 2.1 apresentada no último experimento.

- 7. O que define o valor da cintura  $(2r_0)$ do feixe laser? Que parâmetros do experimento devem ser alterados para obter um valor de  $2r_0$  ainda menor? Qual é o limite teórico para esta cintura do feixe laser, quando ele for focalizado por uma lente?
- 8. O ajuste aos valores experimentais definirá as incertezas estatísticas da cintura, fator de qualidade, posição da lente e comprimento de Rayleigh. Obtenha a equação que define a propagação das incertezas experimentais para estes valores calculados a partir das medidas experimentais do diâmetro e deslocamento z. Calcule a incerteza propagada para cintura, fator de qualidade, posição da lente e comprimento de Rayleigh.



Figura 5.1: Montagem experimental da técnica borda-da-lâmina aplicada na determinação dos diâmetros do feixe laser ao passar por um lente.

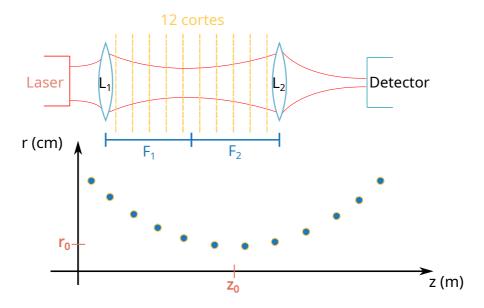


Figura 5.2: Diagrama com os cortes transversais em torno do foco da lente convergente que se quer analisar. Estes cortes deverão ser realizados com a técnica borda-da-lâmina ao longo de z cobrindo aproximadamente a região de duas vezes a distância focal da lente (0-2f)

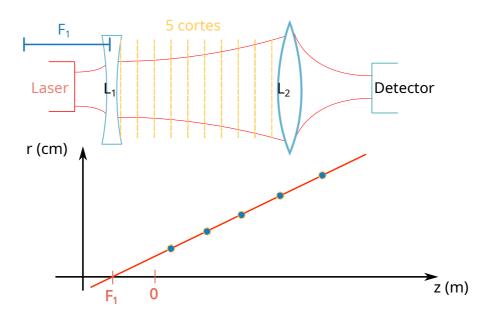


Figura 5.3: Diagrama com os cortes transversais em torno do foco da lente divergente. Estes cortes deverão ser realizados com a técnica borda-da-lâmina ao longo de z na região posterior à lente divergente.

#### Microscópios e Telescópios

#### 6.1 Introdução

O olho humano pode ser simplificado para fins didáticos, como sendo composto por uma estrutura curva e refrativa que seria a córnea, com uma lente de foco variável, que seria o cristalino e um anteparo para projeção da imagem que seria a retina no fundo do olho, conforme apresentado na figura 6.1, ou mais simplificadamente apenas por uma lente projetando a imagem sobre um anteparo (figura 6.2). Esta última configuração será o modelo para o nosso olho durante esta prática experimental, ou seja, se nós quisermos observar a imagem ampliada por uma lupa, microscópio ou telescópio posicionamos o nosso olho, alinhado com o eixo óptico; se não quisermos observar a imagem diretamente, podemos simular o olho posicionando uma lente de 10 ou 15cm para projetar a imagem sobre um anteparo.

Um microscópio simplificado pode ser observado na figura 6.3, neste microscópio temos uma lente objetiva (OB), uma lente ocular (OC), uma separação entre os focos das lentes (S). Para empre-

gar o microscópio como um instrumento de observação é possível empregar o olho humano ou uma lente e anteparo para simular a observação de um objeto. A ampliação do microscópio pode ser obtida de acordo com a fórmula apresentada na figura. Lembrando que o ponto próximo (PP) corresponde a uma distância típica para a observação da imagem empregando o olho humano. Se determinarmos a ampliação empregando o modelo de olho composto por uma lente simulando o cristalino (CR) e um anteparo simulando a retina (R), não podemos empregar esta fórmula. A equação 6.1 representa a ampliação do microscópio.

$$M = \frac{-s}{f_{OB}} \cdot \frac{PP}{f_{OC}} \tag{6.1}$$

onde PP = Ponto Próximo = 25cm.

O diagrama de lentes apresentado na figura 6.4 é um exemplo de configuração para um telescópio e ampliar objetos que se encontram posicionados distante da lente objetiva (OB). Nesta configuração, para se ter a entrada e saída de raios paralelos é necessário o alinhamento das lentes de forma que a posição das distâncias focais seja coincidente, conforme apresentado na figura 6.4. Este arranjo corresponde a um telescópio chamado de astronômico ou telescópio de Kepler. A sua ampliação depende das duas distâncias focais e tem o sinal negativo pois a imagem formada é invertida. A ampliação pode ser observada pelo olho humano mas pode também ser projeta sobre um anteparo empregando o modelo do olho (lente de f=15cm).

Na figura 6.5 observa-se um arranjo para um telescópio de Galileu, onde se emprega uma lente divergente para não produzir a inversão da imagem. Nesta configuração a imagem é direita. Há outra configuração de telescópio, apresentado na figura 6.4, que produz imagens direitas, mas requer 3 lentes convergentes.

A ampliação dos telescópios pode ser mensurada olhando um objeto através dele e comparando com a imagem formada no seu olhe sem o telescópio. Ainda, e possível determinar a ampliação se empegar um modelo de um olho humano e projetar a imagem sobre uma tela, que simularia a sua retina. Este diagrama, modelo

do olho, esta representado nas figuras descritas anteriormente.

A equação 6.2 corresponde a ampliação do telescópio

$$M = -\frac{f_{OB}}{f_{OC}} \tag{6.2}$$

Para montar um instrumento óptico como os microscópios ou telescópios sugere-se empregar um procedimento que permite manter alinhado o eixo óptico onde se propaga a luz e que possa garantir o correto posicionamento do objeto, lentes e formação das imagens. Posicione o objeto alinhado com o eixo do trilho mecânico que será utilizado para a montagem. Na sequência posicione a lente que ficará mais próxima ao seu objeto, que seria a lente objetiva (OB). Com o auxilio de um pedaço de papel branco garanta a posição da imagem formada. Ao inserir novas lentes garanta que as imagens formadas continuem alinhadas com a altura e centralidade do objeto, pois quando ocorre uma desalinhamento do eixo óptico há perda de radiação, ao passar pelo instrumento óptico e o campo de observação ficará prejudicado.

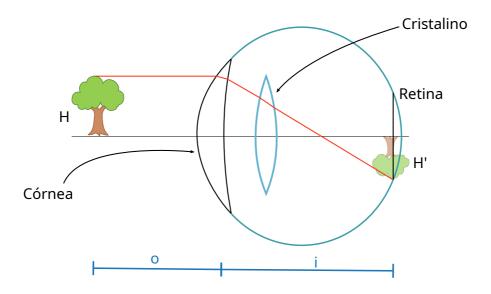


Figura 6.1: Representação dos principais componentes ópticos de um olho humano: córnea, cristalino e retina, incluindo a trajetória de um raio de luz saindo do objeto e formando a imagem na retina.

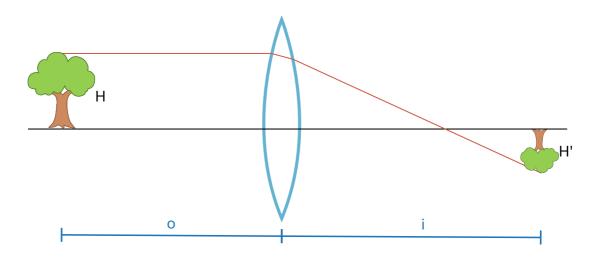


Figura 6.2: Representação simplificada para o olho humano com apenas uma lente e um anteparo, a ser utilizada nesta prática laboratorial.

### 6.2 Objetivo

O objetivo desta prática é montar e caracterizar diferentes configurações de Microscópios e Telescópios.

#### 6.3 Metodologia

- 1. Monte dois microscópios com as lentes disponíveis na bancada empregando diferentes distâncias para o tubo (S) para cada microscópio; Empregue aproximadamente S=10cm ou S=20cm.
- 2. Após a montagem, calcule a ampliação global empregando o valor de S, focos das lentes e o ponto próximo utilizado.

Para o modelo do olho empregue uma lente de 10cm ou 15cm; reserve esta lente para modelar o olho nos demais experimentos deste roteiro. Para determinar a ampliação experimentalmente empregando o modelo do olho determine inicialmente

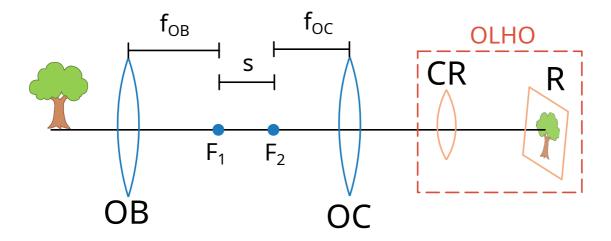


Figura 6.3: Diagrama de lentes de um microscópio e a representação de um olho para visualizar a formação da imagem. A lente objetiva (OB) e uma lente ocular (OC) estão dispostas a produzir uma distância (S) entre os seus focos que determina o comprimento do tubo deste microscópio. Este valor é variável e pode ser configurado na montagem. A ampliação global é definido conforme apresentado, incluindo o valor do ponto próximo do olho.

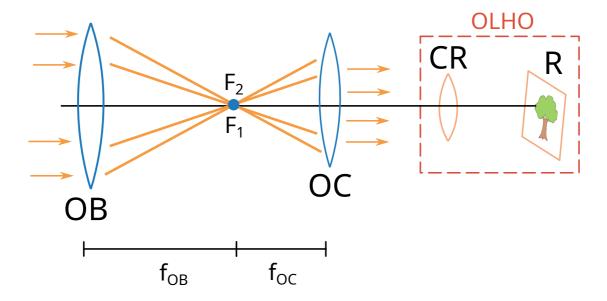


Figura 6.4: Diagrama de lentes de um telescópio e a representação de um olho para visualizar a formação da imagem. A lente objetiva (OB) tem a posição da sua distância focal coincidente com a distância focal da lente ocular (OC). Conforme apresentado, a ampliação do telescópio é obtida pela razão das distâncias focais das duas lentes. Este telescópio é denominado telescópio astronômico ou telescópio de Kepler

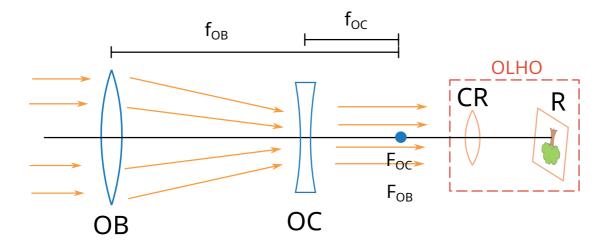


Figura 6.5: Diagrama de lentes de um telescópio de Galileu e a representação de um olho para visualizar a formação da imagem. Neste telescópio se emprega uma lente divergente o que forma uma imagem direita. É possível observar a ampliação do telescópio olhando através dele ou projetando a imagem sobre um anteparo empregando o modelo do olho.

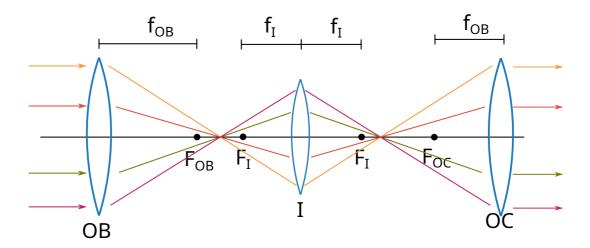


Figura 6.6: Diagrama de lentes de um telescópio terrestre que emprega 3 lentes convergentes. Neste telescópio se emprega uma lente convergente que é chamada de lente inversora (I) que possui apenas o objetivo de formar uma imagem direita. Observa-se pelos 4 raios de luz empregados para diagramar a trajetória que a imagem formada é direita.

a imagem formada num anteparo empregando o seu modelo de olho. Meça esta imagem formada, que sera muito pequena; alinhe o microscópio ou telescópio, na frente do seu modelo de olho e meça novamente a imagem formada no anteparo. Estas duas configurações representam o que você observa sem o com o telescópio. A imagem formada no anteparo representa o tamanho da imagem formada na sua retina.

- 3. Monte um telescópio empregando as lentes convergentes disponíveis na bancada e calcule a ampliação esperada para estes telescópios.
- 4. Monte um telescópio de Galileu. Calcule teoricamente a previsão da ampliação deste telescópio e determine experimentalmente se o valor esperado foi alcançado.
- 5. Compare as ampliações dos 2 telescópios: calculada, obtida qualitativamente pelo seu olho e obtida experimentalmente pelo modelo do olho.

#### Raio de curvatura da córnea

#### 7.1 Introdução

A miopia, a hipermetropia (ou hiperopia) e o astigmatismo são defeitos comuns do mecanismo de formação da imagem; ou seja, erros na capacidade que o olho tem de refratar a luz e focalizar os raios luminosos na retina. A luz que devia ser focalizada na retina num olho normal, também definido como emetropia, pode ser focalizada antes (miopia), ou depois (hipermetropia). O astigmatismo é uma condição em que a córnea não é uniforme, gerando uma imagem formada também de forna não uniforme na retina. As causas destes defeitos são variadas, podendo ser: a) Alteração da posição das estruturas ópticas: Na miopia o olho é maior que o normal ou o cristalino está muito para frente e na hipermetropia o olho é menor que o normal ou o cristalino está muito para trás; b) Alteração da curvatura da córnea: Na miopia a curvatura da córnea é acentuada (raio pequeno) e na hipermetropia curvatura da córnea é pouco acentuada (raio maior); c) Alteração do índice de refração do cristalino; d) Ausência de um elemento do sistema óptico.

O olho com astigmatismo possui meridianos da córnea com diferentes potências dióptricas e cada um deles vai focalizar a imagem num plano, anterior ou posterior à retina. Isto significa que num plano de corte horizontal, por exemplo, a córnea tem maior curvatura do que noutro plano, por exemplo, no vertical. Nesta prática experimental mediremos o raio de curvatura da córnea e vamos considerá-la como um espelho convexo. Nesse caso, pela figura 7.1 lembra-se que para este espelho e para um dado objeto qualquer, a imagem será sempre virtual e sua ampliação é dada pela equação 7.1:

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \tag{7.1}$$

onde s é a distância do objeto ao espelho, s' a distância da imagem ao espelho, y o tamanho do objeto e y' o tamanho da imagem. Mensurando y e y', podemos calcular m; e junto com s, determinar s'. Com isto é possível determinar o raio de curvatura do espelho convexo, conforme apresentado na equação 7.2:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r} \tag{7.2}$$

onde f é o foco e r o raio de curvatura do espelho.

Experimentalmente podemos utilizar um telescópio para observar duas imagens formadas na córnea por duas fontes puntuais. Estas duas fontes podem ser dois LEDs com separação igual a y (vide figura 7.2), distanciados de um valor s da superfície da córnea. Um anteparo com uma referência na forma de U é colocado o mais próximo possível da córnea, e ajustamos os LEDS até que a imagem fique escondida atrás do anteparo. Com isto podemos mensurar a altura da imagem y'. A partir de então temos os valores necessários para obter o raio de curvatura.

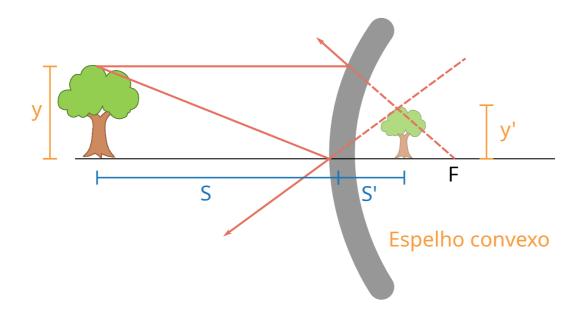


Figura 7.1: Representação da formação de uma imagem num espelho convexo.

### 7.2 Objetivo

Medir o raio de curvatura de superfícies esféricas refletoras para testar a metodologia e na sequência medir o raio de curvatura da córnea de todos os alunos da turma.

#### 7.3 Metodologia

Serão utilizados os seguintes materiais para a montagem do experimento: Lâmpadas, LEDs, esferas de metal, régua, trena, paquímetro e um suporte específico para cabeça.

- 1. Leia todo o Roteiro antes de iniciar os experimentos ;
- 2. Busque sanar qualquer dúvida referente a teoria de espelhos em livros didáticos;
- 3. Correlacione a teoria com o diagrama experimental a ser empregado nesta prática;

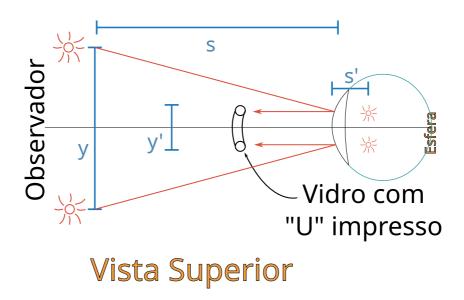


Figura 7.2: Representação experimental da metodologia a ser empregada para mensurar o raio de curvatura de uma esfera espelhada, que pode ser uma esfera de aço ou a córnea humana. A vista superior do experimento mostra o tamanho e posição do objeto e a formação da imagem com o seu tamanho e posição. O "U"será posicionado pelo observador para obstruir a imagem, o que permite determinar o tamanho dela a partir da largura da letra "U".

- 4. Meça o diâmetro da esfera de metal fornecida utilizando o paquímetro. Isto deve ser feito por cada integrante do grupo e repetido 3 vezes, mensurando diferentes meridianos da esfera;
- 5. Empregando todos os valores do grupo calcule o valor médio do raio da esfera e sua incerteza padrão;
- 6. Faça uma montagem para a determinação do raio de curvatura desta esfera de metal. Sabemos que no caso de espelhos convexos a imagem é virtual e a distância s' não pode ser encontrada diretamente. Para isso, posicionamos a lâmina de referência com um U impresso bem próxima ao centro da superfície espelhada da esfera de modo que a abertura y' possa ser considerada uma imagem formada mas bloqueada pela sombra da letra U. O objeto da análise é então definido pelo experimentador que, olhando através do telescópio, ajusta a posição dos LEDs ao espelho. De posse dos tamanhos da imagem e do objeto é possível calcular s' e determinar o raio de curvatura. Cada integrante do grupo deve fazer pelo menos três medidas da esfera empregando esta metodologia;
- 7. Comparar o valor médio do raio de curvatura obtido por cada integrante como o valor médio do raio de curvatura da esfera obtido com o paquímetro. Se este valor divergir, o grupo devera voltar ao item anterior e buscar solucionar o erro, antes de passar para o próximo item.
- 8. Determine o raio de curvatura médio da esfera e sua incerteza padrão. Incluir neste cálculo as incertezas experimentais, incertezas estatísticas e suas propagações. Considere neste cálculo as medidas realizadas pelo integrantes de seu grupo.
- 9. Discuta os seus resultados do raio de curvatura da esfera em termos da repetitividade e reprodutibilidade de sua medida;
- 10. Repetir a mesma metodologia para determinar o raio de curvatura da córnea de todos os alunos da turma (aproximadamente 15 alunos). Cada integrante do grupo deverá fazer as

- suas próprias medidas, ou seja, mensurar a córnea de 15 estudantes, e também posar a sua córnea para outros 15 alunos, para que estes possam mensurá-la.
- 11. Determine o raio de curvatura médio da sua turma, com sua respectiva incerteza padrão. Para esta média inclua apenas as medidas realizadas por você. Considere as incertezas experimentais, incertezas estatísticas e suas propagações no cálculo da incerteza do raio de curvatura médio da turma.
- 12. Antes de se ausentar envie para o seu professor todos os dados obtidos experimentalmente.

#### Difração por fendas e orifícios

#### 8.1 Introdução

O padrão de difração de uma onda plana de comprimento de onda  $\lambda$  incidindo numa fenda de largura a, está esquematicamente representado na figura 8.1. Os valores mínimos na intensidade podem ser observados em  $asen\theta=m\lambda$ , onde  $m=\pm 1,\pm 2,...$  A intensidade observada no anteparo é expressa pela equação 8.1.

$$I(\theta) = I_0 \left[ \frac{sen\alpha}{\alpha} \right]^2;$$
 (8.1)

onde  $\alpha$  é expresso pela equação 8.2

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda} sen(\theta). \tag{8.2}$$

O diagrama experimental para obter o padrão de difração e interferência a partir de duas fendas com largura a e espaçadas por uma distância d é apresentado na figura 8.2. O perfil da intensidade é expresso pela equação 8.3:

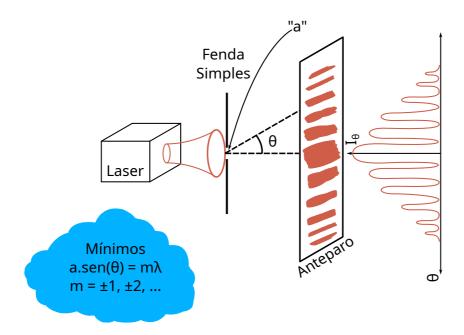


Figura 8.1: Diagrama experimental para observar o padrão de difração formado por uma fenda simples de largura a. A direita se observa o perfil de intensidade esperado em que a 8.1 pode ser ajustada para obter a largura a da fenda.

$$I(\theta) = I_0 \left[ \cos(\beta) \right]^2 \left[ \frac{sen\alpha}{\alpha} \right]^2; \tag{8.3}$$

; onde  $\beta$  é expresso pela equação 8.4

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} sen(\theta). \tag{8.4}$$

O padrão de difração de um orifício circular também pode ser obtido experimentalmente. Ele é composto por um máximo central e anéis secundários. O primeiro mínimo é observado para:

$$sen(\theta) = 1, 22\frac{\lambda}{d}; \tag{8.5}$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação e d o diâmetro do orifício. Para obter um padrão de difração circular é necessário obter um furo pequeno o suficiente para se obter os mínimos e máximos secundários, mas não muito pequeno pois reduzirá em

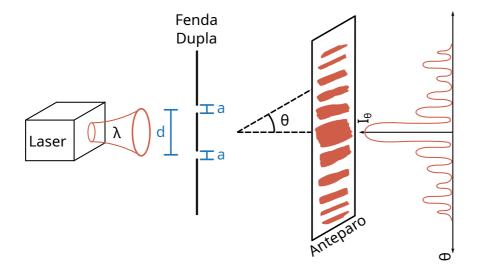


Figura 8.2: Diagrama experimental para observar o padrão de difração formado por uma fenda dupla, onde cada fenda possui largura a e estão espaçadas por uma distância d. O perfil de intensidade esperado pode ser empregado para ajustar a 8.3 e obter a largura das fendas e espaçamento entre elas.

muito a passagem de radiação pelo furo e não se observará o padrão de difração.

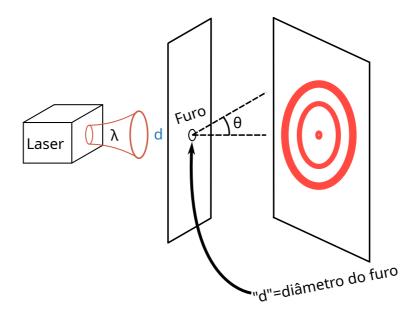


Figura 8.3: Diagrama experimental para observar o padrão de difração formado por um orifício com tamanho não muito superior ao comprimento de onda da radiação incidente.

#### 8.2 Objetivo

Estudar a natureza ondulatória da luz a partir do fenômeno de difração por um fenda simples, fenda dupla, orifício circular e fendas múltiplas. Determinar a largura das fendas envolvidas e do orifício empregando os experimentos de difração e interferência.

#### 8.3 Metodologia

Além dos componentes já empregados em práticas anteriores, os materiais adicionais a serem utilizados nesta prática será uma fenda simples, uma fenda dupla, alfinete para produzir um orifício circular numa folha de alumínio, disco de vidro com fendas múltiplas.

- 1. Utilizando a fenda simples, monte o diagrama experimental em que o laser de diodo vermelho incida na fenda e projete um padrão de difração num anteparo distanciado de aproximadamente 1m. Determine, no anteparo, a intensidade em função do deslocamento transversal ao eixo de propagação, utilizando o deslocador acoplado ao detector e a máscara com o orifício. Sempre estime deslocamentos adequados e permita identificar os máximos e mínimos de intensidade (mV) para obter bons resultados experimentais e facilitar o ajuste da função teórica. Importante: para o próximo item e importante notar que para fazer o ajuste da função, o deslocamento transversal é zero para  $\theta = 0$ ; e geralmente o deslocamento realizado experimentalmente utiliza outro valor.
- 2. Com este perfil experimental ajuste a equação teórica e determine a largura da fenda simples. Faça este item em sala de aula com o experimento ainda montado, para evitar surpresas desagradáveis na análise dos resultados.
- 3. De forma similar, monte o diagrama experimental para a fenda dupla e também determine o perfil de intensidade em função da distância transversal. As duas fendas possuem espessura a e estão distanciadas uma da outra por uma distância d. Importante: A largura desta fenda não é correlacionada com a largura da fenda utilizada no item anterior, assim a largura e a distância entre as fendas será determinado pelo próprio ajuste a ser realizado no próximo item.
- 4. Ajuste a equação teórica referente a fenda dupla e determine a largura das fendas e a distância entre elas.
- 5. Produza um orifício circular empregando um alfinete e uma folha de papel alumínio. Posicione este orifício na frente do laser e obtenha um padrão de interferência circular com pelo menos um máximo secundário. Após ter obtido um furo menor possível e simétrico, obtenha o perfil de tensão em função do deslocamento transversal ao eixo de propagação do laser. Este perfil de tensão corresponderá a uma seção transversal do perfil formado, que possui simetria radial.

- 6. Obtenha o diâmetro do orifício produzido.
- 7. Neste item empregue o disco de vidro com multifendas. Este disco é espelhado e possui 4 espaçamentos verticais visualmente transparentes. Em cada um destes espaçamentos transparentes há um certo número N de fendas micrométricas com uma determinada largura e espaçamento. Empregue o laser vermelho, verde e violeta para determinar o número de fendas, sua largura e espaçamento entre as fendas para cada um dos 4 espaçamentos do disco. Neste item você deve executar experimentos apropriados e significativos para determinar estas variáveis para cada um dos 4 espaçamentos do disco, assim, não se atenha apenas a um laser ou a poucas medidas.

Dispersão

#### 9.1 Introdução

Para caracterizar uma grade de difração ou empregá-la para dispersar a luz podemos adotar um diagrama experimental como observado na figura 9.1. É possível determinar o espaçamento entre as fendas d ou o número de fendas por cm (1/d) determinando experimentalmente a ordem em que ocorre a interferência construtiva (m), o comprimento de onda da fonte  $(\lambda)$  envolvido, o desvio transversal (y) e a separação entre a grade e o anteparo (D). Esta grade pode ser empregada para dispersar qualquer radiação e determinar, por exemplo, o irradiância de qualquer fonte em função do comprimento de onda.

$$dsen(\theta) = m\lambda \tag{9.1}$$

$$d\frac{y}{\sqrt{y^2 + D^2}} = m\lambda \tag{9.2}$$

onde  $m = 0, \pm 1, \pm 2, ...$ 

372 Dispersão

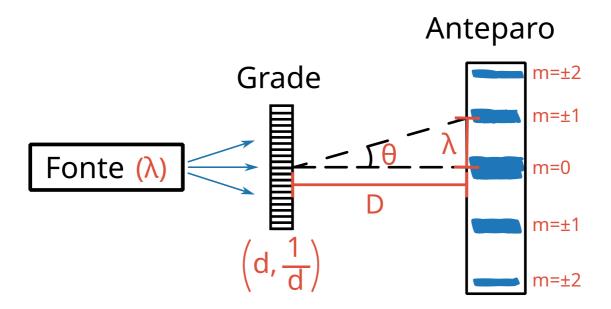


Figura 9.1: Diagrama que correlaciona as variáveis envolvidas num experimento com uma grade de difração. O espaçamento (d) é uma função dependente da ordem (m), comprimento de onda da fonte  $(\lambda)$ , desvio transversal (y) e separação da grade com o anteparo (D). Uma vez caracterizada da grade, ela pode ser empregada para determinar os espectros de fontes desconhecidas.

Outra forma para dispersar a luz é pela a refração da luz por um prisma. Para tal, considere a configuração como observado na figura 9.2. Ajustando o ângulo de incidência ( $\theta_i$ ) para que ocorra um desvio ( $\psi$ ) mínimo é possível simplificar a matemática envolvida e considerar o ângulo de incidência igual ao de saída ( $\theta_i = \theta_o$ ), o que resulta numa dependência apenas com o ângulo do vértice do prisma ( $\phi$ ) e do desvio mínimo ( $\psi_{minimo}$ ) os quais podem ser obtidos experimentalmente; não havendo a necessidade de empregar os ângulos de refração das duas faces do prisma.

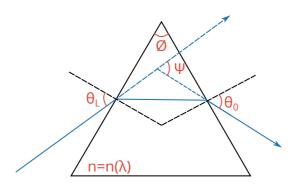


Figura 9.2: Diagrama em que ocorre o desvio  $(\psi)$  da luz pela refração nas duas faces do prisma. Nesta configuração e possível simplificar as equações envolvidas e determinar o índice de refração (n) do material apenas determinando experimentalmente o ângulo do vértice do prisma  $(\phi)$  e o desvio mínimo  $(\psi_{minimo})$  do feixe de luz.

$$n = \frac{sen(\frac{\psi+\phi}{2})}{sen(\frac{\phi}{2})} \tag{9.3}$$

374 Dispersão

#### 9.2 Objetivo

Caracterizar dois prismas e duas grades de difração distintos para empregá-los como elementos dispersivos. Nesta prática será determinado o número de fendas por centímetro das duas grades de difração e o desvio produzido pelos dois prismas.

#### 9.3 Metodologia

Serão empregados dois prismas (com diferentes ângulos nos seus vértices), duas redes de difração (tipo A e tipo B) com número de fendas por centímetro desconhecidas, um pedaços de CD e outro de DVD, goniômetro, fonte de luz branca, lasers azul, verde e vermelho e demais componentes do kit de óptica.

- 1. Com os 3 lasers e o goniômetro determine o número de fendas/cm (1/d) das duas grades disponíveis (tipo A e B), do CD e do DVD. Obtenha o valor médio de (1/d) considerando todas as possíveis variáveis apresentadas na figura 9.1, sendo elas, 3 comprimentos de onda, todas as ordens e desvios transversais para a separação entre a grade e o anteparo mais adequada para cada grade, CD e DVD.
- 2. Empregue os 3 lasers e determine os seus desvios nos dois prismas disponíveis. Empregue um ângulo de incidência que gere a configuração de um desvio mínimo, conforme apresentado na figura 9.2. Com estes valores determine o índice de refração dos prismas para os 3 comprimentos de onda empregados.
- 3. Com a fonte de luz branca, faça a montagem para verificar o efeito de dispersão por uma grade, escolha a grade que gera um espectro mais adequado para observar as cores difratadas. Determine experimentalmente o ângulo do desvio para o comprimento de onda das seguintes cores: violeta, azul, ciano, verde, amarelo, laranja e vermelho.

- 4. Ainda com uma fonte branca, escolha um prisma que também gere uma dispersão adequada para observar as cores do espectro refratado. Com este prisma disperse a luz branca e determine o desvio para as mesmas cores listadas no item anterior e calcule os seus respectivos índices de refração.
- 5. Considerando que a Dispersão pode ser expresso como  $D=\frac{\delta\theta}{\delta\lambda}$ , determina esta razão para todos os elementos dispersivos empregados nesta prática laboratorial.

376 Dispersão

Espectroscopia óptica - emissão, absorção e sensibilidade de detectores

#### 10.1 Introdução

O espectro de absorção de um composto é uma função que mostra a capacidade daquele composto em absorver a radiação eletromagnética sobre uma determinada faixa espectral. Entende-se que a Espectroscopia de absorção óptica corresponde a faixa espectral compreendida com a radiação ultravioleta, visível e infravermelho. Nesta atividade prática experimental estudaremos a espectroscopia de absorção no visível, com comprimentos de onda compreendidos entre 400 nm e 600 nm apesar do detector a ser empregado é sensível para comprimentos de onda maiores que 600nm.

A capacidade de absorver a radiação pode ser determinada quantitativamente pela absorbância da amostra em função do comprimento de onda. Se considerarmos uma fonte policromática  $I_0(\lambda)$  figura 10.1 interagindo com uma solução que possui um fotoabsorvedor, ou corante, com concentração C, emerge do lado oposto uma

radiação  $I(\lambda)$ . Caso a solução (amostra) absorve parcialmente a radiação incidente, a radiação emergente terá valores menores, os quais diferirão para diferentes comprimentos de onda. Inicialmente podemos definir a transmissão conforme a equação 10.1:

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}. (10.1)$$

Se a radiação de um comprimento de onda específico  $\lambda_0$  for absorvida, o espectro de transmissão apresentará uma depressão para este comprimento de onda, conforme observado na figura 10.1. A absorbância é definida conforme equação 10.2, e apresentará um máximo na mesma posição  $\lambda_0$ :

$$A(\lambda) = \log \frac{1}{T}.\tag{10.2}$$

A absorbância pode ser representada dependente da concentração (C) do composto absorvedor, do caminho óptico (L) que a radiação percorre dentro da amostra e também dependera do coeficiente de absorção molar  $(\epsilon_{\lambda})$  que representa a seção de choque característica do composto absorvedor. Este coeficiente apresentará diferentes valores para diferentes comprimentos de onda o que gerará um espectro de absorção molar. A equação 10.3 representa esta relação, bem como sua análise dimensional pode ser observada

na equação 10.4, evidenciando a unidade  $\left[\frac{m^2}{mol}\right]$  do coeficiente:

$$A(\lambda) = \epsilon_{\lambda} CL, \tag{10.3}$$

$$[1] = \left[\frac{m^2}{mol}\right] \left[\frac{mol}{m^3}\right] [m] \tag{10.4}$$

Combinando as equações 10.2 e 10.3 obteremos a equação 10.5 que permite mensurar o coeficiente de absorção molar a partir da radiação que incide e transmite pela amostra:

$$\epsilon(\lambda) = \frac{1}{CL} \cdot log\left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}\right).$$
 (10.5)

Esta mesma equação em termos da radiação incidente e emergente da amostra é conhecida como Lei de Beer-Lambert:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) 10^{-\epsilon_{\lambda} \cdot CL}. \tag{10.6}$$

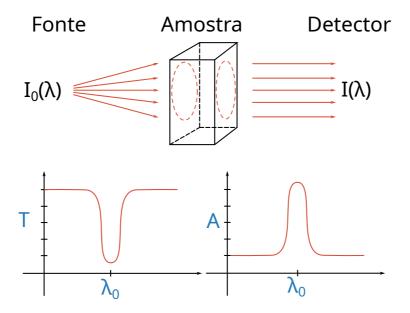


Figura 10.1: Radiação policromática sendo absorvida seletivamente num comprimento de onda específico  $\lambda_0$  de uma amostra com concentração (C); representação gráfica do espectro de transmissão e do espectro de absorção resultante deste processo de absorção.

$$sen\theta = \frac{y}{\sqrt{D^2 + y^2}} \tag{10.7}$$

$$\lambda = \frac{d \cdot y}{\sqrt{D^2 + y^2}} \tag{10.8}$$

$$dsen\theta = m\lambda \tag{10.9}$$

#### 10.2 Objetivo

1. Empregar duas fonte policromáticas e uma rede de difração para construir um espectrômetro

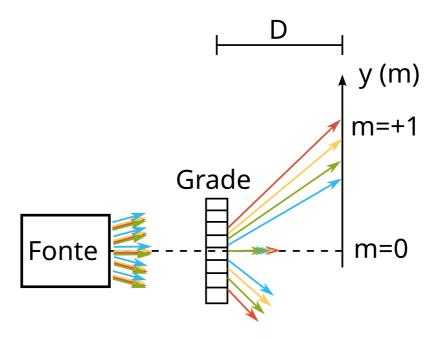


Figura 10.2: Diagrama experimental para montar um espectrômetro de absorção na região espectral do visível. O deslocamento transversal na região angular da ordem m=+1 gerará diferentes valores de  $\lambda$  para uma rede de difração com espaçamento conhecido.

- 2. Determinar o espectro de absorção de duas amostras com bandas de absorção na região espectral do visível: Azul de metileno e acridina laranja.
- 3. Caracterizar a sensibilidade espectral de detectores de luz na região espectral do visível e infravermelho próximo

#### 10.3 Metodologia-emissão e absorção

- 1. Empregue a rede de difração do tipo A, inicialmente uma lâmpada incandescente e o deslocador para determinar a variação da intensidade (mV) em função do deslocamento transversal do detector. É importante garantir que não haja luz espalhada, reflexos sobre o detector e outras interferências. Feito o alinhamento adequado do arranjo experimental pode-se inciar o experimento para determinar o espectro de absorção molar destas duas soluções.
- 2. Para determinar a intensidade que chega até a cubeta com as duas soluções a serem mensuradas, faremos inicialmente uma medida com apenas uma solução de água. Esta medida corresponderá a radiação incidente  $I_0(\lambda)$  para as soluções de acridina laranja e azul de metileno. Para tal posicione a cubeta preenchida com água na frente de sensor e desloque-o transversalmente na região do espectro difratado pela grade de difração. Meça a intensidade em função do deslocamento e calcule o comprimento de onda associado ao deslocamento. É importante que este deslocamento seja o mesmo para as demais medidas, logo recomenda-se fixar os componentes ópticos adequadamente e não desmontar ou variar a posição dos componentes ao longo desta prática.
- 3. Repetir a medida com os mesmos deslocamentos para a cubeta preenchida com a solução de acridina laranja Estes valores corresponderão ao  $I(\lambda)$  que transmitiu pela amostra de acridina laranja.

- 4. Usando a equação 10.5 determine o espectro de absorção molar  $[m^2/mol]$  da acridina laranja. Para tal use a concentração de acridina laranja fornecida no dia do experimento.
- 5. Obtenha novamente o perfil de intensidade agora com a amostra de azul de metileno.
- 6. De forma similar ao já realizado determine o espectro de absorção molar da solução de azul de metileno, para tal também use a concentração fornecido no dia do experimento.
- 7. Troque a fonte incandescente pela fonte de led branco e obtenha o mesmo perfil de intensidade em função do deslocamento transversal para a cubeta com solução de água, acridina laranja e azul de metileno. Para estas três medidas empregue os mesmos deslocamentos transversais e não altere a posição dos componentes ópticos.
- 8. Determine o espectro de absorção molar da acridina laranja e do azul de metileno empregando esta fonte branca led.
- 9. Correlacione os espectros de absorção molar obtidos empregando as duas fontes e comente as semelhanças e diferenças observadas.
- 10. Determine a posição das bandas de absorção e o valor do coeficiente de absorção molar encontrado para estes comprimentos de onda, nas duas soluções.
- 11. Busque na literatura valores para os coeficientes de absorção molar da acridina laranja e para o azul de metileno e compare com os valores encontrados experimentalmente.

#### 10.4 Metodologia-detectores

Será empregado uma grade de difração de 500 linhas/mm como elemento dispersivo, Led branco ou uma lâmpada de filamento

como as fontes de luz. Os detectores disponíveis para serem caracterizados podem ser fotodiodos ou fotoresistores. Sempre consulte o anexo com os dados técnicos de cada detector.

- 1. Monte um diagrama experimental similar ao experimento de espectroscopia de absorção. Para cada detector disponível obtenha a resposta espectral em (mV), cobrindo a faixa espectral do visível.
- 2. Divida a sua resposta espectral, de cada detector, pelo espectro de emissão do led e obtenha assim a resposividade espectral relativa dos detectores avaliados.
- 3. Identifique a faixa espectral adequada que cada detector pode ser empregado como detector de luz. Identifique também o pico máximo de sensibilidade de cada detector.

Polarização

### 11.1 Introdução

Os nossos olhos não são sensíveis a polarização, diferente dos olhos das abelha, por exemplo, que podem detectar padrões de polarização da luz espalhada no céu ou da luz refletida pelas pétalas das flores. Apesar de nós não detectarmos diferenças de polarização ao usar óculos polarizados, estes atenuam a radiação e diminuem a incidência no olho. Óculos solares com polarizador removem preferencialmente os reflexos, pois esta radiação refletida possui majoritariamente uma componente do campo elétrico oscilando horizontalmente. Para testar se determinados óculos de sol possuem filtros polarizadores, basta direcioná-los para uma superfície com reflexo, como um lago, e rotacionar  $90^o$ : a intensidade do reflexo deve apresentar variações. O eixo de polarização dos óculos esta posicionado verticalmente nos óculos, de maneira que ele possa bloquear reflexos, que possuem uma maior componenete horizontal. Oculos de cinema 3D também empregam a propriedade de polarização para separar as componentes da tela para o olho 386 Polarização

direito e esquerdo. Nestes, as lentes não são iguais, pois cabe justamente a necessidade da informação vindo da tela para um olho e para outro. Cabe aos cinéfilos alunos de física identificar o eixo de polarização destas lentes, e quiça estas lentes sejam polarizadas linearmente, pois podem ser polarizadas circular ou elipsoidalmente. Uma referência adequada que estudou a polarização de óculos de cinema 3D podem ser encontrada em [2].

O tipo mais simples de polarização a estudar é a denominada polarização linear. Nesta situação as ondas eletromagnéticas associadas a radiação oscilam ao longo de um eixo definido. As ondas podem também ser polarizadas por filtros de forma circular ou elipticamente, diferenciadas em circularmente polarizada à direita e à esquerda. Mas estes fenômenos serão estudos em outro experimento. O campo elétrico da radiação polarizada linearmente tem o seu módulo variável sem alterar a sua direção, i. e., a oscilação senoidal ocorre apenas para o seu módulo. Por outro lado a polarização circular e elíptica são compostas por um vetor campo elétrico que tem o seu módulo variável, mas também possuem a sua direção variável. Uma maneira simples de produzir luz polarizada é a utilização de um polarizador de máquina fotográfica; esses dispositivos ópticos transmitem seletivamente: a luz que tem seu plano de polarização paralelo ao eixo de transmissão do polarizador é transmitida, e a luz que tem o seu plano de polarização perpendicular a este eixo e absorvida.

Se uma fonte não polarizada passar por um filtro polarizador P1, conforme apresentado na figura 11.1 e incidir sobre outro filtro polarizador P2, também chamado analisador, observa-se um feixe emergente com intensidade  $I(\theta)$  conforme a equação 11.1, onde  $\theta$  é o ângulo entre os dois planos de polarização P1 e P2;  $\phi$  a fase,  $I_0$  a intensidade máxima transmitida e  $I_A$  a intensidade ambiente que é detectada de forma constante independente do ângulo. Esta equação e conhecida como equação de Malus:

$$I(\theta) = I_A + I_0 \cos^2(\theta + \phi); \tag{11.1}$$

onde as variáveis  $I_A$ ,  $I_0$  e  $\phi$  são constantes que dependem das características experimentais.

Empregando apenas o polarizador P1 podemos avaliar se a intensidade do feixe polarizado apresenta a metade a intensidade da fonte não polarizada; evidenciando a atenuação de 50% da radiação incidente. Mensurando esta relação sobre a rotação de  $2\pi$  se avalia alguma anisotropia no padrão da fonte não polarizada.

### 11.2 Objetivo

Estudar a polarização de fontes luminosas como lâmpadas incandescentes, fluorescentes, Leds e lasers. Validar a lei de Malus para estas fontes com a radiação já polarizadas ou a ser polarizada por um filme fotográficos polarizadores.

### 11.3 Metodologia

Neste experimento serão empregados uma fonte de luz branca incandescente, led, a lâmpada fluorescente de iluminação do laboratório e um laser de diodo com comprimento de onda de 630nm; três polarizadores lineares, goniômetros  $0-360^{O}$ , detector, componentes ópticos para montagem dos sistemas experimentais, incluindo lentes convergentes para aumentar a captação de luz pelo detector. Importante: Não há a necessidade de usar a mascara com o furo neste experimento.

1. Monte um sistema experimental similar ao proposto na figura 11.1, não existe a necessidade de ser igual pois irá se pedir a troca de vários componentes durante a prática experimental, mas você precisa alinhar os componentes sobre um trilho óptico e para que não ocorra desalinhamentos laterais, a fonte deve atravessar todos os filtros polarizadores na região central e esta seja focalizada sobre o detector. ATENÇÃO: antes de prosseguir faça testes de sensibilidade no detector, alinhamento e estabilidade de sua montagem óptica. Somente após ter se certificado destes pontos inicie a aquisição dos dados experimentais.

388 Polarização

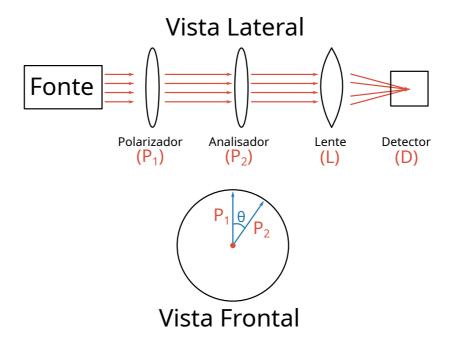


Figura 11.1: Diagrama experimental para os experimentos de polarização. A fonte passará inicialmente pelos polarizador  $P1, P2 \ ou \ P3$ , depois por uma lente para focalizar todo a radiação sobre a área útil do detector.

- 2. Determine o ângulo de polarização do laser. Para tal você deverá determinar a tensão registrada no detector em função da variação angular do polarizador, que neste caso tem a função de analisador. Note que neste item você precisa apenas de um polarizador para analisar o padrão de polarização do laser. Determine estes valores a cada  $\mathbf{10}^o$  sobre o range de  $\mathbf{0}-\mathbf{360}^o$ . Quando estiverem rotacionando o goniômetro em regiões angulares próximas ao máximo e mínimo de transmissão, melhore a resolução das medidas diminuindo o passo do analisador para  $\mathbf{5}^o$ , pois isto facilitará a determinação do ângulo de polarização do laser. Sugestão: Para padronizar o sistema de referência de todos os seus experimentos, considere  $\boldsymbol{\theta} = \mathbf{0}$  quando o eixo do polarizador estiver alinhado para a direita (visto de frente), similar ao sistema cartesiano.
- 3. Faça um gráfico para avaliar a intensidade da radiação do laser que chegou ao detector em função do ângulo de rotação do analisador.

- 4. Caso o seu laser seja totalmente polarizado, verifique a validade da equação de Malus para a fonte laser ajustando a equação 11.1 aos valores experimentais e determine o ângulo de polarização do laser pertencente ao seu kit. Esta polarização é própria ao seu laser, se trocá-lo ou virá-lo dentro do suporte a direção de polarização será perdida.
- 5. Repita o segundo item para a fonte de luz branca (incandescente e LED). Verifique se estas duas fontes são polarizadas. Caso a alguma destas fontes não apresente sinais de polarização, já verifique a definição de que fontes não polarizadas tem a sua intensidade diminuída a metade ao passar pelo polarizador.
- 6. Faça um gráfico para mostrar a dependência da intensidade da luz branca em função do ângulo para as duas fontes (incandescente e LED).
- 7. Polarize verticalmente a fonte incandescente utilizando um polarizador. Com o segundo polarizador verifique a validade da lei de Malus; empregue passos de 10° para a rotação do goniômetro e 5° para os valores em torno dos picos e vales. Mostre estes resultados graficamente.
- 8. Posicione a fonte branca, alinhe um polarizador horizontalmente  $\mathbf{0}^o$ ; agora você tem uma fonte polarizada. Coloque um segundo polarizador posicionado a  $\mathbf{90}^o$ . Introduza um terceiro polarizador entre os dois polarizadores e este alinhado a  $\mathbf{30}^o$ . Determine experimentalmente a intensidade do feixe que sai de cada componente óptico: inicialmente da fonte  $I_0$ , após colocar P1, após colocar P2 e após inserir o o terceiro polarizador P3. Com estas medidas experimentais compare com os valores teóricos esperados para a intensidade transmitida. Determine o erro experimental associado a intensidade final transmitida.
- 9. Com apenas um polarizador avalie qualitativamente o perfil da polarização da fonte fluorescente refletida pelo piso do

390 Polarização

corredor. Diagrame vetorialmente a direção do campo elétrico da radiação emitida pela fonte fluorescente antes e após a reflexão no piso.

# Atividade óptica e birrefringência

#### 12.1 Introdução

Quando a luz se propaga em um meio opticamente isotrópico, as propriedades ópticas são as mesmas em todas as direções, i. e., existe um único índice de refração. Entretanto, quando uma frente de onda se propaga num meio anisotrópico, independente do estado inicial de polarização, a direção de oscilação do campo elétrico pode ser decomposta em duas componentes, raio extraordinário e raio ordinário, os quais apresentam índices de refração distintos:  $n_e$  e  $n_o$  respectivamente; e o meio é chamado de birrefringente, pois possui dois índices de refração. Na figura 12.1 observa-se o diagrama para visualizar e mensurar a separação e polarização dos raios ordinário e extraordinário da calcita. Quando o raio incidente é paralelo ao eixo óptico da calcita não se observa a separação d e os dois raios se sobrepõem.

Os materiais com propriedades capazes de girar o plano de vibração do campo elétrico de uma luz incidente linearmente polarizada são chamados de opticamente ativos. Se o plano de vibração

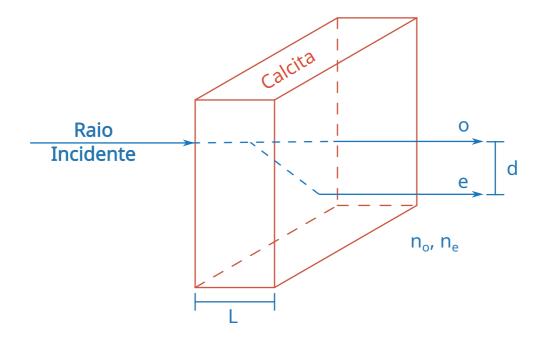


Figura 12.1: Diagrama experimental para visualizar os raios ordinário e extraordinário na calcita. Identifica-se também um caminho óptico L e uma separação dos dois raios.

for girado no sentido horário a substância é dita dextro-rotatória, e no sentido anti-horário levo-rotatória. Se a substância é um cristal, como o quartzo, este comportamento pode ser tanto dos átomos em si como de seu arranjo dentro do cristal. Em substâncias líquidas, como numa solução de açúcar, esse comportamento é atribuído às próprias moléculas. Na literatura, existe uma descrição fenomeno-lógica bastante simples do efeito de atividade óptica proposta por Fresnel, onde uma onda linearmente polarizada incidente pode ser representada por uma superposição de duas ondas circulares, sendo uma com polarização circular para a direita e outra com polarização circular para a esquerda. Fresnel sugeriu que estas duas formas de luz circular se propagam com velocidades diferentes dentro do material opticamente ativo, ou seja, consideram-se dois índices de refração distintos:  $n_D$  (quando a polarização é circular para a direita) e  $n_E$  (quando a polarização é circular para a esquerda).

O ângulo  $\beta$  de rotação do campo elétrico, que ocorre ao passar pelo material, é definido como positivo quando ocorre no sentido horário e negativo quando ocorre no sentido anti-horário. Este

ângulo  $\beta$  também depende do caminho óptico L que a luz atravessa o material, como apresentado na equação 12.1:

$$\beta = \frac{\pi L}{\lambda_0} \left( n_E - n_D \right). \tag{12.1}$$

Esta atividade óptica em líquidos pode também ser correlacionada à concentração do soluto, que é responsável pela rotação do campo elétrico:

$$\beta = \alpha CL; \tag{12.2}$$

onde  $\alpha = \alpha \left( T, \lambda \right)$  é dependente da temperatura e do comprimento de onda incidente, da concentração C, e do caminho óptico L. A concentração pode ser expressa como razão entre a massa do soluto a ser analisado e o volume da solução . O valor de  $\alpha$  representa a constante característica própria para cada soluto que não irá depender da concentração ou do caminho óptico empregado. A presente proposta experimental foi adaptada da referência [1] e o diagrama experimental a ser empregado nesta prática experimental pode ser observado na figura

# 12.2 Objetivo

Estudar o efeito de fontes luminosas polarizadas ao se propagar através de uma solução com açúcar. Obter a constante característica da atividade óptica desta solução de açúcar para diferentes comprimentos de onda; e por fim determinar a concentração de soluções de açucares desconhecidas.

# 12.3 Metodologia

Laser vermelho, verde e azul, dois polarizadores lineares, goniômetros, fotodiodo e soluções de açúcar com diferentes concentrações e caminhos ópticos.

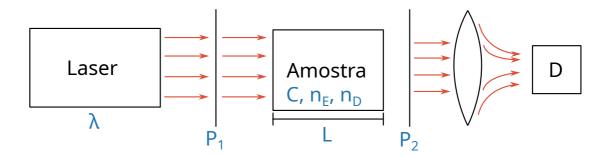


Figura 12.2: Diagrama experimental para o experimento de atividade óptica. É importante alinhar o feixe no meio da amostra e empregar a lente convergente adequadamente.

- 1. Para obter o ângulo de rotação alinhe inicialmente os dois polarizadores de forma cruzada, gerando um valor mínimo na medida do fotodiodo. Introduza o recipiente cilíndrico com a solução de açúcar entre os dois polarizadores. Com esta inserção houve uma rotação do plano de polarização do laser e o fotodiodo registrou mais luz transmitida. Determine a intensidade em função do ângulo de rotação do segundo polarizador até encontrar o novo mínimo. Para melhor identificar este novo mínimo registre 20 valores de intensidade em função do ângulo em torno do mínimo, com passos de  $5^o$ . Este mínimo é o ângulo de rotação  $\beta$  para esta solução.
- 2. Determine o ângulo de rotação  $\beta$  do campo elétrico empregando as diferentes concentrações da solução de açúcar e diferentes caminhos ópticos. Repita este procedimento para os três comprimentos de onda dos lasers disponíveis.
- 3. Apresente graficamente o comportamento do ângulo de rotação em função das duas variáveis avaliadas: caminho óptico

- e concentração da solução de açúcar.
- 4. Obtenha graficamente a constante característica da solução de açúcar empregando os dois conjuntos de dados (caminho óptico e concentração) e diferentes comprimentos de onda.
- 5. Observou-se alguma dependência da constante característica da solução de açúcar com o comprimento de onda ou alguma diferença estatisticamente significante para os diferentes comprimentos de onda e métodos empregados? Comente os resultados observados com o esperado pela literatura.
- 6. Apresente graficamente a dependência do termo  $(n_E n_D)$  da equação 12.1 com o comprimento de onda.
- 7. Há no laboratório três cubetas onde em cada um há uma solução de açúcar com concentração desconhecida. Empregando a mesma metodologia deste experimento determine estas três concentrações.
- 8. Alinhe o cristal de calcita com o laser e detector para permitir a detecção da feixe ordinário e extraordinário.
- 9. Lembrando que o raio ordinário obedece a lei de Snell, identifique este raio e meça a direção de polarização ao passar pela calcita. Compare com a direção de polarização do feixe inicial, antes de passar pela calcita.
- 10. Determine a direção de polarização do raio extraordinário e também compare com a direção do feixe laser inicial.
- 11. Diagrame os raios incidente, ordinário e extraordinário, e seus eixos de polarização ao interagir com o seu cristal de calcita. Compare com a literatura e veja se a calcita possui birrefringência positiva ou negativa.
- 12. Há alguma relação entre o caminho óptico que o raio percorre a calcita e a separação lateral do raio ordinário e extraordinário?

## Espalhamento elástico da luz

#### 13.1 Introdução

Quando a radiação eletromagnética interage com uma amostra polarizando alguma estrutura eletrônica e não é absorvida, a radiação é reemitida, que se melhor denomina como radiação espalhada. Se avaliarmos a energia deste processo, há duas formas que a radiação pode apresentar: espalhamento elástico e espalhamento inelástico. Este último se chama espalhamento Raman e não faz parte desta prática. No caso do primeiro tipo as energias do fóton incidente e do fóton espalhado são iguais, ou seja, acontece uma "absorção"da radiação incidente e reemissão de um fóton com a mesma energia. A direção desta reemissão, ou espalhamento, não é necessariamente na mesma direção de propagação do fóton incidente. A diferença entre o ângulo da incidência e o ângulo de espalhamento apresenta padrões característicos para diferentes comprimentos de onda e tamanhos de partículas espalhadoras.

Para que esse espalhamento ocorra deve haver uma diferença entre os índices de refração da partícula espalhadora e o ambiente onde ela se encontra. A Intensidade da luz espalhada  $I_e$  depende de diversas variáveis que estarão envolvidas no processo de espalhamento e as expressões que correlacionam estas podem se tornar muito complexas para serem apresentadas aqui. Mas há algumas aproximações e podemos assim correlacionar as principais variáveis ópticas com o espalhamento da radiação visível (400-700nm) como: o diâmetro da partícula espalhadora d, o comprimento de onda  $\lambda$ , os índices de refração do meio  $n_1$  e da partícula  $n_2$ , o ângulo de espalhamento  $\theta$  e a concentração de partículas espalhadora C. Mensurando estas variáveis é possível correlacioná-las com a intensidade da luz espalhada.

Nesta prática experimental teremos amostras com diferentes concentração de partículas espalhadoras, diferentes tamanho de partículas e três comprimentos de onda para a radiação incidente  $I_i$ . As demais variáveis que também influenciam no espalhamento mas não poderão ser avaliadas estarão incorporadas na constante  $I_O$  que será uma constante de proporcionalidade. Mensurando o ângulo de espalhamento  $\theta$  conforme o diagrama experimental da figura 13.1, ajustaremos a equação 13.1 ao padrão de espalhamento da amostra.

$$I_e = I_0 \left[ n_1^4 \left( \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_2^2 + n_1^2} \right) \right] \frac{Cd^6}{R\lambda^4} \left( 1 + \cos^2 \theta \right)$$
 (13.1)

Geralmente o tamanho da partícula espalhadora é parametrizado conforme apresenta na equação 13.2:

$$x = \frac{\pi d}{\lambda};\tag{13.2}$$

onde d é o diâmetro da partícula e  $\lambda$  o comprimento de onda incidente. Esta parametrização avalia a razão entre o tamanho da partícula e o comprimento de onda da radiação incidente de forma que diferentes valores de d e  $\lambda$  geram perfis de espalhamento similares. Quando o tamanho da partícula é muito menor (10x) que o comprimento de onda da radiação incidente o espalhamento é denominado espalhamento Rayleigh. Com aumento do diâmetro das partículas a distribuição espacial da intensidade do espalhamento

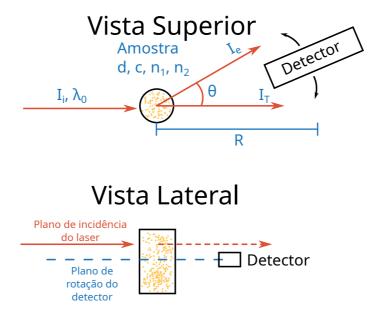
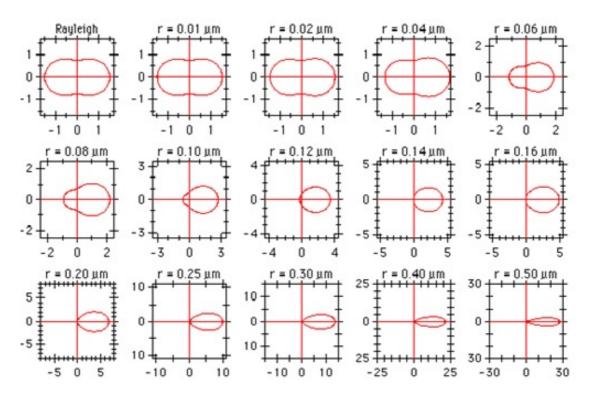


Figura 13.1: Vista superior do diagrama experimental para determinar o perfil de espalhamento de amostras em solução. É importante alinhar o feixe da fonte laser com a amostra em solução num recipiente com geometria cilíndrica e o detector rotacionando simetricamente em torno da amostra. Na visão lateral observa-se que o detector esta sem o suporte e passa num plano ligeiramente abaixo do plano de incidência do laser.



é alterada para perfis conforme apresentado na figura 13.2.

Figura 13.2: Perfil em coordenadas polares da radiação espalhada quando o tamanho das partículas varia de valores moleculares (espalhamento Rayleigh) até valores em que se equiparam com o comprimento de onda da radiação visível.

# 13.2 Objetivo

Determinar o perfil de espalhamento de amostras em solução que possuem diferentes diâmetros de partículas espalhadoras para diferentes comprimentos de onda de radiação incidente.

## 13.3 Metodologia

Serão empregados os 3 lasers (vermelho, verde e azul) para irradiar as amostras. As amostras são soluções de alumina particulada em suspensão na água com diferentes diâmetros. Adicionalmente

há amostras de leite diluída em água, oriundas de leite integral e de leite desnatado.

- 1. Inicialmente alinhe o sistema considerando variar o recipiente da amostra sem alterar a disposição dos demais componentes ópticos. Nota-se que a geometria cilíndrica do recipiente e importante para evitar refrações nas suas faces. O detector a ser empregado deve ser removido do suporte empregando apenas e elemento sensível a luz (fotodiodo). Deverá ser evitado qualquer desalinhamento durante todo o experimento pois qualquer desvio do laser no recipiente da amostra provocará um desvio significativo no feixe transmitido e espalhado; e alterará a intensidade da radiação espalhada. Outro problema que pode se encontrado é a constante sedimentação da alumina na solução; para tal a amostra deverá ser agitada antes da medida e realiza-la o mais rápido possível.
- 2. Determine a luz espalhada do conjunto de amostas de alumina com diferentes diâmetros, meça a intensidade de luz espalhada em função do ângulo de espalhamento sobre todo o range angular  $(0 360^{\circ})$ . Considere passos de  $10^{\circ}$ .
- 3. Apresente os resultados em coordenadas polares e ajuste a equação 13.1 aos valores experimentais. Correlacione com os perfis esperados e apresentados na figura 13.2.
- 4. Para um ângulo de espalhamento fixo, por exemplo  $45^o$ , determine a dependência da luz espalhada em função do diâmetro das partículas, para tal monte um gráfico logarítmico de  $I_e$  versus d e verifique se o expoente da equação 13.1 é realmente 6.
- 5. Obtenha o perfil de espalhamento das amostas de leite de forma similar ao experimento com alumina.
- 6. Apresente os resultados em coordenadas polares e ajuste a equação 13.1 aos valores experimentais.
- 7. Com os resultados obtidos para as amostas de leite integral e

desnatado determine o valor médio para o diâmetro das partículas espalhadoras e correlacione com o que seria esperado.

#### Interferômetro

Na figura 14.1 observa-se o diagrama experimental de um interferômetro de Michelson. Este interferômetro é composto por um semi-espelho (SE) e dois espelhos (E). A fonte é alinhada com o semi-espelho para dividir o feixe e os dois espelhos refletirão estas duas componentes, as quais formarão uma imagem no anteparo. Quando ha uma fonte coerente, como um laser, e um caminho óptico não muito diferente entre os dois "braços"do interferômetro, ocorrera uma interferência das duas componentes do feixe laser. Esta interferência poderá ser construtiva ou destrutiva o que produzirá uma padrão.

Na figura 14.2 observa-se o diagrama experimental de um interferômetro de Mach-Zehnder. Neste interferômetro os dois caminhos ópticos ("braços") são formados por dois semi-espelhos e dois espelhos. Nesta configuração se pode produzir padrões de interferência similares ao interferômetro de Michelson, mas com uma dificuldade técnica adicional para montar um sistema livre de vibrações e um caminho óptico alinhado para formar o padrão de interferência. Uma fator importante na montagem destes interferômetros

é a distância entre os espelhos. Preferencialmente esta distância precisa ser menor possível, pois o caminho óptica total não pode ser superior ao comprimento de coerência óptica dos lasers, que provavelmente não deve ser superior a 10cm.

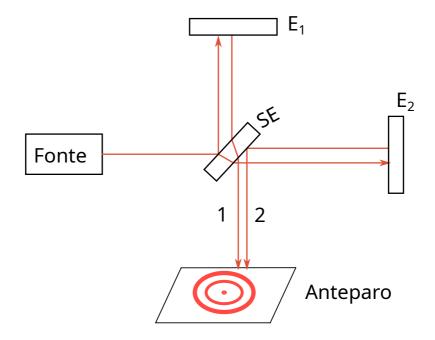


Figura 14.1: Diagrama experimental do Interferômetro de Michelson.

# 14.1 Objetivo

Montar o interferômetro de Michelson e o Interferômetro de Mach-Zehnder e observar os seus padrões de interferência.

### 14.2 Metodologia

Estes interferômetros são baseados na divisão do feixe laser em dois feixes que tomarão caminhos ópticos diferentes e, serão reconstruídos sobre um anteparo comum para produzir padrões de interferência. Vale lembrar que tais arranjos são muito sensíveis a vibrações, deslocamentos de ar ambiente; logo para existir a possibilidade de você observar os padrões de interferência comumente

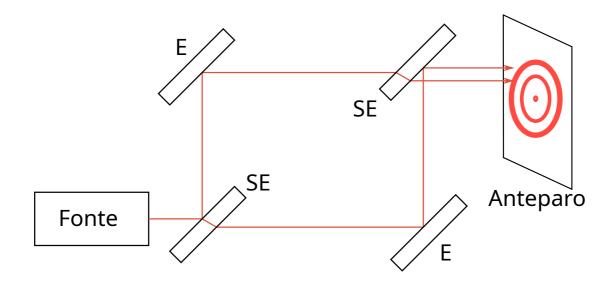


Figura 14.2: Diagrama experimental do Interferômetro de Mach-Zehnder.

apresentados nos livros, deve-se usar uma fonte laser, montar um sistema óptica sem folgas, trilhos ópticos bem alinhados, feixes incidindo de forma simétrica para ambos os braços dos interferômetros e eliminar toda e qualquer perturbação externa. Sugere-se também usar espelhos convexos para expandir o feixe laser e projetar mais distantemente possível para melhor observar e alinhar o padrão.

- 1. Monte um interferômetro de Michelson. Após a montagem busque ajustes finos para produzir o padrão de interferência. Para testar que a interferência é proveniente dos dois "braços" do interferômetro, intercepte um "braço" e avalie se o padrão desapareceu; se ele continua, logo não é um padrão de interferência entre os braço 1 e o braço 2 do interferômetro. É necessário que o padrão formado seja concêntrico, caso contrário você até possui um padrão de interferência mas deficiente. Registre o padrão de interferência.
- 2. Monte um interferômetro de Mach-Zehnder. Neste segundo sistema vocês utilizarão os mesmos componentes ópticos do interferômetro anterior acrescido de um semi-espelho. Após a montagem, busque alinhamentos finos para produzir o padrão

de interferência circular concêntrico. Registre este padrão observado e teste a sua estabilidade.

# capítulo 15

Difração de fresnel

# 15.1 Introdução

# 15.2 Objetivo

Observar a difração de Fresnel numa fenda circular.

# 15.3 Metodologia

1. Montar e alinhar o esquema óptico, mostrada na figura 15.1. Nesse diagrama a fonte laser emite uma onda da luz praticamente plana, uma lente divergente transforma essa onda em uma onda esférica emitida pela fonte virtual posicionada no foco da lente. Passando pela uma fenda circular os raios dessa onda criam no eixo do sistema os pontos claros de interferência construtiva nas distâncias b1, b3, b5, etc. e pontos escuros de interferência destrutiva nas distâncias b2, b4, b6, etc.

- 2. Observar e registrar os padrões de interferência formados no anteparo, deslocando uma lente convergente ao longo do eixo do sistema.
- 3. Determine as distâncias b1, b3, b5, etc que corresponderão a posição dos pontos de interferência construtiva.

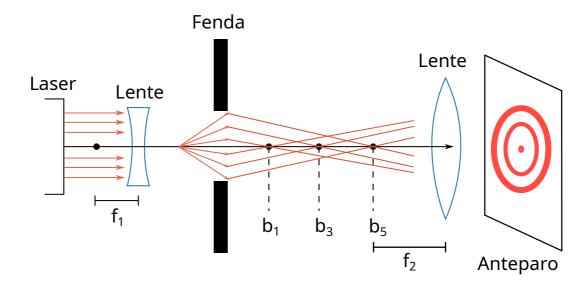


Figura 15.1: Diagrama experimental para observar a difração de Fresnel.

# Referências Bibliográficas

- [1] Carlin, N. et al. Birregringência em placas de onda e atividade óptica de uma solução de açúcar. Revista Brasileira de Ensino de Física 27(3):349-355 (2005).
- [2] Ribeiro, J.L.P. e Verdeaux, M.F.S. Reflexão e Polarização em óculos 3D. Física na Escola, 13(1):14-16 2012.