

## Experimento 2

# MEDIDA DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO VIDRO DE UM PRISMA

### 2.1 OBJETIVOS

Determinação do índice de refração do vidro de um prisma, em função do comprimento de onda, pela medida do ângulo de desvio mínimo.

### 2.2 PARTE TEÓRICA

#### 2.2.1 Índice de refração e lei de Snell-Descartes

O índice de refração  $n$  de um meio material é definido como a relação entre a velocidade de propagação da luz  $c$  no vácuo e a velocidade de propagação  $v$  neste meio,  $n = c/v$ . A velocidade de propagação da luz em um meio material depende, em geral, da frequência  $f$  ou do comprimento de onda  $\lambda$  da luz e esse fenômeno é conhecido como *dispersão*. A consequência direta é que  $n = n(f)$  ou  $n = n(\lambda)$ . No vidro comum e no vidro de qualidade ótica a variação do índice de refração é muito pequena em toda a faixa do espectro visível, na segunda ou terceira casa decimal, mas produz efeitos interessantes como a decomposição da luz branca em suas cores ao atravessar um prisma de vidro ou pequenas gotas de água produzindo o arco-íris.

Quando um raio de luz com comprimento de onda  $\lambda_1$  incide obliquamente na interface de um dioptra (dois meios ópticos) plano, por exemplo, ar-vidro, observamos um raio refletido e um raio refratado (Fig. 2.1).

Sendo  $\theta_1$  o ângulo de incidência,  $\theta_1'$  o ângulo de reflexão e  $\theta_2$  o ângulo de refração, todos medidos com relação à normal à interface, são verificadas as seguintes leis experimentais:

- as direções dos raios incidente, refletido e refratado estão todas em um plano perpendicular à interface do meio 1 com o meio 2,

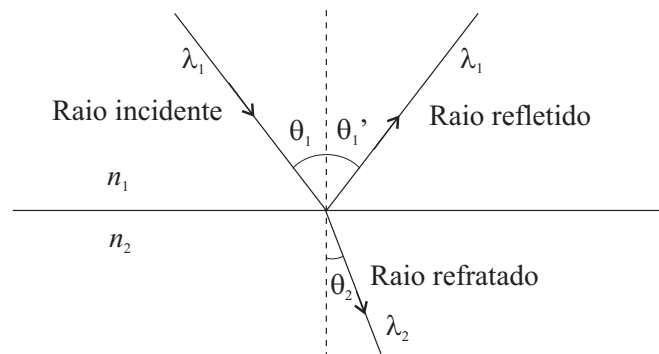


Figura 2.1: Reflexão e refração na interface entre dois meios.

- o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão

$$\theta_1 = \theta_1'$$

- a razão entre o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refração é igual ao inverso da razão entre os respectivos índices de refração

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (\text{índice de refração relativo}). \quad (2.1)$$

ou

$$n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2 \quad (2.2)$$

conhecida como a lei de Snell-Descartes.

Diversas técnicas têm sido utilizadas para a determinação do índice de refração e sua variação com o comprimento de onda, todas elas baseadas na mudança da direção da trajetória da luz ao passar de um meio para o outro. A técnica que utilizaremos para a determinação do índice de refração é muito precisa e está baseada na medida do ângulo de desvio mínimo em um prisma de vidro que descreveremos a seguir.

### 2.2.2 Ângulo de desvio mínimo

Consideremos um raio de luz monocromático incidindo obliquamente com um ângulo de incidência  $\theta_1$  em uma das faces de um prisma de vidro com índice de refração  $n_2$ , ângulo interno  $\hat{A}$  e imerso no ar ( $n_1 = 1$ ) como mostra a figura (Fig. 2.2).

Ao penetrar no prisma, o raio de luz sofre uma primeira refração, com ângulo de refração  $\theta_2$  e atinge a face adjacente com um ângulo de incidência  $\theta_3$  (Fig. 2.3).

O ângulo  $\theta_3$  está relacionado com o ângulo  $\theta_2$  conforme pode ser visto nessa mesma figura.

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{2} - \theta_2 + \hat{A} + \frac{\pi}{2} - \theta_3 &= \pi \\ \therefore \theta_2 + \theta_3 &= \hat{A}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

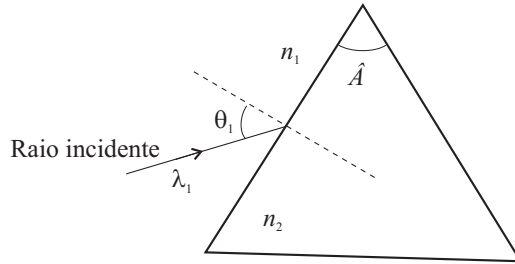


Figura 2.2: Raio de luz incidindo na face de um prisma de vidro com ângulo interno  $\hat{A}$ .

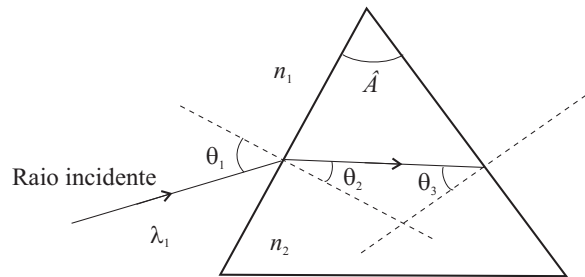


Figura 2.3: Refração do raio de luz que incide na face do prisma de vidro com ângulo interno  $\hat{A}$ .

Observe que o crescimento de  $\theta_2$  provoca uma diminuição em  $\theta_3$  e vice-versa.

Ao atingir a segunda face o raio de luz sofre uma segunda refração e emerge do prisma para o ar com um ângulo de refração  $\theta_4$ . (Fig. 2.4).

O ângulo de refração  $\theta_4$  (ângulo de emergência) depende do ângulo de incidência  $\theta_3$  que está relacionado ao ângulo de refração  $\theta_2$  que por sua vez depende do ângulo de incidência  $\theta_1$ . Em outras palavras,  $\theta_4$  é uma função de  $\theta_1$ .

Com relação ao raio incidente, o raio emergente foi desviado de um ângulo  $\hat{D}$  conhecido como ângulo de desvio, também mostrado na mesma figura. Esse ângulo pode ser escrito em função de  $\theta_1$  e  $\theta_4$ . Vejamos o detalhe mostrado na figura (Fig. 2.5) retirado da figura anterior.

Observe no triângulo  $\hat{abc}$  que

$$\hat{D} = \theta_1 - \theta_2 + \theta_4 - \theta_3.$$

Substituindo a equação (2.3) obtemos

$$\hat{D} = \theta_1 + \theta_4 - \hat{A}. \quad (2.4)$$

A análise da dependência do ângulo de desvio com o ângulo de incidência é um pouco complexa devido à dependência do ângulo  $\theta_4$  com o ângulo  $\theta_1$ . É mais conveniente expressar o ângulo de desvio em função do ângulo de refração  $\theta_2$  usando a lei de Snell nas duas faces e a equação (2.3). Considerando que o prisma está imerso no ar ( $n_1 = 1$ ), temos

$$1\text{sen}\theta_1 = n_2\text{sen}\theta_2 \quad \text{e} \quad n_2\text{sen}\theta_3 = 1\text{sen}\theta_4$$

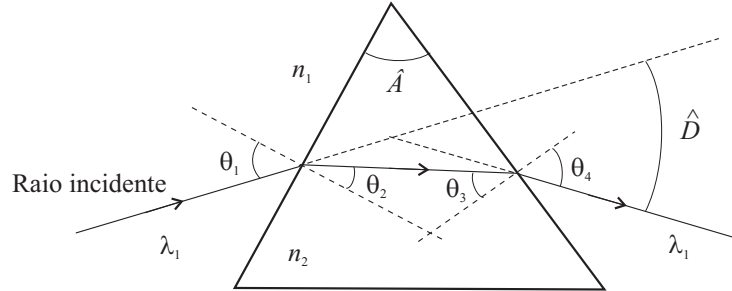


Figura 2.4: Refração do raio de luz ao sair do prisma de vidro para o ar ( $n_1 = 1$  com ângulo de refração  $\theta_4$ ).

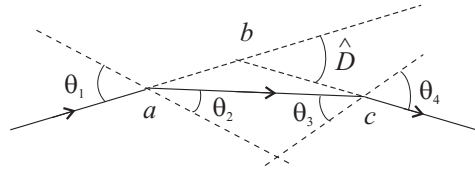


Figura 2.5: Detalhe dos desvios da luz.

$$\therefore \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2 \quad \text{e} \quad \text{sen}\theta_4 = n_2 \text{sen}(\hat{A} - \theta_2).$$

Substituindo na expressão do ângulo de desvio (2.4) fica

$$\hat{D} = \text{arc sen}(n_2 \text{sen}\theta_2) + \text{arc sen}[n_2 \text{sen}(\hat{A} - \theta_2)] - \hat{A}. \quad (2.5)$$

Podemos perguntar o que acontece a esse ângulo ao variarmos o ângulo  $\theta_2$  devido à variação no ângulo de incidência  $\theta_1$ . A figura (Fig. 2.6) mostra o resultado obtido para um prisma com  $\hat{A} = 60^\circ$  e  $n = 1,60$ .

Podemos observar que o ângulo de desvio passa por um valor mínimo para um determinado valor de  $\theta_2$ . Determinemos analiticamente este valor utilizando a condição de mínimo de uma função, derivada nula,

$$\frac{dD}{d\theta_2} = 0.$$

Derivando fica

$$\frac{dD}{d\theta_2} = \frac{n_2 \cos \theta_2}{\sqrt{1 - (n_2 \text{sen}\theta_2)^2}} - \frac{n_2 \cos(\hat{A} - \theta_2)}{\sqrt{1 - [n_2 \text{sen}(\hat{A} - \theta_2)]^2}} = 0,$$

ou seja,

$$\frac{n_2 \cos \theta_2}{\sqrt{1 - (n_2 \text{sen}\theta_2)^2}} = \frac{n_2 \cos(\hat{A} - \theta_2)}{\sqrt{1 - [n_2 \text{sen}(\hat{A} - \theta_2)]^2}}.$$

Para que essa igualdade seja satisfeita basta que

$$\theta_2 = \hat{A} - \theta_2, \quad \therefore \theta_2 = \frac{\hat{A}}{2}.$$

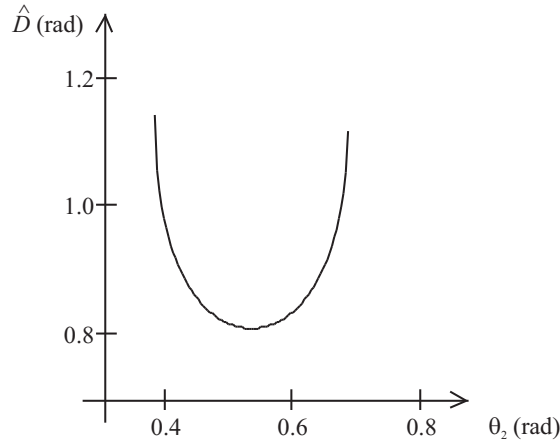


Figura 2.6: Variação do ângulo de desvio com o ângulo  $\theta_2$ .

Desse resultado e da equação (2.3) concluímos que  $\theta_3 = \theta_2$  e a consequência imediata é que  $\theta_4 = \theta_1$ , ou seja, o ângulo de emergência é igual ao ângulo de incidência na situação de desvio mínimo.

Sendo assim, o ângulo de desvio mínimo calculado com a equação (2.4) será

$$\hat{D}_{\min} = 2\theta_1 - \hat{A}$$

ou

$$\theta_1 = \frac{\hat{D}_{\min} + \hat{A}}{2}.$$

Calculando o seno desse ângulo e usando a lei de Snell fica

$$n_2 \sin\theta_2 = \sin\left(\frac{\hat{D}_{\min} + \hat{A}}{2}\right).$$

Contudo,

$$\sin\theta_2 = \sin\frac{\hat{A}}{2},$$

então

$$n_2 = \frac{\sin\left(\frac{\hat{D}_{\min} + \hat{A}}{2}\right)}{\sin\frac{\hat{A}}{2}}. \quad (2.6)$$

Desse modo, podemos determinar o índice de refração do vidro do prisma a partir da medida do ângulo de desvio mínimo e da medida do ângulo interno entre as duas faces do prisma.

### 2.2.3 Dispersão

Conforme comentamos, o índice de refração do vidro é uma função do comprimento de onda da luz (dispersão) medido no vácuo. No item anterior, fizemos a hipótese de que a luz era

monocromática, descrevemos a trajetória do raio de luz ao atravessar o prisma e mostramos que o ângulo de desvio depende do ângulo de incidência e do índice de refração. Portanto, em geral, o ângulo de desvio depende do ângulo de incidência e do comprimento de onda da luz

$$\hat{D} = \hat{D}(\theta_1, \lambda).$$

Dessa forma, podemos afirmar também que o ângulo de desvio mínimo varia com a cor da luz

$$\hat{D}_{\min} = \hat{D}_{\min}(\theta_1, \lambda).$$

Nesse experimento, pretendemos determinar a curva de dispersão  $n_2(\lambda)$  de um vidro de qualidade óptica. Normalmente, esses vidros são do tipo *Flint* ou do tipo *Crown*.

Os vidros do tipo Flint são feitos à base de silicato de chumbo ou ácido bórico, podendo ser encontrados também na sua composição o  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{PbO}$ . São vidros de alta dispersão.

Os vidros tipo Crown são feitos à base de borossilicato e possuem baixa dispersão, sendo encontrado na sua composição  $\text{BaO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Os índices de refração do tipo Flint são maiores que os do tipo Crown. A Tabela (Tab. 2.1) mostra alguns valores de índices de refração para os vidros tipo Flint médio e Flint denso.

Cor	$\lambda(\text{nm})$	Flint médio	Flint denso
Vermelho	656,3	1,6224	1,6500
Amarelo	589,3	1,6272	1,6555
Azul	486,1	1,6385	1,6691
Violeta	396,9	1,6625	1,6940

Tabela 2.1: Índices de refração típicos do vidro tipo Flint.

## 2.3 PARTE EXPERIMENTAL

### 2.3.1 Lista de materiais

Identifique os seguintes equipamentos e materiais que se encontram sobre a mesa:

- Espectrômetro (ou goniômetro óptico),
- prisma de vidro,
- lâmpada de Hg com fonte de alimentação,
- lanterna para iluminação.

### 2.3.2 O espectrômetro

O goniômetro óptico, um instrumento de grande aplicação em medidas ópticas, tem por finalidade medir a posição angular das linhas espectrais ou cores da luz que são desviadas de sua trajetória original por algum artefato óptico (prisma, rede de difração, espelho etc.).

Quando convenientemente calibrado, permite determinar o comprimento de onda dos componentes (cores) do espectro da radiação desviada e passa a ser chamado de *espectrômetro*.

Esse instrumento possui dois braços, um fixo e um móvel, e um suporte central ou mesa. No braço fixo encontra-se o colimador cuja função é colimar ou tornar paralelo um feixe de raios de luz.

O colimador é constituído por um tubo que possui uma fenda vertical ajustável em uma extremidade e uma lente convergente na outra extremidade. A lente é ajustada de tal modo que a fenda esteja posicionada em seu plano focal. Desse modo, os raios de luz contidos num plano transversal à fenda e que a atravessam tornam-se paralelos devido à lente.

O braço móvel, que pode girar ao redor do eixo vertical da mesa, possui um telescópio focalizado no infinito que permite observar os raios de luz provenientes do colimador e que foram eventualmente desviados por um objeto colocado sobre a mesa do aparelho. O telescópio permite observar, ampliada, a imagem da fenda do colimador. Um retículo em forma de *cruz de fios de cabelo* esta localizado no plano focal da lente do telescópio e serve como referência para a medida da posição. O ocular móvel permite a focalização simultânea da imagem da fenda e do retículo e deve ser ajustado ao olho do observador com pequenos deslocamentos para frente e para trás. A posição angular do braço móvel pode ser determinada numa escala graduada de meio em meio grau (30 minutos) e um vernier com divisões de 1 minuto em uma faixa de 30 minutos.

A mesa é um disco horizontal que pode ser submetida a movimentos de rotação e translação, para cima ou para baixo, para regular a sua altura. Um conjunto de três parafusos a  $120^\circ$  permite regular a horizontabilidade.

A figura (Fig. 2.7) mostra o diagrama do instrumento e suas partes. A figura (Fig. 2.8) mostra o aspecto do instrumento em uma vista lateral

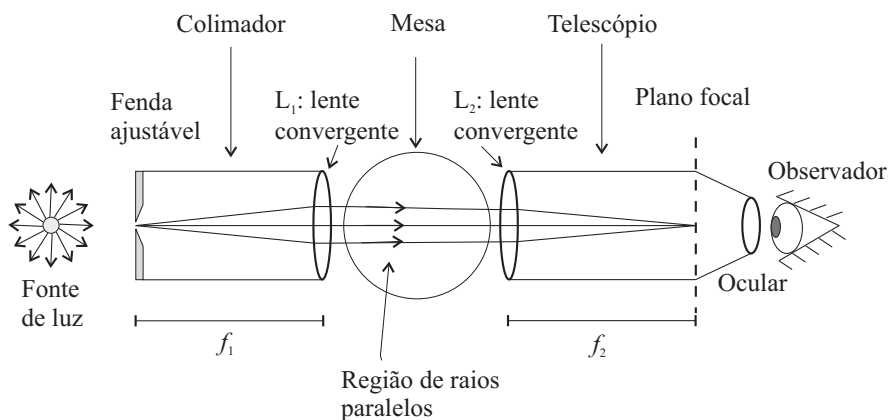


Figura 2.7: Diagrama do goniômetro óptico

### 2.3.3 Prisma de vidro

O prisma que utilizaremos possui base triangular e é aproximadamente equilátero. O ângulo exato entre as duas faces a serem utilizadas deverá ser medido inicialmente para que possa ser efetuada a medida precisa do índice de refração. O prisma é feito com vidro de qualidade

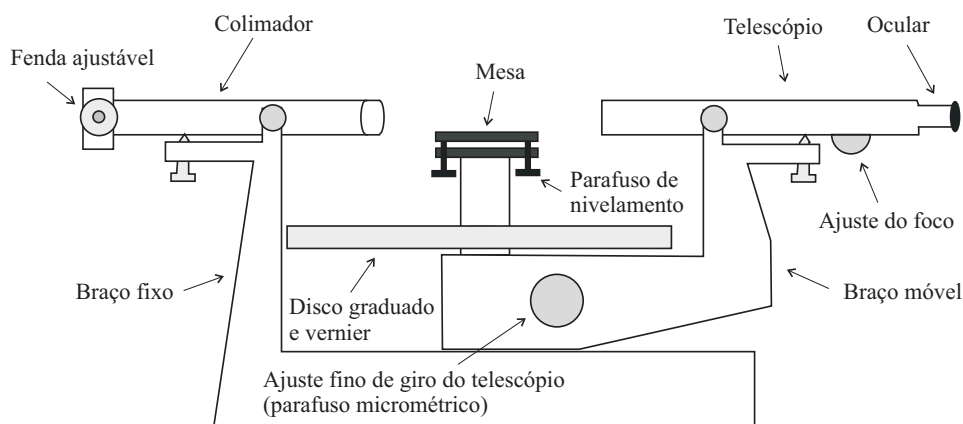


Figura 2.8: Vista lateral do goniômetro óptico

óptica e as faces são polidas com excelente planicidade. Ele está montado entre dois discos de acrílico e duas lâminas de borracha de silicone para protegê-lo de eventuais choques e contaminação das faces durante a manipulação.

### 2.3.4 Fonte de Luz

É constituída por uma lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão semelhante ao tipo utilizado na iluminação pública e sem correção de cor. Essa lâmpada é acondicionada no interior de um tubo cilíndrico metálico em forma de um **T** horizontal com uma lente convergente no extremo da perna. O tubo metálico e a lente de vidro evitam o vazamento da luz ultravioleta, que também é emitida por esse tipo de lâmpada, permitindo apenas a saída de luz visível através da lente. Um leve cheiro de ozônio pode ser percebido durante sua operação. A luz emitida é causada por uma descarga elétrica entre dois eletrodos em uma ampola de quartzo que contém o mercúrio vaporizado. Inicialmente, a ampola é pré-aquecida para vaporizar o mercúrio e uma fonte de tensão com limitação de corrente estabelece um campo elétrico suficientemente alto para ionizar o gás de mercúrio. Uma vez ionizado, a resistência elétrica do gás cai bruscamente e, se a tensão for mantida constante, a corrente tende a valores muito elevados que destruiriam a lâmpada. Daí a necessidade de limitação da corrente que é feita por um indutor (reator) ligado em série, cuja reatância indutiva é suficientemente alta para reduzir a tensão aplicada entre os eletrodos da lâmpada, mantendo a corrente praticamente constante em valores aceitáveis durante a operação. Efetivamente, essa fonte comporta-se como uma *fonte de corrente* (corrente constante) e não como uma fonte de tensão. No processo de ionização ocorrem muitos choques entre os íons em movimento e átomos excitando diversas transições eletrônicas entre os diversos níveis de energia do átomo. Muitas dessas transições correspondem à emissão de luz na região visível que nos interessa. As cores discretas das luzes emitidas ou *linhas espectrais* possuem os comprimentos de onda característicos do átomo de Hg e são conhecidos atualmente com grande precisão.



### 2.3.5 Medidas

#### Cuidados com os aparelhos

- O espectrômetro é um aparelho de alta precisão e deve ser manuseado com cuidado e delicadeza. Nunca force qualquer um dos seus elementos. Em caso de dúvida chame seu professor.
- Não gire o telescópio segurando-o pelo tubo (isso desfocalizará permanentemente o equipamento), use o braço móvel vertical do telescópio.
- A precisão das medidas depende da largura da fenda do colimador. Por isso, trabalhe com a fenda mais fina possível, mas que ainda possa ser visualizada com facilidade.
- A precisão das medidas também depende do correto ajuste do bloco ocular. A posição do ocular deve ser ajustada para o olho do observador deslocando-o ligeiramente para frente ou para trás de modo a focalizar a imagem do retículo (“fio de cabelo”) superposto à imagem da fenda. A imagem da fenda é focalizada com o botão de ajuste do foco.
- O telescópio só pode ser movimentado livremente se o parafuso de bloqueio do braço (parafuso central no lado direito e abaixo do disco) estiver folgado. Caso contrário, só se pode movimentar com o uso do parafuso micrométrico, girando-o em ambos os sentidos (movimento de ajuste fino).
- Segure o prisma pelos suportes circulares e não deixe cair. **Não toque nas superfícies laterais de vidro.**
- Evite olhar diretamente para a lâmpada por um período muito longo. Se luz estiver muito intensa, coloque uma folha de papel entre a saída da fonte de luz e a fenda do colimador.

#### Medida do ângulo $\hat{R}$

Inicialmente, ligue a fonte de luz de Hg e aguarde de um a dois minutos. Durante o aquecimento o brilho da lâmpada aumentará até se tornar estável. Aproxime a saída da fonte de luz à fenda ajustável do espectrômetro de modo que o feixe de luz a ilumine completamente.

Folgue o parafuso de bloqueio do braço móvel e gire-o de modo desobstruir a visão do colimador. Olhando a olho nu diretamente em direção à lente do colimador você deverá enxergar uma linha brilhante com a mesma coloração da luz que ilumina a fenda. Se isso não ocorrer, abra um pouco a fenda ajustável girando o parafuso de ajuste no sentido horário, aproximadamente meia volta. Isso deve ser suficiente.

Movimente o braço móvel de modo que o telescópio aponte para o colimador e olhe através do ocular a imagem da fenda. Com pequenos movimentos laterais procure centralizar a imagem da fenda. Você deverá estar vendo a imagem da fenda e o retículo podendo estar borrados, sem nitidez. Ajuste o ocular movimentando-o levemente para frente e para trás sem girá-lo até conseguir ver o retículo com a maior nitidez possível. Gire agora o botão de ajuste do foco (logo abaixo do tubo do telescópio) para ver a fenda superposta ao retículo com a maior nitidez possível. Esse ajuste depende do olho do observador.

Aperte o parafuso de bloqueio do braço o suficiente para que ele não se movimente. Olhando através do ocular gire o parafuso micrométrico para posicionar a fenda sobre o retículo. Ajuste a largura da fenda para torná-la bastante fina, mas que ainda possa ser possível visualizar o retículo, em seu interior, com facilidade. Pode ser que seja necessário reposicionar a fenda com o auxílio do parafuso micrométrico.

Essa posição corresponde ao que chamamos de ângulo  $\hat{R}$  e vale aproximadamente  $180^\circ$  a depender da posição do disco graduado do aparelho. Esse valor deverá ser lido em graus e minutos com o vernier. Posicione a lente de leitura para a melhor visualização dos números e divisões. Preste atenção no sentido de crescimento do ângulo. Repita esse posicionamento por mais duas vezes anotando os três valores e calcule o valor médio.

### Medida do ângulo $\hat{A}$

Escolha um dos ângulos do prisma para medi-lo. É possível que um ângulo já esteja marcado a lápis sobre o disco de proteção. Coloque o prisma no centro da mesa e posicione esse ângulo de modo que fique frontal ao colimador. O feixe de luz paralelo incidirá obliquamente nas duas faces do prisma e será *refletido* por essas faces produzindo dois feixes que formam um ângulo  $2\hat{A}$  como mostra a figura (Fig. 2.9).

Observe que não é importante que o prisma esteja perfeitamente alinhado de modo que o raio de luz central coincida com a bissetriz do ângulo  $\hat{A}$ . Os dois raios refletidos sempre formarão o dobro desse ângulo. Basta garantir que as duas faces do prisma sejam iluminadas com aproximadamente a mesma quantidade de luz para que os reflexos tenham, aproximadamente, a mesma intensidade. É um bom exercício de geometria mostrar que o ângulo entre os raios refletidos vale o dobro do ângulo interno.

Tente, inicialmente, localizar a luz refletida em cada uma das faces a olho nu. Para isso, movimente sua cabeça ao redor do eixo da mesa do espectrômetro mantendo o olho na altura de um plano horizontal que passe pelo prisma e pelo colimador. Você deverá ver a imagem da lente do colimador e a imagem da fenda brilhante dentro da imagem da lente, ambas refletidas pela face do prisma. A cor da imagem da fenda deverá ser a mesma cor da luz que a ilumina. Se por acaso você enxergar *uma série de linhas coloridas* você não estará vendo a luz refletida mas sim a luz que penetrou no prisma e foi *refratada*. Mude a posição da cabeça para outro local e procure a linha com a cor correta (branca levemente azulada).

Uma vez localizada a imagem da fenda, folgue o parafuso de bloqueio do braço móvel e gire-o até que o telescópio chegue a essa posição. Olhe através do ocular e procure centralizar a fenda sobre o retículo. A fenda deve aparecer à meia altura do campo visual, nem muito alta nem muito baixa, deve estar equidistante das bordas superior e inferior. Se isso não ocorrer, é necessário ajustar o nivelamento do prisma mas, antes disso, repita esse processo para o outro lado girando o braço móvel na direção oposta e verifique também a altura da imagem da fenda. Com base nas posições das imagens em ambos os lados, atue nos parafusos de nivelamento da mesa, um de cada vez, até que as imagens visualizadas em ambos os lados estejam na mesma altura, no centro do campo visual.

Com imagem da fenda centralizada, aperte o parafuso de bloqueio do movimento, faça o ajuste fino com o parafuso micrométrico e meça a posição  $\hat{T}$  em um lado utilizando o vernier. Em seguida meça a posição  $\hat{T}'$  no outro lado. Faça essas medidas mais duas vezes e calcule a média para cada ângulo. Nessa altura da experiência é essencial não mover o

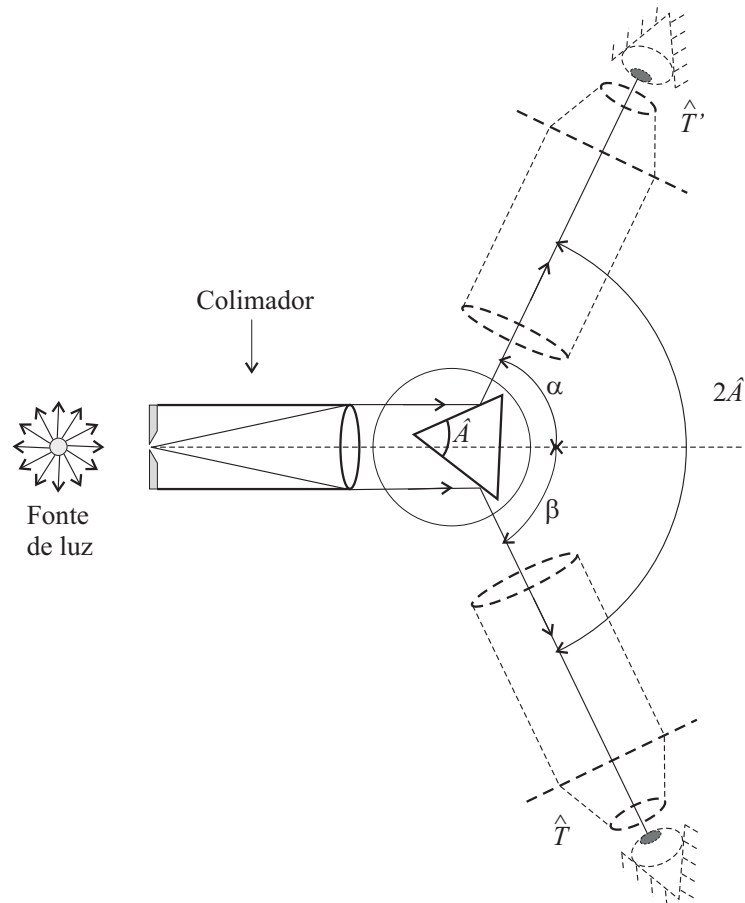


Figura 2.9: Reflexões do feixe de luz nas duas faces do prisma.

prisma. Por que? O ângulo  $\hat{A}$  será

$$\hat{A} = \frac{|\widehat{T} - \widehat{T}'|}{2}. \quad (2.7)$$

#### Medida do ângulo de desvio mínimo

Folgue o parafuso lateral que trava da mesa do espectrômetro se estiver apertado e gire a mesa de forma que a base do prisma oposta ao ângulo  $\hat{A}$  fique girada, aproximadamente, entre  $30^\circ$  e  $45^\circ$  com relação ao eixo do colimador como mostra a figura (Fig. 2.10). O valor desse ângulo não é crítico, é apenas suficiente para que a luz penetre por uma das faces do prisma e saia pela outra face. Esse valor será alterado no decorrer do experimento.

Mantendo a fenda do colimador iluminada com a lâmpada de Hg, os raios de luz provenientes do colimador incidirão na face do prisma que se encontra em frente à lente de

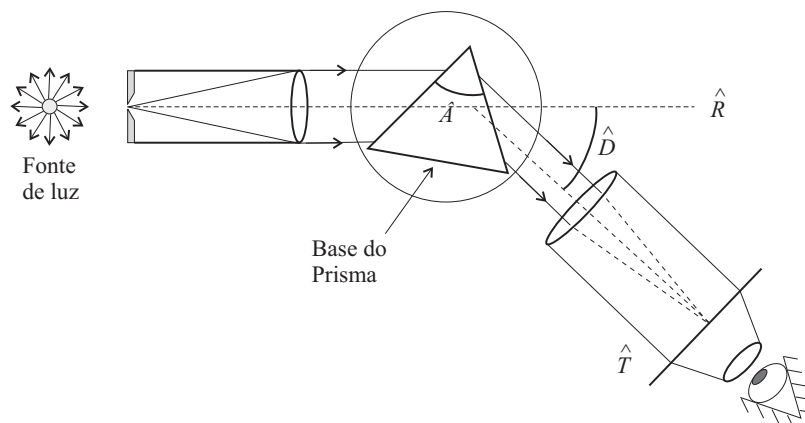


Figura 2.10: Raios de luz desviados pelo prisma.

saída, penetrarão no prisma e sairão pela face oposta com um ângulo de desvio  $\hat{D}$ . Folgue o parafuso de bloqueio do braço do telescópio e movimente-o ao redor do prisma até encontrar uma série de linhas verticais coloridas, o espectro do Hg, que são as imagens da fenda para cada cor. Se não estiver vendo nada, gire um pouco a mesa do prisma para um dos lados e repita a busca até encontrá-las. Você deverá ser capaz de observar as cores listadas na tabela (Tab. 2.2) seguinte:

Cor	$\lambda(\text{nm})$
Roxo 1	405,0
Roxo 2	408,0
Azul-Roxo	436,0
Verde azulado	492,0
Verde	546,1
Amarelo 1	577,0
Amarelo 2	579,0

Tabela 2.2: Cores e comprimentos de onda do espectro visível do Hg.

A depender da intensidade da lâmpada, é possível que você enxergue uma linha azul esverdeada muito fraca entre o azul-roxo e o verde azulado. Despreze-a. Procure a linha amarela que na verdade são duas linhas muito próximas. Você só conseguirá visualizá-las como linhas separadas se a fenda for muito estreita. Se não for possível separá-las, considere como uma única linha com o comprimento de onda médio.

Concentre-se na segunda linha amarela (Amarelo 2) colocando o retículo do telescópio sobre ela. Com a mão esquerda, gire um pouco a mesa do espectrômetro para um dos lados (experimente) de tal forma que a linha amarela se movimente no sentido de diminuir o ângulo de desvio (aproximando-se da posição  $\hat{R}$ ). Ao mesmo tempo, com a mão direita, movimente o telescópio acompanhando o movimento da linha em direção ao mínimo desvio.

Continue a movimentar a mesa, bem lentamente, até perceber que a linha amarela pare de se movimentar atingindo o desvio mínimo. Nessa situação, se você insistir em movimentar

a mesa no mesmo sentido, a linha amarela começará a se movimentar no sentido oposto! Determine com precisão o ponto em que isso ocorre. Para ter certeza que a linha atingiu o ponto de reversão do movimento, coloque o retículo sobre a linha, aperte o parafuso de bloqueio do braço do telescópio, faça o ajuste fino e, em seguida, volte a movimentar a mesa, um pouco para um lado e para o outro. A linha não pode ultrapassar o retículo. Se isso ocorrer, retoque o ajuste fino do braço e volte a movimentar a mesa para ambos os lados até conseguir determinar o ponto exato de reversão do movimento. Essa é a situação de desvio mínimo para essa cor.

Faça a leitura dessa posição  $\hat{T}$  utilizando o vernier e anote o resultado.

Passa para a cor seguinte (Amarelo 1) e repita todo o processo para determinar o desvio mínimo e a posição  $\hat{T}$  para a cor correspondente.

Repita esses passos para todas as cores tabeladas.

**Atenção:** Você tem que determinar o ângulo de desvio mínimo para cada cor repetindo todo o processo. **Não** pode determinar o ponto de reversão para uma cor e continuar a medir a posição das outras cores! Observe que, quando uma cor atinge o ponto de reversão do movimento, as outras cores ainda estão se movimentando!

O valor do ângulo desvio mínimo para cada cor será dado por

$$\hat{D}_{\min} = \left| \hat{R} - \hat{T} \right|. \quad (2.8)$$

### Medida da largura angular da fenda

O erro na determinação de qualquer ângulo medido depende do posicionamento do retículo no interior da imagem da fenda. Por isso, é necessário determinar a largura ou abertura angular da fenda para avaliarmos o erro cometido no posicionamento do retículo. Este erro é considerado como sendo a metade da largura angular da fenda.

Retire o prisma da mesa do espectrômetro e coloque-o em um local seguro (sob a mesa do aparelho é um bom local). Folgue o parafuso de bloqueio do braço do telescópio e gire-o até a posição central para visualizar a imagem da fenda. Se estiver muito intensa coloque uma folha de papel entre a fonte de luz e a fenda de entrada.

Posicione o retículo no centro da imagem da fenda e aperte o parafuso de bloqueio do braço. Com o parafuso micrométrico (ajuste fino) desloque o retículo para a borda esquerda da fenda até tangenciá-la e faça a leitura no vernier. Agora desloque o retículo para a borda direita até tangenciá-la e faça a leitura no vernier. A largura angular da fenda é o módulo da diferença entre essas duas leituras. Tipicamente, encontramos valores entre dois e seis minutos de grau se a fenda for bem fina.

O erro na medida direta de qualquer ângulo  $\theta$  é considerado como sendo o erro do vernier do espectrômetro (um minuto de grau) somado à metade da largura angular da fenda.

$$\Delta\theta = \text{erro do vernier} + \frac{1}{2} \text{ largura angular da fenda} \quad (\text{em radianos!})$$

## 2.4 TRABALHO COMPLEMENTAR

- Utilizando o valor do ângulo interno do prisma e o ângulo de desvio mínimo para cada cor, determine os valores dos índices de refração  $n_2(\lambda)$  do vidro do prisma.

- Utilizando a expressão para o desvio relativo do índice de refração  $\Delta(n)/n$ , determine-o para cada cor. Essa expressão pode ser encontrada pela diferenciação do logaritmo neperiano da expressão do índice de refração.

$$\frac{\Delta(n)}{n} = \left| \cotg \left( \frac{\widehat{D}_{\min} + \widehat{A}}{2} \right) - \cotg \left( \frac{\widehat{A}}{2} \right) \right| \frac{\Delta \widehat{A}}{2} + \left| \cotg \left( \frac{\widehat{D}_{\min} + \widehat{A}}{2} \right) \right| \frac{\Delta \widehat{D}_{\min}}{2},$$

com

$$\Delta \widehat{A} = \frac{\Delta \widehat{T} + \Delta \widehat{T}'}{2} = \Delta \widehat{T}$$

e

$$\Delta \widehat{D}_{\min} = \Delta \widehat{R} + \Delta \widehat{T} = 2\Delta \widehat{T}$$

$$\therefore \frac{\Delta(n)}{n} = \left| \cotg \left( \frac{\widehat{D}_{\min} + \widehat{A}}{2} \right) - \cotg \left( \frac{\widehat{A}}{2} \right) \right| \frac{\Delta \widehat{T}}{2} + \left| \cotg \left( \frac{\widehat{D}_{\min} + \widehat{A}}{2} \right) \right| \Delta \widehat{T}.$$

- Escreva os resultados em uma tabela onde constem as cores, os comprimentos de onda e os índices de refração com os respectivos erros. Lembre-se que o erro deve ser expresso com apenas um algarismo significativo.
- Trace a curva de dispersão  $n_2(\lambda)$  em uma folha de papel milimetrado. Qual é o interesse dessa curva?
- Trace a curva de calibração do espectrômetro, isto é,  $\lambda$  versus  $\widehat{D}_{\min}$ . Qual é a utilidade dessa curva?

## 2.5 BIBLIOGRAFIA

[4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [3], [11], [12], [13], [14], [15]