Roteiro de espectrometria

Laboratório de física moderna

Introdução

O espectro eletromagnético é um intervalo de todas as possíveis frequências da radiação eletromagnética (luz). O espectro eletromagnético vai desde a frequências extremamente baixas da ordem de 30 Hz até a radiação gama com frequências da ordem de 10^{20} Hz.

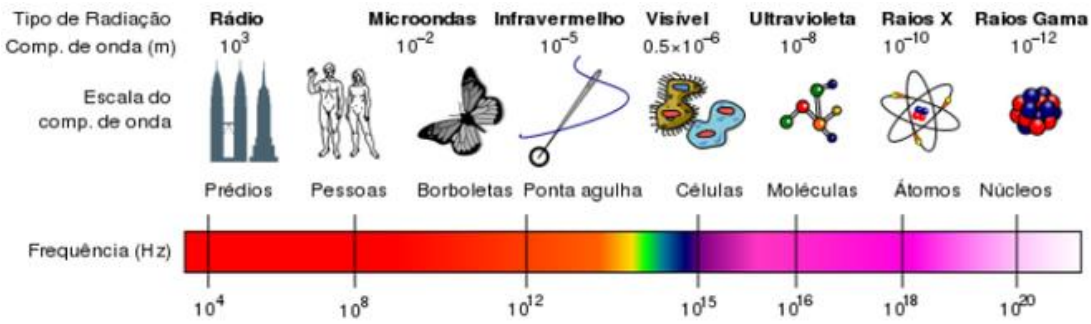

Figura 1: Espectro Eletromagnético.

As cargas elétricas em movimento geram um campo elétrico em uma posição qualquer variando no tempo e gerará um campo magnético que também varia com o tempo. Estes campos, em conjunto, constituem uma onda eletromagnética, que se propaga mesmo no vácuo. James Clerk Maxwell demonstrou que a luz é uma onda eletromagnética. O espectro eletromagnético pode ser contínuo ou discreto. O espectro contínuo é um espectro que possui energias distribuídas continuamente em certa faixa de valores e está associado a cargas elétricas livres em movimento acelerado. Por exemplo, as cargas elétricas oscilando em uma antena geram ondas de rádio e um metal aquecido também emite um espectro contínuo. Por outro lado, o espectro discreto ou de "linhas", contém apenas certos valores bem definidos de energias associados a transições eletrônicas entre estados quânticos. Por exemplo, os estados do átomo de hidrogênio. Para obter esses espectros atômicos é necessário provocar a excitação dos átomos, o que se pode fazer por meio de uma descarga elétrica através de um gás rarefeito contido num tubo de Plucker, por exemplo. Os átomos assim excitados perdem rapidamente esse excesso de energia sob a forma de radiação, que pode ser observada

na zona do espectro visível, como é o caso do espectro do átomo de hidrogênio no modelo atômico de Bohr.

Modelo atômico de Bohr

Pela teoria clássica do eletromagnetismo, quando uma carga é acelerada, ela emitira radiação. Quando se aplica isto ao modelo clássico do átomo (Rutherford), veremos que o átomo entrará em colapso em um tempo muito pequeno, emitindo radiação em todas as frequências. Como e mostrado na figura a seguir Fig (2).

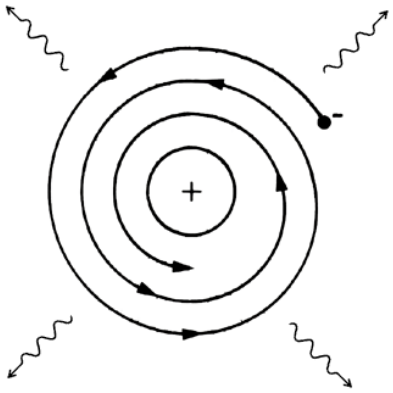

Figura 2: Comportamento clássico do elétron.

Muitas experiências foram feitas e o espectro de muitos átomos foi conhecido (pela primeira vez, o hélio foi detectado por seu espectro e não por processo químico). Isto foi explicado por Bohr. Vamos conhecer os detalhes de seu modelo. Para criar um modelo para o átomo e sua estabilidade, Bohr postula quatro regras, a saber:

1. O elétron se move ao redor do núcleo numa órbita circular atraído por uma força de Coulomb, obedecendo às leis da mecânica clássica.
2. Em vez da infinidade das órbitas permitidas pela mecânica clássica, os elétrons podem se mover somente em órbitas cujo momento angular é um múltiplo inteiro da constante de Planck.
3. Embora constantemente acelerado, o elétron que se move nessas órbitas não emitirá qualquer tipo de radiação, mantendo a sua energia constante.
4. Um elétron emitirá radiação quando muda de uma órbita inicial com energia E_i para outra com energia E_f, e a energia emitida ou absorvida será a diferença dessas energias dividida pela constante de Planck. A Fig (3). esboça o modelo.

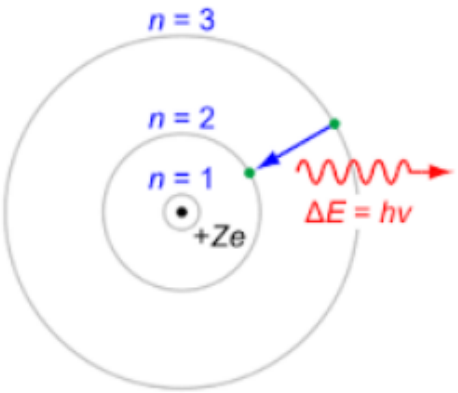

Figura3: Esboço do modelo atômico de Bohr.

A primeira regra é apenas um enunciado que era bem conhecido há seculos (apenas o que se poderia esperar da física clássica). A segunda regra é uma restrição que não tem explicação do ponto de vista clássico. É algo que pode ser aceito com base nos resultados encontrados. A terceira regra é apenas uma forma de negar as regras da eletrodinâmica clássica. A quarta regra é apenas um enunciado sobre a conservação da energia. Vamos escrever todas as regras numa forma matemática. Da primeira delas, temos:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r^2} \tag{1}$$

Estamos usando Z para o número atômico (número de prótons no nucleo), para a carga elétrica elementar a letra e (assumindo apenas um elétron orbitando o átomo). Para a segunda regra:

$$mvr = n\hbar \tag{2}$$

Da ultima delas podemos encontrar a relação:

$$\omega = \frac{E_f - E_i}{\hbar} \tag{1}$$

Usando as equações acima, podemos obter o raio e velocidade do elétron no átomo. Vejamos: da Equação (1) temos:

$$mv^2r = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}Ze^2 \tag{2}$$

e da Equação (2) temos:

$$m^2v^2r^2 = n^2\hbar^2 \leftrightarrow mv^2 = \frac{n^2\hbar^2}{mr^2} \tag{3}$$

Combinando as equações (4) e (5), temos:

$$\frac{n^2\hbar^2}{mr} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}Ze^2 \tag{4}$$

isolando r temos:

$$r = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2n^2}{mZe^2} \tag{5}$$

Para a velocidade, temos de (2):

$$v = \frac{n\hbar}{mr} \tag{6}$$

inserindo a equação (7) para o raio na relação (8), temos:

$$v = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{\hbar^2n} \tag{7}$$

Usando as equações acima e assumindo que a energia é zero para o elétron a uma distância infinita do núcleo. A energia em cada órbita é:

$$E = T + V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{2r} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{2r} \tag{8}$$

Com a equação (7) para o raio na equação (10), temos:

$$E = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{mZ^2e^4}{Z\hbar^2}\frac{1}{n^2} \tag{9}$$

Com esta equação (11), para calcular a energia emitida quando o elétron se move de uma órbita *m* para uma órbita *n* (próxima ao núcleo) encontramos:

$$\omega = \frac{E_n - E_m}{\hbar} = \frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{mZ^2e^4}{Z\hbar^2}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) \tag{10}$$

Para poder comparar o valor calculado e aqueles obtidos a partir de uma experiência, temos que fazer uma pequena correção na fórmula encontrada. A correção é em relação à massa. Para o cálculo que tínhamos feito, tivemos que assumir que a masa do núcleo (M) é infinita. Podemos corregi-la alterando a massa do elétron (m) para a masa reduzida. O seu valor é:

$$\mu = \frac{mM}{m + M} \tag{11}$$

Em que μ e a massa reduzida. Substituindo a massa da equação (12) da frequência de emissão que tinhamos obtido pela massa reduzida, temos:

$$\omega = \frac{E_n - E_m}{\hbar} = \frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{\mu Z^2e^4}{Z\hbar^2}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) \tag{12}$$

com $\omega = {}^{c}/_{\lambda}$ temos:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) \tag{13}$$

Com $R = \frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{\mu Z^2 e^4}{Zc\hbar^2}$.

Da equação (15), encontramos os valores para as series de hidrogênio. Para m=1, temos a série de Lyman (UV), para m=2 temos a serie de Balmer (visível), para m=3 a de Paschem, m=4 a serie de Brackett e para m=5 a serie de Pfund. Podemos representar graficamente estas séries na Fig. (4).

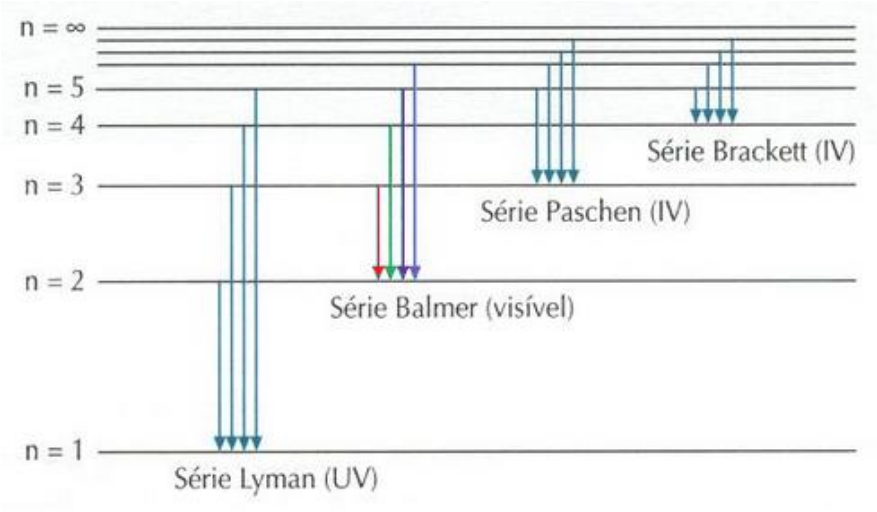

Figura 4: Quatro primeiras séries de emissão do átomo de hidrogênio.

O modelo atômico proposto por Bohr estava de acordo com os valores obtidos por processos experimentais, e foi baseado no modelo nuclear apresentado dois anos aproximadamente, por Rutherford. A espectrometria é uma ferramenta muito poderosa para a análise da estrutura da matéria determinando quais átomos estão presentes em uma substância. Os químicos usam-na para determinar os constituintes de uma molécula e os astrônomos para determinar os constituintes das estrelas que estão à milhões de anos luz. Um espectrômetro é composto basicamente por três componentes: um colimador, um elemento de difração e um telescópio (Fig.5). A luz que vai ser analisada entra pela fenda que está posicionada no ponto focal das lentes do colimador. A luz que sai do colimador é então um feixe fino e paralelo, isto assegura que toda a luz da fenda atinja o elemento de difração no mesmo ângulo de incidência. Isto é necessário para formar uma imagem nítida.

O elemento de difração separa a luz em diferentes cores. Se a luz é composta por várias cores diferentes, cada cor é difratada em um ângulo diferente. O telescópio pode girar-se para coletar a luz difratada em ângulos precisos. Com o telescópio enfocado no infinito e posicionado no ângulo para coletar a luz para uma determinada cor, a imagem certa da fenda do colimador pode ser vista, por exemplo, quando o telescópio está em um ângulo de rotação o visualizador pode ver uma imagem vermelha da fenda, em outro ângulo uma imagem verde, e assim por diante, rotacionando o telescópio, as imagens correspondentes a cada cor constituinte podem ser vistas e o ângulo de difração para cada imagem pode ser medido. Se as caraterísticas do elemento de difração são conhecidas, esses ângulos medidos podem ser usados para determinar o comprimento de onda da luz da imagem formada.

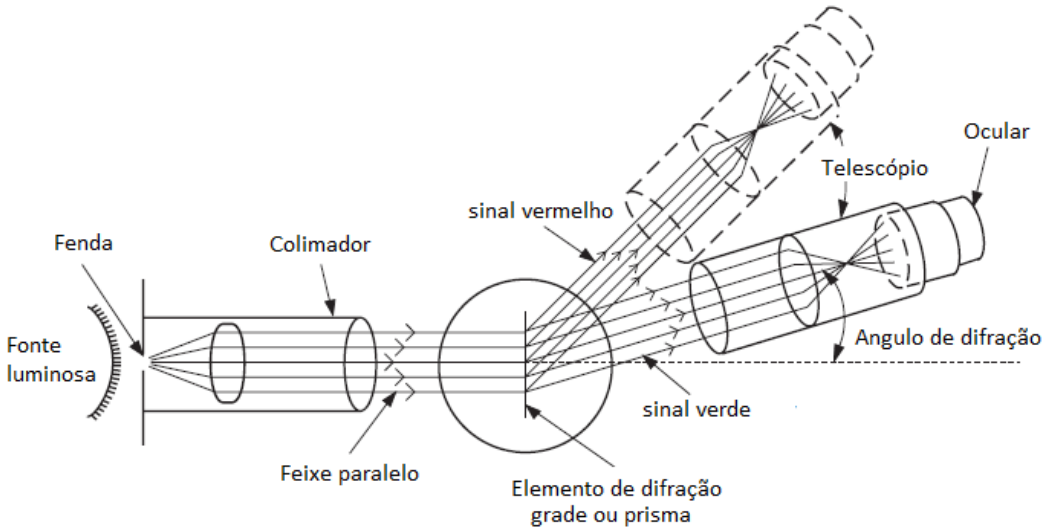

Figura 5: desenho do difratômetro.

Equipamento

O espectrômetro estudantil modelo SP-9268A PASCO oferece medidas espectroscópicas precisas com o prisma ou com a grade de difração como elementos de difração. O espectrômetro é mostrado na Fig. 6.

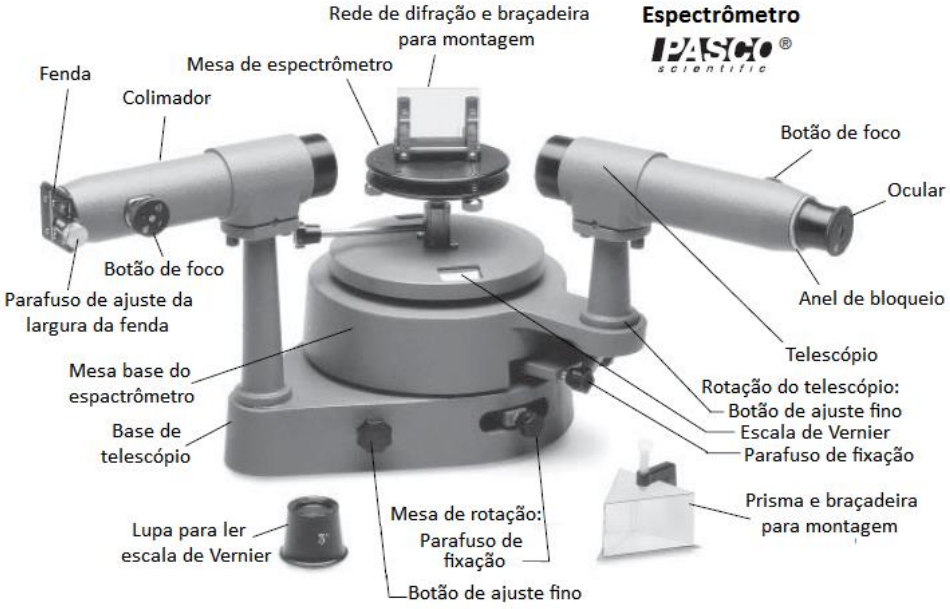

Figura 6: O espectrômetro.

Colimador e Telescópio

Tanto o colimador, quanto o telescópio, tem 178 mm de distância focal, objetivas acromáticas e aberturas claras com diâmetros de 32 mm. O telescópio tem uma ocular Ramsden de 15X com uma lente com uma grade que tem a forma de um X. O colimador está equipado com uma fenda de 6 mm de largura ajustável. O colimador e o telescópio podem ser nivelados. Eles também podem ser realinhados (embora isso seja raramente necessário) de modo que seus eixos fiquem em ordem com o eixo de rotação.

Bases rotativas

A mesa do telescópio e do espectrômetro são montadas em bases rotativas independentes. A escala de Vernier oferece medidas de posições relativas dessas bases até um milímetro de arco. A rotação de cada base é controlada com um parafuso de fixação, a base é facilmente rotacionada com a mão. Com o parafuso de fixação apertado, o botão de ajuste fino pode ser usado para ter um posicionamento mais preciso.

Mesa do espectrômetro

A mesa do espectrômetro é fixa à sua base rotativa com um parafuso, assim a altura da mesa é ajustável. Três parafusos niveladores no lado inferior são usados para ajustar o alinhamento ótico. (A mesa pode ser nivelada em relação ao eixo ótico do colimador e o telescópio se o elemento de difração mantém seu alinhamento para todas as posições do telescópio.) Os parafusos são usados para segurar a braçadeira do prisma e a montagem da grade na mesa, linhas de referência são colocadas na mesa para facilitar o alinhamento.

Acessórios

Os acessórios para o espectrômetro incluem um prisma de sílex denso e duas braçadeiras para a montagem; duas redes de difração, uma de 300 linhas/mm e outra de 600 linhas/mm, dois parafusos para segurar as braçadeiras à mesa do espectrômetro, uma lupa para ler a escala de Vernier, três chaves macho para nivelar o telescópio e o colimador e uma caixa de madeira polida.

Configuração do Equipamento

Nivelando o espectrômetro.

Para resultados corretos, o elemento de difração deve estar corretamente alinhado com os eixos óticos do telescópio e do colimador. É preciso que tanto o espectrômetro quanto a mesa do espectrômetro sejam nivelados.

1. Coloque o espectrômetro em uma superfície plana. Se for preciso, coloque papel embaixo da base de madeira até que a base fixa esteja nivelada.
2. Nivele a mesa do espectrômetro ajustando os três parafusos que ficam na parte da mesa.

Focalização do espectrômetro

- Ao olhar através do telescópio, deslize o ocular dentro e fora até que a grade que tem a forma de um X seja nitidamente focalizada. Solte o anel de bloqueio da grade, e rotacione a grade até que o X fique vertical. Aperte o anel de bloqueio e focalize de novo se for necessário**.**
- Enfoque o telescópio no infinito. Isto é feito melhor, focalizando um objeto afastado, por exemplo, fora da janela.
- Certifique-se que a fenda do colimador esteja parcialmente aberta (use o parafuso de ajuste da largura da fenda).
- Alinhe o telescópio à frente do colimador como é mostrado na Fig.7 a.).

- Ao olhar através do telescópio, ajuste o foco do colimador, se for preciso, rotacione o telescópio até que a fenda fique em um enfoque nítido. *não mude o foco do telescópio*
- Aperte o parafuso de bloqueio de rotação do telescópio, em seguida, use o botão de ajuste fino para alinhar a linha vertical da grade com a borda fixa da fenda. Se a fenda não é vertical, afrouxe o anel de trava da fenda, alinhe de novo a fenda e aperte de novo o anel de trava. Ajuste a largura da fenda para obter uma imagem clara e brilhante. As medidas dos ângulos de difração são sempre medidas com a linha da grade alinhada ao longo da borda fixa da fenda, uma fenda muito estreita, não é sempre uma vantagem.

Quando o telescópio e o colimador estão corretamente alinhados e enfocados, a fenda deve ser nitidamente enfocada no centro do campo de visão do telescópio e a grade com forma de X deve ser perpendicular e estar alinhada com a borda fixa da fenda. Se o alinhamento apropriado não foi obtido com o ajuste descrito acima, você precisa alinhar de novo o espectrômetro como segue.

Realinhamento do espectrômetro

Sob circunstâncias normais, o espectrômetro mantém-se alinhado indefinidamente. Não obstante, se o espectrômetro não estiver corretamente enfocado, como é descrito acima, é preciso ajustar o eixo ótico do colimador e o telescópio, do seguinte modo:

- O pivô do telescópio e o colimador sobre o ponto de apoio em seu respectivo pilar de montagem (ver.Fig.7 b.) . Use a haste de alumínio fornecida com os acessórios para ajustar os parafusos de nivelamento. Afrouxe uma haste,deixando a outra apertada até que a unidade fique nivelada e segura.
- O pilar de montagem do telescópio e o colimador pode rotacionar-se usando uma chave macho para afrouxar os parafusos que fixam os pilares às respetivas bases. Para afrouxar o parafuso para o colimador, o espectrômetro pode ser removido da base de madeira.
- Para garantir que ambas unidades óticas estão formando um angulo de 90° com o eixo de rotação, siga o procedimento de enfoque acima descrito, ajuste os pilares de montagem se for preciso para que a imagem da fenda fique centrada no campo de visão do telescópio.

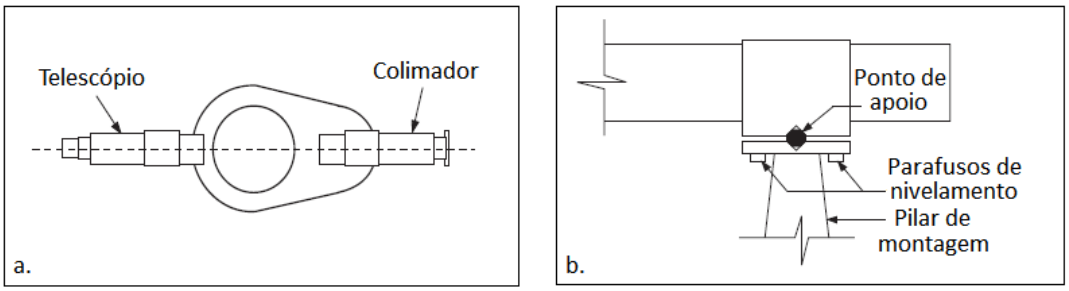

Figura 7: a. Alinhamento do telescópio à frente do colimador, **b**. Nivelação do telescópio e do colimador.

Medidas de ângulos de difração

Ao analisar uma fonte de luz, ângulos de difração são medidos usando a escala Vernier. Porém, as escalas somente oferecem medidas da posição angular relativa entre o telescópio e a base do espectrômetro. Assim, antes de fazer uma medição, é importante estabelecer uma leitura na escala Vernier para o feixe não defletido. Seguidamente, todos os ângulos de difração são medidos em relação à leitura inicial do feixe não defletido. (Ver Fig.8.) Para obter a leitura do ângulo de Vernier para o feixe não defletido, primeiro alinhe a grade em forma de X com a borda fixa da imagem da fenda para o feixe não defletido. Em seguida, leia a escala Vernier. Esta é a leitura no ponto zero θ_0.

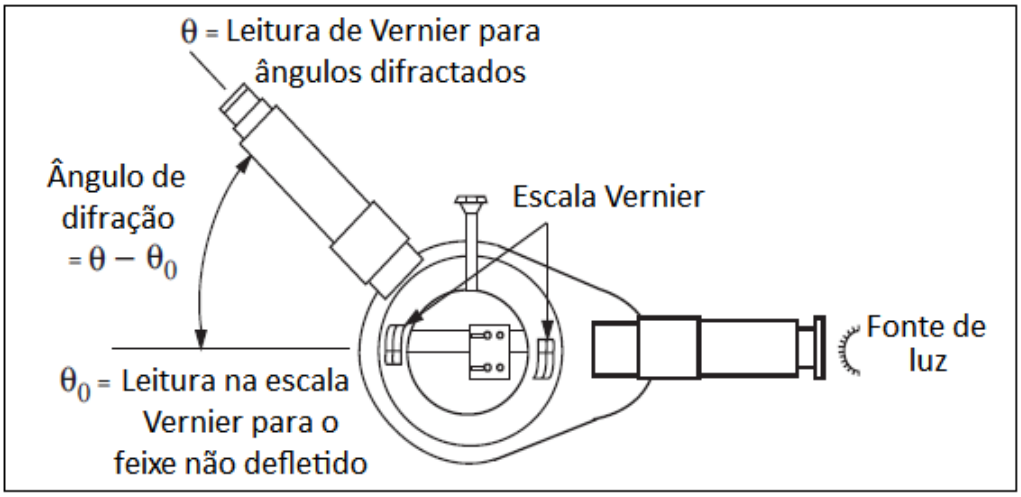

Figura 8: Medida no ângulo de difração

Agora rotacione o telescópio até alinhar a grade em forma de X com a borda fixa da fenda da imagem defletida. Leia a escala Vernier de novo. Se esta segunda leitura é θ

então o ângulo de difração é $\theta - \theta_0$. Se a base do espectrômetro for rotacionada por alguma razão, o ponto zero muda, tem que voltar e medir de novo.

Como medir na escala Vernier

Para medir o ângulo, primeiro encontre onde o ponto zero da escala Vernier alinha-se com a placa de graus e registre o valor. Se o ponto zero está entre duas linhas, use o valor menor. Na fig.9 abaixo, o ponto zero na escala Vernier fica entre 155° e 155° 30' marcado na placa de graus, então o valor que tem que ser registrado é 155°.

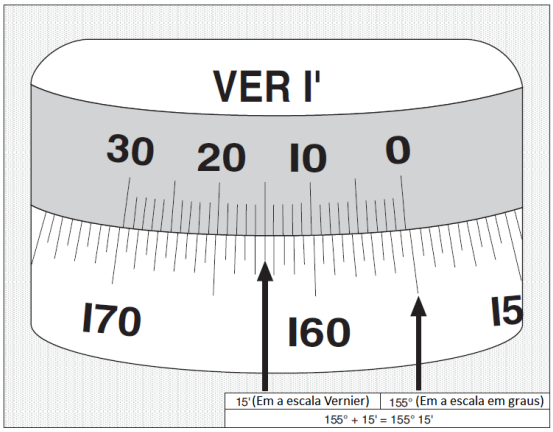

Figura 9: Leitura da escala Vernier.

Agora use a lupa para encontrar a linha em a escala Vernier que se alinha mais perto com alguma linha na escala em graus. Na figura, esta linha corresponde à medida de 15 minutos de arco. Some este valor ao registrado acima para obter uma medida correta com um erro de 1 minuto de arco: assim: 155°+15'=155° 15'.

Uso da grade de difração

Importante: A grade de difração é um componente delicado. Seja cuidadoso, não risque a superfície e sempre envolva-a em espuma de proteção quando não esteja sendo usada.

Alinhamento da grade

Para calcular com precisão os comprimentos de onda em relação aos ângulos de difração, a grade tem que ficar perpendicular ao feixe de luz que sai do colimador**.**

1. Alinhe e enfoque o espectrômetro como foi descrito anteriormente. O telescópio deve ficar em frente do colimador com a forma da fenda enfocada e alinhada com a grade que tem forma de X.

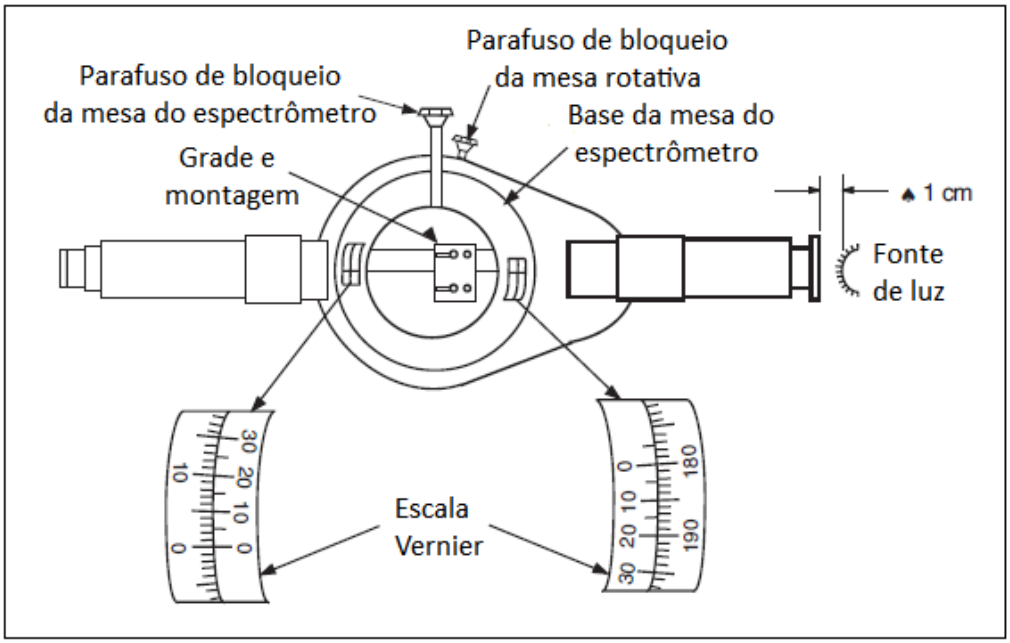

Figura 10: Imagem para passos 2-5 para o alinhamento da grade.

Execute os passos 2-5 com referência à fig.10

2. Afrouxe o parafuso de bloqueio da mesa do espectrômetro. Alinhe a linha gravada na mesa do espectrômetro de modo que seja, tanto quanto possível, colinear com o eixo ótico do telescópio e do colimador. Aperte o parafuso de bloqueio.
3. Usando os parafusos, fixe o montagem da grade, assim que, esteja perpendicular as linhas gravadas da grade.
4. Coloque a grade de difração nos grampos da montagem. Revise a orientação da grade, olhe através da grade a fonte de luz e note como a grade dispersa a luz em vários componentes de cor. Quando esteja colocada na montagem, a grade que separara as cores da luz incidente horizontalmente, rotacionando o telescópio conseguirá ver as diferentes imagens coloridas da fenda.
5. Coloque a fonte de luz (preferencialmente uma com um espectro discreto, tal como a lâmpada de mercúrio ou a de sódio) aproximadamente com um centímetro afastado da fenda. Ajuste o tamanho da fenda tal que a imagem da fenda seja brilhante e fina. Se for necessário, ajuste a altura da mesa do espectrômetro de tal forma que a imagem da fenda seja centrada no campo de visão do telescópio.(*Importante*: A luz difusa pode opacar as imagens, use o

espectrômetro em uma sala semi-escurecida ou faça uma cobertura no espectrômetro com um material opaco)

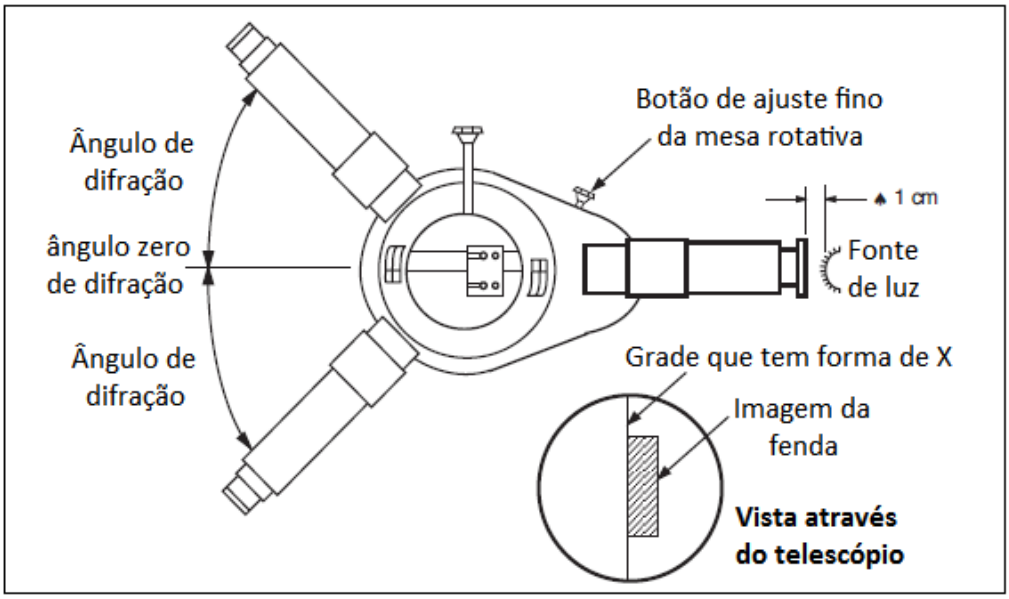

Figura 11: Imagem para passos 6-9 para o alinhamento da grade

Execute os passos 6-9 com referência à fig.11

6. Rotacione o telescópio para encontrar uma imagem brilhante, alinhe a grade que tem forma de X com a borda fixa da imagem e cuidadosamente meça o ângulo de difração (Olhe a seção anterior, *Medidas de ângulos de difração*)
7. A grade de difração difrata a luz incidente em espectros idênticos em ambos os lados da linha do feixe não difratado. Rotacionando o telescópio para trás, após do ângulo zero de difração, para encontrar a correspondente imagem da fenda. Meça o ângulo de difração para esta imagem.
8. Se a grade de difração está alinhada perfeitamente, os ângulos de difração para as correspondentes imagens da fenda serão idênticas. Caso contrario, use o botão de ajuste fino da mesa rotativa para compensar a diferença (i.e., para alinhar a grade perpendicular ao feixe do colimador os dois ângulos têm que serem iguais).
9. Refaça os passos 6-8 até que os ângulos para as correspondentes imagens da fenda sejam os mesmos dentro de um minuto de arco.

Fazendo a leitura

Uma vez que a grade esteja alinhada, não rotacione a mesa rotativa ou a sua base de novo. Os ângulos de difração são medidos como estão descritos na seção anterior (uma vez que a escala Vernier seja movimentada quando a mesa do espectrômetro foi ajustada, o ponto de difração zero tem que ser medido de novo). Os comprimentos de onda da radiação são determinados conforme a fórmula:

$$\lambda = \frac{a\ sin\theta}{n} \tag{14}$$

em que λ é o comprimento de onda; a é a distancia entre as linhas da grade de difração ($a = 3.3 \times 10^{-3}$mm para a grade que tem 300 linhas/mm ou $a = 1.66 \times 10^{-3}$mm para a grade que tem 600 linhas/mm); θ é o ângulo de difração e n é a ordem do espectro de difração na observação. As transições eletrônicas da fonte de luz associadas à luz visível estão na série de Balmer, isto nos diz que o termo m=2 na equação (15).
Para cada cor há um comprimento de onda e uma transição energética associada, jogue na equação (15) cada um dos possíveis valores de m=1, 3, 4, 5, 6, ... e determinar a constante R. Das fontes utilizadas. E com a equação:

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \tag{15}$$

Em que h=6,6260693(11)$\times 10^{34}$$ J·s é a constante de Planck e c=3$\times 10^{8}$ m/s é a velocidade da luz, encontre o valor da energia de cada transição eletrônica e compare-as com as que há na literatura.

Uso do prisma (Opcional)

Vantagens e desvantagens

Um prisma pode ser usado como o elemento de difração em um espectrômetro uma vez que o índice de difração do prisma (e, portanto, o ângulo de difração da luz) varie dependendo suavemente do comprimento de onda da luz.
Um prisma refrata a luz em um único espectro, enquanto que a grade divide a luz disponível em vários espectros. Por causa disso, a imagem que se forma da fenda usando o prisma é geralmente mais brilhante que aquela que é formada pela grade. As linhas espectrais que sejam muito fracas para serem vistas com a grade muitas vezes podem ser vistas usando o prisma.
Infelizmente, incrementando o brilho das linhas espectrais é compensado por uma diminuição da resolução, o que significa que o prisma não separa as linhas de forma tão

eficaz como a grade. Contudo, o brilho das linhas permite que seja usada uma abertura da fenda muito estreita, que compensa parcialmente a redução da resolução.
Com o prisma, o ângulo de refração não é diretamente proporcional ao comprimento de onda da luz. Por esse motivo, uma gráfica do comprimento de onda versus o ângulo de refração pode ser construída usando uma fonte de luz com um espectro conhecido. A medida do comprimento de onda das linhas espectrais não conhecidas usando um prisma podem ser então interpoladas desde la gráfica feita acima.
Uma vez que a gráfica de calibração seja criada para o prisma, medidas de comprimentos de onda futuras são só validas se são feitos com o prisma perfeitamente alinhado, conforme foi usado quando a gráfica foi produzida, todas as medidas são feitas com o prisma alinhado de tal modo que a luz seja refratada no ângulo de desvio mínimo.

O ângulo de desvio mínimo

O ângulo de desvio para a luz atravessando um prisma é mostrado na fig.12. Para um comprimento de onda dado da luz atravessando em um prisma dado, este é um ângulo de incidência caraterístico para o qual é angulo de desvio é mínimo. Este ângulo depende somente do índice de refração do prisma e o ângulo (marcado como A na fig.12. entre os dois lados do prisma atravessados por a luz. A relação entre essas variáveis é dada pela equação:

$$n = \frac{sin\left(\frac{A+D}{2}\right)}{sin\left(\frac{A}{2}\right)} \tag{16}$$

Em que n é o índice de refração do prisma; A é o angulo entre os lados do prisma atravessados pela luz; e D é o ângulo de desvio mínimo. Se n varia com o comprimento de onda, o ângulo de desvio mínimo também varia, mas ele é constante para um comprimento de onda particular.

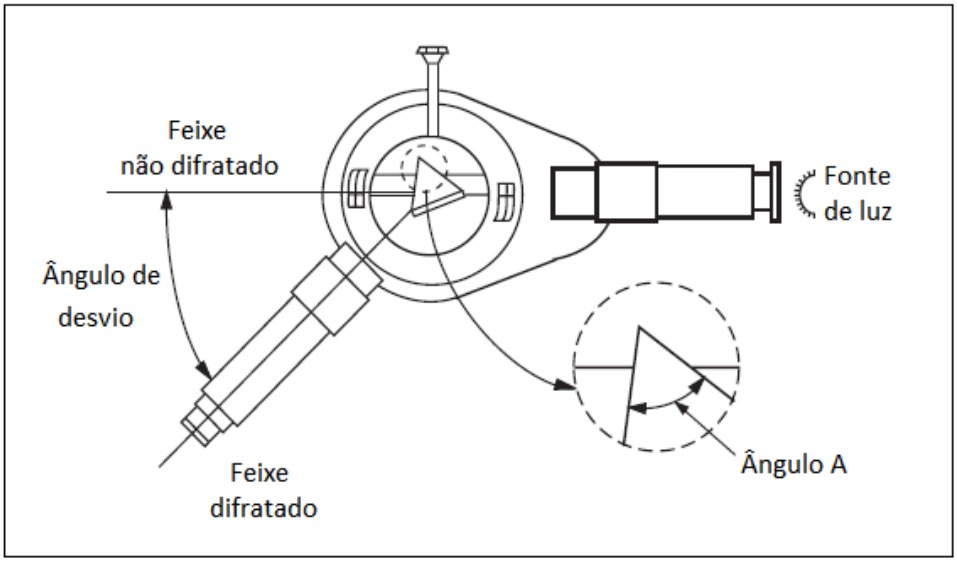

Figura 12: Ângulo de desvio.

Medida do ângulo de desvio mínimo

1. Alinhe e enfoque o espectrômetro como foi descrito acima.
2. Use os dois parafusos para fixar a braçadeira do prisma à mesa do espectrômetro e segure o prisma em seu lugar, como é mostrado na fig.13.
3. Coloque a fonte de luz à uns poucos centímetros atrás da fenda do colimador (poderia ser útil que a sala esteja parcialmente escura, mas não precisa quando esteja usando o prisma.)
4. Com o prisma, geralmente é possível ver a luz refretada à olho nu. Localize a direção geral em que a luz seja refretada, depois alinhe o telescópio e base da mesa do espectrômetro de modo que a imagem da fenda poda ser vista através do telescópio.

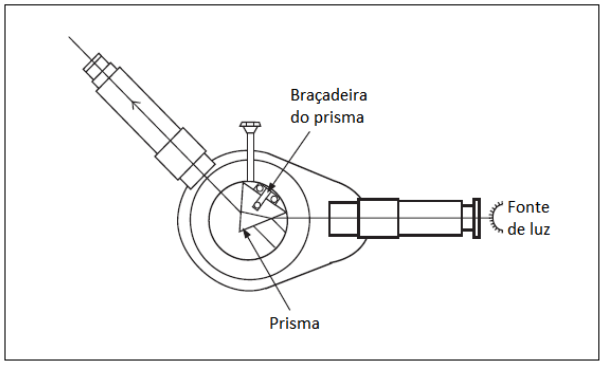

Figura 13: Ângulo de desvio.

5. Enquanto esteja olhando através do telescópio, rotacione a mesa do suavemente para trás e para frente. Note que o ângulo de refração para a linha espectral em observação muda. Rotacione a mesa do espectrômetro até que esse ângulo seja

mínimo, depois rotacione o telescópio para alinhar a grade em forma de X com a imagem da borda fixa da fenda. Use os botões de ajuste fino para fazer esses ajustes o mais preciso possível, depois meça o ângulo do telescópio usando a escala Vernier.

6. Sem trocar a rotação da mesa do telescópio, retire o prisma e rotacione o telescópio para alinhar a grade que tem forma de X com a imagem da borda fixa da fenda do feixe não difratado. Meça o ângulo na escala Vernier. A diferença entre esse ângulo e o registrado para a linha espectral difratada no passo 5, é o ângulo de desvio mínimo. Note que, a determinação do ângulo de desvio mínimo para cada linha espectral exige ajustes rotacionais da mesa do espectrômetro, o ângulo do feixe não difratado pode ser medido de novo para cada linha.