

219 – Espectrômetro para prisma e rede

Roteiro elaborado com base na documentação que acompanha o conjunto por:
Prof. Dr. Jair C. C. Freitas – UFES- Vitória

Espectroscopia com prisma e rede de difração

PRINCÍPIO E OBJETIVOS

Um espectrômetro de prisma e rede de difração é usado para o estudo dos espectros de raios das lâmpadas espectrais de Hg e Na. A lâmpada de Hg é usada para calibração do prisma e a rede de difração é empregada na obtenção da medida da separação das linhas do dubleto D do Na. Como um adendo, obtém-se a curva de dispersão característica do prisma.

TÓPICOS RELACIONADOS

Refração em prismas, ângulo de desvio mínimo, dispersão cromática, redes de difração, espectros de raios, transições eletrônicas e emissões de fótons, regras de seleção, estrutura fina, interação spin-órbita, interação de troca, acoplamento LS, notação espectral.

EQUIPAMENTO

Espectrômetro, lâmpadas espectrais de Na e Hg, fonte de tensão para lâmpadas espectrais, prisma, rede de difração.

	127 V	220 V	
Grampo do banco, -PASS-, pequeno	02010.00	02010.00	1
Tubo de suporte	02060.00	02060.00	1
Suporte para lâmpada ,pico 9, para lâmpada espectral.	08119.00	08119.00	1
Lâmpada espectral de Na, pico 9 base	08120.07	08120.07	1
Rede de difração, 600 linhas/mm	08546.00	08546.00	1
Fonte de alimentação para lâmpada espectral E	13662.98	13662.94	1
Espectrômetro/goniom. com vernier e	42458.1B	42458.1B	1

TAREFAS EXPERIMENTAIS

1. Calibrar o espectrômetro de prisma usando uma lâmpada espectral de Hg.
2. Obter a curva de dispersão do prisma (índice de refração em função do comprimento de onda).
3. Obter e analisar os espectros de raios do Hg e do Na.
4. Utilizar uma rede de difração para determinação da separação das linhas do dubleto D do Na (desdobramento de estrutura fina).

219 – Espectrômetro para prisma e rede

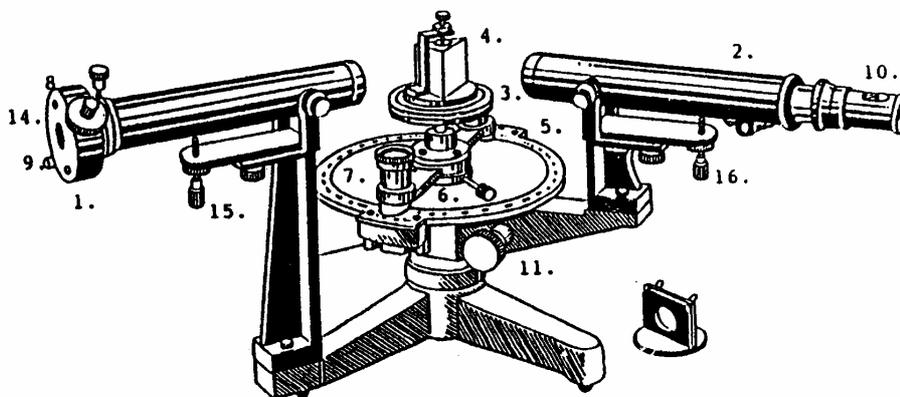
PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

A. Familiarização com o equipamento:

1. O espectrômetro é um equipamento delicado e preciso que permite medidas de ângulos com precisão de leitura de 2" de arco. O equipamento encontra-se ilustrado nas Figs. 1 e 2. As explicações detalhadas sobre o funcionamento e operação de cada uma das componentes indicadas na Fig. 1 podem ser encontradas no manual do espectrômetro, disponível no laboratório. *Recomendamos fortemente que esse manual seja consultado antes de qualquer operação com o espectrômetro e sempre que ocorrer qualquer dúvida sobre o seu funcionamento.*
2. Posicione a lâmpada espectral de Hg no suporte junto à fenda na entrada do colimador do espectrômetro. Conecte a lâmpada à fonte de tensão e ajuste a tensão e corrente apropriadas, observando no rótulo da lâmpada. Pressione o botão "START" e aguarde em torno de 5 minutos para que a iluminação proveniente da lâmpada se estabilize com uma intensidade razoável.
3. Com a plataforma central do espectrômetro vazia, procure observar diretamente no telescópio a imagem da lâmpada através fenda. Regule a abertura desta para obter um feixe estreito e facilmente visível. Ajuste os controles de foco das lentes colimadoras para obter uma imagem nítida da fenda.



219 – Espectrômetro para prisma e rede



- | | |
|---------------------------------|--|
| 1. Colimador | 9. Parafuso de ajuste da fenda |
| 2. Telescópio | 10. Ocular |
| 3. Mesa do prisma | 11. Parafuso de fixação do disco |
| 4. Prisma de vidro flint | 12. Parafuso de nivelamento |
| 5. Disco circular graduado | 13. Parafuso de fixação do telescópio |
| 6. Escala Vernier | 14. Parafuso de ajuste fino do colimador |
| 7. Ocular p/ leitura do Vernier | 15. Ajuste grosso do colimador |
| 8. Fenda | 16. Ajuste grosso do telescópio |

Fig. 1: Espectrômetro.

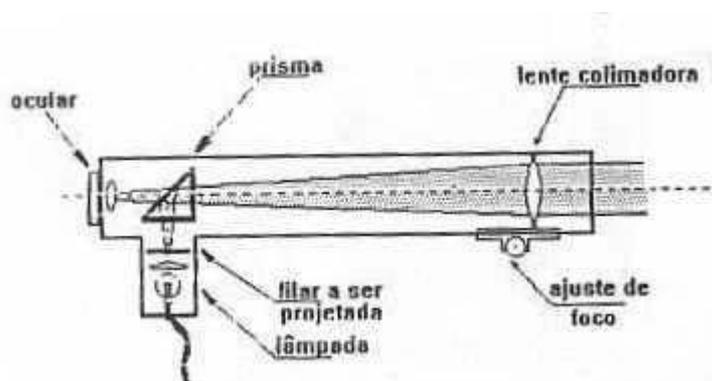


Fig. 2: Esquema óptico do telescópio de observação do espectrômetro.

219 – Espectrômetro para prisma e rede

4. A imagem da fenda é observada na ocular sobreposta a um retículo em forma de cruz, localizado bem no centro do campo visual (Fig. 3). Toma-se como referência a posição em que a imagem da fenda coincide com o traço vertical do retículo. Para fazer esse ajuste com precisão, *fixe o braço móvel* e utilize o *controle de ajuste fino*, o qual permite a realização de pequenas rotações do telescópio.
5. As medidas dos ângulos são efetuadas nas escalas visualizadas através de uma segunda ocular localizada logo abaixo do telescópio de observação (ver Fig. 1). Esse sistema de leitura move-se sempre solidariamente ao braço móvel e a leitura é efetuada somando-se as leituras em duas escalas: a primeira, *horizontal*, dividida em 6 intervalos com 10' de arco cada; e a segunda, *vertical*, onde podem ser efetuadas leituras em minutos e segundos, até a precisão de 2" de arco. O processo de medida encontra-se ilustrado na Fig. 4.

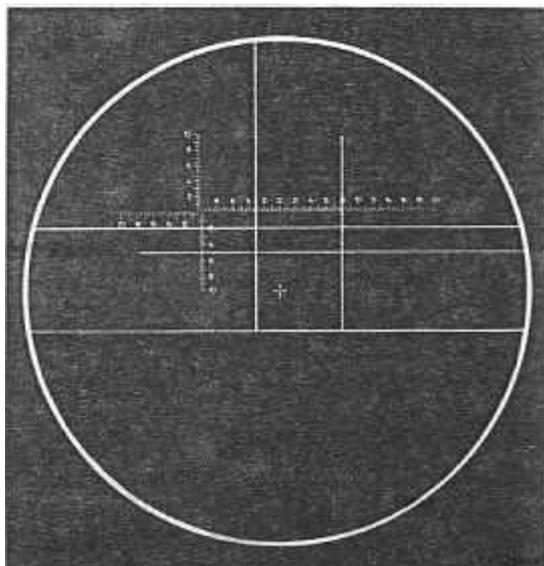


Fig. 3: Ilustração de como é observado o campo visual da ocular, com o retículo em cruz no centro.

219 – Espectrômetro para prisma e rede

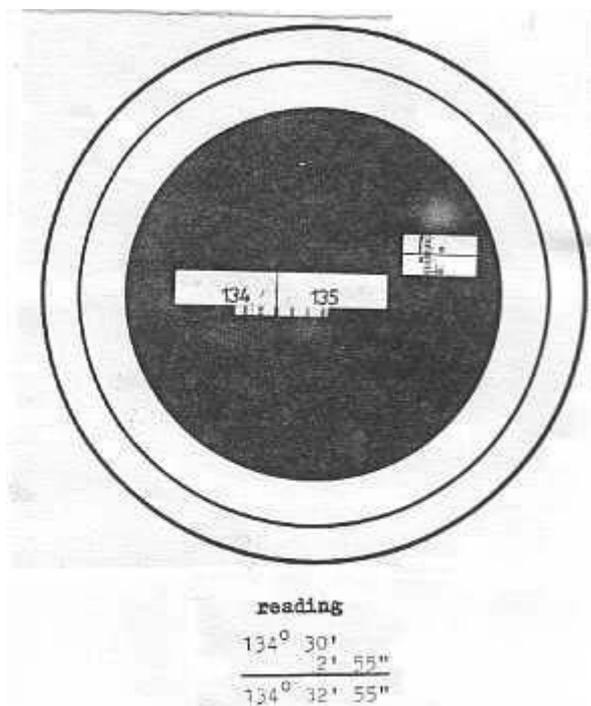


Fig. 4: Ilustração do processo de medida de ângulos utilizando-se as duas escalas de leitura.

6. Alinhamento do braço móvel: este procedimento deve ser repetido sempre que for iniciada uma nova série de medidas.
 - a. Utilizando o *controle da escala de leitura vertical*, posicione esta na posição $0^{\circ}0''$.
 - b. Utilizando o *ajuste fino* de rotação, gire o *braço móvel como um todo* até que a *escala de leitura horizontal* atinja a marca 0° (ou 360°).
 - c. Utilizando o *controle de rotação do telescópio de observação*, gire o telescópio mantendo fixo o braço móvel, até que a imagem da fenda coincida com o retículo em cruz.
7. Com esses procedimentos garante-se que a imagem da fenda observada diretamente corresponde ao ângulo de leitura $0^{\circ}0'0''$, e pode-se então passar a efetuar as medidas dos ângulos de interesse em relação à direção do feixe incidente. Após concluído o alinhamento o botão de *controle de rotação do telescópio de observação* não deve mais ser tocado.
8. Como o espectrômetro é extremamente sensível, deve-se verificar freqüentemente o alinhamento discutido acima, já que qualquer eventual toque acidental no telescópio

219 – Espectrômetro para prisma e rede

e/ou no braço móvel pode prejudicar tal alinhamento e comprometer a confiabilidade das medidas efetuadas.

9. A medida de qualquer ângulo de desvio do feixe pode agora ser efetuada da seguinte forma:
 - a. Localiza-se a imagem da fenda girando o braço móvel como um todo.
 - b. Após ter sido encontrada a imagem da fenda no campo visual da ocular, fixa-se o braço móvel e, com o ajuste fino, posiciona-se a imagem da fenda coincidindo exatamente com o retículo em cruz.
 - c. Na escala de leitura horizontal, efetua-se a leitura “grossa” do ângulo, até dezenas de graus.
 - d. Gira-se o *controle da escala de leitura vertical* até que o traço de referência na escala de leitura horizontal coincida com um dos traços da escala de leitura horizontal. Sempre procure o traço mais próximo e tome cuidado para não forçar o controle da escala de leitura vertical.
 - e. Efetua-se agora a leitura “fina” na escala vertical, em minutos e segundos de arco, e soma-se esse valor à leitura “grossa” para a obtenção do valor total do ângulo de interesse.

Obs.: Note que, devido à atuação das lentes de aumento, os números nas escalas vertical e horizontal aparecem invertidos, de modo que é necessário ter atenção e alguma prática para evitar a ocorrência de erros grosseiros de leitura.

B. Calibração do espectrômetro de prisma com a lâmpada de Hg:

10. Medida do ângulo de abertura do prisma:
 - a. Posicione o prisma sobre a plataforma giratória, de acordo com o esquematizado na Fig. 5. Anote qual vértice está voltado para o feixe incidente (os vértices são numerados), e trabalhe sempre com *este vértice* até o fim da prática.
 - b. Fixe a plataforma giratória e procure com o telescópio de observação localizar os raios refletidos nas faces do prisma (direções QM e ZN na Fig. 5).
 - c. Meça os ângulos correspondentes a esses raios e determine o ângulo total a . O ângulo de abertura do prisma correspondente ao vértice escolhido pode então ser obtido por $A = \alpha = a/2$.

219 – Espectrômetro para prisma e rede

- d. Gire a plataforma e repita o processo acima três vezes, sempre com um aluno diferente efetuando as leituras dos ângulos, para obter uma estimativa das incertezas das medidas associadas ao método de medida, as quais serão certamente maiores que a precisão de leitura oferecida pelo espectrômetro.

11. Medida do ângulo de desvio mínimo:

- a. Posicione o prisma sobre a plataforma giratória, de acordo com o esquematizado na Fig. 6, de forma a observar os raios refratados em relação ao vértice de escolha (vértice A na Fig. 6).
- b. Localize os raios refratados com o telescópio de observação. Nessa situação deve ser possível a visualização das raiais coloridas típicas do espectro ótico do Hg. Ajuste o foco da lente colimadora para observação nítida das raiais refratadas.
- c. Gire a plataforma giratória de modo a variar o ângulo de incidência, acompanhando sempre os raios refratados com o telescópio de observação. Há um ponto em que, continuando a girar a plataforma no mesmo sentido, os raios refratados passam a se mover no sentido oposto. Esta é a situação de desvio mínimo.

Obs.: Para facilitar a localização do ângulo de desvio mínimo, observe nas Figs. 6 e 7 que nessa situação os raios refratados são desviados simetricamente em relação ao vértice A.

- d. Após achar a situação do desvio mínimo, fixe o braço móvel do espectrômetro e passe a se concentrar em uma raia de cada vez, localizando o ângulo de desvio mínimo para essa raia com auxílio da plataforma giratória e, a seguir, utilizando o ajuste fino de rotação do braço móvel para posicionar essa raia junto ao retículo em cruz de referência.
- e. Meça então o ângulo de desvio mínimo para essa raia, nas escalas de leitura apropriadas.
- f. Repita o processo acima para cada raia observada.
- g. Gire a plataforma e repita o processo acima três vezes, sempre com um aluno diferente efetuando as leituras dos ângulos, para obter uma estimativa das

219 – Espectrômetro para prisma e rede

incertezas das medidas associadas ao método de medida, as quais serão certamente maiores que a precisão de leitura oferecida pelo espectrômetro.

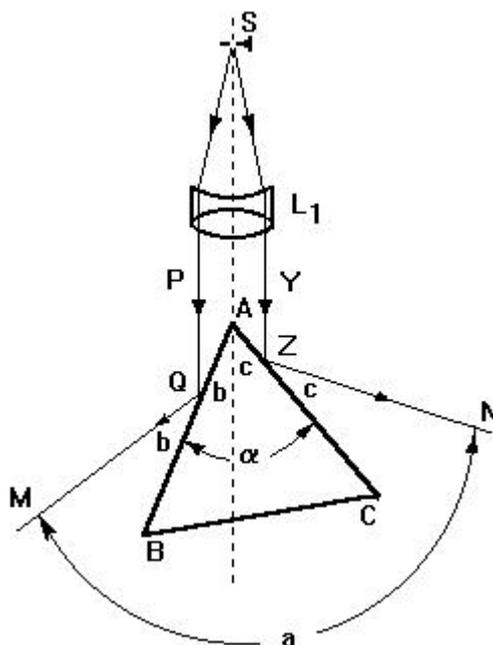


Fig. 5: Arranjo experimental para medição do ângulo de abertura do prisma ($A = \alpha = a/2$).

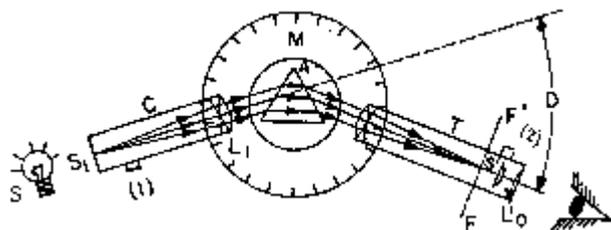


Fig. 6: Arranjo experimental para observação de raios refratados no prisma.

219 – Espectrômetro para prisma e rede

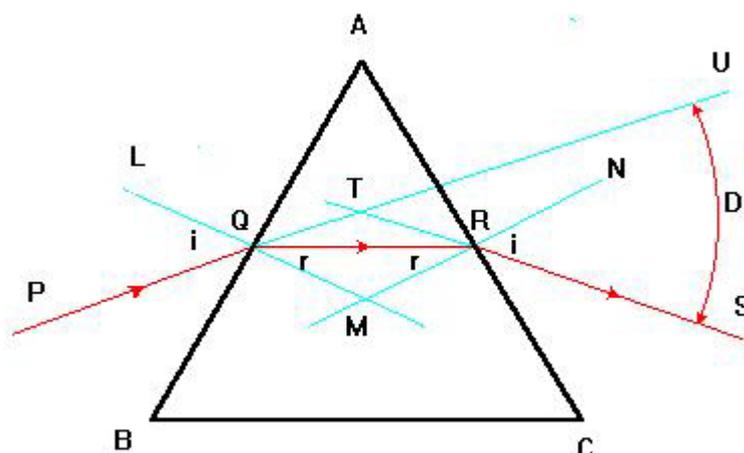


Fig. 7: Trajetória do feixe de luz através do prisma na condição de desvio mínimo ($\delta_m = D$).

C. Medidas dos ângulos de desvio mínimo para a lâmpada de Na:

- Repita as medidas dos ângulos de desvio mínimo, trocando a lâmpada de Hg pela de Na.

D. Medidas da separação do dubleto D do Na com a rede de difração:

- Troque o prisma pela rede de difração (100 ranhuras/mm).
- Verifique novamente o alinhamento do espectrômetro, observando a imagem da fenda sem a presença da rede de difração e ajustando a escala em $0^{\circ}0'0''$.
- Posicione a rede difração sobre a plataforma perpendicularmente ao feixe incidente. Para efetuar esse ajuste com precisão, observe a imagem de uma raia difratada à direita e à esquerda da rede e anote os ângulos medidos.
- Se eles forem diferentes, gire a plataforma giratória onde está a rede de forma que essa diferença seja reduzida ao menor valor possível (tipicamente menor que $30''$ de arco).
- Para melhorar a precisão desse ajuste, observe novamente a mesma raia anterior em ordens mais altas de difração e refaça o ajuste de perpendicularidade da rede.
- Depois de efetuado esse ajuste, meça os ângulos de difração para as duas raia amarelas do dubleto D do Na, sempre à *direita* e à *esquerda* e no mínimo até a *quarta ordem* de difração. Tome as médias das leituras à direita e à esquerda (as quais devem ser muito próximas!) para cada ordem de difração.

219 – Espectrômetro para prisma e rede

CUIDADOS QUE DEVEM SER TOMADOS EM LABORATÓRIO

1. O espectrômetro é um equipamento delicado e preciso, cujo manuseio requer *atenção e cuidado* para evitar danos ao equipamento e prejuízo na qualidade das medidas efetuadas.
2. Igual cuidado deve ser tomado ao se manipularem o prisma e a rede de difração, que são frágeis e não podem *em hipótese alguma* sofrer impactos. Jamais toque nas superfícies do prisma ou da rede com as mãos; utilize um lenço de papel para evitar o contato com essas superfícies.
3. Evite olhar diretamente para as lâmpadas espectrais quando elas estiverem acesas, o que pode causar danos permanentes ao sistema visual do observador.

EXPRESSÕES E RELAÇÕES NUMÉRICAS ENVOLVIDAS

1. O índice de refração n do material que constitui o prisma está relacionado com o ângulo de desvio mínimo δ_m e com o ângulo de abertura do prisma A pela expressão a seguir:

$$n = \frac{\text{sen}\left(\frac{A + \delta_m}{2}\right)}{\text{sen}\frac{A}{2}} \quad (1)$$

2. Como n em geral depende do comprimento de onda λ da radiação, então o ângulo de desvio mínimo δ_m passa a ser também função de λ : $\delta_m = \delta_m(\lambda)$.
3. A dependência de n em relação à λ é usualmente expressa a partir de relações empíricas. No caso de vidros transparentes operando na faixa do visível, a mais conhecida dessas relações é a equação de Cauchy:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}, \quad (2)$$

onde A e B são constantes determinadas experimentalmente.

4. Os máximos de difração para uma rede iluminada por um feixe colimado numa direção perpendicular à rede são encontrados em posições angulares dadas pela expressão abaixo:

$$d \text{ sen } \theta = m\lambda, \quad (3)$$

219 – Espectrômetro para prisma e rede

onde d é a distância entre as ranhuras da rede, θ é o ângulo de difração e m é um número natural que indica a ordem de difração ($m = 1, 2, 3, \dots$).

QUESTÕES A SEREM RESPONDIDAS NO PRÉ-RELATÓRIO

1. Demonstre a afirmação de que o ângulo de abertura A é igual à metade do ângulo α medido pela reflexão do feixe nas faces do prisma (Fig. 5).
2. Demonstre por que a situação mostrada na Fig. 7 corresponde à condição de desvio mínimo.
3. Utilize a demonstração acima para obter a Eq. 1.
4. Esboce os comportamentos esperados para os ângulos de desvio δ e de emergência e em função do ângulo de incidência i em um prisma, indicando a ocorrência do desvio mínimo δ_m .
5. Esboce como você espera que seja a curva de índice de refração em função do comprimento de onda para o vidro de que é feito o prisma. Esse comportamento vale para todos os materiais em todos os comprimentos de onda? É consequência de alguma lei física geral ou é uma lei empírica? Qual a explicação física para a dependência de n com λ ?
6. Explique como funciona o processo de emissão de luz em uma lâmpada espectral.
7. Explique detalhadamente por que os espectros de emissão das lâmpadas espectrais são compostos por raias discretas ao invés de um contínuo.
8. Explique a *notação espectroscópica* usualmente empregada na identificação de níveis de energia de átomos multieletrônicos que obedecem ao acoplamento LS (veja a Fig. 8, por exemplo). Como obter os números quânticos J , L e S a partir dessa notação?

219 – Espectrômetro para prisma e rede

PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS A SEREM EFETUADOS NO RELATÓRIO

1. Apresente os resultados das medidas realizadas para a determinação do ângulo de abertura A do prisma. Forneça os valores dos ângulos medidos e determine o valor médio de A , com sua incerteza.
2. Apresente os resultados das medidas dos ângulos de desvio mínimo para as raias espectrais das lâmpadas de Hg e de Na, fornecendo os valores medidos em laboratório e calculando os valores médios com suas respectivas incertezas.
3. Utilize as raias mais intensas do Hg mostradas na Tabela 1 para construir uma curva de calibração para o prisma. Monte o gráfico $\delta_m \times \lambda$ em papel milimetrado ou em computador.
4. Utilize a Eq. 1 para determinar os valores do índice de refração do prisma (valores médios com incerteza) em função do comprimento de onda da radiação incidente, usando as raias espectrais da lâmpada de Hg. Faça um gráfico de $n \times \lambda$.
5. Monte agora um gráfico de n em função de $1/\lambda^2$. Ajuste a curva obtida utilizando a Eq. 2 e determine os valores de A e B (com incerteza) característicos do prisma usado na experiência. Esse ajuste pode ser efetuado a partir da aplicação do método dos mínimos quadrados ou outro método de regressão linear (gráfico ou numérico).
6. Utilize os valores das constantes determinadas acima juntamente com as Eqs. 1 e 2 para determinar os valores dos comprimentos de onda de todas as raias encontradas para a lâmpada de Na e também das raias encontradas para a lâmpada de Hg que não tiverem sido usadas no processo de calibração. Estime as incertezas envolvidas nesse processo de interpolação (ou extrapolação). Compare com os valores previstos nas Tabelas 1 e 2 e na Fig. 8.
7. Identifique na Fig. 8 quais transições são responsáveis pelas raias observadas para as lâmpadas de Hg e Na. Monte diagramas similares aos da Fig. 8 para indicar *apenas as transições observadas experimentalmente* para as lâmpadas de Hg e Na, utilizando a notação espectroscópica para identificar essas transições.
8. Utilize os valores de λ obtidos experimentalmente (ou tabelados para o caso das raias usadas na calibração) para determinar as energias dos fótons (em eV) envolvidos nas transições observadas para as lâmpadas de Hg e Na.

219 – Espectrômetro para prisma e rede

9. A partir dos dados obtidos com a rede de difração e empregando a Eq. 3, determine os valores de comprimento de onda característicos do dubleto D do Na. Utilize as medidas efetuadas em diferentes ordens para obter valores médios com incerteza.
10. Obtenha a partir desses valores a separação em energia (em eV) dos níveis correspondentes.

Tab. 1 - Principais linhas espectrais da lâmpada de Hg

COR	λ (nm)	INTENSIDADE
vermelho	690,75	fraca
amarelo	578,97	forte
amarelo	576,96	forte
verde	546,07	forte
verde/azul	491,60	fraca
azul	435,84	média
violeta	407,78	fraca
violeta	404,66	média

Tab. 2 - Principais linhas espectrais da lâmpada de Na

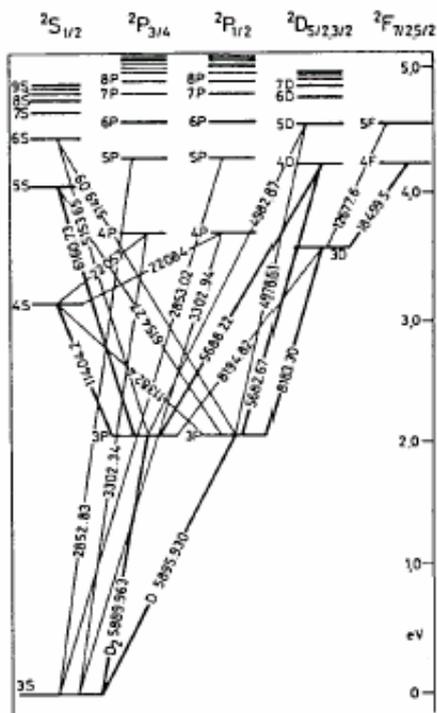
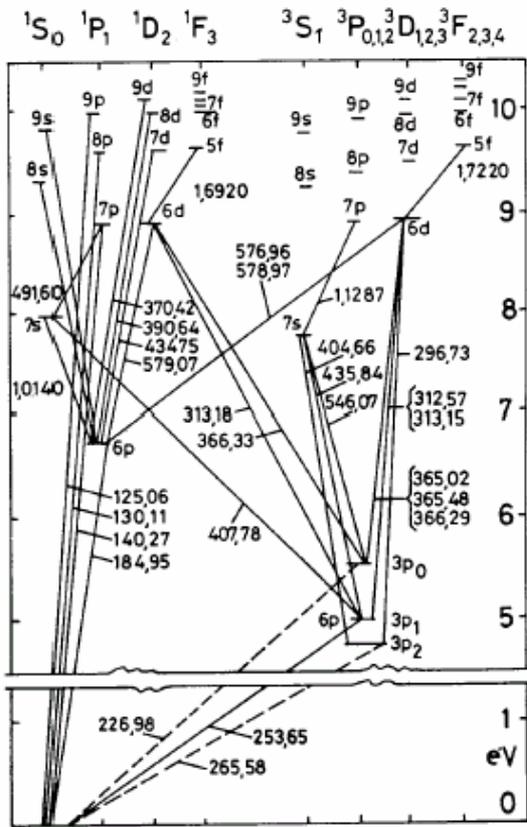
COR	λ (nm)
vermelho	615,43 -
	616,07
amarelo	589,00 -
	589,59
verde	568,27 -
	568,82
verde	514,91 -
	515,36
verde	497,86 -
	498,29
azul	474,80 -
	475,19
azul	466,49 -
	466,86
azul	449,43 -
	449,77

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

219 – Espectrômetro para prisma e rede

1. Explique qual a vantagem de se trabalhar na condição de desvio mínimo para a observação dos raios refratados no prisma.
2. Nas medidas de ângulo de desvio mínimo, verifica-se que o raio refletido na face do prisma oposta ao vértice **A** passa próximo do raio refratado na condição de desvio mínimo. Explique essa observação, com base no arranjo mostrado na Fig. 7.
3. Por que é necessário levantar uma curva de calibração para um espectrômetro de prisma? É também necessário levantar uma curva de calibração para um espectrômetro de rede de difração? Justifique.

219 – Espectrômetro para prisma e rede



(a) Hg

(b) Na

Fig. 8: Diagramas de níveis de energia para (a) Hg e (b) Na, mostrando as transições eletrônicas responsáveis pelas raias espectrais observadas.

219 – Espectrômetro para prisma e rede

4. Compare os métodos de espectroscopia com prisma e com rede, enumerando as vantagens e desvantagens de cada um.
5. A luz incidente sobre o prisma e também sobre a rede de difração é policromática. Explique detalhadamente por que os raios refratados no prisma e difratados na rede são separados nas raias características dos elementos situados dentro das lâmpadas (fenômeno chamado de dispersão). Escreva as expressões matemáticas que mostram a dependência do ângulo de desvio e do ângulo de difração com o comprimento de onda.
6. Costuma-se dizer que os átomos de Na e Hg possuem respectivamente 1 e 2 elétrons *oticamente ativos*. Explique o que significa essa afirmação.
7. Quais são as regras de seleção usualmente envolvidas nas transições eletrônicas em átomos que obedecem ao acoplamento LS ? Qual sua origem física?
8. Verifique se as transições observadas experimentalmente para as lâmpadas de Hg e Na satisfazem as regras de seleção esperadas envolvendo as variações nos números quânticos J , L e S . Discuta o resultado encontrado.
9. Explique por que todos os níveis de energia com $L \neq 0$ mostrados na Fig. 8b para o Na são desdobrados em dois, dando origem aos dubletos indicados na Tab. 2. Qual a origem física desse “desdobramento de estrutura fina”? Como é o ordenamento em energia dos níveis desdobrados?
10. Explique por que o diagrama de níveis de energia do Hg mostrado na Fig. 8a encontra-se dividido em dois conjuntos: estados de singlete (à esquerda) e de triplete (à direita). O que significam os termos “singlete” e “triplete”? Por que os estados de triplete possuem energias sistematicamente mais baixas do que os estados de singlete correspondentes? Qual a origem física da interação envolvida?
11. Quais os números quânticos que caracterizam os elétrons *oticamente ativos* do Na e do Hg no seu estado fundamental? E nos primeiros estados excitados? Escolha dois estados excitados quaisquer na Fig. 8 para o Na e para o Hg e explicita todos os números quânticos dos elétrons *oticamente ativos*.

219 – Espectrômetro para prisma e rede

BIBLIOGRAFIA

1. Halliday, Resnick & Walker, Fundamentos de Física, Vol. 4.
2. J. Goldemberg, Física Geral e Experimental – Vol. 3.
3. Eisberg & Resnick, Física Quântica.
4. Reitz, Milford & Christy, Fundamentos da Teoria Eletromagnética.
5. Melissinos, Experiments in Modern Physics.
6. Jenkins & White, Fundamentals of Optics.
7. Página do Lab. de Espectrofotometria e Ensino de Óptica -
<http://www.ifi.unicamp.br/~accosta>.