Universidade Federal do Paraná
Departamento de Física
Laboratório de Física Moderna

Bloco 02: O DUBLETO DO SÓDIO

Introdução

Os níveis de energia de um átomo de hidrogênio calculados pela equação de Schrödinger são somente função do número quântico n, sendo proporcionais a $1/n^2$. Isto implica que transições ocasionadas pela excitação da nuvem eletrônica produzirão um espectro cujas linhas serão únicas. Porém, a análise experimental dos espectros revela que estes possuem uma estrutura fina, na qual cada linha é formada por linhas de comprimento de onda separadas por alguns Angströms.

Tal observação foi somente explicada em 1925 por S.A. Goudsmit e G.E. Uhlenbeck. Eles sugeriram que o elétron possui um momento angular intrínseco chamado *spin* e um momento magnético associado a este. A estrutura fina é explicada então como sendo o resultado da interação magnética entre o momento angular de spin e o momento angular orbital, conhecida como interação spin-órbita ou ainda interação L-S.

Para o caso simples de um átomo de um único elétron como o hidrogênio e os metais alcalinos, o módulo do momento angular orbital $\boldsymbol{L}$ é:

$$L = \hbar\sqrt{\ell(\ell+1)}$$

na qual $\hbar = h/2\pi$ e h é a constante de Planck. A componente ao longo do eixo z sendo L_z = $m_\ell . \hbar$, na qual m_ℓ. varia de - ℓ a + ℓ.

O módulo do momento angular de spin $\boldsymbol{S}$ é dado por:

$$S = \hbar\sqrt{s(s+1)}$$

na qual s = 1/2. A componente ao longo do eixo z é $S_z = m_s . \hbar$, na qual m_s possui valores iguais a ± 1/2.

Na ausência hipotética do acoplamento spin-órbita, os momentos angulares orbital e de spin, $\mathbf{L}$ e $\mathbf{S}$, de um elétron atômico seriam independentes um do outro e obedeceriam independentemente às leis de conservação de momento angular orbital da mecânica quântica. Os vetores $\mathbf{L}$ e $\mathbf{S}$ precessionariam aleatoriamente em torno do eixo z de quantização, mantendo constantes suas intensidades e componentes.

No mundo real, o acoplamento spin-órbita existe e consiste na atuação de um campo magnético forte interno ao átomo[1], cuja orientação é dada por $\mathbf{L}$, produzindo um torque sobre o momento de dipolo magnético de spin do elétron atômico, cuja orientação é dada por $\mathbf{S}$. Este torque devido ao campo magnético interno do átomo faz com que as orientações de $\mathbf{L}$ e $\mathbf{S}$ dependam uma da outra. Assim, os momentos angulares orbital e de spin passam a precessionarem em torno da sua soma, definida pelo momento angular total $\boldsymbol{J} = \boldsymbol{L} + \boldsymbol{S}$, e não em torno do em torno do eixo z de quantização. Desta forma, o momento angular total $\boldsymbol{J} = \boldsymbol{L} + \boldsymbol{S}$ é tal que:

$$J = \hbar\sqrt{j(j+1)} \qquad \text{e} \qquad J_z = L_z \pm S_z = m_j . \hbar$$

Portanto $m_j = m_\ell \pm m_s$ e $j = \ell \pm s$.

A diferença nos níveis de energia envolvida pode ser calculada usando-se a teoria das perturbações. Tal cálculo revela um valor igual a $(Z\alpha)^2 . E_n/n$ na qual Z é o número atômico, E_n é a energia do nível n e $\alpha = 2\pi e^2/hc$ (no sistema gaussiano!) é chamada de constante da estrutura fina e possui um valor igual a 1/137.

[1] O campo magnético interno que atua sobre o elétron no átomo pode ser compreendido tomando-se o referencial fixo no elétron em movimento. Neste referencial, o núcleo atômico move-se em torno do elétron de modo que este encontra-se dentro de um anel de corrente que produz um campo magnético.

Os elementos alcalinos como o Li, Na, K, Rb e Cs são caracterizados por possuírem um conjunto de subcamadas eletrônicas completamente preenchidas, sendo a de maior energia uma subcamada *p*, mais um elétron adicional na subcamada *s* seguinte. Quando são submetidos às excitações óticas (consideradas de baixa energia), produzidas, por exemplo, por descargas elétricas de baixa voltagem, em geral somente o elétron da subcamada *s* é excitado nestes elementos. Em virtude disso, a análise do espectro óptico em termos dos seus estados excitados é relativamente simples, pois podem ser completamente descritos por um único elétron opticamente ativo e o "caroço" contendo subcamadas completamente preenchidas pode ser ignorado.

2. Sódio

O sódio é um dos elementos do tipo hidrogenóide com um elétron "bandoleiro" na camada mais externa da nuvem eletrônica. Este elétron é responsável pela maioria das propriedades óticas de emissão e absorção da luz deste elemento. Foi no sódio que se descobriu pela primeira vez que além da estrutura ótica existe a chamada estrutura fina. As raias luminosas aparecem em linhas duplas, triplas, quádruplas, etc., e falamos de dubletos, tripletos, quartetos, etc.

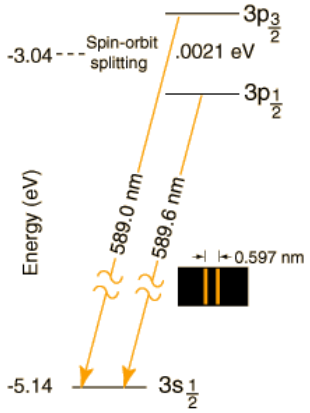


Figura 1 – Transições eletrônicas do dubleto do sódio.

No caso do sódio o espectro é dominado amplamente por duas linhas muito próximas na faixa laranja do espectro. As duas linhas provém de duas transições possíveis para o elétron entre os estados 3*p* com acoplamento spin-órbita diferentes e o estado 3*s*, como apresentado da Figura 1. A diferença de energia entre estes estados pode ser descrita pela chamada energia spin-órbita:

$$E_{SL} = \xi \, . \, \mathbf{L} \, . \, \mathbf{S}$$

na qual ξ é um parâmetro que depende de vários fatores típicos para cada átomo. O objetivo básico desta experiência é medir esta energia spin-órbita para o sódio utilizando uma técnica de interferência que explicaremos a seguir.

3. O Interferômetro de Fabry-Perot

O interferômetro de Fabry-Perot é utilizado para a medida precisa de comprimentos, comprimentos de onda e também na medida de índice de refração de gases. Ele consiste basicamente de duas placas de vidro ou quartzo paralelas e oticamente planas. Estas são semiespelhadas internamente por filmes de prata, alumínio ou filmes de multicamadas interferenciais de tal modo que um feixe luminoso incidindo sobre elas sofrerá múltiplas reflexões (Fig. 2 – direita).

Para se calcular a condição de interferência construtiva, nota-se que a diferença de caminho ótico entre dois raios luminosos adjacentes exemplificados na Figura 2 (esquerda) é BC + CK. É fácil provar que a soma acima é igual a $2.t.\cos\theta$ e que a condição para interferência construtiva é:

$$n\lambda = 2t\cos\theta$$

na qual n é um número inteiro, λ é o comprimento de onda da radiação incidente e t é a separação das placas.

Em geral, as superfícies semiespelhadas devem possuir um alto grau de refletividade. Tal fato é necessário, uma vez que o contraste das franjas será maior quanto maior o coeficiente de refletividade. Valores acima de 0.9 são aceitáveis. As superfícies internas precisam também ser planas com precisão de λ /10 ou maior.

A forma do padrão de interferência consiste em inúmeros círculos concêntricos (Fig. 2 - direita) cuja posição angular pode ser inferida a partir da equação acima.

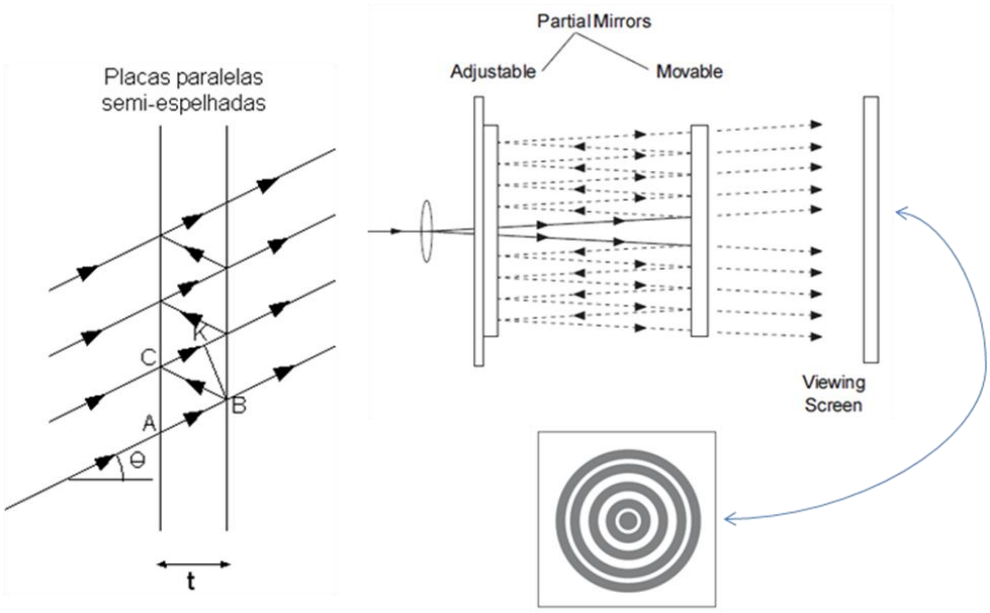


Figura 2. Representação dos raios incidentes e das múltiplas reflexões em um interferômetro de Fabry-Perot.

O interferômetro Fabry-Perot que temos no laboratório tem um espelho fixo ajustável em ângulo e um espelho móvel. Ambos os espelhos são do tipo semitransparente de modo que ocorre a interferência múltipla, mas mesmo assim é possível observar o fenômeno externamente ao par de espelhos. Com o micrômetro lateral ao interferômetro é possível mover o espelho móvel. Evidentemente o espelho se move por λ tipicamente, enquanto que o micrômetro se move por mícrons.

Procedimento

1) Ligue a lâmpada espectral de sódio. Esta lâmpada fica ligada durante todo o tempo da experiência. Melhor para a vida dela.

2) Alinhe o espectrômetro ótico. Ajuste lentes e colimador até que você veja uma fenda bem nítida. Marque o zero na escala.

3) Coloque a rede de difração bem perpendicular ao ramo da objetiva.

4) Agora procure as raias da difração. Veja a raia dupla cor de laranja. Este é o dubleto do sódio. Tente medir a separação do dubleto em primeira e segunda ordens de difração.

5) Meça o ângulo médio para o qual aparece a raia dupla em primeira ordem. Meça para a esquerda e para a direita. O comprimento de onda médio do dubleto se calcula pela equação:

$$d.\,\mathrm{sen}\theta = n.\,\lambda\ ,$$

na qual d é a distância entre linhas na rede de difração e θ é o ângulo no qual aparece o dubleto e n é a ordem da difração.

6) Agora observe a lâmpada de sódio pelo Fabry-Perot. Coloque a lente entre lâmpada e interferômetro até obter a melhor imagem. Regra zero na manipulação deste equipamento de precisão: NÃO TOQUE NOS ESPELHOS!!! Você verá uma série de lâmpadas. Alinhe o espelho ajustável para sobrepor as imagens múltiplas da lâmpada. Mais cedo ou mais tarde aparecem franjas de interferência. Ajuste até obter os famosos anéis de interferência. Se você não conseguir, chame o mestre. Se ele não conseguir também, chame os bombeiros!

7) Com o interferômetro alinhado gire-o e ligue o Laser de He-Ne. Faça a luz do Laser incidir sobre a parede branca passando pelos espelhos. NUNCA OLHE DIRETAMENTE PARA DENTRO DO LASER! Gire o micrômetro lateral do Fabry-Perot e observe como a luz do Laser oscila conforme se move o espelho móvel.

8) Meça a constante do Fabry-Perot. Bom mesmo é medir umas N = 100 oscilações da intensidade e ver quanto "andou" o micrômetro. Cada oscilada completa significa que o espelho móvel andou $\lambda/2$. Fazendo d* a leitura de deslocamento no micrômetro e d o movimento real dos espelhos, cujo valor é $N\lambda/2$ e conhecendo-se λ, pode-se gerar um fator de correção d/d* que deve ser multiplicado à leitura do micrômetro para um medida mais precisa da separação do dubleto.

9) Agora vem a medida da separação entre raias do dubleto. Volte a girar o Fabry-Perot para a lâmpada de sódio. Desligue o Laser.

10) Como as duas raias no laranja tem comprimento de onda levemente diferente, os anéis devido a uma raia aparecem geometricamente concêntricas com os anéis da outra raia. Girando o micrômetro é possível sobrepor estes anéis. Marque a leitura no micrômetro. A partir daí, gire o micrômetro até que as duas raias se sobreponham novamente. Marque este novo valor no micrômetro. Agora você sabe quanto "andou" o micrômetro de sobreposição em sobreposição. Calcule quanto "andou" o espelho móvel. Use a constante do Fabry-Perot.

11) A separação entre as duas raias do dubleto do sódio será dada pela equação:

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = \frac{\overline{\lambda}^2}{2(d_1 - d_2)}$$

na qual λ é o comprimento de onda médio do dubleto que você mediu com o espectrômetro ótico e d_1 - d_2 é o deslocamento real do espelho do Fabry-Perot de sobreposição em sobreposição. Calcule a separação.

12) Calcule agora a energia média do dubleto de sódio em elétron-volt. Calcule a energia que separa as raias do dubleto, também em eV.

13) Complete seu relatório Vapt-vup!

UFPR- Departamento de Física

Laboratório de Física Moderna

Relatório Vapt-Vupt

Bloco 02: O DUBLETO DO SÓDIO

1) Faça um desenho esquemático da montagem experimental:

2) Meça as linhas do dubleto do sódio nas difrações de primeira e segunda ordem usando o espectrômetro.

Ordem da difração	Cor e linha do dubleto	θ esquerdo	θ direito	λ médio(Å)

3) Faça a medida da constante do Fabry-Perot:

Medida	Número de oscilações	Medida no micrômetro

4) Calcule a constante d/d* do interferômetro.

5) Faça a medida da separação do dubleto do sódio usando o interferômetro de Fabry-Perot.

Medida	Medida no micrômetro

6) Calcule a separação entre raias.

7) Calcule agora, em unidades de eV, a energia média do dubleto de sódio e a energia que separa as raias do dubleto.