

Espectroscopia Óptica – Monocromador: Emissão Hidrogênio e Deutério

Mabily Bilancieri Rosa - 11965564

Sofia de Freitas Martins - 11810672

Relatório feito para a disciplina de Laboratório Avançado de Física II. Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil. 26 de junho de 2024.

Resumo

Neste relatório, estudamos o espectro de emissão do mercúrio, usando uma lâmpada de Hg, e os espectros de emissão do deutério e do hidrogênio, utilizando uma lâmpada de deutério. Por meio desse estudo, fomos capazes de calibrar o equipamento e obtivemos um coeficiente angular de $(1,004 \pm 0,009)$ no gráfico dos comprimentos de onda do Hg esperados pelos obtidos, indicando que o monocromador possui uma boa precisão. Também determinamos a constante de Rydberg para o deutério e o hidrogênio medindo os espectros na 1ª e 2ª ordem, resultando em $R_D = (1,0969 \pm 0,0003)(\times 10^{-7})m^{-1}$ e $R_H = (1,0966 \pm 0,0003)(\times 10^{-7})m^{-1}$, ambos com erros relativos ao NIST de $\epsilon = 0,02\%$. Por fim, chegamos na razão entre a massa de hidrogênio e de deutério de $(0,50 \pm 0,01)$ e na razão entre a largura a meia altura do hidrogênio e do deutério, ambos na interação spin-órbita, de $(1,4 \pm 0,3) \approx \sqrt{2}$.

Palavras-chave: espectroscopia; monocromador; calibração; mercúrio; hidrogênio e deutério; constante de Rydberg

1 Introdução

A análise espectroscópica do hidrogênio no século XIX levou a descobertas importantes, resultando na fórmula de Balmer em 1885, que descreve os comprimentos de onda (λ_n) das linhas espectrais na série de Balmer do hidrogênio:

$$\lambda_n = 3646 \times \frac{n^2}{(n^2 - 4)} \text{ \AA} \quad (1)$$

onde $n = 3, 4, 5, \dots$ representa as diferentes linhas da série.

Em 1890, Rydberg generalizou a fórmula de Balmer:

$$\frac{1}{\lambda_n} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (2)$$

onde $n = 3, 4, 5, \dots$ e R é a constante de Rydberg. Posteriormente, a fórmula de Rydberg foi estendida para incluir outras séries espectrais:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (3)$$

onde n_1 pode assumir os valores 1, 2, 3, 4, 5, ... com a restrição de que $n_2 > n_1$.

O modelo atômico de Bohr foi proposto em 1913 propôs que a energia de um elétron em um estado estacionário no átomo de hidrogênio é quantizada e pode ser calculada pela fórmula:

$$E_n = -\frac{mZ^2e^4}{(4\pi\epsilon_0)^22\hbar^2} \frac{1}{n^2} \quad (4)$$

onde m é a massa do elétron, Z é o número atômico ($Z = 1$ para hidrogênio) e e é a carga do elétron. A energia da radiação emitida/absorvida em uma transição eletrônica é dada por:

$$E_i - E_f = \frac{hc}{\lambda} = \frac{mZ^2e^4}{(4\pi\epsilon_0)^22\hbar^2} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (5)$$

onde $n_i\hbar$ e $n_f\hbar$ são os momentos angulares do elétron nos estados inicial i e final f .

A teoria de Bohr também permitiu expressar a constante de Rydberg (R_H) em termos de constantes fundamentais:

$$R_H = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2h^3c} \quad (6)$$

A descoberta do deutério, isótopo do hidrogênio com um nêutron no núcleo, e a observação de que

diferentes isótopos emitem espectros ligeiramente diferentes levaram à inclusão da massa reduzida μ nas equações.

A massa reduzida considera o movimento simultâneo do elétron e do núcleo:

$$\mu = \frac{mM}{(M + m)} \quad (7)$$

onde M é a massa do núcleo. A energia de radiação para íons hidrogenóides (um elétron orbitando Z prótons) é então expressa como:

$$E_i - E_f = \frac{hc}{\lambda} = \frac{\mu_X Z^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (8)$$

onde μ_X é a massa reduzida do átomo X .

A relação inversa entre o comprimento de onda e a massa reduzida é dada por:

$$\frac{1}{\lambda_X} \propto \mu_X \quad (9)$$

Finalmente, a diferença relativa entre os comprimentos de onda emitidos por hidrogênio λ_H e deutério λ_D está relacionada à razão entre suas massas nucleares M_H e M_D :

$$\frac{\lambda_H - \lambda_D}{\lambda_H} = \frac{\frac{1}{\mu_H} - \frac{1}{\mu_D}}{\frac{1}{\mu_H}} = \frac{1 - \frac{M_H}{M_D}}{1 + \frac{M_H}{m}} \quad (10)$$

onde M_H é a massa do próton M_p e a razão entre as massas do próton e do elétron é $\frac{M_p}{m} = 1836,15$.

Também temos que o valor da constante de Rydberg obtida pelo espectro de hidrogênio e de deutério vão diferir da seguinte maneira:

$$\frac{R_H}{R_D} \approx \left(1 - \frac{m}{2M_p} \right) \quad (11)$$

Podemos converter a diferença de comprimento de onda $\lambda_D - \lambda_H$ em uma diferença de frequência:

$$\nu_H - \nu_D = c \frac{\lambda_D - \lambda_H}{\lambda_D \lambda_H} \quad (12)$$

$$\frac{\Delta\nu_{D-H}}{\nu_D} = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (13)$$

Da equação (11), obtemos:

$$\frac{\Delta\nu_{D-H}}{\nu_D} = \frac{R_H - R_D}{R_D} \approx -\frac{m}{2M_p} \approx -2,72 \times 10^{-4} \quad (14)$$

Essas fórmulas são essenciais para a análise espectroscópica, permitindo determinar a composição isotópica de amostras e calcular massas nucleares com alta precisão.

2 Objetivos

Os objetivos dessa prática incluem calibrar o equipamento com uma lâmpada de mercúrio, a fim de obter um gráfico linear com as linhas espectrais do Hg experimental e teoricamente, variar as fendas de entrada e saída do monocromador para obtenção de melhor resolução das linhas espectrais e determinar a razão entre as massas nucleares do hidrogênio e deutério a partir de medições de segunda ordem.

3 Montagem experimental

Para esta prática iremos utilizar:

- Lâmpadas de mercúrio (Hg) e Hidrogênio e Deutério ($H_2 - D_2$)

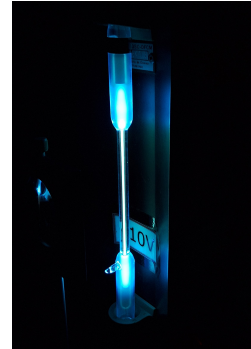


Figura 1: Lâmpada de mercúrio. Elaborado pelos compiladores

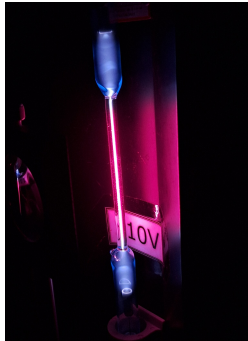


Figura 2: Lâmpada de Deutério-Hidrogênio. Elaborado pelos compiladores

- Lentes convergentes

O sistema óptico é responsável por focar a luz da lâmpada na entrada do monocromador, ele é composto por duas lentes montadas em um trilho.



Figura 3: Lentes sistema óptico. Da esquerda, uma lente com foco de 20 cm e da direita, de 5 cm

- Monocromador

Usando uma grande difração o monocromador separa a luz de incidência em um espectro. Espelhos são utilizados para refletir a luz e aumentar o caminho óptico dentro do equipamento, assim a distância entre as faixas do espectro aumenta. Os espelhos podem ser rotacionados e, ao variar o ângulo de rotação, é selecionado o comprimento de onda que passa pela saída e atinge a fotomultiplicadora. Na entrada e saída existem reguladores que podem ser abertos ou fechados para controlar a quantidade de luz passando pelas fendas.

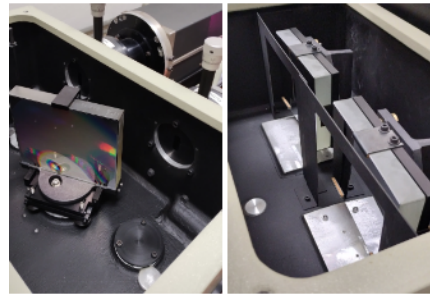


Figura 4: Interior do monocromador. À esquerda, grade de difração e à direita, espelhos

- Fotomultiplicadora

A fotomultiplicadora é um detector de luz extremamente sensível. Seu funcionamento se dá por efeito fotoelétrico. Nesse processo, fótons de luz incidente atingem um material e geram elétrons livres, resultando em uma corrente elétrica detectável. Essa corrente elétrica é proporcional à intensidade da luz incidente.

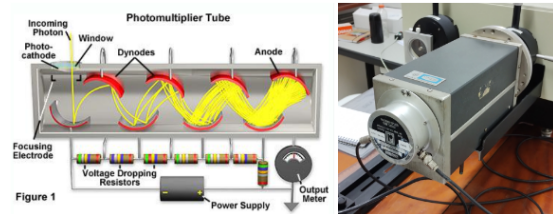


Figura 5: À esquerda, esquematização do funcionamento de uma fotomultiplicadora e à direita, fotomultiplicadora do laboratório

- Fonte de alimentação da lâmpada
- Eletrômetro



Figura 6: Da esquerda para direita: Software para coletar os dados, eletrômetro e fonte de alimentação. Elaborado pelos compiladores

- Motor de passo

Este componente é responsável pela interação entre computador, monocromador e eletrômetro.



Figura 7: Motor de passo.

- Controle manual

Controle que muda o comprimento de onda do monocromador manualmente (para utilizá-lo é necessário que a chave da interface esteja na opção manual). Ideal para quando se deseja avaliar o sinal conforme se varia comprimento de onda do monocromador.



Figura 8: Controle manual

- Software

Ao abrir o software, selecione a opção *coletar dados*.

Medida espectral: Esta opção define como vai ser feita a medida, os dados vão ser salvos em dois arquivos. O primeiro é uma imagem do gráfico feito pelo próprio software. O outro é um texto com todos os pontos medidos.

As duas primeiras opções são para escolher o nome do arquivo de texto e de imagem respectivamente. Em seguida é definido o número de médias por passo, que determina o intervalo entre os pontos medidos. As últimas duas opções definem o intervalo de medida, a posição final define o comprimento no último ponto e a posição inicial define o comprimento no início.

Set posição atual: Sempre ao abrir o software ou mudar a interface para micro, é necessário informar ao computador qual é o comprimento de onda correto do monocromador com duas casas decimais de precisão, para que o software esteja com o lambda calibrado.

GOTO novo lambda: Opção para deslocar o comprimento de onda do monocromador automaticamente.



Figura 9: Software

- Montagem experimental

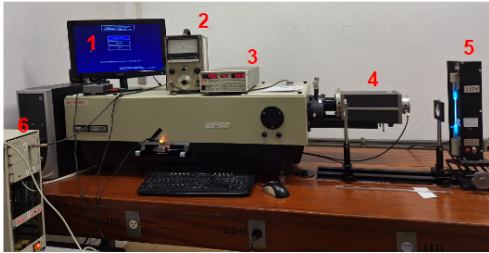


Figura 10: Montagem experimental. (1) Software, (2) Eletrômetro, (3) Fonte, (4) Fotomultiplicadora, (5) Lâmpada, (6) Motor de passo. Elaborado pelos compiladores

4 Procedimento experimental

Para a realização dos experimentos deve-se ligar, primeiramente, a lâmpada, logo em seguida a fonte de alimentação, o eletrômetro, o computador e, por fim, o motor de passo.

4.1 Calibração do equipamento

1. Coloque a lâmpada de mercúrio
2. Alinhe as lentes no trilho para ter o máximo de luz entrando nas fendas do monocromador
3. A partir das principais linhas do Hg ajuste as intensidades com o auxílio do controle do motor de passo e do eletrômetro

4. Anote o comprimento de onda esperado e o que foi medido
5. Faça um gráfico $\lambda_{esp} \times \lambda_{med}$

4.2 Variação das fendas

1. Fixe as fendas horizontais (de entrada e saída do monocromador)
2. Faça medidas de uma linha do Hg variando as fendas verticais
3. Agora, fixe a fenda vertical que se obteve melhor resultado e faça medidas variando as fendas horizontais

4.3 Primeira ordem

1. Coloque a lâmpada de Deutério-Hidrogênio
2. Alinhe as lentes no trilho para ter o máximo de luz entrando nas fendas do monocromador
3. Encontre as linhas violeta, azul, verde e vermelha do hidrogênio e ajuste suas intensidades com o auxílio do controle do motor de passo e do eletrômetro
4. Anote o comprimento de onda esperado e o que foi medido
5. A partir da equação (2) faça um gráfico e encontre a constante de Rydberg

4.4 Segunda ordem

1. Encontre a linha vermelha na segunda ordem para visualizar o dubleto
2. Encontre a razão entre as massas nucleares do hidrogênio e deutério

4.5 Separação das linhas H-D

5 Resultados e Discussão

5.1 Calibração do equipamento

Calibramos o equipamento utilizando uma lâmpada de mercúrio e ao plotar um gráfico do comprimento de onda esperado em função do observado, obtemos:

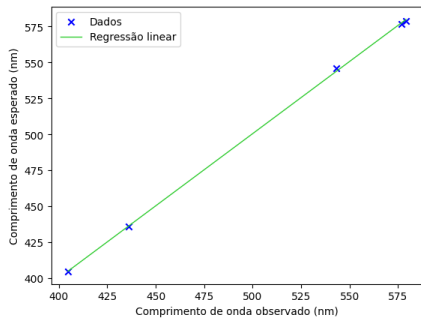


Figura 11: Calibração do equipamento utilizando uma lâmpada de Hg. Elaborado pelos compiladores

| $\lambda_{esperado}$ (nm) | $\lambda_{observado}$ (nm) | ϵ (%) |
|---------------------------|----------------------------|----------------|
| 404,65 | 404,80 | 0,037% |
| 435,83 | 435,94 | 0,252% |
| 546,07 | 546,08 | 0,002% |
| 576,95 | 577,00 | 0,009% |
| 579,06 | 579,14 | 0,014% |

Tabela 1: Comparação entre valores de λ observados no experimento e os esperados, tabulados pelo NIST. Elaborado pelos compiladores

Ao fazer a regressão linear, o coeficiente linear representa um desvio constante nas medições devido à erros sistemáticos experimentais, enquanto o coeficiente angular indica o quão próximo os valores observados estão dos esperados, tendo maior proximidade quanto mais próximo de 1. Obtemos um coeficiente linear de $(-1,7 \pm 0,3)$ e um angular de $(1,004 \pm 0,009)$, indicando portanto que os erros provenientes do equipamento são baixos, não interferindo no experimento, e que os comprimentos de onda obtidos estão bem próximos aos esperados pelo NIST, com erros relativos ϵ muito baixos, conforme indicado pela tabela 1.

5.2 Variação das fendas

Primeiramente, fixamos a fenda horizontal em 1mm e variamos a abertura da fenda vertical de 1 a 10 μm e depois em 12,20 e 30 μm . Todas essas medidas foram feitas na emissão de Hg I em 546,07nm, uma vez que essa é uma das emissões mais fortes no espectro

do mercúrio. Para melhor visualização, fizemos um fit gaussiano e normalizamos a intensidade, já que observamos leves variações nas assíntotas (linhas de base da gaussiana) e ruídos no pico a medida que a fenda foi sendo fechada.

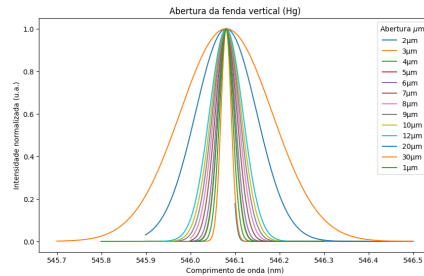


Figura 12: Comportamento da emissão de Hg I em 546,07nm conforme se varia a abertura da fenda vertical. Elaborado pelos compiladores

Em seguida, fixamos a fenda vertical em 3 μm e variamos a abertura da fenda horizontal de 1 a 4 mm. Como resultado, temos:

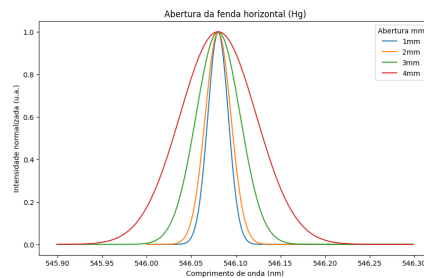


Figura 13: Comportamento da emissão de Hg I em 546,07nm conforme se varia a abertura da fenda horizontal. Elaborado pelos compiladores

O comportamento demonstrado nos gráficos acima indica que quanto menor a abertura da fenda, tanto na horizontal quanto vertical, menor a largura a meia altura.

5.3 Primeira ordem

Mudando para a lâmpada de deutério, analisamos o espectro de emissão de deutério e do hidrogênio, ambos na primeira ordem:

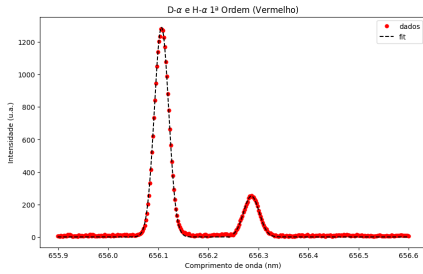


Figura 14: Emissão de deutério e hidrogênio no vermelho, na primeira ordem. Elaborado pelos compiladores

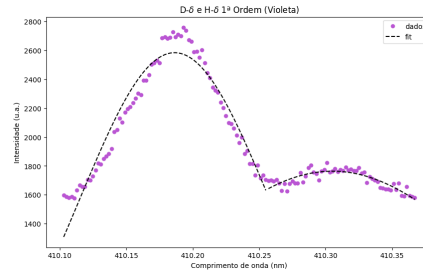


Figura 17: Emissão de deutério e hidrogênio no violeta, na primeira ordem. Elaborado pelos compiladores

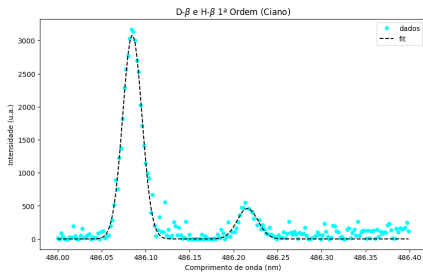


Figura 15: Emissão de deutério e hidrogênio no ciano, na primeira ordem. Elaborado pelos compiladores

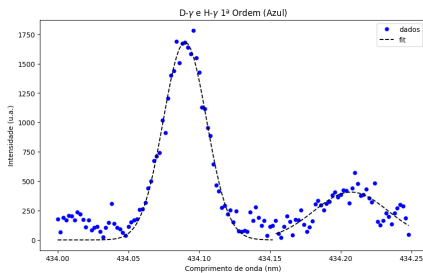


Figura 16: Emissão de deutério e hidrogênio no azul, na primeira ordem. Elaborado pelos compiladores

A partir dos fits gaussianos, obtemos os seguintes valores, que usaremos ao longo do relatório para obter o valor de M_H/M_D :

| linhas | λ_D (nm) | λ_H (nm) | $\lambda_H - \lambda_D$ (nm) |
|--------------------------|------------------|------------------|------------------------------|
| $D - \alpha; H - \alpha$ | 656,105 | 656,286 | 0,181 |
| $D - \beta; H - \beta$ | 486,084 | 486,215 | 0,131 |
| $D - \gamma; H - \gamma$ | 434,090 | 434,210 | 0,120 |
| $D - \delta; H - \delta$ | 410,193 | 410,301 | 0,108 |

Tabela 2: Valores dos comprimentos de onda do deutério (λ_D) e hidrogênio (λ_H) obtidos pelos ajustes gaussianos, na primeira ordem. Elaborado pelos compiladores

5.4 Segunda ordem

Também analisamos a emissão de deutério e hidrogênio na segunda ordem, fazendo os fits gaussianos e obtendo os valores tabelados abaixo dos gráficos:

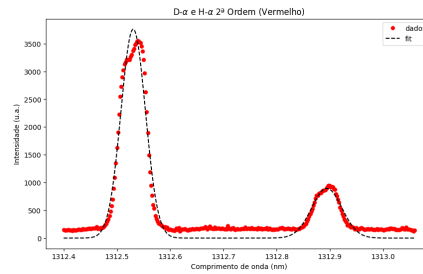


Figura 18: Emissão de deutério e hidrogênio no vermelho, na segunda ordem. Elaborado pelos compiladores

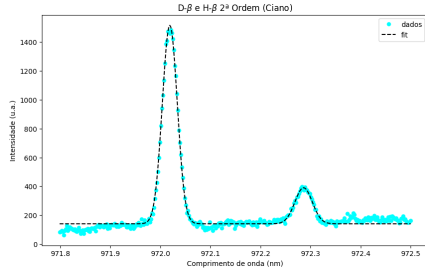


Figura 19: Emissão de deutério e hidrogênio no ciano, na segunda ordem. Elaborado pelos compiladores

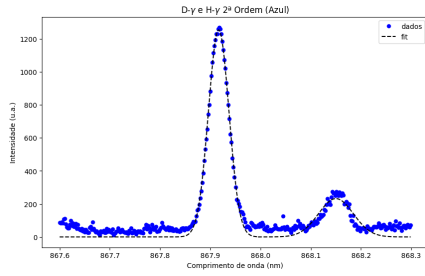


Figura 20: Emissão de deutério e hidrogênio no azul, na segunda ordem. Elaborado pelos compiladores

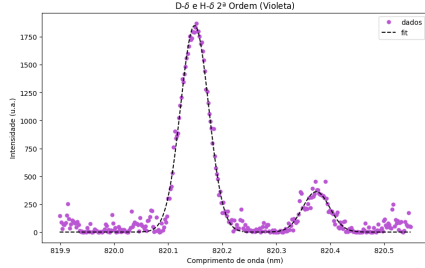


Figura 21: Emissão de deutério e hidrogênio no violeta, na segunda ordem. Elaborado pelos compiladores

| linhas | λ_D (nm) | λ_H (nm) | $\lambda_H - \lambda_D$ (nm) |
|--------------------------|------------------|------------------|------------------------------|
| $D - \alpha; H - \alpha$ | 1312,540 | 1312,903 | 0,363 |
| $D - \beta; H - \beta$ | 972,015 | 972,283 | 0,268 |
| $D - \gamma; H - \gamma$ | 867,918 | 868,151 | 0,233 |
| $D - \delta; H - \delta$ | 820,152 | 820,373 | 0,221 |

Tabela 3: Valores dos comprimentos de onda do deutério (λ_D) e hidrogênio (λ_H) obtidos pelos ajustes gaussianos, na segunda ordem. Elaborado pelos compiladores

5.5 Determinação de M_H/M_D

Rearranjando os termos da equação (10), temos:

$$1 - \frac{M_H}{M_D} = \left(1 + \frac{M_H}{m}\right) \left(\frac{\lambda_H - \lambda_D}{\lambda_H}\right) \quad (15)$$

Isolando M_H/M_D e sabendo que $(1 + M_H/m) = 1837,15$, obtemos:

$$\frac{M_H}{M_D} = 1 - \left(1837,15 \left(\frac{\lambda_H - \lambda_D}{\lambda_H}\right)\right) \quad (16)$$

Pelas tabelas 1 e 2, sabemos $\lambda_H - \lambda_D$, portanto basta dividir esse valor por λ_H e utilizar a equação acima para obter M_H/M_D . Os resultados estão na tabela abaixo:

| ordem | $\lambda_H - \lambda_D$ (nm) | $\lambda_H - \lambda_D/\lambda_H$ | M_H/M_D |
|-------|------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 1 | 0,181 | 0,000276 | 0,493 |
| 1 | 0,131 | 0,000269 | 0,506 |
| 1 | 0,120 | 0,000276 | 0,493 |
| 1 | 0,108 | 0,000263 | 0,517 |
| 2 | 0,363 | 0,000276 | 0,493 |
| 2 | 0,268 | 0,000276 | 0,493 |
| 2 | 0,233 | 0,000268 | 0,508 |
| 2 | 0,221 | 0,000269 | 0,506 |

Tabela 4: Valores dos comprimentos de onda do deutério (λ_D) e hidrogênio (λ_H) obtidos pelos ajustes gaussianos, na segunda ordem. Elaborado pelos compiladores

Fazendo a média, obtemos um valor $\overline{\frac{M_H}{M_D}} = (0,50 \pm 0,01)$, bem próximo ao previsto pela bibliografia [1],

que dá como valor 0,500248. Vemos portanto, que a massa do hidrogênio é a metade da massa do deutério.

5.6 Determinação da Constante de Rydberg

Utilizando os resultados das tabelas 2 e 3 e a equação (2), podemos plotar gráficos de $1/\lambda_n$ vs $(1/4 - 1/n^2)$ para descobrir os valores das constantes de Rydberg para o hidrogênio e para o deutério, que serão os coeficientes angulares dos gráficos conforme equação citada.

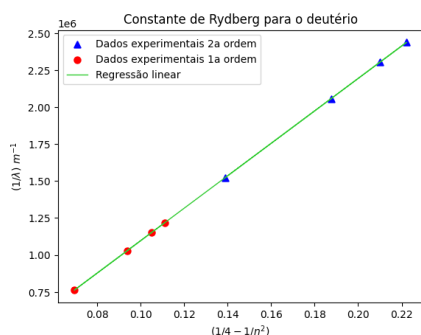


Figura 22: Determinação da constante de Rydberg para o deutério. Elaborado pelos compiladores

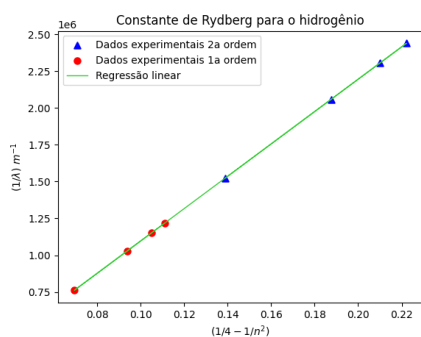


Figura 23: Determinação da constante de Rydberg para o hidrogênio. Elaborado pelos compiladores

Como resultados, temos $R_D = (1,0969 \pm 0,0003)(\times 10^{-7})m^{-1}$ e $R_H = (1,0966 \pm 0,0003)(\times 10^{-7})m^{-1}$, coerentes com os valores tabelados pelo NIST de $R_D = 1,0970746 \times 10^{-7}m^{-1}$ e $R_H = 1,0967758 \times 10^{-7}m^{-1}$, tendo portanto

ambos os erros relativos para o deutério e hidrogênio, de 0,02%. Pelos valores obtidos, temos que $\frac{R_H - R_D}{R_D} \approx (-2,7350 \pm 0,0004)(\times 10^{-4})$, o que é coerente com o valor da razão entre a massa do elétron e duas vezes a do próton, conforme equação (14).

6 Spin-órbita

Da teoria, sabe-se que as larguras à meia altura se relacionam da seguinte forma: $\omega_D = \frac{\omega_H}{\sqrt{2}}$, conforme figura abaixo:

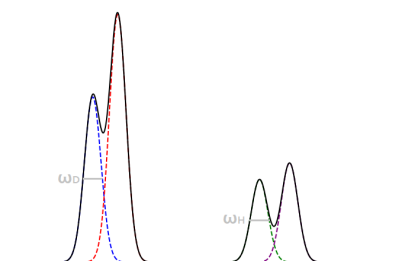


Figura 24: Gráfico hipotético de spin-órbita, com os valores de ω sinalizados. Elaborado pelos compiladores

Conseguimos observar a interação spin-órbita com clareza somente nas linhas α , com abertura da fenda horizontal de 1mm e vertical de $2\mu m$. Fazemos os ajustes gaussianos para obter os ω :

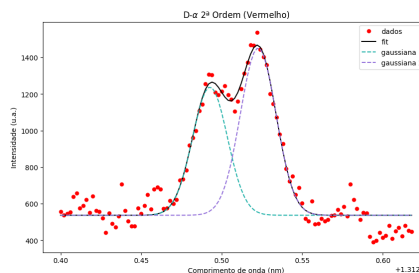


Figura 25: Interação spin-órbita do deutério. Elaborado pelos compiladores

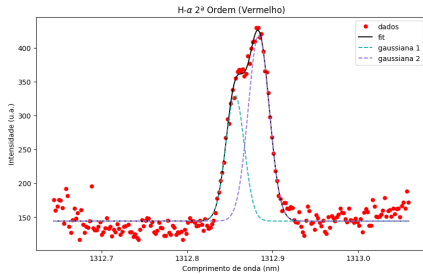


Figura 26: Interação spin-órbita do hidrogênio. Elaborado pelos compiladores

As larguras a meia altura das gaussianas 1 dão os valores de $\omega_D = (0,018 \pm 0,003)\text{nm}$ e $\omega_H = (0,025 \pm 0,002)\text{nm}$, logo $\omega_H/\omega_D = 1,4 \pm 0,3 \approx \sqrt{2}$, portanto se mostrando coerente à teoria.

Analisamos também como o comportamento da interação spin-órbita do deutério é modificado com a variação da abertura da fenda vertical. Normalizamos a intensidade, assim como tínhamos feito para o mercúrio:

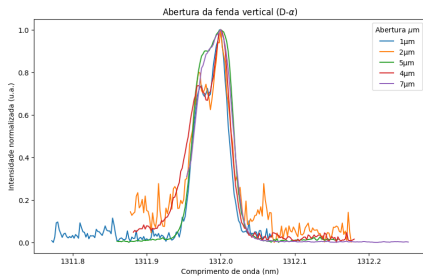


Figura 27: Interação spin-órbita do deutério para diferentes aberturas da fenda vertical. Elaborado pelos compiladores

Conforme gráfico acima, com uma abertura vertical de $5\mu\text{m}$ ainda conseguimos ver, mesmo que minimamente, a interação spin-órbita. A partir de $7\mu\text{m}$ não é possível fazer a distinção dos picos, de forma que não conseguimos analisar essa interação. As larguras a meia altura vão aumentando conforme a abertura aumenta, comportamento similar ao que ocorre no mercúrio. Visualmente, vemos que para valores menores de abertura da fenda, conseguimos distinguir melhor a interação spin-órbita.

7 Conclusão

Os objetivos propostos nesta prática foram cumpridos e nos permitiram compreender a espectroscopia de alta resolução na emissão de mercúrio, hidrogênio e deutério. No gráfico de $\lambda_{esperado} \times \lambda_{obtido}$ para o mercúrio, obtivemos o coeficiente angular de $(1,004 \pm 0,009)$ e linear de $(-1,7 \pm 0,3)$, indicando uma ótima precisão e calibração do equipamento, com erros sistemáticos insignificantes. Apesar disso, ao analisarmos a mudança de comportamento do comprimento de onda de Hg mais intenso de $546,07\text{nm}$ ocasionada pela variação da abertura da fenda, tanto horizontal quanto vertical, vemos que a escolha da abertura influencia de forma diretamente proporcional na largura a meia altura, precisando portanto de novas calibrações ao longo do experimento para manter resultados precisos. Um comportamento semelhante na variação da fenda foi visto em $D - \alpha$.

Ademais, obtemos um $M_H/M_D = (0,50 \pm 0,01)$, indicando que a massa do deutério é o dobro da massa de hidrogênio, o que é consistente uma vez que o deutério é um isótopo do hidrogênio que contém um nêutron adicional em seu núcleo e tanto o próton quanto o nêutron possuem 1 unidade de massa atômica, enquanto a massa do elétron é muito pequena, podendo ser desprezada nessa análise. Também chegamos em $R_D = (1,0969 \pm 0,0003)(\times 10^{-7})m^{-1}$ e $R_H = (1,0966 \pm 0,0003)(\times 10^{-7})m^{-1}$, ambos com erros em relação ao NIST de $0,02\%$, mostrando novamente uma alta precisão do monocromador. Logo, temos como resultado $\frac{R_H - R_D}{R_D} = (-2,7350 \pm 0,0004)(\times 10^{-4})$, valor esse igual ao previsto pela teoria de $-\frac{m}{2M_p}$. Ao analisarmos as larguras a meia altura da interação spin-órbita para $D - \alpha$, chegamos no valor já previsto de aproximadamente $\sqrt{2}$ na razão entre as larguras do hidrogênio e deutério. Por fim, a partir dos resultados obtidos, repara-se que esta prática foi bem sucedida, sendo o aparato experimental bastante preciso, nos possibilitando entender os principais fenômenos de espectroscopia de alta resolução e reforçando sua importância na ciência.

Referências

- [1] J. Stoltenberg, D. Pengra, and J. A. Detwiler.: *Hydrogen-Deuterium Mass Ratio*. Disponível em: <https://www.ifsc.usp.br/~lavfis/lavfiswp/wp-content/uploads/2023/06/Hydrogen-Deuterium-Mass-Ratio.pdf>
- [2] *Strong Lines of Hydrogen (H)*. National Institute of Standards and Technology (NIST). Disponível em: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/hydrogentable2.htm>
- [3] *Strong Lines of Mercury (Hg)*. National Institute of Standards and Technology (NIST). Disponível em: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/mercurytable2.htm>
- [4] *Balmer Lamp Instruction Sheet*. LD Didactic GmbH. Disponível em: <https://www.ifsc.usp.br/~lavfis/lavfiswp/wp-content/uploads/2023/10/Balmer-lamp-deuterated.pdf>
- [5] *THR 100 Monochromator: Instruction Manual*. Jobin Yvon Division d'Instruments S.A. Disponível em: https://www.ifsc.usp.br/~lavfis/lavfiswp/wp-content/uploads/2023/06/Monocromador_Manual.pdf
- [6] Melissinos, A. C., Napolitano J.: *Experiments in modern physics*. p 218-243. Academic Press, 2003.