

# Espectroscopia Óptica - Hidrogênio & Deutério

## Pós-Prática

Guilherme S. de Almeida<sup>1</sup>    Vitória B. Galliac<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Física de São Carlos (USP)

Laboratório Avançado de Física, Agosto 2023



# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Procedimento Experimental
- 3 Resultados Experimentais e Discussão
- 4 Conclusão
- 5 Referências



# Introdução

- Kirchoff & Bunsen (*Circa 1860*): Cada elemento possui um espectro característico (Por que?)
- Balmer (1885): Série de Balmer para linhas do hidrogênio
- Rydberg (1890): Generaliza o espectro de Balmer
- Bohr (1913): Três postulados; explica o espectro dos elementos com grande precisão (para hidrogenoides)

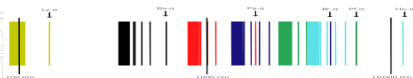


Figura 1: Espectro do H

$$\lambda_n = 3646 \times n^2 / (n^2 - 4)$$

$$1/\lambda_n = R(1/n_i^2 - 1/n_f^2)$$

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

$$R_H = \frac{\mu_H e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c}$$

# Objetivos e Resultados Esperados

Utilizando valores tabelados da base de dados do NIST (*National Institute of Standards and Technology*)

Constante de Rydberg  
 $R_H$  &  $R_D$

$$\star R_H = 1.0967758 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$$

$$\star R_D = 1.0970746 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$$

Interação Spin-Órbita  
(Dubleto)

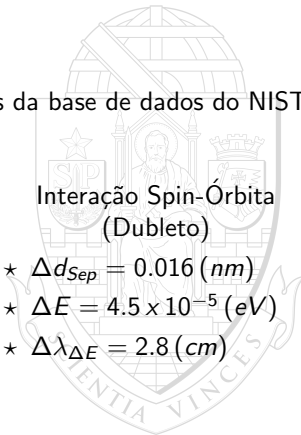
$$\star \Delta d_{Sep} = 0.016 \text{ (nm)}$$

$$\star \Delta E = 4.5 \times 10^{-5} \text{ (eV)}$$

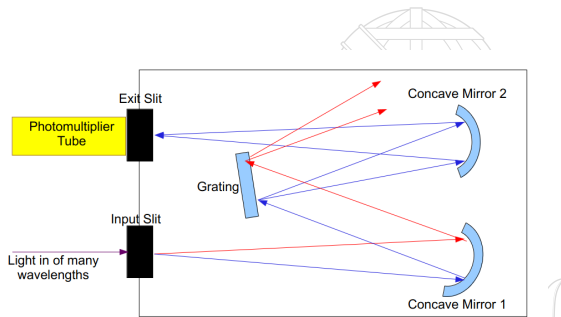
$$\star \Delta \lambda_{\Delta E} = 2.8 \text{ (cm)}$$

Razão de massa  $M_H/M_D$

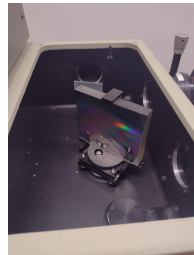
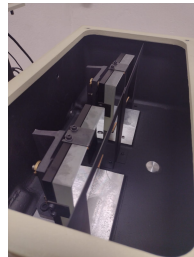
$$\star \frac{M_H}{M_D} = 0.500248$$



# Monocromador



$$m\lambda = d \sin \theta_m, \quad d = 1/N$$



# Montagem, Lâmpada e Fotomultiplicador

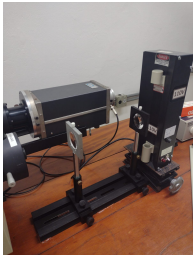


Figura 2: Montagem Experimental: Lâmpada, Lentes e Fotomultiplicador



Figura 3: Lâmpada LLE-8 Hydrogen-Deuterium

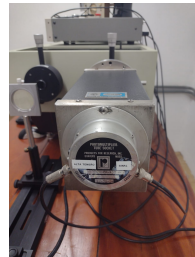
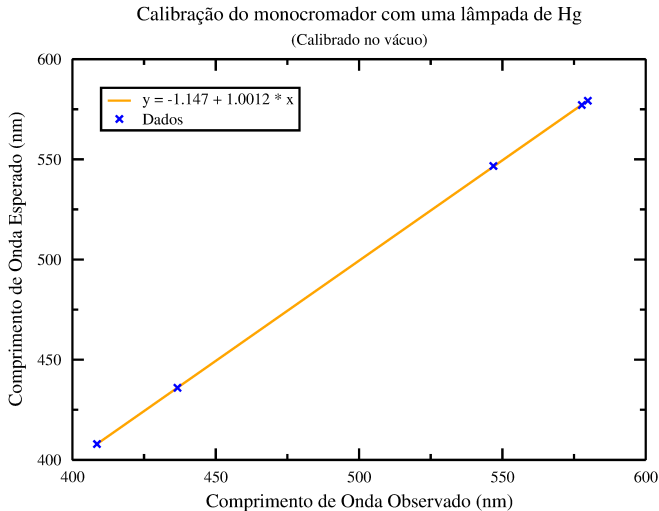


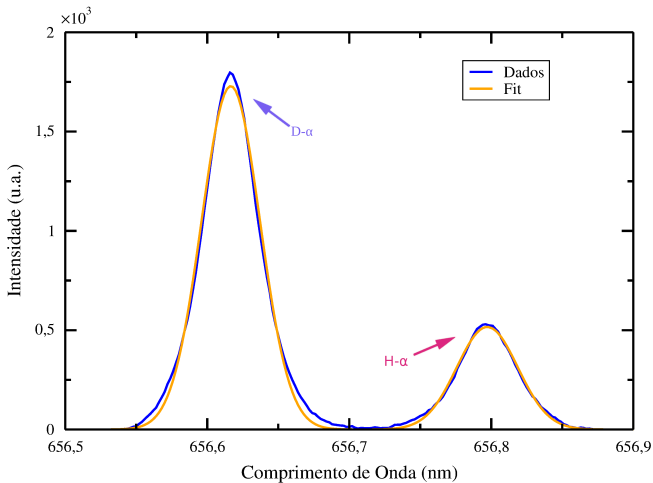
Figura 4: Fotomultiplicador

# Resultados: Calibração do Monocromador

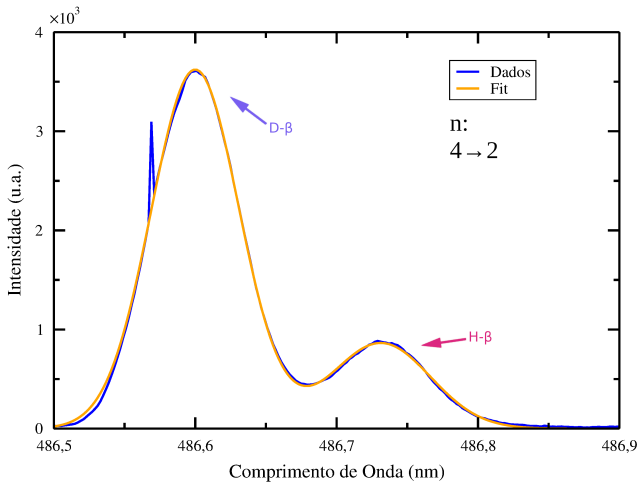


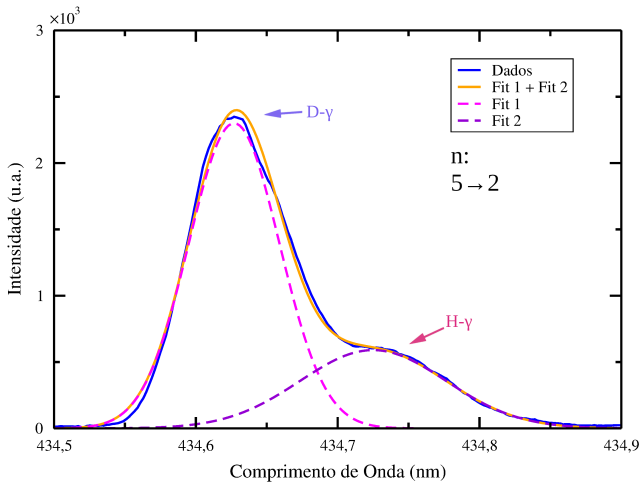
# Resultados: Linhas de H e D (1ª Ordem)

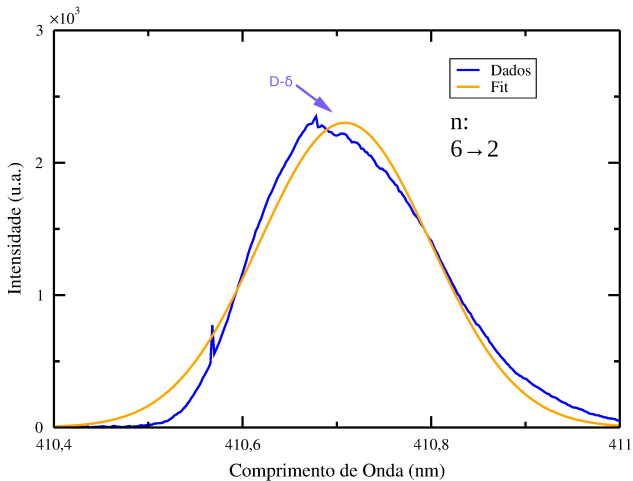
## D- $\alpha$ & H- $\alpha$ 1ª Ordem (Vermelho)



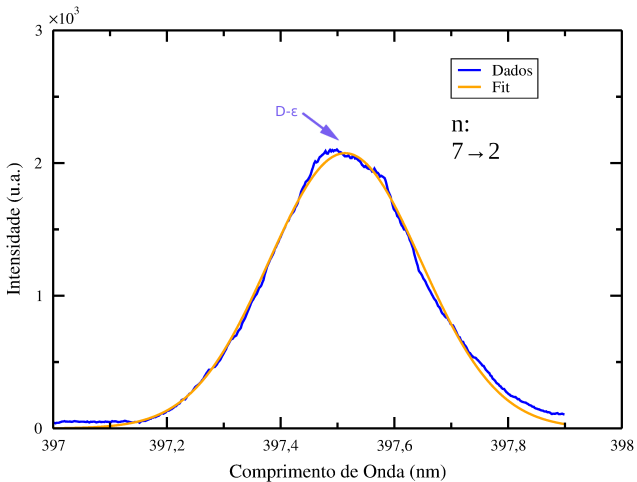


D- $\beta$  & H- $\beta$  1ª Ordem (Ciano)

D- $\gamma$  & H- $\gamma$  1ª Ordem (Azul)

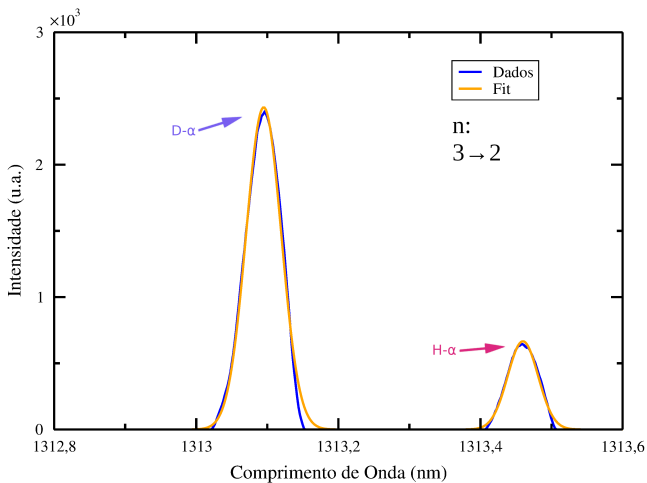
D- $\delta$  1ª Ordem (Violeta)

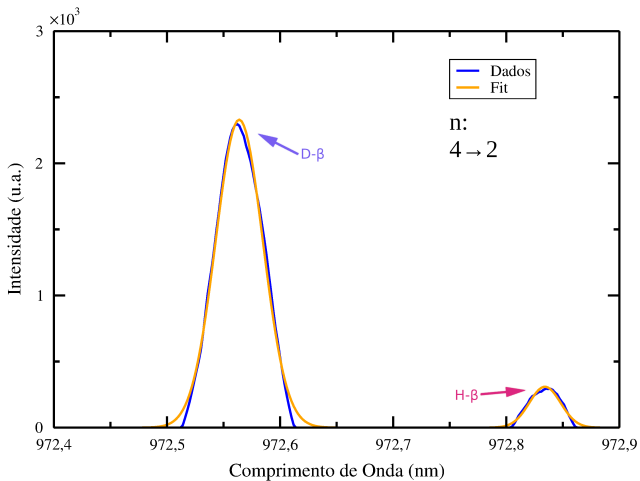
## D-ε 1ª Ordem (Ultravioleta)

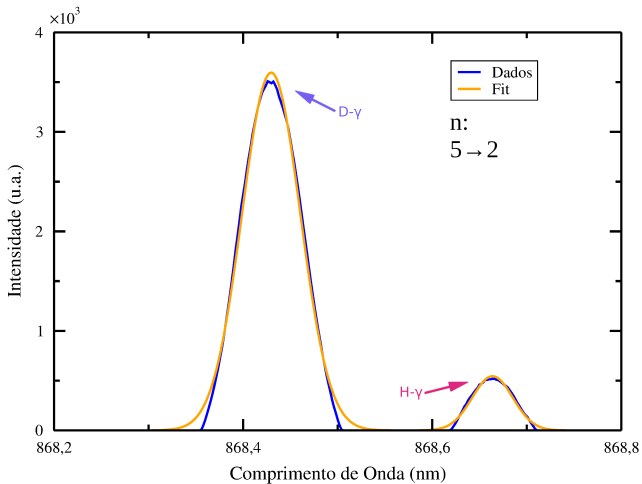


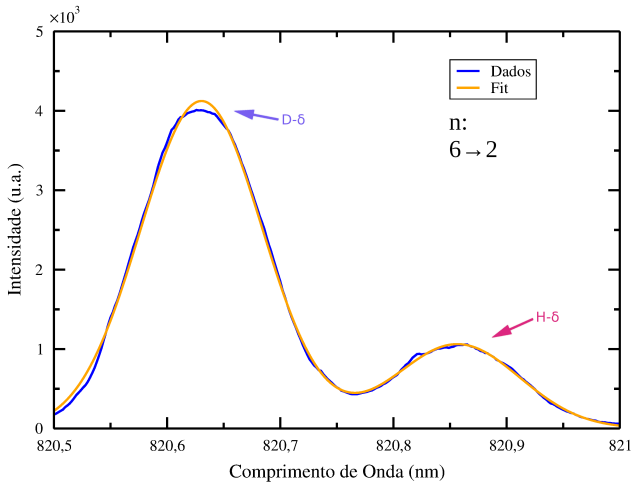
# Resultados: Linhas de H e D (2ª Ordem)

## D- $\alpha$ & H- $\alpha$ 2ª Ordem (Vermelho)



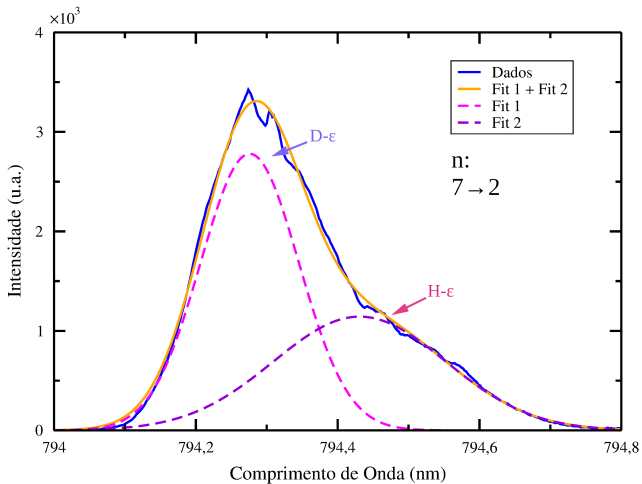
D- $\beta$  & H- $\beta$  2ª Ordem (Ciano)

D- $\gamma$  & H- $\gamma$  2ª Ordem (Azul)

D- $\delta$  & H- $\delta$  2ª Ordem (Violeta)



## D-ε &amp; H-ε 2ª Ordem (Ultravioleta)

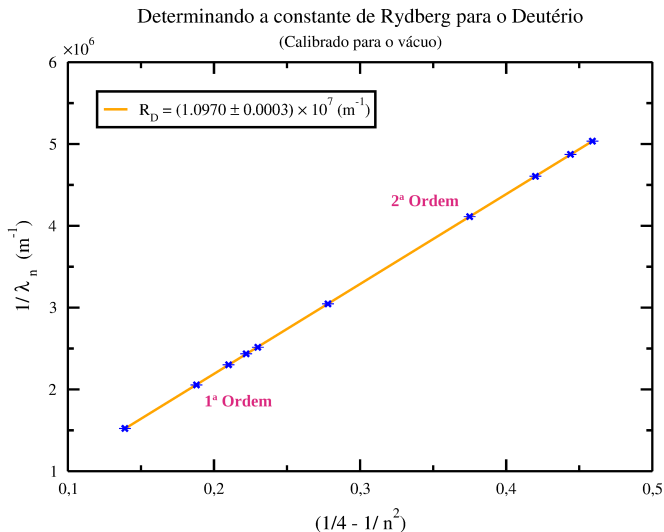


# Resultados: Linhas de Espectrais



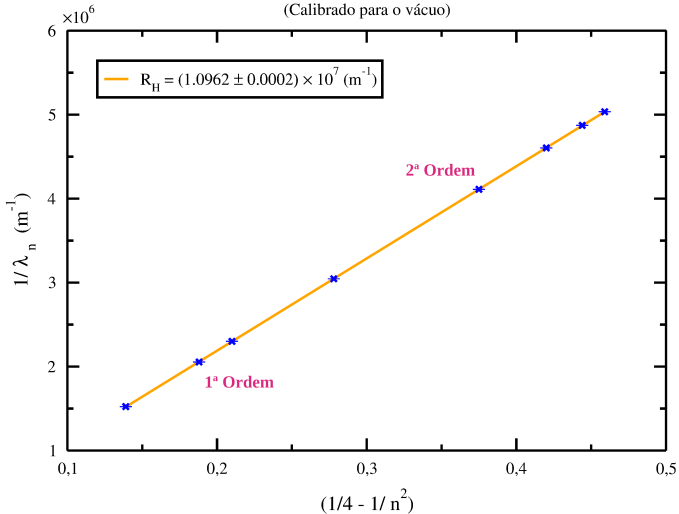
Ordem	$n$	$\lambda_D$ (nm)	Largura $\sigma_D$ (nm)	$\lambda_H$ (nm)	Largura $\sigma_H$ (nm)
1	3	656.80	0.02	656.98	0.02
1	4	486.73	0.03	486.86	0.04
1	5	434.75	0.03	434.84	0.05
1	6	410.82	0.09	não obtido	não obtido
1	7	397.6	0.1	não obtido	não obtido
2	3	1313.45	0.02	1313.82	0.02
2	4	972.83	0.02	973.10	0.01
2	5	868.67	0.03	868.90	0.02
2	6	820.85	0.05	821.08	0.06
2	7	794.49	0.07	794.6	0.1

# Resultados: Constante de Rydberg

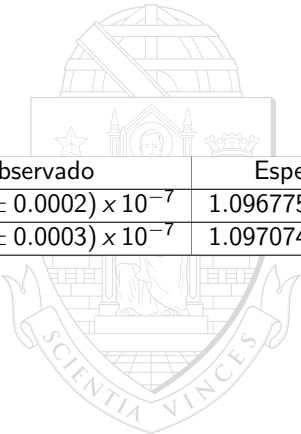


## Determinando a constante de Rydberg para o Hidrogênio

(Calibrado para o vácuo)



# Resultados: Constante de Rydberg



	Observado	Esperado	Razão
$R_H (m^{-1})$	$(1.0962 \pm 0.0002) \times 10^{-7}$	$1.0967758 \times 10^{-7}$	1.0005066
$R_D (m^{-1})$	$(1.0970 \pm 0.0003) \times 10^{-7}$	$1.0970746 \times 10^{-7}$	1.0000776

## Resultados: Razão Massa $M_H/M_D$

Utilizando os valores das linhas espectrais 3 a 5, em 1ª Ordem e 3 a 7 em 2ª Ordem, calculamos a média da razão entre as massas dos núcleos de Hidrogênio e Deutério:

Razão dos núcleos  $R_N = \frac{M_H}{M_D} \rightarrow$  Esperado:  $R_N = 0.500248$

$$\bar{R}_N = (0.52 \pm 0.02)$$

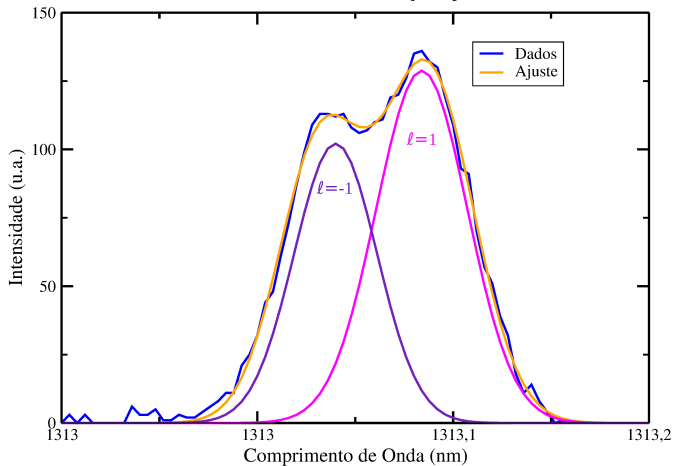
Porém, a linha 7 (2ª Ordem) se desviou muito da média (0.64). Se removermos essa linha e refizermos a análise temos:

Nova Razão dos núcleos  $R_N = \frac{M_H}{M_D}$

$$\bar{R}_N = (0.50 \pm 0.01)$$

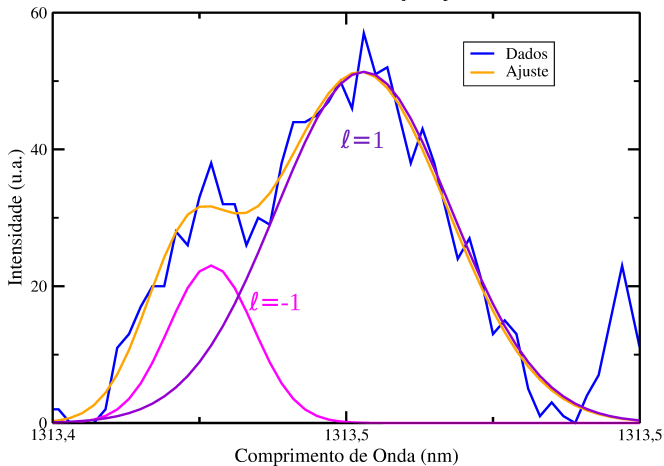
# Resultados: Dupleto (Spin-Órbita)

Espectro Deutério para a linha  $\alpha$  da série de Balmer mostrando a divisão da interação Spin-Órbita



# Resultados: Dupleto (Spin-Órbita)

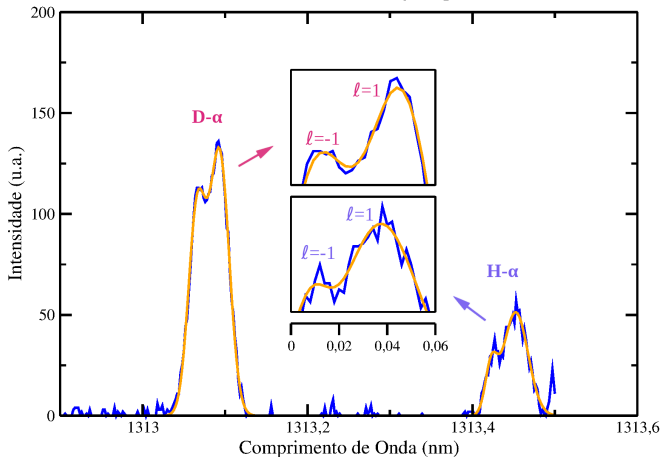
Espectro Hidrogênio para a linha  $\alpha$  da série de Balmer mostrando a divisão da interação Spin-Órbita





# Resultados: Dupleto (Spin-Órbita)

Espectro Hidrogênio-Deutério para a linha  $\alpha$  da série de Balmer mostrando a divisão da interação Spin-Órbita



# Resultados: Dupleto (Spin-Órbita)

	Observado			
	$\lambda_{\ell=-1} (nm)$	Largura (nm)	$\lambda_{\ell=1} (nm)$	Largura (nm)
H	$656.893 \pm 0.001$	0.007	$656.906 \pm 0.001$	0.014
D	$656.715 \pm 0.001$	0.010	$656.726 \pm 0.001$	0.011

	Observado		Esperado
	H	D	
$\Delta d_{sl} (nm)$	$0.013 \pm 0.002$	$0.011 \pm 0.002$	0.016
$\Delta E (eV)$	$(3.7 \pm 0.6) \times 10^{-5}$	$(3.2 \pm 0.6) \times 10^{-5}$	$4.5 \times 10^{-5}$
$\Delta \lambda_{\Delta E} (cm)$	$3.3 \pm 0.5$	$3.9 \pm 0.7$	2.8

# Conclusões

## Sobre a calibração

Na calibração, feita no primeiro dia, tivemos problemas com a ruídos provenientes da eletrônica. Contudo, o *fitting* das 5 linhas da lâmpada de mercúrio foi bem sucedido.

Partindo para o espectro da lâmpada de deutério, conseguimos achar todas as linhas de emissão da série de Balmer, da linha  $\alpha$  até a  $\epsilon$ , tanto para o Deutério (as linhas mais intensas) tanto para o Hidrogênio (as linhas menos intensas e mais largas) devido à presença pequena deste último na lâmpada.

## Sobre a diferença entre ordens

Algo que fica evidente no gráfico dos espectros em 2<sup>a</sup> ordem é o aumento das separações entre linhas de H e D em comparação com as de 1<sup>a</sup> ordem. Isso nos permitiu solucionar 2 linhas,  $\delta$  e  $\epsilon$ , que não conseguimos em 1<sup>a</sup> ordem.

# Conclusões

Com a análise feita na seção de resultados, chegamos no seguinte valor e o comparamos ao esperado:

Razão massa ( $M_H/M_D$ )

Observado	Esperado
$0.50 \pm 0.01$	0.500248

# Conclusões

Usando métodos de regressão encontramos os seguintes valores para a constante de Rydberg:

## Constante de Rydberg ( $R_H$ & $R_D$ )

	Observado	Esperado	Razão
$R_H (m^{-1})$	$1.0962 \pm 0.0002 \times 10^{-7}$	$1.0967758 \times 10^{-7}$	1.0005066
$R_D (m^{-1})$	$1.0970 \pm 0.0003 \times 10^{-7}$	$1.0970746 \times 10^{-7}$	1.0000776

# Conclusões

Finalmente, a análise espectral da separação das linhas  $\alpha$  do H e D nos mostra os seguintes resultados:

## Dubleto (Spin-Órbita)

	Observado		Esperado
	H	D	Ambos
$\Delta d_{sl} (nm)$	$0.013 \pm 0.002$	$0.011 \pm 0.002$	0.016
$\Delta E (eV)$	$3.7 \pm 0.06 \times 10^{-5}$	$3.2 \pm 0.6 \times 10^{-5}$	$4.5 \times 10^{-5}$
$\Delta \lambda_{\Delta E} (cm)$	$3.3 \pm 0.5$	$3.9 \pm 0.7$	2.8

# Conclusão: Sugestões para os próximos grupos

## Nº de médias

No software do Lab, se escolher uma quantidade de médias muito pequena (por exemplo, 150) as flutuações do PMT podem acabar dominando de vez em quando e haveram picos de intensidade. Ver gráfico das linhas  $\beta$  em 1ª ordem.


## Ruído

Para lidar com o ruído, se certificar primeiro que o aterramento está correto, e após isso, ajustar a ordem de grandeza no amplificador. É bom sempre verificar o offset do multímetro e verificar se o ruído está zerado.

## Linhas fracas

Manter as fendas bem abertas quando procurando por linhas de emissão, sinais fracos não serem encontrados de outro jeito. A intensidade de cada linha é um tanto arbitraria na literatura e no próprio experimento não tem tanta importância para os resultados, fazer isso para se certificar de achá-las.

# Referências

-  CARL, N. 2023. Hydrogen Fine Structure, [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/hydfin.html> [2023, August 23]. Georgia State University, Atlanta, GA.
-  KRAMIDA, A. et al. 2022. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.10), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2023, August 20]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
-  RUBIN, B. 2010. Optical Spectroscopy, [Online]. Available: [http://web.mit.edu/rbowru/Public/Jlab/BowensRubin\\_Hspec.pdf](http://web.mit.edu/rbowru/Public/Jlab/BowensRubin_Hspec.pdf) [2023, August 23]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
-  UNKNOWN. 2020. Hydrogen-Deuterium Mass Ratio, [Online]. Available: [https://courses.washington.edu/phys432/HD/HD\\_spectrum\\_2020.pdf](https://courses.washington.edu/phys432/HD/HD_spectrum_2020.pdf) [2023, August 18]. University of Washington, Seattle, WA.