

氢氘光谱

廖荣

中国科学技术大学 物理学院, 合肥 230026

摘要: 此实验中我们利用 Zolix Omni-λ500i 光栅光谱仪测量了汞灯光谱和氢氘光谱数据, 将汞灯光谱测量数据与标准数据进行线性拟合后, 得到了实验仪器的标准数据和测量数据转换方程。并依据此转换方程得到近似标准氢氘谱线数据, 由此进一步计算得到了氢氘谱线的里德伯常数、氢氘核质量比和质子电子质量比等数据。

关键词: 氢氘光谱; 光栅光谱仪; 里德伯常数

Spectrum of Hydrogen and Deuterium

Rong Liao

School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract: In this experiment, the Zolix Omni-λ500i grating spectrometer was used to measure the mercury lamp spectrum and the hydrogen deuterium spectrum. After linear fitting of the mercury lamp spectrum measurement data and the standard data, the conversion equation of the standard data and the measured data was obtained. Based on this conversion equation, approximate standard deuterium spectral line data are obtained, and the Rydberg constant, hydrogen deuterium mass ratio and proton-electron mass ratio of deuterium spectral line are further calculated.

Keywords: Hydrogen-Deuterium Spectrum; Grating Spectrometer; Rydberg Constant

1 实验原理

1.1 同位素和同位素移位

同位素的定义为具有相同质子数, 不同中子数 (或不同质量数) 同一元素的不同核素互为同位素。

在谱线上, 同位素对应的谱线会发生移位, 称为同位素移位。核质量越轻, 移位效应越大, 因此氢具有最大的同位素移位。[3]

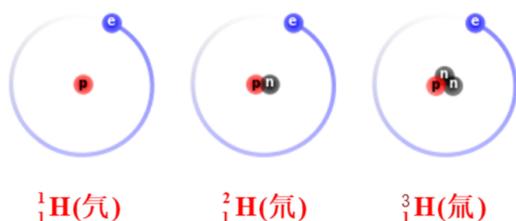


图 1: 氢原子同位素示意图

1.2 氢原子光谱规律

氢和氘的巴尔末公式为:

$$\frac{1}{\lambda_H} = \tilde{\nu}_H = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{1}{\lambda_D} = \tilde{\nu}_D = R_D \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (2)$$

其中 R_H 和 R_D 为氢和氘的里德伯常数, 根据玻尔理论和量子力学对氢原子和类氢原子里德伯常量的分析得到:

$$R_H = \frac{R_\infty}{1 + m_e/M_H} \quad (3)$$

$$R_D = \frac{R_\infty}{1 + m_e/M_D} \quad (4)$$

其中 M_H 、 M_D 为氢和氘的原子核质量, R_∞ 为原子核质量趋于无穷时的里德伯常数。

联立上面四式可以得到

$$\frac{M_D}{M_H} = \frac{m_e}{M_H} \cdot \frac{\lambda_H}{\lambda_D - \lambda_H + \lambda_D \frac{m_e}{M_H}} \quad (5)$$

同时可以根据测量的波长差计算氢氦谱峰波长差：

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \lambda_H - \lambda_D \\ &\approx \left(\frac{1}{R_H} - \frac{1}{R_D}\right) / \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \\ &\approx \frac{m}{2M} \lambda \end{aligned}$$

即 $\frac{M}{m} \approx \frac{\lambda}{2\Delta\lambda}$.

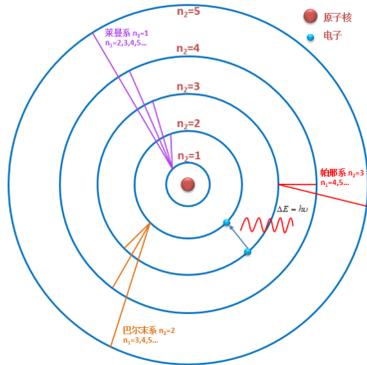


图 2: 氢原子光谱规律示意图

1.3 光栅光谱仪的原理

光栅光谱仪 (单色仪) 是一个光谱分析研究的通用设备, 其元件主要包括: 光栅及反射镜, 准光镜和物镜, 入射出射狭缝旋钮, 信号接收设备 (光电倍增管/CCD), 计算机及软件系统。光栅由计算机软件控制步进电机驱动, 可以获得较高的精度。

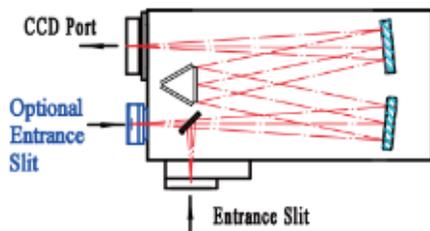


图 3: 光栅单色仪的结构和原理 [2]

从上图可知, 光源发出的光束均匀地照亮在入射狭缝上, 光通过准光镜变成平行光照射到光栅上, 再经过光栅衍射返回, 经过物镜会聚到出射狭缝, 由于光栅的分光作用, 从狭缝出射的光为单色光。当光栅转动时, 从狭缝出射的光由短波到长波依次

出现。出射狭缝位置连接信号接收设备 (光电倍增管/CCD), 可对出射光谱进行数据采集分析。

(6) 1.4 闪耀光栅

光栅光谱仪的核心部件为闪耀光栅, 其可以将一段光谱的衍射最大转移到其他衍射阶而非零阶。

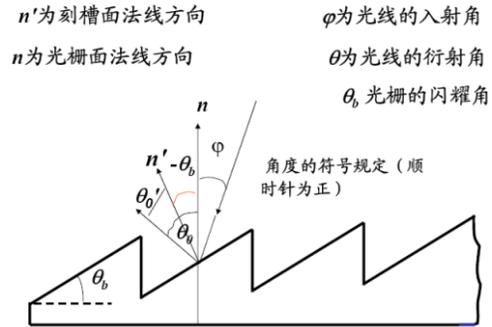


图 4: 闪耀光栅的结构和原理

当入射光与光栅面的法线 n 的方向的夹角为 ϕ 时, 光栅的闪耀角为 θ_b , 取一级衍射项时, 对于入射角为 ϕ , 而衍射角为 θ 时, 光栅方程式为:[1]

$$d = (\sin\phi + \sin\theta) = \lambda \quad (7)$$

2 实验器材

1. Zolix Omni-λ500i 光栅光谱仪 (焦距 $f=500\text{mm}$. 光栅条数: 1200 gr/mm . 扫描步距: 0.005nm .)



图 5: 光栅光谱仪示意图 (同公司 750i 版本)

2. 光电倍增管 (测量范围 $200\text{-}800\text{nm}$)
3. 氢氦灯、汞灯
4. 数据采集器、电源

3 实验步骤与结果

3.1 使用光谱仪测量汞灯光谱，寻峰并记录汞灯谱线波长位置

设置负高压为 $-820V$ ，扫描区域为 $364.0 - 579.0nm$ ，步长为 $0.1nm$ ，扫描并记录原始汞灯光谱，寻峰得到 9 条谱线，将第 5 条谱线波长按参考数据校准后，发现修正为 $-0.42nm$ ，修正处理后的汞灯谱线记录如下：

汞灯谱线序号	波长 λ/nm
1	364.98
2	365.48
3	366.38
4	404.68
5	407.78
6	435.88
7	546.08
8	576.98
9	579.08

表 1: 汞灯谱线波长

3.2 使用光谱仪测量氢氘光谱各个谱峰位置，放大各个谱峰后记录氢氘谱峰数据

设置负高压为 $-1100V$ ，步长为 $0.005nm$ ，扫描并记录原始氢氘光谱，得到 4 条谱线，按照 $-0.42nm$ 进行波长修正，修正处理后的氢氘谱线记录如下：

氢氘谱线能级	波长 λ_H/nm	波长 λ_D/nm
3	656.250	656.075
4	486.175	486.040
5	434.065	433.940
6	410.200	410.080

表 2: 氢氘谱线波长

4 数据分析与结论

4.1 将汞灯谱线测量数据与标准数据参考拟合，得到转换方程

由于测量数据和标准数据非常接近，因此我们作线性转换，即直接对两组数据进行线性拟合。设

标准数据为 λ_s ，测量数据为 λ_m ，拟合结果如下图所示。

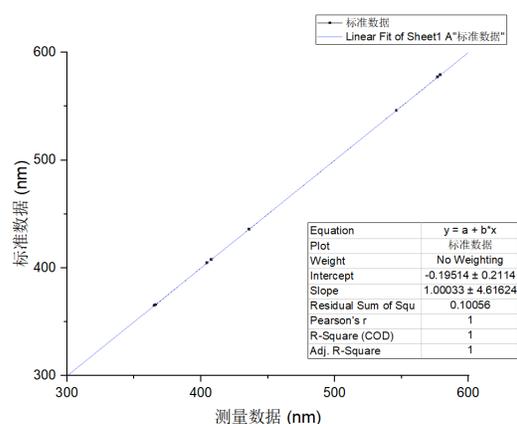


图 6: 标准数据和测量数据的线性转换拟合结果

由拟合结果可以看出，线性转换方程为 $\lambda_s = 1.00033\lambda_m - 0.19514$ ，线性拟合 $R^2 = 1$ 。

4.2 将实验测量得到的氢氘光谱数据代入该方程式中，获得近似标准氢氘谱线数据

按转换方程 $\lambda_s = 1.00033\lambda_m - 0.19514$ 处理氢氘光谱数据，得到近似标准氢氘谱线数据如下：

氢氘谱线能级	波长 λ_H/nm	波长 λ_D/nm
3	656.271	656.096
4	486.140	486.005
5	434.013	433.888
6	410.140	410.020

表 3: 氢氘谱线波长

4.3 计算氢氘谱线的里德伯常数

根据下式进行计算

$$\frac{1}{\lambda_H} = \tilde{\nu}_H = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (8)$$

$$\frac{1}{\lambda_D} = \tilde{\nu}_D = R_D \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (9)$$

n	λ_H/nm	R_H	λ_D/nm	R_D
3	656.271	1.09710	656.096	1.09740
4	486.140	1.09708	486.005	1.09738
5	434.013	1.09718	433.888	.09750
6	410.140	1.09719	410.020	.09751

表 4: 氢氦谱线的里德伯常数

取平均得到

$$R_H = 1.09714 \times 10^7 m^{-1},$$

$$R_D = 1.09745 \times 10^7 m^{-1}.$$

4.4 计算氢氦核质量比

根据下式进行计算, 其中 $\frac{M_H}{m_e}$ 为氢原子核质量与电子质量之比 (取值为 1836.1527)

$$\frac{M_D}{M_H} = \frac{R_D/R_H}{1 - (R_D/R_H - 1)M_H/m_e} = 2.07877 \quad (10)$$

理论值为 1.99900, 实验相对误差为 3.99%。

4.5 计算质子电子质量比

根据下式进行计算

$$\frac{M}{m_e} \approx \frac{\lambda}{2\Delta\lambda} = \frac{\lambda_H + \lambda_D}{4\Delta\lambda} \quad (11)$$

n	λ_H/nm	λ_D/nm	$\Delta\lambda/nm$	$\lambda/2\Delta\lambda$
3	656.271	656.096	0.175	1874.81
4	486.140	486.005	0.135	1800.27
5	434.013	433.888	0.125	1735.80
6	410.140	410.020	0.120	1708.67

表 5: 氢氦谱线的里德伯常数

取平均得到质子和电子质量比为 1779.89. 与理论值 1835.15 相比误差为 3.01%

5 实验结果误差分析

- 实验仪器在波长定标和测量的过程中有系统误差.
- 数据处理过程中存在近似处理造成误差.

• 光栅光谱仪的测量步长较精细, 导致氢氦光谱的峰值附近波动较大, 放大了噪声的影响, 导致难以判别氢氦光谱的峰值所对应波长.

• 实验环境并非完全避光, 灯光和自然光入射狭缝会造成光谱的噪声污染.

• 计算里德伯常数时, 应带入真空中的波长, 实际实验在空气中进行, 应该考虑折射率对波长的影响.

6 思考题和实验总结

6.1 思考题

6.1.1 在计算 R_H 、 R_D 时, 应该以真空中的波长代入公式计算, 但实验中的测量是在空气中进行的。若空气的折射率为 $n = 1.00029$, 请推导波长修正公式, 并将修正后的 R_H 、 R_D 值与公认值比较

折射率定义为光在真空中的传播速度与光在该介质中的传播速度之比, 因此有

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (12)$$

因此修正后的波长应该为

$$\tilde{\lambda}_H = n\lambda_H, \tilde{\lambda}_D = n\lambda_D \quad (13)$$

同理修正后的里德伯常数应该为

$$\tilde{R}_H = \frac{R_H}{n} = 1.09682 \times 10^7 m^{-1} \quad (14)$$

$$\tilde{R}_D = \frac{R_D}{n} = 1.09713 \times 10^7 m^{-1} \quad (15)$$

氢氦的里德伯常数公认值为

$$R_H = 1.09678 \times 10^7 m^{-1}, R_D = 1.09707 \times 10^7 m^{-1} \quad (16)$$

故实验的相对误差分别为 0.03% 和 0.05%

6.1.2 本实验中测量汞灯光谱目的是什么？请问若要使用其他光源或者方法代替测量汞灯光谱，给出方案。

测量汞灯光谱的目的是 1. 寻峰以修正光谱仪的偏差，2. 找到测量数据和标准数据的转换方程。

如果使用其他光源代替测量汞灯光谱，需要寻找产生线状光谱且有多条谱线的光源（如钠灯，具有主线系 589.0nm、589.6nm，漫线系 568.3nm、568.86nm、497.78nm、498.2nm 和锐线系 616.0nm、615.4nm 共 8 条谱线），方便定标并得到转换方程。

6.1.3 若想要测量其他元素同位素光谱，对仪器有什么要求？为什么？

由于核质量越轻，移位效应越大，因此氢具有最大的同位素移位。所以如果测量其他元素的同位素光谱，要求实验中调节入射狭缝更细，光栅光谱仪的步长更小、分辨率更高，同时为保持信噪比，还需控制环境噪声，如在暗室中进行实验。

6.2 实验总结

此实验中我们利用 Zolix Omni-λ500i 光栅光谱仪测量了汞灯光谱和氢氘光谱数据，将汞灯光谱测量数据与标准数据进行线性拟合后，得到了实验仪器的标准数据和测量数据转换方程。并依据此转换方程得到近似标准氢氘谱线数据，由此进一步计算得到了氢氘谱线的里德伯常数、氢氘核质量比和、氢氘核质量比等数据。

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 单色仪定标和光谱测量（实验讲义）.
- [2] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 氢氘光谱（实验讲义）.
- [3] 轩植华, 霍剑青, 姚国, 张淑贞. 大学物理实验, 第三册, 第二版. 高等教育出版社, 北京, 2005.