物理实验报告

南方科技大学 SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

学号：11910104　姓名：王奕童　日期：2020 年 05 月 29 日　星期 五

氢氘光谱

一. 实验目的

1. 学习光栅光谱仪的工作原理和光谱测量的基本技术；

2. 测量同位素光谱，学习确定里德伯常量的方法；

3. 研究获得同位素光谱的实验方法、分析方法及其在微观测量中的应用。

二.实验仪器

光栅光谱仪，汞灯，氢氘灯

三. 实验原理

1. 同位素光谱特点及巴尔末公式、里德伯常量计算公式、$\frac{m_D}{m_H}$计算公式等

（1）同位素光谱特点：

自然界中的许多元素都存在同位素，它们的原子核具有相同数量的质子，但中子数不同。反映在谱线上，同位素所对应的谱线发生位移，这种现象称为同位素移位。同位素移位的大小与核质量有密切关系， 核质量越轻，移位效应越大。因此，氢同位素具有最大的同位素移位。

由图 7.3-1 所示的氢原子光谱图可以明显地看到有三个谱线系列，一个谱线系列在可见光和近紫外区，称为巴尔末系；一个谱线系列在紫外，为莱曼系；另一个谱线系列在红外，为帕邢系。此外，在长波长方向还有一些不很清楚的线系，如布喇开系、普丰特系等。每个谱线系都很有规律，谱线间隔和强度都向短波方向递减，即越来越密，越来越弱。

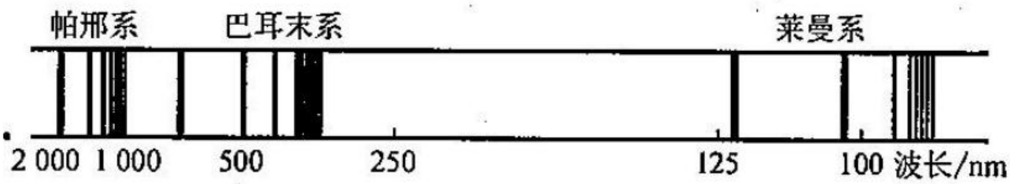


图 7.3-1 氢原子光谱

（2）巴尔末公式：1895 年，瑞士的一位中学数学教师巴尔末(J.J.Balmer,1825-1896) 根据实验结果，确定了可见光区域氢光谱的谱线分布规律为

$$\lambda = B\frac{n^2}{n^2-4}, n = 3,4,5,... \tag{1}$$

式（1）即用于表示氢原子谱线可见光波长的经验公式，其中 $B = 3.6456\times10^{-7}m$，是谱线系极限值，即 $n\to\infty$ 时的波长值。

（3）$\frac{m_D}{m_H}$ 计算公式：

1896 年，瑞典物理学家里德伯(J.R.Rydberg, 1854-1919)将巴尔末公式改写用波数 σ 表示，σ 为单位长度波列中波的数目，λ 是一个周期波的长度，即 $\sigma=\frac{1}{\lambda}$，频率 $\nu=\sigma c$，c 为光速。氢和类氢原子的巴尔末线系对应光谱线波数为：

$$\sigma = \frac{2\pi^2 m_e e^4 Z^2}{(4\pi\varepsilon_0)^2 h^3 c(1+\frac{m_e}{m_Z})}(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}) \tag{2}$$

其中 m_Z 为原子核质量，m_e 为电子质量，e 为电子电荷，h 为普朗克常量，ε_0 为真空介电常量，c 为光速，Z 为原子序数，因此类氢原子的里德伯常量可写为

$$R_Z = \frac{2\pi^2 m_e e^4 Z^2}{(4\pi\varepsilon_0)^2 h^3 c}\cdot\frac{1}{(1+\frac{m_e}{m_Z})} \tag{3}$$

若 $m_Z\to\infty$，则有

$$R_\infty = \frac{2\pi^2 m_e e^4 Z^2}{(4\pi\varepsilon_0)^2 h^3 c} \tag{4}$$

里德伯常量 R_∞ 是重要的基本物理常量之一，由于里德伯常量的测定比起一般的基本物理常量来可以达到更高的精度，因而它成为测定其他一些基本常量的重要引入值。在 1986 年国际激光光谱学会议上发表并被推荐的里德伯常量值为：

$$R_\infty = (10973731.534\pm0.012)m^{-1}$$

由（3）、（4）两个式子，可求出：

$$R_Z = \frac{R_\infty}{1+\frac{m_e}{m_Z}} \tag{5}$$

由此可见，R_Z 随原子核质量 m_Z 变化，对于不同的元素或同一元素的不同同位素 R_Z 不同。因为 $m_Z >> m_e$，m_e 对 R_Z 影响很小，因此氢和它的同位素的相应波数很接近，在光谱上形成很难分辨的双线或多线。

设氢和氘的里德伯常量分别为 R_H 和 R_D，则氢、氘光谱线的波数 σ_H、σ_D 分别为

$$\sigma_H = R_H(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}) \qquad (n=3,4,5,...) \tag{6}$$

$$\sigma_D = R_D(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}) \qquad (n=3,4,5,...) \tag{7}$$

因此，测出氢、氘的波长，求出波数，即可计算出氢、氘原子的里德伯常量 R_H 和 R_D。

另外，氢和氘光谱相应的波长差为

$$\Delta\lambda = \lambda_H - \lambda_D = \lambda_H(1-\frac{\lambda_D}{\lambda_H}) = \lambda_H(1-\frac{\sigma_H}{\sigma_D}) = \lambda_H(1-\frac{R_H}{R_D}) \tag{8}$$

因此，通过实验测得氢波长和氢氘的波长差，根据式（8）也可求得氢和氘的里德伯常量 R_H 和 R_D。

根据式（5）有

$$R_H = \frac{R_\infty}{1+\frac{m_e}{m_H}} \tag{9}$$

$$R_D = \frac{R_\infty}{1+\frac{m_e}{m_D}} \tag{10}$$

其中 m_H 和 m_D 分别为氢和氘原子核的质量，式（10）除以式（9），得

$$\frac{R_D}{R_H} = \frac{1+\frac{m_e}{m_H}}{1+\frac{m_e}{m_D}} \tag{11}$$

从式（11）可解出 $\frac{m_D}{m_H}$

$$\frac{m_D}{m_H} = \frac{\frac{R_D}{R_H}}{1-\frac{m_H}{m_e}(\frac{R_D}{R_H}-1)} \tag{12}$$

式中 $\frac{m_H}{m_e}$ 为为氢原子核质量与电子质量比，公认值为 1836.1515。因此将通过实验测得的 λ_H 和 λ_D 和由式（8）得到的 $\frac{R_D}{R_H}$ 代入式（12），可求得氘和氢原子核质量比 $\frac{m_D}{m_H}$。

2. 简述光栅光谱仪工作原理（重点是光路图和光电倍增管结构）

（1）光源

实验中，用氢氘放电管作为光源。氢氘放电管是将氢气和氘气充入同一放电管中，当一定的高压加在放电管两极上时，管内的游离电子受到电场作用飞向阳极，并因此获得越来越大的动能。当它们与管中的氢、氘分子碰撞时，使氢氘分子离解为氢原子和氘原子，并进入激发状态，当它们回到低能级时产生光辐射。

（2）光谱仪

光谱的观察与拍摄使用光谱仪。根据分光方式不同，光谱仪可分为光栅光谱仪和棱镜光谱仪，前者性能优于后者，因此更广泛地应用于各类光谱实验中。光栅单色仪的结构如图 7.3-2 所示。

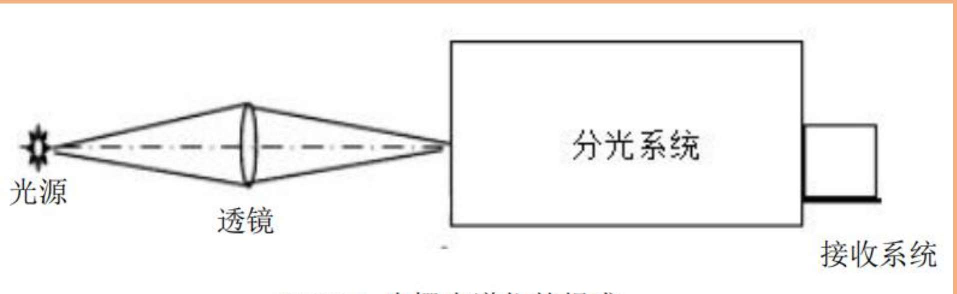


图 7.3-2 光栅光谱仪的组成

光栅单色仪的分光系统如图 7.3-3 所示，光源或照明系统发出的光束均匀照亮在入射狭缝 S_1 上，S_1 位于反射式准光镜 M_1 的焦平面上。光被 M_1 反射变成平行光照射到光栅 G 上，光栅转动时，衍射光束经由凹面反射镜 M_2，会聚到出射狭缝 S_2 上，或由平面反射镜 M_3 成像在出射狭缝 S_3 处，从而选择不同的接收器类型。这种结构简单、尺寸小，像差小、分辨率高，更换光栅方便。由于各波长光的衍射角不同，出射狭缝处形成以一波长为中心的光谱带，转动光栅 G 可以改变中心波长，整个谱带也随之移动。这种结构为 C-T 型光学系统。

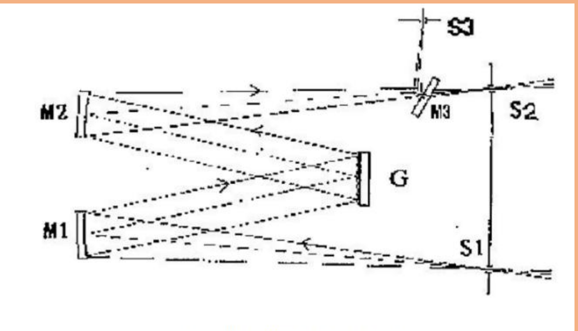


图 7.3-3 光栅单色仪的分光系统

光栅光谱仪的光学特性，可以从色散率、分辨率及闪烁特性三方面考虑。

1) 光栅光谱仪的色散率

对于一定波长差 $d\lambda$ 的两条谱线，其衍射角间隔 $d\beta$ 或在幕上的距离 dx 有多大，这是光栅光谱仪的色散本领问题。

光栅方程为 $$d(\sin i + \sin\beta) = K\lambda \tag{13}$$

其中 d 为光栅常数，i、β 分别为入射角、衍射角、K 为衍射级次。光栅光谱仪的角色散率可由式（13）取微分得到

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{K}{d\cos\beta} \tag{14}$$

若平面光栅暗箱物镜的焦距为 f，则平面光栅的线色散率

$$\frac{dx}{d\lambda}=\frac{Kf}{d\cos\beta} \tag{15}$$

可见光栅常数越小，衍射级越高，角色散率越大。在实际工作中，为了使用方便，常用线色散率的倒数 $\frac{d\lambda}{dx}$ 表示，谱面上单位距离对应的波长间隔为

$$\frac{d\lambda}{dx}=\frac{d\cos\beta}{Kf} \tag{16}$$

2) 光栅摄谱仪的分辨率

分辨率定义为谱线波长 λ 与邻近刚好能分开的两条谱线波长差的比值，则分辨率

$$R=\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \tag{17}$$

可以证明，光栅的理论分辨率为

$$R=\frac{\lambda}{\Delta\lambda}=KN \tag{18}$$

N 为光栅总的刻线数目，可见，为了提高分辨率，应在高级次下使用较大的光栅。由于种种原因，如光栅的表面质量、刻线间距的均匀性及其光学元件质量的限制等，实际分辨率比理论值低。

3) 光栅的闪烁特性

对于透射式光栅，光能大部分集中在零级光谱，其余的光能也分散在各级光谱中，以致每级光谱的强度都比较小。实际中使用光栅时，只利用它的某一级光谱，利用闪烁光栅可以设法把光能集中到这一级光谱上来。

对于不同波长的光，其光能在反射式平面光栅的各级衍射光谱中的分配是不同的，这种分配由光栅划槽的形状决定。若某一波长的光，在槽面上的反射方向与它在光栅上的衍射的方向相同，则在该波长出光栅衍射的能量比例最高，此即光栅的“闪耀”，与此波长相对应的谱线相对强度也最大。这个波长称为闪耀波长。槽面与光栅平面之间的夹角成为闪耀角。

如图 7.3-4 所示，图中 n , N 分别为槽面与光栅平面的法线，θ_b 为闪耀角。若平行光束沿槽面法线方向入射，则第一级闪耀波长 λ_{1b} 满足

$$2d\sin\theta_b=\lambda_{1b} \tag{19}$$

一般光栅规格都是指第一闪耀波长。

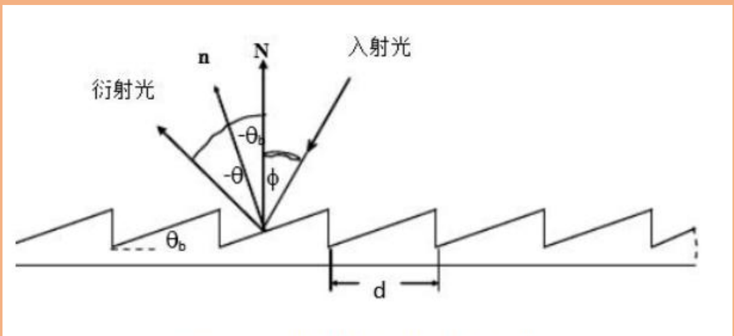


图 7.3-4 闪耀光栅的工作原理

使用光谱仪和做光谱实验时必须注意以下事项：

i. 光谱仪为精密仪器，使用时要注意爱护，尤其是狭缝，各旋钮、手柄均应轻调慢调，旋到头时不要再继续用力，不要触及仪器的各光学表面，更不能挪动光谱仪。

ii. 注意爱护狭缝：

狭缝是光谱仪的关键部件，它的宽度范围是 0-3mm，每格为 0.005mm。仪器不工作时狭缝开启宽度应放在最小的位置。在调节狭缝宽度时切记不要用力过猛和过快，要仔细缓慢的调到所要求的值。当照明狭缝的光是完全非相干的（即每一点为独立的点光源），狭缝为无限细时，由衍射理论和实验可知其光谱线的宽度 $W_0 = 0.86\frac{\lambda_f}{D}$。这里 λ 为光的波长，f 为离轴抛物镜的焦距，D 为光栅和抛物镜的口径。狭缝应该调到它的最佳宽度 $\alpha_n = W_0$。当狭缝 α 逐渐变宽时，谱线宽度随之增大，如图 7.3-5 所示。光谱的分辨率 R 和光谱线的强度 I 随狭缝宽度的变化如图 7.3-6 所示。由图 7.3-6 可见缝宽过大时实际分辨率下降，缝宽过小时，出射狭缝上得到光强太小，取 $\alpha = \alpha_n$ 最好。

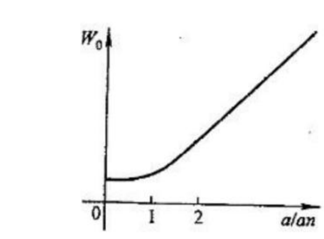


图 7.3-5 狭缝宽度α与光谱宽度W_0的关系曲线

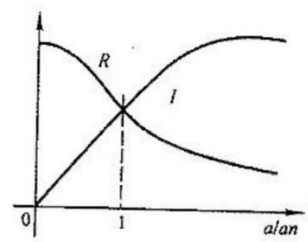


图 7.3-6 狭缝宽度与光谱分辨率及光谱强度的关系

(3) 光电倍增管

单色仪的接收系统在本实验中使用光电倍增管（简称 PMT），（也可以使用电荷耦合器件 CCD）。下面说明光电倍增管的原理。

它是利用光电子发射效应和二次电子发射效应制成的光电器件。其主要优点是灵敏度高、稳定性好、响应速度快和噪音低。其主要缺点是结构复杂、工作电压高、体积大。光电倍增管是电流放大元件，具有很高的电流增益，因而最适合于微弱信号的检测。

光电倍增管的基本结构和工作原理如下：当光子打到光电倍增管的光电阴极 K 上时，由于光电效应会产生一些光电子，这些光电子在光电倍增管的电场作用下飞向阳极 A，在阴极 K 和阳极 A 之间还有 n 个电极 (D_1~D_n)叫做倍增极，从图中可以看出极间也有一定的电压（几十到百伏），在极间电压的作用下飞向阳极 A 的光电子被一级一级的加速，在加速的过程中它们以高速度轰击倍增极，使倍增极产生二次电子发射，这样就使得电子的数目大量增加，并逐极递增，最后到达阳极的电子就会很多，形成很大的阳极电流。由于倍增极的倍增因子基本是常数，所以当光信号变化时，阴极发射的电子的数目也随之变化，从而阳极电流也随着光信号发生变化。这样光电倍增管就可以反映光强随时间的变化。使用光电倍增管应当了解它的特性，如它的频率特性、时间特性、暗电流和噪声特性，还有稳定性及对环境的要求等。

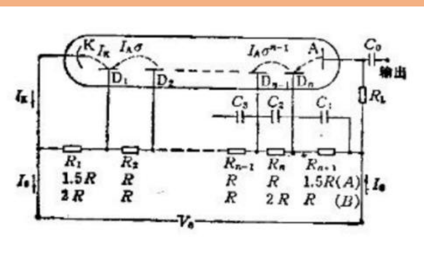


图 7.3-7 光电倍增管的结构

附图：定标用 Hg 光谱的谱图(理论波长）

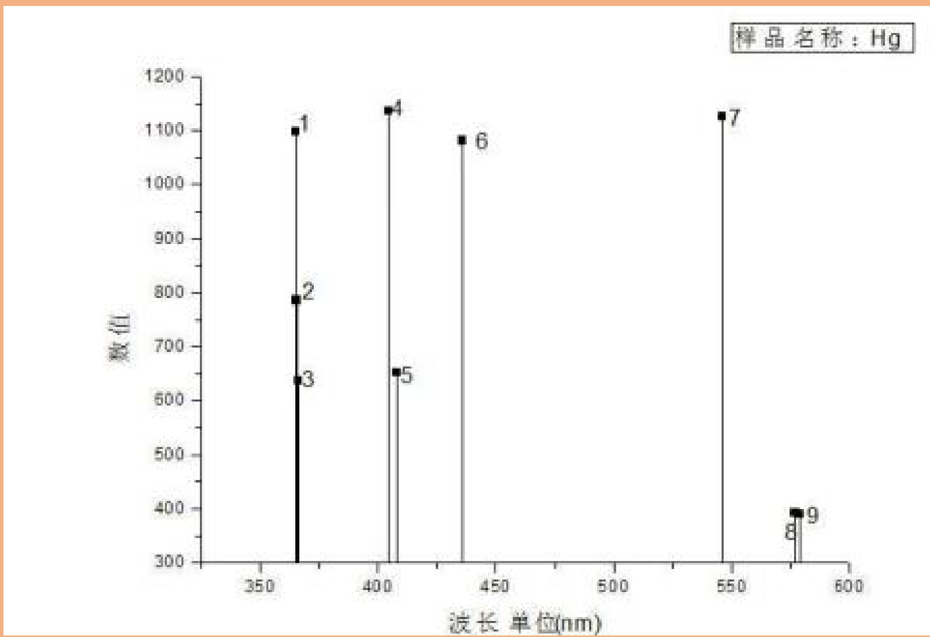


图 7.3-8 定标用 Hg 光谱的谱图

序号	波长 （nm）	序号	波长(nm)
1	365.02	6	435.84
2	365.48	7	546.07
3	366.30	8	576.96
4	404.66	9	579.07
5	407.78		

四．实验内容

1. 将光谱仪的电压旋钮逆时针旋至最小——〉打开光谱仪电源——〉打开软件，光谱仪自动复位。
2. 光谱仪的定标（Hg 灯光谱的测量）
   a) 将 Hg 灯安放在光谱仪入射狭缝前，开启电源
   b) 光谱仪上的负高压调至 400V 左右
   c) 选择合适的参数在 350nm-590nm 范围内扫描光谱
   d) 记录谱线中每个峰对应的波长（共 9 个峰,干扰信号应剔除）。
3. HD 灯的测量

a) 将 HD 灯安放在光谱仪入射狭缝前，开启电源

b) 光谱仪上的负高压调至 800V 左右

c) 粗扫 HD 光谱，确定谱线峰值的大概范围

d) 细扫 HD 光谱，确定谱线峰值的准确波长

e) 依次记录 n=5\4\3（即 434nm\486nm\656nm）的 3 对双峰的波长（短波长为 D，长波长为 H）

4．数据处理

a) 拟合修正公式

以实验测得 Hg 波长为横轴，以 Hg 理论波长为纵轴，作图，并拟合修正公式 y=ax+b。

b) 根据修正公式修正实验所测的氢波长和氘波长

c) 根据修正后的氢波长计算氢的里德伯常量$\mathrm{R_H}$，并计算平均值

d) 根据修正后的氘波长计算氘的里德伯常量R_D，并计算平均值

e) 计算氘和氢原子核质量比$\frac{m_D}{m_H}$

原始数据

1．Hg 灯波长

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
测量波长(nm)	364.65	365.07	365.87	404.55	407.68	435.94	546.93	578.01	580.08
理论波长(nm)	365.02	365.48	366.30	404.66	407.78	435.84	546.07	576.96	579.07

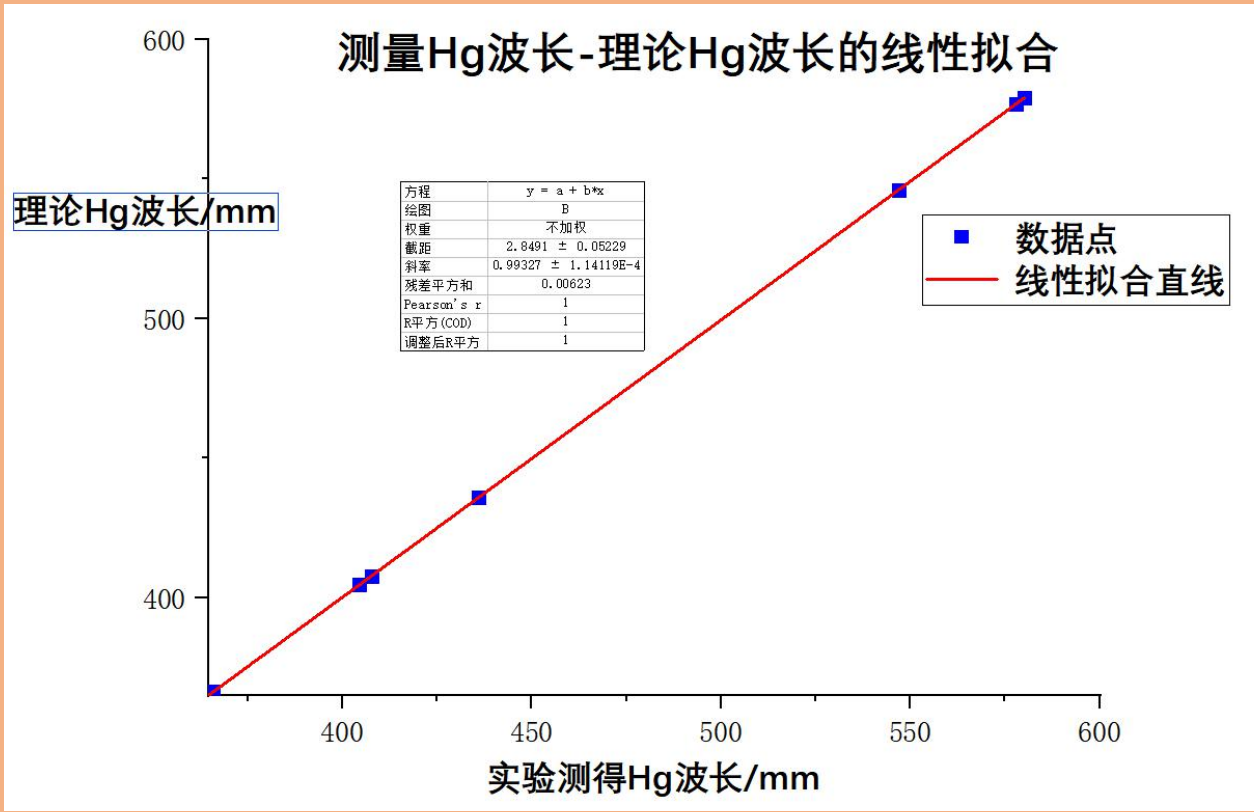
2．HD 灯波长

	n = 5		n = 4		n = 3	
	氘	氢	氘	氢	氘	氢
测量波长(nm)	433.99	434.10	486.28	486.42	658.16	658.35

数据处理

1.作图并拟合修正公式

使用 OriginLab 的线性拟合功能，以实验测得 Hg 波长为横轴，以 Hg 理论波长为纵轴，作图并拟合修正公式，得到测量 Hg 波长-理论 Hg 波长的线性拟合图，如下所示。



通过 OriginLab 的线性拟合可知理论波长λ与实际测得的波长λ'之间的关系式是:

$\lambda = 0.99327\lambda' + 2.8491nm$

得到拟合的修正公式$\lambda = 0.99327\lambda' + 2.8491nm$

2.根据修正公式修正实验所测的氢波长和氘波长

由1，可知修正公式：$\lambda = 0.99327\lambda' + 2.8491nm$

代入公式，得到计算结果：

	n = 5		n = 4		n = 3	
	氘	氢	氘	氢	氘	氢
测量波长(修正前)(nm)	433.99	434.10	486.28	486.42	658.16	658.35
测量波长(修正后)(nm)	433.92	434.03	485.86	486.00	656.58	656.77

3.　根据修正后的氢波长计算氢的里德伯常量 R_H，并计算平均值

根据实验原理式子(6)：$\sigma_H = R_H(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2})$，以及 $\sigma = \frac{1}{\lambda}$，得到氢的里德伯常量 R_H 的表达式为：

$$R_H = \frac{1}{\lambda_H} \cdot \frac{1}{(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2})}$$

当 $n = 5$ 时，$\lambda_{H5} = 434.03nm$，$R_{H5} = \frac{1}{\lambda_{H5}} \cdot \frac{1}{(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2})} = \frac{1}{434.03nm} \cdot \frac{1}{(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2})} = 1.09714 \times 10^7 m^{-1}$;

当 $n = 4$ 时，$\lambda_{H4} = 486.00nm$，$R_{H4} = \frac{1}{\lambda_{H4}} \cdot \frac{1}{(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2})} = \frac{1}{486.00nm} \cdot \frac{1}{(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2})} = 1.09739 \times 10^7 m^{-1}$;

当 $n = 3$ 时，$\lambda_{H5} = 656.77nm$，$R_{H3} = \frac{1}{\lambda_{H3}} \cdot \frac{1}{(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2})} = \frac{1}{656.77nm} \cdot \frac{1}{(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2})} = 1.09627 \times 10^7 m^{-1}$;

平均值计算：

$$\overline{R_H} = \frac{1}{3}(R_{H3} + R_{H4} + R_{H5}) = \frac{1}{3}(1.09627 \times 10^7 + 1.09739 \times 10^7 + 1.09714 \times 10^7)m^{-1} = 1.09693 \times 10^7 m^{-1}$$

得到氢的里德伯常量 R_H 的平均值为 $\overline{R_H} = 1.09693 \times 10^7 m^{-1}$

4. 根据修正后的氘波长计算氘的里德伯常量 R_D，并计算平均值

根据实验原理式子(6)：$\sigma_D = R_D(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2})$，以及 $\sigma=\frac{1}{\lambda}$，得到氘的里德伯常量 R_D 的表达式为：

$$R_D=\frac{1}{\lambda_D}\cdot\frac{1}{(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2})}$$

当 $n=5$ 时，$\lambda_{D5}=433.92nm$，$R_{D5}=\frac{1}{\lambda_{D5}}\cdot\frac{1}{(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2})}=\frac{1}{433.92nm}\cdot\frac{1}{(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{5^2})}=1.09741\times10^7 m^{-1}$;

当 $n=4$ 时，$\lambda_{D4}=486.28nm$，$R_{D4}=\frac{1}{\lambda_{D4}}\cdot\frac{1}{(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2})}=\frac{1}{485.85nm}\cdot\frac{1}{(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{4^2})}=1.09773\times10^7 m^{-1}$;

当 $n=3$ 时，$\lambda_{D5}=656.58nm$，$R_{D3}=\frac{1}{\lambda_{D3}}\cdot\frac{1}{(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2})}=\frac{1}{656.58nm}\cdot\frac{1}{(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{3^2})}=1.09659\times10^7 m^{-1}$;

平均值计算：

$$\overline{R_D}=\frac{1}{3}(R_{D3}+R_{D4}+R_{D5})=\frac{1}{3}(1.09659\times10^7+1.09773\times10^7+1.09741\times10^7)m^{-1}=1.09724\times10^7 m^{-1}$$

得到氘的里德伯常量 R_D 的平均值为 $\overline{R_D}=1.09724\times10^7 m^{-1}$

5. 计算氘和氢原子核质量比 $\frac{m_D}{m_H}$

根据实验原理式子(12)，可得氘和氢原子核质量比 $\frac{m_D}{m_H}$ 的计算公式：

$$\frac{m_D}{m_H}=\frac{\frac{R_D}{R_H}}{1-\frac{m_H}{m_e}(\frac{R_D}{R_H}-1)}$$

。其中 $\frac{m_H}{m_e}$ 为氢原子核质量与电子质量比，公认值为 1836.1515，R_D 和 R_H 分别是氘原子和氢原子的里德伯常量。

$$\therefore\frac{m_D}{m_H}=\frac{\frac{R_D}{R_H}}{1-\frac{m_H}{m_e}(\frac{R_D}{R_H}-1)}=\frac{(\frac{1.09724\times10^7 m^{-1}}{1.09693\times10^7 m^{-1}})}{1-1836.1515\times(\frac{1.09724\times10^7 m^{-1}}{1.09693\times10^7 m^{-1}})}=2.07920$$

得到氘和氢原子核质量比 $\frac{m_D}{m_H}=2.0792$

实验结论

简要概括实验内容及结果。

（1）实验内容：本次实验使用了光栅光谱仪，汞灯，氢氘灯等实验仪器，先利用 Hg 灯的光谱对光谱仪进行了定标，然后利用定标完成的光谱仪先后利用粗扫和细扫对 n=5/4/3 的双峰波长进行了测量，最终计算出氘和氢原子核质量比 $\frac{m_D}{m_H}$。

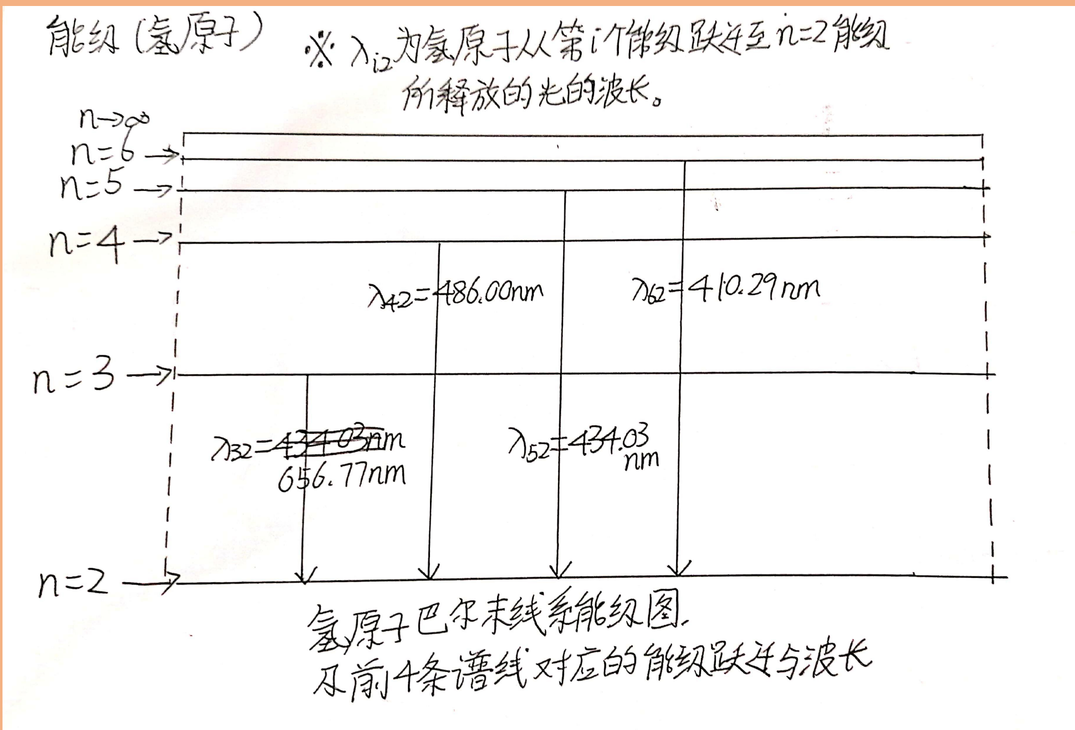
（2）实验结果：本次试验测得氢的里德伯常量 R_H 的平均值为 $\overline{R_H}=1.09693\times10^7 m^{-1}$，氘的里德伯常量 R_D 的平均值为 $\overline{R_D}=1.09724\times10^7 m^{-1}$，最终测得氘和氢原子核质量比 $\frac{m_D}{m_H}=2.0792$。

思考题

画出氢氘原子巴尔末线系的能级图，并标出前 4 条谱线对应的能级跃迁。

氢原子巴尔末线系能级图：（从左到右前 4 条为前 4 条谱线的能级跃迁）

（1）氢原子巴尔末线系能级图：



（2）氘原子巴尔末线系能级图：