

氢光谱和类氢光谱

实验者：季业 指导老师：白翠琴

摘要

This experiment mainly used the grating monochromator to measure the spectrum of hydrogen lamp and sodium lamp. In analyze of the hydrogen spectrum, the spectrum of deuterium can be observed fully and clearly. Also, the data collected from the measure of the sodium spectrum served to calculate the quantum defect of sodium.

关键词

Spectrum, Hydrogen, Deuterium, Sodium, Quantum Defect

引言

1855 年，瑞士科学家巴尔末根据实验结果得出在可见光的氢光谱分布规律的经验公式：

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 2^2}$$

式中 B 是一常数，等于 364.56nm; n 为大于 2 的正整数。当 n=3, 4, 5, 6 时，上式即给出氢光谱中科健部分的四条谱线的波长，分别称为 H_α ， H_β ， H_γ 和 H_δ 谱线。

另外，类氢元素的光谱也满足类似的关系，比如钠元素。

本实验通过使用光栅单色仪测量并分析了氢灯、钠灯光谱。同时利用所得数据对单色仪进行了定标，计算了钠元素的量子缺并分析了钠灯中的杂质。

理论部分

1、氢光谱

巴尔末线系的波数满足：

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

式中 R 称为里德伯常数。上式更好地显示了巴尔末线系的光谱规律。

R 不是一个经验常数，而可以由基本物理常数精确地算得

$$R = \frac{2\pi^2 e^4 m_e}{ch^3}$$

式中 m_e , e 分别是电子的质量和电荷, c , h 分别是真空中的光速和普朗克常数。

电子绕核运动时, 核不是固定的。所以上式中 m_e 要用折合质量 μ ($=\frac{m_e m}{m_e + m}$) 代替。

当原子核质量 $m \rightarrow \infty$ 时的常数 R_∞ 为

$$R_\infty = \frac{2\pi^2 e^4}{ch^3}$$

故有:

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

2、氘光谱 (同位素位移)

1932 年, 尤雷在实验中发现, 在氢的 H_α 线的旁边还有一条谱线, 两者仅差 0.179 nm,

他便假定这一谱线属于氢的同位素, 氘 (D)。当 $m_H / m_D = 1/2$ 时, 计算值和实验值符合得很好, 肯定了氘的存在。

由 1 中的公式可得

$$R_D = R_\infty \frac{1}{1 + \frac{m_e}{2m_H}}$$

$$\nu_D = \frac{1}{\lambda_D} = R_\infty \frac{1}{1 + m_e / 2m_H} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

3、类氢光谱 (钠光谱)

碱金属原子的最外面的壳层上只有一个容易电离的电子, 把这个电子称之为价电子。而内壳层则都是满壳层, 满壳层上的电子不易电离, 而绕原子核运动, 这些电子与原子核形成一个比较坚实的集团, 称为原子实。因此, 可以提出这样的碱金属原子模型, 即一个价电子围绕原子实运动, 原子实的静电荷 Z 是 1。因此, 碱金属是一种类氢原子, 但它有别于氢原子, 它的原子实并不严实。原子实是由 Z 个带正电荷的质子和 $Z-1$ 个带负电的电子所组成, 在价电子场的作用下, 正、负电荷的中心不再重合, 原子实被极化, 这样, 价电子不仅受到库仑场的作用, 还将受到偶极矩的作用, 即价电子的势能成为

$$V = -\frac{e^2}{r} - C \frac{e^2}{r^2}$$

式中 C 是一个与原子实极化程度有关的一个常数。由于价电子的势能增加了极化能这一项, 类氢原子的能级将为

$$E_n = -hcR_H \frac{1}{n^2}$$

式中 n' 称为有效量子数，满足 $n' = n + \Delta$ 。式中 n 为正整数， Δ 为量子亏损。对应于 $l = 0, 1, 2, 3$ 时的 Δ 值分别用 $\Delta_s, \Delta_p, \Delta_d, \Delta_f$ 来表示。所以，碱金属原子的谱线波数为

$$\nu = R_{\infty} \left(\frac{1}{(n_2 + \Delta_2)^2} - \frac{1}{(n_1 + \Delta_1)^2} \right)$$

它的谱项可写成

$$n^2 S \equiv \frac{R_{\infty}}{(n + \Delta_s)^2}$$

$$n^2 P \equiv \frac{R_{\infty}}{(n + \Delta_p)^2}$$

$$n^2 D \equiv \frac{R_{\infty}}{(n + \Delta_d)^2}$$

$$n^2 F \equiv \frac{R_{\infty}}{(n + \Delta_f)^2}$$

碱金属的原子光谱有四个主要谱线系：

锐线系： $n^2 S \rightarrow 3^2 P$ 跃迁 ($n > 3$)

主线系： $n^2 P \rightarrow 3^2 S$ 跃迁 ($n \geq 3$)

漫线系： $n^2 D \rightarrow 3^2 P$ 跃迁 ($n \geq 3$)

基线系： $n^2 F \rightarrow 3^2 D$ 跃迁 ($n > 3$)

用高分辨率的光谱仪测量碱金属的原子光谱时，发现这些谱线都是多重线，这一现象是乌伦贝克和古兹密特提出电子自旋假设的一个实验依据。电子除了有轨道角动量 L 之外，还有自旋角动量 S ，而且认为 S 只有两个取向，这样 $l = 1$ 的态将产生 $j = 1 \pm 1/2 = 3/2$ 和 $1/2$ 两个状态，即 $^2P_{3/2}, ^2P_{1/2}$ ；而 $l = 0$ 的态依旧对应一个状态 $j = 1/2$ ，即 $^2S_{1/2}$ ；能级之间的跃迁由选择定则来决定：

$$\Delta l = \pm 1$$

$$\Delta j = 0, \pm 1$$

实验部分

实验仪器：由计算机控制的光栅单色仪、氢灯、高压钠灯、白炽灯。

实验时，先用白炽灯确定单色仪入射缝、出射缝的零点。之后的实验中，根据测得的零点位置，相应地调整峰宽至合适大小，以进行测量。由于氢灯强度较高，所以实验时，缝宽较小；而钠灯的光强较弱，所以实验时，缝宽较大。

测量氢和钠的谱线时，用计算机控制扫描的精细程度。先做一遍粗略的扫描，以确定已经选择了合适的实验参数，使得可以观察到想要得到的峰，并且各峰的高度合适。

由于钠的谱线强弱相差很大，所以采取了分段测量。各段使用相应的合适的参数。比如双黄线由于光强大，就调小缝宽、减小高压。

结果与讨论

一、单色仪的定标

通过氢灯的四条特征谱线及钠灯的两条主线来对单色仪进行定标。

测量值/nm	真实值/nm
329.14	330.26
410.38	410.13
434.40	434.00
486.73	486.08
589.34	588.99
589.94	589.59
658.26	656.208

对其作直线 $y = ax + b$ 拟合 (y 为真实值, x 为测量值), 得到:

$$a = 0.99369 \pm 0.0021, b = 2.73299 \pm 0.99369。$$

二、氢光谱

共观察到 4 对谱线: 410.28 nm, 410.38 nm; 434.30 nm, 434.40 nm; 486.61 nm, 486.73 nm; 658.08 nm, 658.26 nm。

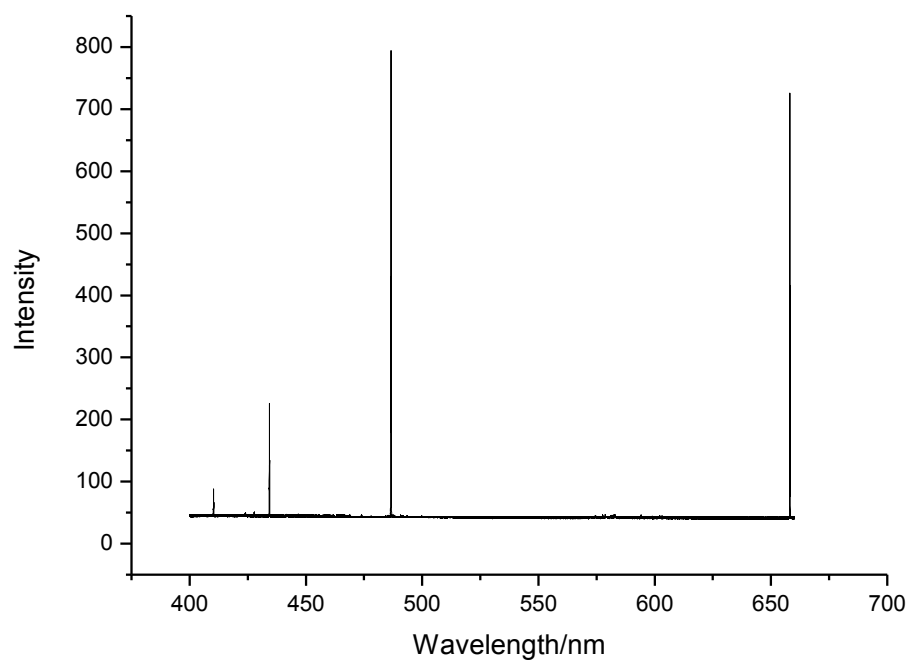


图 1 氢灯光谱

根据理论可知，D 的谱线比 H 的谱线波数略大。故波长略小。

经过定标修正后，有下表：

氙光谱/nm	氦光谱/nm	对应跃迁
410.52	410.42	6 → 2
434.39	434.29	5 → 2
486.39	486.27	4 → 2
656.84	656.66	3 → 2

由公式 $R = R_\infty \frac{1}{1 + m_e / m_{核}}$ ，可估算氦核与电子质量的比值。

将氙光谱与氦光谱相应波长相除，得到： $\frac{\lambda_H}{\lambda_D} = \frac{1 + m_e / m_D}{1 + m_e / m_H}$ 。将 m_e / m_H 当作已知量，

即可解得 m_e / m_D 。

由此算得 $m_e / m_D = 1 / 3395.05$ 。这与理论值 $1 / 3671.483$ 相差了约 7.5%。推测，这是波长测量得误差所带来的。

三、钠光谱

1、钠光谱成分分析

查表计算得到，钠在可见光波段的光谱：（单位：nm）

主线系：589.894，330.437

锐线系：615.502，514.96，474.883，454.322

漫线系：568.337，497.981，466.572，449.485，439.124

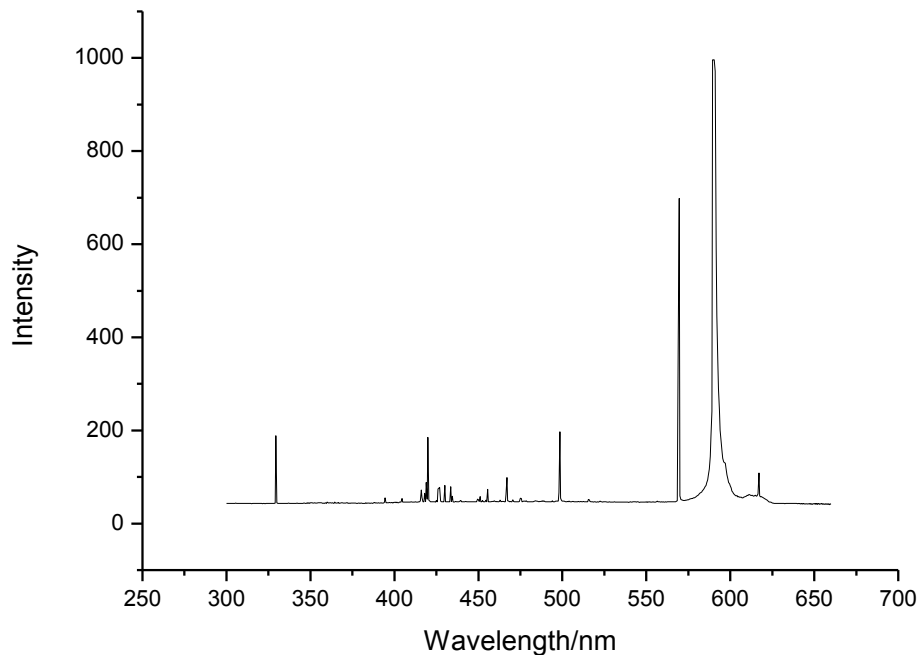


图 2 钠灯光谱

对比实验数据得到

	测量值/nm	修正值/nm	对应跃迁
主线系	589.34, 589.94	588.354, 588.95	$3^2P \rightarrow 3^2S$
	329.14	329.796	$4^2P \rightarrow 3^2S$
锐线系	616.11, 616.72	614.955, 615.561	$4^2S \rightarrow 3^2P$
	454.31, 455.17	454.176, 455.031	$8^2S \rightarrow 3^2P$
漫线系	568.77, 569.27	567.914, 568.411	$4^2D \rightarrow 3^2P$
	498.27, 497.83	497.859, 497.422	$5^2D \rightarrow 3^2P$

其中， $4^2P \rightarrow 3^2S$ 这条线，由于单色仪分辨能力不强，所以理论上分裂的双线合并成一条线。

另外，测量 300 nm – 550nm 时，由于光路未对准，导致几条谱线缺失。这在实验时需要注意。

2、钠量子缺计算

同一线系的谱线求波数差，有：

$$\nu_1 - \nu_2 = R_\infty \left[\frac{1}{(n_2 + \Delta_l)^2} - \frac{1}{(n_1 + \Delta_l)^2} \right]$$

用数学软件解方程即得相应的 Δ_l 。

除了主线系的第二条线外，各谱线都是双线。处理数据时，取双线的波长的平均值来计算相应的波数。

由主线系的两组谱线求得 $\Delta_p = -0.897425$ ；

由锐线系的两组谱线求得 $\Delta_s = -1.35324$ ；

由漫线系的两组谱线求得 $\Delta_d = -0.0208008$ 。

3、杂峰来源分析

钠谱线上除了上述 3 个线系 6 组峰外，还有许多不属于钠的峰。主要集中在 350nm~450nm 这个范围里。查阅资料得知高压钠灯中存在汞和氙气。推测这些峰是汞和氙带来的。

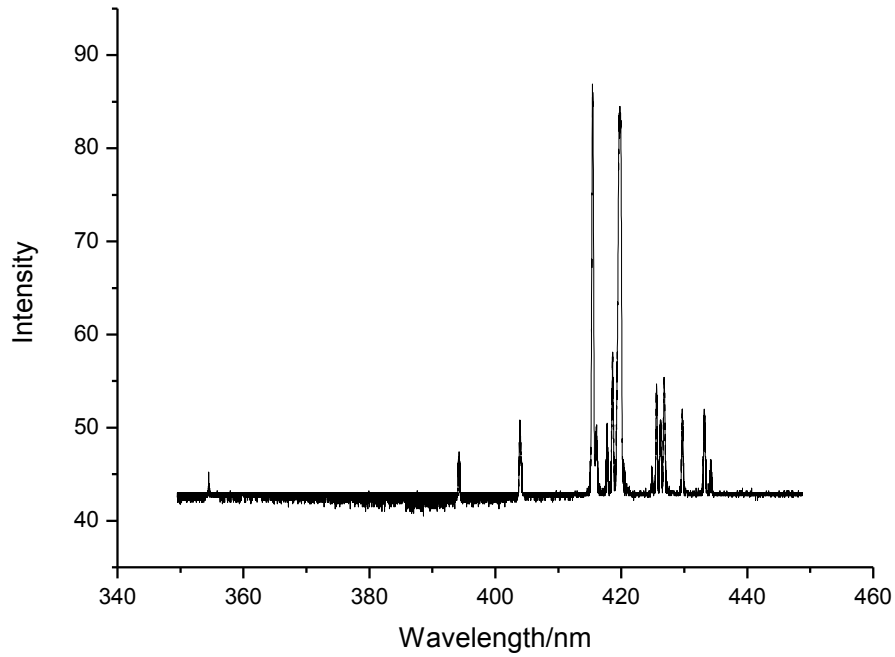


图 3 钠光谱中的杂峰

通过查阅资料这两个元素的光谱并和实验数据对比，得到如下表：

来源	波长/nm	强度
Hg	354.966	45.2
Xe	394.475	47.4
Hg	404.084	50.8
Xe	415.601	86
Xe	416.774	50.3
Xe	417.867	50.5
Xe	418.721	58.1
Xe	419.854	84.5
Xe	424.962	45.7
Xe	425.638	54.5
Xe	426.293	50.8
Xe	426.85	55.4
Xe	429.702	52
Xe	433.199	51.5
Xe	434.243	46.5

表中波长已经通过定标所得的关系进行了修正。表中的强度数值大小没有明确的单位。其意义在于比较不同波长的相对强弱。

结论/小结

实验得到 $m_e / m_D = 1 / 3395.05$;

钠的量子缺 $\Delta_p = -0.897425$, $\Delta_s = -1.35324$, $\Delta_d = -0.0208008$ 。

钠灯中含有杂质：汞及氙。

该实验对光路调节要求较高。由于实验时，有一组测量调节时，钠灯朝向略有偏差，导致有几条钠谱线缺失。

参考文献

戴道宣 戴乐山：近代物理实验（第二版），北京，高等教育出版社，2006（7）；