

钠原子光谱测量与分析

实验者：杨帆 合作者：侯婕

指导老师：马世红

Abstract

With a 44-W plane grating monochrometer, we scan the spectrum of sodium lamp (visible component). According to the Bohr theory and selection rules, the corresponding energy level transition can be ,thus we calculate the effective nuclear charge number and quantum defect of sodium atom. The result deviates little from standard value.

关键字

原子光谱学 钠光谱 光谱分析 能级结构

引言

氢原子与类氢原子光谱是原子光谱中非常重要的内容，利用氢原子及类氢原子光谱，可以验证很多原子理论猜想，计算得到许多原子物理学中的重要常数。本文介绍的实验就是利用 44W 型平面光栅单色仪扫描钠原子光谱，通过光谱分析，以波尔原子理论和选择定则为基础，分析光谱中各谱线峰对应的能级跃迁、绘制能级图，计算钠原子的有效核电荷数、量子亏损、双线强度比等，来验证理论分析。

实验原理

碱金属原子的最外层只有一个容易电离的电子，称为价电子；内层电子与原子核形成比较坚实集团，称为原子实；价电子和原子实就形成了类氢原子的模型。但是这个原子实并不像氢原子核那样严实，在电子的作用下，原子实被极化，正负电荷的中心不重合，形成偶极子，使得电子受到的势能增加。因此类氢原子的能级为

$$E_n = -hcR_H \frac{1}{n'^2} \quad (1)$$

式中 n' 称为有效量子数， $n' = n + \Delta$ ， Δ 则成为量子亏损，对应于 $l = 0, 1, 2, 3$ 时的 Δ 值分别用 Δ_s 、 Δ_p 、 Δ_d 及 Δ_f 来表示。所以，根据波尔原子理论，碱金属原子的谱线波数为

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

碱金属原子光谱有四个主要谱线系：

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

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

其能级之间的跃迁由选择定则来决定： $\Delta l = \pm 1$ ， $\Delta j = 0, \pm 1$ 。

实验装置及操作

实验装置如图 1 所示，实验中使用的是 44W 型平面光栅单色仪。光源发出的光进入平面光栅单色仪输出单一波长的光，经过光电倍增管变成电信号输入电脑中，利用特定的软件可以得到光源的发光光谱。光电倍增管的放大倍数有负高压调节控制。

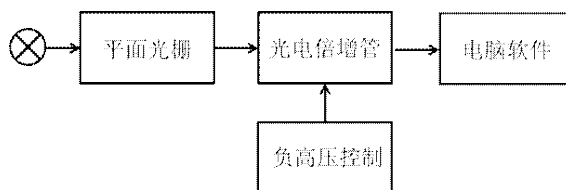


图 1 实验装置示意图

利用钠灯做光源，首先设定较小入射缝宽、出射缝宽和负高压值，观察钠双黄线，如图 2 所示。钠双黄线峰值波长强度如表 1 所示，波长为修正值。

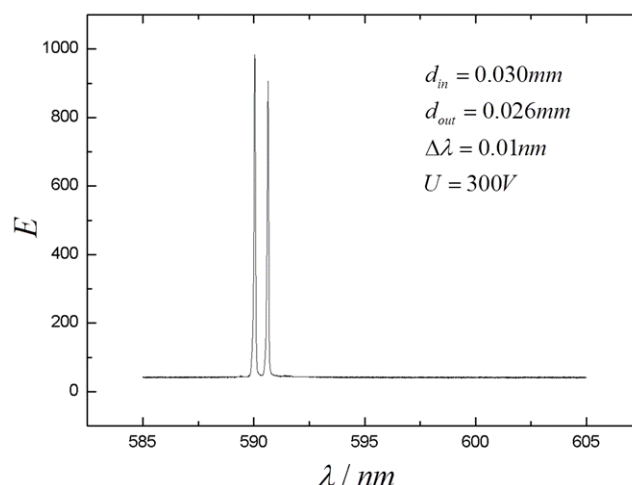


图 2 钠双黄线图

表 1 钠双黄线峰值

	波长/nm	强度
1	589.07	983.6
2	589.66	906.5

然后适当增大入、出射缝宽和负高压值，观察钠光的其他谱线，如图 3。钠双黄线为共振峰，强度远高于其他自发辐射谱线，因此在图 3 中其强度已超出量程。利用实验软件可读出钠原子各谱线峰的波长和强度，将在后面分析中列出。

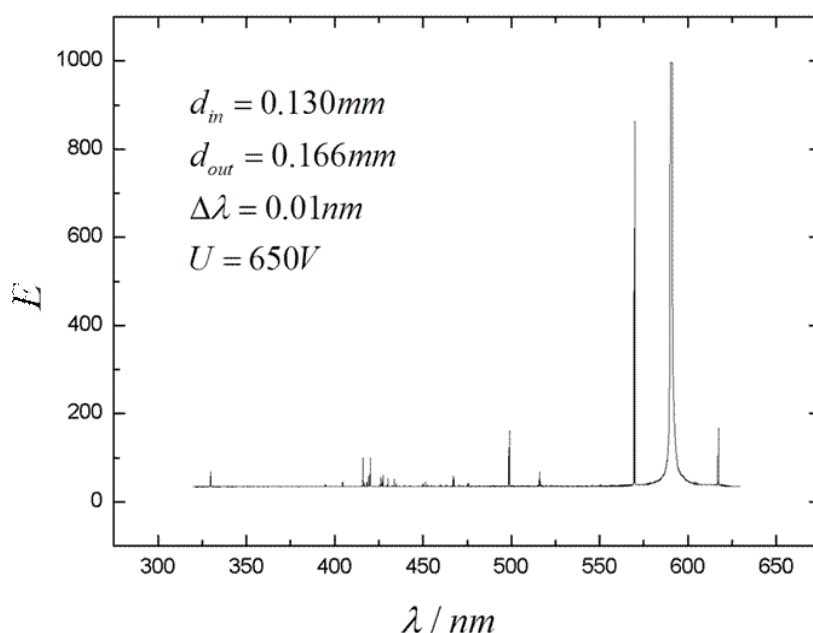


图 3 钠灯光谱图

实验结果及讨论

1、利用钠双黄线计算钠原子的有效核电荷数

对于钠原子的 3p 能级， $l-s$ 耦合， $s = \frac{1}{2}$ ， $l = 1$ ，则 $j = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$ ，3p 能级分裂成 2 条，

分别为 $3^2P_{1/2}$ 和 $3^2P_{3/2}$ ，能级光谱项同时发生变化：

$$T_{n,l,j=l+1/2} = \frac{R}{(n-\Delta_l)^2} - \frac{l}{2}\xi_{n,l}; \quad T_{n,l,j=l-1/2} = \frac{R}{(n-\Delta_l)^2} + \frac{l+1}{2}\xi_{n,l} \quad (3)$$

式中 $\xi_{n,l}$ 是只与 n, l 有关的因子，称为单电子的分裂因子： $\xi_{n,l} = \frac{R\alpha^2(Z_s^*)^4}{n^3l(l+1)(l+1/2)}$ ；由此可

得双重能级的波数差为：

$$\Delta\nu = (l + \frac{1}{2})\xi_{n,l} = \frac{R\alpha^2(Z_s^*)^4}{n^3l(l+1)} \quad (4)$$

代入钠双黄线各数值，计算可得： $Z_s^* = 3.54$

2、计算钠原子的量子亏损 Δ_s 、 Δ_p 、 Δ_d

读出图 3 中的个谱线峰的波长，然后根据波尔原子理论计算出钠原子自发辐射可能产生的波长值，与实验测量出的波长值对比，可判断出各谱线峰对应的能级跃迁，如表 2 所示。

表 2 钠原子谱线峰波长值

来源	3P-3S	4P-3S	5S-3P	6S-3P	4D-3P	5D-3P
第一谱线波长/nm	589.07	330.25	615.62	515.03	568.48	498.02
第二谱线波长/nm	589.66	--	616.22	515.48	569.03	498.47

实验中观察到了锐线系、主线系、漫线系，对应式 (2)，各谱线都有一个固定项，因此同一谱线中的谱线波数差可表达为：

$$\Delta\nu = R_\infty \left[\frac{1}{(n+\Delta_l)^2} - \frac{1}{(n+1+\Delta_l)^2} \right] \quad (5)$$

代入上表中各波长值和已知的 R_∞ 、 n ，利用 Mathematica 计算得：

$$\Delta_p = -0.89, \Delta_s = -1.35, \Delta_d = -0.01$$

3、钠原子谱线双线成分相对强度分析

已知自发辐射跃迁情况下，原子从上能级 n 跳到下能级 m ，发出的谱线强度为

$$I_{nm} = N_n A_{nm} h\nu_{nm} \quad (6)$$

式中 N_n 为上能级 n 的原子数目, A_{nm} 为单位时间从 n 到 m 的跃迁几率。

碱金属原子无外场作用下, 每一能级的统计权重 $g = 2j + 1$, 处于不同能级的原子数目与统计权重成正比, 利用谱线跃迁的强度和选择定则来估算谱线的相对强度, 可得: 主线系和锐线系双线强度比为 1:2, 漫线系三线强度比为 5:1:9, 但由于漫线系中两条谱线重叠, 故实验测得的双线强度比值大于 1:1.8。实验中测得的各谱线强度如下 (已去底):

表 3 钠原子谱线相对强度

线系	跃迁能级	波长	相对强度	强度比	理论比值
锐线系	$5^2S_{1/2} \rightarrow 3^2P_{1/2}$	615.62	69.1	1:1.91	1:2
	$5^2S_{1/2} \rightarrow 3^2P_{3/2}$	616.22	131.7		
	$6^2S_{1/2} \rightarrow 3^2P_{1/2}$	515.03	17.4	1:1.98	
	$6^2S_{1/2} \rightarrow 3^2P_{3/2}$	515.48	34.5		
漫线系	$4^2D_{3/2} \rightarrow 3^2P_{1/2}$	568.48	444.5	1:1.87	1:1.8
	$4^2D_{5/2} \rightarrow 3^2P_{3/2}$	569.03	830.3		
	$5^2D_{3/2} \rightarrow 3^2P_{1/2}$	498.02	67.2	1:1.92	
	$5^2D_{5/2} \rightarrow 3^2P_{3/2}$	498.47	128.7		

钠双黄线是比较特殊的一组, 它并不是自发辐射产生的, 因此其强度比不满足 1:2 的关系。钠双黄线是低压气体放电产生的, 钠原子通过碰撞作用被激发, 进而放出钠双黄线。

实验中我们应用的光源是低压钠灯, 电子浓度很低, 电子按能量的分布不是 Maxwell 分布, 此时激发原子的数目取决于电子激发碰撞的数目 $\Delta N_j(n_e)$

$$\Delta N_j(n_e) = n_e N_i \int_{V_{ij}}^{\infty} Q_{ij}(V) \sqrt{V} F(v) dV \quad (9)$$

式中 n_e 是自由电子密度, N_i 为下能级原子密度, $F(v)$ 是电子的速度分布函数, V_{ij} 为临界能, $Q_{ij}(V)$ 是电子激发几率函数。辐射谱线强度我们可以表示为

$$I = K' \Delta N_j(n_e) h\nu_{ji} \quad (10)$$

对于钠双黄线, 公式中 $F(v)$ 相同, $Q_{ij}(V)$ 函数的激发能 V_A 和 V 积分范围不同, 但是

钠双黄线的能量差只有 $\Delta U = hc(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2) = 0.25eV$ ，对激发函数及积分的影响非常小，因此两条谱线对应的 $\Delta N_j(n_e)$ 是相等的，那么两条谱线的强度比等于频率比，略大于 1。

读取钠双黄线的强度，去底后其强度比约为 1.08，与分析基本相符。

4、钠灯谱线中段小峰的分析

从图 3 中可以看到，在 $400nm - 470nm$ 范围有很多小峰，应为杂质谱线。已知钠灯中会填充惰性气体，因此考虑可能是惰性气体受激跃迁辐射光谱。利用实验室软件读出各小峰波长值，再查询资料找到各种惰性气体的光谱，发现氩原子光谱与小峰对应的很好，说明实验中使用的钠灯填充的是氩气，扫描出的谱线中的杂质峰是氩原子受激跃迁发射的光谱。

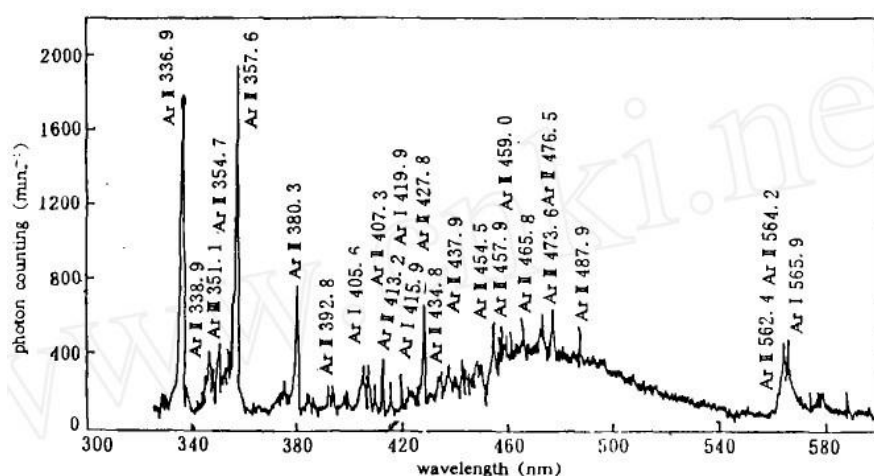


图 5 氩原子受激跃迁辐射光谱

表 4 钠灯谱线杂质峰波长与氩原子受激跃迁发射波长

钠灯杂质峰/nm	405.1	416.1	420.2	427.4	434.1	437.2	454.2	466.7
氩原子谱线/nm	405.6	415.9	419.9	427.8	434.8	437.9	454.9	465.8

小结

本实验利用平面光栅单色仪对钠灯谱线进行了测量和分析，计算了钠原子有效核电荷数、量子亏损、相对强度比等，得到的结果非常符合理论分析，可见利用这套仪器可以很好的测量光谱。感谢实验中心老师为我们提供的实验设备，以及在实验过程中的悉心指导，同时感谢合作者侯婕同学在操作分析中的配合。

参考资料：

- 《原子光谱分析》 66-70 页 张锐等编著 中国科学技术大学出版社
 《原子物理学》 41-55&62-67&166-172 页 杨福家著 高等教育出版社
 《原子与分子光谱导论》 9-23 页 王国文编著 北京大学出版社
 《 α 粒子激励下氩激发态光谱》 叶安培等 《光学学报》 第 13 卷 第 4 期 1993 年 4 月
 《对低压钠灯谱线的分析》 李体莲等 《物理实验》 第 20 卷 第 5 期