

钠原子光谱的观测及分析

专业：光信息科学与技术 学号：06300720363 姓名：倪星宇

摘要

本实验利用光栅光谱仪对钠原子光谱进行观察,通过钠光谱计算量子缺和各线系波数的完整表达式,绘制钠原子的部分能级图。对钠原子的精细结构作基础分析,并根据双重线不同成分的波长差计算部分轨道的原子实有效电荷,同时根据双重线不同成分的光强讨论其理论上的相对强度。

关键词

近代物理实验 钠光谱 量子缺 双重结构

引言

光谱线系的规律与原子结构有内在的联系,因此,光谱是研究原子结构的一种重要的方法。一百多年来,对光谱和原子结构的研究从未间断,它是实验研究与理论研究相互促进的典范。本实验对钠原子的各线系进行了更详细的观察和分析,并且在能够完全确定各线系波数计算式的基础上对其双重结构进行了具体的计算和分析。

实验理论

(一) 钠原子光谱的线系

对于氢原子光谱,它的光谱线的波数可以用两项值之差表示:

$$\tilde{\nu} = R/n_2^2 - R/n_1^2 \quad (1)$$

式中 R 为里德伯常量。

碱金属原子只有一个价电子,与氢原子类似。但是由于原子实的存在,价电子处于不同轨道时,它和原子实的相互作用是不同的。主要是价电子的轨道在原子实中贯穿的程度不同,所受到的作用不同;其次,不同轨道引起原子实的极化程度也不一样。这两者都要影响原子的能量。即使价电子所处轨道的主量子数 n 相同而轨道量子数 l 不同,原子的能量也是不同的。因此,原子的能量与 n 、 l 都有关。

若不考虑电子自旋和轨道运动的相互作用引起的能级分裂,可以把光谱项表示为

$$T_{nl} = \frac{R}{(n/Z_{\sigma}^*)^2} = \frac{R}{(n^*)^2} = \frac{R}{(n - \Delta_l)^2} \quad (2)$$

式中 n, l 分别是主量子数和轨道量子数, Z_{σ}^* 是原子实的平均有效电荷数, $Z_{\sigma}^* > 1$, Δ_l 是一个与 n, l 都有关的正的修正数,称为量子缺。当 n 很大时,量子缺的大小主要取决于 l , 而随 n 的变化不大。本实验中近似地认为 Δ_l 与 n 无关。

电子由上能级(量子数为 n, l)跃迁到下能级(n', l')发射的光谱线的波数由下式决定:

$$\tilde{\nu} = \frac{R}{(n' - \Delta_{l'})^2} - \frac{R}{(n - \Delta_l)^2} \quad (3)$$

如果令 n', l' 固定,而 n 依次改变,则得到一系列的 $\tilde{\nu}$ 值,它们构成一个光谱线系。

钠原子有四个线系：

主线系 (P 线系) :	3S~nP,	n=3,4,5,...
漫线系 (D 线系) :	3P~nD,	n=3,4,5,...
锐线系 (S 线系) :	3P~nS,	n=4,5,6,...
基线系 (F 线系) :	3D~nF,	n=4,5,6,...

其中 n' , l' 固定不变, 将 (3) 式中关于 n' , l' 的谱项称为固定项, 以 $A_{n'l'}$ 表示之; n , l 项称之为变动项。因此式 (3) 可写作

$$\tilde{\nu} = A_{n'l'} - \frac{R}{(n - \Delta_l)^2} \quad (4)$$

(二) 钠原子光谱的双重结构

电子具有自旋, 自旋量子数 $s=1/2$ 。由于电子自旋和轨道运动的相互作用, 使原子具有附加能量。这附加能量除了与量子数 n , l 有关外, 还与原子的总角动量量子数 j 有关, 因此同一光谱项又分裂为不同能级。

碱金属原子只有一个价电子, 由于原子实的角动量为零, 因此原子的总角动量就等于价电子的角动量。对于 s 轨道, 电子的轨道角动量为零, 总角动量就等于电子的自旋角动量, 因此 $j=1/2$, 从而 S 谱项只有一个能级, 是单重能级。对于其它轨道, j 可取 $\pm 1/2$ 两个数值, 因此相应的谱项分裂为双重能级。

双重能级的间隔可以用波数差表示为

$$\Delta\tilde{\nu} = \frac{R\alpha^2(Z_s^*)^4}{n^3l(l+1)} \quad (5)$$

其中 Z_s^* 为原子实的有效电荷数。实验上从量子数确定的原子实有效电荷数和根据光谱双重结构确定的有效电荷数不完全相同。

由上式可知, 双重能级的间隔随 n 和 l 的增大而迅速减小。

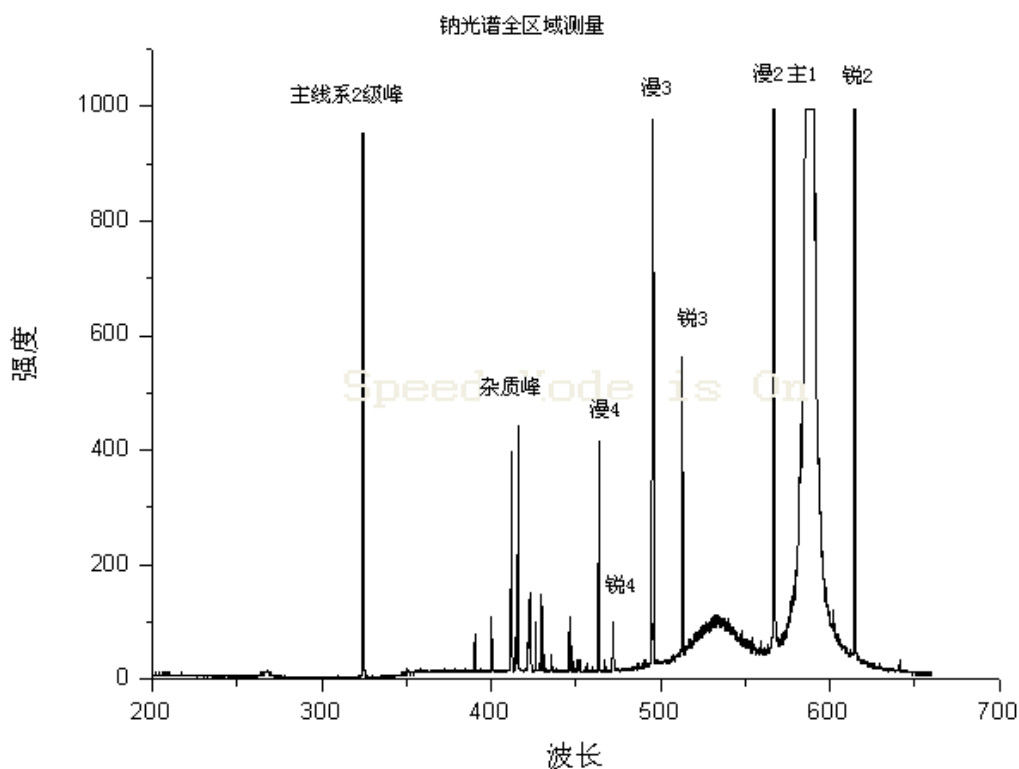
由于上述的电子自旋和轨道运动相互作用造成的能级双重分裂, 碱金属原子的光谱存在着双重结构。

实验仪器

平面光栅单色仪



结果与讨论



(注：这里说的全区域是指仪器能达到的最大区域范围)

1、计算量子缺和固定项

若不考虑谱项的双重分裂，由(4)式可知，在每一个线系中，相邻组谱线的波数差为

$$\Delta \tilde{\nu} = \tilde{\nu}_{n+1} - \tilde{\nu}_n = \frac{R}{(n - \Delta_l)^2} - \frac{R}{(n+1 - \Delta_l)^2}$$

令 $n - \Delta_l = m + a$ ，其中 m 为整数， a 为正小数，根据波数差查里德伯表可得 m 和 a 的

值，由此 Δ_l 可以确定。相邻两组线可以确定一个 Δ_l ，取同一个线系所有求得的 Δ_l 的平均值即为所求的量子缺。(忽略 n 的影响) 当量子缺及主量子数确定之后，根据光谱线的波数数值以及(3)式，就可以得到固定项，即

$$A_{n'l'} = \tilde{\nu} + \frac{R}{(n - \Delta_l)^2}$$

$A_{n'l'}$ 既得，再查里德伯表，求出 m' 和 a' ，进而确定 Δ_l' ，从而固定项所属轨道就可得知，整个线系就完全确定。

计算数据如下：

线系	跃迁	波长	波数	量子缺	固定项	固定项量子缺
		(nm)	(1/cm)	Δ_l	(1/cm)	Δ_l'

主线系	3S-3P	589.4	16966.4	0.92	42331.0	1.40
	3S-4P	324.6	30807.1	平均值: 0.92	42375.0	
漫线系	3P-4D	567.3	17627.4	0.04	24696.4	0.90
	3P-5D	495.6	20177.6	0.08	24674.3	
	3P-6D	463.5	21575.0	平均值: 0.06	24685.1	
锐线系	3P-5S	615.2	16254.9	1.42	24769.5	0.90
	3P-6S	512.8	19500.8	1.40	24709.5	
	3P-7S	472.0	21186.4	平均值: 1.41	24698.2	

至此，整个线系完全确定。

主线系 (P 线系): 3S~nP, n=3,4,5,...

$$\tilde{\nu} = \frac{R}{(3-1.40)^2} - \frac{R}{(n-0.92)^2}$$

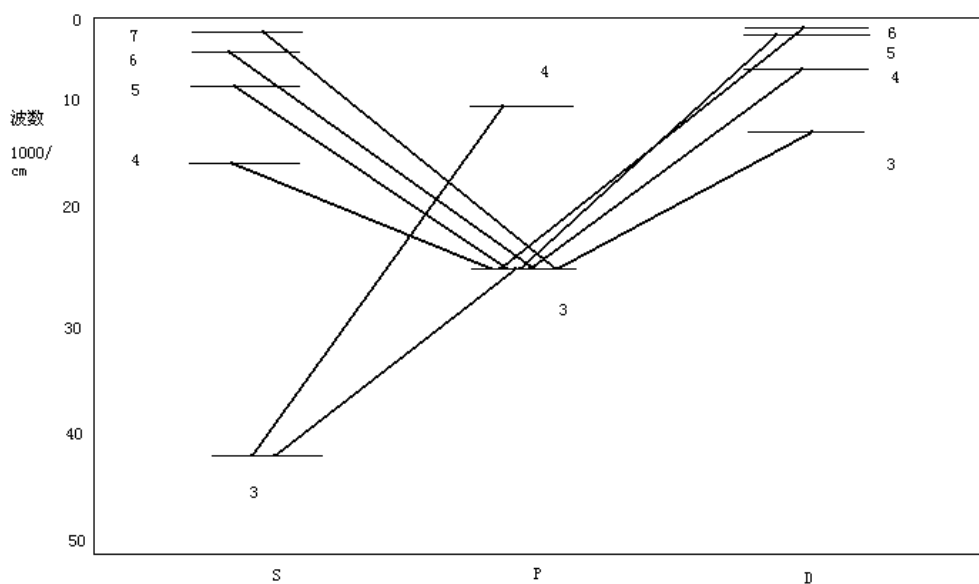
漫线系 (D 线系): 3P~nD, n=3,4,5,...

$$\tilde{\nu} = \frac{R}{(3-0.90)^2} - \frac{R}{(n-0.06)^2}$$

锐线系 (S 线系): 3P~nS, n=4,5,6,...

$$\tilde{\nu} = \frac{R}{(3-0.90)^2} - \frac{R}{(n-1.41)^2}$$

2、钠原子部分能级图



(注：该图并未考虑精细结构，与上述计算前提一致)

3、原子实有效电荷数的计算

考虑 3P 谱项：

(1)从量子数确定的原子实有效电荷数为：

$$Z_{\sigma}^* = \frac{n}{n - \Delta_p} = \frac{3}{3 - 0.92} = 1.4423$$

(2)双重结构：

考虑锐线系的双重结构的间隔

其波数差的平均值为 $\Delta\tilde{\nu} = 20.08\text{cm}^{-1}$

由 (5) 式可得：

$$Z_s^* = 1.9209$$

可发现两个原子实有效电荷数与实验预期一样，不完全相同，这是因为前者的计算并未考虑电子自旋和轨道运动的相互作用，而后者则把这些考虑进去对双重结构进行了计算。所以理论上讲后者更准确和精确。

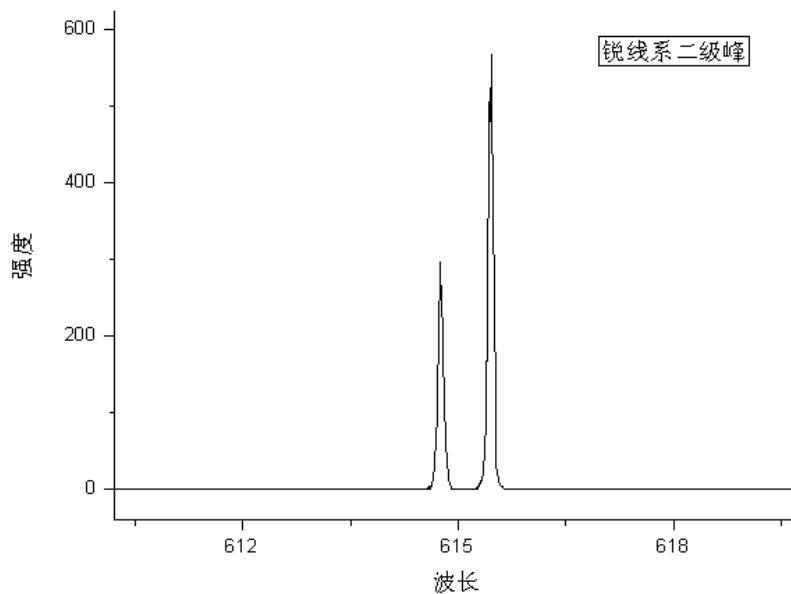
4、双重结构的分析

由 $l=0, j=1/2; l \neq 0, j = \pm 1/2$ 和选择定则可知：

主线系跃迁的上能级是双重能级，下能级是单能级。

锐线系跃迁的上能级是单能级，下能级是双重能级。

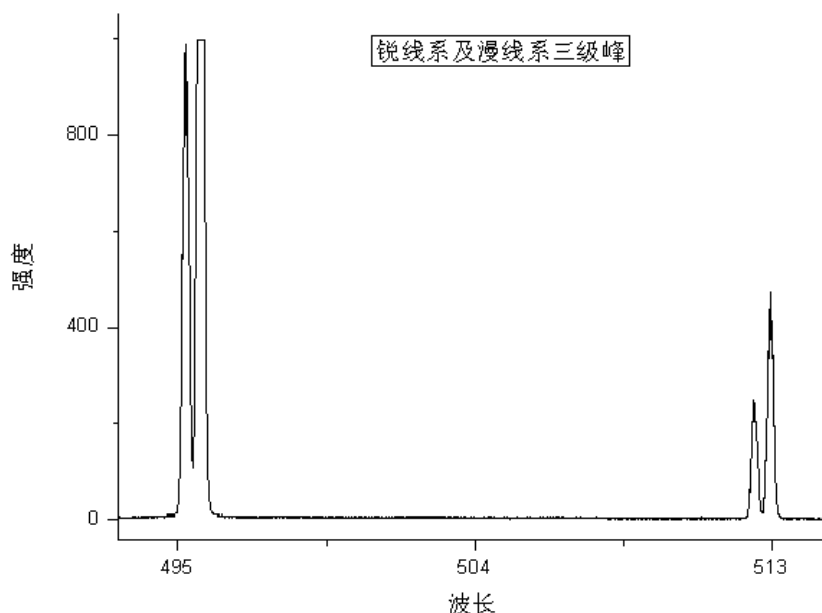
故主线系和锐线系都是双线结构。而由式 (5) 可发现：主线系双线之间的 $\Delta\tilde{\nu} \propto 1/n^3$ ，锐线系任意一组双线之间的波数差相同。在上面计算原子实有效电荷数时，选择取锐线系的平均波数差计算 3P 谱项的有效电荷数，正是利用了这个原理，这样计算有效电荷数既方便了计算又减小了误差。



漫线系和基线系谱线对应跃迁的上下能级都是双重能级。

根据选择定则，每一组谱线的多重结构中应有三个成分，但这样一组谱线不称为三重线，

而称为复双重线，因为它们仍然是由于双重能级之间的跃迁产生的。在漫线系多重结构的三个成分中，有一个强度较弱，且与另一个很近，所以一般都只能观察到两个成分。并且，由于 nD 谱项的双重分裂较小，因此漫线系的多重结构近似等于由 $3P$ 谱项的双重分裂所致。所以在计算漫线系多重结构波数差时可以近似用锐线系的处理方法。



为了方便说明，从实验图像中随机抽取了两张局部区域细测图，从图中可以清楚地看到各线系的多重结构，而在本实验中由于仪器精度问题漫线系只能看到两个成分。

5、双重结构的相对强度

从实验数据可得到：

三个线系的双重结构的相对强度分别为：

主线系： $\lambda_{\text{长}}/\lambda_{\text{短}}=0.621$

锐线系： $\lambda_{\text{长}}/\lambda_{\text{短}}=1.876$

漫线系： $\lambda_{\text{长}}/\lambda_{\text{短}}=2.145$

（注：由于测量时候部分峰值超出了量程，导致漫线系的相对强度无法计算，这里有关漫线系峰值的数据是由陈玉宋臣实验小组提供的）

理论上：

强度和定则：

(1) 从同一能级向下能级跃迁产生的所有谱线成分的强度和正比于该能级的统计权重 $g_{\text{上}}$ 。

(2) 终于同一下能级的所有谱线的强度和正比于该能级的统计权重 $g_{\text{下}}$ 。

将该定则分别应用于不同线系即可得到相对强度。

主线系：

$$3^2 S_{1/2} \sim n^2 P_{3/2,1/2} (n = 3, 4, \dots)$$

$$\frac{I_{PA}}{I_{PB}} = \frac{g_{3/2}}{g_{1/2}} = 2:1$$

其中 $g_{3/2}$ 和 $g_{1/2}$ 分别为 $n^2P_{3/2}$ 和 $n^2P_{1/2}$ 的统计权重。

$$\text{所以 } \lambda_{\text{长}} / \lambda_{\text{短}} = 1:2$$

与实验计算结果很接近。

锐线系：

$$3^2P_{3/2,1/2} \sim n^2S_{1/2} (n=4,5,\dots)$$

$$\frac{I_{SA}}{I_{SB}} = \frac{g_{1/2}}{g_{3/2}} = 1:2$$

$$\text{所以 } \lambda_{\text{长}} / \lambda_{\text{短}} = 2:1$$

与实验计算结果很接近。

漫线系：

$$3^2P_{3/2,1/2} \sim n^2D_{5/2,3/2} (n=3,4,5,\dots)$$

上下能级均为双重。令其成分波长从小到大依次为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ，强度为 I_1, I_2, I_3 。

由强度和定则 1：

$$\frac{I_2}{I_1 + I_3} = \frac{g_{5/2}}{g_{3/2}} = 3:2$$

由强度和定则 2：

$$\frac{I_2 + I_3}{I_1} = \frac{g_{3/2}}{g_{1/2}} = 2:1$$

由两式可得： $I_1: I_2: I_3 = 5: 9: 1$

前面在双重结构分析中提到的与另一条很接近且强度较弱的就是 I_3 。

由于它们很近，一般都无法分辨开，所以通常放在一起，用 I_{23} 表示。

$$\text{所以 } \frac{I_1}{I_{23}} = \frac{5}{9+1} = 1:2$$

与实验计算结果很接近。

发现漫线系的相对强度比值与锐线系的相同。

相对强度可以帮助加深对双重结构的理解和便于在光谱测量中进行区分和辨认。比如通过相对强度能很简单地分辨出是否属于主线系，因为主线系双重结构中波长较大的强度较小，与其它线系都相反。

不论从多重结构波数差还是从双线结构强度比看，漫线系和锐线系都十分接近。说明 nD 谱项的双重分裂确实很小。

结论

本实验很好地为钠原子结构的理论提供了实验证明。
对于实验者来说，通过做这个实验对原子结构有了更深刻的理解。

致谢

感谢白老师在实验中的指导和帮助。
感谢近代物理实验课程所有的老师所提供的环境以及各种帮助。
感谢我的同组成员杨苏。

参考文献

- 《近代物理》 郑广垣 编著
- 《近代物理实验教程》周孝安等人 合编
- 《近代物理实验》高立模 主编