

# 钠光谱简单分辨

陈柏良-复旦大学物理系

## 摘要:

本实验利用平面光栅单色仪分离光谱的功能来分辨钠灯光谱,并对所获得的钠光谱(波长范围 $300\text{nm} \sim 660\text{nm}$ )作简要的分辨和分析,以了解钠光谱各线系谱线的分布情况。实验中共检测到9条钠谱线,均为双线,其中主线系2条( $3P \sim 3S, 4P \sim 3S$ )、锐线系3条( $5S \sim 3P, 6S \sim 3P, 7S \sim 3P$ )、漫线系4条( $4D \sim 3P, 5D \sim 3P, 6D \sim 3P, 7D \sim 3P$ ),此外还观察到3条未知谱线(波长分别为: $415.95\text{nm}, 455.45\text{nm}, 493.38\text{nm}$ ),这3条谱线不属于钠光谱任何线系而且都是单线,其中 $493.38\text{nm}$ 为氙的光谱。

关键词: 钠光谱、量子缺、光谱线系、光栅单色仪

## 引言:

玻尔的氢原子理论指出里德伯常数不再是一个实验经验常数,而可以由基本物理常数精确地算得 $R = \frac{2\pi^2 e^4 m_e}{ch^3}$ ,而由此得到氢原子中能级 $E_n$ 的能量为 $E_n = -hcR_H \frac{1}{n^2}$ 。碱金属钠是一种类氢原子,原子实并不严实,在价电子场作用下,正负电荷中心不再重合,这时钠原子能级将为 $E_n = -hcR_H \frac{1}{n'^2}$ ,式中 $n'$ 为有效量子数,在 $n$ 不大的情况下 $n' = n + \Delta$ , $\Delta$ 为量子亏损,与轨道角动量值 $l$ 有关,本实验以钠灯作光源,利用光栅单色仪及光电倍增管探测钠光谱,计算碱金属钠的量子缺,分辨钠光谱线。

## 原理:

氢原子光谱谱线波数差可以用两光谱项之差来表示:

$$\tilde{\nu} = T(n_1) - T(n_2) = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right);$$

类似的对类氢原子钠, 谱线波数可以写成:

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

钠光谱主要有 4 个线系:

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

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

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

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

由于电子自旋, 这些谱线在高分辨率光谱仪观察时成为多重线。其中主线系因为上能级是 2 重态 ( $^2P_{1/2}, ^2P_{3/2}$ ), 所以观察时都为双线, 著名钠黄光双线 ( $589.3nm$ ) 就属于主线系, 锐线系因为下能级是 2 重态, 所以也是双线, 漫线系上下能级都是双重态, 理论上 4 种组合方式, 但由于跃迁选择定则的限制, 实际发生的只有 3 种, 即漫线系应为 3 线, 但由于 3 线中有两根谱线靠得很近而且波长较长的那条谱线强度很弱, 所以观察时一般也只能观察到漫线系双线。这就提供了一种在多种谱线混合的情况下分辨钠谱线的方法——寻找双线。

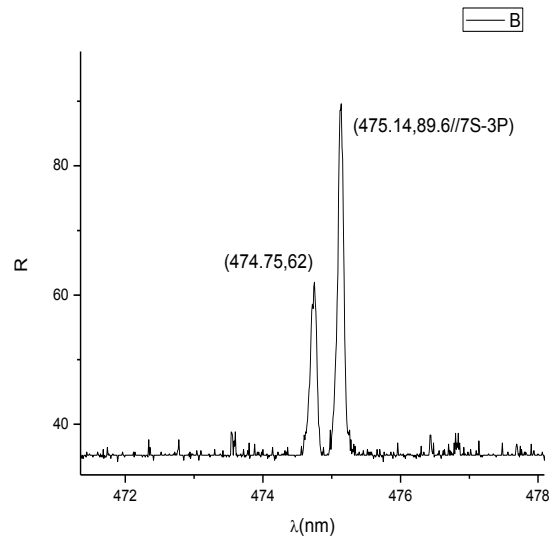
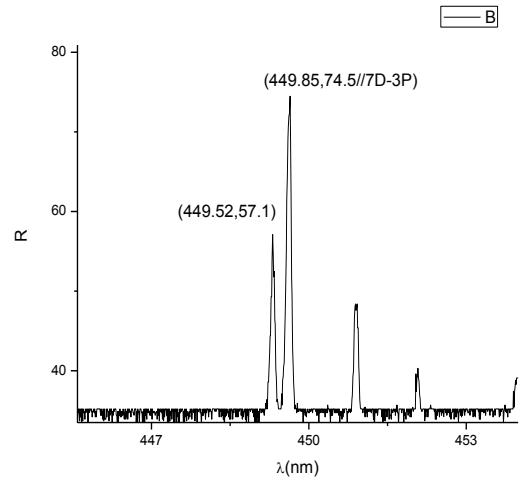
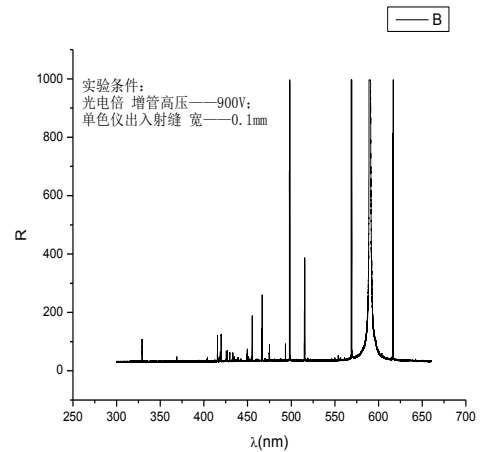
实验所用仪器如下图:

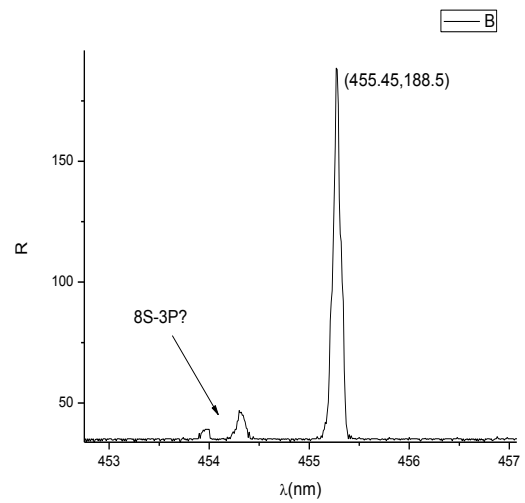
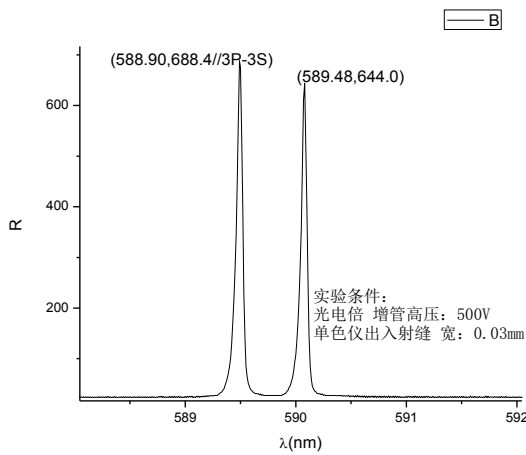
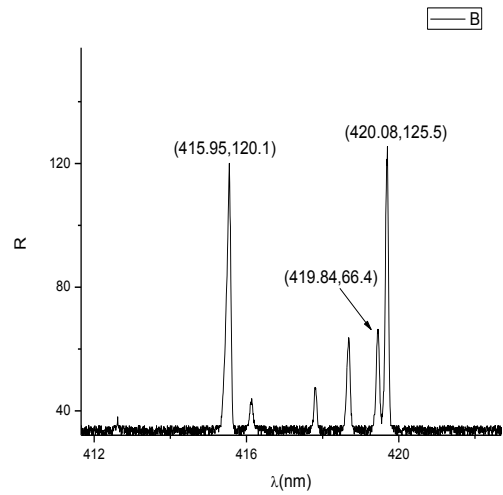
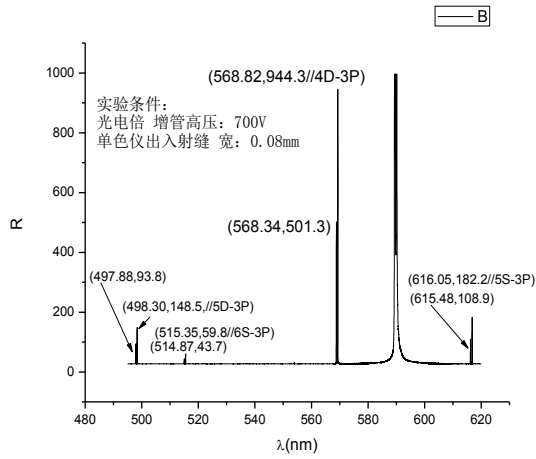


单色仪可以扫描一定波长范围内的谱线, 而光电倍增管用来记录光强。换用不同的光源 (氢灯、钠灯) 即可完成对单色仪的定标和钠谱线的测量。

## 结果:

实验中共获得具有双线结构的谱线 9 条, 主线系  $4P \sim 3S$  谱线由于仪器调节的原因未能分开而观察为单线。





主线系:

330.05nm(4P ~ 3S);

588.90|589.48nm(3P ~ 3S);

锐线系:

474.81|475.20nm(7S ~ 3P);

514.87 | 515.35nm(6S ~ 3P);

615.48 | 616.05nm(5S ~ 3P);

漫线系:

449.52 | 449.85nm(7D ~ 3P);

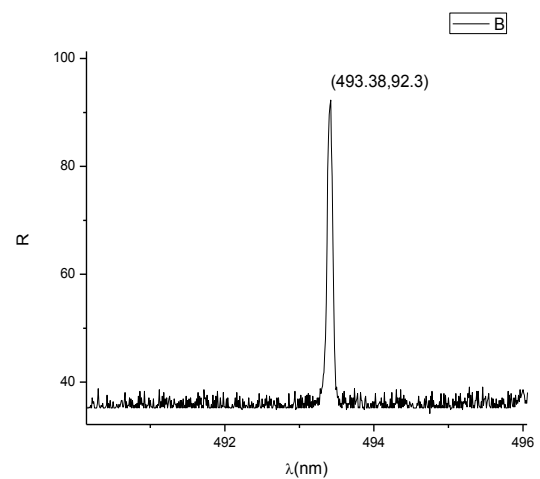
466.50|466.87nm(6D ~ 3P);

497.88|498.30nm(6D ~ 3P);

568.34 | 568.82nm(4D ~ 3P);

实验获得谱线除了钠光谱外还观察到比较不同的3条谱线,这3条谱线均为单线,波长分别为:

415.95nm, 455.45nm, 493.38nm。



两个疑点:

- 1) 419nm 附近双线谱线强度 (125.5) 比(7D~3P) 谱线 (74.5) 要强, 不符合随主量子数增加, 谱线强度下降的规律, 比较氫光谱在该波长附近谱线发现有相对强度150的谱线, 而钠光谱在 419nm 附近却只有理论谱线 (见附录) 存在, 所以这条谱线应为氫的光谱。

Observed Wavelength Air (Å)	Ritz Wavelength Air (Å)	Rel. Int. (?)	$A_{ki}$ (s <sup>-1</sup> )	Acc.	$E_i$ (cm <sup>-1</sup> )	$E_k$ (cm <sup>-1</sup> )	Configurations
4 123.55	4 123.5+	10			77 185.041	- 101 429.3	$5p^5(2P^{\circ}_{1/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{1/2})4f$
4 135.133	4 135.132+	20			68 045.156	- 92 221.362	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{3/2})8p$
4 146.78	4 146.810+	2			68 045.156	- 92 153.279	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{3/2})8p$
4 175.17	4 175.1+	6			79 986.618	- 103 931.4	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})5d - 5p^5(2P^{\circ}_{1/2})5f$
4 193.01	4 193.009+	20			67 067.547	- 90 910.052	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{3/2})4f$
4 193.528	4 193.530+	150			67 067.547	- 90 907.090	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{3/2})4f$
4 203.695	4 203.695+				67 067.547	- 90 849.440	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{3/2})4f$
4 205.404	4 205.404+	10			67 067.547	- 90 839.777	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{3/2})4f$
4 235.03	4 235.1+	15			80 322.746	- 103 928.2	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})5d - 5p^5(2P^{\circ}_{1/2})5f$
4 279.16	4 279.1+	2*			81 925.514	- 105 288.2	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})5d - 5p^5(2P^{\circ}_{1/2})6f$

- 2) 3条未知谱线各为什么元素的光谱?

查询 NIST 光谱数据库发现氫光谱在 493.38nm 附近存在相对强度 500 的谱线。

Observed Wavelength Air (Å)	Ritz Wavelength Air (Å)	Rel. Int. (?)	$A_{ki}$ (s <sup>-1</sup> )	Acc.	$E_i$ (cm <sup>-1</sup> )	$E_k$ (cm <sup>-1</sup> )	Configurations
4 807.0190	4 807.019+		2.4e+06		68 045.156	- 88 842.256	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{3/2})7p$
4 829.708	4 829.708+	400			68 045.156	- 88 744.559	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{3/2})7p$
4 843.2934	4 843.293+	300			68 045.156	- 88 686.500	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{3/2})7p$
4 916.507	4 916.506+				68 045.156	- 88 379.126	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{1/2})6p$
4 923.152	4 923.151+	500			68 045.156	- 88 351.681	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{3/2})7p$

而相对强度为 400 和 300 的氫谱线实验中未观察到, 另外的 415.95nm, 455.45nm 两谱线也既不属于钠光谱也不属于氫光谱。

Observed Wavelength Air (Å)	Ritz Wavelength Air (Å)	Rel. Int. (?)	$A_{ki}$ (s <sup>-1</sup> )	Acc.	$E_i$ (cm <sup>-1</sup> )	$E_k$ (cm <sup>-1</sup> )	Configurations
4 500.978	4 500.979+		6.2e+05		67 067.547	- 89 278.706	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{1/2})6p$
4 524.6805	4 524.681+		2.1e+05		67 067.547	- 89 162.356	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{1/2})6p$
4 543.99	4 543.6+	6			81 925.514	- 103 928.2	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})5d - 5p^5(2P^{\circ}_{1/2})5f$
4 576.60	4 576.603+				67 067.547	- 88 911.692	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6d$
4 582.7472	4 582.747+				68 045.156	- 89 860.015	$5p^5(2P^{\circ}_{3/2})6s - 5p^5(2P^{\circ}_{1/2})6p$

利用钠光谱几条明显的双线计算量子数, 所采用的谱线有:

主线系  $3P \sim 3S, 4P \sim 3S$  ;

锐线系  $5S \sim 3P, 6S \sim 3P$  ;

漫线系  $4D \sim 3P, 5D \sim 3P, 6D \sim 3P$ , 共 7 条谱线。

计算方法:

代入钠原子谱线波数公式  $\tilde{\nu} = R_{\infty} \left( \frac{1}{(n_2 + \Delta_2)^2} - \frac{1}{(n_1 + \Delta_1)^2} \right)$ , 其中第一项为下能级对应固定

项, 同一线系相邻谱线有相同的固定项, 因而利用这两条谱线能计算出该线系上能级量子数缺值。

最终得量子缺值分别为： $\Delta_s = -1.3659$ 、 $\Delta_p = -0.8853$ 、 $\Delta_d = -0.016$ 。

## 结论:

利用钠光谱各线系均为双线这一特点，能在300~660nm范围内观察到9条钠谱线，其中主线系  $n = 4$  那条谱线由于仪器调节的原因未能观察到双线，其余8条谱线均为双线，包括钠黄光双线（主线系  $n = 3$ ），锐线系（ $n = 5, 6, 7$ ）3条谱线和漫线系（ $n = 4, 5, 6, 7$ ）4条谱线。除了钠光谱线外，我们还观察到3条“独特”的谱线，其中493.38nm为氙光谱，而另外两条谱线415.95nm, 455.45nm还未知。

## 参考文献:

- [1] 戴道宣、戴乐山. 近代物理实验. 第二版. 高等教育出版社, 2003
- [2] NIST Atomic Spectra Database

## 附录:

钠光谱（400nm ~ 423nm）:

### Na I: 10 Lines of Data Found

**Wavelength range: 4000 - 4230 Å**

**Wavelength in: vacuum below 2000 Å, air between 2000 and 20000 Å, vacuum above 20000 Å**

Observed Wavelength Air (Å)	Ritz Wavelength Air (Å)	Rel. Int. (?)	$A_{ki}$ (s <sup>-1</sup> )	Acc.	$E_j$ (cm <sup>-1</sup> )	$E_k$ (cm <sup>-1</sup> )	Configurations
	4 193.012		1.70e+05	C	16 956.172	- [40 798.656]	$2p^63p - 2p^613d$
	4 196.039		3.40e+04	C	16 973.368	- [40 798.656]	$2p^63p - 2p^613d$
	4 196.039		2.04e+05	C	16 973.368	- [40 798.656]	$2p^63p - 2p^613d$
	4 199.138		5.9e+04	C	16 956.172	- [40 763.874]	$2p^63p - 2p^614s$
	4 202.174		1.18e+05	C	16 973.368	- [40 763.874]	$2p^63p - 2p^614s$
	4 213.001		2.20e+05	C	16 956.172	- [40 685.535]	$2p^63p - 2p^612d$
	4 216.057		4.39e+04	C	16 973.368	- [40 685.535]	$2p^63p - 2p^612d$
	4 216.057		2.63e+05	C	16 973.368	- [40 685.535]	$2p^63p - 2p^612d$
	4 220.899		7.1e+04	C	16 956.172	- [40 641.138]	$2p^63p - 2p^613s$
	4 223.966		1.41e+05	C	16 973.368	- [40 641.138]	$2p^63p - 2p^613s$