

钠原子光谱强度分析

汪 敏

(复旦大学 物理学系, 上海)

摘要: 钠原子作为碱金属的代表以及与生活的息息相关都使得人们对它的研究十分感兴趣。在大学物理实验中, 对钠原子光谱的测量更是大学生必做的实验之一。本文通过实验和理论分析, 对钠原子光谱强度分布进行了研究, 得到了两个结论: ①漫线系和锐线系精细结构光强度短波与长波之比是 1:2; ②主线系精细结构光强度短波与长波的比例不确定。

关键词: 钠原子 谱线强度 单色仪 精细结构

钠原子的光谱在原子物理学中有着十分重要的地位。根据其价电子跃迁的能级不同, 可以有四个主要的谱线系: 主线系、锐线系、漫线系、基线系。【1】由于电子自旋与轨道的相互作用, 使得 l、p、d、f...能级分裂, 当然 s 能级不分裂, 这就是原子的精细结构, 它大大丰富了钠原子的光谱图。在大学里的研究当中, 经常把钠原子谱线的研究当作一种类氢原子来研究, 而对他谱线强度的研究较少。本文对钠原子精细结构产生的双线的谱线强度比值进行理论研究, 并且在实验中得到了一致的结果。

1、理论计算

在实验室中通常用电弧、火花或辉光放电等光源得到原子光谱, 在这种情况下考虑谱线的强度, 只需考虑自发辐射跃迁, 设价电子从上能级 m 到下能级 n 的跃迁发出的光谱强度为

$$I_{mn} = N_m A_{mn} h\nu_{mn} \quad (1)$$

式中, N_m 为处于上能级的原子数目, $h\nu_{mn}$ 为上下能级的能量差, A_{mn} 为单位时间内原子从上能级 m 跃迁到下能级 n 的跃迁概率。由于钠原子各光谱线的精细结构分裂带来的能量差是很小的。因此, 在讨论光谱精细结构分裂谱线见的强度分布时可以忽略 $h\nu_{mn}$ 带来的影响。在下面的讨论中, 我们主要是从上能级粒子数 N_m 和跃迁概率 A_{mn} 来讨论谱线精细结构的相对强度。

(1) 主线系: 碱金属的主线系是价电子从 $m^2P_{1/2,3/2} \rightarrow 3^2S$ 跃迁而辐射的光谱线。根据量子力学概论可知, 这两种跃迁概率 A_{j_1} 、 A_{j_2} 是相等的。【2】所以有:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_{j1}}{N_{j2}} = \frac{g_{j1}}{g_{j2}} e^{(E_{j2}-E_{j1})/kT} \quad (2)$$

由于自旋和轨道相互作用导致的能级分裂能量很小，使得 $E_{j2} - E_{j1} \ll kT$ ，所以有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{g_{j1}}{g_{j2}} e^{(E_{j2}-E_{j1})/kT} \approx \frac{g_{j1}}{g_{j2}} = \frac{3/2 \times 2 + 1}{1/2 \times 2 + 1} = 2:1 \quad (3)$$

由于 $j=3/2$ 能级高，产生的波长短，所以，对于主线系，其精细结构的短波比上长波的强度应等于 2:1。

(2) 锐线系：锐线系是从 $m^2S \rightarrow 3^2P_{1/2,3/2}$ 的跃迁而产生的光谱线。其中上能级没有分裂，而下能级是双重态，所以上能级的粒子数是相等的，那么精细结构的两条光谱线的相对强度取决于这两个过程的跃迁频率。根据量子力学 [3] 有：

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_{j1}}{A_{j2}} = \frac{B_{j1}g_{j1}V_{j1}^3}{B_{j2}g_{j2}V_{j2}^3} \quad (4)$$

由于 B 是一个常数，且光谱线频率几乎相等。所以光谱线强度之比最后可以近似看作两能级统计权重 g 之比，具体如下：

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{g_{j1}}{g_{j2}} = \frac{3/2 \times 2 + 1}{1/2 \times 2 + 1} = 2:1 \quad (5)$$

由于 $j=3/2$ 能级高，产生的波长长，所以，对于锐线系，其精细结构的短波比上长波的强度应等于 1:2。

(3) 漫线系：漫线系是从 $m^2D_{5/2,3/2} \rightarrow 3^2P_{1/2,3/2}$ 的跃迁产生的光谱线。其中上下能级都分裂了，根据选择定律 $\Delta j = 0, \pm 1$ 可知，一共有三条光谱线产生。如右图所示：由于上能级分裂没有下能级分裂的能级大，在实验中，不能区分 I1 和 I2，那么我们可以把 I1 和 I2 看做一种光，这样其自发辐射情况与锐线系的情况相同，也就是：

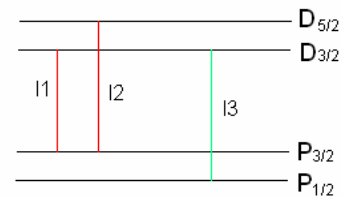


图 1 漫线系能级跃迁图

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{g_{j1}}{g_{j2}} = \frac{3/2 \times 2 + 1}{1/2 \times 2 + 1} = 2:1 \quad (6)$$

即对于漫线系，其精细结构的短波比上长波的强度应等于 1:2。

但是以上的计算只考虑了自发辐射的情况，对于主线系，由于下能级处于基态，所以

在实验中还存在自吸收的过程。这样，主线系镇南关短波成分与长波成分的强度比不再是 2:1，具体数值和放电条件、光源温度分布。光源结构和线度等许多因素有关。但是，由于锐线系和漫线系不存在自吸收，所以他们短波和长波的比 1:2 在实验室中是存在的。

2、实验装置和实验方法

实验中利用平面光栅单色仪来获得钠原子的光谱，如右图 2 所示，光源发出光束后经透镜聚光后，均匀地照明入射狭缝 S1，由于 S1 位于凹面反射镜 M2 的焦平面上，因此光束经过 M2 反射后成为一束平行光，照射到平面光栅 G 上。凹面反射镜 M3 将衍射光会聚到它的焦平面（出射狭缝 S2）上，平面反射镜 M1，M4 是使光束转向的。最后，光线从 S3 射出并通过光电倍增管增大被计算机计数。

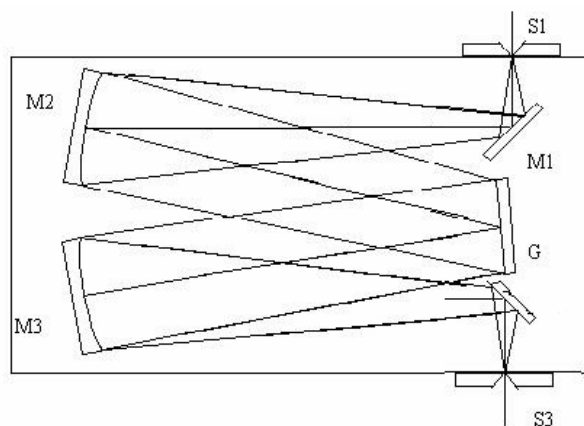


图 2 平面光栅单色仪的光学系统

在完成仪器的平行度的调节和出、入射峰零点的测量后，我们利用钠原子的共振线（589.0nm 及 589.6）对实验进行调零，然后在整个光谱范围内，按照谱线的特点寻找全部可能找到的钠的谱线，并且将凡是能分开的双线单独测量，这样，我们就得到了 Na 原子的光谱图了。

3、实验结果及分析

实验中我们一共找到了五组光谱线，如下表所示：（单位：nm）

497.46	497.88	514.52	515.02	568.30	568.86	588.95	589.54	615.62	616.30
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

利用项值计算各能级跃迁辐射的波长，与上面的结果进行比较，可以将上面的光谱线进行以下的分类，并且计算双线的相对强度之比。

(1) 主线系：测量结果如下图 3 所示：

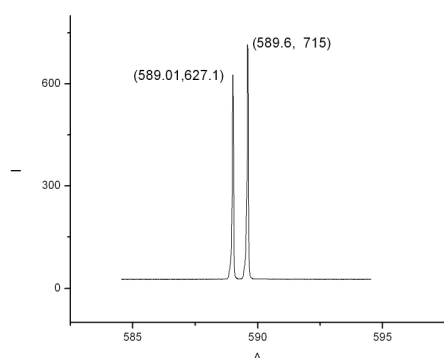


图 3 钠原子主线系光谱图

测得噪音值强度为 26，两个峰的强度分别为 627.1 和 715，这样，我们可以计算出钠双黄线的短波比上长波的相对强度比为 1:1.15，与计算值 2:1 相差很远，但是，由于自吸收的存在而使得强度比不再是 2:1，而具体是多少与实验条件有关，所以，这个结果并没有与理论相矛盾。

(3) 锐线系：测量结果如下图 4 所示：

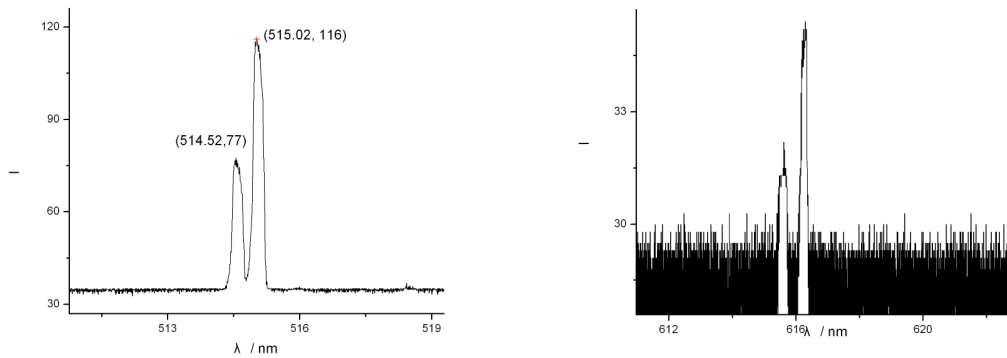


图 4 钠原子锐线系光谱图

左图对应的的谱线跃迁是 $6S_{1/2} \rightarrow 3P_{1/2,3/2}$ ，测量得背景音为 37，短波和长波的光强值为 77 和 116。计算可得其短波与长波的相对强度之比为 1:2。

右图对应的的谱线跃迁是 $5S_{1/2} \rightarrow 3P_{1/2,3/2}$ ，测量得背景音为 29，短波和长波的光强值为 32 和 35。计算可得其短波与长波的相对强度之比为 1:2。

可见，锐线系的相对强度与理论计算一致。

(3) 漫线系：测量结果如下图 5 所示：

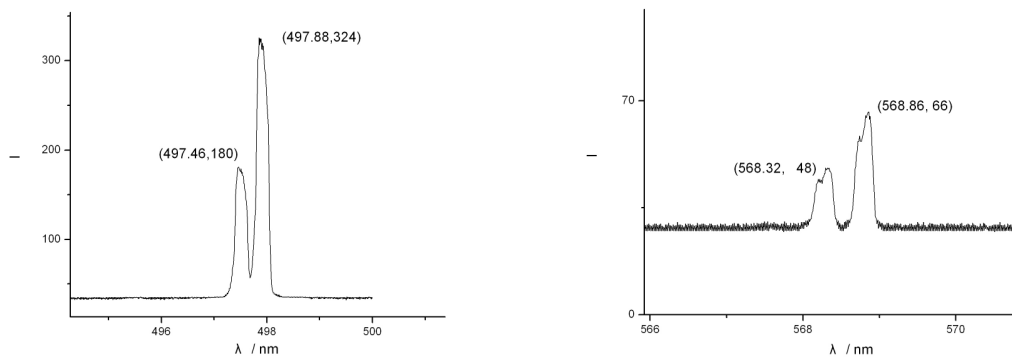


图 5 钠原子漫线系光谱图

左图对应的的谱线跃迁是 $5D_{5/2,3/2} \rightarrow 3P_{1/2,3/2}$ ，测量得背景音为 34，短波和长波的光强值为 180 和 324。计算可得其短波与长波的相对强度之比为 1:2。

右图对应的的谱线跃迁是 $4D_{5/2,3/2} \rightarrow 3P_{1/2,3/2}$ ，测量得背景音为 29，短波和长波的光强值为 48 和 66。计算可得其短波与长波的相对强度之比为 1:2。

可见，漫线系的相对强度与理论计算一致。

4、结束语

我们对钠原子的光谱线强度进行了理论分析和实验验证，都看到了相同的结果。可见，理论分析和实验结果是具有一致性的。同时，经过严密的理论推导以及完整的实验验证，我们对谱线产生的原因及其强度的影响机制有了更加清楚的理解。可以看到，在这个非常平常的现象背后，隐藏了并不简单的原理，我们应该善于应用我们所了解的知识，去发现生活中的物理，生活中的美。

致谢：这篇论文的顺利完成得益于马世红教授的悉心指导和蓝凡立同学的精心配合，在此仅表达我衷心的感谢！

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
- 【2】 David J.Griffiths Introduction to Quantum Mechanics 机械工业出版社，2006.
- 【3】 顾建中 原子物理学 高等教育出版社，1986