

钠原子能级的斯塔克结构*

邱济真 张 森 梁 宜 徐云飞 王 刚
(浙江大学物理系)

提 要

本文报道钠在主量子数 $n=12, 13, 14$ 附近能区的斯塔克(Stark)效应, 外场从 $0\sim 8\text{ kV/cm}$ 。观察到随着电场的增加, 角动量小的项并入线性斯塔克簇, 且不同 $|m|$ 的能级简并解除。对实验结果进行了分析讨论。

关键词: 斯塔克效应, 准简并, 反交叉。

一、引 言

由于获得及研究里德堡态的实验技术的发展, 人们再次对原子与外电场间的相互作用发生兴趣。在这方面, 一个颇有意义的课题是研究里德堡原子在静电场中的能级分裂与移动, 即斯塔克效应。随着主量子数 n 的增大, 电子与外加电场的耦合作用以 n^2 增大, 而结合能则以 n^{-2} 减少, 最终斯塔克效应将对原子的能级结构起主导作用。利用以这方面实验为基础的斯塔克开关技术, 可以在零场中获得所需的任意 l 态布居。另外, 也可进一步研究外场中原子的自电离态及光吸收截面在零场电离限附近随波长的振荡等^[1,2]。

对于碱金属里德堡态的能级斯塔克结构, 已从理论上及实验上进行了研究^[3,4]。本文报道 Na 原子在 $0\sim 8\text{ kV/cm}$ 电场中, 在主量子数 $n=12, 13, 14$ 附近的能级斯塔克结构, 从实验上证实 L. Zimmerman 等人用计算法求出的钠原子在 $n=15$ 附近的能级斯塔克结构的一些基本特征在不同能量区域同样存在, 并对 Na 原子不同 $|m|$ 的斯塔克能级的简并随着电场的增大而解除的现象进行了观察与讨论。

二、实验方法及结果

实验所用装置可参看文献[5]。Na 原子从原子炉中射出, 炉温为 440°C 。密度约为 $10^{19}/\text{cm}^3$ 的原子束在作用区与两束激光相正交。作用区处于两相距 1 cm 的平行极板之间。两极板间可加 $0\sim 8\text{ kV}$ 的直流电压, 以获得一均匀静电场。当 $n=14$ 时, 经典场电离限 $F_0=1/16n^4\approx 8.4\text{ kV/cm}$ 。本实验过程中 F 不超过 8 kV/cm , 小于 F_0 。第一束激光波长 $\lambda_1=5890\text{ \AA}$, 将 Na 原子从 3^2S 基态激发至 $3^2P_{3/2}$ 态。第二束激光波长从 $\lambda_2=4170\text{ \AA}$ 扫描至 4243 \AA 。这两束光分别由同一台 Nd:YAG 激光器的倍频光 (532 nm) 和三倍频光 (355 nm)

收稿日期: 1987年4月10日; 收到修改稿日期: 1987年6月19日

* 国家自然科学基金资助的课题。

泵浦若丹明 590 和 Stilbene 420 而获得。第一束激光线宽 $\Delta\lambda_1=0.2 \text{ \AA}$ ，第二束激光线宽 $\Delta\lambda_2=0.1 \text{ \AA}$ 。在两束光的光路中均加一线偏振器，使两束激光均为平行于电场方向的线偏振光，从而得到终态 $|m|=0, n=12, 13, 14$ 附近的斯塔克结构如图 1 所示。本实验中由 λ_1 或 λ_2 光子将斯塔克能级上的原子光电离，得到的离子信号由电子倍增器检测^[5]。能级位置的标定是利用零场中的 $11d$ 和 $15d$ 两个里德堡能级的位置 (40540.35 cm^{-1} 和 40958.00 cm^{-1})，当 λ_2 扫描至 $11d$ 和 $15d$ 附近时，取消外加电场。在扫描范围内， λ_2 的变化可近似地认为是线性的。

为了对不同 $|m|$ 的能级简并随着外场强 F 的增加而解除的情况进行观察，在 $F=37.4 \text{ kV/cm}$ 至 $F=5.96 \text{ kV/cm}$ 的范围内，我们去掉第二束激光光路中的线偏振器，将得到的能级图与前面加了线偏振器所得到的能级图进行比较，发现在 $F < 5.00 \text{ kV/cm}$ 时，对于 $n=12$ 的斯塔克簇， $|m|=0$ 和 $|m|=1$ 的能级在本实验的分辨率 (0.5 cm^{-1}) 条件下一直是简并的。由图 2 可以明显地看出，当电场增至 5.96 kV/cm 时，斯塔克簇中能级分裂，即不仅有 $|m|=0$ 的能级，而且有 $|m|=1$ 的能级出现。

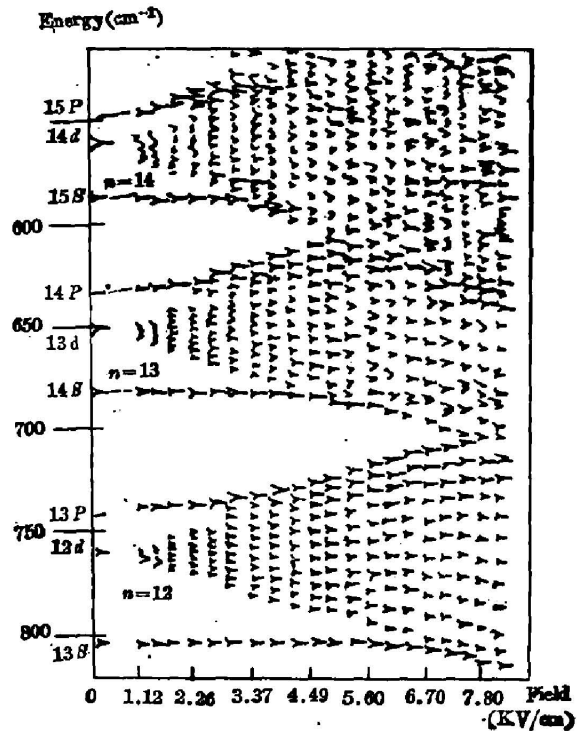


Fig. 1 Experimental map of Stark structure of Na in the vicinity of $n=12, 13$ and $14, |m|=0$

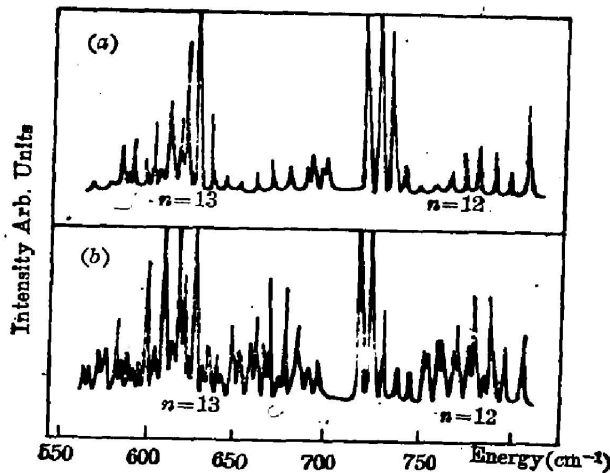


Fig. 2 Comparison of the Stark levels of Na in the same energy range, but with different $|m|$

(a) $|m|=0$; (b) $|m|=0.1$; the field is 5.96 kV/cm

三、分析与讨论

氢原子斯塔克能级的二级近似解为^[6]:

$$E = -\frac{1}{2n^2} + \frac{3}{2} n(n_1 - n_2)F - \frac{1}{16} n^4 [17n^2 - 3(n_1 - n_2)^2 - 9m^2 + 19]F^2, \quad (1)$$

式中 n 为主量子数, n_1, n_2 为抛物量子数, m 为磁量子数, 且 $n = n_1 + n_2 + |m| + 1$ 。在场强 F 不太大时, 主要表现出线性特征。这是氢原子库伦中心势场的独特性质。但对于碱金属, 则不存在由于波函数球对称而产生的能级简并, 所以在 F 较小时, 就表现出两次斯塔克效应^[7]。这一点从图 1 中的 $13p$ 态可以很明显地看出。零场中, 根据电偶极跃迁的选择定则, p 态是不出现的。加上电场, 且 F 较小时, $13p$ 偏离 $n=12$ 的斯塔克簇, 但当 F 增加时, 则并入线性斯塔克簇内。 $14p, 15p$ 同样表现出这一特性。 F 继续增大, 由^[7]

$$\Delta E_{\gamma JM} = F^2 \sum_{\gamma' J'} \frac{|\langle \gamma JM | D_\gamma | \gamma' J' M \rangle|^2}{E_{\gamma J} - E_{\gamma' J'}}, \quad (2)$$

可知, 与电场平方有关项明显发挥作用, 因而图上表现出更为复杂的二次结构。

在线性斯塔克簇中, 碱金属原子表现出与氢原子不同的特性, 即不同 $|m|$ 的能级发生准简并(quasi degeneracy)。只考虑线性效应时, (1)式可写成 $E = -(1/2n^2) + (3/2)nkF$, 其中 $k = n_1 - n_2 = n - 2n_2 - 1 - |m|$ 。所以, 对于氢原子 $|m|=1$ 的线性斯塔克簇, 其能级应位于 $m=0$ 能级的当中。然而, 对碱金属则并非如此。在我们的实验分辨率条件下, Na 在 $n=12, F < 5.00 \text{ kV/cm}$ 时, 斯塔克簇中 $|m|=0$ 与 $|m|=1$ 能级是分辨不出的。 Fabre 等^[8] 人曾在低电场 ($< 10 \text{ V/cm}$) 情况下, 讨论了 Na 在 $n=29$ 附近不同 $|m|$ 能级的准简并情况, 这与本实验所得结果是一致的。只是在不同能量区域, 这种简并发生在不同电场范围内。 n 越大, 相应的电场 F 越小。

Zimmerman 等^[4] 人用计算法得到了碱金属原子在 $n=15$ 附近的斯塔克结构图。图 3

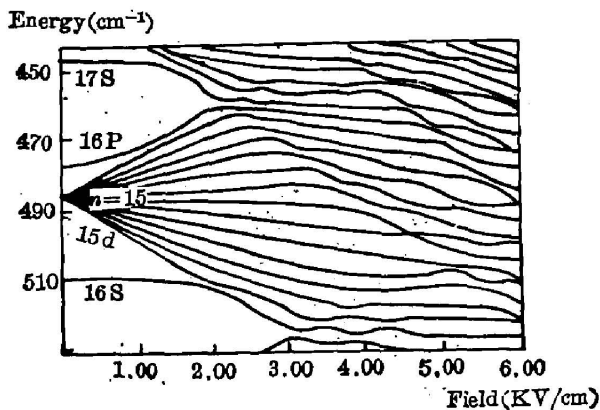


Fig. 3 Calculated Stark levels of Na in the vicinity of $n=15, |m|=0$ (Ref, [4])

即为其中 Na 原子 $n=15, |m|=0$ 的斯塔克图。由于碱金属各里德堡态系列 s, p, d, \dots 等量子亏损不随能量而变, 所以用这一计算法得出的一些规律在其他能量区域也同样适用。例如: n 与 $n+1$ 两簇第一次相交的电场 $F \propto n^{-6}$ 。由图 1 可知, $n=12$ 与 $n=13$ 两簇相交于 $F \approx 7.43 \text{ kV/cm}$, $n=13$ 与 $n=14$ 两簇相交于 $F \approx 4.80 \text{ kV/cm}$, 与这一规律符合很好。对于氢原子, 由于其库伦场的对称性, 相同 $|m|$ 不同 n 值的斯塔克簇可以相交。然而, 碱金属原子的波函数不存

在这一对称性, 所以, 通常情况下, 其相同 $|m|$ 但不同 n 值的斯塔克簇是不相交的。在二者相遇处, 形成“反交叉”(anticrossing)。根据 Zimmerman 等人的计算, n 与 $n+1$ 簇在第一

个反交叉处的最小能量间距为

$$\Delta E = 1.9 \delta / n^4 (\text{a. u.}), \quad (3)$$

从图 1 及图 4 可知, 当 $F=7.43 \text{ kV/cm}$ 时, $n=12$ 与 $n=13$ 两簇间 $\Delta E \approx 3.3 \text{ cm}^{-1}$ 。这与将 p 态的量子亏损 $0.85^{[9]}$ 代入 (3) 式 ($\delta=1-0.85=0.15$) 计算所得结果基本相符。由于本实验中电场变化间隔较大, 因而对于 ΔE 所对应的电场数值的确定是不够准确的, 这样 ΔE 本身数值也就不够准确, 这一点从 $n=13$ 与 $n=14$ 两簇相遇处可看出, 有待于今后做进一步的实验测定。

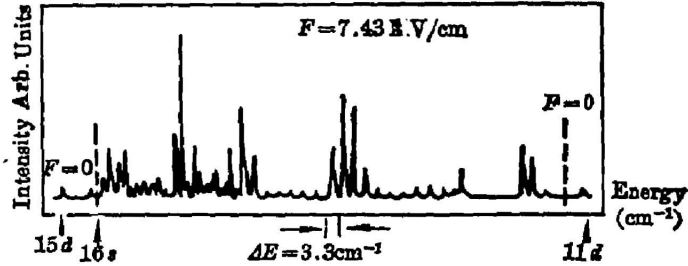


Fig. 4 The measurement of the energy ΔE at the first anticrossing between the Stark manifolds $n=12$ and $n=13$

对图 1 和图 3 进行比较, 可以观察到对于 Na 原子, $|m|=0$ 的不同 n 值附近的能级斯塔克结构的一些基本特征的相似性。例如, $17s, 16s$ 与 $15s, 14s, 13s$ 及 $16p$ 与 $15p, 14p, 13p$ 趋向性完全相似。对于 s 态, $\delta_0=1.35^{[9]}$, $\delta_0-\delta_1=0.5$, 处于上、下 p 态当中, 受到几乎相等的推斥, 均表现出非常小的二次斯塔克效应。这些说明 Na 原子不同能量区域里德堡态斯塔克效应具有一些共同的规律性。也就进一步证实量子亏损在分析讨论斯塔克效应时的重要作用。这对于我们分析更为复杂的碱土元素 (Sr, Ca 等) 的斯塔克效应有很大帮助。

感谢实验过程中与吴璧如副教授进行的有益讨论。

参 考 文 献

- [1] K. A. Safinya *et al.*; *Phys. Rev.*, 1980, **A22**, No. 3 (Sep), 1063~1071.
- [2] W. Sandner *et al.*; *Phys. Rev.*, 1981, **A23**, No. 5 (May), 2448~2456.
- [3] D. Kleppner *et al.*; *Rydberg State of Atoms & Molecules* ed. by B. F. Stebbings, F. B. Dunning, (Cambridge University Press, 1983), 73~90.
- [4] M. L. Zimmerman *et al.*; *Phys. Rev.*, 1979, **A20**, No. 6 (Dec), 2251~2271.
- [5] 陆杰等; 《光学学报》, 1986, **6**, No. 5 (May), 469~470.
- [6] L. D. Landau; *Quantum Mechanics*, (Pergamon Press, London-Paris, 1958), 254.
- [7] I. I. Sobelman; *Atomic Spectra & Radiative Transitions* ed. by V. I. Goldanskii *et al.*, (New York, 1970), 171~176.
- [8] C. Fabre *et al.*; *J. Phys. (B)*, 1984, **17**, No. 16 (Aug), 3217~3228.
- [9] C. Fabre *et al.*; *Phys. Rev.*, 1978, **A18**, No. 1 (Jul), 229~231.

Stark structure of atomic levels of Na

QIU JIZHEN, ZHANG SEN, LANG YI, XU YUNFEI AND WANG GANG
(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 10 April 1987; revised 19 June 1987)

Abstract

We report the experimental results of the Stark effect in the vicinity of $n=12$,

13, 14 of Na in the field from 0~8kV/cm. It is observed that the low-angular-momentum terms merge into the linear manifolds and the $|m|$ degeneracy is removed when the field increases. The experimental results are discussed in this paper.

Key words: Stark effect; quasi-degeneracy; anticrossing.

新型(系列)偏光器件四项成果通过国家级鉴定

1987年11月20~21日在山东省曲阜市国家科委召开由曲阜师范大学激光教研室承担研制的“七·五”国家重点科研项目——新型(系列)偏光器件四项成果的国家级鉴定会。

新型(系列)偏光器件四项成果包括: LGP-6 马普·赫斯棱镜、LGP-8 超高透棱镜、LSP-9 平行分束偏光镜和 GXC-I 型高消光比测试系统。

鉴定委员会是由全国光学界的 16 名专家教授组成, 陈继述教授任组长; 国家科委派代表专程与会指导, 山东省科委领导亲临主持。

鉴定委员会的测试小组根据计量测试大纲和实际条件, 经过严谨、反复测试, 测定了三项偏光器件和高消光比测试系统的主要参数和性能为:

(1) LGP-6 马普·赫斯棱镜

透射比为 0.86; 消光比优于 10^{-5} ; 抗光损伤能力为 50 W/cm^2 (连续), 300 MW/cm^2 (脉冲); 波前畸变为 $1/8$ 波长; 通波段使用或镀单波长硬增透膜; 棱镜孔镜角(全偏张角) $> 10^\circ$ 。

(2) LGP-8 超高透偏光镜(单、复式两大系列)

透射比为 0.99; 消光比优于 10^{-5} ; 抗光损伤能力为 50 W/cm^2 (连续), 300 MW/cm^2 (脉冲); 波前畸变为 $1/8$ 波长; 通波段使用。

(3) LSP-9 平行分束偏光镜

总透射比为 0.91; 消光比优于 10^{-5} ; 抗光损伤能力为 50 W/cm^2 (连续), 300 MW/cm^2 (脉冲); 波前畸变为 $1/8$ 波长; 通波段使用或镀单波长硬增透膜; 剪刀差 $> 1 \text{ mm}$ 。

(4) GXC-I 型高消光比测试系统

消光比可测到 10^{-9} 以下; 也可测偏光器件的透射比。

鉴定结论如下

(1) 四项成果技术资料基本齐全、测试数据可靠。全部达到、并部分超过国家重点科技项目新型(系列)偏光器件专题合同要求;

(2) 三个系列激光偏光器件设计新颖, 有创造性。主要技术指标达到国外同类产品的先进水平。其中部分指标如抗光损伤能力等超过了国际先进水平;

(3) GXC-I 型高消光比测试系统, 设计思想新颖合理, 采用了自制的高精度激光偏光器件, 并采取连续驱动、同步记录; 利用衰减器消除光电器件的非线性记录等一系列措施, 使系统测试消光比可达 10^{-9} 量级, 重复性亦较好;

(4) 四项成果均填补了我国偏光技术领域中的空白, 其中超高透偏光镜与高消光比测试系统经查阅大量国内外有关专利和文献资料, 迄今未发现报道, 属于首创。

激光偏光器件是激光偏光技术的重要和关键器件。由于国家科委的重视和大力支持, 使新型(系列)偏光器件的研制工作卓有成效, 从而结束了我国科技市场上缺少高精度国产激光偏光器件产品的落后局面, 并部分打入了国际市场。

(黎 凤)