

# Na 原子斯塔克态寿命的实验测定\*

方达涓\*\* 钟建伟 谢卫军\*\*\* 张 森  
(浙江大学物理系, 杭州 310027)

**摘 要** 在 1250~ 2000 V/cm 的静电场变化范围内, 用可调谐激光两步激发实现 Na 原子在  $n = 17, m = 0$  斯塔克簇各能态布居。采用延迟脉冲场电离方法测量了各斯塔克能态在不同外电场下的寿命。讨论了外电场强度和环境黑体辐射对斯塔克态寿命的影响。

**关键词** 钠原子斯塔克态, 寿命, 电场电离。

近年来, 对高激发原子与外电场相互作用的研究有许多新的进展, 其中尤以斯塔克能级的精确测定<sup>[1]</sup>、谱线展宽和位移的测量<sup>[2]</sup>及场电离规律和机制的探讨<sup>[3]</sup>等方面的工作最为深入。但对斯塔克态寿命的实验观察报道很少, 文献[4]和[5]中对 Rb 和 Na 原子高于经典电离限的个别短寿命斯塔克共振态进行了研究。文中采用测量谱线宽度的方法来计算态的寿命, 未考虑环境黑体辐射对斯塔克原子实际寿命的影响。

对经典电离限以下的斯塔克态由于寿命较长, 对应的谱线很窄, 受激光线宽及其它展宽效应的限制, 用测量荧光衰减或线宽来计算寿命的方法已不再适用。本文报道采用延迟脉冲场电离方法在不同外电场下对 Na 原子  $n = 17$  斯塔克簇各能态寿命的测量结果, 并对部分斯塔克态定量测量了环境黑体辐射对其寿命的影响。

## 1 实验原理、方法与结果

置于外电场中的激发态类氢原子,  $|n, n_1, n_2, m\rangle$  能态到  $|n', n'_1, n'_2, m\rangle$  能态 ( $E_{n'} < E_n$ ) 的自发跃迁几率在抛物坐标表象下可表示为:

$$A(n', n'_1, n'_2, m | n, n_1, n_2, m) = \frac{4e^2 \omega^3}{3\hbar c^3} |(n', n'_1, n'_2, m | r | n, n_1, n_2, m)|^2 \quad (1)$$

式中  $n_1, n_2$  为抛物量子数,  $m$  为磁量子数, 它们与主量子数  $n$  的关系为  $n = n_1 + n_2 + |m| + 1$ 。 $|n, n_1, n_2, m\rangle$  能态的自发辐射寿命可表示为该态总的自发跃迁几率的倒数, 即

$$\frac{1}{\tau} = \sum_{n' < n} \sum_{n'_1=0}^{n'-m-1} A(n', n'_1, n'_2, m | n, n_1, n_2, m) + \sum_{\substack{n'_1=0 \\ (n'=n)}}^{n_1-1} A(n', n'_1, n'_2, m | n, n_1, n_2, m) \quad (2)$$

\* 国家自然科学基金资助课题。

\*\* 现通讯地址: 中国计量学院光电技术研究所, 杭州 310034。

\*\*\* 现通讯地址: 江西九江师范专科学校物理系, 九江 332000。

收稿日期: 1996 年 3 月 26 日; 收到修改稿日期: 1996 年 8 月 12 日

当环境温度  $T \neq 0$  时, 背景黑体辐射将产生受激发射和吸收引起的跃迁, 产生附加的衰减项

$$\frac{1}{\tau^b} = \sum_{n' \neq n} \sum_{\substack{n_1 \\ n_1}}^{n'-m-1} B(n', n_1, n_2, m | n, n_1, n_2, m) \rho(n', n_1, n_2, m | n, n_1, n_2, m) + \sum_{\substack{n_1 \neq n_1 \\ (n' = n)}} B(n', n_1, n_2, m | n, n_1, n_2, m) \rho(n', n_1, n_2, m | n, n_1, n_2, m) + \int B \rho dE \quad (3)$$

式中  $B(n', n_1, n_2, m | n, n_1, n_2, m)$  为  $|n, n_1, n_2, m\rangle$  能态至  $|n', n_1, n_2, m\rangle$  能态的受激跃迁系数,  $\rho(n', n_1, n_2, m | n, n_1, n_2, m)$  为与跃迁频率对应的黑体辐射能量密度

$$B(n', n_1, n_2, m | n, n_1, n_2, m) \rho(n', n_1, n_2, m | n, n_1, n_2, m) = \frac{4e^2 \omega^3 | \langle n', n_1, n_2, m | \mathbf{r} | n, n_1, n_2, m \rangle |^2}{3\hbar c^3 \exp(\hbar \omega/kT) - 1} \quad (4)$$

(3) 式中的积分项对电离阈以上的连续态进行。在光谱实验的高真空和低密度原子束条件下, 可忽略碰撞等其它过程引起的布居数衰减, 并且当环境温度不太低时, (3) 式中的  $n' = n$  求和项可以忽略。这样, 外电场中  $|n, n_1, n_2, m\rangle$  激发态的实际寿命可表示为

$$\frac{1}{\tau^*} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau^b} = \sum_{n' \leq n} A_{nn'} + \sum_{n' \neq n} B_{nn'} \rho_{nn'} + \int B \rho dE \quad (5)$$

为简明起见, 上式中省略了各矩阵元中的  $n_1, n_2, m$  量子数标记及对这些下标的求和。

实验原理及方法参见文献[6, 7]。从原子炉中水平出射的 Na 原子束进入两平行板中央的作用区。作用区中原子束、激光束和电场强度三者互相垂直。两束可调谐染料激光把 Na 原子从  $3p^2P_{3/2}$  激发到斯塔克态。激发模式由外加偏振器件控制, 本实验中取两束线偏振光的  $\pi\pi$  组合使原子在  $m = 0$  的斯塔克态上得到布居。实验时首先在各给定的外电场下扫描第二束染料激光的波长  $\lambda_2$ , 获得不同电场强度时的斯塔克光谱, 如图 1 所示。然后确定某一电场强度, 对照图 1 通过手动调谐  $\lambda_2$  择定待测的斯塔克态。待测态确定后, 先采用与文献[6]中相同的方法测出该态的电离讯号-场强关系曲线, 如图 2 所示, 由图确定被测态的场电离阈值。然后, 保持脉冲电压的幅值略大于电离阈值, 通过一专门的延时器改变原子的光激发与场电离之间的延迟时间  $t$ , 测得电离讯号幅值随延迟时间  $t$  的衰减曲线, 如图 3 的曲线(a)。根据激光分步激发高度选择性布居的特点, 如不考虑环境黑体辐射引起的能级再布居效应, 这一电离讯号的衰减正比于待测斯塔克态上布居数随时间的衰减。对此曲线经计算机进行指数拟合后即可求出被测斯塔克态的寿命  $\tau_{\text{exp}}$ 。实验结果列于表 1。

对主量子数  $n$  较大的斯塔克态, 室温下环境黑体辐射引起的能级再布居效应, 即(5) 式右边的后两项实际上是不可忽略的<sup>[8]</sup>。计及这一效应, 图 3(a) 给出的离子讯号幅值实际上并

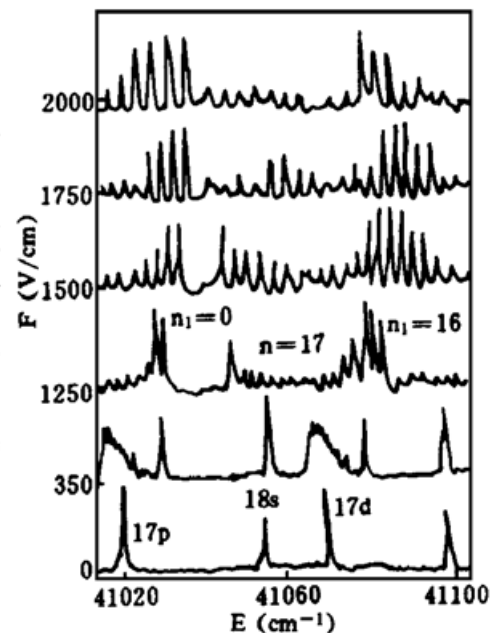


Fig. 1 The Stark map of Na atom ( $F = 0 \sim 2000$  V/cm,  $n = 17, m = 0$ )

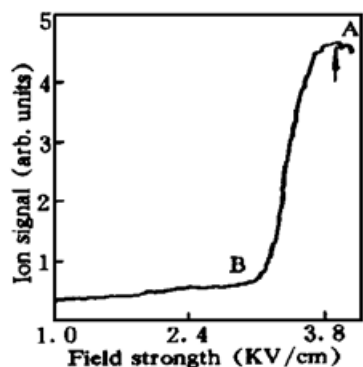


Fig. 2 Ion signal as a function of field strength for Na (17, 15, 2, 0)

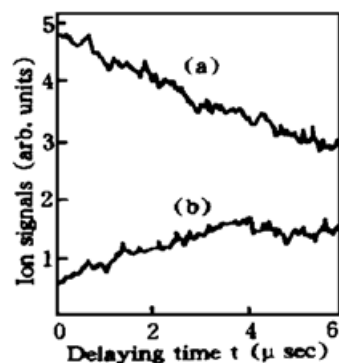


Fig. 3 Ion signal as a function of delaying time for Na (17, 15, 2, 0)

不仅仅限于待测斯塔克态上的粒子，同时还包括了因黑体辐射从待测态跃迁到高能级的粒子，因此这一衰减曲线反映的实际上是待测斯塔克态及其以上各能级所有粒子数随时间的衰减，由这一曲线求得的  $\tau_{\text{exp}}$  并非待测斯塔克态的实际寿命。为单独考察待测斯塔克态上粒子数的衰减规律，作者选取部分斯塔克态作了如下的测量：分别保持脉冲电压幅值略高于和恰低于被测态的电离阈值(图 2 中 A 处和 B 处)，测出电离讯号与延迟时间关系曲线。前一曲线表征了被测斯塔克态及其以上各能态粒子数随时间的衰减[图 3(a)]，后一曲线表征了被测斯塔克态以上各能态粒子数随时间的衰减[图 3(b)]，两曲线对应点差值随时间变化曲线即为待测斯塔克态上粒子数随时间的衰减。由此即可求得该斯塔克态的实际寿命  $\tau_{\text{exp}}^*$ 。实验求得的  $\tau_{\text{exp}}^*$  一并列于表 1。

Table 1. Experimental lifetimes of the Na  $n = 17$  manifolds ( $m = 0$ )

field strength	$n_1$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	lifetime( $\mu\text{s}$ )																	
1250 V/cm	$\tau_{\text{exp}}$	5.1	6.2	5.9	6.8	5.6	5.4	5.8	4.3	4.0	3.9	4.1	3.6	4.2	5.9	6.1	8.2	6.1
	$\tau_{\text{exp}}^*$		4.3								3.7							5.9
1500 V/cm	$\tau_{\text{exp}}$	5.7	6.5	6.1	6.2	5.9	5.3	5.7	4.0	3.6	4.1	4.0	3.9	4.7	9.1	7.8	6.7	6.1
	$\tau_{\text{exp}}^*$		4.6															4.8
1750 V/cm	$\tau_{\text{exp}}$	4.9	5.1	4.7	6.3	5.8	5.3	5.1	3.8	/	4.0	3.6	3.3	5.3	6.4	9.6	5.1	6.9
2000 V/cm	$\tau_{\text{exp}}^*$	4.8	5.3	5.6	4.5	5.5	4.9											

实验时脉冲电压的幅值测量系统用直流电压标定，标定误差小于 2.5%，两平行板之间相距为 0.5 cm，距离误差不大于 2%，因此电场测量总的相对误差不大于 5%。延时器的时间调整精度为 5%。对每一被测态，实验测量次数均在三次以上，经统计平均定出寿命测量值。对靠近斯塔克簇中央的大多数能态，用同一种方法所得测量结果的离散度小于 15%，但有一部分靠近斯塔克簇边缘的能态测量离散度大于 15%，最高达 23%。因此，如不考虑计算机取样拟合过程中引入的误差，寿命测量值的最大相对误差约为 33%。

## 2 讨 论

1) 从实验方法可以看出，图 3(a) 曲线离子讯号的衰减只由下跃迁所引起，而黑体辐射引起的上跃迁所导致的被测态粒子数的减少在衰减曲线上反映不出来。对照(5)式，可把式中第二项写为  $\sum_{n' < n} B_{nn'} \rho_{nn'}$  和  $\sum_{n' > n} B_{nn'} \rho_{nn'}$  两项之和，这样图 3(a) 曲线的衰减规律显然由(5)式中

涉及下跃迁的两项  $\sum_{n' < n} A_{nn'}$  和  $\sum_{n' < n} B_{nn'} \rho_{nn'}$  所决定。由于原子里德伯态斯塔克能级的密度大体上与能级的有效主量子数  $n^* 4$  成正比, 在被测态能级位置不太高时, 黑体辐射引起的受激上跃迁总速率  $\sum_{n' > n} B_{nn'} \rho_{nn'}$  应比受激下跃迁总速率  $\sum_{n' < n} B_{nn'} \rho_{nn'}$  大得多, 并且在室温环境下的黑体辐射谱中与受激下跃迁的相关能级差对应的光子数密度数值较小, 由此引起的受激下跃迁总速率通常比自发跃迁总速率小得多, 因此由图 3(a) 衰减曲线求得的寿命值  $\tau_{\text{exp}}$  接近于自发辐射寿命。实验中采用第二种方法测得的  $\tau_{\text{exp}}^*$ , 直接校正了由黑体辐射引起的受激上跃迁对被测态寿命的影响, 表征了待测斯塔克态的实际寿命。但由于未考虑布居到被测态以上的原子与被测态原子向低能级的自发下跃迁速率的差异, 这种校正还是不完全的。

2) 由表 1 可见, 在实验的四个外场条件下, 各能态寿命随外场的变化只引起数值的改变而不导致量级的变化。在同一外场条件下, 簇内各能态寿命的分布总体上呈两侧大、中间小的特点。进一步的观察还可发现, 位于斯塔克簇中央的能态 ( $n_1 = 4 \sim 11$ ) 在外电场变化时寿命值改变不大, 大体上随外场增加略为减小。而邻近两侧边缘的态 ( $n_1 = 0 \sim 3, n_1 = 12 \sim 16$ ) 其寿命值随外场的改变而变化很大。相比较而言, 短波侧这种寿命变化剧烈的态多于长波侧。上述现象可能是由外侧态与相邻斯塔克簇及外侧态相互之间的作用而引起。从实验获得的斯塔克光谱(图 1) 可看出,  $n = 17$  斯塔克簇与  $n = 18$  斯塔克簇在外电场小于 1250 V/cm 时即已相交并发生抗交叉,  $n = 17$  簇与  $n = 16$  簇则在 1750 V/cm 左右相交而发生抗交叉(在这一抗交叉点附近,  $n_1 = 0$  态的寿命出现了一个明显的“台阶”式变化)。可见, 在实验的外场条件下,  $n = 17$  斯塔克簇两侧与相邻斯塔克簇的相互作用均已十分强烈, 这种抗交叉作用又通过态-态相互作用从抗交叉点向簇内传递, 引起附近能态的强烈混合, 使这些能态的寿命产生急剧变化。由于短波侧这种相互作用比长波侧更强, 因而短波侧寿命变化大的态比长波侧更多。

3) 在零场条件下, 根据偶极跃迁选择定则,  $l$  能态的自发跃迁只能下跃迁至  $l \pm 1$  能态。对  $n$  较大的高  $l$  态, 可供下跃迁的能级比低  $l$  态要小得多, 因此高  $l$  能级比低  $l$  能级寿命要长得多。当施加外电场后, 不同  $l$  能态的混合使偶极跃迁禁戒解除, 因此随着外电场增加, 能态混合的加剧, 同一斯塔克簇内各子能态的寿命将趋于接近。表 1 中  $n = 17$  斯塔克簇各能态寿命都在同一量级 ( $\sim 10^{-6}$  sec), 这与作者根据以上分析预期的结果一致。从表 1 还可见, 黑体辐射对斯塔克态实际寿命的影响极为显著, 在所测量的几个态中, 影响的程度最低约 8% ( $n_1 = 9$  态), 最高接近 30% ( $n_1 = 2$  态), 寿命越长的态, 黑体辐射的影响越显著。以上述及的两个因素, 均使同一外场下同一斯塔克簇内各能态实际寿命的差异变小。

作者对徐云飞副教授、陈星工程师在实验过程中给予的支持和帮助表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- [1] M. Ciocca, C. E. Burkhardt, J. J. Leventhal, Precision Stark spectroscopy of sodium: Improved values for the ionization limit and bound states. *Phys. Rev. (A)*, 1992, **45**(7): 4720~ 4730
- [2] M. Kh. Salakhov, E. V. Sarandaev, I. S. Fishman, New approach to the search for relationships between the Stark parameters of broadening and shift of atomic and ionic spectral lines. *Opt. Spectrosc.*, 1991, **71**(6): 509~ 512

- [3] C. Bordas, H. Helm, Electric-field ionization of Rydberg states of  $H_3$ . *Phys. Rev. (A)*, 1993, **47**(2): 1209~ 1219
- [4] S. Fenuille, S. Liberman, E. Luc-koenig *et al.*, Field-induced stabilisation of Stark states in the rubidium atom. *J. Phys. (B)*, 1982, **15**(8): 1205~ 1216
- [5] P. Menicholl, T. Bergeman, H. J. Metcalf, Lifetime measurements of interference-narrowed sodium Stark resonances. *Phys. Rev. (A)*, 1988, **37**(9): 3302~ 3312
- [6] 方达渭, 戴长建, 舒晓武等, Yb 原子里德伯态及价态的场电离阈. *物理学报*, 1995, **44**(5): 678~ 684
- [7] 谢卫军, 方达渭, 舒晓武等, Na 原子高里德伯态的辐射寿命. *光学学报*, 1996, **16**(4): 567~ 570
- [8] W. E. Cooke, T. F. Gallagher, Effects of blackbody radiation on highly excited atoms. *Phys. Rev. (A)*, 1980, **21**(2): 588~ 593

## Lifetime Measurement of Stark States of Sodium

Fang Dawei      Zhong Jianwei      Xie Weijun      Zhang Sen

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 26 March 1996; revised 12 August 1996)

**Abstract** We have obtained the population of  $n = 17$ ,  $m = 0$  Stark states of sodium atom in the static electric fields ranged from 1250 to 2000 V/cm by two-step excitation with tunable lasers. The lifetimes of the Stark-manifold states are measured by using delayed electric field ionization. The influences of applied fields and blackbody radiation on the determination of the lifetimes are discussed.

**Key words** sodium stark state, lifetime, electric field ionization.