

Ca 和 Sr 原子 $n'dnl$ 自电离态在低 电场中的线性 Stark 效应*

张 森 邱济真 梅式民 陈 星

浙江大学物理系, 杭州, 310027

1989年9月26日收到

用激光多步激发技术观察了 Ca 和 Sr 原子 $n'dnl$ 双电子激发自电离态的电场效应。Stark 光谱显示, 在 $F < 1/3n^3$ 的低电场中, Stark 能级分裂与外电场强度线性相关。也观察了近简并 1 亚能级的 Stark 混合使自电离共振谱线在外电场中的增宽。这一效应在高温等离子体中对双电子复合速率的增加起重要作用。

PACC: 3260S; 3280D

一、引 言

在原子高激发态及其外场效应的研究中, 对原子自电离态的电场效应已经进行了不少工作。由于外电场不仅影响离散的自电离态之间的耦合, 而且影响自电离态与连续态之间的耦合, 因此原子自电离态电场效应的研究具有重要的物理意义。另外, 在低密度高温等离子体中, 双电子复合过程是一个主要辐射冷却过程, 在此过程中离子无辐射俘获电子形成双电子激发自电离态, 接着通过辐射使实电子去激发而跃迁到单电子激发里德伯态, 并且里德伯原子向基态的级联跃迁伴随着更多的辐射。由于双电子复合是自电离的逆过程, 自电离速率直接决定着双电子复合速率和电离平衡, 因此在等离子体的辐射原子系统研究中, 原子自电离态的电场效应具有重要的理论和实际意义。

70 年代末期, Freeman 和 Bjorklund^[1] 首先用激光多步激发方法观察了 Sr 原子自电离态光谱在外电场中的分裂, 发现谱线形状和宽度受外电场的强烈影响。为了研究这种电场诱导组态混合效应对谱线宽度-自电离速率的影响, Safinya 等人^[2]对 Ba 原子自电离态在低电场中的 Stark 光谱作了进一步的观察, 并讨论了外电场中谱线宽度的变化及 Stark 混合对自电离速率和双电子复合速率的影响。这种影响在 Jaffe 等人^[3]对 Ba 原子在强电场 ($1/3n^3 < F < 1/16n^4$) 范围的自电离态光谱中也作了观察, 他们发现在零场中自电离速率随 n^{-3} 减小的规律在强电场中变为 n^{-4} 关系。此外, Saloman 等人^[4]和 Kelleher 等人^[5]分别对 Ba 和 Sr 原子观察到较宽的自电离能级与邻近的相反宇称的窄能级在静电场中的干涉, 这种干涉效应引起能级的分裂^[4]或窄能级的强烈增宽^[5]。

* 国家自然科学基金资助的课题。

除了对碱土金属原子自电离态电场效应的实验观察以外, Cole 等人^[6]和 Delsart 等人^[7]分别观察了惰性气体 Xe 和 Kr 原子在静电场中的自电离态光谱. 其中对 Kr 原子的实验得出, 在 $F < 1/3n^5$ 的低电场中, 自电离态谱线宽度正比于 n^{-3} 关系仍然成立. 但是实验表明, 在恒定电场内 Stark 能级分裂 $\Delta E \propto n^{0.7}$, 这一结果与 H 原子具有明显的差异. 最近, Ernst 等人^[8]对 Xe 原子的实验观察得出了类似的结果.

惰性气体与碱土金属原子自电离态光谱在外电场中的差异, 显示了原子自电离态光谱及其电场效应的复杂特性. 为了观察自电离态光谱特性, 我们曾对 Ca 和 Sr 原子 $n'dnl$ 自电离态做了实验测定^[9]. 本文报道在实验测定了 Ca 和 Sr 原子自电离态光谱的基础上, 对其电场效应的进一步观察, 并根据实验结果, 讨论了低电场中自电离能级的线性 Stark 结构, 以及 Stark 混合和谱线增宽效应.

二、实验与结果

原子自电离态的激发方法与文献[9]相同. 对 Ca 和 Sr 原子, 分别由激光两步激发至 $3d^2\ ^3P_0$ 和 $4d^2\ ^3P_0$ 价态, 然后用第三束激光扫描, 对 Ca 原子得到 $3dnl$, $j=1$ 自电离态, 对 Sr 原子得到 $4dnl$, $j=1$ 自电离态. 静电场由两平行板电极产生, 激光束、原子束和电场方向互相垂直. 实验从零电场开始, 逐次增加电场值约 350V/cm , 最大电场强度不超过经典场电离阈 $F = (2n^*)^{-4}$. 在每一固定电场值使波长 λ 扫描, 得出自电离态 Stark 光谱. λ 扫描时, 波长用零场的已知谱线标定^[10].

在实验的电场范围内, Ca 和 Sr 原子第一激发态 $4s4p\ ^1P_1$ 和 $5s5p\ ^1P_1$ 的 Stark 位移

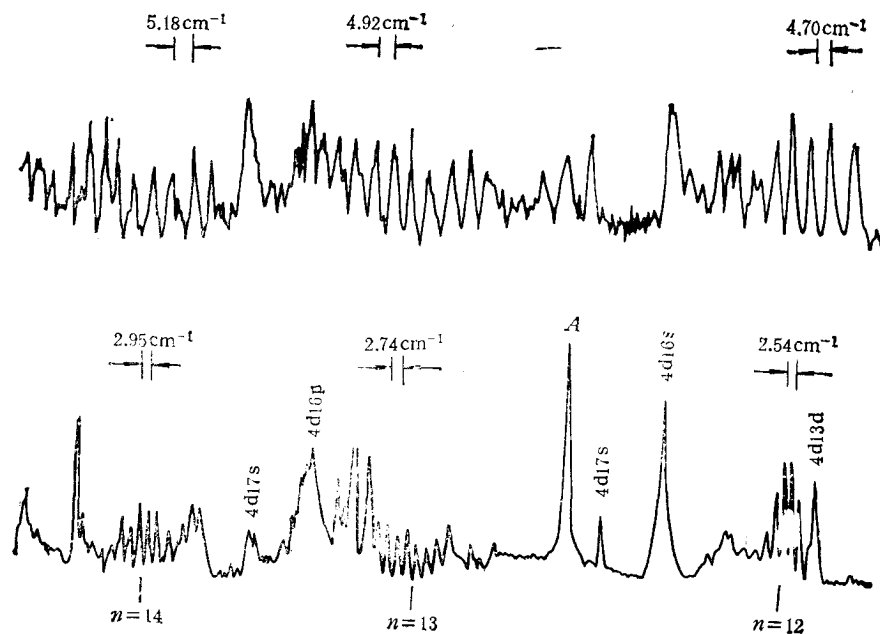


图1 Sr 原子 $4dnl$ 自电离态的 Stark 光谱 (图中标注的为对应的零场态符号)

上图 $F = 3.02\text{kV/cm}$; 下图 $F = 1.68\text{kV/cm}$

可以忽略,但是 Ca 原子 $3d^2\ ^3P_0$ 价态在电场较高时具有较大的 Stark 位移^[10],因此在改变电场时,同时调整第二束激光波长,以保证 $3d^2\ ^3P_0$ 中间态的激发. 对 Sr 原子,按照文献[10]中的方法先测定 $4d^2\ ^3P_0$ 态在实验电场范围内的 Stark 位移,由于位移很小,实验中可以忽略.

图 1 为 Sr 原子 $n = 12-14$ 附近的 Stark 光谱,对应于零场中非氢态的部分谱线已在图 1 中用零场态的符号标注. 在零场中跃迁禁戒的 $4d(^2D_{3/2})ns$ 和 $4d(^2D_{3/2})nd$ 态在电场中由于和邻近的偶极跃迁态之间的角动量和宇称混合也得布居,其中 $4d13d$ 态是按文献[1]中的鉴别认定的,在零场中其量子亏损 $\delta = 1.04$,其余各态在电场中的位置延伸至零场,可以确定其量子亏损 $\delta_{mod1} \sim 0.45$,可以认定为 $4dns$ 态.

图 2 为 Ca 原子 $n = 15-18$ 附近在较低电场中的 Stark 光谱,图 2 中下面为对应的零场中自电离态光谱. 在静电场中 $3dnp\ ^3P_1$ 非氢态长波侧出现的谱线,大致位于相邻两 Stark 簇中间,量子亏损 $\delta_{mod1} \sim 0.5$,对照 Sr 原子的情况,可以认定为 $3dns$ 态,其 $3dnd$ 态可能由于和 Stark 簇靠近,谱线不易分辨.

在图 1 和图 2 中,分别按 $4d^2D_{3/2}$ 和 $3d^2D_{3/2}$ 电离限计算的各 n 为整数的能级位置已在图中标出,由高 $l(l \geq 4)$ 亚能级的 Stark 混合构成的类氢 Stark 簇均分布在 n 为整

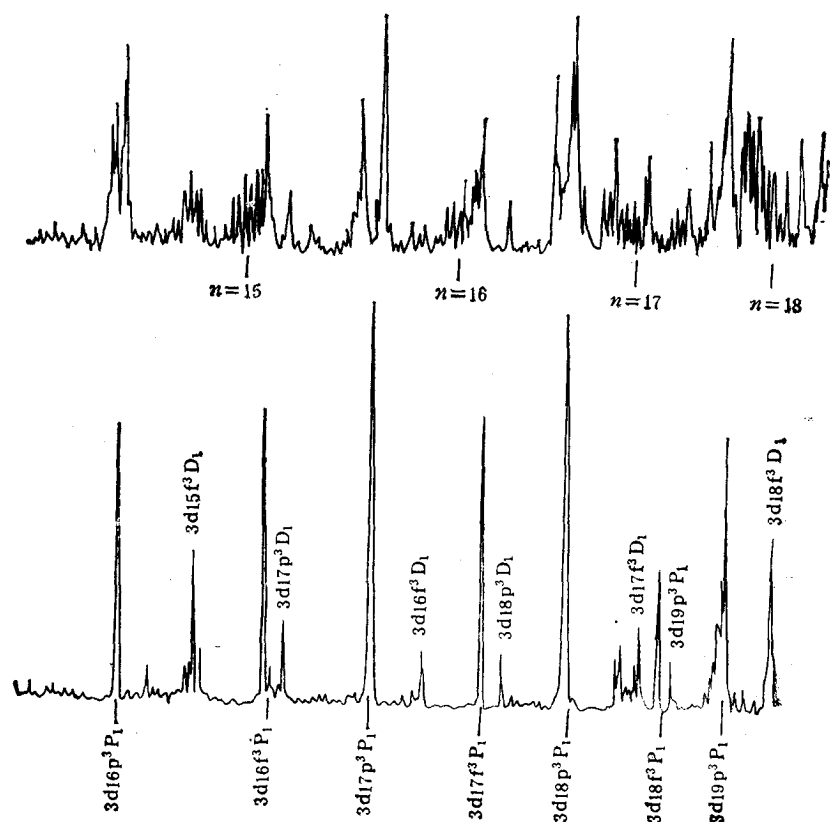


图 2 Ca 原子 $3dnl$ 自电离态的 Stark 光谱

上图 $F = 700V/cm$; 下图为零场自电离态

数的能位附近,说明这些 Stark 簇均收敛于 $^1D_{3/2}$ 电离限. 收敛于 $4d^2D_{3/2}(\text{Sr})$ 和 $3d^2D_{3/2}(\text{Ca})$ 电离限的 Stark 簇由于跃迁概率较小^[9], 讯号与噪声混合, 谱线难以观察.

图 1 中标注“A”的谱线为低于第一电离限的 $5p^2^1D_2$ 价态的光电离谱, 由图 1 可见, 这条谱线在电场加大时相对高度明显降低, 并且宽度明显增加, 这种价态谱线在静电场中线型随场强的变化在 Ca 原子 $3d^2^3P_0$ 和 $3d^2^3P_2$ 价态中也曾观察到^[10], 它是由价态与邻近的非氢里德伯态之间的 Stark 混合产生的干涉效应引起的.

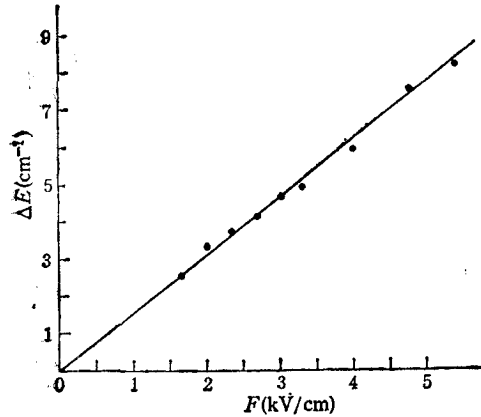


图 3 Sr 原子 $n=12$ Stark 簇能级分裂与外场强 nF 关系
● 为测量值; 直线为 $\Delta E = 3nF(\text{au})$

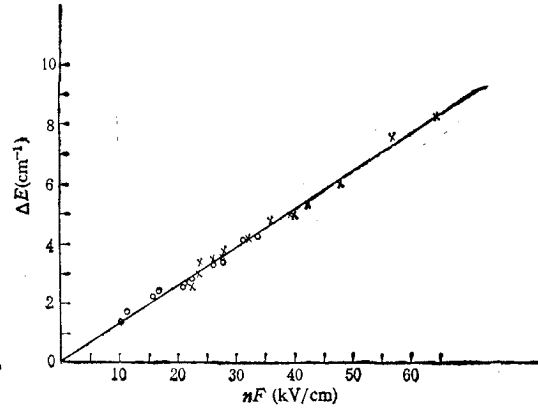


图 4 Sr 和 Ca 原子 Stark 能级分裂与外场强 nF 关系
× 为 Sr 原子测量值; ○ 为 Ca 原子测量值;
直线为 $\Delta E = 3nF(\text{au})$

三、 $n'dnl$ 自电离态的线性 Stark 效应

对 $n'dnl$ 双电子激发态, 当 $n \gg n'$ 时, 在低电场中忽略内层 $n'd$ 电子受外电场的影响, 电场对外层 nl 电子的作用可以作为微扰. Jacobs 和 Davis^[11] 利用微扰理论, 考虑给定主量子数 n 的各近简并 l 亚能态的场致混合, 得出在外电场 F 中双电子激发自电离态的一级近似能量本征值

$$E(n, \lambda, m) = -\frac{z^{*2}}{2n^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{n}{z^*} \right) qF (\text{au}),$$

式中 λ 代替 l , 取值 $0-n-|m|-1$, z^* 为离子实有效电荷数, $q = n_1 - n_2 = n - 2\lambda - |m| - 1$. 由上式取 $z^* = 1$ 可得, 在同一 Stark 簇内, 相邻两 Stark 能级 (n, q, m) 和 $(n, q-2, m)$ 之间的能量间隔 $\Delta E = 3nF$. 这一结果与 H 原子束缚里德伯态在外电场中的能级一阶分裂一致^[12].

但是, Delsart 和 Keller^[7] 对 Kr 原子在 $F = 3 \text{ kV/cm}$ 以下 $n = 8-15$ 的 Stark 簇得出, 自电离里德伯态的能级分裂与 $n^{0.7}$ 成比例, 与 H 原子具有显著的偏离. Ernst 等人^[8] 对 Xe 原子 $n = 14-16$ 自电离里德伯态, 在 $F = 787-2094 \text{ V/cm}$ 电场范围内, 检验了能级分裂的 $n^{0.7}$ 关系, 发现在较低电场中指数增大至 0.87, 并且对高 n 簇能级分裂接近 H 原子.

为了探讨原子自电离态在低电场中 Stark 能级结构的类氢性质,图 3 给出 Sr 原子 $n = 12$ 的 Stark 簇在 $F = 1.687 - 5.386 \text{ kV/cm}$ 电场内的能级分裂与外场强 nF 的关系,图 4 为 Sr 原子在同样电场范围内 $n = 12 - 14$ 的 Stark 簇及 Ca 原子在 $F = 0.70 - 2.10 \text{ kV/cm}$ 电场内 $n = 15, 16$ 的 Stark 簇的能级分裂与外场强 nF 的关系,其中电场值均小于 $F = 1/3n^5 \text{ (au)}$ 。两图中的直线均为 $\Delta E = 3nF \text{ (au)}$ 。由图 4 可见, Sr 和 Ca 原子 $n'dnl$ 自电离态系列在低电场中近简并 l 亚能级的 Stark 分裂均具有线性类氢性质。

碱土金属原子 $n'dnl$ 自电离态是以 $n'd$ 电子代替 $(n' + 1)s$ 电子的离子实和一个 nl 高激发价电子构成的,由于 $n \gg n'$, 两个激发电子之间的关联作用可以忽略^[13], 并且库仑场对 $n'd$ 电子的作用远大于对 nl 电子的作用, 在低电场中可以忽略外场对实内 $n'd$ 电子的影响, 因此, nl 电子在实电场和外电场作用下, 其结构类似于静电场中的里德伯态。Sr 和 Ca 原子 $n'dnl$ 自电离态与 $(n' + 1)snl$ 里德伯态在低电场中具有同样的类氢 Stark 能级结构^[10, 14], 显示了对于 $n'dnl$ 自电离态, 当 $n \gg n'$ 时, 在低电场中 H 原子近似模型仍然适用。

四、Stark 混合与自电离谱线加宽

在零电场中, 原子自电离态的衰变速率 Γ 随 l 增大而减小。Jones 和 Gallagher^[15] 对 Ba 原子 $6P_{1/2}nl (n = 11 - 13)$ 自电离态的实验得出, 在 $l < 8$ 的范围内, $n^3\Gamma$ 随 l 的增加接近指数地减小, 当 $l > 8$ 时, 辐射衰变将代替自电离衰变。因此, 在零场中只有低 l 态具有较大的自电离速率。在低电场中, 线性 Stark 效应使近简并的 l 亚能态混合, 相应地高 l 态自电离速率加大, 这些高 l 态的快速自电离衰变, 在高温等离子体中可以促使双电子复合速率增大^[2]。由图 1 可见, 随着电场的增加, 各 Stark 能级谱线明显加宽, 显示了其自电离速率随电场的增强而进一步加大, 这种效应在高温等离子体的微观电场中将进一步促使双电子复合速率加大、辐射损耗增强, 成为使高温等离子体冷却的重要因素。

在图 2 中, 零场 $3dnp^3P_1$ 态在静电场中谱线向短波端移动, 位移量远大于零场非简并态在低电场中的二阶 Stark 效应^[10], 显示了 $3dnp^3P_1$ 态与邻近的 $3d(n + 1)s$ 态之间存在较强的相互作用。这种相邻的字称相反的自电离态之间的场致混合, 使零场中较窄的 $3dnp^3P_1$ 谱线在电场中显著加宽, 自电离速率加大。类似地, 在图 1 中 $4d(^2D_{3/2})15p\left[\frac{1}{2}\right]_1$ 能级与邻近的 $4d16s$ 能级间距随电场增加而显著加大, 显示出较强的相互作用, 并导致谱线随电场增大而加宽。以上结果与 Kelleher 等人^[5] 对 Sr 原子观察到的 $4d5d^1D_2$ 态在电场中与 $4d6p^1P_1$ 态混合引起的谱线加宽一致。

[1] R. R. Freeman and G. C. Bjorklund, *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 118.

[2] K. A. Safinya, J. F. Delpech and T. F. Gallagher, *Phys. Rev. A*, **22**(1980), 1062.

[3] S. M. Jaffe, R. Kachru, N. H. Tran, H. B. Van Linder van den Heuvel and T. F. Gallagher, *Phys. Rev. A*, **30**(1984), 1828.

[4] E. B. Saloman, J. W. Cooper and D. E. Kelleher, *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 193.

[5] D. E. Kelleher, J. F. Delpech and J. Weiner, *Phys. Rev.*, **A32** (1985), 2230.

[6] B. E. Cole, J. W. Cooper, D. L. Ederer, G. Mehlmann and E. B. Saloman, *J. Phys. B*, **13**(1980), L175.

[7] C. Delsart and J. C. Keller, *Phys. Rev.*, **A28**(1983), 845.

- [8] W. E. Ernst, T. P. Softley and R. N. Zare, *Phys. Rev.*, **A37**(1988), 4172.
- [9] 张森、梅式民、徐云飞, *光学学报*, **9**(1989), 909.
- [10] 张森、邱济真、王刚, *物理学报*, **38**(1989), 481.
- [11] V. L. Jacobs and J. Davis, *Phys. Rev.*, **A19** (1978), 776.
- [12] M. L. Zimmerman, M. G. Littman, M. M. Kash and D. Kleppner, *Phys. Rev.*, **A20**(1979), 2251.
- [13] N. Morita, T. Suzuki and K. Sato, *Phys. Rev.*, **A38**(1988), 551.
- [14] 张森、邱济真、胡素芬、陆杰、钟建伟、梁宜、孙家祯, *物理学报*, **37**(1988), 983.
- [15] R. R. Jones and T. F. Gallagher, *Phys. Rev.*, **A38** (1988), 2846.

LINEAR STARK EFFECT OF THE $n'dnl$ AUTOIONIZATION STATES OF Ca AND Sr ATOMS IN THE LOW-FIELD REGION

ZHANG SEN QIU JI-ZHEN MEI SHI-MIN CHEN XING

Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

(Received 26 September 1989)

ABSTRACT

The electric field effect on the $3dnl$ and $4dnl$ doubly excited autoionization states of Ca and Sr atoms have been observed using a multistep laser excitation technique. The Stark spectra show that splittings of the Stark levels are linearly dependent on the applied electric field in the lowfield region of $F < 1/3n^5$. We have observed also that the autoionization resonance broadens with increasing electric field because of field-induced mixing of nearly degenerate l substates, which can play important role for increase of dielectronic recombination rate in plasmas.

PACC: 3260S; 3280D