

外电场中 Ca 和 Sr 原子光 电离谱的共振结构*

邱济真 张 森 王 刚

浙江大学物理系

1988年10月6日收到

用双光子激发的方法观察了 Ca, Sr 原子在电场中经典场电离限以上的激发光谱. 讨论了光谱共振结构与电场和光的偏振的关系.

一、引 言

对于外加电场中的原子,按照经典的鞍点模型,在原子能量 $E > E_c$ 时应具有连续光谱,其中

$$E_c = E_0 - 2F^{1/2} \quad (1)$$

为经典场电离阈. 但是, 1978 年 Freeman 等人观察到 Rb 在电场中的光电离截面随波长 λ 而共振的现象. 这一共振现象不仅发生在能量大于 E_c 的区域, 而且出现在零场电离限 E_0 附近^[1]. 他们发现共振结构与外场强及激发光的偏振有关, 并提出强场混合模型并作了解释^[2]. 这一现象的发现引起人们很大的兴趣, 在这之后进行了进一步的实验研究和理论分析. Rau 证明了对于氢原子, 其强场混合共振峰间隔遵循规律^[3]

$$\frac{dE}{dn} = (22.5 \text{ cm}^{-1}) \left(\frac{F}{4335} \cdot \frac{V}{\text{cm}} \right)^{3/4}. \quad (2)$$

Luc-Koenig 等人则提出了振子强度补偿的观点来解释这一现象^[4]. Sandner 和 Cooper 分别对 Ba, Na^[5] 和 Yb^[6] 在电场中 $E > E_c$ 的光电离谱进行了观察, 并讨论了在多步激发过程中, 不同的中间态和激发光偏振组合对共振现象的影响, 以求进一步证实强场混合理论的正确性, 且与振子强度补偿的解释进行了比较. 他们的实验结果表明与方程(2)给出的规律是相符的. 在本文中, 我们将对所观察到的碱土原子 Ca 和 Sr 在经典场电离限以上的激发光谱进行讨论. 我们的实验结果进一步证实对于碱土原子在零场电离限 E_0 附近的光电离谱的共振间隔 dE/dn 亦随电场强度按照 $F^{3/4}$ 规律变化. 这一实验结果与用强场混合模型得到的结果一致.

二、实 验 方 法

实验装置大致与我们过去研究 Stark 效应时所用相同^[7]. 实验步骤简述如下: Ca 原

* 国家自然科学基金资助的课题.

子束从炉温 $T = 750^\circ\text{C}$ 的原子炉中射出, 原子束、激光束和直流电场三者相互垂直. 作用区内原子数密度约为 $10^9/\text{cm}^3$. 激光波长从 $4000\text{ \AA}$ 连续扫描至 $4150\text{ \AA}$, 它是由 Nd:YAG 激光器的三倍频光泵浦染料 DPS 而得到的. 激光线宽 $\Delta\lambda < 0.2\text{ \AA}$, 脉冲重复率为 10 次/s. 利用双光子过程将 Ca 原子从基态 $4s^2^1S_0$ 激发至经典场电离阈之上. 电离产生的离子由电子倍增器检测. 为了得到与电场方向平行的偏振光, 在激光路径中加了线偏器. 根据选择定则 $\Delta m = 0$, 得到终态为 $m = 0$ 的电离光谱. 为了加强双光子激发的讯号, 用透镜使光束在作用区内聚焦. 取直流电场分别为 2.57, 4.71, 6.86 kV/cm, 得到了不同场强 F 时 Ca 原子的 π - π 激发光谱.

另外, 改变激光束偏振方向, 使其与电场垂直, 得到了 Ca 原子 σ - σ 偏振的激发光谱. 这一光谱是 $m = 0$ 与 $m = 2$ 的混合.

利用类似的双光子过程, 亦观察了 Sr 在外加电场中经典场电离阈之上的 π - π 和 σ - σ 激发光谱. 所用激光波长为 $4500\text{--}4300\text{ \AA}$, 由 YAG 激光器三倍频光泵浦香豆素 440 获得. 所加电场为 3.27 和 5.05 kV/cm.

在实验中, 我们将 Ca 和 Sr 的零场里德堡态的已知激发波长作为波长的绝对定标, 并利用标准具的干涉谱为波长刻度. 为了减小激光能量起伏的影响, 将 Boxcar 的积分常数增大至 $100\text{ }\mu\text{s}$, 并相应地减小激光波长的扫描速度.

三、结果与讨论

图 1 为 Ca 原子在外加电场 $F = 6.86\text{ kV/cm}$ 和 4.71 kV/cm 时的 π - π 激发光谱. 图 1 中所标 E_c 是由方程 (1) 计算得出的. 因为在库仑场和外加电场共同作用时, 考虑 Stark 效应, 阈值电场 F_c 应该为 $E^2/4z_2$ (z_2 为从 1 变化至 $1/n$ 的一个分离变量)^[2]. 所以这里 E_c 只是一近似估算. 在图 1 中可以看到 $E > E_c$ 时, 存在着尖锐的共振结构, 它们与准稳 Stark 态相对应. 同样现象在 Sr 光谱中亦可见到 (图 2). 因为我们使用的是双光子激发过程, 由于功率展宽的影响, 这些共振峰变宽. 且与 $E < E_c$ 时的 Stark 态谱线比较, 在 $E > E_c$ 时谱线明显增高, 呈现出显著的场电离效应.

在零场电离限附近, π - π 偏振的激发光谱中的共振结构非常明显, 然而对于 σ - σ 偏振, 这种共振现象就不很清楚 (图 2). Freeman 提出了一个“电子准周期运动”的经典模型解释这一共振现象. 图 3 为电子在核电场与外加电场共同作用下的强场混合区域内的经典轨道计算结果. 由图 3 可见, 当电子在起始位置离 z 轴较近时, 在被电场电离而逸出原子之前, 来回经过核数次, 相当于存在一“准周期运动”. 由于稳定轨道仅限于电子运动靠近 z 轴的情形 (外加电场沿 z 轴方向), 这相应于电子无角动量的 z 分量, 即末态 $m_l = 0$ 的情况. 所以, 对于基态电子为 $m_l = 0$ 的原子, 就只有 π 偏振 ($\Delta m = 0$) 的激发光谱才能观察到共振现象. Rau 等人利用在关于 η 和 ξ 的分离势函数作用下运动的半经典模型对这一现象给予说明, 并给出了计算公式. 他们将 WKB 近似法用于 $m = 0$ 时对 ξ 的有效势 $V(\xi) = -z_1 e^2/\xi + 1/8 e F \xi$ (z_1 为另一分离变量, $z_1 + z_2 = 1$), 得出了 $E = E_c$ 附近共振间隔的表达式 (2). 表 1 给出了关于 Ca 和 Sr 光电离谱共振结构的实验数据, 其误差在 $\pm 0.5\text{ cm}^{-1}$ 内. 表 1 中所给计算结果是由方程 (2) 得出的. 表 1 也给出了

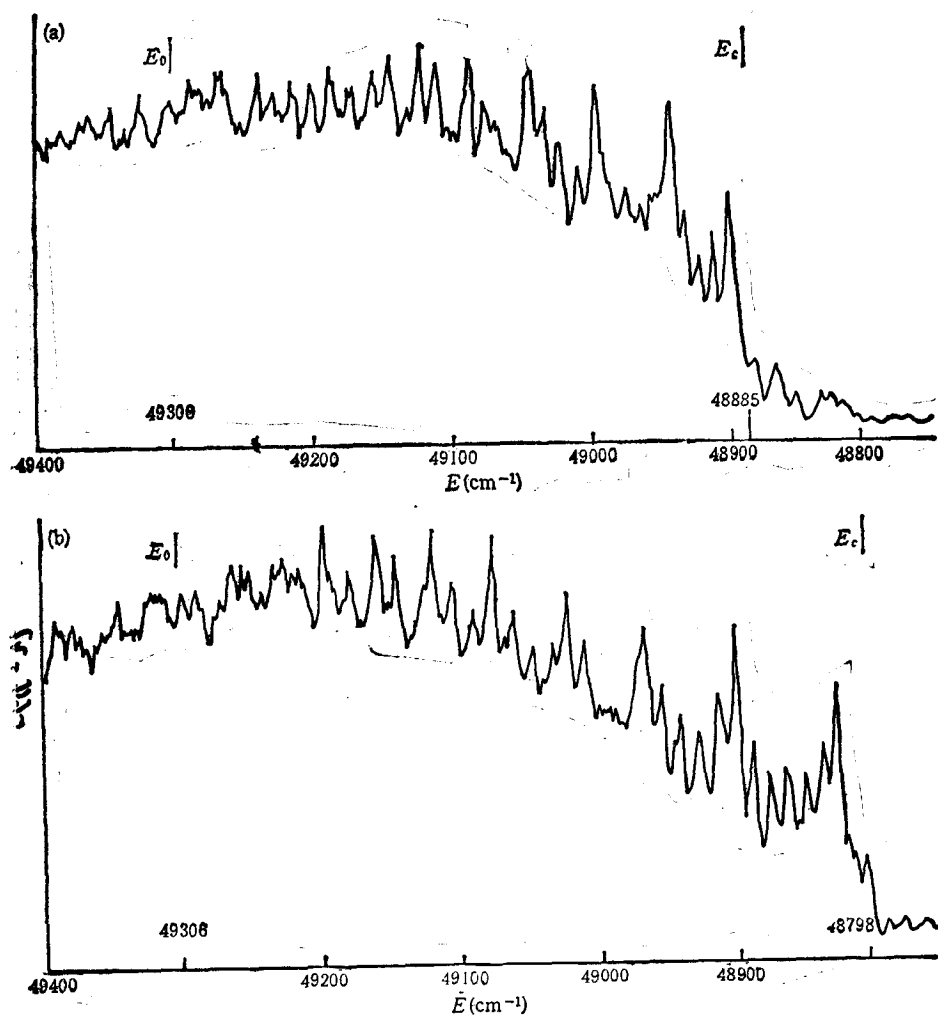


图1 Ca 原子 π - π 偏振激发光谱的共振结构 (a) 为外加电场 $F = 4.71 \text{ kV/cm}$; (b) 为 $F = 6.86 \text{ kV/cm}$

表1 Ca 和 Sr π - π 偏振激发光谱共振结构的间隔 dE/dn 和相对调制率 M

	电 场 F (kV/cm)	实验数据 dE/dn (cm^{-1})	计算数据 dE/dn (cm^{-1})	相对调制率 $M(\%)$
Ca	2.57	15.6	15.2	7
	4.71	23.2	24.0	11
	6.86	32.2	31.8	18
Sr	3.27	18.8	18.2	12
	5.05	26.5	25.3	14

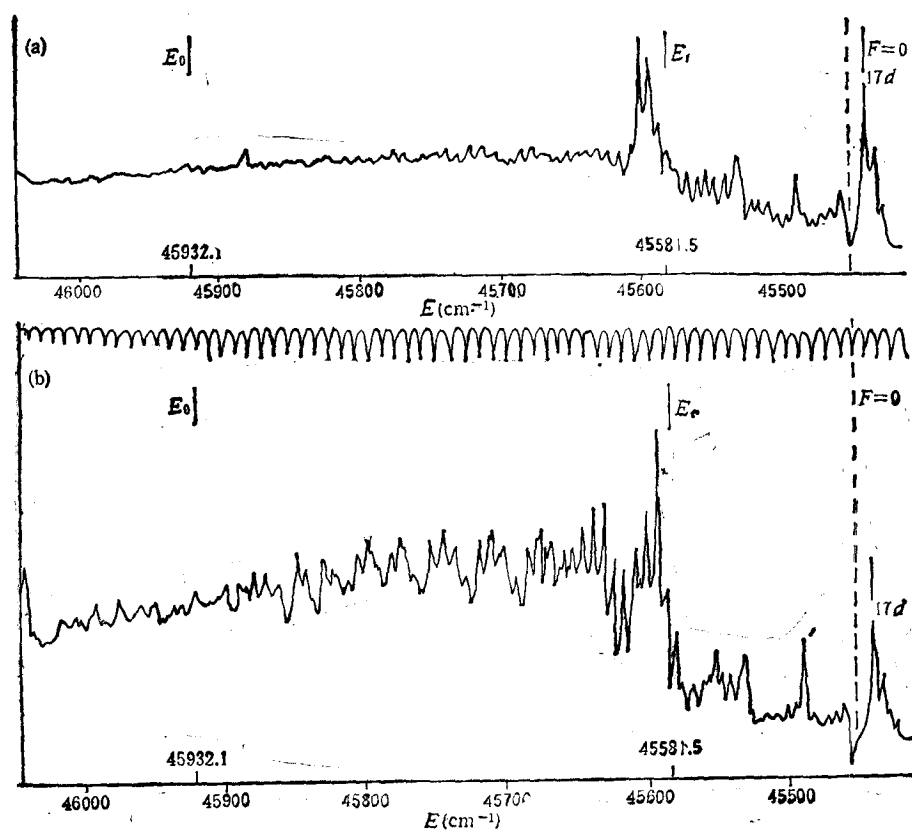
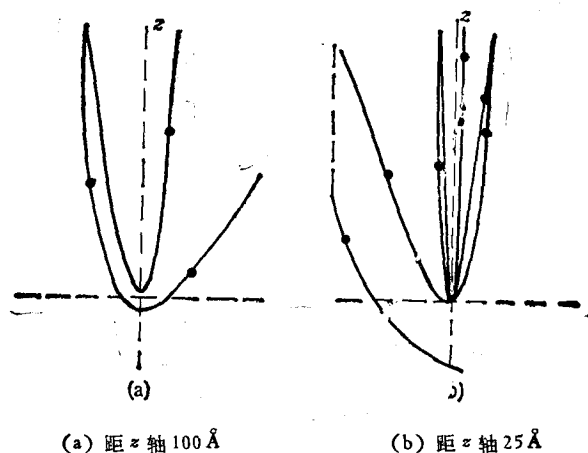


图2 Sr 原子在外加电场 $F = 3.27 \text{ kV/cm}$ 时的激发光谱
(a) 为 $\sigma\text{-}\sigma$ 偏振激发; (b) 为 $\pi\text{-}\pi$ 偏振激发



(a) 距 z 轴 $100 \text{ \AA}$ (b) 距 z 轴 $25 \text{ \AA}$
图3 电子的“准周期轨道” 电子能量 $E = +32.7 \text{ cm}^{-1}$; 离核 $760 \text{ \AA}$

在 E_0 附近共振结构的相对调制率 M . 这里, M 定义为两相邻截面的极值之差除以它们的和的一半^[2]. 表 1 中数据均为多次记录的平均值. 我们的实验结果表明, 对碱土原子其能量在零场电离限附近的光电离谱的共振结构与强场混合理论的结果是一致的.

- [1] R. R. Freeman *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **41**(1978), 1463.
- [2] R. R. Freeman *et al.*, *Phys. Rev.*, **A20**(1979), 2356.
- [3] A. R. P. Rau, *J. Phys. B*, **12**(1979), L193.
- [4] E. Luc-Koenig *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **43**(1979), 921.
- [5] W. Sandner *et al.*, *Phys. Rev.*, **A23**(1981), 2448.
- [6] J. W. Cooper, E. B. Saloman, *Phys. Rev.*, **A26**(1982), 1452.
- [7] 邱济真等, 光学学报, **18**(1988), 212.

RESONANCES OF PHOTOIONIZATION OF Ca AND Sr ATOMS IN AN ELECTRIC FIELD

QIU JI-ZHEN ZHANG SEN WANG GANG

Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou

(Received 6 October 1988)

ABSTRACT

Photoionization spectra of Ca and Sr atoms above the classical field-ionization threshold are observed by using two-photon excitation method. The relation between the resonances and the applied electric field as well as polarization of laser beam are discussed.