

强电场中铯原子双光子光电离光谱研究*

王嘉珉 刘炳模 顾思洪 戴作跃 龚顺生

(中国科学院武汉物理所 波谱与原子分子国家开放重点实验室, 武汉 430071)

提要 报道了对铯原子在双光子激发条件下的强电场光电离光谱进行实验研究的结果。发现铯原子较大量子亏损导致的核心(core)效应可影响到场电离阈值以上的光谱特性,但对零场阈值附近强场共振特性的影响可以忽略。指出强场共振的发生与双光子激发光偏振特性的关系与预期不尽符合。

关键词 强电场, 光电离, 里德堡态, 强场共振

1 引言

自 1978 年发现强电场中原子光电离光谱在零场电离阈值附近的共振现象以来^[1],人们对之进行了广泛的理论与实验研究^[2~8]。早期的理论研究对此共振现象提出了两种不同的解释,即共振起源于初态的相对对称性和激发光的偏振特性导致的振子强度抵消效应^[2];共振起源于电子在强度相当的库仑场和外电场中运动导致的强场混合效应^[3,4]。随着研究工作的进展,后一种解释被广泛接受。然而近年来,著名原子物理学家 Damburg 对强场中原子共振行为的上述理论提出了质疑,认为已有的理论并没有正确描述这种阈值现象,必须寻求新的理论以揭示这一现象的全部物理内涵^[9]。新近在氢原子强电场光电离光谱实验中观测到的共振细致结构,支持了 Damburg 的上述观点^[10]。这些新的发现,激发了人们对原子强电场效应进行更深入的实验与理论研究的兴趣。

在已进行过强电场光电离光谱研究的原子中,除氢以外^[5,6],主要是碱金属原子铷^[1]和钠^[7,8],而对具有更大量子亏损的碱原子铯(其 *S* 态的量子亏损约 4.057),则尚未见有实验报道。并且在已有的碱原子实验中,里德堡原子的产生采用的是从基态的单光子一步激发或利用中间态的两步单光子激发。本文报道利用双光子从基态一步激发的方法对铯原子强电场光电离光谱进行实验研究的结果,目的在于考察大量子亏损值和特殊激发方案对里德堡原子强电场特性的影响。

2 实 验

实验研究所用装置如图 1 所示。铯原子束由位于束源室中的直热式原子炉产生,经准直

* 国家基金重点支持项目。

孔准直后进入作用室。作用区原子束密度约为 $10^8 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 准直度约为 100 : 1。准直板兼作束源室和作用室的隔断, 两室分别由各自的真空机组进行差分抽空。在作用室中部, 铯原子束与激光束垂直相交, 交叉束上下各置有一块 $\phi 100 \text{ mm}$ 的铜质电场板, 板间距离约为 7 mm。下电场板中央开有一 $\phi 20 \text{ mm}$ 圆孔以便铯离子通过, 由位于板下的电子倍增器接收。在下电场板的圆孔上复盖有不锈钢栅网, 以保证电场的均匀度。

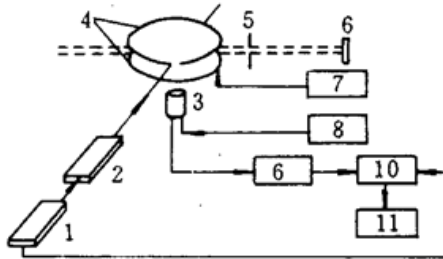


Fig. 1 The experimental setup

1: YAG laser; 2: dye laser; 3: EMT; 4: electric field plates; 5: collimator; 6: atomic beam oven; 7: DC high voltage; 8: power supply; 9: pre-amplifier; 10: boxcar; 11: X-Y recorder

脉冲激光束由 YAG 激光器 (DCR-2 型) 的二倍频光泵浦染料激光器 (PDC-1) 产生。利用 DCM 染料, 输出光波长可在 620~670 nm 范围调谐。激光脉冲能量约 5 mJ, 脉宽约 5 ns, 线宽约 0.3 cm^{-1} 。激光束经 $f = 20 \text{ cm}$ 透镜聚焦后进入作用区, 以提高双光子激发效率。

在强电场下, 铯原子从基态 ($6^2S_{1/2}$) 被双光子激发到电离阈值 ($E_c = -2\sqrt{F}$, F 为电场强度, 单位 V/cm) 以上即被电离, 所形成的铯离子被强电场加速抛出作用区, 被电子倍增器接收。电子倍增器的输出经宽带前置放大后送 Boxcar 处理, 最后由 X-Y 记录仪记录。

3 结果及讨论

在 4500 V/cm 电场下, 扫描激光波长所得铯原子双光子光电离 π 光谱 (激光偏振平行于电场) 和 σ 光谱 (激光偏振垂直于电场) 示于图 2。由图可见, 当铯原子被激发到场电离阈值 E_c 后 (对于 4500 V/cm 电场, 场电离阈值 $E_c = -2\sqrt{F} = -413.3 \text{ cm}^{-1}$), 光电离光谱明显增强。这是因为在 E_c 以下, 光谱的产生机制为三光子 ($2 + 1$) 电离, 而在 E_c 以上, 光谱则直接由双光子电离产生; 在 E_c 以上, 光谱呈现明显的尖锐峰状结构, 反映了场电离阈值以上还有大量的准稳定态存在, 而不象电离连续态应具有平滑结构。而且, 其中某些谱峰的形状严重不对称, 形成所谓 Fano 型谱线 (如图中 A, B, C 等峰所示)。Fano 谱线的形成, 一般认为是电离速率小的准稳定态与电离速率大的连续态背景相互耦合所造成, 而这种耦合则是源于铯原子非球对称的核心势场作用^[4]。以上这些结果与已有的用其他原子和其他激发方式所得结果基本一致^[7,8], 说明这些特性与激发方式和原子种类无关 (氢原子除外, 氢原子由于核的球对称性, 不存在 Fano 谱线)。但我们注意到, 在图 2 所示的铯原子强电场光谱中, 在电场高达 4500 V/cm 和能量高达离零场电离阈值仅 180 波数的情况下, 还能发现 Fano 谱线 (如图 2 中 c 峰)。我们认为, 这是由于铯原子具有很大的量子亏损, 其中核心效应在较强电场、较高能态的情况下仍然具有不可忽略的影响的缘故。

对于图 2 所示的铯原子强电场光谱的其他特征, 如谱线强度、密度、线型与电场强度、激光偏振、激发能量之间的依赖关系等, 需要在进行相应理论分析的基础上才能给出准确的描述。本文将重点对图 2 所示光谱在零场电离阈值 (E_0) 附近的共振结构 (即强场共振行为) 进行分析。

如图 2 所示, 随着激发能量的增加 (激发波长变短), π 激发谱和 σ 激发谱的强度均随之而减小。但 π 激发谱减小的速度比 σ 激发谱慢, 并且随着激光能量逼近 E_0 , π 激发谱线开始变宽或

发生组合, 逐渐形成一个个很宽的共振峰, 此共振峰一直持续到 E_0 以上的正能区。在此区间, 共振峰的宽度逐渐变小, 共振峰的深度也逐渐变低, 形成铯原子的强场共振谱。几个在不同电场强度下所测得的铯原子双光子 π 激发的强电场共振谱示于图 3。我们测量了各种电场强度下, 跨越 E_0 的共振峰的宽度, 发现其宽度与电场强度的关系很好地符合 $3/4$ 次方定律

$$\Delta = 22.5 \times \left(\frac{F}{4335} \right)^{3/4} \text{ cm}^{-1}$$

如图 4 所示。我们还测量了同一电场强度下, 共振峰的深度百分比

$$\delta = \frac{2(H - h)}{H + h}$$

其中 H 为峰高, h 为谷高。随共振峰序数(能量增加方向)的变化, 所得结果示于图 5。图中理论线表示如下关系^[4]: $E > 0$ 时, 共振峰深度百分比 $\delta = 0.20 \exp[-3E/|E_c|]$ (E 为共振峰峰值对应的能量)。由于上述铯原子共振峰宽度与深度的变化均符合从氢原子的强电场理论所推导出的关系^[4], 说明虽然铯原子具有较大的量子亏损, 但其在零场电离阈值 E_0 附近的电场特性仍然是类氢的, 即铯原子核心效应对 E_0 附近的电场特性的影响可以忽略不计。

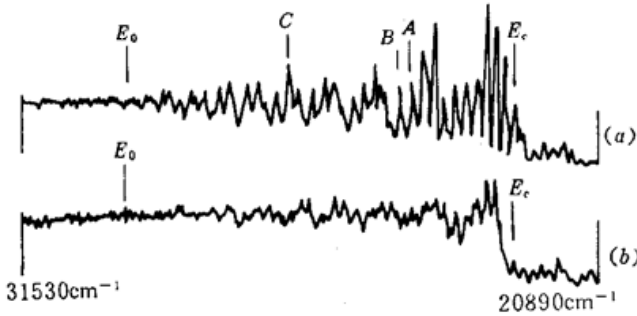


Fig. 2 Two-photon ionization spectra of Cs atom in a 4500 V/cm electric field. E_0 : zero field ionization threshold; E_c : field ionization threshold
(a) π excitation; (b) σ excitation

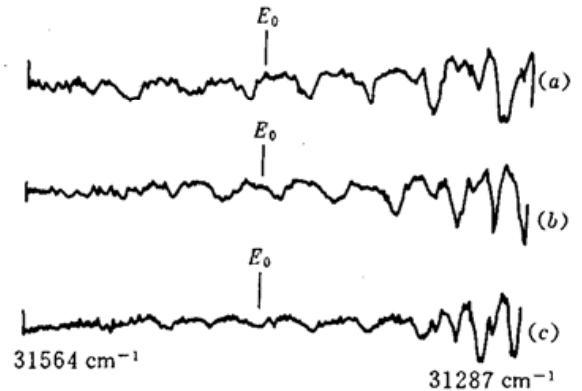


Fig. 3 Strong resonances of Cs atom in different electric fields
(a) 7150 V/cm; (b) 6450 V/cm; (c) 5700 V/cm

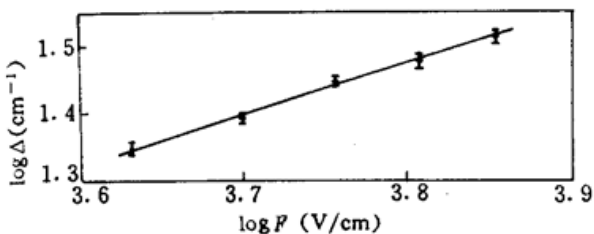


Fig. 4 Dependence of the spacing of strong field resonance on the electric field
(•: experimental; —: theoretical)

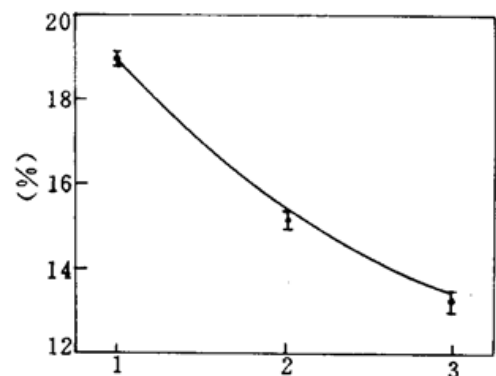


Fig. 5 Percent depth of resonances as a function of resonance numbers at $F = 5700$ V/cm
(•: experimental; —: theoretical)

图 2 反映出的另一现象是, 在 σ 激发谱上没有观察到明显的强场共振。这对于以往从 S 态或 P 态的单光子激发的研究而言是正常的^[1,5~8], 而对本文从铯原子基态 $6^2S_{1/2}$ 的双光子激发,

则是一个意外的结果。按已基本公认的强场混合理论,强场共振起源于高激发态中 $m_s = 0$ 的分量^[3,4],这样,在本研究的激发方案中, π 激发谱呈现共振是正常的;但 σ 激发谱也应呈现共振,只不过共振峰的深度减半。考虑到实验信噪比的限制,我们曾仔细考察过 σ 激发谱的 E_0 附近谱段,在尽可能改善信噪比条件下,也未观察到可信的共振结构。这一结果倾向说明,共振不一定取决于终态的 m_s ,而是和初态的对称性及激发光的偏振特性有关。同时也说明,对于不同激发条件下的原子强电场共振特性,有进一步深入研究的必要。

参 考 文 献

- 1 R. R. Freeman, N. P. Economou, G. C. Bjorklund *et al.*. Observation of electric-field-induced resonances above the ionization limit in a one-electron atom. *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **41**: 1463
- 2 E. Luc-Koenig, A. Bachclier. Interpretation of electric-field-induced oscillations in the cross section of a one-electron atom above the ionization limit. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, **43**: 921
- 3 A. R. P. Rau. Rydberg states in electric and magnetic fields; near-zero-energy resonance. *J. Phys. B*, 1979, **12**: L193
- 4 D. A. Harmin. Theory of the Stark effect. *Phys. Rev. A*, 1982, **26**: 2656
- 5 H. Rottke, K. H. Welge. Photoionization of the hydrogen atom near the ionization limit in strong electric fields. *Phys. Rev. A*, 1986, **33**: 301
- 6 W. L. Glab, M. H. Nayfeh. Stark-induced resonances in photoionization of hydrogen. *Phys. Rev. A*, 1985, **31**: 530
- 7 W. Sandner, K. A. Safinya, T. F. Gallagher. Photoabsorption of Ba and Na in an electric field; manifestation of strong-field-mixing resonances. *Phys. Rev. A*, 1981, **23**: 2448
- 8 T. S. Luk, L. Dimauro, T. Bergeman *et al.*. Continuum Stark spectroscopy. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, **47**: 83
- 9 R. Damburg. Hydrogen atom in strong uniform electric fields. Edited by C. A. Nicolaides, C. W. Clark, M. H. Nayfeh. *Atoms in strong fields*, New York; Plenum press, 1990. 107
- 10 M. H. Nayfeh. Hydrogen in strong DC and low frequency fields. Edited by C. A. Nicolaides, C. W. Clark, M. H. Nayfeh. *Atoms in strong fields*, New York; Plenum press, 1990. 133

Study of Two-photon Ionization Spectrum of Cs Atom in a Strong Electric Field

Wang Jiamin Liu Bingmo Gu Sihong Dai Zoyue Gong Shunsheng

(Wuhan Institute of Physics, Academia Sinica,

Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan 430071)

Abstract The two-photon ionization spectrum of Cs atom in a strong electric field was studied experimentally. It was found that the core effect of Cs atom due to the higher quantum defects can affect the ionization spectrum well above the field ionization threshold, but has negligible influence on the strong field resonances near the zero field ionization threshold. The dependance of the strong field resonance on the polarization of the excitation laser beam seems not fully consistent with predictions and a further study is needed.

Key words strong electric field, photoionization, Rydberg state, strong field resonances