

超冷铯 Rydberg 原子寿命的测量*

冯志刚 张好 张临杰 李昌勇 赵建明[†] 贾锁堂

(山西大学物理电子工程学院, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2010年8月10日收到; 2010年9月25日收到修改稿)

本文从实验上采用两步激发超冷基态原子获得超冷 Rydberg 原子, 通过选择场电离的方法获得超冷 Rydberg 原子的离子信号. 改变延迟时间测得 Rydberg 原子布居数随时间的变化关系, 用两种方法拟合实验数据得到 36D 和 34S 态原子的有效寿命, 与现有理论结果一致.

关键词: Rydberg 原子, 寿命, 黑体辐射, 场电离

PACS: 32.80.Ee, 32.70.Cs

1. 引言

Rydberg 原子特殊的结构使其具有较大的原子半径和电偶极矩, 以及较长的辐射寿命. 精确的寿命测量对 Rydberg 原子的电偶极矩, 振荡强度, 极化率, 以及黑体辐射等理论和实验研究具有重要的意义^[1]. Rydberg 原子寿命测量的传统方法是以热原子为样品, 通过观察原子的荧光衰减来获得^[2-6]; 由于热原子大的热碰撞效应及荧光探测方法的局限性(荧光信号强度随主量子数的增加迅速减小), 同时高密度下超辐射效应^[7]及室温黑体辐射的存在^[8], 将大大降低高 Rydberg 态寿命的测量精度. 为了克服以上效应的影响, 1981 年 Kleppner 小组在 30 K 的低温条件下测量了钠原子 Rydberg 态寿命, 实验证明, 热碰撞效应的有效抑制提高了寿命测量的精确性^[3].

近年来, 随着激光冷却与俘获技术的出现和迅速发展, 使超冷 Rydberg 原子的实现成为可能. 处于温度为 300 μ K, 密度约为 10^9 cm^{-3} 的超冷 Rydberg 气体, 在 1 μ s 实验时间尺度内, 原子相对运动的距离仅为原子间距的 3%, 这种冷冻的 Rydberg 气体对详细研究 Rydberg 原子间的 van der Waals 及偶极-偶极相互作用^[9,10]、Stark 效应^[11,12]、超冷 Rydberg 向超冷等离子体的演化及超冷等离子体的

再复合^[13,14]提供了条件, 同时也显著降低了原子热碰撞效应及超辐射效应对其寿命精确测量的影响. 2000 年, Marcassa 小组首次在超冷铷原子磁光阱中, 利用选择场电离技术测量了 27D 态的辐射寿命, 获得测量精度小于 3% 的实验结果^[15]; 随后, 他们详细地测量了 $26 < n < 45$ (n 为主量子数) 铷原子 Rydberg 态寿命^[16,17], 与理论计算相一致. 而铯原子高 Rydberg 态寿命的测量还没有相关报道. 在理论方面, 许多小组用不同的方法分别计算了碱金属 Rydberg 态的寿命^[18-20]及黑体辐射的影响^[21], 但是以上计算只是局限在主量子数 $n < 30$ 的 Rydberg 态. 最近, Beterov 用准经典近似的方法计算了更大范围的 Rydberg 态 $10 \leq n \leq 80$ 寿命, 同时计算了黑体辐射率及不同温度下黑体辐射对 Rydberg 原子寿命的影响, 并得到了近似的拟合公式^[22].

本文在超冷铯原子磁光阱中, 采用两步激发获得超冷 Rydberg 原子, 用选择脉冲场电离的方法获得相应 Rydberg 原子的离子信号, 改变激发光与脉冲场的延迟时间来研究 Rydberg 原子随时间的衰减过程, 得到了与理论结果一致的有效辐射寿命.

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示, 我们首先在传统的磁光阱(MOT)中利用激光冷却与俘获技术制备大小约

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB921603), 国家自然科学基金(批准号:10934004, 60778008, 60978018, 61078001)和山西省回国留学人员科研基金资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn; fzg66666@163.com

为 $800 \mu\text{m}$, 温度约为 $100 \mu\text{K}$, 密度约为 $4 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 的超冷铯原子. 然后用两步激发得到超冷铯 Rydberg 原子. 其中, 用作冷却光的 852nm 激光器 (DL100) 作为第一步激发, 将基态铯原子激发到 $6P_{3/2}$ 态, 然后用 YAG 抽运的脉冲染料激光器作为第二步激发, 将 $6P_{3/2}$ 态原子激发到 nS 或 nD 态. 染料激光器的输出波长范围为 $506\text{--}538 \text{nm}$, 用波长计 (high finesse angstrom, WS-U-30) 进行校准, 精确度达 0.001cm^{-1} . 在 MOT 中心有一对间距为 15mm 的平行栅极, 在栅极上施加脉冲电场, 使产生的 Rydberg 原子电离, 产生的离子在电场的加速下, 到达位于栅极后的微通道板 (MCP) 探测器. 信号送入门积分平均器 (Boxcar) 进行数据处理, 并由计算机记录, 同时我们在示波器上直接监视. 数字延迟脉冲发生器 (DG535) 用来控制染料激光器与电离脉冲场的延迟及 Boxcar 和示波器的触发, 我们通过 Labview 程序均匀的改变染料激光器与脉冲场的延迟时间, 得到 Rydberg 原子布居随时间的演化, 然后拟合就可以得到相应态的寿命.

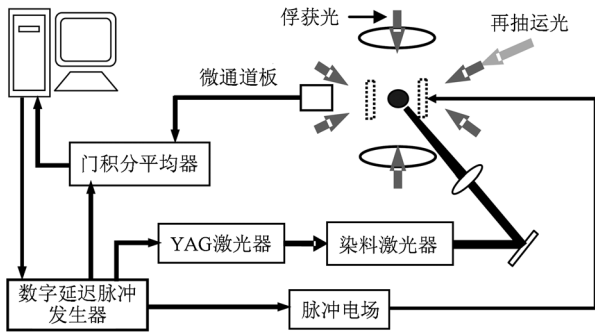


图1 实验装置图

3. 实验结果与分析

在一定温度下, Rydberg 态有效寿命主要由自发辐射、黑体辐射、以及原子间的碰撞决定:

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \Gamma_{\text{eff}} = \Gamma_{\text{Spon}} + \Gamma_{\text{BBR}} + \Gamma_{\text{Coll}}, \quad (1)$$

其中 Γ_{Spon} 为自发辐射率, Γ_{Coll} 为 Rydberg 原子间及 Rydberg 原子与基态原子间总的碰撞损失率, 表示为 $\Gamma_{\text{Coll}} = \rho_{\text{Ry}} v_{\text{Ry}} \sigma_{\text{Ry}} + \rho_{\text{g}} v_{\text{g}} \sigma_{\text{g}}$, Γ_{BBR} 为黑体辐射率, 用以下公式表示^[22]:

$$\Gamma_{\text{BBR}} = \frac{A}{n_{\text{eff}}^D} \frac{2.14 \times 10^{10}}{\exp(315780B/n_{\text{eff}}^C T) - 1} (\text{s}^{-1}), \quad (2)$$

其中 A, B, C, D 为拟合数值结果的拟合参数, n_{eff} 为

有效主量子数 (S 和 D 的量亏损分别为 4.052 和 2.467 ^[23]), T 为室温, 在实验中我们假定为 300K .

由于在低 Rydberg 原子密度下, Rydberg 原子间的碰撞时间远远大于其寿命, 而且在低密度下影响里德堡寿命的超辐射效应也被大大抑制, 因此低密度下, Rydberg 原子有效寿命简化为

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \Gamma_{\text{eff}} = \Gamma_{\text{Spon}} + \Gamma_{\text{BBR}}. \quad (3)$$

实验上, 我们首先用中性衰减片衰减了再抽运光的功率得到低密度的冷原子, 然后降低染料激光器的功率, 得到密度小于 10^7cm^{-3} 的 Rydberg 原子. 实验表明, 在低于此密度下, Rydberg 原子有效寿命趋于常数, 说明在低密度下, Rydberg 原子寿命值只取决于自发辐射和黑体辐射. 图 2 和图 3 是在 Rydberg 原子密度为 $6 \times 10^6 \text{cm}^{-3}$ 下, $36D$ 和 $34S$ 态原子布居随时间的演化, 用指数拟合, 得到有效辐射寿命分别为 $18.56 \pm 0.31 \mu\text{s}$ 和 $20.80 \pm 0.32 \mu\text{s}$ (此误差为统计误差). 由于大的染料激光线宽导致低的能级分辨率, D 态寿命为 $D_{3/2}$ 和 $D_{5/2}$ 的平均寿命.

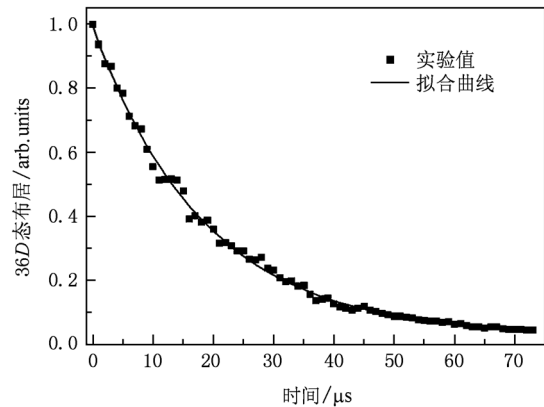


图2 36D 态原子布居随时间的变化关系

利用方程 (3), 根据文献^[22] 数据理论计算得到的 $36D$ 和 $34S$ 态有效寿命分别为 $18.47 \mu\text{s}$ 和 $20.90 \mu\text{s}$, 在实验误差范围内与我们的实验结果一致. 实验误差主要有两个来源: 染料激光器输出功率的波动性, 我们对实验结果采用 200 次平均, 引入约 5% 的误差; 室温的变化 (约 1°C) 引起黑体辐射率的不确定性, 导致小于 0.3% 的误差; 冷原子及探测系统引入的总的系统误差大约为 2%, 此外, 数据的拟合过程也将引入误差.

同时我们研究了高 Rydberg 原子密度下 ($\geq 10^9 \text{cm}^{-3}$), Rydberg 原子寿命随时间的变化, 实验上, 固

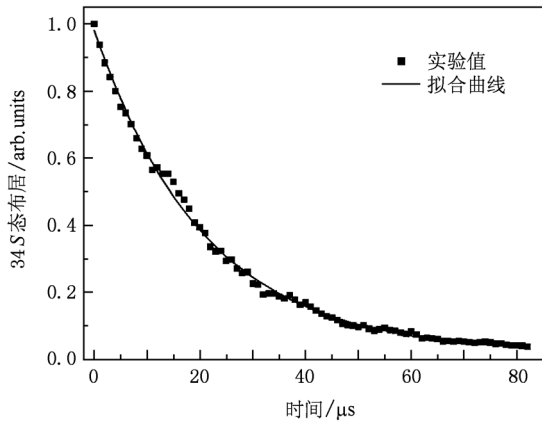


图3 34S态原子布居随时间的变化关系

定染料激光器的功率,改变再抽运光的功率,得到不同初始的 Rydberg 原子密度下的有效寿命. 由于较高密度下 Rydberg 原子间的强相互作用导致能级频移,将抑制超辐射的发生,而且 Rydberg 原子间的碰撞远大于 Rydberg 原子与基态原子间的碰撞,因此高 Rydberg 原子密度下,原子的有效寿命近似表示为

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \Gamma_{\text{eff}} = \Gamma_{\text{Spon}} + \Gamma_{\text{BBR}} + \rho_{\text{Ry}} v_{\text{Ry}} \sigma_{\text{Ry}} \quad (4)$$

图4为36D态有效寿命随Rydberg原子密度的变化关系,由图可以看出,随着Rydberg原子密度的增加,有效寿命逐渐减小,说明高密度下Rydberg原子之间的相互作用导致的碰撞加大了Rydberg原子的衰减过程. 我们用方程(4)拟合就可以反推得到零Rydberg原子密度下的有效寿命,通过拟合得到36D态的有效寿命为 $19.01 \pm 0.37 \mu\text{s}$. 由于实验上对里德堡原子密度的测量存在误差,同时忽略了

Rydberg原子与基态原子间的碰撞,而且超辐射效应在高密度下不会被完全抑制. 实际上,Rydberg原子的有效寿命在大的密度范围内并非严格线性关系. 以上原因导致此方法得到的实验结果略大于文献[22]中理论计算结果.

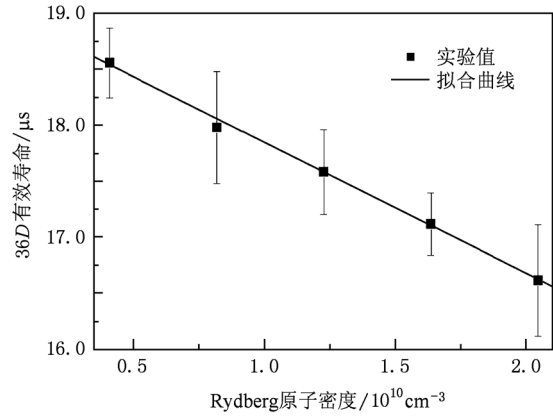


图4 36D态寿命随Rydberg原子密度的变化关系

4. 结 论

在超冷铯原子中用两步激发的方法得到超冷Rydberg原子,采用选择场电离的方法测量超冷Rydberg原子离子信号. 通过改变延迟时间观察了低密度Rydberg原子布居随时间的变化,得到36D与34S态的有效寿命,与现有的理论结果一致. 同时测量了36D态寿命随高Rydberg密度的变化,然后反推得到零密度下的有效寿命,实验表明,在低密度下的寿命测量更接近理论结果. 这为进一步研究Rydberg原子间相互作用、碰撞等效应奠定了基础.

[1] Gallagher T F 1994 *Rydberg Atoms* (Cambridge University press)
 [2] Hansen W 1983 *J. Phys. B* **16** 933
 [3] Spencer W P, Vaidyanathan A G, Kleppner D 1981 *Phys. Rev. A* **24** 2513
 [4] Gallagher T F, Cooke W E 1979 *Phys. Rev. A* **20** 670
 [5] Hugon M, Gounand F, Fournier P R 1978 *J. Phys. B* **11** L605
 [6] Marek J, Niemax K 1976 *J. Phys. B* **9** L483
 [7] Wang T, Yelin S F, Côté R, Eyler E E, Farooqi S M, Gould P, Koštrun L M, Tong D, Vranceanu D 2007 *Phys. Rev. A* **75** 033802
 [8] Cooke W E, Gallagher T F 1980 *Phys. Rev. A* **21** 588
 [9] Tong D, Farooqi S M, Stanojevic J, Krishnan S, Zhang Y P, Côté R, Eyler E E, Gould P L 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 063001

[10] Vogt T, Viteau M, Chotia A, Zhao J M, Comparat D, Pillet P 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 073002
 [11] Feng Z G, Zhang L J, Zhao J M, Li C Y, Li A L, Jia S T 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 2661
 [12] Zhu X B, Zhang H, Feng Z G, Zhang L J, Li C Y, Zhao J M, Jia S T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2401 (in Chinese) [朱兴波、张好、冯志刚、张临杰、李昌勇、赵建明、贾锁堂 2010 物理学报 **59** 2401]
 [13] Zhang L J, Feng Z G, Li A L, Zhao J M, Li C Y, Jia S T 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1362
 [14] Zhao J M, Zhang L J, Feng Z G, Li C Y, Jia S T 2010 *Chin. Phys. B* **19** 043202

- [15] Magalhães K M F, De Oliveira A L, Zanon R A D S, Bagnato V S, Marcassa L G 2000 *Opt. Commun.* **184** 385
- [16] De Oliveira A L, Mancini M W, Bagnato V S, Marcassa L G 2002 *Phys. Rev. A* **65** 031401(R)
- [17] Nascimento V A, Caliri L L, De Oliveira A L, Bagnato V S, Marcassa L G 2006 *Phys. Rev. A* **74** 054501
- [18] Gounand F, 1979 *J. Phys. (France)* **40** 457
- [19] He X, Li B, Chen A, Zhang C 1990 *J. Phys. B* **23** 661
- [20] Theodosiou C E 1984 *Phys. Rev. A* **30** 2881
- [21] Cooke W E, Gallagher T F 1980 *Phys. Rev. A* **21** 588
- [22] Beterov I I, Ryabtsev I I, Tretyakov D B, Entin V M 2009 *Phys. Rev. A* **79** 052504
- [23] Zhang L J, Feng Z G, Li A L, Zhao J M, Li C Y, Jia S T 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1838

Measurement of lifetime of ultracold cesium Rydberg states^{*}

Feng Zhi-Gang Zhang Hao Zhang Lin-Jie Li Chang-Yong Zhao Jian-Ming[†] Jia Suo-Tang
 (State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, College of Physics and Electronics Engineering,
 Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 10 August 2010; revised manuscript received 25 September 2010)

Abstract

In this paper, the cold cesium atoms are excited to Rydberg states via two-photon transition and the ion signal of Rydberg atoms is obtained by the selective field-ionization method. The evolution of the 36D and 34S states population is acquired by changing delay time; the corresponding effective lifetimes are obtained by fitting the experimental data, which are in agreement with the existing theoretical results.

Keywords: Rydberg atoms, lifetime, blackbody radiation, field-ionization

PACS: 32.80.Ee, 32.70.Cs

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB921603), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10934004, 60778008, 60978018 and 61078001), and the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of Shanxi Province, China.

[†] Corresponding author. E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn; fzg66666@163.com