

70S 超冷 Cs Rydberg 原子的动力学演化*

车俊岭 张好 冯志刚 张临杰 赵建明† 贾锁堂

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

(2011 年 4 月 11 日收到; 2011 年 5 月 6 日收到修改稿)

利用双光子激发超冷原子获得 70S 超冷 Cs Rydberg 原子, 采用脉冲场电离法使 Rydberg 原子电离, 并用微通道板测量 Rydberg 原子的信号. 改变激发光和电离电场脉冲的延迟时间和激发光脉冲的宽度, 研究 70S 超冷 Cs Rydberg 原子之间的相互作用和动力学演化过程. 利用黑体辐射导致的态转移和相互作用碰撞电离解释了实验结果, 实验结果和理论相一致.

关键词: Rydberg 原子, 相互作用, 动力学演化

PACS: 32.80.Ee, 34.90.+q

1 引言

激光冷却与俘获技术的实现大大促进了人们对超冷原子和分子的研究, 如超冷原子碰撞^[1], 超冷分子物理^[2]和 Bose-Einstein condensate(BEC)^[3-5]等, 同时也促进了超冷 Rydberg 原子的研究. Rydberg 原子是原子中的一个外层电子被激发到主量子数 n 极大的高激发态原子. 其原子半径, 电偶极矩和碰撞截面都很大, 原子寿命和相互作用时间较长. Rydberg 原子能级间隔与主量子数的立方成反比, 以 $n = 100$ 为例, 能级间隔为 $\Delta E \approx 6.5$ GHz, 处于微波段, 可以利用微波场调节原子间的相互作用. 另外, Rydberg 原子具有很大的极化率, 极易受到外场的影响^[6], 可以利用外加电场调节原子的能级, 从而达到操控原子间相互作用的目的. Rydberg 原子间的强偶极-偶极相互作用和长程 van der Waals 相互作用可以产生 blockade 效应^[7-11]. 利用这种效应可实现单 Rydberg 原子的激发, 使 Rydberg 原子成为构建量子逻辑门^[12,13]实现量子信息存储方面的备选介质, 因此 Rydberg 原子成为人们研究的热点.

国内外很多研究小组都在 Rydberg 原子的长程 van der Waals 相互作用和偶极相互作用等方面

开展了相关的理论和实验研究. Gallgher 小组^[14,15]利用微波场技术调节 Rb Rydberg 原子间的偶极相互作用. Raithel 小组^[16,17]在理论和实验上研究了 Rb Rydberg 原子的偶极相互作用和长程 van der Waals 相互作用, 实验与理论相一致. Pillet 小组^[11]在 Cs Rydberg 原子中研究了电场调谐下的偶极相互作用和偶极 blockade 效应. Rydberg 原子间的长程相互作用具有吸引或排斥势的特性, 处于吸引势的原子相互吸引, 相向运动以至碰撞而产生 Penning 电离. Weidemüller 小组^[18]采用实时光谱测量 Rb Rydberg 原子信号和由于相互作用产生的自由离子信号, 研究了其动力学演化特征. 进一步的研究表明, 即使原子处于排斥势的作用也会产生一些自由离子信号, 文献^[19]观察到处于排斥势的 Rydberg 原子在较长的延迟时间内获得自由离子的实验结果, 并利用黑体辐射理论对实验结果作了解释. 我们小组^[20]利用双光子激发超冷 Cs 原子获得了 40D 态的 Rydberg 原子, 观察到了自由离子信号, 并研究了 Cs Rydberg 原子在 40D 态下的动力学演化特性.

本文主要研究 70S 超冷 Cs Rydberg 原子之间的相互作用和动力学演化. 通过两步激发超冷基态原子形成超冷 Rydberg 原子, 使用脉冲场电离方

* 国家自然科学基金 (批准号: 10934004, 60978018, 61078001, 60978001) 资助的课题.

† E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn

法探测离子和原子信号, 改变激发光和电离电场脉冲之间的延迟时间和激发光脉冲宽度, 研究 70S 超冷 Cs Rydberg 原子间的相互作用, 并利用黑体辐射导致的态转移以及相互作用碰撞电离对实验结果作了解释.

2 实验装置

在标准的磁光阱 (MOT) 中利用激光冷却和俘获技术获得温度大约为 100 μK 的超冷 Cs 原子, 其原子数约为 6.5×10^7 (使用一台校准的数字 CCD, 通过荧光探测法测得), 大小约为 0.7 mm, 对应原子密度约为 $3.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 具体实验装置参见文献 [21]. 实验中利用双光子激发获得超冷 Rydberg 原子, 波长为 852 nm 的冷却光同时实现第一步激发, 即铯原子 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$ 的跃迁, 第二步激发使用连续可调谐半导体倍频激光器 (TA-SHG110) 实现 $6P_{3/2}(F'=5) \rightarrow 70S$ 的跃迁. 激光器输出线宽小于 2 MHz, 波长在 508—517 nm 范围内连续可调. 实验中用测量精度为 0.001 cm^{-1} 的 WSU-30 型 (ANGSTROM) 波长计记录第二步激发光的波长. 第二步激发光经声光调制器 (AOM) 和透镜聚焦后入射到冷原子云中, 并形成雪茄形的激发区, 其激发腰斑半径约为 145 μm , 最大功率约 53 mW. 冷原子云的两侧有两个相距 15 mm 的平行栅极, 在栅极上施加高压脉冲电场, 用以电离已形成的 Rydberg 原子, 并加速产生的离子到位于栅极之后的微通道板 (MCP) 探测器, 探测的信号送到示波器直接观察, 或者由门积分平均器 (Boxcar) 进行数据处理, 并由计算机记录. 数字延迟脉冲发生器 (DG535, SRS) 控制整个实验的时序.

3 实验结果和分析

Rydberg $nS-nS$ 原子对间的长程相互作用能表示为 [22]

$$V_{ss} = -\frac{C_6}{R^6} - \frac{C_8}{R^8} - \frac{C_{10}}{R^{10}}, \quad (1)$$

其中 R 为原子间距, C_6, C_8, C_{10} 是散射系数, 可以通过微扰理论求得. 对于 $nS-nS$ 原子间的相互作用在长程范围是排斥势.

实验中, 调节第二步激发光的频率, 使激光波长调谐至 $6P \rightarrow 70S$ 跃迁线附近, 利用上升时间为 3 μs 的斜坡电场电离 Rydberg 原子, 由 MCP 测量 Rydberg 原子信号和自由离子信号. 实验中首先改变第二步激发光和电离脉冲场间的延迟时间, 保持其他参数不变研究 Rydberg 原子的演化和动力学过程. 图 1 为实验测得的 70S 态延迟时间为 1 μs (虚线) 和 10 μs (实线) 时的 TOF 谱, 在 5 μs 附近出现的是自由离子信号. 由图 1 可知, 当延迟时间为 1 μs 时, 测得的自由离子信号非常微弱, 当延迟时间增加至 10 μs 时, 离子信号明显增强, 而相应的 Rydberg 原子信号因受到抑制而减小.

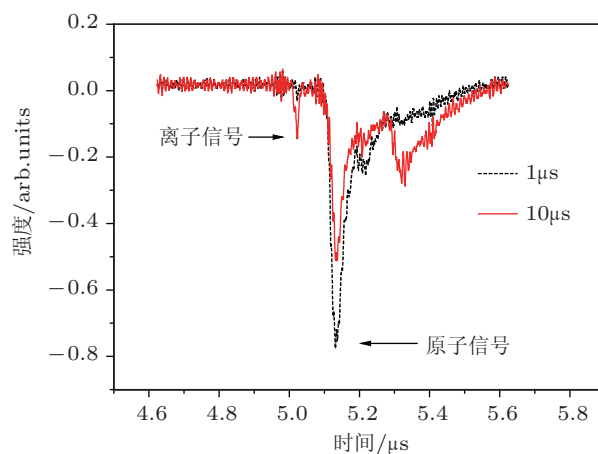


图 1 实验测得的延迟时间为 1 μs (虚线) 和 10 μs (实线) 的 TOF 信号

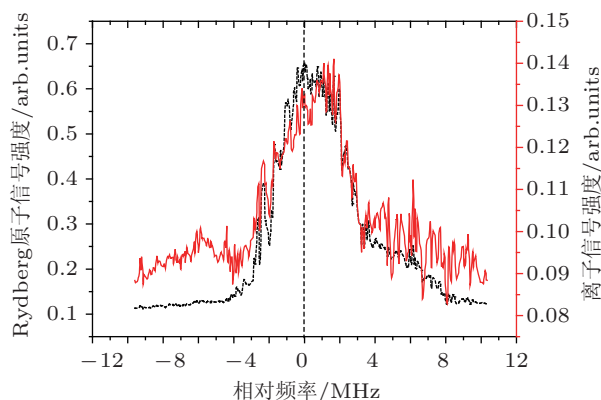


图 2 70S Rydberg 原子 (虚线) 和自由离子 (实线) 的信号强度. 激发光脉冲宽度为 1 μs , 延迟时间为 $\Delta t = 18 \mu\text{s}$. 以第二步激发光与 70S Rydberg 原子的共振频率为相对 0 点

将 Boxcar 的门信号设置为分别记录自由离子信号和 Rydberg 原子信号, 研究自由离子信号的形成机理和演化. 图 2 是测量的激发光脉冲宽度为 1 μs , 延迟时间为 18 μs 时对应的自由离子 (实

线) 和 70S Rydberg 原子信号 (点线) 的离子谱, 以第二步激发光与 70S Rydberg 原子的共振频率为相对 0 点. 由图 2 可知离子信号的线宽和 70S Rydberg 原子的线宽几乎一样, 但是光谱线不对称, 自由离子信号的最大值出现在 Rydberg 原子共振位置的右侧, 即在蓝失谐的位置上自由离子的信号更强, 这说明 Rydberg 原子被制备到了排斥势上, 与理论计算 [22] 相一致.

当原子处于吸引势时, 原子相互吸引, 碰撞并产生 Penning 电离, 观察到自由离子信号 [18]. 处于排斥势的原子不应产生碰撞, 然而实验在较长的延迟时间内也观察到了自由离子信号, 且自由离子信号与原子信号中心相比出现了明显的蓝移. 这样的结果和 Amthor 等人 [19] 在 Rb Rydberg 原子中观察的结果类似. 说明原子虽然处于排斥势, 但由于黑体辐射光子和 Rydberg 原子相互作用, 使 nS Rydberg 原子跃迁到它附近的偶极跃迁对应的 $n'p$ 态, 而 $ns+n'p$ 原子对在长程范围内形成吸引势, 它们相对运动, 碰撞并产生 Penning 电离. 又由于原子初始处于相互作用排斥势, 对应于共振位置蓝失谐的位置更易激发 Rydberg 原子对态.

为了进一步研究自由离子的演化特性, 我们在实验中改变延迟时间, 扫描第二步激发光频率, 分别测量不同延迟时间的 Rydberg 原子和自由离子谱. 对离子谱进行拟合, 获得 Rydberg 原子信号和自由离子信号与延迟时间的依赖关系, 即 Rydberg 原子在排斥势下的演化过程, 实验结果如图 3 所示.

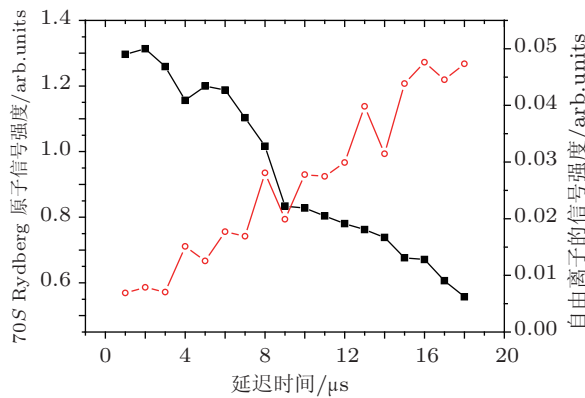


图 3 70S Rydberg 原子 (正方形) 和自由离子 (圆点) 随延迟时间的变化

由图 3 可知自由离子信号刚开始很小, 随着延迟时间的增加自由离子信号逐渐增加, 开始的自由离子信号是由于黑体辐射作用使 S 态原子跃迁到相

邻的 P 态, SP 原子对为吸引势, 他们相互吸引碰撞并产生 Penning 电离. 随着延迟时间的增加, 黑体辐射以及原子间的相互作用, 使更多地 S 态原子重新分布到相邻的偶极允许的 P 态, 从而导致自由离子信号的增加.

下面计算离子产率, 主要考虑二方面机理.

1) 黑体辐射直接导致产生的电离, 其光电离率为 [23]

$$R_{PI}^{bb} = \int_{\omega_{nl}}^{\infty} \sigma_{PI}(n, l, \omega) \frac{\omega^2}{\pi^2 c^2 (e^{\omega/(kT)} - 1)} d\omega, \quad (2)$$

这里的 $\omega_{nl} = 1/(2n^*)$ 是初始能量, k 是波尔兹曼常数, c 是光速, 对 (2) 式进行积分, 得到下面的近似结果:

$$R_{PI}^{bb} \approx C_l T \left(\frac{14423}{n^{*7/3}} + \frac{10770l^2}{n^{*11/3}} \right) \times \ln \left(\frac{1}{1 - \exp \left(-\frac{157890}{Tn^{*2}} \right)} \right) s^{-1}, \quad (3)$$

其中, C_l 是 $C_s = C_p = 0.2$, T 是环境温度, 在我们的实验条件下, $T = 300$ K, 由 (3) 式计算的 70S 态原子的离子产率大约为 $98 s^{-1}$.

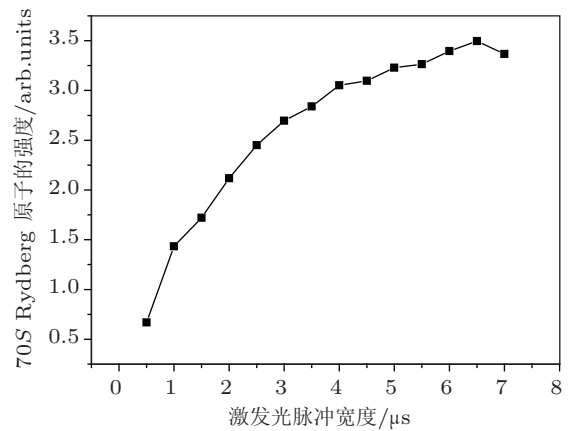


图 4 70S Rydberg 原子信号与激发光脉冲宽度的关系

2) 黑体辐射导致的态转移而造成的原子相互吸引碰撞而产生的离子, 这在前面已经略微提到, 黑体辐射导致态转移率 T_{BRR} 可以表示为 [24]

$$T_{BRR} = \frac{1}{n_{eff}^5} \frac{2.14 \times 10^{10}}{\exp(315780/n_{eff}^3 T) - 1} (s^{-1}), \quad (4)$$

其中 T 是环境温度, n_{eff} 是有效主量子数. 在 70S 的情况下其态转移率经过计算约为 $4143 s^{-1}$, 计算出来的态转移率比黑体辐射导致的电离率大两个数量级, 所以产生自由离子的主要机理是黑体辐射

导致的态转移引起的. 黑体辐射导致 70S 态原子重新布居到相邻的偶极跃迁的态, 经相互吸引碰撞产生 Penning 电离, 所以实验中需要较长的延迟时间才能观察到自由离子信号.

最后, 我们令延迟时间为 1 μ s, 其他条件和前面的实验一致, 改变激发光的脉冲宽度, 研究 70S Rydberg 原子与激发光脉冲宽度之间的依赖关系, 实验结果如图 4 所示. 由图可知, 随着激发光脉宽的增加, Rydberg 原子信号趋于饱和, 即产生了激发阻塞效应. 这是由于 Rydberg 原子间具有很强的长程相互作用, 当激发光脉宽较大时, 先激发的 Rydberg 原子由于长程相互作用使他邻近的原子能级发生频移, 当用窄线宽激光进一步激发时, 由于激发光的频率失谐而阻止了邻近原子的进一步激发, 即“激发阻塞效应”. 利用这种激发阻塞效应可以在局部实现单 Rydberg 原子的激发^[25,26], 进而实现

可控量子逻辑门的操作^[27].

4 结论

本文从实验上研究了 70S 超冷 Cs Rydberg 原子的相互作用和动力学演化过程. 通过改变延迟时间测量自由离子和 Rydberg 原子信号的变化趋势, 详细讨论了 Rydberg 原子在长程 van der Waals 相互作用下产生自由离子的机理. 并通过改变激发光脉冲宽度获得了激发阻塞效应, 并对实验结果作了讨论. Rydberg 原子具有很强的长程相互作用, 使相邻原子能级发生频移, 产生激发阻塞效应. 而长程吸引相互作用可以形成超冷 Rydberg 分子. 所以本文的研究对进一步研究超冷 Rydberg 原子的相互作用以至形成分子具有重要意义.

-
- [1] Zhao Y Q, Liu L, Liu C L, Xue P, Wang J G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3248 (in Chinese) [赵益清, 刘玲, 刘春雷, 薛平, 王建国 2009 物理学报 **58** 3248]
- [2] Zhang Y C, Wu J Z, Ma J, Zhao Y T, Wang L R, Xiao L T, Jia S T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5418 (in Chinese) [张一驰, 武寄洲, 马杰, 赵彦廷, 汪丽蓉, 肖连团, 贾锁堂 2010 物理学报 **59** 5418]
- [3] Qi R, Yu X L, Li Z B, Liu W M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 185301
- [4] Liang Z X, Zhang Z D, Liu W M 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 050402
- [5] Liu W M, Wu B, Niu Q 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 11
- [6] Gallagher T F 1994 *Rydberg Atoms* (Cambridge University Press) p5
- [7] Anderson W R, Veale J R, Gallagher T F 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 249
- [8] Mourachko I, Comparat D, Tomasi F D, Fioretti A, Nosbaum P, Akulin V M, Pillet P 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 253
- [9] Singer K, Reetz-Lamour M, Amthor T, Marcassa L, Weidemüller M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 163001
- [10] Tong D, Farooqi S, Stanojevic J, Zhang Y, Côté R, Eyler E, Gould P 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 063001
- [11] Vogt T, Viteau M, Zhao J M, Choteau A, Comparat D, Pillet P 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 083003
- [12] Lukin M D, Fleischhauer M, Côté R, Duan L M, Jaksch D, Cirac J I, Zoller P 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 037901
- [13] Jaksch D, Cirac J I, Zoller P, Rolston S L, Côté R, Lukin M D 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2208
- [14] Li W, Tanner P J, Gallagher T F 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 173001
- [15] Han J, Gallagher T F 2009 *Phys. Rev. A* **79** 053409
- [16] Reinhard A, Liebisch T C, Younge K C, Berman P R, Raithel G 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 123007
- [17] Reinhard A, Liebisch T C, Knuffman B, Raithel G 2007 *Phys. Rev. A* **75** 032712
- [18] Amthor T, Reetz-Lamour M, Westermann S, Denskat J, Weidemüller M 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 023004
- [19] Amthor T, Reetz-Lamour M, Giese C, Weidemüller M 2007 *Phys. Rev. A* **76** 054702
- [20] Zhang L J, Feng Z G, Zhao J M, Li C Y, Jia S T 2001 *Optics Express* **18** 11599
- [21] Zhang L J, Feng Z G, Li A L, Zhao J M, Li C Y, Jia S T 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1362; Zhu X B, Zhang H, Feng Z G, Zhang L J, 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]
- [22] Singer K, Stanojevic J, Weidemüller M, Côté R 2005 *J. Phys. B* **38** S295
- [23] Beterov I I, Tretyakov D B, Ryabtsev I I 2007 *Phys. Rev. A* **77** 015404
- [24] Beterov I I, Ryabtsev I I, Tretyakov D B, Entin V M 2009 *Phys. Rev. A* **79** 052504
- [25] Urban E, Johnson T A, Henage T, Isenhower T, Yavuz D D, Walker T G, Saffman M 2009 *Nature Physics* **5** 110
- [26] Gaëtan A, Miroshnychenko Y, Wilk T, Chotia A, Viteau M, Comparat D, Pillet P, Browaeys A, Grangier P 2009 *Nature Physics* **5** 115
- [27] Isenhower L, Urban E, Zhang X L, Gill A T, Henage T, Johnson T A, Walker T G, Saffman M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 010503

Evolution of ultracold $70S$ Cs Rydberg atom*

Che Jun-Ling Zhang Hao Feng Zhi-Gang Zhang Lin-Jie
Zhao Jian-Ming[†] Jia Suo-Tang

(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Laser Spectroscopy Laboratory, College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 11 April 2011; revised manuscript received 6 May 2011)

Abstract

Ultracold $70S$ Cs Rydberg atoms are obtained by two-photon excitation in a magneto-optical trap, and detected by using the state-selective pulse field ionization technique. The evolution of $70S$ Rydberg atoms is investigated by changing the delay time between excitation laser and ionization electric field and the excitation duration. Blackbody radiation is taken into account to explain experimental result. The experimental result is found to be consistent with theoretical value.

Keywords: Rydberg atom, interaction, dynamical evolution

PACS: 32.80.Ee, 34.90.+q

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10934004, 60978018, 61078001, 60978001).

[†] E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn