

里德伯原子向超冷等离子体的自发转化*

赵建明 张临杰 李昌勇 贾锁堂

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

(2007 年 12 月 5 日收到, 2007 年 12 月 24 日收到修改稿)

在铯原子 MOT 中, 利用三光子激发冷原子获得超冷里德伯原子, 改变里德伯原子间的相互作用时间, 获得超冷等离子体的信号. 研究了里德伯原子向超冷等离子体的自发转化过程和里德伯原子的初始电离机理.

关键词: 里德伯原子, 相互作用, 等离子体, 电离机理

PACC: 3150, 3280K, 3280P

1. 引言

主量子数 n 较大的里德伯原子因其具有较大的原子半径($\propto n^2$), 和电偶极距($\propto n^2$), 以及较长的寿命($\propto n^3$), 从而具有较长的相互作用时间以及较大的碰撞截面^[1]. 里德伯原子的这些特点使其很容易受到外界的影响, 具有很大的偶极相互作用, 因而人们可以利用外场如电场, 微波场等来控制里德伯原子间的相互作用. 这些特性在研究冷原子的长程相互作用过程具有重要的意义.

处于温度约 300 μK , 密度约为 10^9 个每立方厘米的超冷里德伯原子气体, 在 1 μs 的实验时间尺度内, 原子可以运动的距离是原子间距离的 3%, 这样的原子样品几乎是静止的, 原子间的相互作用, 并不像室温下两个原子之间的相互作用, 实际上同时是多个原子间的相互作用, 这样的相互作用使冷冻的里德伯气体更像是没有固定形状的固体(an amorphous solid). 原子间的偶极相互作用使里德伯原子的能级发生频移, 利用窄线宽激光激发时, 当一个原子被激发, 其他的原子则由于激发光频率的失谐而不能激发, 这种现象叫做偶极阻塞(dipole blockade)效应^[2-4]. 偶极阻塞可用于研究量子信息存储以及量子逻辑门的计算^[5]等.

里德伯原子和等离子体的研究一直以来被认为是相互独立的. 然而它们之间有着密切的联系, 研究表明超冷里德伯原子可以自发地转化为超冷的等离

子体^[6,7], 超冷等离子体也可以重新组合成为超冷里德伯原子^[8]. Rolston^[9]小组在 1999 年首先在氫原子 MOT 中利用双光子电离冷原子获得了超冷等离子体. 文献 [7] 分别以超冷铷原子和铯原子为介质, 利用双光子激发获得超冷里德伯原子, 研究了超冷里德伯原子向超冷等离子体转化的过程和机理.

本文主要在超冷铯原子 MOT 中, 利用三光子激发获得超冷里德伯原子, 然后加一场电离脉冲使里德伯原子电离, 由微通道板(MCP)探测离子或电子信号, 通过改变里德伯原子的作用时间, 研究超冷铯原子向超冷等离子体转化的过程, 和里德伯原子初始电离的机理.

2. 实验原理和自发转化过程

实验是在超冷铯原子样品中完成的. 在冷铯原子的磁光阱中利用激光冷却和俘获技术得到温度约 200 μK , 密度约 10^9 个每立方厘米的超冷铯原子. 然后利用三光子激发, 将超冷铯原子激发到超冷里德伯态, $n\text{p}$ 态. 具体的激发能级如图 1 所示. 首先, 用 852 nm 的冷却光将铯原子从基态激发至 $6P_{3/2}$ 态; 其次, 用 1.47 μm 的半导体激光器将其从 $6P_{3/2}$ 态激发至 $7S_{1/2}$ 态; 然后用 750—830 nm 的钛宝石激光器将其激发至 $nP_{3/2}$ 态. 实验中将其激发到 $43P_{3/2}$ 的里德伯态, 之后加一脉冲电场, 利用场电离脉冲方法使里德伯原子电离, 由 MCP(微通道板)测量电离的离子或者电子, 对 Boxcar 设置对应门信号, 由计算机记录

* 国家自然科学基金(批准号: 60678003, 10574084, 60778008)和 973 计划(批准号: 2006CB921603)资助的课题.

初始电离的离子信号和里德伯原子信号,以此来研究里德伯原子间的相互作用.实验中通过改变第三步激发激光和场电离脉冲之间的时间间隔(延迟时间)来观察超冷里德伯原子向等离子体的转化过程.

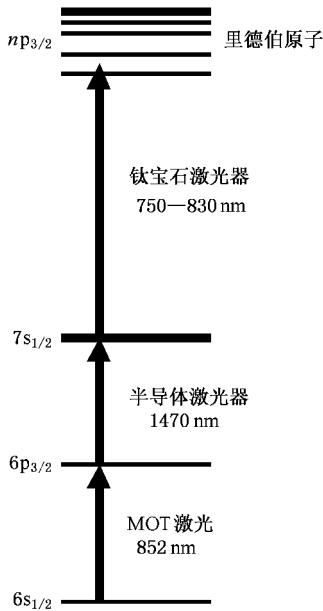


图 1 与实验相关的三步激发能级图(852 nm 的 MOT 光作为第一步激发使铯原子由基态 $6s_{1/2}$ 激发到 $6p_{3/2}$, 半导体激光器输出的 1470 nm 的激光作为第二步激发使铯原子由激发态 $6p_{3/2}$ 激发到 $7s_{1/2}$, 最后由连续可调谐的钛宝石激光器将 $7s_{1/2}$ 的原子激发到 $np_{3/2}$)

图 2 是延迟时间分别为 $0 \mu\text{s}$, $5 \mu\text{s}$, $10 \mu\text{s}$, $30 \mu\text{s}$ 时的 TOF(飞行时间质谱)测量的离子信号.图 2 中,在 TOF 谱中,首先得到的信号为离子(或等离子体)信号,随后得到的为里德伯原子信号,这是由于离子带正电荷,当有一个非常小的电场就可以使离子得到一个加速度,在这个加速度的作用下离子到达 MCP,而对于里德伯原子,只有当电场达到一定的时候才可以使里德伯原子电离,离子在电场的加速下到达 MCP,实验中采用的场电离脉冲的上升沿约为 $1 \mu\text{s}$,因此由到达 MCP 的先后顺序可以区分离子信号和里德伯原子信号.

从图 2 中可以看到,延迟时间为 $0 \mu\text{s}$ 时,得到的信号主要是里德伯原子信号,离子信号非常少.这是因为原子间相互作用的时间很短,初始电离过程所产生的离子很少.而在 $5 \mu\text{s}$ 时,由于相互作用时间增加,离子信号很快增大.延迟时间为 $10 \mu\text{s}$ 时,对应的离子信号很大,而里德伯原子信号非常小,即几乎所有的里德伯原子全部转化为离子,从而形成等

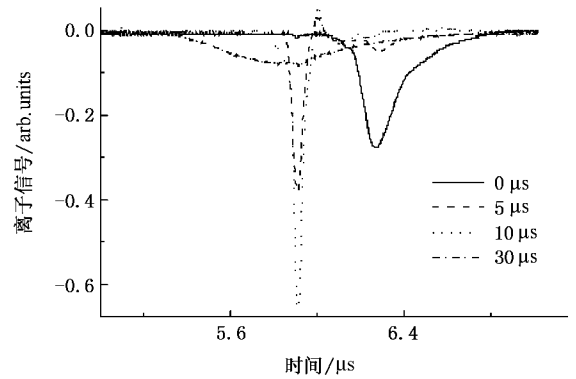


图 2 延迟时间分别为 $0 \mu\text{s}$ (实线), $5 \mu\text{s}$ (虚线), $10 \mu\text{s}$ (点线), $30 \mu\text{s}$ (点划线)时的 TOF 信号,首先得到的信号为离子信号,随后得到的为里德伯原子信号.当延迟时间为 $10 \mu\text{s}$ 时,离子信号很大,几乎所有的里德伯原子全部转化成了离子信号,形成了等离子体

离子体.而当相互作用时间继续增大($30 \mu\text{s}$)时,等离子体信号开始扩散.

这种转化过程可以表示为,在初始时刻,由于各种原因有小部分里德伯原子发生电离,电离后的电子很快离开了 MOT 阱,而离子则仍留在阱中,随着正离子的增加,当正离子的数量达到一定时,这些电荷会形成一个势阱,从而俘获随后电离的电子,势阱中的电子进一步和里德伯原子碰撞而产生更多的电子和离子,以至发生雪崩效应,形成等离子体.这个过程在文献 [6] 中也被证实.在里德伯原子向等离子体转化的过程中,初始电离的少部分离子起了非常重要的作用,这部分在初始过程中产生的离子是怎样产生的,其产生的机理还有待研究.

3. 初始电离机理分析

文献 [6] 分析了在实验的初始阶段,导致里德伯原子电离的两个主要原因,一是黑体辐射,二是热原子和超冷里德伯原子间的碰撞.由于里德伯态的相邻能级间隔与 n^{-3} 成正比,而室温下黑体辐射的能量约为 200 cm^{-1} ,基态对应的间隔为 10^4 cm^{-1} ,高里德伯态对应的能级间隔约为 10 cm^{-1} [1],所以黑体辐射对于基态原子几乎没有作用,然而对于里德伯原子则表现出完全不同的性质,所以黑体辐射对里德伯原子的初始电离具有一定的作用;另外在磁光阱中还存在有大约 1% 的热原子,这些热原子也同时被激发到里德伯态,热原子具有极大的动能,热-冷原子的相互作用可以导致冷的里德伯原子电离而形

成离子.文献[6]从理论上研究了这两种效应,得出对于主量子数 $n < 40$ 的态其主要的电离机理是冷热原子的碰撞.黑体辐射的作用可以不计.对于主量子数 $n > 50$ 的态,则即使没有热原子也能形成等离子体,其主要的电离机理是冷的里德伯原子间偶极-偶极和黑体辐射与超冷里德伯原子的作用.

为了进一步研究超冷里德伯原子的初始电离机理,我们以超冷铯原子为样品,如图1所示利用三光子激发,分别将超冷原子激发到 $n = 40$ 和 43 的能级,研究在这两个能级上的电离.图3所示为在延迟时间为 $10 \mu\text{s}$ 时,保持其他参数不变,改变第三步激发光的强度,从而改变初始时刻里德伯原子的密度,研究初始电离机理.由图3(a)可以看到,随着激发光功率的增加且约小于 25 mW 时, 40p 和 43p 态里德伯原子数目的变化几乎相同,都是随功率的增加原子数线性增加.当激发光功率超过 30 mW 时,两态的变化截然不同.对于 40p ,激发光功率增加到 50 mW 后,里德伯原子逐渐趋于饱和,这种现象可以解释为,激发光功率增加到一定值时,所有的 7s 原子全部被激发到 40p ,即使再增加激发光功率, 40p 原子数也不会增加,达到饱和.对于 43p 态则不同,激发光功率超过 30 mW 后 43p 里德伯原子数不再增加甚至减少.对于相应的离子信号(如图3(b)所示)也有类似的情形,激发光功率较小时,如文献[6]所述由于冷热原子作用产生了少量的离子,随着功率的增加里德伯原子的数目增加,因而产生的离子数增加,但是对于 43p 态产生的离子,当激发功率超过一定值即 43p 态里德伯原子的数目增加到一定值时,即里德伯原子向等离子体转化的阈值时,离子的数目急剧增加,从而形成等离子体.

由上分析可知在相同的条件下, 43p 态比 40p 态更容易电离形成等离子体.这与他们的能级结构有关.对于铯原子 $n = 42\text{P}$ 态原子, $n\text{p}$ 态能级约处于 $(n+1)\text{s}$ 和 $n\text{s}$ 态能级的中间,可以偶极-偶极共振相互作用.对于 $n > 42$ 则 $n\text{p}$ 态能级处于 $(n+1)\text{s}$ 和 $n\text{s}$ 态中间能级的偏下部分,对于 $n < 42$ 则 $n\text{p}$ 态能级处于 $(n+1)\text{s}$ 和 $n\text{s}$ 态中间能级的偏上部分.

将里德伯原子看作为偶极子,两个中性原子间的偶极相互作用势为

$$V = \frac{\boldsymbol{\mu}_1 \cdot \boldsymbol{\mu}_2 - 3(\boldsymbol{\mu}_1 \cdot \hat{R})(\boldsymbol{\mu}_2 \cdot \hat{R})}{R^3},$$

其中 $\boldsymbol{\mu}_1$ 和 $\boldsymbol{\mu}_2$ 为偶极矩阵元, R 为两个偶极子之间的距离.

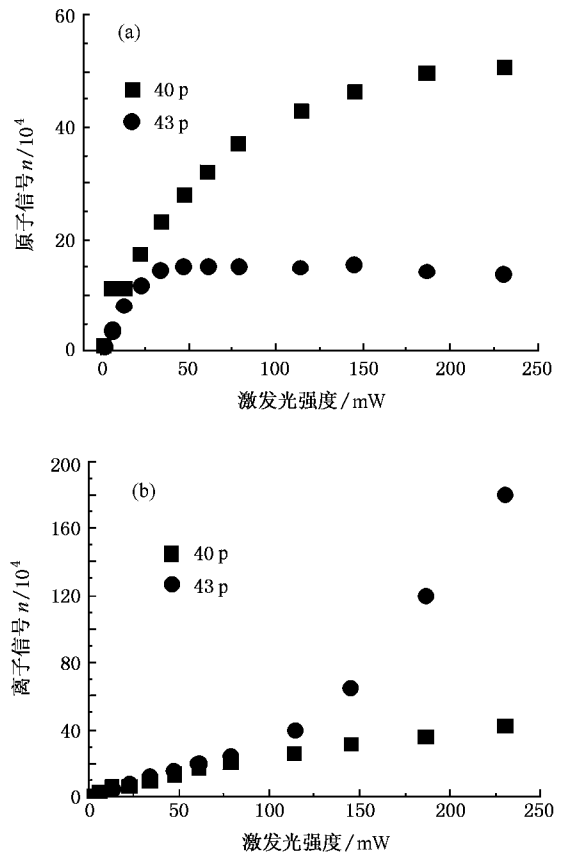


图3 延迟时间为 $10 \mu\text{s}$ 时 40p 和 43p 态的里德伯原子信号(a)和离子信号(b)随第三步激发光强度的变化曲线

在没有外场作用的原子样品中,原子只有跃迁偶极矩.如果两个原子分别处于 s 和 p 态,两原子可以形成对应的两个分子态—— sp 和 ps .则原子的偶极跃迁矩阵元 μ 为: $\mu = s|\mu|p$.在此考虑 p 态仅有 z 分量.这种情况下,系统的哈密顿量的本征值给出的两条势能曲线分别为排斥势曲线和吸引势曲线.

对于 43p 态的原子,由于偶极相互作用,原子处于相互吸引势曲线,两个原子相互吸引碰撞然后电离.而对于 40p 的原子则处于排斥势曲线,不易电离.总之,对于 40p 态的原子其初始的电离机理主要是由于冷热原子的相互碰撞,而对于 43p 态的原子的初始的电离机理主要是由于偶极相互作用.

4. 结 论

本文以超冷原子为介质,利用三光子激发产生超冷里德伯原子,通过改变延迟时间研究超冷里德伯原子向超冷等离子体转化的过程和机理.在延迟时间为 $10 \mu\text{s}$ 时观察到超冷里德伯原子转化为超冷

等离子体的信号. 并对里德伯原子的初始电离机理作了定性的分析, 初始电离机理的定量分析将另文分析. 研究超冷里德伯原子间的相互作用对进一步

研究和控制原子间的相互作用以及量子信息存储和量子逻辑门的设计等有重要意义. 文中实验数据是在法国国家科学中心 Aime Cotton 实验室完成.

- [1] Gallagher T F *Rydberg atom* (Cambridge University press) Cambridge 1994
- [2] Tong D , Farooqi S M , Stanojevic J , Krishnan S , Zhang Y P , Cote R , Eyler E E , Gould P L 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 063001
- [3] Liebisch T C , Reinhard A , Berman P R , Raithel G 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 253002
- [4] Vogt T , Viteau M , Zhao J , Chotia A , Comparat D , Pillet P 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 083003
- [5] Lukin M D , Fleischhauer M , Cote R , Duan L M , Jaksch D , Cirac J I , Zoller P 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 037901
- [6] Li W , Noel M W , Robinson M P , Tanner P J , Gallagher T F 2004 *Phys. Rev. A* **70** 042713
- [7] Robinson M P , Tolra B L , Noel M W , Gallagher T F , Pillet P 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 4466
- [8] Killian T C , Lim M J , Kulin S , Dumke R , Bergeson S D , Rolston S L 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3759
- [9] Killian T C , Kulin S , Bergeson S D , Orozco L A , Orzel C , Rolston S L 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4776

The transformation of ultra-cold Rydberg atom to plasma^{*}

Zhao Jian-Ming Zhang Lin-Jie Li Chang-Yong Jia Suo-Tang

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

(Received 5 December 2007 ; revised manuscript received 24 December 2007)

Abstract

Ultra-cold Rydberg atoms are obtained using three-photon excitation in the Cs magneto-optical trap (MOT), and the signals of the plasma are measured through changing the interaction time. The spontaneous evolution and the ionization mechanism are investigated.

Keywords : Rydberg atom , interaction , plasma , ionization mechanism

PACC : 3150 , 3280K , 3280P

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60678003 , 10574084 and 60778008) and 973 Project (Grant No. 2006CB921603).