

# 超冷铷铯极性分子振转光谱的实验研究\*

杨艳 姬中华 元晋鹏 汪丽蓉<sup>†</sup> 赵延霆<sup>‡</sup> 马杰 肖连团 贾锁堂

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学激光光谱实验室, 太原 030006)

(2012年4月11日收到; 2012年6月2日收到修改稿)

利用激光冷却俘获技术在双暗磁光阱中获得高密度的超冷铷原子和铯原子, 通过光缔合方法制备超冷铷铯极性分子。采用共振增强双光子电离技术探测基三重态  $a^3\Sigma^+$  的铷铯分子, 产率约为  $10^4/\text{s}$ 。通过改变缔合光频率, 获得  $(2)0^+$ ,  $(3)0^-$ ,  $(2)0^-$  等分子态的高分辨振转光谱, 拟合得到相应的转动常数分别为  $0.00349 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.00649 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.00372 \text{ cm}^{-1}$ 。

**关键词:** 光缔合, 超冷铷铯分子, 振转光谱

**PACS:** 33.20.-t, 33.15.Pw, 37.10.Mn, 34.80.Gs

## 1 引言

近年来超冷分子由于温度较低、能级丰富和外场可控等优点吸引了人们的关注。超冷分子已经广泛地应用于高分辨光谱<sup>[1]</sup>、超冷碰撞<sup>[2]</sup>、超冷化学<sup>[3]</sup>、量子信息及量子计算机<sup>[4]</sup>等方面的研究。

分子冷却主要有缓冲气体冷却<sup>[5]</sup>、斯塔克电场冷却<sup>[6]</sup>、Feshbach 共振<sup>[7]</sup>和光缔合<sup>[8]</sup>等方法。光缔合技术具有对原子样品要求较低、实验技术简单、超冷分子产率高、振转能级可控、基态分子寿命长等优点; 通过光缔合技术可以获得超冷分子激发态和基态的信息, 对于表征分子能级参数、研究超冷分子的动力学性质以及分子的量子操控具有很重要的意义, 所以这种技术被许多研究小组采用。超冷原子光缔合原理最早由美国马里兰大学 Thorsheim 等<sup>[9]</sup>提出, 1993 年 Lett 等<sup>[10]</sup>首先在实验上通过钠冷原子光缔合形成长程态的钠冷分子, 目前人们已经利用光缔合技术

成功地实现了  $\text{Na}_2^{[10]}$ ,  $\text{Rb}_2^{[11]}$ ,  $\text{K}_2^{[12]}$ ,  $\text{Cs}_2^{[13]}$ ,  $\text{LiCs}^{[14]}$ ,  $\text{NaCs}^{[15]}$ ,  $\text{KRb}^{[16]}$ ,  $\text{LiK}^{[17]}$ ,  $\text{RbCs}^{[18]}$  等双原子分子的冷却。

我们研究小组在 2006 年利用光缔合技术制备了超冷同核铯分子<sup>[13]</sup>。随着人们对分子冷却技术及其应用的进一步深入研究, 异核极性分子的优越性逐渐凸显出来。与同核分子相比, 异核双原子分子具有较大的永久电偶极距, 易于受外加电场调控<sup>[19]</sup>。基于这些特征, 超冷极性分子成为量子信息领域研究的重要载体。我们研究小组在改造原有系统基础上, 开始搭建超冷铷铯异核极性分子的实验平台, 并且取得了一定的工作进展<sup>[20]</sup>。

本文主要研究在双暗磁光阱中利用光缔合技术制备超冷铷铯分子。采用共振增强双光子电离技术探测形成的超冷铷铯基态分子。获得  $(2)0^+$ ,  $(3)0^-$ ,  $(2)0^-$  等分子态的高分辨振转光谱, 对光谱进行了讨论和分析, 通过双原子分子刚体模型拟合得到这些振转光谱的转动常数。

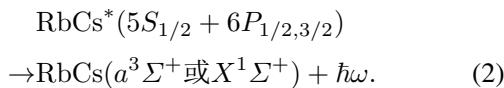
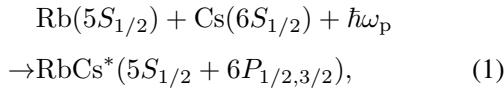
\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB921603)、国家国际科技合作专项(批准号: 2011DFA12490)、国家自然科学基金(批准号: 10934004, 60978018, 61008012, 60808009, 61078001, 60978001)、国家基金委创新研究群体(批准号: 61121064)、山西省国际合作项目(批准号: 2011081030)和山西省自然科学基金(批准号: 2011011004)资助的课题。

† E-mail: wlr@sxu.edu.cn

‡ E-mail: zhaoyt@sxu.edu.cn

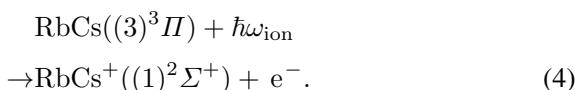
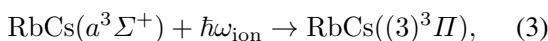
## 2 钷铯分子形成及电离机制

图 1 是铷铯分子形成及电离的相关能级图<sup>[21,22]</sup>. 光缔合制备铷铯基态分子的过程用(1)和(2)式表示:



两个相互碰撞的超冷基态<sup>85</sup>Rb原子( $5S_{1/2}, F=2$ )和基态<sup>133</sup>Cs原子( $6S_{1/2}, F=3$ )在缔合光作用下吸收一个光子( $\hbar\omega_p$ )形成一个激发态铷铯分子( $5S_{1/2} + 6P_{1/2,3/2}$ ), 对应图 1(a)过程. 激发态分子寿命大约是几十纳秒, 辐射一个光子( $\hbar\omega$ )后可能形成稳定的基态铷铯分子( $X^1\Sigma^+$ )或者亚稳态的基三重态铷铯分子( $a^3\Sigma^+$ ), 本文涉及到的分子态中, (2)0<sup>+</sup>, (2)1 态铷铯分子可能辐射到基单态  $X^1\Sigma^+$  也可能辐射到基三态  $a^3\Sigma^+$ , 而 (3)0<sup>-</sup>, (2)0<sup>-</sup>, 及 (1)2 态铷铯分子只能辐射到基三态  $a^3\Sigma^+$ , 辐射几率取决于分子能态间的选择定则和弗兰克康登因子<sup>[23]</sup>, 对应图 1(b)的自发辐射过程. 也可能重新离解为两个分离的原子, 从势阱中逃逸出去. 本文研究超冷铷铯分子的形成, 对离解的原子不做讨论.

共振增强双光子电离光谱技术探测基三态铷铯分子的过程用(3)和(4)式表示:



波长为 710 nm 的第一个光子( $\hbar\omega_{\text{ion}}$ )将基三重态铷铯分子激发到  $\text{Rb}(5S_{1/2}) + \text{Cs}(5D_{3/2,5/2})$  离解限的(3)<sup>3</sup> $\Pi$  态, 接着同样频率的第二个光子将(3)<sup>3</sup> $\Pi$  态铷铯分子电离到(1)<sup>2</sup> $\Sigma^+$  态形成铷铯离子, 对应图 1(c)和(d)的双光子电离过程.

## 3 实验装置

实验中首先利用激光冷却俘获技术在双暗磁光阱中制备高密度的超冷铷原子和铯原子<sup>[24]</sup>, 相关能级如图 2 所示. 图 2(a)是铷原子的相关能

级, T 是俘获光, 频率负失谐于  $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=4)$  的共振跃迁 12.5 MHz. R 是再抽运光, 频率对应于  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=2)$  的共振跃迁. D 是反抽运光, 频率对应于  $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=2)$  的共振跃迁, 它的作用是使超冷铷原子布居在  $5S_{1/2}(F=2)$  的超精细结构上. 图 2(b)是铯原子的相关能级, 俘获光频率负失谐于  $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$  的共振跃迁 15 MHz. 再抽运光频率对应于  $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=4)$  的共振跃迁. 反抽运光频率对应于  $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=4)$  的共振跃迁, 它的作用是使超冷铯原子布居在  $6S_{1/2}(F=3)$  的超精细结构上.

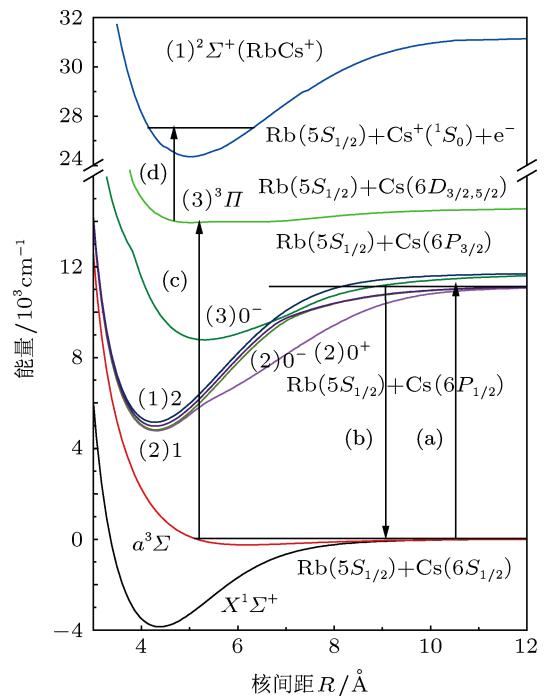


图 1 光缔合制备超冷铷铯分子及其探测过程的相关能级图 (a) 光缔合过程; (b) 自发辐射过程; (c), (d) 双光子电离过程

实验装置如图 3 所示. 金属腔背景真空度约为  $1.6 \times 10^{-7}$  Pa, 铷铯的俘获光分别由三对相互垂直、偏振方向相反的圆偏振光束组成, 四极磁场由一对反亥姆霍兹线圈产生, 在俘获区域沿轴向的空间磁场梯度约为 15 G/cm. 同时使用了三对矩形线圈补偿磁光阱区域的地磁场和其他杂散磁场. 实验中俘获光、再抽运光和反抽运光均由德国 Toptica 公司生产的半导体激光器(DL100)提供. 以铷暗磁光阱为例, 俘获光频率通过饱和吸收谱技术将激光

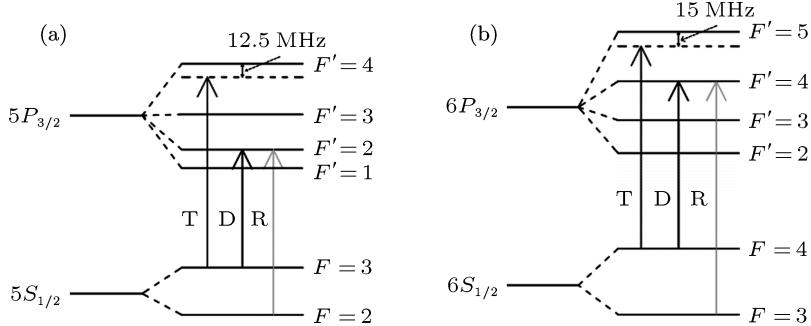
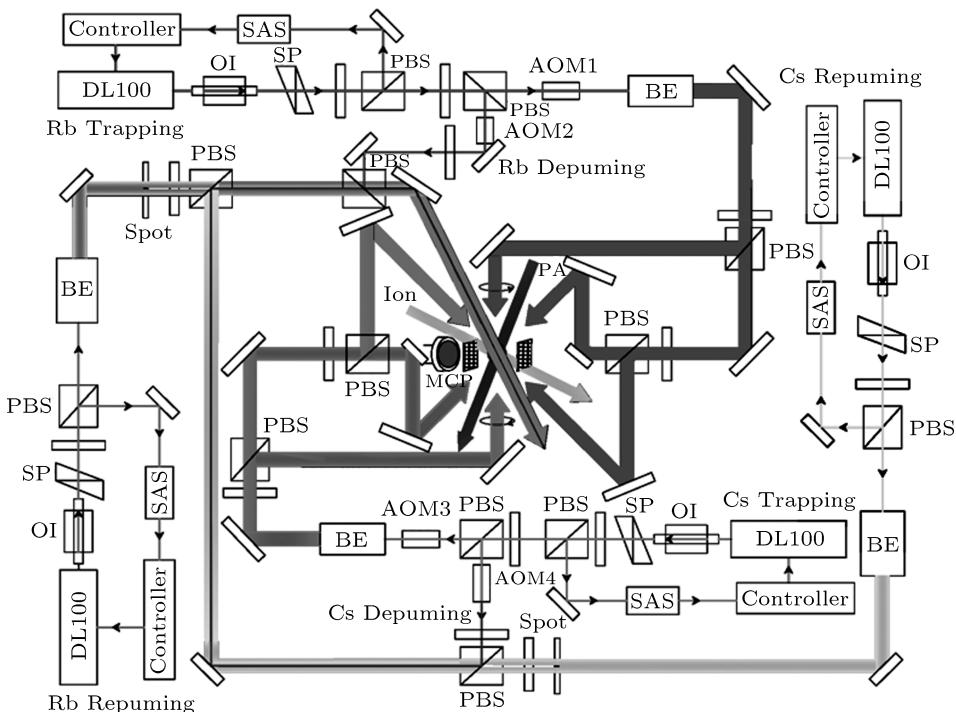
图 2 (a)  $^{85}\text{Rb}$  原子相关能级图; (b)  $^{133}\text{Cs}$  原子相关能级图; T, 俘获光; R, 再抽运光; D, 反抽运光

图 3 超冷铯分子制备的实验装置图 DL100, 半导体激光器; OI, 隔离器; SP, 整形棱镜; SAS, 饱和吸收光谱; PBS, 偏振分束棱镜; Spot, 带黑点白玻片; AOM, 声光调制器; BE, 扩束器; MCP, 微通道板; PA, 缔合光; Ion, 电离光; Trapping, 俘获光; Repumping, 再抽运光; Depumping, 反抽运光

器锁定在  $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=4, 2)$  的交叉线上, 通过声光调制器 (AOM1) 使其频率负失谐  $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=4)$  的共振跃迁约 12.5 MHz, 功率约 30 mW. 再抽运光锁定在  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=2)$  的共振跃迁, 功率约 2 mW. 俘获光和再抽运光扩束后光斑直径均约为 15 mm. 为了将铷原子制备在暗态 ( $5S_{1/2}(F=2)$ ), 将再抽运光的中心贴上直径约为 3 mm 不透光的黑点, 为了消除菲涅耳衍射的影响, 光束通过一组焦距均为 200 mm 的透

镜组, 将黑点成像到磁光阱的中心. 同时加入反抽运光, 反抽运光由提供俘获光的激光器在通过 AOM1 前分出一束, 通过 AOM2 使其频率偏移在  $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=2)$  的共振跃迁处, 功率约 40  $\mu\text{W}$ , 直径约为 3 mm, 通过  $\lambda/2$  波片和棱镜将反抽运光重合到暗点中心. 在上述实验条件下, 获得了直径约 500  $\mu\text{m}$ 、密度约  $3 \times 10^{11}/\text{cm}^3$  和温度约 150  $\mu\text{K}$  的铷原子云. 铯暗磁光阱的光路与此类似, 俘获光、再抽运光的频率如图 2(b) 所示, 俘获光功率约 50 mW, 再抽运光功率约 2 mW, 二者扩

束后光斑直径均约为 15 mm. 反抽运光由提供俘获光的激光器在通过 AOM3 前分出一束, 通过 AOM4 使其偏频在相应的共振跃迁线上, 反抽运光功率约 40  $\mu\text{W}$ , 直径约为 3 mm. 在上述实验条件下, 获得铯原子云的直径约 500  $\mu\text{m}$ 、密度约  $6 \times 10^{11}/\text{cm}^3$  和温度约 100  $\mu\text{K}$ . 仔细调节光路, 利用 CCD 从不同方向观察使两种原子云很好地重合.

缔合光由频率可大范围连续调谐的钛宝石激光器 (MBR 110) 提供, 输出线宽小于 100 kHz, 最大输出功率 1.2 W, 实验中选择缔合光输出功率约 600 mW. 缔合光的输出频率利用波长计 (WS7/R) 测量, 为了保证频率测量的准确性, 波长计通过铯原子的超精细结构跃迁线校准. 缔合光光斑直径约 500  $\mu\text{m}$ , 能够完全地覆盖超冷原子云. 电离激光器是由 532 nm Nd:YAG 激光 (INDI-40-10-HG) 抽运的脉冲染料激光器 (CBR-G-18EG) 提供. 脉冲染料激光器输出光波长为 710 nm, 输出能量约为 1 mJ, 用透镜聚焦后约 1 mm 作用在冷原子云上, 峰值强度约为  $2.4 \times 10^7 \text{ W/cm}^3$ . 电离后的离子经过电场加速, 通过微通道板进行高灵敏探测. 信号通过门积分平均器 (SR250) 进行数据处理后由 NIPC11714 记录. 实验中俘获光、抽运光、缔合光和电离光的时序由两台脉冲延时发生器 (DG535) 控制.

## 4 实验结果与分析

实验中把缔合光频率固定在  $11150.273 \text{ cm}^{-1}$ , 对应于铷铯分子  $(3)0^-$  长程态转动量子数  $J = 0$  的共振位置. 缔合光关断 100  $\mu\text{s}$  后开启脉冲染料激光器, 在示波器上获得的时间飞行质谱如图 4 所示. 飞行时间质谱的起点是脉冲染料激光的开启时刻, 5.64  $\mu\text{s}$  出现第一个离子信号, 6.95  $\mu\text{s}$  出现第二个离子信号, 8.79  $\mu\text{s}$  出现最后一个离子信号, 离子信号间隔分别为 1.31  $\mu\text{s}$  和 1.84  $\mu\text{s}$ . 根据原子离子和分子离子的质量不同从而到达微通道板的时间不同, 可以判断上述三个离子信号依次为铷原子离子、铯原子离子和铷铯分子离子. 依据选择定则和分子势能曲线, 可以判断出观察到的铷铯分子离子来源于  $(3)^3\Pi \leftarrow a^3\Sigma^+$  的双光子共振增强电离<sup>[25]</sup>. 考虑到实验中特征时间和微通道板的探测效率等相关实验参数, 计算得到  $a^3\Sigma^+$  态铷铯分子

的产率约  $10^4/\text{s}$ .

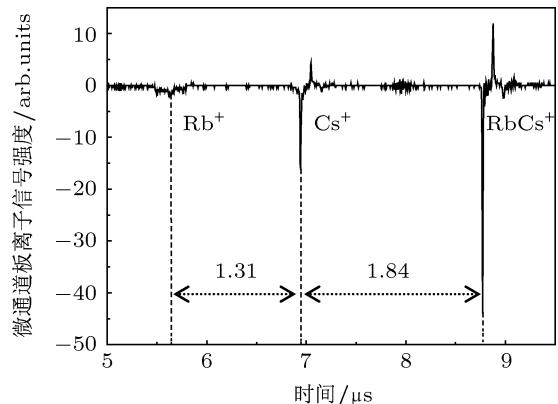


图 4 时间飞行质谱图

将门积分平均器卡在铷铯分子离子信号上, 扫描缔合光频率记录分子信号的强度, 可以获得由离子探测技术测量的铷铯分子光缔合光谱. 判断光缔合光谱归属的一般方法是: 利用从头算法获得分子的各电子态势能曲线, 进而计算各电子态的振动能级, 与实验观测到的光谱数据进行比对. 对于本文中涉及的光缔合光谱, 耶鲁大学的 De-Mille 小组利用冷原子的荧光俘获损失 (trap loss) 方法进行了探测<sup>[26]</sup>, 并进行了光谱归属的标定, 也为我们判断光谱归属提供了依据. 实验中缔合光频率从  $11150.1262 \text{ cm}^{-1}$  变化到  $11150.3894 \text{ cm}^{-1}$ , 得到超冷铷铯分子  $(2)0^+, (3)0^-$  分子态的高分辨振转光谱, 如图 5(a), (b) 所示. 缔合光频率从  $11151.2260 \text{ cm}^{-1}$  变化到  $11151.3262 \text{ cm}^{-1}$  时得到超冷铷铯分子  $(2)0^-$  等分子态的高分辨振转光谱如图 5(c) 所示. 缔合光频率从  $11151.3262 \text{ cm}^{-1}$  变化到  $11151.4584 \text{ cm}^{-1}$  获得的谱线是  $(1)2$  态和  $(2)1$  态的交叠, 统一标记为  $\Omega = (1)2, (2)1$ , 如图 5(d) 所示. 为了保证超冷原子的有效光缔合率, 缔合光扫描速率一般约为 20 MHz/s.  $\Omega = 0^\pm$  的分子态没有角动量和原子核自旋的耦合, 故可以从谱线中分辨出清晰的转动结构.

实验中将钛宝石激光器输出的缔合光频率从  $11150.1262 \text{ cm}^{-1}$  变化到  $11150.2294 \text{ cm}^{-1}$ , 首先探测到的是  $(2)0^+$  态高分辨光缔合光谱, 见图 5(a). 光谱中可以清晰看到  $(2)0^+$  态的四个转动能级结构转动量子数  $J$  从 0 到 3, 转动量子数  $J = 0$  的能级位置相对于  $\text{Cs}(6S_{1/2}, F = 3) \rightarrow \text{Cs}(6P_{1/2}, F' = 3)$  共振跃迁线负失谐  $28.29 \text{ cm}^{-1}$ . 由于我们利用了

双暗磁光阱冷却和俘获超冷原子, 减小了由于碰撞带来的损耗, 俘获的超冷原子温度较普通磁光阱中低约  $100 \mu\text{K}$ , 实验中得到的光缔合谱线只和一些较低角动量分量有关。对于  $0^+$  态, 转动量子数  $J = 0$  与 2 的谱线和角动量  $l = 1$  的散射有关, 转动量子数  $J = 1$  的谱线与角动量  $l = 0$  的散射有关, 转动

量子数  $J = 3$  的谱线来源于角动量  $l \geq 2$  的散射贡献<sup>[26]</sup>。不同转动能级谱线强度不同, 一个原因是由于激发态不同振转能级的光缔合率取决于原子的散射态到分子束缚态的弗兰克康登因子<sup>[23]</sup>, 另外一个原因是激发态分子自发辐射为基态分子的辐射率不同<sup>[27]</sup>。

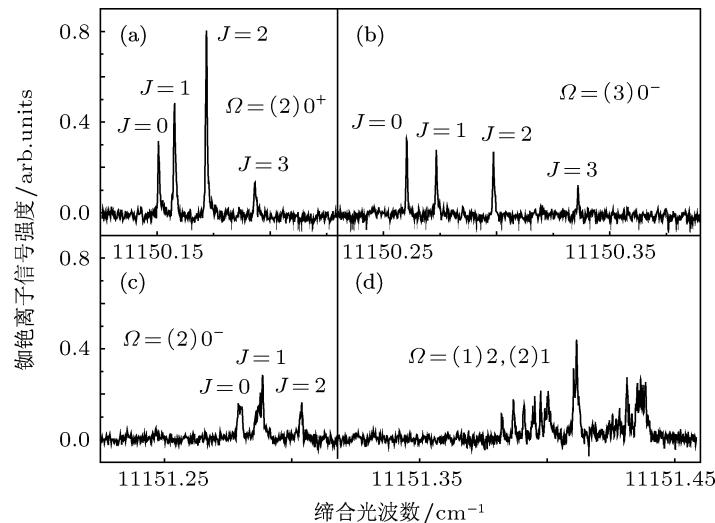


图 5 超冷铷铯分子  $(2)0^+$ ,  $(3)0^-$ ,  $(2)0^-$ ,  $(1)2 (2)1$  振转能级光谱图

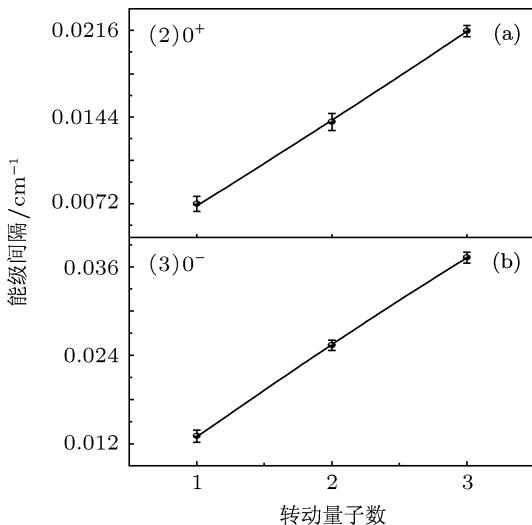


图 6 铷铯分子  $(2)0^+$ ,  $(3)0^-$  转动常数拟合图 (a)  $(2)0^+$  态转动常数拟合图; (b)  $(3)0^-$  态转动常数拟合图

按照刚体模型<sup>[28]</sup>, 原子分子的振转能量可表示为

$$E_V = hcB_V J(J+1) \quad (J \geq 0), \quad (5)$$

在相同的振动态, 相邻的转动能级间隔  $\Delta E$  可

表示为

$$\begin{aligned} \Delta E &= [E_V(J) - E_V(J-1)]/hc \\ &= 2B_V J \quad (J \geq 1), \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $E_V$  是转动能量本征值,  $h$  是普朗克常数,  $c$  是光速,  $V$  是振动量子数,  $B_V$  是振动态为  $V$  的转动能常数,  $J$  是转动量子数。

图 6(a) 是  $(2)0^+$  态不同转动能级间隔和转动量子数的关系, 通过(6)式拟合得到  $(2)0^+$  态的转动能常数为  $0.00349 \text{ cm}^{-1}$ 。考虑到拟合误差、能级间隔的标准方差、参考腔稳定性误差以及缔合光扫描的非线性等带来的误差, 转动常数的总误差在  $0.0004 \text{ cm}^{-1}$  范围内。

钛宝石激光器输出的缔合光频率从  $11150.2294 \text{ cm}^{-1}$  变化到  $11150.3894 \text{ cm}^{-1}$ , 可以探测到  $(3)0^-$  态的高分辨光缔合光谱如图 5(b) 所示。谱线可以分辨  $(3)0^-$  态的转动量子数  $J = 0$  到 3 的四个转动能级结构, 转动量子数  $J = 0$  的能级位置相对于  $\text{Cs}(6S_{1/2}, F = 3) \rightarrow \text{Cs}(6P_{1/2}, F' = 3)$  共振线负失谐  $28.18 \text{ cm}^{-1}$ 。对于  $0^-$  态, 转动量子

数  $J = 0$  和  $2$  的谱线与角动量  $l = 0$  的散射有关, 转动量子数  $J = 1$  和  $3$  的谱线与角动量  $l = 1$  的散射有关<sup>[26]</sup>. 图 6(b) 是  $(3)0^-$  态不同转动能级间隔和转动量子数的关系, 通过(6)式拟合得到  $(3)0^-$  态的转动常数为  $0.00649 \text{ cm}^{-1}$ .

缔合光频率从  $11151.2260 \text{ cm}^{-1}$  到  $11151.3262 \text{ cm}^{-1}$  变化时, 获得超冷铷铯分子  $(2)0^-$  态高分辨光缔合光谱见图 5(c). 该谱线转动量子数  $J = 0$  的位置为  $11151.2800 \text{ cm}^{-1}$ , 谱线包含了转动量子数  $J$  从  $0$  到  $2$  的转动结构, 利用(6)式拟合得到  $(2)0^-$  态的转动常数为  $0.00372 \text{ cm}^{-1}$ .

与  $\text{Rb}(5S_{1/2}) + \text{Cs}(6P_{1/2})$  离解限对应的  $(2)0^-$  分子态处于浅束缚态, 势阱约十几  $\text{cm}^{-1}$ , 对应外拐点核间距  $R$  约  $25 \text{ \AA}$ , 根据转动常数  $B \approx \hbar^2/2\mu R^2$  (其中  $\hbar$  是普朗克常数,  $\mu$  是折合质量,  $R$  是两个原子核间距), 对应的转动常数小, 属于长程态分子. 一般长程态分子由于自由原子态到束缚态分子态的弗兰克康登因子相比短程态的弗兰克康登因子大, 用 trap loss 方法比较容易观察<sup>[20]</sup>, 但通常辐射到基态的几率比较小, 所以我们观察到的  $(2)0^-$  态分子信号比较小, 与  $\text{Rb}(5S_{1/2}) + \text{Cs}(6P_{3/2})$  离解限对应的  $(3)0^-$  态分子态处于比较深的束缚态, 势阱约  $600 \text{ cm}^{-1}$ , 外拐点的核间距  $R$  约为  $9 \text{ \AA}$ , 对应的转动常数大, 属于短程态分子. 短程态铷铯分子由于自由原子态到束缚态分子态的弗兰克康登因子比较小, 光缔合率比较低, 因此 trap loss 光谱探测短程态的分子比较困难. 美国耶鲁大学 DeMille 小组通过腔增强的方

法将缔合光功率密度提高 15 倍, 才用 trap loss 方法观测到这个态的分子<sup>[26]</sup>. 然而短程态分子辐射到分子基态的几率比长程态分子的几率较大, 因此用离子光谱技术探测可以克服短程态分子光缔合率低的缺点, 有效地探测短程态分子, 因此我们不需要增加缔合光功率, 用离子光谱技术就可以探测到信噪比非常好的  $(3)0^-$  态分子.  $(2)0^+$  态分子在短程态时存在  $A^1\Sigma^+$  与  $b^3\Pi$  态的回避交叉, 核间距位置对应势能最低点, 原子间的相对运动比较大, 这时波恩-奥本海默近似失效, 发生非绝热耦合, 这样特殊的势能使得  $(2)0^+$  态的波函数在长程态和短程态都有较大的数值, 表现在长程态时激发态分子与自由原子态有较大的跃迁概率, 在短程态时激发态分子与基态分子有较大的跃迁概率, 因此我们用离子光谱技术观察到的  $(2)0^+$  态分子信号强度最大.

## 5 结 论

利用激光冷却俘获技术在暗磁光阱中获得密度约  $3 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 、温度约  $150 \mu\text{K}$  的超冷铷原子和密度约  $6 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 、温度约  $100 \mu\text{K}$  超冷铯原子, 通过光缔合方法制备超冷铷铯极性分子, 采用共振增强双光子电离技术探测基三重态  $a^3\Sigma^+$  的铷铯分子, 分子产率约为  $10^4/\text{s}$ . 获得了  $(2)0^+$ ,  $(3)0^-$ ,  $(2)0^-$  等分子态的高分辨振转光谱. 为进一步研究铷铯分子高分辨光谱、铷铯分子能级常数及铷铯分子形成的动力学过程奠定了实验基础.

- 
- [1] Wang L R, Ma J, Zhang L J, Xiao L T, Jia S T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6373 (in Chinese) [汪丽蓉, 马杰, 张临杰, 肖连团, 贾锁堂 2007 物理学报 **56** 6373]
  - [2] Wang Y, Dong D Z, Li W Y, Feng E Y, Cui Z F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6913 (in Chinese) [王悦, 董德智, 李伟艳, 凤尔银, 崔执凤 2009 物理学报 **58** 6913]
  - [3] Rieger T, Junglen T, Rangwala S A, Pinkse P W H, Rempe G 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 173002
  - [4] Elena K, Bragdon T, Robin C, Yelin S F 2012 *Phys. Rev. A* **85** 012328
  - [5] Dima E, Thierry L, Wieland S, Bretislav F, John M D 2002 *Phys. Rev. A* **66** 043401
  - [6] Joop J G, Jochen K, Steven H, Nicolas V 2006 *Phys. Rev. A* **73** 063410
  - [7] Papp S B, Wieman C E 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 180404
  - [8] Jones K M, Eite T, Paul D L, Paul S J 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 483
  - [9] Thorsheim H R, Weiner J, Julienne P S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2420
  - [10] Lett P D, Helmerson K, Philips W D, Ratcliff L P, Rolston S L, Wagshul M E 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 2200
  - [11] Miller J D, Cline R A, Heinzen D J 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 2204
  - [12] Nikolov A N, Eyler E E, Wang X T, Li J, Wang H, Stwalley W C, Gould P L 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 703
  - [13] Wang L R, Ma J, Li C Y, Zhao J M, Xiao L T, Jia S T 2007 *Appl. Phys. B* **98** 53
  - [14] Deiglmayr J, Grochola A, Repp M, Mörlbauer K, Glück C, Lange J, Dulieu O, Wester R, Weidmüller M 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 133004
  - [15] Haimberger C, Kleinert J, Bhattacharya M, Bigelow N P 2004

- Phys. Rev. A* **70** 021402
- [16] Wang D, Qi J, Stone M F, Nikolayeva O, Wang H, Hattaway B, Gensemer S D, Gould P L, Eyler E E, Stwalley W C 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 243005
- [17] Ridinger A, Chaudhuri S, Salez T, Fernandes D R, Bouloufa N, Dulieu O, Salomon C, Chevy F 2011 *Eur. Phys. Lett.* **96** 33001
- [18] Ji Z H, Zhang H S, Wu J Z, Yuan J P, Yang Y G, Zhao Y T, Ma J, Wang L R, Xiao L T, Jia S T 2012 *Phys. Rev. A* **85** 013401
- [19] Shi Z Y, Qi R, Zhai H 2012 *Phys. Rev. A* **85** 020702
- [20] Ji Z H, Zhang H S, Wu J Z, Yuan J P, Zhao Y T, Ma J, Wang L R, Xiao L T, Jia S T 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 083701
- [21] Allouche A R, Korek M, Fakherdin K, Chaalan A, Dagher M, Taher F, Aubert-Frécon M 2000 *J. Phys. B* **33** 2307
- [22] Fahs H, Allouche A R, Korek M, Aubert-Frécon M 2002 *J. Phys. B* **35** 1501
- [23] Wang C C, Killinger D K 1979 *Phys. Rev. A* **20** 1495
- [24] Townsend C G, Edwards N H, Zetie K P, Cooper C J, Rink J, Foot C J 1996 *Phys. Rev. A* **53** 1702
- [25] Yoon Y, Lee Y, Kim T, Ahn J S, Jung Y, Kim B, Lee S 2001 *J. Chem. Phys.* **114** 8926
- [26] Kerman A J, Sage J M, Sainis S, Bergeman T, DeMille D 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 033004
- [27] Zhang H S, Ji Z H, Yuan J P, Zhao Y T, Ma J, Wang L R, Xiao L T, Jia S T 2011 *Chin. Phys. B* **20** 123702
- [28] Lysebo M, Veseth L 2008 *Phys. Rev. A* **77** 032721

# Experimental study of rovibrational spectrum of ultracold polar RbCs molecules\*

Yang Yan Ji Zhong-Hua Yuan Jin-Peng Wang Li-Rong<sup>†</sup> Zhao Yan-Ting<sup>‡</sup>  
Ma Jie Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Laser Spectroscopy Laboratory, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 11 April 2012; revised manuscript received 2 June 2012)

## Abstract

Ultracold polar RbCs molecules are produced via photoassociation in a dual dark-SPOT magneto-optical trap, in which ultracold rubidium and cesium atoms with high densities are formed by laser cooling and trapping. The  $a^3\Sigma^+$  triplet metastable state ultracold RbCs molecules with  $10^4$ /s production rate are detected using resonance-enhanced two-photon ionization. The ultra-high resolution rovibrational spectra of  $(2)0^+$ ,  $(3)0^-$  and  $(2)0^-$  rovibrational states are observed by scanning the photoassociation laser frequency. The rotational constants of  $(2)0^+$ ,  $(3)0^-$  and  $(2)0^-$  vibrational states are  $0.00349\text{ cm}^{-1}$ ,  $0.00649\text{ cm}^{-1}$  and  $0.00372\text{ cm}^{-1}$  by fitting respectively.

**Keywords:** photoassociation, ultracold RbCs molecules, rovibrational spectrum

**PACS:** 33.20.-t, 33.15.Pw, 37.10.Mn, 34.80.Gs

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB921603), International S & T Cooperation Program of China (Grant No. 2011DFA12490), National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10934004, 60978018, 61008012, 60808009, 61078001, 60978001), Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61121064), International S & T Cooperation Program of Shanxi Province, China (Grant No. 2011081030) and National Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2011011004).

† E-mail: wlr@sxu.edu.cn

‡ E-mail: zhaoyt@sxu.edu.cn