

利用双光缔合光谱技术直接测量超冷铯分子 $0_u^+(6S_{1/2}+6P_{1/2})$ 长程态的转动常数的实验研究

胡晨阳 刘文良 徐润东 武寄洲 马杰 肖连团 贾锁堂

Direct measurement of the rotational constant of $0_u^+(6S_{1/2}+6P_{1/2})$ long-range state via double-pass spectroscopy

Hu Chen-Yang Liu Wen-Liang Xu Run-Dong Wu Ji-Zhou Ma Jie Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 143302 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.143302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.143302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超冷铯分子 $0_u^+(6P_{3/2})$ 长程态的高灵敏光缔合光谱研究

High sensitive photoassociation spectroscopy investigation on $0_u^+(6P_{3/2})$ long-range state of ultracold cesium molecules

物理学报.2015, 64(15): 153303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.153303>

自辐射场下 UN_2 分子的光谱研究

Spectrum of UN_2 under inner radiation fields

物理学报.2015, 64(6): 063301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.063301>

Voigt 线形函数二阶导数研究

Second derivative of Voigt function

物理学报.2014, 63(22): 223301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.223301>

从头计算研究 BP 分子的势能曲线和光谱性质

Ab initio calculation of the potential energy curves and spectroscopic properties of BP molecule

物理学报.2014, 63(7): 073302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.073302>

多参考组态相互作用方法研究 BS^+ 离子的势能曲线和光谱性质

Multi-reference calculations on the potential energy curves and spectroscopic properties of the low-lying excited states of BS^+

物理学报.2013, 62(23): 233302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.233302>

利用双光缔合光谱技术直接测量超冷铯分子 0_u^+ ($6S_{1/2}+6P_{1/2}$) 长程态的转动常数的实验研究*

胡晨阳 刘文良 徐润东 武寄洲 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, 山西大学激光光谱研究所, 物理电子工程学院, 太原 030006)

(2015年2月13日收到; 2015年3月16日收到修改稿)

实验获得了超冷铯分子 $6S_{1/2}+6P_{1/2}$ 离解限下 0_u^+ 长程态振动能级 $v = 187$ 的转动常数. 首先利用调制的荧光光谱技术获得了高分辨的转动量子数 $J = 0-6$ 的超冷铯分子纯转动光谱. 利用双光缔合光谱技术, 构建了高精度的频率参考信号, 进而得到了相邻转动能级间的频率间隔. 最后通过非刚性转子模型拟合得到了转动常数和离心畸变常数.

关键词: 超冷分子, 转动光谱, 转动常数, 双光缔合光谱

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

DOI: 10.7498/aps.64.143302

1 引言

分子无规则的热运动极大地干扰了人们对于分子结构性态的研究, 因此研究纯化分子之前, 首先希望获得运动速度接近于零的分子样品. 以20世纪80年代发展起来的激光冷却和俘获原子技术为起点, 冷分子的研究备受关注并得到了极大的发展. 人们一般将温度在1 K—1 mK的分子定义为冷分子, 而将温度在1 mK以下的分子定义为超冷分子. 研究超冷分子的产生和应用将开辟很多新的研究领域, 如超冷分子碰撞^[1]、超高分辨分子光谱^[2]、分子量子态操控^[3]、超冷化学反应控制和量子信息处理等^[4,5]. 最初的设想是将激光冷却原子技术直接应用于分子, 但由于分子的能级结构复杂, 无法构建闭合循环冷却能级系统, 因此无法利用激光对分子进行有效的直接冷却. 目前, 冷却分子的主要方法有非光学方法和光学方法两种. 实验上一般采用光学间接方法获得超冷分子, 以超冷

原子样品为起点, 通过磁场 Feshbach 共振技术和光缔合技术制备超冷分子, 这两种方法都能获得温度为1 mK以下的分子样品^[6]. 其中, 光缔合技术对原子样品初始温度和密度参数的要求相对较低, 因此作为一种有效的产生超冷分子技术在实验中得到了广泛的应用^[7]. 目前, 人们利用光缔合技术已经制备的超冷分子包括氢、锂、钠、钾、铷、铯、钙等^[8-10], 得到的超冷基态分子样品温度一般在100 μ K左右. 相比于传统热分子, 光缔合技术制备的超冷分子不仅具有更低的温度, 其分子内部相互作用力也更弱, 体现在势能曲线上即为形成的分子多处于近离解区域. 由于 Franck-Condon 原理更适用于接近于离解限振动能级的激发过程^[11], 因此光缔合作为一种新的具有高分辨率的方法可用于来测量较高振动能级的分子光谱. 这些特殊的光谱与传统方法测得的深束缚态光谱结合, 可得到振动常数、转动常数、离心畸变常数及渐近线系数等一系列与分子势能函数有关的量, 并为获得完整的高精准分子势能曲线铺平了道路. 其中, 转动常数及离

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB921603)、长江学者和创新团队发展计划 (批准号: IRT13076)、基金委重大研究计划培育项目 (批准号: 91436108)、国家自然科学基金 (批准号: 61378014, 61308023, 61378015, 11434007, 61275211)、教育部新教师基金 (批准号: 20131401120012)、国家自然科学基金国家基础科学人才培养基金 (批准号: J1103210) 和山西省青年科技研究基金 (批准号: 2013021005-1) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mj@sxu.edu.cn

心畸变常数的获得对于红外光谱、拉曼光谱和高分辨振转光谱的精确测量和标识具有重要意义, 同时还有助于加深对分子结构的认识, 是研究分子振转跃迁的基础. 此外, 利用实验得到的转动常数数据, 可以通过 $B = h/8\pi c\mu r^2$ 直接计算得到分子的平均核间距^[11].

相比于其他的碱金属元素, 铯分子具有相对较低的动能 ($k_B \leq 1 \text{ mk} \simeq 21 \text{ MHz}$), 因此光缔合制备超冷铯分子的实验实现相对较晚^[12]. 法国国家科学中心 Aime Cotton 实验室的 Pillet 小组于 1998 年首次报道了在真空磁光阱中进行的光缔合制备超冷铯分子的实验^[12], 在他们后来的实验中^[6,13], 陆续通过高精度的光缔合光谱完善了长程态 0_u^+ 和 $1_g(6S_{1/2}+6P_{3/2})$ 离解限下 40 cm^{-1} 的分子光谱信息, 并获得了相应振动能级的部分转动常数. 美国康涅狄格州立大学物理系的 Stwalley 小组之后实验报道了超冷铯分子 ($6S_{1/2}+6P_{3/2}$) 和 ($6S_{1/2}+6P_{1/2}$) 离解限下的失谐 51 cm^{-1} 的光谱^[14]. 我们小组在 2009 年将相对于 ($6S_{1/2}+6P_{3/2}$) 离解限下失谐范围扩展至 70 cm^{-1} ^[15], 2013 年报道了 $6S_{1/2}+6P_{1/2}$ 离解限下 0_u^+ 态 $v = 214, 215, 216$ 的振转光谱和转动常数的测量^[16], 同时利用双光缔合光谱技术精密测量了 $6S_{1/2}+6P_{1/2}$ 离解限下纯长程 0_g^- 态四个振动能级的转动常数^[17]. 目前, 测量超冷分子振动能级转动常数的实验主要采用高精度波长计直接测量转动能级的束缚能数据, 然后

获得频率间隔, 进而通过双原子分子转子模型计算得到转动常数. 但是由于近离解区域高振动能级的转动能级间隔非常小 (通常 $< 300 \text{ MHz}$), 这种方法得到准确的转动常数需要依赖波长计的超高精度. 而超高精度的波长计价格昂贵且不易维护. 本文提出了一种双光缔合光谱精确测量超冷分子高振动能级转动常数的方法, 利用两束具有固定频率间隔的激光作为光缔合激光, 扫描获得的超冷分子的双光缔合光谱构造一个准确的频率参考, 无须使用波长计即可得出相邻转动能级的频率间隔, 进而获得一系列转动能级频率间隔, 最后通过非刚性转子模型拟合获得了转动常数.

2 实验装置

超冷铯分子双光缔合光谱测量的实验装置如图 1 所示. 首先在一个石英玻璃真空腔中利用激光冷却原子磁光阱技术制备超冷铯原子, 其中真空腔中气压约为 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$. 冷却激光和再抽运激光分别由两台半导体激光器 (Toptica, DL pro 和 DL 100) 提供, 前者的输出频率通过饱和吸收光谱技术被锁定在铯原子 D2 线基态 $F = 4 - F' = 5$ 的共振频率红失谐约 15 MHz 处, 后者的输出频率同样通过饱和吸收光谱技术被严格锁定在铯原子 D2 线基态 $F = 3 - F' = 4$ 的共振频率处. 冷却激光功率约

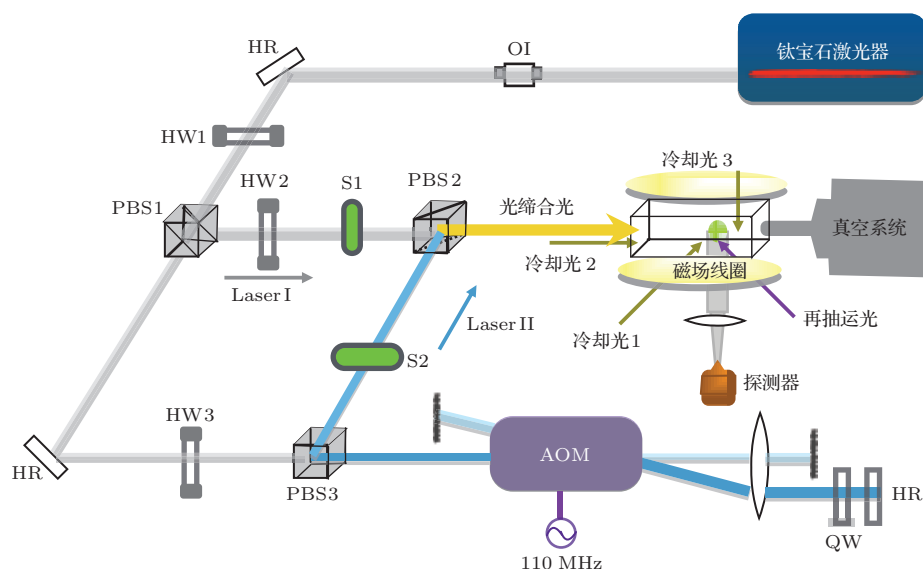


图 1 装置图 OI, 光隔离器; HW, 二分之一波片; PBS, 分光棱镜; HR, 宽带高反射镜; S, 开关; QW, 四分之一波片; AOM, 声光调制器

Fig. 1. Setup. OI, Optical isolate; HW, half wave plate; PBS, polarization beam splitter; HR, high reflect mirror; S, shutter; QW, quarter wave plate; AOM, acousto-optic modulator.

为 36 mW, 被分成相同六束激光后通过光纤传输分别从空间三维的正反共六个方向入射到真空腔中心. 再抽运激光的功率约为 5 mW, 也通过光纤传输后入射到真空腔中心. 一对反亥姆霍兹线圈提供了约为 15 Gauss/cm 的磁场梯度, 用于俘获冷却后的超冷铯原子样品. 最终获得的超冷铯原子样品的温度由飞行时间法测得约为 200 μ K, 原子数约为 5×10^7 个, 原子样品直径约为 800 μ m. 获得的超冷铯原子样品可通过一个黑白 CCD 摄像机 (MinttronMTV-1881EX) 连接到显示器上实时观察.

光缔合是指两个碰撞的超冷原子共振吸收一个光子, 形成一个处于激发态的超冷分子. 由于激发态的分子寿命很短 (~ 30 ns), 经过自发辐射通过两个通道向下跃迁, 其中一个通道为形成一个稳定的基态超冷分子, 另一个通道为形成两个自由态的原子, 如图 2 所示. 无论哪种自发跃迁通道, 都会造成被俘获在磁光阱中超冷原子数目的减少, 因此可以通过观察磁光阱中超冷原子荧光的变化, 获得激发态超冷分子的光缔合光谱. 超冷原子发出的荧光通过 $f = 50$ mm 的透镜聚焦后经过窄带滤波片 (中心波长 850 nm, 带宽 10 nm) 滤掉杂散光, 再经过雪崩光电二极管 (Licel, APD module) 由光信号转换为电信号输出. 传统的荧光光谱技术由于各种杂散光及噪音的存在而导致光谱的信噪比和探测灵敏度较差, 为此我们使用了一种荧光调制光谱技术. 将冷却光激光频率加一个调制信号, 最后收集的调制荧光经过雪崩二极管后输入锁相放大器 (Stanford, SR830) 解调输出, 这样所获得的信号滤掉了杂散光信号并对所得信号进行了放大, 最后获得了比传统方法精度更高的光谱.

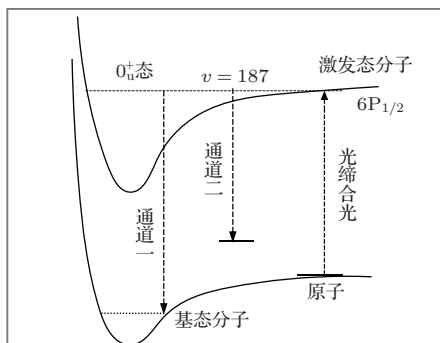


图 2 光缔合制备超冷铯分子能级示意图

Fig. 2. Energy levels diagram of photoassociation for preparing ultracold cesium molecules.

实验中, 我们采用一个由绿光固体激光器 (Verdi 10) 抽运的连续可调谐钛宝石激光器 (Co-

herent, MBR110) 提供光缔合激光, 其最大输出功率约为 1 W, 激光线宽小于 100 kHz. 为了构造精确的频率参考标准以获得超冷分子的转动常数, 我们使用了双光缔合光谱技术. 从钛宝石激光器输出的光缔合激光通过一个偏振分束棱镜 (PBS1) 和一个 1/2 波片 (HW1) 将光束分为两束强度相同的激光. 其中一束 (Laser I) 通过一个 1/2 波片 (HW2) 改变偏振 90° 后穿过偏振分束棱镜 (PBS2) 入射到磁光阱中心. 另一束激光通过一次中心频率为 110.0 MHz 的声光调制器后产生的一级光, 经一个透镜后正入射至一个全反射镜 (HR), 光束因此沿原路径再次通过一次声光调制器, 最后通过分光棱镜 (PBS3) 出射, 这样 Laser II 经过了两次声光调制器后其频率与 Laser I 相比减少 220.0 MHz. Laser II 再次入射分光棱镜 (PBS2), 与 Laser I 重合经透镜聚焦后入射到磁光阱中心. 在两束激光前各加一个激光快门, 即可实现对两束激光的独立快速开断操控.

3 实验结果与分析

图 3 所示为双光缔合两束激光作用时序图, 我们使用了两束光缔合激光 Laser I 和 Laser II, 先打开 S1 让 Laser I 与超冷原子样品作用, 扫描得到超冷铯分子 0_v^+ 态振动能级 $v = 187$ 的全部 $J = 0-6$ 转动能级谱线之后, 迅速关断 S1 同时打开 S2, 让 Laser II 与超冷铯原子样品重新作用, 获得与 Laser I 扫描所得 $J = 6$ 能级谱线完全相同的一段谱线, 记作 $J' = 6$. 两个开关切换的时间小于 5 ms, 远小于超冷原子装载入磁光阱的时间 (~ 10 s), 因此不会造成荧光的明显变化. 由于保证了严格的线性频率扫描, $J = 6$ 和 $J' = 6$ 谱线的能级间隔即为两束激光的频率差 220.0 MHz. 根据这

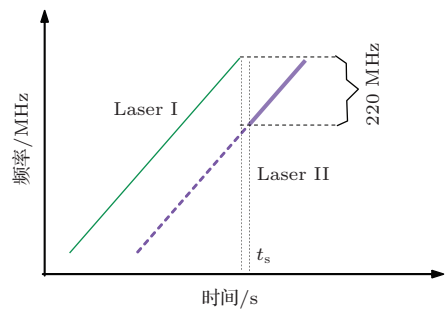


图 3 双光缔合时序图

Fig. 3. Sequence diagram of double-pass photoassociation.

个频率参考标准, 就可按比例得出其他相邻转动能级的频率间隔. 两束激光 Laser I 和 Laser II 的光强必须严格一致, 实验中两束激光的光强为 95.5 W/cm^2 , 这是由于一定功率的激光以两个特定能级间的共振频率扫描时, 会造成共振频率位置的线性红移, 即光致频移现象^[18]. 如果两束激光的功率不同, 将导致红移量的不同, 造成频率间隔与我们标定的 220.0 MHz 相差较大.

图 4 所示为标准光缔合技术与我们所用的双光缔合技术所得高灵敏、高分辨超冷铯分子光缔合光谱的对比图, 其中红色谱线为双光缔合光谱, 蓝色谱线为标准光缔合光谱. 对应于超冷铯分子 $6S_{1/2}+6P_{1/2}$ 离解限下 0_u^+ 长程态振动能级为 $v = 187$ 的纯转动光谱. 我们清楚地观察到了丰富的转动光谱信号, 转动量子数 $J = 0-6$. 这些量子数较大的转动能级是由除 s 波之外的其他高次分波导致的, 如 p 波和 d 波等. 这些转动能级对应的谱线强度从 $J = 0$ 开始逐渐变大, 到 $J = 2$ 变为最大, 之后逐渐变小, 直至 $J = 6$. 这是由于对应于从初始原子基态到长程分子激发态振转能级末态的光缔合的弗兰克-康登跃迁因子发生了变化导致的. 双光缔合光谱较标准光缔合光谱多一个谱线 ($J' = 6$), 即 Laser II 作为光缔合光扫描获得的. 根据前面的描述, 我们可以知道 $J = 6$ 和 $J' = 6$ 两个谱线之间的频率间隔为严格的 220.0 MHz , 以此作为频率参考标准, 即可容易地获得所有的相邻转动能级谱线频率间隔 $\Delta_0-\Delta_5$ 的精确值.

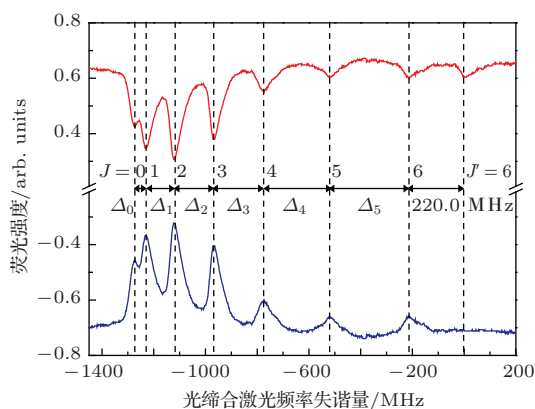


图 4 $6S_{1/2}+6P_{1/2}$ 离解限下 0_u^+ 态 $v = 187$ 的光缔合光谱图

Fig. 4. Photoassociation spectra of $v = 187$ belonging to 0_u^+ state below the $6S_{1/2}+6P_{1/2}$ dissociation limit.

图 5 给出了我们所获得的超冷铯分子长程 0_u^+ ($6S_{1/2}+6P_{1/2}$) 态振动能级 $v = 187$ 相邻转动能级频率间隔 $\Delta_0-\Delta_5$ 的实验数据. 利用分子的转子

模型对数据进行拟合, 即可获得分子的转动常数. 在对数据进行拟合时, 我们考虑到了刚性模型和非刚性模型. 刚性模型表示分子的一种理想状态, 这种状态下分子的构型都相对稳定, 而光缔合形成的超冷铯分子为长程分子, 核间距非常大, 它们之间的相互作用相对比较弱, 不适用刚性模型. 因此, 我们使用非刚性模型进行数据拟合^[19]:

$$E/hc = BJ(J+1) - DJ^2(J+1)^2, \quad (1)$$

其中, E 是转动本征值, h 是普朗克常量, c 是光速, B 是转动常数, D 为离心畸变常数. 对于一定的转动量子数, 我们拟合所用的相邻频率间隔公式如下:

$$\begin{aligned} \Delta v &= [E(J+1) - E(J)]/hc \\ &= 2B(J+1) - 4D(J+1)^3. \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式拟合实验所得转动能级间隔, 可以获得转动常数和离心畸变常数的值, 分别为 $B = 25.22 \text{ MHz} \pm 0.92 \text{ MHz}$ 和 $D = 0.02 \text{ MHz} \pm 0.01 \text{ MHz}$, 其中误差主要来源于系统误差和拟合误差. 文献^[14]中给出的对应超冷铯分子长程 0_u^+ ($6S_{1/2}+6P_{1/2}$) 态振动能级 $v = 187$ 的转动常数为 26.08 MHz , 与我们获得的结果相差 3.3% .

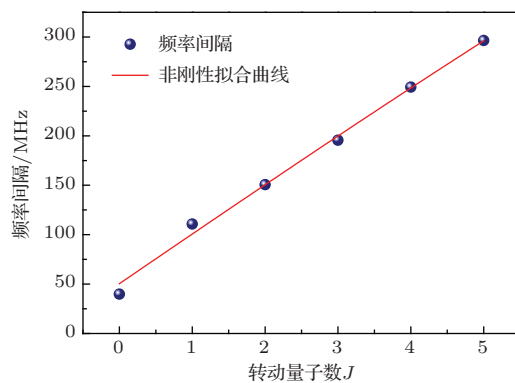


图 5 频率间隔及拟合曲线

Fig. 5. Frequency intervals and fitting curve.

4 结 论

本文利用双光缔合光谱技术获得了超冷铯分子 $6S_{1/2}+6P_{1/2}$ 离解限下长程 0_u^+ 态振动能级 $v = 187$ 的高灵敏、高分辨的纯转动光谱, 并构造了一个 220.0 MHz 的频率参考标准, 可以在不使用波长计的情况下获得出相邻转动能级的频率间隔, 进而通过非刚性转动模型拟合得到了转动常数 25.22 MHz 与离心畸变常数 0.02 MHz . 我们提出

的实验技术不仅可以用来精确测量超冷分子的转动常数,同时可以用于测量光谱线宽和光致频移.

参考文献

- [1] Kajita M 2004 *Phys. Rev. A* **69** 012709
- [2] Jochim S, Bartenstein M, Altmeyer A, Hendl G, Chin C, Hecker Denschlag J, Grimm R 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 240402
- [3] Wynar R, Freeland R S, Han D J, Ryu C, Heinzen D J 2000 *Science* **287** 1016
- [4] Pillet R, Drag C, Tolra B L 2001 *Laser Phys.* **11** 480
- [5] Tsai C, Freeland R, Vogels J, Boesten H 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 1245
- [6] Wang J M 1999 *Ph. D. Dissertation* (Taiyuan: Shanxi University) (in Chinese) [王军民 1999 博士学位论文 (太原: 山西大学)]
- [7] Jones K M, Tiesinga E, Lett P D, Julienne P S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 483
- [8] Jiang K J, Li K, Wang J, Zhan M S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 125 (in Chinese) [江开军, 李可, 王瑾, 詹明生 2006 物理学报 **55** 125]
- [9] 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, 赵延霆, 汪丽蓉, 肖连团, 贾锁堂 2010 物理学报 **59** 5418]
- [10] Zhang W, Huang Y, Xie T, Wang G R, Cong S L 2010 *Phys. Rev. A* **82** 063411
- [11] Fioretti A, Comparat D, Drag C, Amiot C, Dulieu O, Masnou-Secuews F, Pillet P 1999 *Eur. Phys. J. D* **5** 389
- [12] Fioretti A, Comparat D, Drag C, Amiot C, Dulieu O, Masnou-Secuews F, Pillet P 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 4402
- [13] Comparat D, Drag C, Fioretti A, Dulieu O, Pillet P 1999 *J. Mol. Spectrosc.* **195** 229
- [14] Pichler M, Chen H, Stwalley W C 2004 *J. Chem. Phys.* **121** 6779
- [15] Ma J, Wang L R, Zhao Y T, Xiao L T, Jia S 2009 *J. Mol. Spectrosc.* **255** 106
- [16] Chen P, Li Y Q, Zhang Y C, Wu J Z, Ma J, Xiao L T, Jia S 2013 *Chin. Phys. B* **22** 093301
- [17] Ma J, Chen P, Liu W L, Feng G S, Li Y Q, Wu J Z, Xiao L T, Jia S T 2010 *Acta Phys. Sin.* **62** 223301 (in Chinese) [马杰, 陈鹏, 刘文良, 冯国胜, 李玉清, 武寄洲, 肖连团, 贾锁堂 2010 物理学报 **62** 223301]
- [18] Wu J Z, Ma J, Zhang Y C, Li Y Q, Wang L R, Zhao Y T, Chen G, Xiao L T, Jia S T 2011 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **13** 18921
- [19] Bransden B H, Joachain C J 1983 *Physics of Atoms and Molecules* (Essex: Longman Publishing Group)

Direct measurement of the rotational constant of $0_u^+(6S_{1/2}+6P_{1/2})$ long-range state via double-pass spectroscopy*

Hu Chen-Yang Liu Wen-Liang Xu Run-Dong Wu Ji-Zhou Ma Jie[†]

Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

(Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 13 February 2015; revised manuscript received 16 March 2015)

Abstract

In this paper, we obtain the rotational constant and the distortion constant of $v = 187$ belonging to 0_u^+ state below the $6S_{1/2}+6P_{1/2}$ disassociation limit. In our experiment, we first prepare the ultra-cold cesium sample in the MOT (magneto-optical trap) by six beams of pumping laser, one beam of repumping laser, and a pair of anti-Helmholtz coils. Then we construct a high-resolution frequency reference using the double-pass photoassociation technique. The double-pass photoassociation technique is a creative and robust method. We use a polarization beam splitter to split one laser beam from the laser to two beams—Laser I and Laser II; Laser II then passes twice through an acousto-optic modulator (AOM) whose central frequency is 110 MHz, using a reflecting mirror and a convex lens before illuminating the MOT. We use two shutters—S1 and S2 to control Laser I and Laser II. Open S1 while keep S2 close to make Laser I interact with the MOT; and after the rotational spectroscopy of $J = 0-6$ is observed, turn off S1 and turn on S2 immediately. Let laser II interact with MOT and obtain another part of spectroscopy that is exactly the same with $J = 6$; we define this part of spectroscopy as $J' = 6$. The frequency interval between $J = 6$ and $J' = 6$ is exactly 220 MHz for the scan process is strictly linear, and that can be an accurate frequency interval in our experiment. The laser intensities of these two laser beams have to be strictly equal in case of the laser-induced frequency shift. Using the frequency interval of 220 MHz, we can calculate the frequency interval of $J = 0-6$. The detection method we used here is the trap loss spectroscopic technology by modulating fluorescence of cold atoms in the MOT, which allows a direct spectroscopy detection at the rovibrational levels for a very weak transition probability. With the frequency intervals of each rotational quantum number, we can fit the frequency intervals to the non-rigid model to derive the rotation constant B and distortion constant D which are crucial to precisely measure the full molecule potential curves as well as deepen our understanding of molecular formation. This kind of double-pass photoassociation technique not only can direct obtain the precise value of rotation constant B and distortion constant D as compared with the traditional photoassociation method, but also can obtain a relatively accurate potential energy curve. And another great advantage is that we are able to calculate the frequency intervals easily without the wavelength meter which is rather expensive and difficult to control.

Keywords: ultra-cold molecules, rotational spectroscopy, rotational constant, double-pass photoassociation technique

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

DOI: 10.7498/aps.64.143302

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2012CB921603), the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. IRT13076), the Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91436108), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61378014, 61308023, 61378015, 11434007, 61275211), the New Teacher Fund of the Ministry of Education of China (Grant No. 20131401120012), the Fund for Fostering Talents in Basic Science of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. J1103210) and the Natural Science Foundation for Young Scientists of Shanxi Province, China (Grant No. 2013021005-1).

[†] Corresponding author. E-mail: mj@sxu.edu.cn