

# 超冷铯分子 $0_{\text{u}}^{+}(6\text{P}_{3/2})$ 长程态的高灵敏光缔合光谱研究\*

马杰 王晓峰 辛统钰 刘文良 李玉清 武寄洲† 肖连团 贾锁堂

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

(2015年4月18日收到; 2015年5月21日收到修改稿)

利用发展的调制俘获损耗荧光光谱技术实验测量了超冷铯分子 $0_{\text{u}}^{+}(6\text{P}_{3/2})$ 长程态的高灵敏光缔合光谱. 光谱探测范围较国际已有报道扩大了 $60\text{ cm}^{-1}$ , 观察到25个长程区域新的振动能级. 通过LeRoy-Bernstein公式对振动束缚能数据进行拟合, 获得了超冷铯分子 $0_{\text{u}}^{+}(6\text{P}_{3/2})$ 态的长程系数 $C_3$ 为 $16.103 \pm 0.010$ . 构建了超冷铯分子 $0_{\text{u}}^{+}(6\text{P}_{3/2})$ 态长程区域的势能曲线.

**关键词:** 超冷铯分子, 光缔合光谱, 长程系数, 分子势能曲线

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.153303

## 1 引言

以1997年和2001年诺贝尔物理学奖作为标志, 超冷原子物理研究已经取得令人瞩目的巨大成就, 大大地扩展了原子分子物理的研究范畴, 并在超高分辨光谱、精密测量和量子信息处理领域获得了广泛的应用<sup>[1]</sup>. 其中, 以超冷原子为实验起点的超冷分子实验和理论研究在过去的十几年间也受到了极大的关注, 特别是超冷分子的光缔合光谱作为一种新颖的分子光谱技术, 提供了一个独特的机会来获得分子长程甚至纯长程态的光谱信息<sup>[2]</sup>. 同时, 光缔合光谱技术已广泛应用于分子近离解区域的高振动能级束缚能的测量, 突破了传统的分子光谱短程区域的研究局限, 为深刻理解由分子束缚态到原子散射态的过渡区域的物理机理提供了可能性<sup>[3]</sup>. 此外, 光缔合技术还是除磁场 Feshbach 共振技术之外, 能够产生超冷分子的最有效的工具, 已经在碱金属元素和碱土金属元素制备超冷分子实验中被广泛采用<sup>[4]</sup>.

超冷铯原子的光缔合过程是: 处于基态( $6\text{S}_{1/2}$ )的超冷铯原子对, 碰撞过程中共振吸收一个频率为 $\nu_1$ 的光子, 形成一个激发态长程分子( $6\text{S}_{1/2} + 6\text{P}_{3/2}$ ). 这一过程可用下式表示:

$$2\text{Cs}(6\text{s}, f=4) + h\nu_1 \rightarrow \text{Cs}_2(\Omega_{u,g}(6\text{s} + 6\text{p}_{1/2,3/2}; \nu, J)). \quad (1)$$

式中,  $\Omega_{u,g}$  采用洪特规则 C, 这是由于两个相互作用的超冷铯原子碰撞距离在 $60\text{--}80 a_0$  ( $a_0$  为玻尔半径), 比起两个原子平衡态的距离 ( $\sim 15a_0$ ) 要大得多, 因此原子间的相互作用十分小, 对于这种远距离碰撞作用的角动量耦合属于洪特规则 C. 在该规则下, 利用光缔合共振激发可以获得布居于 $6\text{S}_{1/2} + 6\text{P}_{1/2}$  离解限下三个吸引势的长程态 ( $0_{\text{u}}^{+}$ ,  $0_{\text{g}}^{-}$ ,  $1_{\text{g}}$ ) 和 $6\text{S}_{1/2} + 6\text{P}_{3/2}$  离解限下四个吸引势的长程态 ( $0_{\text{u}}^{+}$ ,  $0_{\text{g}}^{-}$ ,  $1_{\text{u}}$ ,  $1_{\text{g}}$ ) 的超冷铯分子. 这里需要指出的是, 在 $6\text{S}_{1/2} + 6\text{P}_{3/2}$  离解限下,  $1_{\text{u}}$  和  $0_{\text{g}}^{-}$  长程激发态具有特殊的双阱结构, 可以通过自发辐射转移到 $a^3\Sigma_{\text{u}}^{+}$  基三重态以及 $X^1\Sigma_{\text{g}}^{+}$  基单重态. 考虑到隧穿效应的影响, 在光缔合制备基态超冷铯分

\* 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) 和国家自然科学基金国家基础科学人才培养基金 (批准号: J1103210) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wujz@sxu.edu.cn

子过程中这两个态作为关键中间态, 已经开展了很多实验和理论的细节研究<sup>[5-7]</sup>.  $0_u^+$  和  $1_g$  长程态与传统的分子光谱获得短程态部分可以衔接, 做联合分析, 对于获得精确的分子结构常数和高精准分子势能曲线具有重要意义, 因此也受到越来越多的关注. 1998年Pillet小组首次通过光缔合技术实验制备了超冷铯分子<sup>[8]</sup>, 利用离子光谱技术获得了 $1_u$  和  $0_g^-$  纯长程态光谱数据, 并且通过俘获损耗荧光光谱技术获得了 $0_u^+$  和  $1_g$  长程态在 $6S_{1/2}+6P_{3/2}$  离解限下 $-40\text{ cm}^{-1}$  的光谱数据<sup>[9]</sup>. 2004年Pichler等使用俘获损耗荧光光谱技术也获得了 $0_u^+$  和  $1_g$  长程态在 $6S_{1/2}+6P_{3/2}$  离解限下 $-52\text{ cm}^{-1}$  的振动光谱<sup>[10]</sup>. 2009年我们采用直接调制的荧光光谱技术将光谱测量范围拓展到 $-70\text{ cm}^{-1}$ , 并且获得了近离解区域的相关超冷铯分子光谱数据, 但是 $-50\text{ cm}^{-1}$ — $-70\text{ cm}^{-1}$  部分的光谱灵敏度很低<sup>[11]</sup>. 2014年我们采用联合分析的方法理论研究了超冷铯分子 $6S_{1/2}+6P_{3/2}$  和  $6S_{1/2}+6P_{3/2}$  离解限下各长程态的分子结构常数<sup>[12]</sup>, 并利用双缔合光谱技术直接获得了高振动态的转动常数.

目前, 国际上超冷铯分子光缔合光谱相关的实验和理论研究, 主要集中在建立更为精确的分子结构常数的理论模型和构建高精准势能曲线方面<sup>[13]</sup>. 然而这些前沿研究工作的基础始终离不开高灵敏高分辨的光谱测量, 获得更多的实验光谱数据将为优化理论模型并最终获得高精准势能曲线铺平道路<sup>[14-16]</sup>. 影响继续拓展光缔合光谱测量范围的主要原因是超冷原子基态到激发态跃迁的Franck-Condon因子很小<sup>[9]</sup>. 在本文中, 我们采用高灵敏的调制俘获损耗荧光光谱技术, 将超冷铯分子在 $6S_{1/2}+6P_{3/2}$  离解限下光缔合光谱测量范围拓展至 $-112\text{ cm}^{-1}$ , 观察到25个 $0_u^+$  长程态的振动能级光谱数据, 并且结合前期已经获得的振动能级束缚能数据确定了它们对应的振动量子数, 利用LeRoy-Bernstein理论拟合获得了超冷铯分子 $0_u^+$  ( $6P_{3/2}$ ) 长程态的分子长程系数 $C_3$ , 并构建了长程区域的分子势能曲线.

## 2 实验装置

实验装置如图1所示. 利用激光冷却中性原子技术, 在一个背景气压约为 $10^{-7}\text{ Pa}$  的石英真空腔中, 通过标准的蒸汽装载的磁光阱系统(MOT)获得了超冷铯原子样品<sup>[15]</sup>. 通过飞行时间方法测得超冷铯原子样品温度约为 $200\text{ }\mu\text{K}$ , 通过共振吸

收光谱方法测得样品的原子数约为 $5 \times 10^7$ , 其直径约为 $800\text{ }\mu\text{m}$ , 峰值密度约为 $10^{11}\text{ cm}^{-3}$ . 为简便起见, 图1中略去了俘获激光和再抽运激光的光路, 实验细节可参考文献<sup>[11]</sup>中的论述. 俘获激光和再抽运激光分别由两台半导体激光器(Toptica, DL100, 输出线宽 $0.8\text{ MHz}$ )提供, 通过饱和和吸收光谱稳频技术将激光的频率分别锁定在铯原子 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$  共振频率负失谐 $10\text{ MHz}$  和  $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=4)$  共振跃迁位置.

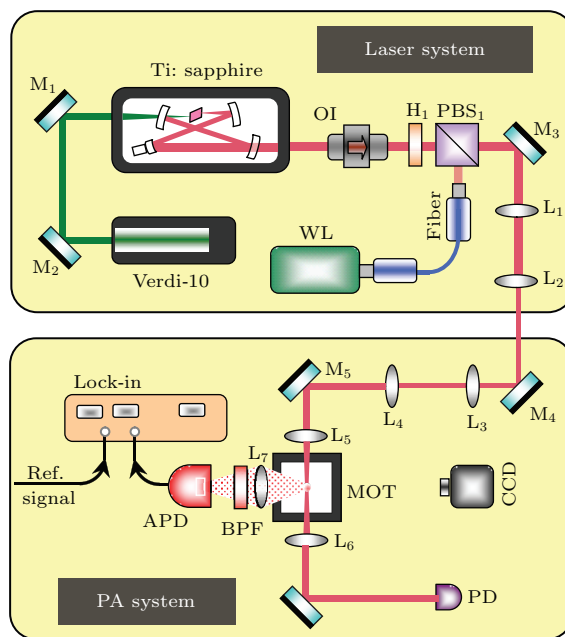


图1 (网刊彩色) 实验装置 Ti: sapphire: 钛宝石激光器; Verdi-10: 抽运激光器; OI: 光隔离器; WL: 高精度波长计; Fiber: 单模光纤; M: 宽带高反射镜; PBS: 偏振分束棱镜; H: 二分之一波片; L: 透镜; BPF: 带通滤光片; MOT: 磁光阱系统; APD: 雪崩光电二极管探测器; PD: 光电二极管探测器; Lock-in: 锁相放大器; CCD: 电荷耦合器件(红外监视器)

Fig. 1. (color online) Experimental setup Ti: sapphire: Ti: sapphire laser; Verdi-10: pump laser; OI: Optical isolator; WL: wavelength meter; Fiber: optical fiber; M: high reflect mirror; PBS: polarization beam splitter; H: half wave plate; L: lens; BPF: band pass filter; MOT: magneto-optical trap; APD: avalanche photodiode; PD: photodiode; Lock-in: lock-in amplifier; CCD: charge-coupled device (infrared monitor).

光缔合激光由连续可调谐钛宝石激光器系统(Ti: sapphire Laser, MBR110, 输出线宽小于 $0.1\text{ MHz}$ )提供, 最大输出功率约为 $1.0\text{ W}$ , 抽运源由一台大功率抽运激光器(Verdi-10)提供, 抽运功率约为 $9.5\text{ W}$ . 通过一台超高精度波长计(HighFinesse-Angstrom, WS/7S, 绝对精度

60 MHz, 相对精度 3 MHz) 监视和记录光缔合激光的输出频率. 波长计在使用前通过频率高稳定的氦氖激光器的输出光进行校准, 每小时校准一次. 光缔合激光通过两组凸透镜组分别在激光系统和光缔合系统中进行光斑缩束和扩束操作, 确保在自由空间传播过程中为平行光束, 并且在 MOT 中聚焦到合适的腰斑直径 (~1 mm). 调谐光缔合激光频率与原子-分子跃迁频率共振时, 即可形成超冷分子, 同时 MOT 中的超冷原子数目出现减少. 扫描光缔合激光输出频率, 同时监视超冷原子团发出的荧光的变化, 可以获得超冷分子激发态光谱, 即俘获损耗荧光光谱技术. 在我们的实验中, 超冷原子样品荧光首先通过直径 2 英寸的聚焦透镜 ( $f = 50$  mm) 收集, 再经过窄带带通滤波片 (中心波长 850 nm, 带宽 10 nm) 滤掉空间杂散光, 最后被高灵敏的雪崩光电二极管探测器 (Licel APD module) 探测并转换成电信号.

由于 MOT 装载时间较长 (~10 s), 为了获得高分辨的分子光谱, 光缔合激光的频率扫描速率相应要求较慢 (~30 MHz/s), 导致直接的荧光光谱受低频噪声影响很大, 通常表现出信噪比差、探测灵敏度低等缺点. 为了获得高分辨的超冷铯分子长程态振动光谱, 我们在实验中发展了一种高灵敏的调制俘获损耗荧光光谱技术. 我们考虑超冷铯原子的荧光辐射率  $R$  [14,15] 为

$$R = \frac{b\omega_t^2(\Gamma_a/2)}{2\pi \left[ (\Gamma_a + \Gamma_l)^2 + \frac{4\Delta_l^2}{\Gamma_a + \Gamma_l} + \frac{b\omega_t^2}{2\pi^2\Gamma_a} \right]} N, \quad (2)$$

其中,  $\omega_t$  是六束俘获光总光强的拉比频率,  $\Gamma_a$  是激发态原子的自然线宽,  $\nu_l$  是俘获光的中心频率,  $\Delta_l = \nu_0 - \nu_l$  为俘获光的频率失谐量 ( $\nu_0$  是原子共振跃迁频率),  $\Gamma_l$  是俘获光线宽,  $N$  为冷原子平衡态的数目. 可见当俘获激光光强、线宽和磁光阱其他参数一定时, 荧光辐射率  $R$  是俘获激光频率失谐量  $\Delta_l$  的函数. 由于超冷原子荧光是在原子与俘获激光作用过程中产生的, 因此通过调制俘获激光频率可以实现对超冷原子荧光光强的快速调制, 实验中我们将信号发生器输出的正弦信号加入俘获激光器的电流调制输入端, 然后利用锁相放大器 (SR830) 对探测到的荧光信号进行直接解调. 调制频率的选择可以通过冷原子荧光的噪声功率谱作为参考, 噪声在低频处较大, 主要由  $1/f$  噪声引起. 而在高频部分 (>2 kHz), 冷原子荧光的噪声较小. 通过解调被调制的荧光信号, 我们比较了俘获损耗光谱信号的 1—3 次谐波信号, 发现信号的信噪比

随谐波次级的减小而增加 [11]. 因此实验中我们选择调制频率为 3 kHz, 同时采用一次谐波解调信号. 解调后的荧光信号信噪比大幅提升 (~20 倍), 探测灵敏度也获得了显著的提高. 实际操作中, 该调制信号同时被用于饱和吸收光谱技术锁定俘获激光的调制频率.

### 3 实验结果与分析

超冷原子光缔合制备超冷分子的构想, 最早由 Thorsheim 等在 20 世纪 80 年代提出 [17], 之后在激光冷却中性原子技术成熟后被迅速实现. 当一对碰撞的超冷原子对和光场相互作用时, 如果光缔合激光频率恰好接近原子散射态与分子束缚态的共振频率, 这时超冷原子对就会吸收一个光子, 形成一个弱束缚的激发态超冷分子 [13]. 当超冷原子在长程区域内光缔合为激发态的超冷分子时, 由于 MOT 中超冷分子的形成导致超冷原子数的减少, 超冷原子的荧光会相应地减弱, 因此可以通过监测超冷原子荧光强度随光缔合光频率的变化关系, 获取超冷分子激发态振动光谱 [9]. 图 2 为超冷铯分子  $6S_{1/2} + 6P_{3/2}$  离解限 (对应波数 ~11732.176  $\text{cm}^{-1}$ ) 下光缔合激光频率红失谐时观测到激发态超冷铯分子的俘获损耗荧光光谱. 实验中使用的光缔合激光功率密度 ~280  $\text{W}/\text{cm}^2$ . 钛宝石激光器最大单次线性扫描频率为 20 GHz, 频率扫描速率约为 30 MHz/s. 由于之前的文献 [10] 中已经对  $-52 \text{ cm}^{-1}$  以上的光缔合光谱进行了较为详细的研究, 而我们研究小组之前报道的  $-52 \text{ cm}^{-1}$ — $-70 \text{ cm}^{-1}$  光谱的信噪比非常低 (~2.0), 因此我们在图 2 中给出了  $-52 \text{ cm}^{-1}$ — $-112 \text{ cm}^{-1}$  范围的高灵敏俘获损耗荧光光谱.

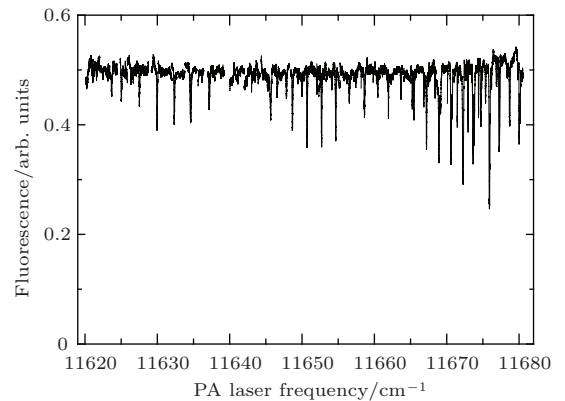


图 2 超冷铯分子  $0_u^+(6P_{3/2})$  长程态部分振动光谱  
Fig. 2. Part of vibrational spectra in  $0_u^+(6P_{3/2})$  long range state of ultracold Cesium molecules.

根据我们获得的超冷铯分子俘获损耗荧光光谱, 可以发现光谱信号的强度随着频率变化出现明显起伏变化, 这主要是由于原子基态与长程分子激发态之间的 Franck-Condon 因子随振动量子数出现非周期振荡导致<sup>[9]</sup>. 当红失谐达到  $-112 \text{ cm}^{-1}$  之后, Franck-Condon 因子变得很小, 共振跃迁的概率也随之减小, 因此光谱信号强度变的很小, 且信噪比也明显下降. 光谱中能级间距随光缔合激光频率相对于离解限失谐增大而逐渐增大. 红失谐较小时振动能级密布, 且各长程态能级互相叠合, 甚至有些共振峰被重叠; 而红失谐较大时则能级间距很大, 可以清楚分辨.

根据图 2 中给出的超冷铯分子俘获损耗荧光光谱, 结合国内外相关的前期研究结果, 可以判断出观察到光谱信号主要为三个长程电子态:  $0_g^-$ ,  $0_u^+$  和  $1_g$  态. 其中  $0_u^+$  态由于 Franck-Condon 因子最大, 判断相对容易, 且可观察的振动能级光谱线最多, 本文着重关注  $0_u^+$  态的测量和分析;  $1_g$  态的 Franck-Condon 因子相比  $0_u^+$  态约小 1/3, 且振动常数与  $0_u^+$  态接近, 表现出伴随  $0_u^+$  态出现;  $0_g^-$  态由于阱深约为  $-80 \text{ cm}^{-1}$ , Franck-Condon 因子较小, 只出现在  $11680-11655 \text{ cm}^{-1}$  范围内, 且信号信噪比较差, 难以准确分辨.

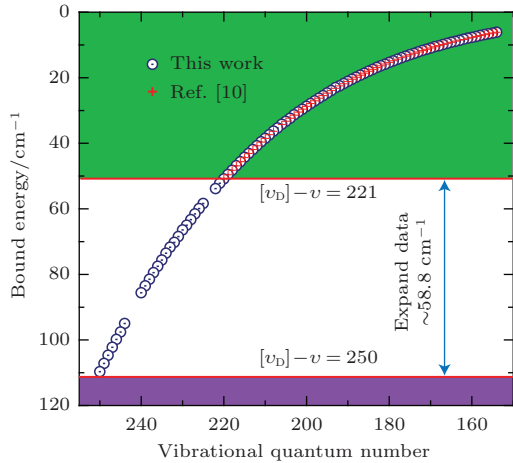


图 3 (网刊彩色) 超冷铯分子  $0_u^+$  长程态束缚能与振动量子数关系

Fig. 3. (color online) Dependence of binding energies on vibrational quantum number for  $0_u^+$  state in  $\text{Cs}_2$ .

如图 3 所示为超冷铯分子  $0_u^+$  长程态束缚能与振动量子数的关系图, 其中上半部分绿色区域为已经被报道的光谱范围<sup>[10]</sup>, 振动量子数为  $[v_D] - v = 154-220$ . 图中蓝色圆点所示为我们实验中的束缚能结果, 红色十字所示为参考文献<sup>[10]</sup>中报道的实验结果. 可以清楚地发现, 在上述

光谱范围内, 我们与参考文献<sup>[10]</sup>中的结果符合的很好. 图中最下面的紫色区域为尚未获得有效光谱信息的区域, 振动量子数为  $[v_D] - v > 250$ , 其原因主要在于对应 Franck-Condon 因子变得很小, 受光谱技术的探测灵敏度所限难以分辨. 图 3 中白色区域对应图 2 中拓展的光谱测量的范围, 振动量子数为  $[v_D] - v = 220-250$ , 观察到的振动能级光谱线数为 25, 其中  $[v_D] - v = 225-226$  和  $[v_D] - v = 243-225$  共 5 条光谱线由于跃迁概率较小和谱线交叉干扰, 导致无法确定. 表 1 中列出了获得的扩展光谱区域的所有 25 个振动量子数的束缚能 ( $\epsilon_\nu$ ) 数据, 束缚能单位为  $\text{cm}^{-1}$ .

在我们的实验中,  $0_u^+$  长程态超冷铯分子是由一个  $6S_{1/2}$  基态的铯原子和一个  $6P_{3/2}$  铯原子组成的, 长程区域的分子势能曲线可以近似表示为  $C_3/R^3$ , 其中  $R$  是分子核间距,  $C_3$  是分子长程系数<sup>[9-11]</sup>.

表 1 超冷铯分子长程  $0_u^+$  态束缚能数据  
Table 1. Binding energies for ultracold Cesium molecules  $0_u^+$  state.

$[v_D] - v$	$\epsilon_\nu/\text{cm}^{-1}$	$[v_D] - v$	$\epsilon_\nu/\text{cm}^{-1}$
221	52.2045	236	77.5197
222	53.8455	237	79.4728
223	58.3791	238	81.4985
224	59.9087	239	83.4959
227	61.5426	240	85.5942
228	63.3074	241	94.9840
229	65.0099	242	97.5685
230	66.4308	246	99.8257
231	68.4722	247	102.2253
232	70.2267	248	104.6712
233	71.7131	249	107.1633
234	73.5450	250	109.7017
235	75.6151		

根据实验获得的振动态束缚能数据, 通过一定的理论模型推导出精确的分子长程系数  $C_3$  值, 就可以描绘出分子长程势能曲线. 这里, 我们采用被广泛使用的 LeRoy-Bernstein 公式来拟合获得分子长程系数  $C_3$ <sup>[18]</sup>:

$$\epsilon_\nu^{1/6} = \frac{\hbar\Gamma(4/3)}{\sqrt{8\pi\mu}\Gamma(5/6)} \frac{([v_D] - v)}{C_3^{1/3}}, \quad (3)$$

其中,  $\varepsilon_v$  是某一振动能级  $v$  的束缚能,  $\Gamma$  是伽玛函数 (Gamma function),  $h$  是普朗克常量,  $\mu$  是铯分子的约化质量,  $[v_D]$  是离解限处的非整量子数. 将表 1 中给出的  $[v_D] - v$  和  $\varepsilon_v$  对应值代入上述的 LeRoy-Bernstein 公式, 即可计算出分子长程系数  $C_3$  值. 图 4 是我们利用数学软件拟合获得的超冷铯分子长程  $0_u^+$  态的  $C_3$  值,  $\varepsilon_v^{1/6}$  和  $[v_D] - v$  的拟合线性度很好. 在图 4 中标记的 A 和 B 两个区域, 数据点与拟合曲线差距较大, 考虑到对应光谱位置, 可以发现此处 Franck-Condon 因子较小, 且与  $1_g$  长程态谱线交叉重叠, 因此这两个区域的光谱数据误差较大. 我们拟合获得的  $0_u^+$  态的  $C_3$  值为  $16.103 \pm 0.010$ , 其中误差主要来源于实验误差和拟合误差. 运算处理过程中,  $\varepsilon_v$  单位为波数 ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $C_3$  的单位为原子单位 (Atomic units). 实验中扩展的光谱区域 ( $-52 \text{ cm}^{-1}$ — $-112 \text{ cm}^{-1}$ ) 数据在  $C_3$  系数拟合中表现出与已经报道的光谱数据相同的线性趋势.

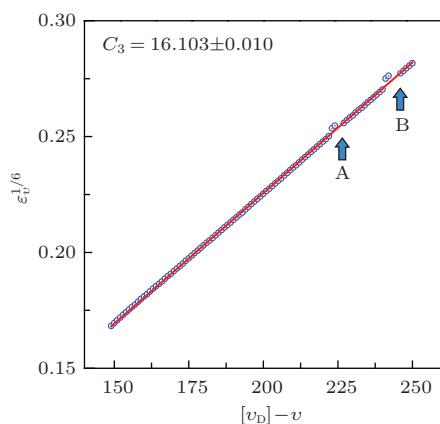


图 4 (网刊彩色) 超冷铯分子  $0_u^+$  长程态分子长程系数  $C_3$  拟合曲线

Fig. 4. (color online) Fitting curve of long range parameter  $C_3$  for  $0_u^+$  state in ultracold Cesium molecules.

为了与其他实验小组获得的超冷铯分子长程  $0_u^+$  态  $C_3$  值以及理论值相比较, 我们将这些结果列于表 2 中.

我们的结果与其他三个实验结果, 都与 Marinescu 和 Dalgarno 在 1995 发表的理论预测值<sup>[19]</sup> 非常接近, 其中, 我们的结果与理论值相差仅 1.88%, 与其他三个实验结果分别相差 0.38%, 3.12% 和 0.02%. 根据采用的光谱数据范围比较, 分别比其他三个实验扩展了 60%, 115% 和 180%, 因而  $0_u^+$  长程态的低振动能级束缚能数据的增加, 有助于获得更加准确的分子长程系数和势能曲线.

利用  $C_3$  值, 通过  $V(R) = -C_3/R^3$  公式, 我们可以容易地获得超冷铯分子  $0_u^+$  长程态的长程区

域分子势能曲线, 如图 5 中蓝色曲线所示. 我们用红色虚线标出一些光谱测量拓展部分的上限  $[v_D] - v = 221$  和下限  $[v_D] - v = 250$ . 拓展部分观察到的振动能级对应的核间距在  $R = 30a_0$ — $40a_0$  之间, 仍然属于分子长程区域.

表 2 超冷铯分子  $0_u^+$  态长程系数  $C_3$  值比较  
Table 2. Comparison of long range parameters  $C_3$  for  $0_u^+$  state of ultracold Cesium molecules.

	Year	Spectral range	$C_3$
This Work	2015	$-112 \text{ cm}^{-1}$	16.103(10)
Experimental <sup>[11]</sup>	2009	$-70 \text{ cm}^{-1}$	16.164(12)
Experimental <sup>[10]</sup>	2004	$-52 \text{ cm}^{-1}$	16.606(32)
Experimental <sup>[9]</sup>	1999	$-40 \text{ cm}^{-1}$	16.1(4)
Theoretical <sup>[18]</sup>	1995	—	16.22

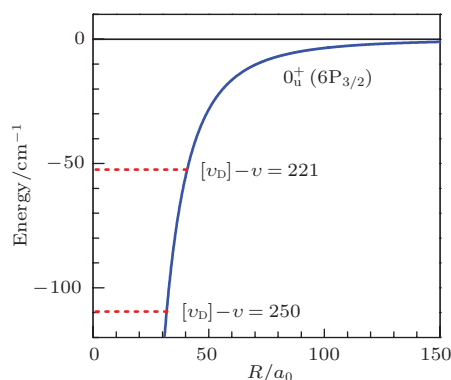


图 5 (网刊彩色) 超冷铯分子  $0_u^+$  长程态的长程区域势能曲线

Fig. 5. (color online) Long range potential curve for the  $0_u^+$  state of ultracold Cesium molecules.

## 4 结 论

在本文中, 我们针对俘获损耗荧光光谱探测灵敏度低的问题, 分析了低频噪声是影响该技术在超冷分子光缔合光谱中应用的主要因素, 通过发展调制俘获损耗荧光光谱技术, 可以有效地抑制低频噪声对光谱灵敏度的影响. 我们实验测量了超冷铯分子  $0_u^+$  ( $6P_{3/2}$ ) 长程态的高灵敏光缔合光谱. 在国际上报道的光谱探测范围约为  $-52 \text{ cm}^{-1}$  的基础上, 我们的光谱探测范围扩大到  $-112 \text{ cm}^{-1}$ , 实验观察到  $0_u^+$  ( $6P_{3/2}$ ) 长程态 25 个新的振动能级. 通过 LeRoy-Bernstein 公式对振动束缚能数据进行拟合, 获得了超冷铯分子  $0_u^+$  ( $6P_{3/2}$ ) 态的长程系数  $C_3$  为  $16.103 \pm 0.010$ , 并且构建了超冷铯分子  $0_u^+$  ( $6P_{3/2}$ ) 态长程区域的势能曲线. 我们的结果对于研究超冷

铯分子 $0_u^+(6P_{3/2})$ 长程态的分子结构和进一步了解分子束束缚态-原子散射态过渡区域的物理机理具有重要价值.

感谢低维量子物理国家重点实验室、清华大学物理系戴星灿教授的有益讨论. 感谢山西大学激光光谱研究所先进激光光谱开放实验室的有力支持.

## 参考文献

- [1] Phillips W D 1998 *Rev. Mod. Phys.* **70** 721
- [2] Carr L D, DeMille D, Kreams R V, Ye J 2009 *New J. Phys.* **11** 055049
- [3] Kemmann M, Mistrik I, Nussmann S, Helm H, Williams C J, Julienne P S 2004 *Phys. Rev. A* **69** 022715
- [4] Jones K M, Tiesinga E, Lett P D, Julienne P S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 483
- [5] Amiot C, Dulieu O, Gutterres R F, Masnou-Seeuws F 2002 *Phys. Rev. A* **66** 052506
- [6] Zhang Y, Ma J, Wu J, Wang L, Xiao L, Jia S 2013 *Phys. Rev. A* **87** 030503
- [7] Comparat D, Drag C, Tolra B L, Fioretti A, Pillet P, Crubellier A, Dulieu O, Masnou-Seeuws F 2000 *Eur. Phys. J. D* **11** 59
- [8] Fioretti A, Comparat D, Crubellier A, Dulieu O, Masnou-Seeuws F, Pillet P 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 4402
- [9] Fioretti A, Comparat D, Drag C, Amiot C, Dulieu O, Masnou-Seeuws F, Pillet P 1999 *Eur. Phys. J. D* **5** 389
- [10] Pichler M, Chen H M, Stwalley W C 2004 *J. Chem. Phys.* **121** 6779
- [11] Ma J, Wang L R, Zhao Y T, Xiao L T, Jia S T 2009 *J. Mol. Spectrosc.* **255** 106
- [12] Ma J, Liu W, Yang J, Wu J, Sun W, Ivanov V, Skublov A S, Sovkov V, Dai X, Jia S 2014 *J. Chem. Phys.* **141** 244310
- [13] Jones K M, Iesinga E, Lett P D, Julienne P S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 483
- [14] 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]
- [15] 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]
- [16] Ma J, Chen P, Liu W L, Feng G S, Li Y Q, Wu J Z, Xiao L T, Jia S T 2013 *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 2013 物理学报 **62** 223301]
- [17] Thorsheim H R, Weiner J, Julienne P S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2420
- [18] Comparat D 2004 *J. Chem. Phys.* **120** 1318
- [19] Marinescu M, Dalgarno A 1995 *Phys. Rev. A* **52** 311

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

Ma Jie Wang Xiao-Feng Xin Tong-Yu Liu Wen-Liang Li Yu-Qing Wu Ji-Zhou<sup>†</sup>  
Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

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

( Received 18 April 2015; revised manuscript received 21 May 2015 )

## Abstract

Photoassociation spectroscopy with high resolution for  $0_u^+$  ( $6P_{3/2}$ ) long-range state of ultracold cesium molecules has been measured experimentally using the modulated trap loss fluorescence spectroscopy technology. The spectral range has been extended over  $60\text{ cm}^{-1}$  below the  $6S_{1/2} + 6P_{3/2}$  dissociation limit as compared with other groups. twenty-five new observations of the  $\text{Cs}_2\ 0_u^+$  in long-range state are reported. The vibrational binding energies of these states are analyzed by using the LeRoy–Bernstein formula. The long-range parameter  $C_3$  in molecular  $0_u^+$  ( $6P_{3/2}$ ) state is derived for  $16.103 \pm 0.010$ , and the corresponding molecular potential curve is depicted.

**Keywords:** ultracold cesium molecules, photoassociation spectroscopy, long-range parameter, molecular potential curve

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.153303

---

\* 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) and the Fund for Fostering Talents in Basic Science of the National Natural Science Foundation of China(Grant No. J1103210).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [wujz@sxu.edu.cn](mailto:wujz@sxu.edu.cn)