

超冷原子向异核四聚物分子 A_3B 的绝热转化*李冠强^{1)†} 彭婷¹⁾ 曹振洲²⁾ 薛具奎³⁾

1) (陕西科技大学理学院, 西安 710021)

2) (中南民族大学电子信息工程学院, 武汉 430074)

3) (西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

(2011年6月25日收到; 2011年9月13日收到修改稿)

提出了利用 Efimov 共振辅助的受激拉曼绝热通道 (ER-STIRAP) 过程实施超冷原子向异核四聚物分子 A_3B 转化的理论方案, 得到了转化过程中中间态分别为同核 Efimov 三聚物 A_3 和异核 Efimov 三聚物 A_2B 两种途径下系统的暗态解, 证实了 ER-STIRAP 技术对超冷异核四聚物分子 A_3B 合成的可行性和有效性. 研究了外场参数, 包括缔合光脉冲的强度、脉宽、磁耦合强度及其失谐量等对 A_3B 形成的影响. 对两种不同中间态的转化途径进行比较发现, 与中间态为异核 Efimov 三聚物 A_2B 的途径相比, 经历中间态为同核 Efimov 三聚物 A_3 的途径时系统实现最终四聚物分子 A_3B 的产率更高. 另外, 还讨论了系统内禀的非线性和中间态的自发辐射损失对异核四聚物分子合成的影响.

关键词: 异核四聚物分子, 受激拉曼绝热通道, 绝热保真度, 转化效率

PACS: 03.75.-b, 37.90.+j, 67.85.De

1 引言

近年来, 超冷分子的合成及其相关研究引起了人们极大的研究兴趣^[1-3]. 一方面是由于超冷分子系统为研究超低温下量子多体系统相互作用的基本规律提供了新的可能, 另一方面是该系统的研究对于开发精密测量, 量子信息处理以及纳米微制造等领域的新技术具有重要意义. 十多年来, 伴随着冷却原子技术的不断发展, 人们也一直在探索对分子的有效冷却^[4-6]. 形成的技术大体可分为直接的方法和间接的方法两类. 冷却分子的直接方法有缓冲气体冷却和 Stark 减速等, 而间接的方法是通过超冷原子的相互作用, 采用外场干预, 使超冷原子转化为超冷分子. 这种间接的方法近来被证明在超冷分子的合成中非常有效^[4]. 通过光学缔合或磁场的 Feshbach 共振技术进行超冷分子的组装已经成为了新的研究热点. 对磁缔合而言, Feshbach 共振技术已经在合成极性和非极性分子方面具有了优

势^[5,6]. 在光缔合方面, 起源于量子光学中对原子内态进行相干控制的双光子受激拉曼绝热通道技术 (STIRAP), 被认为是把超冷原子转化为超冷分子的一种有效手段^[7-10]. 该技术的成功依赖于相干布居俘获态 (也称暗态) 的存在. 系统在绝热演化过程中暗态的粒子布居数几乎为零, 抑制了激发态上自发辐射损失带来的影响, 从而可以高效地实现初始原子态向稳定分子束缚态的转化. 另外, 最近的研究也证明, Feshbach 共振辅助的受激拉曼绝热通道 (FR-STIRAP) 过程在把超冷原子转化成分子的过程中比纯 STIRAP 过程更加有效^[11,12]. 该方法把外部激光场和磁场结合起来, 有望在双原子分子以及更为复杂的多原子分子的合成方面发挥重要作用^[13-16].

实验上, 继利用磁场的 Feshbach 共振技术产生同核和异核双原子分子之后, 通过外部磁场可以把超冷原子直接缔合成弱束缚的三聚物分子的技术也已经形成^[17-22]. 该技术与 1970 年 Efimov 预

* 国家自然科学基金 (批准号: 10774120, 10975114), 中南民族大学中央高校基本科研业务专项基金 (批准号: CZQ11001) 和陕西科技大学自然科学基金 (批准号: ZX11-33) 资助的课题.

† E-mail: liguanqiang@sust.edu.cn.

测的三体共振相互作用的奇特性质有关,因而也被称为 Efimov 共振技术. 一般情况下,两个微观粒子(例如中性原子或中子等)之间只存在微弱的相互作用,当有第三个粒子加入时,则在一定的条件下就会产生一种强相互作用,并可形成多种构形的三聚物束缚态^[23,24]. 这种 Efimov 三聚物态存在于两体束缚态并不存在的区域,并且形成一个无穷序列. 同核 Efimov 三聚物分子的存在性分别在 ¹³³Cs 原子气体^[17,18], ⁶Li 的三组分费米气体^[19,20]以及 ³⁹K 的玻色气体中被证实^[21]. 异核 Efimov 三聚物分子 Rb₂K 和 K₂Rb 存在的迹象也已经在 ⁴¹K 和 ⁸⁷Rb 混合气体中被观察到^[22]. Efimov 态独有的分子构型不依赖原子的种类,所以它可以用对所有原子都普适的方法合成,再作为中间态被转化到其他特定的分子态上,这实际上提供了一种控制超冷分子合成的重要手段.

最近,利用 Efimov 共振辅助的受激拉曼绝热暗通道(ER-STIRAP)技术来合成超冷同核四聚物分子 A₄ 的理论方案已经被提出^[16]. 结合关于异核 Efimov 三聚物 Rb₂K 和 K₂Rb 的实验,本文提出采用 ER-STIRAP 过程来合成超冷异核四聚物分子 A₃B 的设想. 在下文中,首先给出实施该过程的理论模型. 对经历中间态为同核 Efimov 三聚物 A₃ 和中间态为异核 Efimov 三聚物 A₂B 的两种途径,分别推导出了原子分子转化系统的暗态解及其相应的条件,证实了该方案在合成超冷异核四聚物分子 A₃B 时的可行性和有效性. 其次,研究外场参数,包括缔合激光脉冲的强度、脉宽、磁耦合强度及其失谐量等对 A₃B 形成的影响. 对于磁缔合过程, Efimov 三聚物在磁共振临界值附近就可以形成,因而除了磁耦合强度(与外磁场强度成正比)之外,还研究磁耦合失谐量的作用. 同时,比较了在超冷异核四聚物分子 A₃B 的形成过程中,经历两种不同中间态时,实现四聚物分子 A₃B 有效转化的差别. 另外,还讨论系统内禀的非线性和中间态的自发衰减损失对异核四聚物分子合成的影响.

2 理论模型

最近关于同核和异核 Efimov 三聚物分子的实验研究,为大量稳定三聚物分子 A₃ 和 A₂B 的形成提供了基础. 据此,下文将给出通过两种不同途径来合成异核四聚物分子 A₃B 的理论

方案: 1) 中间态为同核 Efimov 三聚物 A₃ 途径,可表示为 3A+B→A₃+B→A₃B,如图 1(a)所示; 2) 中间态为异核 Efimov 三聚物 A₂B 的途径,表示为 3A+B→A₂B+A→A₃B,如图 1(b). 这两种途径都需要两个步骤来合成,第一步利用磁场的 Efimov 共振技术把三个原子结合成一个三聚物分子,称为磁缔合过程;第二步采用外部激光场把处于中间激发态的三聚物分子与另一个原子转移到四聚物分子态上,称为光缔合过程. 在传统的双光子 STIRAP 过程当中,为了成功的实施原子量子态的转化,外部光脉冲必须以反直觉的方式打开,即斯托克斯光要先于抽运光打开^[25]. 同样,在进行磁缔合过程之前,必须先加上耦合激光场,铺好绝热通道,一旦发生 Efimov 共振,处于中间态的三聚物分子和另一个原子会沿绝热通道被转移到四聚物分子态上,实现原子向分子的转化. 这里分两种情况进行讨论.

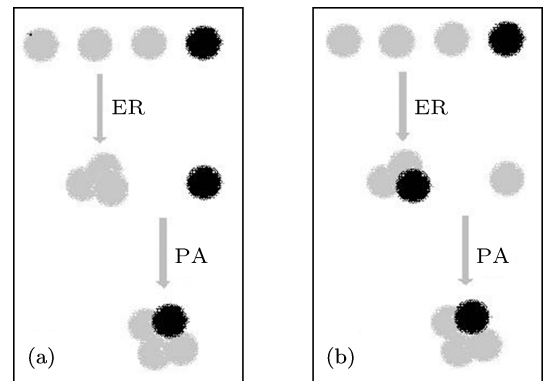


图 1 Efimov 共振辅助的受激拉曼绝热通道过程实施超冷原子向异核四聚物分子 A₃B 转化的示意图 (a) 中间态为同核三聚物分子 A₃ 的情形; (b) 中间态为异核三聚物分子 A₂B 的情形

2.1 中间态为同核 Efimov 三聚物 A₃ 的情形

在相互作用绘景下,描述系统转化的哈密顿表达式为

$$\hat{H} = -\hbar \int d\mathbf{r} \left\{ \sum_{i,j} \chi'_{i,j} \hat{\psi}_i^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_j^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_j \times (\mathbf{r}) \hat{\psi}_i(\mathbf{r}) + \delta \hat{\psi}_m^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_m(\mathbf{r}) + (\Delta + \delta) \hat{\psi}_g^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_g(\mathbf{r}) + \lambda' [\hat{\psi}_m^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_a(\mathbf{r}) \hat{\psi}_a(\mathbf{r}) \hat{\psi}_a(\mathbf{r}) + \text{H.C.}] - \Omega' [\hat{\psi}_g^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_m(\mathbf{r}) \hat{\psi}_b(\mathbf{r}) + \text{H.C.}] \right\}, \quad (1)$$

其中, $\hat{\psi}_i^+$ 和 $\hat{\psi}_i$ 代表相应粒子的产生和湮没算符, 下标 $i = a, b, m$ 和 g 分别代表原子 A, 原子 B, 三

聚物分子 A_3 和四聚物分子 A_3B . $\chi'_{ii} = 4\pi\hbar a_i/m_i$ 和 $\chi'_{ij} = 2\pi\hbar a_{ij}/m_{ij}$ ($i \neq j$) 描述两体之间的非线性相互作用, 这里 a_i 和 a_{ij} 表示 s 波散射长度, m_i 表示第 i 组分的质量, m_{ij} 表示不同组分的约化质量. λ' 和 Ω' 分别是磁共振耦合强度和缔合激光脉冲的拉比频率, 而后者的大小与外部激光场的光强成正比. 磁耦合失谐量 δ 为初始原子态和中间三聚物分子态之间的跃迁能量与发生 Efimov 共振耦合的强度之差.

在平均场意义下, 系统的动力学方程为

$$i \frac{d\psi_a}{dt} = -2 \sum_j \chi_{aj} |\psi_j|^2 \psi_a - 3\lambda \psi_m \psi_a^{*2}, \quad (2a)$$

$$i \frac{d\psi_b}{dt} = -2 \sum_j \chi_{bj} |\psi_j|^2 \psi_b + \Omega \psi_g \psi_m^*, \quad (2b)$$

$$i \frac{d\psi_m}{dt} = -2 \sum_j \chi_{mj} |\psi_j|^2 \psi_m - \delta \psi_m - \lambda \psi_a^3 + \Omega \psi_b^* \psi_g - i\gamma \psi_m, \quad (2c)$$

$$i \frac{d\psi_g}{dt} = -2 \sum_j \chi_{gj} |\psi_j|^2 \psi_g - (\Delta + \delta) \psi_g + \Omega \psi_m \psi_b, \quad (2d)$$

其中 $\chi_{ii} = \chi'_{ii}n$, $\chi_{ij} = \chi'_{ij}n$, $\lambda = \lambda'n$, $\Omega = \Omega'\sqrt{n}$ 为对应的无量纲量, n 表示系统总的粒子数密度. 方程 (2c) 中正比于参数 γ 的项描述中间三聚物态上粒子的自发辐射所引起的损失.

类似于文献 [14, 15], 为了获得方程 (2) 的暗态解 (中间三聚物态的粒子布居数为零), 取如下形式的试探波函数, 即

$$\begin{aligned} \psi_a &= |\psi_a^0| e^{i\theta_a} e^{-i\mu_a t}, \\ \psi_b &= |\psi_b^0| e^{i\theta_b} e^{-i\mu_b t}, \\ \psi_m &= |\psi_m^0| e^{i3\theta_a} e^{-i3\mu_a t}, \\ \psi_g &= |\psi_g^0| e^{i(3\theta_a + \theta_b)} e^{-i(3\mu_a + \mu_b)t}, \end{aligned} \quad (3)$$

并把其代入方程 (2), 利用系统总粒子数守恒 $|\psi_a|^2 + |\psi_b|^2 + 3|\psi_m|^2 + 4|\psi_g|^2 = 1$, 得到暗态解为

$$\begin{aligned} |\psi_b^0|^2 &= \frac{\Omega}{2(\Omega + \sqrt{\Omega^2 + 27\lambda^2})}, \\ |\psi_a^0|^2 &= 3|\psi_b^0|^2, \\ |\psi_m^0|^2 &= 0, \\ |\psi_g^0|^2 &= \frac{1}{4} - |\psi_b^0|^2. \end{aligned} \quad (4)$$

系统对应的化学势为

$$\begin{aligned} \mu_a &= -2(\chi_{aa} |\psi_a^0|^2 + \chi_{ab} |\psi_b^0|^2 \\ &\quad + \chi_{ag} |\psi_g^0|^2), \\ \mu_b &= -2(\chi_{ab} |\psi_a^0|^2 + \chi_{bb} |\psi_b^0|^2 \\ &\quad + \chi_{bg} |\psi_g^0|^2), \end{aligned} \quad (5)$$

“双光子”共振条件为

$$\begin{aligned} \Delta &= -\delta + \left(6\chi_{aa} - 2\chi_{ag} + 4\chi_{ab} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2}{3}\chi_{bb} - \frac{2}{3}\chi_{bg} \right) |\psi_a^0|^2 \\ &\quad + \left(6\chi_{ag} + 2\chi_{bg} - 2\chi_{gg} |\psi_g^0|^2 \right). \end{aligned} \quad (6)$$

方程 (2) 和 (6) 说明, 只要动力学保持共振条件, 系统可以在初始原子态和四聚物分子态之间转换. 也就是说, 当 $\lambda/\Omega = 0$ 时, 系统粒子都处在原子态上, 当 $\lambda/\Omega = \infty$ 时, 系统会形成足够数量的超冷四聚物分子.

2.2 中间态为异核 Efimov 三聚物 A_2B 的情形

在相互作用绘景下, 描述系统转化的哈密顿表达式为

$$\begin{aligned} \hat{H} &= -\hbar \int d\mathbf{r} \left\{ \sum_{i,j} \chi'_{ij} \hat{\psi}_i^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_j^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_j \right. \\ &\quad \times (\mathbf{r}) \hat{\psi}_i(\mathbf{r}) + \delta \hat{\psi}_m^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_m(\mathbf{r}) \\ &\quad + (\Delta + \delta) \hat{\psi}_g^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_g(\mathbf{r}) \\ &\quad + \lambda' [\hat{\psi}_m^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_a(\mathbf{r}) \hat{\psi}_a(\mathbf{r}) \hat{\psi}_b(\mathbf{r}) + \text{H.C.}] \\ &\quad \left. - \Omega' [\hat{\psi}_g^+(\mathbf{r}) \hat{\psi}_m(\mathbf{r}) \hat{\psi}_a(\mathbf{r}) + \text{H.C.}] \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

在这里, 除了 m 表示异核三聚物分子 A_2B 之外, 其他参数的意义与方程 (1) 完全相同.

在平均场意义下, 系统的动力学方程为

$$i \frac{d\psi_a}{dt} = -2 \sum_j \chi_{aj} |\psi_j|^2 \psi_a - 2\lambda \psi_m \psi_a^* \psi_b^* + \Omega \psi_g \psi_m^*, \quad (8a)$$

$$i \frac{d\psi_b}{dt} = -2 \sum_j \chi_{bj} |\psi_j|^2 \psi_b - \lambda \psi_m \psi_a^{*2}, \quad (8b)$$

$$i \frac{d\psi_m}{dt} = -2 \sum_j \chi_{mj} |\psi_j|^2 \psi_m - \delta \psi_m - \lambda \psi_a^2 \psi_b + \Omega \psi_a^* \psi_g - i\gamma \psi_m, \quad (8c)$$

$$i \frac{d\psi_g}{dt} = -2 \sum_j \chi_{gj} |\psi_j|^2 \psi_g - (\Delta + \delta) \psi_g + \Omega \psi_m \psi_a. \quad (8d)$$

同样, 利用试探波函数

$$\begin{aligned} \psi_a &= |\psi_a^0| e^{i\theta_a} e^{-i\mu_a t}, \\ \psi_b &= |\psi_b^0| e^{i\theta_b} e^{-i\mu_b t}, \\ \psi_m &= |\psi_m^0| e^{i(2\theta_a + \theta_b)} e^{-i(2\mu_a + \mu_b)t}, \\ \psi_g &= |\psi_g^0| e^{i(3\theta_a + \theta_b)} e^{-i(3\mu_a + \mu_b)t}, \end{aligned} \quad (9)$$

和总粒子数守恒条件, 可以得到经历中间态为异核 Efimov 三聚物 A_2B 的途径时, 系统的暗态解

$$\begin{aligned} |\psi_b^0|^2 &= \frac{\Omega}{2(\Omega + \sqrt{\Omega^2 + 3\lambda^2})}, \\ |\psi_a^0|^2 &= 3|\psi_b^0|^2, \\ |\psi_m^0|^2 &= 0, \\ |\psi_g^0|^2 &= \frac{1}{4} - |\psi_b^0|^2. \end{aligned} \quad (10)$$

系统化学势和“双光子”共振条件的表达式仍由方程 (5) 和 (6) 给出.

3 主要结果

3.1 粒子数布居的动力学演化

对于具体的三体系统, Efimov 共振发生在一些特定的磁场强度处, 因而磁耦合强度可以看成是确定的常数. 为了实现成功转化, 必须对“双光子”共振条件进行动力学控制, 这就要求缔合光脉冲的拉比频率是含时的, 不妨取其形式为

$$\Omega(t) = \Omega_0 \text{sech}(t/\tau), \quad (11)$$

其中 Ω_0 的大小反映了光脉冲的强度, τ 反映了脉冲的宽度. 实验上, ER-STIRAP 过程可以通过如下的方式实施. 首先, 打开耦合激光场, 将其幅度固定在 Ω_0 ; 其次, 扫描磁场并使其接近于三原子 Efimov 共振的外置; 紧接着调节外部激光场的幅度和频率, 使其按照方程 (11) 和 (6) 要求的方式变化. 耦合初始空置的四聚物态与中间三聚物态的激光场先于磁场的 Efimov 共振作用于系统, 代表了一种反直觉的外场打开方式 [25].

通过求解方程 (2) 和 (8), 我们给出了原子态和四聚物分子态的演化. 相应参数的取值分别为 $\lambda = 1$, $\Omega_0 = 20$, $\tau = 20$, $\delta = -3$, $\gamma = 1$. 对于 ^{41}K 和 ^{87}Rb 原子构成的混合系统, 当考虑两体

之间碰撞相互作用 (即 $\chi \neq 0$) 时, 取 $\chi_{aa} = 0.3214$,

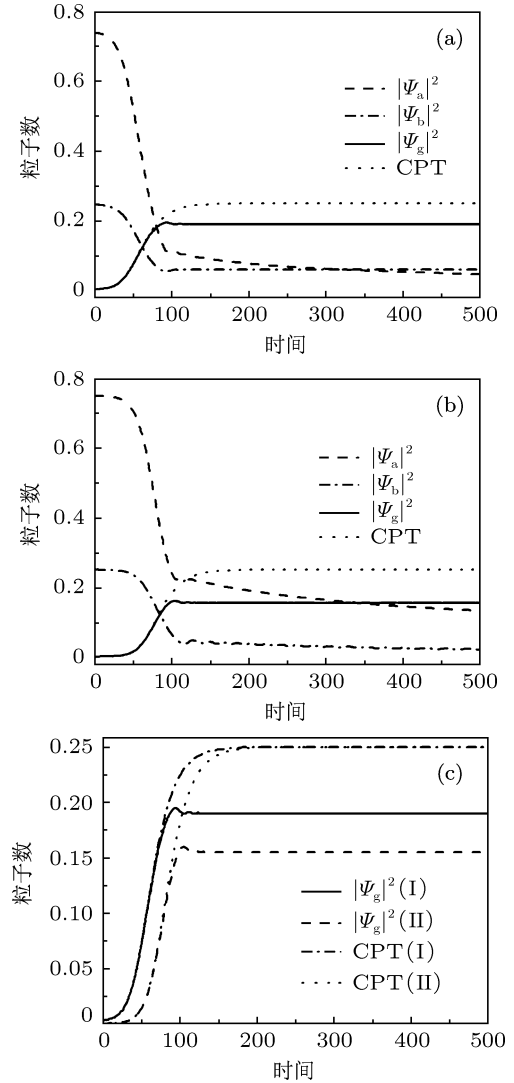


图 2 粒子数布居随时间的变化 (a) 经历中间态为同核 Efimov 三聚物 A_3 的情形; (b) 经历中间态为异核 Efimov 三聚物 A_2B 的情形; (c) 经历两种不同途径时粒子布局随时间变化的比较

$\chi_{bb} = 0.5303$, $\chi_{ab} = 0.8731$, 其他的碰撞参数取为 0.0938 [15, 26]. 图 2(a) 给出经历中间态为同核 Efimov 三聚物 A_3 的途径时的演化情形. 可以看到, A 原子和 B 原子的数目随时间的演化不断降低, 而四聚物 A_3B 的数目却在不断增加, 大约在时间 $T = 100$ 之后趋于稳定值. 图 2(b) 给出经历中间态为异核 Efimov 三聚物 A_2B 的情形, 得到的结果与图 2(a) 类似. 为了比较, 我们也给出了暗态解随时间的变化, 发现在演化过程中四聚物 A_3B 的分子态布居总是小于暗态解给出的值. 在相同的参数条件下, 图 2(c) 比较了经历中间态为同核 Efimov 三聚物 A_3 和中间态为异核 Efimov 三聚物 A_2B 的两种途径下, 系统暗态解和真实演化态的差别. 可

见,对两种不同的途径来讲,暗态解只在演化的初始阶段有差别,在演化后期,暗态解的值都为 25%. 真实演化态在整个演化过程中都不相同,在演化后期,第一种途径的值大约为 19%,而第二种途径约为 15%,表明前者的转化效率可以达到 76%,而后者约为 60%. 后面的讨论将会指出,在实际的超冷原子向分子转化过程中,除了外部磁场和激光场参数的作用之外,粒子之间的两体相互作用和中间态粒子的自发衰减损失都将对超冷分子的合成有重要影响.

3.2 外场参数对异核四聚物合成的影响

在超冷原子-分子转化系统中,绝热保真度描述了系统在绝热演化过程中真实态与暗态的偏离程度,它定义为 $F \equiv |\langle \Psi | CPT \rangle|^2 \leq 1$, 其中 $|\psi\rangle = (\psi_a, \psi_b, \psi_d, \psi_g)$, $|CPT\rangle = (\psi_a^0, \psi_b^0, \psi_d^0, \psi_g^0)^{[26-28]}$. 偏离程度越小,绝热保真度 F 越接近于 1,意味着转化过程中超冷分子的产率越高. 下文将借助绝热保真度的概念来刻画外场参量,系统内禀的非线性以及中间态上粒子的衰减损失等对超冷原子向异核四聚物分子转化的影响.

3.2.1 磁耦合强度及其失谐量的作用

图 3(a) 描述了外部磁场的耦合强度对异核四聚物合成的影响. 可以看到,随着磁耦合强度 λ 的增加,超冷原子向异核四聚物分子转化系统的绝热保真度的值先迅速增加,大约在 $\lambda > 2$ 之后增加的相对缓慢,并逐步趋近于 1. λ 越大,绝热保真度越接近于 1. 这里,磁耦合强度的作用类似于传统双光子 STIRAP 过程中抽运光的拉比频率. 抽运光的作用是把初始原子态与中间态耦合起来. 抽运光的强度越大,就会有更多的原子被激发到中间分子态上. 当光强足够大时,就有可能把处于初始态的全部原子转移到中间分子态. 图 3, 4, 5 中分别用 $\chi = 0$ 表示不考虑系统中两体之间相互作用的情形, $\chi \neq 0$ 表示考虑了两体非线性相互作用的情形, 1) 表示经历中间态为同核 Efimov 三聚物的途径, 2) 表示经历中间态为异核 Efimov 三聚物的途径. 非线性情况下的产率比线性情况下的更低,表明两体相互作用对四聚物分子的形成有抑制作用^[29-31]. 对两种不同中间态的比较发现,经历中间态为同核三聚物的过程,要比经历中间态为异核三聚物的过程实现最终的稳定分子的数目多. 这也表明在利

用 ER-STIRAP 过程合成超冷异核四聚物分子 A_3B 时,经历中间态为同核 Efimov 三聚物的过程比经历中间态为异核 Efimov 三聚物的过程更加有效.

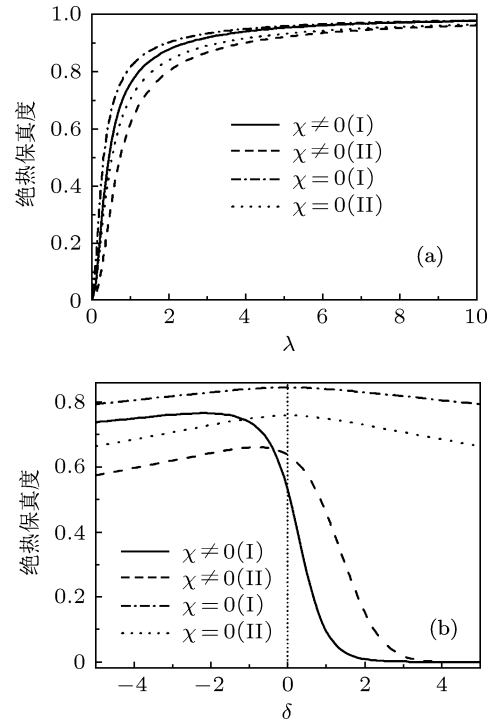


图 3 磁耦合强度及其失谐量对异核四聚物合成的影响

一般情况下, Efimov 三聚物分子在能量近共振的情况下就能合成,所以我们研究了磁耦合失谐量 δ 对超冷分子合成的影响,结果如图 3(b) 所示. 由图看出,当不考虑粒子之间的两体相互作用时,绝热保真度关于 $\delta = 0$ 是两边对称的. 失谐量 $|\delta|$ 越大,绝热保真度的值越小,表明了转化效率的降低. 当考虑粒子之间的两体相互作用时,绝热保真度关于 $\delta = 0$ 两边不再对称. 对 $\delta < 0$,绝热保真度的值相对比较大,而对 $\delta > 0$,绝热保真度的值相对变小. 但是绝热保真度随失谐量 $|\delta|$ 增加而降低的总趋势没有发生变化. 这充分表明,外磁场为红失谐 ($\delta < 0$) 时系统有较高的稳定转化效率,而蓝失谐 ($\delta > 0$) 则不利与超冷四聚物分子的合成. 另外,当不考虑两体相互作用时,经历中间态为同核 Efimov 三聚物分子 A_3 的过程中系统的绝热保真度总是比经历中间态为异核 Efimov 三聚物分子 A_2B 的过程要大. 但当考虑两体相互作用时,情况却有所不同. 在红失谐一侧,中间态为同核 Efimov 三聚物分子 A_3 的过程产率更高,而在蓝失谐一侧,中间态为异核 Efimov 三聚物分子 A_2B 的过程产率更高一些,但这样的失谐量范围相对比较窄.

3.2.2 缔合光脉冲强度和宽度的作用

图 4(a) 给出了绝热保真度随缔合光脉冲拉比频率 Ω_0 的变化结果. 结果表明, 系统的绝热保真度随激光脉冲拉比频率的增大先减小, 最后趋于一小于 1 的稳定值, 表明当脉冲强度较小时, 转化效率随脉冲强度的增大而减小, 当脉冲强度增大到一定值 (大约为 $\Omega_0 > 2.5$) 以后, 转化效率变为一常数. 不管激光脉冲的强度为多少, 系统总有较高的稳定转化效率. 这里的缔合光对应于传统的双光子 STIRAP 过程中的斯托克斯光, 它只需先于抽运光打开, 铺好中间态到末态的通路, 一旦抽运光把原子转移到中间激发态上, 就会很快顺着该通路到

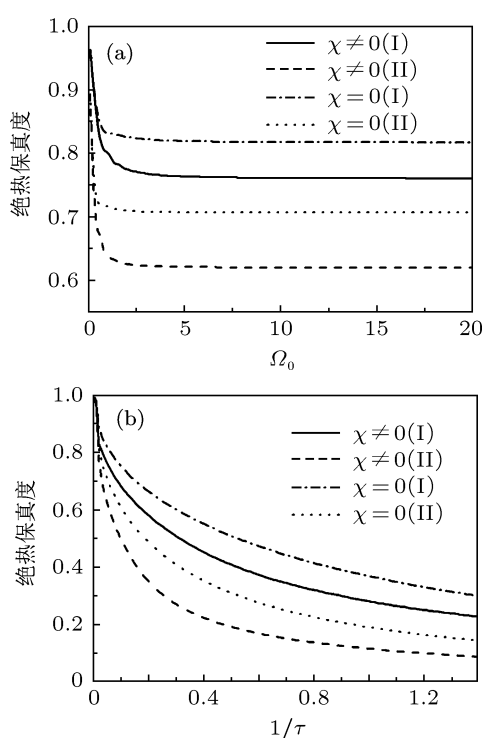


图 4 缔合光脉冲强度和宽度对异核四聚物合成的影响

达末态. 系统最终的转化效率在很大的范围内不依赖于斯托克斯光的强度. 图 4(b) 给出了绝热保真度随缔合光脉冲宽度倒数的变化结果. 可以看出, 绝热保真度随脉冲宽度的增加而增大. 脉宽越大, 转化效率越高. 该图同样反映出经历不同中间态时, 超冷四聚物分子的合成效率是不同的.

3.3 中间态的自发辐射损失对异核四聚物合成的影响

在真实系统中, 各个能态上粒子的衰减损失是不可避免的. 我们只考虑中间态三聚物分子的自发

辐射损失对异核四聚物合成的影响. 图 5 给出了绝热保真度随中间态粒子数衰减参数 γ 的变化曲线. 不管哪种情况, 随着中间态自发衰减的增强, 最终实现的四聚物分子的产率会降低. 另外, 从图中也可以反映前面讨论过的结果, 一方面系统中两体相互作用对超冷原子向异核四聚物分子的转化具有抑制作用, 另一方面, 中间态为异核 Efimov 三聚物时比中间态为同核 Efimov 三聚物时系统的衰减更快. 衰减率较大时, 对中间态为同核 Efimov 三聚物的途径影响更大. 这里只考虑了中间态上的自发辐射导致的损失, 实际上两体弛豫和三体解离等其他因素也会导致分子产率的降低.

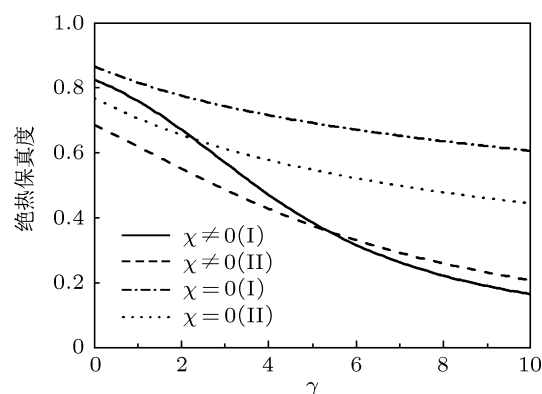


图 5 中间态的自发辐射损失对异核四聚物合成的影响

4 结论

在最近实验上分别研究同核 Efimov 三聚物和异核 Efimov 三聚物的基础上, 本文提出了利用 ER-STIRAP 过程合成超冷异核四聚物分子 A_3B 的理论方案, 得到了合成过程中中间态分别为同核 Efimov 三聚物 A_3 和异核 Efimov 三聚物 A_2B 两种途径下系统的暗态解. 借助于量子信息科学中发展起来的绝热保真度的概念, 研究了超冷原子向异核四聚物分子 A_3B 的绝热转化, 比较了系统真实演化态与暗态的差别, 证实了 ER-STIRAP 技术在合成超冷异核四聚物分子 A_3B 过程中的可行性和有效性. 研究了外场参数, 包括缔合激光脉冲的强度、脉宽、磁耦合强度及其失谐量等对 A_3B 形成的影响. 研究发现, 系统的转化效率随缔合光脉冲强度的增大先减小, 最后趋于稳定值. 不管激光脉冲的强度为多少, 系统总有较高的稳定转化效率. 转化效率随脉冲宽度单调变化, 脉宽越大, 转化效率越高. 理论上, 磁耦合强度越大, 转化到中间 Efimov 三聚物

态的概率越高,但对于具体的三体系统, Efimov 共振常常发生在一些特定的磁场值处. 磁耦合失谐为红失谐时,系统有比较高的稳定转化效率,而蓝失谐光脉冲则不利于超冷分子的形成. 同时,对两种不同中间态的转化途径进行比较发现,与中间态为同核 Efimov 三聚物 A_3 的过程相比,经历中间态为异核 Efimov 三聚物 A_2B 的过程系统实现最终四聚

物分子 A_3B 的产率要低一些. 考虑到实验上实现异核 Efimov 三聚物 A_2B 比实现同核 Efimov 三聚物 A_3 更困难,对于两种途径来说,实际上得到的四聚物分子产率的差别会更大. 本文的理论结果不仅对利用 STIRAP 技术实现超冷原子向异核四聚物分子转化的实验有指导意义,而且对更为复杂的多原子分子的可控合成具有重要的参考价值.

- [1] Carr L D, DeMille D, Kreams R V, Ye J 2009 *New J. Phys.* **11** 055049
- [2] Chin Cheng, Flambaum V V, Kozlov M G 2009 *New J. Phys.* **11** 055048
- [3] Cronin A D, Schmiedmayer J, Pritchard D E 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1051
- [4] Jones K M, Tiesinga E, Lett P D, Julienne P 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 483
- [5] Köhler T, Góral K, Julienne P 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1311
- [6] Chin Cheng, Grimm R, Julienne P, Tiesinga E 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 1225
- [7] Mackie M, Kowalski R, Javanainen J 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 3803
- [8] Drummond P D, Kheruntsyan K V, Heinzen D J, Wynar R H 2002 *Phys. Rev. A* **65** 063619
- [9] Mackie M, Härkönen K, Collin A, Suominen K A, Javanainen J 2004 *Phys. Rev. A* **70** 013614
- [10] Meng S Y, Liu J 2010 *Prog. Phys.* **30** 280 (in Chinese) [孟少英, 刘杰 2010 物理学进展 **30** 280]
- [11] Mackie M 2002 *Phys. Rev. A* **66** 043613
- [12] Mackie M, DeBrosse C 2010 *Phys. Rev. A* **81** 043625
- [13] Winkler K, Thalhammer G, Theis M, Ritsch H, Grimm R, Denschlag J H 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 063202
- [14] Ling H Y, Pu H, Seaman B 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 250403
- [15] H. Jing, J. Cheng, P. Meystre 2008 *Phys. Rev. A* **77** 043614
- [16] Jing H, Jiang Y 2008 *Phys. Rev. A* **77** 065601
- [17] Kraemer T, Mark M, Waldburger P, Danzl J G, Chin C, Engeser B, Lange A D, Pilch K, Jaakkola A, Nägerl H C, Grimm R 2006 *Nature* **440** 315
- [18] Knoop S, Ferlaino F, Mark M, Berninger M, Schoebl H, Nägerl H C, Grimm R 2009 *Nature Phys.* **5** 227
- [19] Ottenstein T B, Lompe T, Kohnen M, Wenz A N, Jochim S 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 203202
- [20] Huckans J H, Williams J R, Hazlett E L, Stites R W, O'Hara K M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 165302
- [21] Zaccanti M, Deissler B, D'Errico C, Fattori M, Jona-Lasinio M, Muller S, Roati G., Inguscio M, Modugno G. 2009 *Nature Phys.* **5** 586
- [22] Barontini G, Weber C, Rabatti F, Catani J, Thalhammer G, Inguscio M, Minardi F 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 043201
- [23] Efimov V 1970 *Phys. Lett. B* **33** 563
- [24] Braaten E, Hammer H W 2006 *Phys. Rep.* **428** 259
- [25] Bergmann K, Theuer H, Shore B W 1998 *Rev. Mod. Phys.* **70** 1003
- [26] Meng S Y, Fu L B, Chen J, Liu J 2009 *Phys. Rev. A* **79** 063415
- [27] Meng S Y, Fu L B, Liu J 2008 *Phys. Rev. A* **78** 053410
- [28] Lu L H, Li Y Q 2008 *Phys. Rev. A* **77** 053611
- [29] Meng S Y, Wu W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5311 (in Chinese) [孟少英, 吴炜 2009 物理学报 **58** 5311]
- [30] Meng S Y, Wu W, Liu B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6902 (in Chinese) [孟少英, 吴炜, 刘彬 2009 物理学报 **58** 6902]
- [31] Meng S Y, Wu W, Liu B, Ye D F, Fu L B 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3844

Adiabatic conversion from ultracold atoms to heteronuclear tetrameric molecule A_3B^*

Li Guan-Qiang^{1)†} Peng Ping¹⁾ Cao Zhen-Zhou²⁾ Xue Ju-Kui³⁾

1) (College of Science, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

2) (College of Electronics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

3) (College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

(Received 25 June 2011; revised manuscript received 13 September 2011)

Abstract

We present a theoretical scheme for conversion from ultracold atoms to heteronuclear tetrameric molecule A_3B via Efimov resonance-assisted stimulated Raman adiabatic passage (ER-STIRAP). The dark state solutions of the system are obtained for two different pathways. For the first pathway, the intermediate state is populated by homonuclear Efimov trimer A_3 , and the second one by heteronuclear Efimov trimer A_2B . The feasibility and the effectiveness of the scheme are also verified. Meanwhile, we investigate the effects of external field parameters, including the intensity of associated laser pulses, its width, magnetic coupling strength and its detuning, on the formation of heteronuclear tetrameric molecules. By comparison, it is found that the ultimate yield of the tetrameric molecules for the second pathway is less than ones for the first pathway. In addition, the effects of the intrinsic nonlinearity of the system and the spontaneous decay in the intermediate state on the tetramer formation are discussed.

Keywords: heteronuclear tetrameric molecule, stimulated Raman adiabatic passage, adiabatic fidelity, conversion efficiency

PACS: 03.75.-b, 37.90.+j, 67.85.De

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10774120, 10975114), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of South-Central University for Nationalities (Grant No. CZQ11001), and the Natural Science Foundation of Shaanxi University of Science and technology, China (Grant No. ZX11-33).

† E-mail: liguanqiang@sust.edu.cn.