

弱场中 Ba-Sr 系统激光感生碰撞过程的 理论研究*

陈德应 郑瑞华 王 骥 马祖光

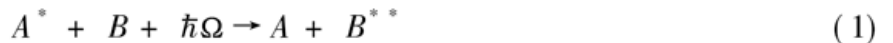
(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要 针对四能级理论模型的第二种极限情况, 提出了 Ba-Sr 激光感生碰撞能量转移系统, 该系统满足 $|\omega_{21}| \gg |\omega_{43}|$ 。利用四能级理论模型对该 Ba-Sr 系统进行了数值计算, 并与三能级近似理论模型的计算结果进行了比较。通过比较四能级理论与三能级近似理论模型的计算结果, 进一步证实了当 $|\omega_{21}| \gg |\omega_{43}|$ 时, 四能级理论模型可以过渡为三能级理论模型。

关键词 Ba 原子, Sr 原子, 激光感生碰撞能量转移, 碰撞截面。

1 引 言

一般而言, 如果两碰撞原子的初态和终态之间的能量差 ΔE 与 kT 相比要大得多的话, 两原子间的非弹性碰撞截面将是非常小的(大概在 10^{-20} cm^2 以下)。但是, 如果在两原子碰撞的过程中, 通过引入一束外加激光场, 且外加激光场的频率 Ω 满足 $\hbar\Omega = \Delta E$ (或 $n\hbar\Omega = \Delta E$) 时, 将会大大增加两原子间的非弹性碰撞截面, 使之可达到 10^{-12} cm^2 。这种在激光场的作用下, 通过非弹性碰撞实现一个粒子的能量选择性地传递到另一个不同粒子高激发态能级的过程, 被称为激光感生碰撞能量转移(LECET)。该过程可用如下反应式来描述:



其中: A^* 和 B^{**} 分别为 A 原子和 B 原子的电子激发态; Ω 为外加激光场频率。

由于两原子间的碰撞时间非常短, 通常为几十皮秒, 因此, 在外加激光场的作用下, 这种激光感生碰撞过程也可以被看作“开关”碰撞。正是由于激光感生碰撞时间非常短, 而且具有碰撞截面大的特点, 因此激光感生碰撞过程常被用来实现粒子间能量的快速而有效的传递。通过激光感生碰撞过程的研究, 对检验和完善现有的碰撞理论具有重要的科学意义。而且, 研究激光感生非弹性碰撞过程还有着明显的应用前景。例如, 在短波长激光的研究中, 通常能量是先被储存于抽运粒子(可以是原子或离子)中, 然后通过非弹性碰撞, 抽运粒子的能量被转移给激活粒子, 最后在激活粒子中实现激光上下能级的布居数反转; 但正如前面所介绍的, 在抽运粒子初态和激活粒子终态之间存在一定的能量差时, 两粒子间的非弹性碰撞截面将是非常小的, 这时通过引入一外加光场以补偿抽运粒子初态和激活粒子终态之间的能量差, 利用粒子间

* 国家自然科学基金(69388003)资助项目。

收稿日期: 1999-04-05; 收到修改稿日期: 1999-08-30

激光感生非弹性碰撞就可以解决碰撞截面小的问题,从而实现粒子间能量的快速而有效的传递。

自从 1976 年 Harris 及其合作者^[1,2]首次于实验上观察到了 Sr-Ca 系统的激光感生碰撞能量转移之后就引起了许多研究者的极大兴趣,人们在激光感生碰撞能量转移实验作广泛研究的同时^[1-5],也开展了深入的理论研究^[6-8]。

我们在已有三能级理论^[7,8]的基础上,同时考虑了两个中间能级的影响,建立了激发感生碰撞能量转移的四能级理论模型^[9]。由于同时考虑了两个中间能级的影响,因此四能级理论与三能级理论相比更具有普遍性。理论分析表明:当 $|\omega_{21}| \gg |\omega_{43}|$ 或 $|\omega_{21}| \ll |\omega_{43}|$ 时,四能级理论就可以过渡为三能级近似理论。也就是说,只有当激光感生碰撞系统满足上述两种极限情况之一时,激光感生碰撞过程才能近似为一个三能级系统。利用四能级理论模型,我们还对 Eu-Sr 系统中的三个激光感生碰撞能量转移进行了数值计算^[10],从而证明了理论分析:1) 当 $|\omega_{21}| \ll |\omega_{43}|$ 时,四能级理论和三能级近似理论都能给出令人满意的计算结果,并与已有的实验结果获得了很好的吻合;2) 当 $|\omega_{21}|$ 值与 $|\omega_{43}|$ 相近时,三能级理论的计算结果将存在着很大的误差,而四能级理论模型则适合于计算各种条件下的激光感生碰撞过程。

作为对四能级理论的补充,有必要对激光感生碰撞过程的第二种极限情况(即满足 $|\omega_{21}| \gg |\omega_{43}|$) 进行讨论。基于这种考虑,本文提出了 Ba-Sr 激光感生碰撞系统,对于该系统,理论分析表明:1) 态在激光感生碰撞的过程中基本上不参与作用。分别利用四能级理论和三能级近似理论模型对 Ba-Sr 系统进行了数值计算,通过比较四能级理论与三能级近似理论模型的计算结果,进一步证实了我们的理论分析结果。

2 理论分析

2.1 基本理论

在文献[9]中,同时考虑了两个中间能级的影响,建立了包括如下四个复合系统态的激光感生碰撞能量转移四能级理论模型:

$$|1\rangle = |A\rangle|B^*\rangle, \quad |2\rangle = |A^*\rangle|B\rangle, \quad |3\rangle = |A^*\rangle|B^*\rangle, \quad |4\rangle = |A\rangle|B^{**}\rangle. \quad (2)$$

通过求解上述四个复合系统态的态振幅运动方程,可以得到(2)式所示四个复合系统态在弱场作用下态振幅的一级近似解为:

$$\left. \begin{aligned} a_1(t) &= b_1(t) \cos \theta + b_2(t) \sin \theta, \\ a_2(t) &= -b_1(t) \sin \theta + b_2(t) \cos \theta, \\ a_3(t) &= b_3(t) \cos \varphi + b_4(t) \sin \varphi, \\ a_4(t) &= -b_3(t) \sin \varphi + b_4(t) \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} b_1(t) &= 0, \\ b_2(t) &= \exp\left[-i \int_{-\infty}^t \lambda_2(t') dt'\right], \end{aligned} \right\} \quad (\omega_{21} > 0). \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} b_1(t) &= \exp\left[-i \int_{-\infty}^t \lambda_1(t') dt'\right], \\ b_2(t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\omega_{21} < 0). \quad (5)$$

$$b_3(t) = \exp[i\Delta t - i \int_{-\infty}^t \lambda_3(t') dt'] \left[- i \int_{-\infty}^t \{ [(V_{31}\cos\theta - V_{32}\sin\theta)\cos\varphi - V_{41}\cos\theta \sin\varphi] b_1(t') dt' + \right. \\ \left. [(V_{31}\sin\theta + V_{32}\cos\theta)\cos\varphi - V_{41}\sin\theta \sin\varphi] b_2(t') \} \exp[-i\Delta t' + i \int_{-\infty}^{t'} \lambda_3(t'') dt''] dt' \right], \quad (6)$$

$$b_4(t) = \exp[i\Delta t - i \int_{-\infty}^t \lambda_4(t') dt'] \left[- i \int_{-\infty}^t \{ [(V_{31}\cos\theta - V_{32}\sin\theta)\sin\varphi + V_{41}\cos\theta \cos\varphi] b_1(t') dt' + \right. \\ \left. [(V_{31}\sin\theta + V_{32}\cos\theta)\sin\varphi + V_{41}\sin\theta \cos\varphi] b_2(t') \} \exp[-i\Delta t' + i \int_{-\infty}^{t'} \lambda_4(t'') dt''] dt' \right], \quad (7)$$

$$\lambda_1 = [-\omega_{21} - (\omega_{21}^2 + 4V_{12}^2)^{1/2}]/2, \quad \lambda_2 = [-\omega_{21} + (\omega_{21}^2 + 4V_{12}^2)^{1/2}]/2, \\ \lambda_3 = [-\omega_{43} - (\omega_{43}^2 + 4V_{34}^2)^{1/2}]/2, \quad \lambda_4 = [-\omega_{43} + (\omega_{43}^2 + 4V_{34}^2)^{1/2}]/2, \quad (8)$$

$$\sin \theta = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\omega_{21}}{(\omega_{21}^2 + 4V_{12}^2)^{1/2}} \right] \right\}^{1/2}, \quad \cos \theta = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\omega_{21}}{(\omega_{21}^2 + 4V_{12}^2)^{1/2}} \right] \right\}^{1/2}, \\ \sin \varphi = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\omega_{43}}{(\omega_{43}^2 + 4V_{34}^2)^{1/2}} \right] \right\}^{1/2}, \quad \cos \varphi = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\omega_{43}}{(\omega_{43}^2 + 4V_{34}^2)^{1/2}} \right] \right\}^{1/2}, \quad (9)$$

$$\Delta = \Omega - \omega_{42}, \quad \omega_{nn} = (E_n - E_n)/\hbar. \quad (10)$$

将(3)式中 a_4 解的形式代入下式. 就可以求得相对速度为 v 、失谐量为 Δ 时的激光感生碰撞过程的碰撞截面:

$$\sigma(\Delta) = 2\pi \int_0^{+\infty} b db |a_4(+\infty)|^2. \quad (11)$$

2.2 Ba-Sr 激光感生碰撞系统的特点

作为对四能级理论的进一步验证, 本文将以下 Ba-Sr 激光感生碰撞系统为例,

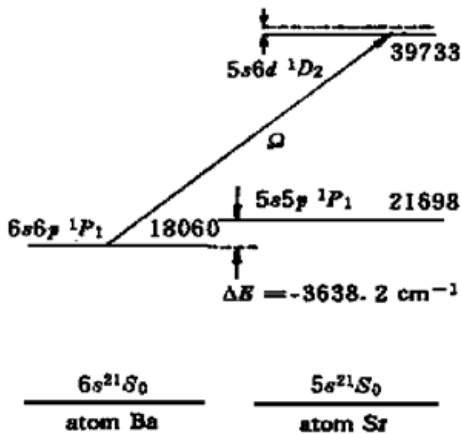
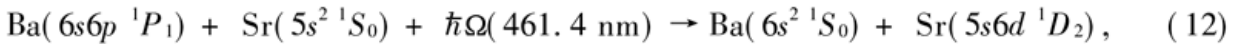


Fig. 1 Energy level diagram of the Ba-Sr laser-induced collisional process. The LICET transition occurs from $\text{Ba}(6s6p \ ^1P_1) \rightarrow \text{Sr}(5s6d \ ^1D_2)$. The energy levels in the figure are expressed in cm^{-1} .

来讨论文献[9]中的第二种极限情况. 图 1 是(12)式所示 Ba-Sr 激光感生碰撞过程的能级图(其中忽略了那些与激光感生碰撞过程无关的能级). 对于该激光感生碰撞能量转移, 储能态为 $\text{Ba}(6s6p \ ^1P_1)$, 在转移激光(频率为 Ω) 的作用下 Ba-Sr 之间发生非弹性碰撞. 非弹性碰撞的结果为: Ba 原子因碰撞消激发由储能态 $\text{Ba}(6s6p \ ^1P_1)$ 跃迁回基态, 而 Sr 原子在获得 Ba 原子激发能的同时再吸收一个转移激光光子跃迁到一个更高的激发态 $\text{Sr}(5s6d \ ^1D_2)$, 于是 Ba-Sr 四个复合系统能级可表示为

$$\left. \begin{aligned} |1\rangle &= |\text{Ba}(6s^2 \ ^1S_0)\rangle |\text{Sr}(5s5p \ ^1P_1)\rangle, \\ |2\rangle &= |\text{Ba}(6s6p \ ^1P_1)\rangle |\text{Sr}(5s^2 \ ^1S_0)\rangle, \\ |3\rangle &= |\text{Ba}(6s6p \ ^1P_1)\rangle |\text{Sr}(5s5p \ ^1P_1)\rangle, \\ |4\rangle &= |\text{Ba}(6s^2 \ ^1S_0)\rangle |\text{Sr}(5s6d \ ^1D_2)\rangle \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

(13) 式中的 $|2\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 态之间的能级间隔为 $\omega_{21} = -3638.2 \text{ cm}^{-1}$, $|4\rangle$ 态和 $|3\rangle$ 态之间的能级间隔为 ω_{43}

$= -25.6 \text{ cm}^{-1}$ 。当转移激光场强为 10^6 V/m 时, 对应于图 1 所示 Ba-Sr 系统的激光感生碰撞过程的 V 矩阵[参见文献[9]中的(11)式]的理论计算值为:

$$V = \begin{pmatrix} -\omega_{21} & 6.318 \times 10^{-14}/R^3 & -1.938 \times 10^{11} i & -3.642 \times 10^{10} i \\ 6.318 \times 10^{-14}/R^2 & 0 & -1.720 \times 10^{11} i & 0 \\ 1.938 \times 10^{11} i & 1.720 \times 10^{11} i & \omega_{32} - \Omega & 1.899 \times 10^{-14}/R^3 \\ 3.642 \times 10^{10} i & 0 & 1.899 \times 10^{-14}/R^3 & \omega_{42} - \Omega \end{pmatrix}, \quad (14)$$

其中: $R = (b^2 + v^2 t^2)^{1/2}$, b 为碰撞参数, v 为两碰撞原子间的相对运动速度。

对于该 Ba-Sr 系统, 很显然, 它满足 $|\omega_{21}| \gg |\omega_{32}|$; 从(14)式的 V 矩阵可知, 在碰撞参数 $b > 1.5 \text{ nm}$ 时(通过以下的数值计算表明, 对于激光感生碰撞能量转移有较大贡献的是在碰撞参数 $b \geq 1.5 \text{ nm}$), $|2\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 态之间的相互作用势 $|V_{21}| < 2 \times 10^{13}$; 而 $|2\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 态之间的能级间隔为 $|\omega_{21}| = 6.86 \times 10^{14}$ (对应于 3638.2 cm^{-1}), 从而有 $|\omega_{21}| \gg |V_{21}|$ 。利用(3)式, 考虑到 $\omega_{21} < 0$, 可得:

$$|a_1(t)|^2 = \cos^2 \theta = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\omega_{21}}{(\omega_{21}^2 + 4V_{12}^2)^{1/2}} \right] \approx \frac{V_{12}^2}{\omega_{21}^2} \quad (\omega_{21} < 0, |\omega_{21}| \gg |V_{21}|), \quad (15)$$

由于 $|\omega_{21}| \gg |V_{21}|$, $|1\rangle$ 态在整个激光感生碰撞的过程中基本上不存在粒子数布居(即可认为 $|a_1(t)|^2 \approx 0$), 更确切地说, $|1\rangle$ 态在激光感生碰撞过程中基本上不参与作用, 于是, 四能级理论可过渡到三能级近似理论。

下面将通过 Ba-Sr 系统的数值计算来进一步证实以上理论分析的结果。

3 Ba-Sr 激光感生碰撞过程的数值计算

激光感生碰撞截面 $\sigma(\Delta)$ 的计算可以通过(11)式来进行, 但在计算激光感生碰撞截面时, 首先要计算出碰撞跃迁几率 $|a_4(+\infty)|^2$ 随碰撞参数 b 的变化关系; 而在计算 $|a_4(+\infty)|^2$ 随碰撞参数 b 的变化关系之前, 最重要的就是确定激光感生碰撞时间。

3.1 Ba-Sr 激光感生碰撞时间的确定

所谓激光感生碰撞时间指的是只有在该时间范围内才存在激光感生碰撞跃迁, 在此时间范围之外, 两原子之间不能发生非弹性碰撞, 因而也就不存在激光感生碰撞能量转移。要确定激光感生碰撞时间, 可以通过计算 $|1\rangle$ 态和 $|2\rangle$ 态的几率 $|a_1(t)|^2$ 和 $|a_2(t)|^2$ 随时间 t 的变化关系来确定, 因为只有在碰撞时间内 $|1\rangle$ 态和 $|2\rangle$ 态才存在偶极-偶极相互作用。当然, 激光感生碰撞时间也可以通过计算 $|4\rangle$ 态的几率 $|a_4(t)|^2$ 随时间 t 的变化关系来确定, 因为 t 大于碰撞时间时, 碰撞跃迁几率 $|a_4(t)|^2$ 将趋于一常数。

首先计算了该 Ba-Sr 系统中 $|1\rangle$ 态的几率 $|a_1(t)|^2$ 随时间 t 的变化关系。当两原子间的相对运动速度为 600 m/s 、转换激光严格共振(即失谐量 $\Delta = 0$), 碰撞参数 b 分别为 1 nm 和 2 nm 时, 计算结果如图 2(a) 和图 2(b) 所示。从计算的结果可以看出: $|1\rangle$ 态在碰撞前和碰撞后都没有粒子数布居,

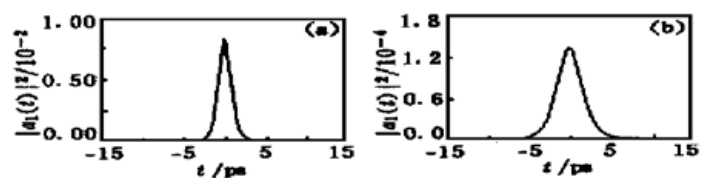


Fig. 2 The probability of $|1\rangle$ state are plotted against time. (a) $b = 1 \text{ nm}$, (b) $b = 2 \text{ nm}$.

只当 $-10 \text{ ps} < t < 10 \text{ ps}$ 时, $|1\rangle$ 态和 $|2\rangle$ 态之间才存在着偶极-偶极相互作用, 这时两态之间有着瞬间的粒子数交换作用, 而且碰撞参数 b 越大, $|1\rangle$ 态几率越小。与 Eu-Sr 系统相比, Ba-Sr 系统在激光感生碰撞过程中 $|1\rangle$ 态的几率几乎可以忽略, 这也证实了前面的理论分析, 即: $|a_1(t)|^2 \approx 0$ 。

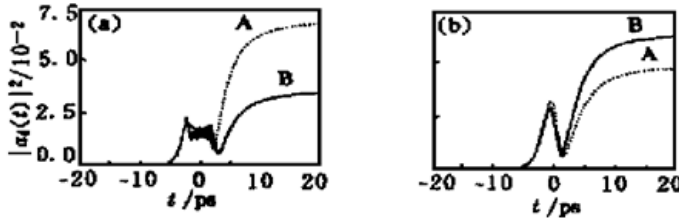


Fig. 3 Behavior of the Ba-Sr final state probability $|a_4(t)|^2$ vs time. The dash line A is calculated from the three-level model, the solid line B is calculated from the four-level model. The detuning $\Delta = 0 \text{ cm}^{-1}$, (a) $b = 1 \text{ nm}$, (b) $b = 1.8 \text{ nm}$.

为了精确确定激光感生碰撞时间, 还计算了碰撞跃迁几率 $|a_4(t)|^2$ 随时间的变化关系。当转换激光严格共振、两原子间的相对运动速度为 600 m/s , 碰撞参数分别为 1 nm 和 1.8 nm 时, 计算得碰撞跃迁几率 $|a_4(t)|^2$ 随时间 t 的变化关系如图 3 所示。其中: 虚线 A 是利用三能级近似理论(在该 Ba-Sr 系统中三个能级是 $|2\rangle$ 态、 $|3\rangle$ 态和 $|4\rangle$ 态)的计算结果^[8,9], 实线 B 是利用四能级理论的计算结果。从图 4 可以看出, 两种

理论模型的计算结果都表明: 碰撞跃迁几率 $|a_4(t)|^2$ 随时间作振荡变化, 但最终都趋于一个常数, 其区别在于它们的相对大小不同; 另外, 碰撞参数 b 越小, 碰撞跃迁几率 $|a_4(t)|^2$ 随时间的振荡变化越剧烈。从图 3 的计算结果来看, 该 Ba-Sr 系统的激光感生碰撞跃迁主要发生在 $-15 \text{ ps} < t < 15 \text{ ps}$ 时间范围之内。

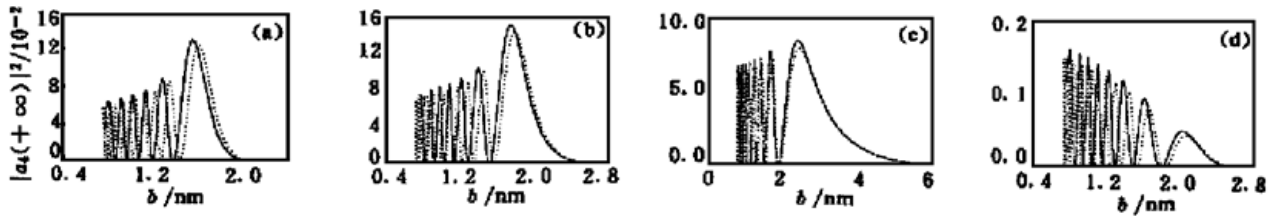


Fig. 4 Comparison of the transition probability $|a_4(+\infty)|^2$ vs impact parameter b at a fixed value of v for the Ba-Sr LICET. The solid line is calculated from the four-level model, the dash line is calculated from the three-level model. (a) $\Delta = -10 \text{ cm}^{-1}$, (b) $\Delta = -5 \text{ cm}^{-1}$, (c) $\Delta = 0 \text{ cm}^{-1}$, (d) $\Delta = 5 \text{ cm}^{-1}$

综合以上计算结果, 我们取 Ba-Sr 系统的激光感生碰撞时间范围为: $-15 \text{ ps} < t < 15 \text{ ps}$ 。

3.2 Ba-Sr 激光感生碰撞跃迁几率

在计算碰撞跃迁几率 $|a_4(+\infty)|^2$ 时, 为了获得足够精确的理论计算值, 可取积分区间为几倍于碰撞时间 ($-45 \text{ ps} < t < 45 \text{ ps}$)。

为了对四能级理论和三能级理论模型进行全面的比较, 计算了两碰撞原子间的相对运动速度为 600 m/s , 改变转换激光失谐量的情况下, 碰撞跃迁几率 $|a_4(+\infty)|^2$ 随碰撞参数 b 的函数关系。图 4 中(a)、(b)、(c)和(d)分别对应于转换激光失谐量为 -10 cm^{-1} 、 -5 cm^{-1} 、 0 cm^{-1} 和 5 cm^{-1} , 其中: 实线是利用四能级理论的计算结果, 虚线为利用三能级理论的计算结果。从图 4 中可以看出, 当转换激光失谐量 $\Delta > 0$ 时, 碰撞跃迁几率 $|a_4(+\infty)|^2$ 的幅值极大值随碰撞参数的增大而减小; 当转换激光失谐量 $\Delta < 0$ 时, 碰撞跃迁几率 $|a_4(+\infty)|^2$ 的幅值极大值随碰撞参数的增大而增大。在转换激光严格共振时($\Delta = 0 \text{ cm}^{-1}$), 碰撞跃迁几率 $|a_4(+\infty)|^2$ 随 b 呈迅速振荡行为, 当 b 值大于 2.5 nm 时, 跃迁几率变得很平滑, 且一直沿伸到 b 为无穷大;

而在转换激光非共振的情况下, 碰撞跃迁几率亦表现为振荡行为, 与共振情况不同的是, 碰撞参数 b 明显存在一个极大值点 b_0 , 当 $b > b_0$ 时, 跃迁几率 $|a_4(+\infty)|^2$ 等于零。

图 4 的计算结果亦表明, 当 b 值较大时, 三能级理论和四能级理论的计算结果吻合得很好, 而当碰撞参数 b 较小时, 两种理论计算值的偏差开始增大; 而且, 随着 b 值的减小, 利用三能级理论计算所得的跃迁几率随碰撞参数 b 振荡较四能级理论来得剧烈。

3.3 Ba-Sr 激光感生碰撞截面的数值计算

通过以上数值计算, 得到了碰撞跃迁几率 $|a_4(+\infty)|^2$ 随碰撞参数的变化关系, 进一步利用 (7) 式就可以得到激光感生碰撞能量转换的碰撞截面随转换激光失谐量 Δ 的变化关系。对于 (12) 式所示 Ba-Sr 激光感生碰撞系统, 计算得激光感生碰撞能量转换的碰撞截面随转换激光失谐量 Δ 的变化关系如图 5 所示。其中: 曲线 A、B、C 和 D 分别对应于两碰撞原子间相对运动速度为 500 m/s、600 m/s、700 m/s 和 800 m/s。为了进行比较, 也利用三能级理论进行了数值计算, 计算结果如图中的虚线所示。可见, 尽管两个理论模型计算所得的碰撞跃迁几率随碰撞参数的变化关系略有差别, 但最终算得的碰撞截面的差别甚小, 两种模型都获得了令人满意的计算结果。这是由于碰撞参数 b 较大处, 碰撞跃迁几率对碰撞截面有较大的贡献。而在碰撞参数 b 较大处, 利用三能级理论和四能级理论计算得的碰撞跃迁几率吻合得较好。计算结果还表明, 该 Ba-Sr 系统的准稳态翼在红端, 它具有 4 cm^{-1} 的调谐范围, 峰值截面位于 $\Delta = -0.6 \text{ cm}^{-1}$ 处。

此外, 在转换激光场强不变时, 两碰撞原子间相对运动速度越大, Ba-Sr 原子间发生激光感生非弹性碰撞的截面就越小, 但两碰撞原子间相对运动速度并不影响碰撞截面最大值位置。

结 论 根据文献[9]的理论分析, 可将原子间的激光感生碰撞能量转移大体上分为三种情况来处理: 1) $|\omega_{21}| \ll |\omega_{43}|$; 2) $|\omega_{21}|$ 值与 $|\omega_{43}|$ 相近; 3) $|\omega_{21}| \gg |\omega_{43}|$ 。对于目前人们所演示的激光感生碰撞能量转移系统(如 Sr-Ca^[11]、Eu-Sr^[3]、Ru-K^[4]等), 大部分都属于上述的第一种情况。在 $|\omega_{21}| \ll |\omega_{43}|$ 时, 理论分析表明, $|3\rangle$ 态在激光感生碰撞过程中基本上不参与作用, 故而四能级理论可过渡到三能级理论, 这也是为什么三能级理论的计算结果与实验普遍吻合得较好的原因所在。然而, 在 $|\omega_{21}|$ 值与 $|\omega_{43}|$ 相近的条件下, 这时 $|1\rangle$ 态和 $|3\rangle$ 态对激光感生碰撞能量转移的贡献都不可忽视, 因而只有利用四能级理论才能获得正确的计算结果。通过 Eu-Sr 系统的数值计算证实了以上的理论分析^[10]。

对于另一种极限情况的激光感生碰撞能量转移: 即 $|\omega_{21}| \gg |\omega_{43}|$, 目前还未见有关理论研究的报道。为了充分验证理论分析的正确性, 本文提出了 Ba-Sr 激光感生碰撞系统。对于该系统, $\omega_{21} = -3638.2 \text{ cm}^{-1}$, $\omega_{43} = -25.6 \text{ cm}^{-1}$ 。该系统特点是: $|\omega_{21}| \gg |\omega_{43}|$, 且 $|1\rangle$ 态和 $|2\rangle$ 态间的偶极-偶极相互作用与 $|\omega_{21}|$ 相比可以忽略(即 $|\omega_{21}| \gg |V_{12}|$)。根据理论分析, $|1\rangle$ 态在激光感生碰撞的过程中基本上不参与作用, 四能级理论可以过渡为三能级近似理论。本文对通过 Ba-Sr 系统的数值计算证实了上述理论分析, 两种理论都获得了令人满意的计算结果。

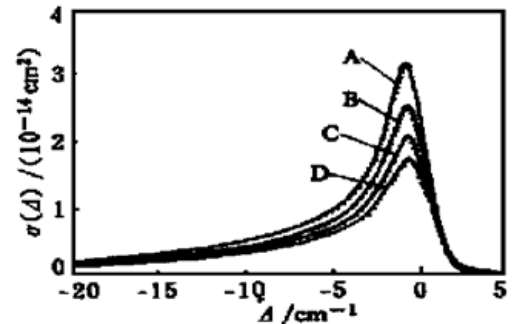


Fig. 5 The Ba-Sr LICET spectrum calculated from four-level model (Solid line) and three-level model (dash line) respectively. A: $v = 500 \text{ m/s}$, B: $v = 600 \text{ m/s}$, C: $v = 700 \text{ m/s}$ and D: $v = 800 \text{ m/s}$.

参考文献

- [1] Lidow D B, Falcone R W, Young J F *et al.*. Inelastic collision induced by intense optical radiation. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, **36**(9): 462~ 464
- [2] Falcone R W, Green W R, White J C *et al.*. Observation of laser-induced inelastic collision. *Phys. Rev. (A)*, 1977, **15**(3): 1333~ 1335
- [3] Brechignac C, Cahuzac P. High-resolution studies on laser-induced collision energy transfer profiles. *Phys. Rev. (A)*, 1980, **21**(6): 1969~ 1974
- [4] Cheron B, Lemery H. Observation of laser-induced collisional energy transfer in a rubidium-potassium mixture. *Opt. Commun.*, 1982, **42**(2): 109~ 112
- [5] Debarre A. High-resolution study of light-induced collisional energy transfer in Na-Ca mixture. *J. Phys. (B)*, 1983, **16**(2): 431~ 436
- [6] Harris S E, White J C. Numerical analysis of laser induced inelastic collisions. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1977, **QE-13**(12): 972~ 979
- [7] Bambini A, Berman P R. Quasistatic wing behavior of collisional-radiative line profiles. *Phys. Rev. (A)*, 1987, **36**(9): 3753~ 3757
- [8] Agresti A. Analysis of the far-wing behavior in the spectrum of the light-induced collisional-energy-transfer process. *Phys. Rev. (A)*, 1988, **38**(5): 2259~ 2273
- [9] 陈德应, 王 骐, 马祖光. 激光感生碰撞能量转移的四能级理论模型. *光学学报*, 1996, **16**(11): 1564~ 1569
- [10] 陈德应, 王 骐, 马祖光. Eu-Sr 中激光感生碰撞能量转移的数值计算. *中国科学*, 1997, **27**(5): 449~ 460

Theoretical Study of Ba-Sr Laser-Induced Collisional Energy Transfer in Weak Field

Cheng Deying Zheng Ruihua Wang Qi Ma Zuguang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronics,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 5 April 1999; revised 30 August 1999)

Abstract The laser-induced collisional energy transfer (LICET) in Ba-Sr system is suggested, which satisfies the condition $|\omega_{21}| \gg |\omega_{43}|$. And the results of numerical calculations of the Ba-Sr system are obtained from the four-level model and the conventional three-level model respectively. The results of numerical calculations in Ba-Sr further prove the theoretical prediction that the four-level model can be simplified as a conventional three-level model if the condition $|\omega_{21}| \gg |\omega_{43}|$ is satisfied.

Key words Ba atom, Sr atom, laser-induced collisional energy transfer, collision cross section.