

异核 Na(3P) + Cs(6P) 系统的 碰撞能量合并*

沈异凡 李万兴

(新疆大学物理系, 乌鲁木齐 830046)

(1995 年 1 月 17 日收到)

置于同一池中的钠原子和铯原子, 分别被连续染料激光器和铯光谱灯激发到 Na(3P), Cs(6P), Na(3P) 原子密度由吸收等效宽度技术来测定. 利用调制技术, 分离出了由异核碰撞产生的荧光光谱. 观察到了 Na(3P) 和 Cs(6P) 间的碰撞能量合并现象, 并测定了其碰撞截面.

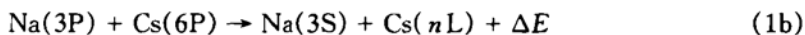
PACC: 3450; 3250

1 引 言

激发态原子之间的碰撞转移过程, 可以给出原子相互作用势的许多信息, 因此引起国内外许多作者的兴趣. 碰撞能量合并是指两个激发态原子碰撞, 其中一个原子的电子能量转移到另一个原子上后该原子回到基态, 而另一个原子则由于得到能量而处于更高的激发态. 自从 Allegrini 等^[1]首先在钠蒸气中证实了这种过程后, 大部分实验是在同核碱原子间进行的. 近年来, 已有激发态 Sr 原子间^[2]以及异核 K(4P) + Rb(5P) 等^[3]碰撞能量合并的报道.

只有当两个激发态原子的能量和与更高激发态原子的能量差 $|\Delta E|$ 不大于 $2kT$ 时, 能量合并过程才能有效进行, 如 Na(3P) + Na(3P) 只有 5S, 4D, 4F 能级被有效地布居(这里 4D 表示 $4D_{3/2, 5/2}$ 两个能级, 对 4F 等也同样理解). 而在异核系统中, 可以得到约 60 个能级^[3], 这不仅可以给出更多的原子相互作用信息, 而且便于讨论碰撞截面与能量差 ΔE 的关系.

本工作测量如下异核能量合并过程的碰撞截面:



这里 $n\text{L} = 9\text{P}, 8\text{D}, 10\text{S}, 6\text{F}, 10\text{P}, 9\text{D}$ 等. 图 1 是 Na, Cs 的部分能级图. 水平虚线表示 Na(3P) + Cs($6P_{3/2}$) 的能级和. 带箭头的实线表示将基态原子激发到共振态. 带箭头的虚线表示要探测的谱线.

在钠铯混合样品池中同时将基态原子激发到 Na(3P) 和 Cs(6P) 后, 不仅存在异核

* 国家自然科学基金资助的课题.

Na(3P) + Cs(6P) 碰撞, 同时存在同核 Na(3P) + Na(3P) 和 Cs(6P) + Cs(6P) 的碰撞, 因 Na(3D)Cs(8D, 9D) 等能级位于两个 Cs(6P) 能量和 5000 cm^{-1} 以上, 故 Cs(6P) + Cs(6P) 碰撞对过程 (1) 式不会有影响, 但 Na(3P) + Na(3P) 能量合并产生的 5S, 4D, 4F 等态都位于 Na(3D), Cs(8D) 等以上, 要产生 Na(4F) → Na(3D) 发射或向 Cs(8D) 等态碰撞转移, 为了消除 Na(3P) + Na(3P) 对过程 (1) 式的影响, 将激发 Cs 原子的光用斩波器调制. 这样, 锁相放大器输出的 Na(3D) 和 Cs(8D) 等荧光讯号就仅是由异核碰撞引起的.

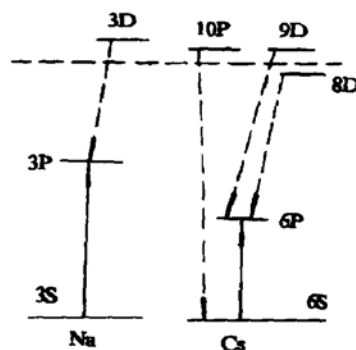


图1 Na, Cs 原子部分能级图

2 实验装置与测量方法

实验装置见图 2. 钠铯混合样品池为圆柱体, GG-17 玻璃材料, 内直径为 1.8 cm, 长为 4.5 cm, 高温烘烤后, 抽真空至 10^{-4} Pa . 因在相同温度下, 铯原子密度比钠原子密度至少大二个数量级, 故在池中充钠和铯的比约为 10:1, 总量为 100mg 左右. 池温控制在 503K.

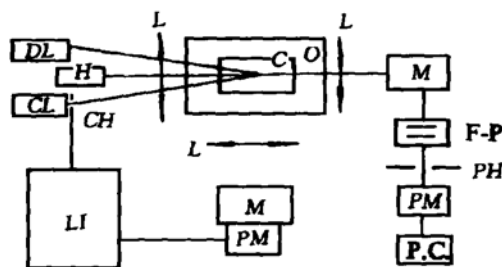


图2 实验装置图 DL 染料激光器, CL 铯光谱灯, H 空

心阴极灯, L 透镜, C 池, O 控温炉, M 扫描单色仪, F-P 标准具, PH 针孔, PM 光电倍增管, P.C. 光子计数器, LI 锁相放大器, CH 斩波器

将染料激光器调到 589.0nm 激发钠原子, 激光功率约 100mW, 激光束直径约 0.8cm. 铯光谱灯发射的谱线经干涉滤光片滤光后, 得到 D_1 (894.3nm) 线或 D_2 (852.1nm) 线, 经斩波器调制, 聚焦到样品池中去激发铯原子. 在垂直于激发光的方向收集激发态原子的荧光, 这些荧光由单色仪分光后, 经光电倍增管进入锁相放大

过程 (1a) 式的稳态速率方程为

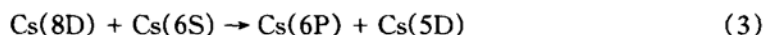
$$k_{3D}[\text{Na}(3P)][\text{Cs}(6P)] = \Gamma_{3D}[\text{Na}(3D)], \quad (2a)$$

即 Na(3D) 的碰撞产生率等于其辐射衰变率, 这里用 $[\]$ 表示方括号内态的原子密度, Γ_{3D} 为 3D 态的辐射率, k_{3D} 为碰撞产生率系数.

过程 (1b) 式的稳态速率方程为

$$k_{nL}[\text{Na}(3P)][\text{Cs}(6P)] = \Gamma_{nL}[\text{Cs}(nL)] + k_{tr}[\text{Cs}(nL)][\text{Cs}(6S)] \quad (2b)$$

即 Cs(nL) 的碰撞产生率等于其辐射衰变率加上向其他能级的碰撞转移率. 转移率系数 k_{tr} 主要是由形如



的过程产生的^[4], 当 Cs 原子密度大于 10^{15} cm^{-3} 时, Γ_{nL} 和 $k_{tr}[\text{Cs}(6S)]$ 有相同的量级^[4]. 而对于 Na(3D), 不会产生类似 (3) 式的过程.

Na3D→3P 荧光与 Cs6P→6S 的荧光强度比为

$$\frac{I_{3D \rightarrow 3P}}{I_{6P \rightarrow 6S}} = \frac{\Gamma_{3D \rightarrow 3P} [Na(3D)] \epsilon_{3D \rightarrow 3P} h \nu_{3D \rightarrow 3P}}{\Gamma_{6P \rightarrow 6S} [Cs(6P)] \epsilon_{6P \rightarrow 6S} h \nu_{6P \rightarrow 6S}} = \frac{k_{3D} [Na(3P)] \epsilon_{3D \rightarrow 3P} \nu_{3D \rightarrow 3P}}{\Gamma_{6P \rightarrow 6S} \epsilon_{6P \rightarrow 6S} \nu_{6P \rightarrow 6S}}, \quad (4a)$$

上式第 2 个等式中利用了(2a)式和 $\Gamma_{3D \rightarrow 3P} = \Gamma_{3D}$, ϵ 是探测系统对不同波长的光谱响应因子, Γ 为有效辐射率. Cs $nL \rightarrow n_1L_1$ 与 Cs 6P→6S 的荧光强度比为

$$\begin{aligned} \frac{I_{nL \rightarrow n_1L_1}}{I_{6P \rightarrow 6S}} &= \frac{\Gamma_{nL \rightarrow n_1L_1} [Cs(nL)] \epsilon_{nL \rightarrow n_1L_1} h \nu_{nL \rightarrow n_1L_1}}{\Gamma_{6P \rightarrow 6S} [Cs(6P)] \epsilon_{6P \rightarrow 6S} h \nu_{6P \rightarrow 6S}} \\ &= \frac{\Gamma_{nL \rightarrow n_1L_1} k_{nL} [Na(3P)] \epsilon_{nL \rightarrow n_1L_1} \nu_{nL \rightarrow n_1L_1}}{\Gamma_{6P \rightarrow 6S} \{ \Gamma_{nL} + k_{tr} [Cs(6S)] \} \epsilon_{6P \rightarrow 6S} \nu_{6P \rightarrow 6S}}, \end{aligned} \quad (4b)$$

从(4a)和(4b)式得到

$$k_{3D} = \frac{\Gamma_{6P \rightarrow 6S} \epsilon_{6P \rightarrow 6S} \nu_{6P \rightarrow 6S}}{[Na(3P)] \epsilon_{3D \rightarrow 3P} \nu_{3D \rightarrow 3P}} \frac{I_{3D \rightarrow 3P}}{I_{6P \rightarrow 6S}}, \quad (5a)$$

$$k_{nL} = \frac{\Gamma_{6P \rightarrow 6S} \{ \Gamma_{nL} + k_{tr} [Cs(6S)] \} \epsilon_{6P \rightarrow 6S} \nu_{6P \rightarrow 6S}}{\Gamma_{nL \rightarrow n_1L_1} [Na(3P)] \epsilon_{nL \rightarrow n_1L_1} \nu_{nL \rightarrow n_1L_1}} \frac{I_{nL \rightarrow n_1L_1}}{I_{6P \rightarrow 6S}}. \quad (5b)$$

Na(3P)原子密度利用吸收等效宽度技术得到,由扫描单色仪, F-P 标准具, 光子计数器测得从钠空阴灯发出的漫线系谱线的多普勒宽度,并测量吸收系数,即可得 Na(3P)原子密度,这在文献[5]中已详细描述. 光谱响应因子比利用已知光谱发射率的钨带灯测得. 在 503K 时,由蒸气压公式得 $[Cs(6S)]$ 为 $4.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. 在这样高的铯原子密度下,由 Holstein 理论算出 6P→6S 的有效辐射率 $\Gamma = 8 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 并与密度无关^[6].

3 结果与讨论

实验没有探测到 Na5S→3P(616.1 和 615.4 nm), 4D→3P(569.0 和 568.4 nm)谱线,说明利用调制技术确把 Na(3P)原子同核碰撞的影响消除了.

对于过程(1a)式,如用 CsD₁(894.1 nm)线抽运,则 $|\Delta E| = 1027 \text{ cm}^{-1}$, 超过 $3kT$, 而且(1a)式是吸热反应,探测不到 Na3D→3P 荧光. 当用 CsD₂(852.3 nm)线抽运时, $|\Delta E| = 473 \text{ cm}^{-1}$ 小于 $2kT$, 探测到了荧光 $I_{3D \rightarrow 3P}$ (包括 $3D \rightarrow 3P_{3/2}$ 和 $3D_{3/2} \rightarrow 3P_{1/2}$ 二部分荧光). 由测得的荧光比 $I_{3D \rightarrow 3P} / I_{6P_{3/2} \rightarrow 6S}$, 由(5a)式并利用 $k_{3D} = \sigma_{3D} \nu$ 和 $\nu = (8kT/\mu\pi)^{1/2}$ 得到过程(1a)式碰撞转移截面 σ_{3D} , 见表 1.

表 1 σ_{3D} 的确定

$\frac{I_{3D \rightarrow 3P}}{I_{6P_{3/2} \rightarrow 6S}}$	$\Gamma_{6P_{3/2} \rightarrow 6S}$	$[Na(3P)]$	$\epsilon_{6P_{3/2} \rightarrow 6S}$	$\nu_{6P_{3/2} \rightarrow 6S}$	σ_{3D}
			$\epsilon_{3D \rightarrow 3P}$	$\nu_{3D \rightarrow 3P}$	
1.24×10^{-3}	$8 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$	$1.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$	0.93	0.96	$1.1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$

上表中, 荧光强度比误差为 5%, 由计算得到的 Γ 与实验结果的差别在 15% 以内^[7], Na(3P)密度误差为 23%^[5], 光谱响应比误差为 5%, 故 σ_{3D} 的均方误差为 29%.

对于过程(1b)式, 如果用 CsD₂(852.3 nm)线抽运, 则 Na(3P) + Cs(6P_{3/2})的能量和与

Cs(10D) 的能量差 $|\Delta E| = 763 \text{ cm}^{-1}$ 约为 $2 kT$, 故对于 Cs(11P, 10D) 等许多态过程(1b)式都能进行. 这些高能级将通过如 $10D \rightarrow 9P$, $11P \rightarrow 8D$ 发射转移到下能级, 这样, 9D, 8D 等发射的荧光中包含了从高能级来的级联荧光, 为了避免这种情况, 对于过程(1b)式, 用 CsD₁(894.1 nm) 线抽运, 这时 Na(3P) + Cs(6P_{1/2}) 的能量和比 Cs(10D) 低 1330 cm^{-1} , 10D 及其附近的 11P, 7G, 7F 等态难以由过程(1b)式布居. 故 9P, 8D 等发射的荧光中不含有从高能级来的级联荧光.

在用 CsD₁ 线抽运的情况下, 由过程(1b)式得到的 Cs(*n*L) 可以为 Cs(9P, 8D, 10S, 6F, 6G, 6H, 10P, 9D), 其中 6G, 6H 发射红外光谱, 本实验不能探测; 9P, 10P 向 6S 跃迁发射紫外线被玻璃吸收, 而且其有效辐射率(由于辐射陷获)未被测定, 10S-6P, 6F $\rightarrow$ 5D 发射的谱线虽可由本装置探测, 但对于 10S, 6F 态还没有类似过程(3)式的实验研究, 故无法确定(5b)式中的 k_{tr} .

分别测量 Cs8D $\rightarrow$ 6P_{3/2}(621.8, 621.3 nm), Cs9D $\rightarrow$ 6P_{3/2}(584.8, 584.5 nm) 荧光与 Cs6P_{1/2} $\rightarrow$ 6S 的荧光强度比, 利用(5b)式得到 σ_{8D} 和 σ_{9D} , 见表 2.

表 2 σ_{nD} 的确定

<i>n</i> D	$I_{nD \rightarrow 6P_{3/2}}$	$\Gamma_{nD} + k_{tr}^{(4)}[\text{Cs}(6S)]$	$\epsilon_{6P_{1/2} \rightarrow 6S}$	$\nu_{6P_{1/2} \rightarrow 6S}$	σ_{nD}
	$I_{6P_{1/2} \rightarrow 6S}$	$\Gamma_{nD \rightarrow 6P_{3/2}}$	$\epsilon_{nD \rightarrow 6P_{3/2}}$	$\nu_{nD \rightarrow 6P_{3/2}}$	
8D	1.46×10^{-3}	3.8	0.61	0.69	$2.3 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$
9D	3.44×10^{-4}	7.1	0.64	0.65	$1.0 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$

表 2 中, 荧光比误差为 5%, [Cs(6S)] 误差为 10%, k_{tr} 的误差为 25%^[4], Γ_{nD} 的误差为 10%, 光谱响应比误差为 5%, 再加上 Γ (15%) 和 [Na(3P)](23%) 的误差, 总的均方误差为 40%.

本实验中, 还存在有 Cs₂(E) + Cs(6P) $\rightarrow$ Cs₂ + Cs(8D) 等过程, 即基态 Cs₂ 分子被 589.0nm 激光抽运到激发态 Cs₂(E), Cs₂(E) 与 Cs(6P) 碰撞转移到 Cs(8D $\cdots$), 但实验证明^[8]. 这种过程的截面很小, 它不能与过程(1b)式竞争.

- [1] M. Allegrini, G. Alzetta, A. Kopystynska and L. Moi, *Opt. Commun.*, **19**(1976), 96.
- [2] H. G. C. Werij, M. Harris, J. Cooper and A. Gallagher, *Phys. Rev.*, **A43**, (1991), 2237.
- [3] C. Gabbanini, S. Gozzini, G. Squadrito, M. Allegrini and L. Moi, *Phys. Rev.*, **A39**(1989), 6148.
- [4] A. C. Tam, T. Yabuzaki, S. M. Curry, M. Hou and W. Happer, *Phys. Rev.*, **A17**(1978), 1862.
- [5] 沈异凡、李万兴, 物理学报, **42**(1993), 32.
- [6] J. Huennekens and A. Gallagher, *Phys. Rev.*, **A28**(1983), 238.
- [7] B. Keramati, M. Masters and J. Huennekens, *Phys. Rev.*, **A39**(1988), 6148.
- [8] 沈异凡、李万兴, 物理学报, **42**(1993), 1767.

ENERGY-POOLING COLLISIONS FOR Na(3P) + Cs(6P) HETERONUCLEAR SYSTEM

SHEN YI-FAN LI WAN-XING

(Department of Physics, Xinjiang University, Urumqi 830046)

(Received 17 January 1995)

ABSTRACT

Two different atomic species-sodium and cesium-have been resonantly excited in a cell by a cw dye laser and a cesium lamp, respectively. The density of the excited Na(3P) atoms in the cell is measured directly using the absorption-equivalent-width technique on the lines of the diffuse series. To isolate the heteronuclear contribution in the fluorescence spectrum, a modulation detection technique has been adopted. The energy-pooling collisions between Na(3P) and Cs(6P) have been observed and cross sections have been measured.

PACC: 3450; 3250