

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0017-03

Rb-Cs 混合蒸气中 Rb(5P)+Cs(5D)碰撞能量合并

沈异凡, 戴康

(新疆大学物理系, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要 测量了 Rb-Cs 混合蒸气中碰撞能量合并过程 $Rb(5P)+Cs(5D) \rightarrow Rb(5S) + Cs(8D)$ 速率系数, 测量利用了已知速率系数的过程[即 $Cs(6P)+Cs(5D) \rightarrow Cs(6S)+Cs(7D_2)$]. 利用激光光解 Rb_2 和 Cs_2 分子, 得到 $Cs(6P,5D)$ 和 $Rb(5P)$ 态原子, 探测由光解离产生的激发态原子与由碰撞转移产生的激发态原子的荧光的相对强度, 结合 $Cs(6P)$ 和 $Rb(5P)$ 态的有效寿命, 得到异核碰撞能量合并速率系数为 $5.4 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$. 讨论了其它过程对速率系数的影响.

关键词 激光物理; 能量合并; 异核碰撞; 荧光; 速率系数

中图分类号 O562.5

文献标识码 A

Energy Pooling Collisions for Rb(5P)+Cs(5D) in a Rb-Cs Mixture

SHEN Yi-fan, DAI Kang

(Department of Physics, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

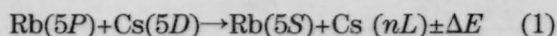
Abstract The rate coefficient for energy-pooling collision $Rb(5P)+Cs(5D) \rightarrow Rb(5S) + Cs(8D)$ in the Rb-Cs vapor mixture has been measured using a known energy-pooling rate coefficient of a homonuclear reaction [i.e., $Cs(6P)+Cs(5D) \rightarrow Cs(6S)+Cs(7D_2)$]. Populations of the $Cs(6P,5D)$ and $Rb(5P)$ states have been produced by photodissociation of Rb_2 and Cs_2 molecules by the use of a dye laser radiation. The resulting fluorescence includes the components emitted in the decay of the excited states produced by photodissociation and the components arising from the collisionally populated excitation-states. By combining relative intensities of the components with $Cs(6P)$, $Rb(5P)$ states effective lifetimes, the rate coefficient for the heteronuclear energy-pooling is obtained to be $5.4 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$. The contribution to the rate coefficient from other processes is discussed.

Key words laser physics; energy-pooling(EP); heteronuclear collision; fluorescence; rate coefficient

1 引言

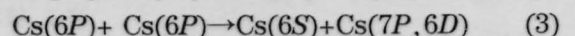
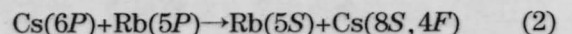
碱金属原子由于其激发态能级较低容易用激光激发, 而且它们的结构相对简单, 因此对其激发态的碰撞能量转移过程进行了大量的研究, 其中最感兴趣的有精细结构碰撞转移, 碰撞能量合并(EP)等, 通过这些研究, 给出了原子-分子相互作用势的很多信息, 也为研制新型激光器、激光同位素分离提供了实验数据。

在碱金属蒸气中, 除了用激光共振激发产生激发态原子外, 也可用激光光解碱分子来产生激发态原子^[1], 研究它们之间的碰撞能量转移。本文研究如下过程



只有当 $Rb(5P)$ 和 $Cs(5D)$ 的能级之和与 nL 能级能量差 ΔE 不超过 $2k_B T$ 时, EP 过程才能有效进行, 本

实验中 $T=473 \text{ K}$, $k_B T=336 \text{ cm}^{-1}$, 因此, 这里的 $nL=8D, 5F, 5G, 9S, 9P$, 但 $5G \rightarrow 4F$ 跃迁位于红外, 实验不能探测。因 $Cs(6S \rightarrow 5D)$ 为电偶极禁戒跃迁, 而 $Cs(6P \rightarrow 5D)$ 跃迁波长为 $3.0 \mu\text{m}$, 因此利用双光子或二步共振激发都较困难, 而利用激光光解 Rb-Cs 混合蒸气, 可得到 $Cs(6P, 5D)$ 和 $Rb(5P)$ 原子, 这时除过程(1)外, 以下过程



也可产生 Cs 的较高激发态^[2], 但过程(2), (3)产生的 $Cs(7P, 6D, 8S, 4F)$ 位于 $8D$ 等态以下, 不会对过程(1)产生影响。

2 速率方程

对于过程(1)在达到稳定时有速率方程

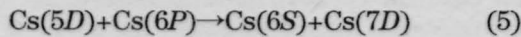
收稿日期: 2003-10-8

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(批准号 10264004)

作者简介: 沈异凡(1944-), 男, 新疆大学物理系教授。主要从事原子分子碰撞方面的研究。E-mail: shenyifan01@sina.com

$$k_j[\text{Cs}]_{5D}[\text{Rb}]_{5P} - \Gamma_j N_j = 0 \quad (4)$$

这里 $[\text{Cs}]_{5D}$, $[\text{Rb}]_{5P}$ 分别表示解离产生的 Cs 及 Rb 为 5D 及 5P 态的原子密度, k_j 为 EP 过程的速率常数, $N_j(j=nL)$ 是过程 (1) 产生的 Cs 激发态原子密度, $\Gamma_j = \sum_{l \neq j} \Gamma_{jl}$ 为 Cs(nL) 态的自发跃迁速率。直接测定 (4) 式中 k_j 需要 Cs(5D) 态原子密度及其空间分布的数据, 但要测量它们是很困难的, 为此利用已知速率系数^[3]的过程



作相对测量。

过程 (5) 的稳态速率方程为

$$k_{7D}[\text{Cs}]_{5D}[\text{Cs}]_{6P} - \Gamma_{7D} N_{7D} = 0 \quad (6)$$

从 (4), (6) 两式得到

$$k_j / k_{7D} = \frac{\Gamma_j [\text{Cs}]_{6P} N_j}{\Gamma_{7D} [\text{Rb}]_{5P} N_{7D}} \quad (7)$$

被测量的荧光强度由下式给出

$$I_{mn} = \varepsilon_{mn} h \nu_{mn} \Gamma_{mn} N_m V \frac{\Omega}{4\pi} \quad (8)$$

ε_{mn} 是探测系统的光谱响应因子, V 为检测荧光的体积, Ω 为观测的立体角, Γ_{mn} 为观测方向的有效辐射率。再由分支比

$$\gamma_{mn} = \Gamma_{mn} / \sum_{n \neq m} \Gamma_{mn} \quad (9)$$

从 (7)–(9) 式得到

$$k_j = k_{7D} \left[\frac{\gamma_{jk} \nu_{jk}}{\gamma_{jl} \nu_{jl}} \cdot \frac{\tau_{6P}}{\tau_{5P}} \frac{\nu_{5P}}{\nu_{6P}} \left(\frac{I_{6P}}{I_{5P}} \right)_\varepsilon \left(\frac{I_{6P}}{I_{5P}} \right)_\varepsilon \right] \quad (10)$$

式中 τ_{6P} , τ_{5P} 为 Cs(6P), Rb(5P) 态的有效寿命, 光强 $I_{6P} = I_{6P_{32} \rightarrow 6S} + I_{6P_{12} \rightarrow 6S}$, 而 $I_{5P} = I_{5P_{32} \rightarrow 4S} + I_{5P_{12} \rightarrow 4S}$, 下标 ε 表示经过光谱响应修正, 测得 (10) 式中的光强比及光解离产物的有效寿命, 就可得到 k_j 。表 1 中列出了能量差 ΔE , 相关的跃迁及辐射率的分支比^[4]。因 $9P \rightarrow 6S$ 存在辐射陷获, 难以得到有效辐射率, 而 $5F \rightarrow 5D$ 的跃迁率及 $9S$ 寿命也未见有实验报道, 故它们未在

表 1 被观测的 EP 跃迁的特性参数

Table 1 Characteristic parameters of the observed energy-pooling transitions

System	Level	$\Delta E/\text{cm}^{-1}$	Transition	λ/nm	γ
Rb-Cs	8D(Cs)	393	8D \rightarrow 6P	601.2–621.9	0.52
Cs-Cs	7D _{3/2}	277	7D _{3/2} \rightarrow 6P _{3/2}	698.4	0.16

表 2 Rb-Cs 碰撞能量转移的速率系数和截面

Table 2 Rate coefficient and cross section for energy-transfer collision in Rb-Cs system

Level	$\left(\frac{I_{6P}}{I_{5P}} \right)_\varepsilon$	$\left(\frac{I_{7D}}{I_{7D_{32} \rightarrow 6P_{32}}} \right)_\varepsilon$	$\frac{\gamma_{jk} \nu_{jk}}{\gamma_{jl} \nu_{jl}}$	$k/\text{cm}^3\text{s}^{-1}$	σ/cm^2
8D	0.31	0.43	0.27	5.4×10^{-10}	1.2×10^{-14}

表 1 中列出。

3 实验装置和测量方法

圆柱形玻璃样品池直径 2.5 cm, 长 15 cm, 高温烘烤, 真空度 10^{-4} Pa, 充入 Rb 和 Cs 各数十 mg, 不充任何缓冲气体, 样品池置于一个玻璃容器内, 由电热器加热, 池温保持在 200 °C, 由热电偶监测。

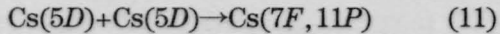
用波长为 590 nm 功率 100 mW 的 Ar⁺ 激光器抽运的染料激光器光解 Rb-Cs 混合蒸气, Cs₂, Rb₂, RbCs 等分子激发态预解离或与基态原子碰撞转移产生 Cs(5D, 6P) 和 Rb(5P) 原子, 这里不用 Ar⁺ 激光器本身的谱线 (465.8, 488.0, 514.5 nm) 激发, 否则要产生 Cs(7S) 原子, 增加问题的复杂性。

在与激光束垂直的方向于同一立体角内探测 I_{6P} (894.3, 852.1 nm), I_{5P} (794.8, 780.0 nm) 及表 1 中列出的相关跃迁线的荧光强度。荧光聚焦在 0.66 m 扫描单色仪的入射狭缝上, 经分光后进入光电倍增管, 光电倍增管冷却到 -40 °C, 其暗计数约为 30 cps, 光信号由光子计数器记录。单色仪在相应谱线峰值附近扫描, 每个光强是 5 次扫描的平均结果。利用已知光谱发射率的钨灯测定探测系统的光谱响应因子。将一个验偏器置于单色仪狭缝前, 发现这些原子荧光都是非偏振的, 这是因为原子激发态产生不是来自激光的共振激发, 而是来自激发态分子的解离和碰撞转移。

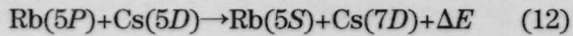
4 结果与讨论

实验中, 池温为 200 °C, Rb(5P) 有效寿命 τ_{5P} 约为其自然寿命的 10 倍, 即 $\tau_{5P} = 300 \pm 45$ ns^[5], 而 Cs(6P) 态有效寿命 τ_{6P} 约为 1 μs ^[6], 速率系数 $k_{7D} = 4.2 \times 10^{-9}$ cm³/s^[8], 测得相应的谱线强度比, 由 (10) 式得到 k_j 和截面 σ_j , 见表 2。

二个 Cs(5D) 原子碰撞, 产生 7F, 11P 等高激发态:



7F, 11P 向 7D, 8D 跃迁, 产生的 7D→6P, 8D→6P 级联荧光会对实验结果造成影响, 但由于 5D 态原子与 6P 态原子数之比约为 $\Gamma_{6P}/\Gamma_{5D}<0.1$, 5D 原子比 6P 原子少, 且 7F, 11P 可向除 7D, 8D 外的多个下能级跃迁, 故跃迁到 7D, 8D 态的粒子数不能与由过程(1)和(5)所产生的粒子数竞争。另外, 以下过程



因 $\Delta E=1370 \text{ cm}^{-1}\approx 4k_B T$, 对 Cs(7D)布居的贡献也是很小的。

文献^[9]给出了放热 EP 速率系数 k 与温度 T , 能量差 ΔE (正值)关系的经验公式

$$k=(5.5\pm 1.7)\exp[-(\Delta E/k_B T)^{1.4\pm 0.2}]\times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s} \quad (13)$$

由此计算得到 $k_{8D}=(2.2\sim 1.0)\times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$, 比本实验得到的结果要大, 因此(13)式不适用于吸热 EP 过程。

参 考 文 献

1 Z Wu, J Huennekens, Predissociation and collisional depopulation of the Cs(2E) state[J]. *J. Chem. Phys.*, 1984, **81**(10):4433-4446

2 F de Tomas, S Milošević, P Verkerk *et al.* Experimental study of caesium $6P_J+6P_J\rightarrow 7P_J+6S$ energy pooling collisions and modeling of the excited atom density in the presense of optical pumping and radiation trapping[J]. *J. Phys. B*, 1997, **30**: 4991-5008

3 Shen Yifan, Li Wan-xing. Energy transfer in collisions between two excited cesium atoms [J]. *Acta Physica Sinica*, 1993, **42**(11): 1766-1773

沈异凡, 李万兴. 激发态铯原子间的碰撞能量转移[J]. *物理学报*, 1993, **42**(11):1766-1773

4 A. C. Tam, T. Yabuzaki, S. M. Curry *et al.* Inelastic cross sections in Cs(n^2D_J)+Cs($6^3S_{1/2}$) collisions [J]. *Phys. Rev.*, 1978, **A17**(6):1862-1868

5 C. Gabbanini, S. Gozzini, G. Squdrino *et al.* Energy pooling collisions for K(4P)+Rb(5P) and Na(3P)+Rb(5P) heteronuclear systems[J]. *Phys. Rev.*, 1989, **A39**(12): 6148-6153

6 T. Yabuzaki, A. C. Tam, M. Hou *et al.* Preferential excitation transfer in Cs*($6D_{3/2}$)-Cs($6S_{1/2}$) collisions [J]. *Opt. Commun.*, 1978, **24**(3): 305-310

7 B. Rberamati, M. Masters, J. Huennekens. Excitation-transfer collisions in cesium vapor: Cs($5D_{5/2}$)+Cs($6S_{1/2}$)→Cs($5D_{3/2}$)+Cs($6S_{1/2}$) [J]. *Phys. Rev.*, 1988, **A38**(9): 4518-4526