

激发态铯原子间的碰撞能量转移*

沈非凡 李万兴

新疆大学物理系, 乌鲁木齐 830046

1992 年 12 月 15 日收到

用激光抽运基态 Cs_2 分子, 通过预离解或碰撞转移, 由一部分的激发态 Cs_2 产生 Cs 原子 6P, 5D 激发态. 测量了 $\text{Cs}(5\text{D}) + \text{Cs}(6\text{P}) \rightarrow \text{Cs}(7\text{D}_J) + \text{Cs}(6\text{S})$ 碰撞激发能量转移截面 $\sigma_{7\text{D}_J}$, 以及 $\text{Cs}(7\text{D}_J) + \text{Cs}(6\text{S}) \rightarrow$ 除 Cs(7D) 外的态的截面 σ_{tr} . 结果是, 对于 $J=5/2, 3/2$, $\sigma_{7\text{D}_J}$ (以 10^{-14}cm^2 为单位, 下同) 分别为 $5.4 \pm 50\%$, $4.9 \pm 50\%$; σ_{tr} 分别为 $1.6 \pm 50\%$, $0.34 \pm 50\%$. 为了得到这些截面值, 探测了 7D_J 和 5D 态发射的荧光强度, 利用等效宽度技术测量了 6P 激发态原子的密度. 对实验结果进行了讨论.

PACC: 3450; 3250

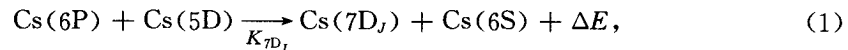
一、引 言

两个激发态原子碰撞, 使一个原子处于更高的激发态, 另一个原子回到基态, 测得这种能量转移过程的速率系数, 可以获得原子之间以及原子与分子之间相互作用势的许多信息.

这类碰撞转移过程, 首先由 Allegrini 等人在钠蒸气中观察到^[1]. 在这以后, 许多作者对碱金属原子激发态碰撞转移速率系数的测量进行了大量的研究. 最近, 在碱土金属铯蒸气中也观察到了这种过程^[2]. 而异核系统 $\text{K}(4\text{P}) + \text{Rb}(5\text{P})$ 和 $\text{Na}(3\text{P}) + \text{Rb}(5\text{P})$ 的碰撞实验研究已有报道^[3].

从实验角度讲, 利用染料激光器, 碱金属原子的第一激发态容易获得. 因此, 一般是研究两个第一激发态原子的碰撞转移问题, 例如 $\text{Na}(3\text{P}) + \text{Na}(3\text{P})$ 和 $\text{Rb}(5\text{P}) + \text{Rb}(5\text{P})$ 等.

本实验研究 Cs 原子不同激发态之间的碰撞能量转移过程,



其中 6P 代表 $6^2\text{P}_{3/2}$ 、 $6^2\text{P}_{1/2}$ 两个态, 5D 代表 $5^2\text{D}_{5/2}$ 、 $5^2\text{D}_{3/2}$, ΔE 为 6P 和 5D 态的能量和与 7D_J 能级之差, $K_{7\text{D}_J}$ 为相应的能量转移速率系数.

图 1 为 Cs 原子的部分激发态能级图. 因 6P 和 5D 各有两个精细结构能级, 故 6P 和 5D 的能量和有 4 个不同的值. 这 4 个值与 7D_{3/2} 仅分别相差 370, 272, 184 和 282 cm^{-1} , 而与 7D_{5/2} 分别相差 391, 294, 163 和 261 cm^{-1} . 在本实验条件下, 原子热运动能量 kT 约为 350 cm^{-1} , 以上的能量差多数小于 kT , 可以预期(1)式中的速率系数是比较大的.

* 国家自然科学基金资助的课题.

为了同时得到 6P 和 5D 激发态原子,用激光将基态 Cs_2 激发到 $\text{Cs}_2(E)$ (E 表示分子

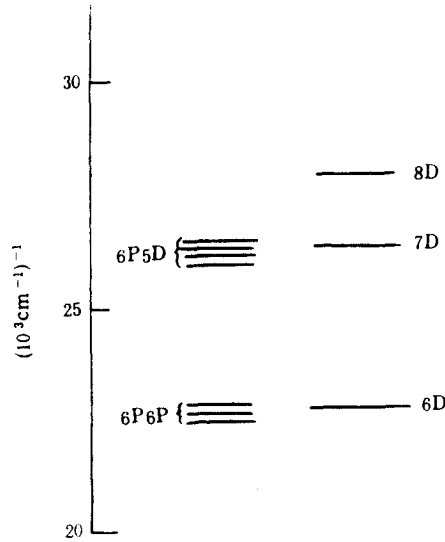


图1 Cs 原子部分激发态能级图 左边为两个激发态原子的能量和;右边为一些 nD 态

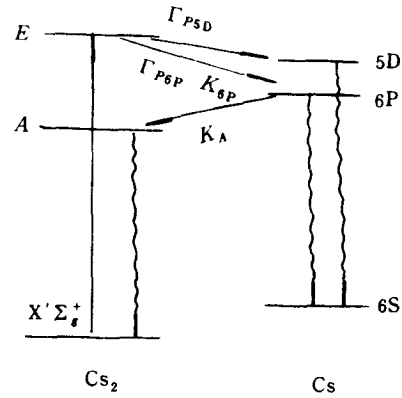
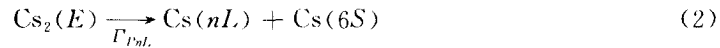
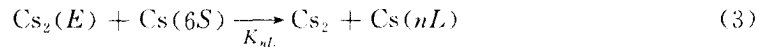


图2 Cs_2 的激发、离解和碰撞转移

较高的激发态),如果 $\text{Cs}_2(E)$ 为预离解的(或直接离解),则



Γ_{nl} 为离解率, nL 表示 6P 和 5D 态. 因本实验使用的激光波长约为 590 nm, 故 Cs 原子其它激发态在激光抽运所能达到的能级之上. 如果 $\text{Cs}_2(E)$ 为束缚的, 则通过碰撞转移



产生激发态原子, K_{nl} 表示转移速率系数. 以上两个过程如图 2 所示. 实验表明^[1], 过程(2)式中的离解率可达到 10 s^{-1} , 过程(3)式中的 K_{nl} 约为 $10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$. 这样产生的 6P、5D 态原子通过碰撞使 7D 态得到布居.

二、速率方程

对于两个处于不同激发态原子的碰撞(本文为 6P 和 5D 态), 其能量转移速率系数(本文为 K_{ij})定义为

$$R_{7D_j} = K_{6P,5D} N(6P) N(5D), \quad (4)$$

R_{7D_j} 为单位体积内 7D_j 的碰撞产生率, $N(6P)$, $N(5D)$ 分别为 6P、5D 态的原子密度.

对于两个处于相同激发态原子的碰撞, 其能量转移速率系数定义为

$$R_{nL} = \frac{1}{2} K_{nl} N^2(nL), \quad (5)$$

因为相同的激发态原子在池中作热碰撞, $N(nL)$ 把碰撞对的数目加倍, 故上式中有一个 1/2 的因子^[2]. 在过去的多数文献中^[3,4] 没有这个因子, 因此他们得到的速率系数(或碰撞

截面)应加倍,本文用到这些数据时将其加倍.

对于过程(1)式,当达到稳定后,有下列速率方程:

$$\begin{aligned} \dot{N}(7D_{5/2}) = 0 = & K_{7D_{5/2}} N(6P)N(5D) + K'_{fs} N(7D_{3/2})N - \Gamma_{7D_{5/2}} N(7D_{5/2}) \\ & - K_{fs} N(7D_{5/2})N - K_{tr} N(7D_{5/2})N, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{N}(7D_{3/2}) = 0 = & K_{7D_{3/2}} N(6P)N(5D) + K_{fs} N(7D_{5/2})N - \Gamma_{7D_{3/2}} N(7D_{3/2}) \\ & - K'_{fs} N(7D_{3/2})N - K'_{tr} N(7D_{3/2})N, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\Gamma_{7D_{5/2}}, \Gamma_{7D_{3/2}}$ 为相应能级总的自然辐射率, N 为基态原子密度, K_{fs}, K'_{fs} 为由以下过程表示的精细结构碰撞转移速率系数:

$$Cs(7D_{5/2}) + Cs(6S) \xrightleftharpoons[K'_{fs}]{K_{fs}} Cs(7D_{3/2}) + Cs(6S), \quad (8)$$

而 K_{tr}, K'_{tr} 分别表示 $Cs(7D_{5/2}) + Cs(6S)$ 和 $Cs(7D_{3/2}) + Cs(6S)$ 碰撞转移到 7D 态以外的原子态(如一个 6P 态, 一个 5D 态, 即过程(1)式的逆过程)的速率系数. 因本实验中基态原子密度 N 较大(在 $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 之间), 而 K_{fs}, K_{tr} 等有 $10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$ 的数量级, 故(6), (7)两式中等号右边第二、四、五项不能略去. 将(6), (7)两式改写为

$$K_{7D_{5/2}} = (K_{fs} + K_{tr}) \frac{N(7D_{5/2})N}{N(5D)N(6P)} + \frac{N(7D_{5/2})\Gamma_{7D_{5/2}}}{N(5D)N(6P)} - \frac{N(7D_{3/2})NK'_{fs}}{N(5D)N(6P)}, \quad (9)$$

$$K_{7D_{3/2}} = (K'_{fs} + K'_{tr}) \frac{N(7D_{3/2})N}{N(5D)N(6P)} + \frac{N(7D_{3/2})\Gamma_{7D_{3/2}}}{N(5D)N(6P)} - \frac{N(7D_{5/2})NK_{fs}}{N(5D)N(6P)}. \quad (10)$$

以上两式中不同温度下的原子密度由 Nesmeyanov 关系式^[8]得到, 精细结构碰撞转移速率系数 K_{fs}, K'_{fs} 已由实验定出^[7], 激发态 6P 原子密度用等效宽度法测得(见本文第三部分). 为了得到 $N(7D_{5/2})/N(5D)$ 和 $N(7D_{3/2})/N(5D)$, 探测在立体角 $d\Omega/4\pi$ 内不同温度时 $7D_{5/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ (697.3 nm), $7D_{3/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ (698.4 nm) 和 $5D \rightarrow 6S$ (包括 685.1, 689.9 nm 两条谱线) 荧光强度, 这里 $5D \rightarrow 6S$ 是电偶极禁戒而电偶极允许的跃迁, 尽管 $5D \rightarrow 6S$ 的辐射率小, 但因光电倍增管工作在可见光区域有很高的信噪比. 而 $5D \rightarrow 6P$ 跃迁的波长(约为 3 μm) 处于红外, 探测灵敏度很低. 谱线的强度比为

$$\frac{I_{7D_{5/2} \rightarrow 6P_{3/2}}}{I_{5D \rightarrow 6S}} = \frac{\epsilon_{7D_{5/2} \rightarrow 6P_{3/2}}}{\epsilon_{5D \rightarrow 6S}} \frac{h\nu_{7D_{5/2} \rightarrow 6P_{3/2}}}{h\nu_{5D \rightarrow 6S}} \frac{\Gamma_{7D_{5/2} \rightarrow 6P_{3/2}}}{\Gamma_{5D \rightarrow 6S}} \frac{N(7D_{5/2})}{N(5D)}, \quad (11)$$

$$\frac{I_{7D_{3/2} \rightarrow 6P_{3/2}}}{I_{5D \rightarrow 6S}} = \frac{\epsilon_{7D_{3/2} \rightarrow 6P_{3/2}}}{\epsilon_{5D \rightarrow 6S}} \frac{h\nu_{7D_{3/2} \rightarrow 6P_{3/2}}}{h\nu_{5D \rightarrow 6S}} \frac{\Gamma_{7D_{3/2} \rightarrow 6P_{3/2}}}{\Gamma_{5D \rightarrow 6S}} \frac{N(7D_{3/2})}{N(5D)}, \quad (12)$$

$\epsilon_{7D_j \rightarrow 6P_{3/2}}/\epsilon_{5D \rightarrow 6S}$ 为探测系统对相应波长的探测效率, 它是由光电倍增管对不同波长的响应不同, 光栅对不同频率光的分光效率不同以及透镜的光谱特性不同而引起的, 可由已知光谱发射率的标准灯测得, ν 为相应谱线的频率. $5D \rightarrow 6S$ 有两条谱线, $I_{5D \rightarrow 6S}$ 为两条谱线的强度和, $\nu_{5D \rightarrow 6S}$ 取它们的平均频率, $\epsilon_{5D \rightarrow 6S}$ 为其平均波长的探测效率. $\Gamma_{7D_j \rightarrow 6P_{3/2}}, \Gamma_{7D \rightarrow 6P}$ 为相应跃迁的自然辐射率, 从文献[7, 9]中得到, 故由荧光强度比得到 $N(7D_{5/2})/N(5D)$ 和 $N(7D_{3/2})/N(5D)$ 的数值. 将这些结果代入(9), (10)两式, 可得到 $K_{7D_{5/2}}, K_{tr}$ 和 $K_{7D_{3/2}}, K'_{tr}$.

三、实验装置与测量方法

实验装置如图 3 所示. 铯池是由 GG-17 玻璃材料制成的圆柱体, 它的直径为 18 mm,

长度为 40 mm, 将其高温烘烤去气后, 在真空下蒸馏入纯铯(新疆有色金属总公司提供)约 0.1 g(不充缓冲气体), 把它置于控温炉中加热至 200—250 °C, 这时 Cs_2 的密度约为 10^{13} cm^{-3} [8]. 染料激光器由氩离子激光器(美国 Coherent innova70)抽运, 将波长调到约为 590.0 nm(功率约为 100 mW)去激发基态 Cs_2 以获得激发态 $\text{Cs}(5D)$, $\text{Cs}(6P)$ 原子, 这里不能用氩离子激光器的各条固定谱线(含 465.8, 488.0 和 514.5 nm 等)去直接激发 Cs_2 , 这样要产生 $\text{Cs}(7S)$ 激发态, 增加问题的复杂性.

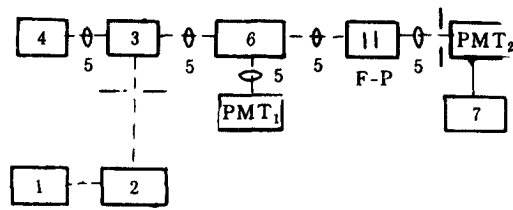


图 3 实验装置 1 为氩离子激光器; 2 为染料激光器, 3 为铯池; 4 为铯空心阴极灯; 5 为透镜; 6 为扫描单色仪; PMT 为带冷却罩的光电倍增管; F-P 为标准具; 7 为光子计数器

在与激光束垂直的方向于同一主体角内探测 $7D \rightarrow 6P_{3/2}$ (697.3, 698.4 nm) 和 $5D \rightarrow 6S$ (685.1, 689.8 nm) 荧光强度, 由 0.66 m 扫描单色仪(美国 ACTON 公司 AM-566 型, 分辨本领为 0.02 nm, 狭缝高度为 5 mm, 宽度为 20 μm). 后随光电倍增管(PMT₁), 光电讯号经甄别放大后由光子计数器记录.

实验中在测量 $5D \rightarrow 6S$ 荧光强度时, 发现有一个分子谱带的背景, 其强度随温度的增加而增加, 这主要是由于存在碰撞转移过程 $\text{Cs}_2 + \text{Cs}(6P) \rightarrow \text{Cs}_2(A) + \text{Cs}(6S)$, 产生了低于 6P 能级的分子激发态 $\text{Cs}_2(A)$, $\text{Cs}_2(A)$ 向基态 $\text{Cs}_2(X^1\Sigma_g^+)$ 跃迁($X^1\Sigma_g^+$ 比 $\text{Cs}(6S)$ 能级低), 产生了 A 带分子荧光, 见图 2. 虽然 $\text{Cs}_2(A)$ 要比 $\text{Cs}(5D)$ 小约 4 个数量级, 但 $5D \rightarrow 6S$ 是电偶极矩禁戒跃迁, 其跃迁率小于 $\text{Cs}_2(A) \rightarrow \text{Cs}_2(X^1\Sigma_g^+)$ 跃迁率约三个数量级(或更小), 故这个背景与 $5D \rightarrow 6S$ 荧光强度相比不能忽略. 因此, 在测量 $5D \rightarrow 6S$ 荧光前, 先在 685.1 和 689.8 nm 两线间测分子带强度(其强度随波长变化不大), 在光子计数器记录 $5D \rightarrow 6S$ 强度时, 把这个分子荧光作为背景扣除.

利用吸收谱线的等效宽度法^[10]测量激发态 6P 原子密度, 这种测量方法文献[11]已有详细描述. 这里使用的是 Cs 空阴灯, 其发射的谱线有约 300 K 的多普勒轮廓, 将空阴灯发出的光聚焦到 Cs 池中心后再聚焦到单色仪狭缝, 由单色仪分出的 621.8 nm 线($8D_{3/2} \rightarrow 6P_{3/2}$)作为吸收线, 高分辨率的 F-P 标准具可测得谱线宽度. 让单色仪在吸收线附近以很慢速度(0.01 nm/min)扫描, 由光子计数器(美国 Princeton 应用研究公司 M-1109)记录透射光强(包括激光照射前后), 可得到吸收谱线轮廓的若干分立点的吸收系数 k_ν . 而激发态原子密度 $N(6P_{3/2})$ 由

$$\int k_{\nu} d\nu = (\lambda_0^2 g_2 / 8\pi g_1 c \tau) N(6P_{3/2}) \quad (13)$$

确定, λ_0 为吸收线中心波长; ν 为吸收线波数; g_2, g_1 为吸收线上、下能级的统计权重; τ 为原子在上能级的寿命, 因使用的吸收线下能级为 $6P_{3/2}$, 故得到的是 $6P_{3/2}$ 的密度. 为得到 $6P_{1/2}$ 态的原子密度, 测量 $6P_{3/2} \rightarrow 6S$ (波长为 λ_2 , 强度为 I_2) 和 $6P_{1/2} \rightarrow 6S$ (波长为 λ_1 , 强度为 I_1) 荧光, 它们的比值

$$I_1/I_2 = \epsilon_1 \lambda_1 \Gamma_1 N(6P_{1/2}) / \epsilon_2 \lambda_2 \Gamma_2 N(6P_{3/2}), \quad (14)$$

Γ_1, Γ_2 分别为 $6P_{1/2}, 6P_{3/2}$ 向 6S 的有效辐射率, 在本实验原子密度条件下, 从辐射陷获理论

得到^[4] $\Gamma_2/\Gamma_1 \approx 1$, 故 $N(6P_{1/2})$ 可由 (14) 式得到. 而 $N(6P) = N(6P_{3/2}) + N(6P_{1/2})$.

本实验在与激光束垂直方向测量不同波长的荧光, 如果荧光是偏振的, 即意味着荧光各向异性发射. 这样, 测量到的谱线强度占其总强度的百分比对不同的谱线就不一样; 另一方面, 探测系统对不同偏振方向的灵敏度也是不同的, 这会造成实验的系统误差. 本实验测量了原子与分子荧光的偏振情况(将验偏器置于单色仪狭缝前), 发现, 分子荧光是部分偏振的(本文不利用分子荧光强度), 而原子荧光是不偏振的, 这也是预料的结果, 因为原子激发态不是由激光直接得到的, 而是由激发态分子的离解和碰撞转移而被布居的.

四、结果与分析

利用已知光谱发射率的标准灯带(与空阴灯处在同一位置, 在图 3 中未画出), 测得探测系统的波长效率为 $\epsilon_{7D_{5/2} \rightarrow 6P_{3/2}}/\epsilon_{5D \rightarrow 6S} = 0.85$, 因 $7D_{3/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ 的波长与 $7D_{5/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ 的波长相差不大. 故 $\epsilon_{7D_{3/2} \rightarrow 6P_{3/2}}/\epsilon_{5D \rightarrow 6S}$ 也取这个数值, 而 $\epsilon_{6P_{3/2} \rightarrow 6S}/\epsilon_{6P_{1/2} \rightarrow 6S}$ (即 (14) 式中的 ϵ_2/ϵ_1) 测定为 1.2.

测量不同温度下 $I_{7D_j \rightarrow 6P_{3/2}}$ 和 $I_{5D \rightarrow 6S}$ 的荧光强度, 把它们代入 (11), (12) 两式, 可得到不同 Cs 原子密度(利用 Nesmeyanov 关系式^[8])时 $N(7D_j)/N(5D)$ 的值, 见图 4.

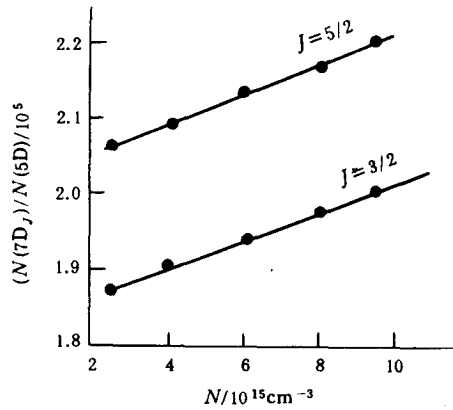


图 4 $N(7D_j)/N(5D)$ 与原子密度的关系

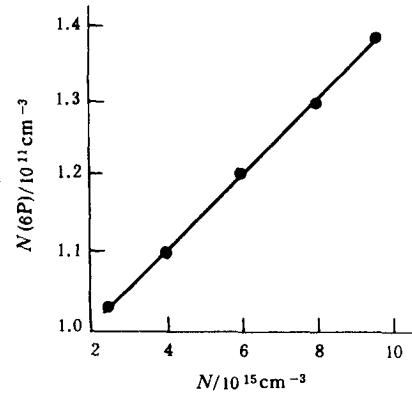


图 5 $N(6P)$ 与原子密度的关系

表 1 不同密度下的测量值

$N/10^{15} \text{ cm}^{-3}$	2.5	4	6	8	9.5
X	0.500	0.760	1.06	1.34	1.51
$Y/10^9 \text{ cm}^3 \text{ S}^{-1}$	1.38	0.953	0.442	0.008	-0.292
X'	0.454	0.691	0.962	1.21	1.38
$Y'/10^9 \text{ cm}^3 \text{ S}^{-1}$	1.32	0.967	0.620	0.180	-0.0650

注: $X = N(7D_{5/2})N/N(5D)N(6P)$; $Y = N(7D_{5/2})\Gamma_{7D_{5/2}}/N(5D)N(6P) - N(7D_{3/2})NK'_{fs}/N(5D)N(6P)$,
 $X' = N(7D_{3/2})N/N(5D)N(6P)$, $Y' = N(7D_{3/2})\Gamma_{7D_{3/2}}/N(5D)N(6P) - N(7D_{5/2})NK_{fs}/N(5D)N(6P)$.

用等效宽度技术和测量 $6P_{3/2} \rightarrow 6S$ 与 $6P_{1/2} \rightarrow 6S$ 荧光比的方法(见本文第三部分), 得

到 $N(6P)$ 与原子密度的关系见图 5.

将在不同密度下的 $N(7D_j)/N(5D)$ 和 $N(6P)$ 的测量值代入 (9), (10) 两式, 并利用^[7] $K_{fs} = 1.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$, $K'_{fs} = 1.4 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$, 得到的结果见表 1.

(9), (10) 两式可简写为 $Y = K_{7D_{5/2}} - (K_{fs} + K_{tr})X$ 与 $Y' = K_{7D_{3/2}} - (K'_{fs} + K'_{tr})X'$. 用最小二乘法拟合得到 (K_{fs}, K'_{fs} 用文献[7]中的值)

$$K_{7D_{5/2}} = 2.2 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}, \quad K_{tr} = 6.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s},$$

$$K_{7D_{3/2}} = 2.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}, \quad K'_{tr} = 1.4 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}.$$

利用 $\sigma = K/\bar{v}$, \bar{v} 为原子碰撞对的平均相对速度, 在本实验的温度范围内 \bar{v} 约为 $4.1 \times 10^4 \text{ cm/s}$, 故相应的截面为

$$\sigma_{7D_{5/2}} = 5.4 \times 10^{-14} \text{ cm}^2, \quad \sigma_{7D_{3/2}} = 4.9 \times 10^{-14} \text{ cm}^2,$$

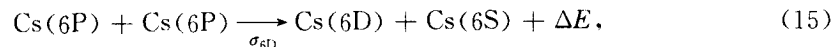
$$\sigma_{tr} = 1.6 \times 10^{-14} \text{ cm}^2, \quad \sigma'_{tr} = 3.4 \times 10^{-15} \text{ cm}^2.$$

从 (11), (12) 两式可得 $N(7D_j)/N(5D)$ 的误差 (均方误差, 下同), 探测效率比的误差约为 5%; 荧光强度比误差约为 5%; $\Gamma_{7D_j \rightarrow 6P_{3/2}}$ 的误差为 5%; $\Gamma_{5D \rightarrow 6S}$ 的误差最大. 一是因为用不同方法得到的此值差别较大^[4]; 一是因为辐射陷获效应, 本实验 Cs 原子密度在 $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 范围内, 共振跃迁的辐射陷获是十分明显的, 其辐射率将减小很多, 如 $\text{Cs } 6P_{1/2} \rightarrow 6S$ 的跃迁, 它的自然辐射率为 $2.9 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, 而有效辐射率 Γ_{6P}^* 为 $8 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ^[12]. 本实验利用 $5D \rightarrow 6S$ 禁戒跃迁, 其吸收振子强度虽然很小, 但因原子密度较大, 也会产生辐射陷获效应, 文献[4]对原子密度小于 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时辐射陷获对 $\Gamma_{5D \rightarrow 6S}$ 的影响进行了计算, 表明其最大影响不超过 30%. 比一般情况要小得多. 本实验原子密度小于 10^{16} cm^{-3} , 故影响还要小, 综合以上考虑, 本文取 $\Gamma_{5D \rightarrow 6P}$ 的误差为 30%. 因此 $N(7D_j)/N(5D)$ 的误差为 32%.

速率系数的误差可从 (9), (10) 两式得到, $N(6P)$ 的测量误差为 23%^[11]; Γ_{7D} 的误差为 10%; K_{fs} 的误差为 20%^[7]; 利用蒸气压曲线^[8] 得到的原子密度产生误差的原因不仅在于蒸气压曲线本身, 还由于温度的测量, 特别是最冷点的温度测量有误差, 多数文献 (例如文献[7]) 对利用这个关系式得到的碱金属原子密度的误差估计, 一般在 15% 到 20% 之间, 本文取 20%. 故本实验测得的速率系数 (或截面) 总的误差为 50%.

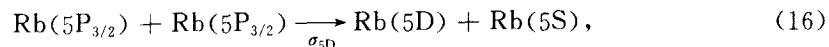
五、讨论

因为未见有过程 (1) 式的其他实验结果, 故不能进行比较. Klyucharev 等人^[13] 测量了如下过程:



得到 σ_{6D} 的上限为 $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$, 上式中的 ΔE 为 231 cm^{-1} , 而过程 (1) 式中的 ΔE 为 163 cm^{-1} , 估计 σ_{7D} 的上限不小于 $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$.

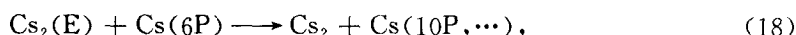
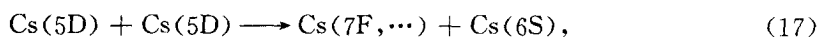
Barbier 等人^[6] 研究了与 Cs 同属重碱金属的 Rb 的如下过程:



得到的截面 $\sigma_{5D} = (6 \pm 3) \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ (已将原文中的截面值加倍, 见本文第二部分), 与本文的 σ_{7D} 值很接近, 且误差也为 50%。

Tam 等人^[7]在测量 $\text{Cs}(nD_{3/2}) + \text{Cs}(6S) \longrightarrow \text{Cs}(nD_{5/2}) + \text{Cs}(6S)$ 精细结构碰撞转移截面时, 还得到了 $nD_{5/2}$ 向其它能级 (除 $nD_{3/2}$) 碰撞转移截面, 对于 $7D_{5/2}$, 有 $\sigma_r = (5.3 \pm 1.5) \times 10^{-14} \text{ cm}^2$, 这个数值约为本文结果的 3 倍, 文献[7]中的 σ_r 是将在 145—200 °C 的温度范围内 $N(7D_{3/2})/N(7D_{5/2})$ 随 $N(\text{Cs}$ 原子密度) 变化的直线向 $N \rightarrow \infty$ 外推得到的. 实际上, 随着 N 的增大, 由于激发态原子间的碰撞转移, 上述的线性关系已不成立, 因此, 其误差一定远大于 25%. 文献[14]中对 $\text{Cs}(6D_{3/2}) + \text{Cs}(6S) \longrightarrow \text{Cs}(6P) + \text{Cs}(6P)$ 作了详细的实验研究, 结果为 $\sigma'_{r'} = (1.5^{+1.5}_{-0.7}) \times 10^{-14} \text{ cm}^2$, 该文忽略了 $6D_{5/2} \xrightleftharpoons{\sigma} 6D_{3/2}$ 的精细结构碰撞转移的影响. 事实上, $\sigma'_{f_s} \approx 1.4\sigma_{f_s} = 3.7 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ ^[7], 故它们的影响 (特别在原子密度较大时) 不能忽略, 略去它们会造成 $\sigma'_{r'}$ 的增大.

在 Cs 池中还会发生如下的一些碰撞过程:



$7F, 10P$ 等能级向 $7D$ 跃迁, 因此会产生 $7D \rightarrow 6P_{3/2}$ 的级联荧光而对本实验结果造成影响. 因 $7F \rightarrow 7D$ 的跃迁处于红外 ($3.2 \mu\text{m}$), 本实验不能直接测量它, 但由于 $5D$ 态原子与 $6P$ 态原子数之比约为^[12] $\Gamma_{6P}^* / \Gamma_{5D} < 0.1$, $5D$ 原子比 $6P$ 原子要少得多, 故由过程(17)式而布居的高激发态 (如 $7F$ 等) 粒子数不很多. 且 $7F$ 等能级可向多个下能级跃迁, 因此跃迁到 $7D$ 态的粒子数不能与由过程(1)式所产生的粒子数竞争.

对于过程(18)式, 即由激光抽运得到的 $\text{Cs}_2(\text{E})$ 激发态和 $6P$ 原子碰撞, 激发态分子回到基态而使 $6P$ 原子到更高的激发态 (如 $10P$ 等), 它们向 $7D$ 跃迁, 其波长也处在红外 ($> 3.7 \mu\text{m}$), 不能直接测量. 为了估计 $10P$ 态的布居, 实验中探测了 $10P \rightarrow 5D$ 的荧光 (波长 706.4 nm), 未见有明显的强度, 这很可能是因为分子比原子有多得多的能级, 故 $\text{Cs}_2(\text{E}) + \text{Cs}(6P)$ 的碰撞主要是得到分子的更高激发态, 而发生过程(18)式的概率很小, 因此, 它对本实验结果的影响也是可忽略的.

[QS1] M. Allegrini, G. Aizetta, K. Kopystynska, L. Moi and G. Orriols, *Opt. Commun.*, **19**(1976), 96.

[QS2] H. G. C. Werij, M. Harris, J. Cooper and A. Gallagher, *Phys. Rev.*, **A43**(1991), 2237.

[QS3] C. Gabbanini, S. Gozzini, G. Squadrito, M. Allegrini and L. Moi, *Phys. Rev.*, **A39**(1989), 6148.

[QS4] Z. Wu and J. Huennekens, *J. Chem. Phys.*, **81**(1984), 4433.

[QS5] J. F. Kelly, M. Harris and A. Gallagher, *Phys. Rev.*, **A38**(1988), 1225.

[QS6] L. Barbier and M. Chéret, *J. Phys. B*, **16**(1983), 3213.

[QS7] A. C. Tam, T. Yabuzaki, M. Curry, M. Hou and W. Happer, *Phys. Rev.*, **A17**(1978), 1862.

[QS8] A. N. Nesmeyanov, *Vapor Pressure of Elements* (Academic, New York, 1963).

[QS9] K. Niemax, *J. Quan. Spectr. Rad. Trans.*, **17**(1977), 125.

[10] A. Corney, *Atomic and Laser Spectroscopy* Oxford U. P. (1977).

[11] 沈非凡, 李万兴, *物理学报*, **42**(1993), 32.

[12] B. Keramati, M. Masters and J. Huennekens, *Phys. Rev.*, **A38**(1988), 4518.

[13] A. N. Klyucharev and A. V. Lazarenko, *Opt. Spectrosc. (USSR)*, **32**(1972), 576.

[14] T. Yabuzaki, A. C. Tam, M. Hou, W. Happer and S. M. Curry, *Opt. Commun.*, **24**(1978), 305.

ENERGY TRANSFER IN COLLISIONS BETWEEN TWO EXCITED CESIUM ATOMS

SHEN YI-FAN LI WAN-XING

Department of Physics, Xinjiang University, Urumqi 830046

(Received 15 December 1992)

ABSTRACT

Cesium molecules are pumped by a CW dye laser. Some of the excited molecules then pre-dissociate or collisionally transfer excitation to produce excited atoms at the 5D and 6P levels. The cross sections (in units of 10^{-14}cm^2) for the excitation transfer process $\text{Cs}(6\text{P}) + \text{Cs}(5\text{D}) \rightarrow \text{Cs}(7\text{D}_J) + \text{Cs}(6\text{S})$ for J being 5/2 and 3/2 are $5.4 \pm 50\%$ and $4.9 \pm 50\%$, respectively. The cross sections (in units of 10^{-14}cm^2) for the excitation transfer out of the 7D doublet [i. e., $\text{Cs}(7\text{D}_J) + \text{Cs}(6\text{S}) \rightarrow$ states other than $\text{Cs}(7\text{D})$] for J being 5/2 and 3/2 are $1.6 \pm 50\%$ and $0.34 \pm 50\%$, respectively. To obtain these cross sections, the intensities of 7D and 5D fluorescence emissions and the 6P atom density are measured by using the absorption equivalent width technique. The results are discussed in comparison with those of other experiments.

PACC: 3450; 3250