

# 激发态铷分子的光离解<sup>y</sup>

沈异凡<sup>1</sup>, 沈 论<sup>2</sup>

(1 新疆大学物理系, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2 上海联合油墨有限公司, 上海 200237)

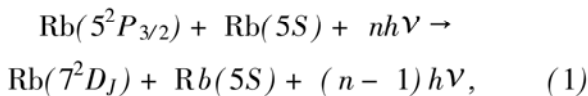
摘 要: 研究了  $\text{Rb}(5^2P_{3/2}) + \text{Rb}(5S) + nh\nu \rightarrow \text{Rb}(7^2D_J) + \text{Rb}(5S) + (n-1)h\nu$  过程, 激光频率  $\nu$  调到  $\text{Rb}7D_{3/2} \rightarrow 5P_{3/2}$  跃迁谱线的两翼  $20-100 \text{ cm}^{-1}$ , 测量了精细结构谱线强度分支比  $I(7D_{3/2} \rightarrow 5P_{1/2})/I(7D_{5/2} \rightarrow 5P_{3/2})$ . 实验表明, 原子相互作用势和非绝热效应在离解动力学中起关键作用.

关键词: 光离解; 精细结构; 分支比

中图分类号: O561.4; O562.4 文献标识码: A

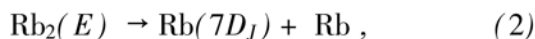
## 1 引言

近年来, 激发态原子之间或者激发态原子与基态原子之间的非弹性碰撞是一个特别活跃的领域<sup>[1]</sup>, 这里染料激光器的应用起关键作用, 光离解过程可以认为是一种原子、分子的光碰撞过程, 在这种非弹性碰撞中, 原子相互作用势对碰撞截面值的大小起本质的作用<sup>[2]</sup>, 本文研究如下过程: 二步激发  $\text{Rb}_2$  分子, 即首先用  $\text{Rb}$  光谱灯的  $D_2$  线将  $\text{Rb}_2$  激发到低激发态, 再把染料激光调到  $\text{Rb}7D_{3/2} \rightarrow 5P_{3/2}$  跃迁的两翼, 将  $\text{Rb}_2$  激发到高激发态, 这个高激发态离解(含预离解)或碰撞转移到  $\text{Rb}7D_{3/2}$  或  $7D_{5/2}$  态, 可用下式表示:



这里  $nh\nu$  表示有  $n$  个频率为  $\nu$  的光子的激光辐射场. (1) 式包含以下几个过程:

$\text{Rb}_2(E)$  分子离解(含预离解)

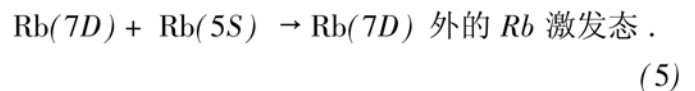
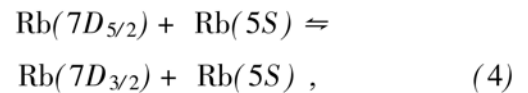


这里  $\text{Rb}_2(E)$  表示高激发态分子.

$\text{Rb}_2(E)$  与  $\text{Rb}$  原子碰撞能量转移



同时存在精细结构碰撞转移和向  $7D$  以外态的碰撞转移



测量谱线强度比  $I(7D_{3/2} \rightarrow 5P_{1/2})/I(7D_{5/2} \rightarrow 5P_{3/2})$ , 可以得到  $\text{Rb}_2(E)$  分子离解到  $7D_{3/2}$  或  $7D_{5/2}$  态的离解率之比.

## 2 速率方程

用  $M, N, n$  分别表示基态  $\text{Rb}$  原子、 $\text{Rb}_2(E)$  分子、 $\text{Rb}(7D)$  态原子密度, (2), (3) 式的稳态速率方程为

$$(\Gamma_d + kM)N - \Gamma_{7D}n = 0, \quad (6)$$

式中,  $\Gamma_d$  为离解率,  $k$  为碰撞转移率,  $\Gamma_{7D}$  为  $\text{Rb}(7D)$  态辐射率.  $\text{Rb}(7D)$  原子荧光与  $\text{Rb}_2(E)$  分子荧光强度比为

$$\frac{I_{7D}}{I_E} = \frac{\Gamma_{7D} h\nu_{7D} \epsilon_{7D} n}{\Gamma_E h\nu_E \epsilon_E N} = \frac{\Gamma_d + kM}{\Gamma_E} \frac{\nu_{7D} \epsilon_{7D}}{\nu_E \epsilon_E}, \quad (7)$$

这里  $\Gamma_E$  为  $\text{Rb}_2(E)$  态辐射率,  $\epsilon$  是探测系统光谱响应因子. 由(7)式得到

<sup>y</sup> 收稿日期: 2002 - 02 - 27; 修改日期: 2002 - 06 - 06

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19864001)

作者简介: 沈异凡(1944-), 男(汉族), 上海人, 教授, 从事原子分子碰撞与光谱的研究.

$$\frac{k}{\Gamma_d} = \frac{\text{slope of } I_{7D}/I_E}{\text{intercept of } I_{7D}/I_E}. \quad (8)$$

由以下的实验结果,  $k/\Gamma_d < 10^{-22} \text{m}^3$ , 故在本实验中, 当 Rb 密度为  $10^{20} \text{m}^{-3}$  量级时,  $kM$  比  $\Gamma_d$  至少小二个量级, 这时 Rb( $7D$ ) 主要由过程(2)产生, 用  $n_1, n_2$  分别表示 Rb( $7D_{3/2}$ ) 与 Rb( $7D_{5/2}$ ) 的原子密度, 有下列速率方程:

$$\Gamma_d^1 N + n_2 Z_{21} = n_1 \left( \frac{1}{\tau_1} + Z_{12} + Z_1 \right), \quad (9)$$

$$\Gamma_d^2 N + n_1 Z_{12} = n_2 \left( \frac{1}{\tau_2} + Z_{21} + Z_2 \right), \quad (10)$$

式中  $\Gamma_d^1, \Gamma_d^2$  分别为 Rb( $7D_{3/2}$ ), Rb( $7D_{5/2}$ ) 的离解产生率,  $\tau_1, \tau_2$  分别为 Rb( $7D_{3/2}$ ), Rb( $7D_{5/2}$ ) 的寿命,  $Z_{12} = \sigma_{12} Mv$  为 Rb( $7D_{3/2} \rightarrow 7D_{5/2}$ ) 转移的非弹性碰撞频率,  $\sigma_{12}$  为  $7D_{3/2} \rightarrow 7D_{5/2}$  碰撞转移截面,  $v = (8kT/\pi\mu)^{1/2}$  是原子碰撞时的平均相对速率,  $\mu$  为碰撞对原子折合质量,  $Z_{21}$  为 Rb( $7D_{5/2} \rightarrow 7D_{3/2}$ ) 转移的非弹性碰撞频率, 由细致平衡原理  $\sigma_{21} = 1/2 \sigma_{12} \exp(\Delta E/kT)$ ,  $Z_1, Z_2$  为向 Rb( $7D$ ) 态以外能级的碰撞转移.

设  $R = n_1/n_2, B = \Gamma_d^1/\Gamma_d^2$ . 由(9), (10) 两式得到:

$$\begin{aligned} & R[1 + (1+B)(\sigma_{12} + \sigma_1)Mv\tau_1] \\ &= \left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)B + (1+B)(\sigma_{21} + \sigma_2)Mv\tau_1, \end{aligned} \quad (11)$$

式中的  $\sigma_{12} + \sigma_1$  可由另一个速率方程得到, 用染料激光的 572.46 nm 线激发 Rb( $5P_{3/2}$ ) 到  $7D_{3/2}$  态, 由精细结构碰撞转移使  $7D_{5/2}$  态得到布居, 而它又通过辐射, 碰撞转移去布居, 达到稳定时有

$$n_1 \sigma_{12} Mv = n_2 \left( \frac{1}{\tau_2} + \sigma_{21} Mv + \sigma_2 Mv \right), \quad (12)$$

上式可改写为

$$R = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{\tau_2 \sigma_{12}} \left| \frac{1}{Mv} \right| + \frac{\sigma_{21} + \sigma_2}{\sigma_{12}}. \quad (13)$$

通过探测荧光比  $I_1(7D_{3/2} \rightarrow 5P_{1/2})/I_2(7D_{5/2} \rightarrow 5P_{3/2})$  得到  $n_1/n_2 = I_1 A_2 / I_2 A_1$ ,  $A_1, A_2$  为相应跃迁的辐射率,  $A_1/A_2, \tau$  可从文献[3]查到. 从(13)式看出,  $n_1/n_2$  与  $(Mv)^{-1}$  成线性关系, 这条直线的斜

率给出  $\sigma_{12}$ , 从该直线的截距得到  $\sigma_{21} + \sigma_2$ , 而  $\sigma_{21}$  由细致平衡原理给出. 令  $(\sigma_{21} + \sigma_2)/(\sigma_{12} + \sigma_1) = \alpha$ , 将(11)式化简得到

$$(R - \alpha)^{-1} = (B - \alpha)^{-1} (1 + \alpha Mv), \quad (14)$$

其中  $\alpha = (\sigma_{12} + \sigma_1)\tau_1(1+B)$ ,  $(R - \alpha)^{-1}$  与 Rb 原子密度成线性关系. 由该直线的斜率得到离解率之比  $B$ , 改变激光频率, 可以得到不同激发频率时  $B$  的值.

### 3 实验装置与测量方法

圆柱形玻璃泡直径为 2.5 cm, 长为 15 cm, 高温烘烤, 真空度  $10^{-4} \text{Pa}$ , 蒸馏入金属 Rb(新疆有色金属总公司提供)约百毫克, 在一个玻璃容器中, 用加热器加热样品池, 池温由热电偶监测. 用 Rb 光谱灯的  $D_2$  线将基态 Rb 原子激发到  $5^2P_{3/2}$  态, 先将池温控制在 300—350 °C 之间. 由  $\text{Ar}^+$  激光器(美 Innova70 型)泵浦的染料激光器(长春光机所 801 型 R6G 染料, 功率约 100 mW)激发 Rb( $5P_{3/2}$ ) 原子, 激光调到 Rb( $7D_{3/2}$ ) 的蓝翼约  $50 \text{cm}^{-1}$  (570.8 nm). 在与激光束垂直的方向探测 Rb( $7D_{3/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ ) (564.78 nm),  $7D_{5/2} \rightarrow 5P_{3/2}$  (572.41 nm) 和  $7D_{3/2} \rightarrow 5P_{3/2}$  (572.46 nm) 荧光强度(分别用  $I_1, I_2$  和  $I_3$  表示), 荧光聚焦在单色仪(美 Acton AM566 型, 分辨率 0.04 nm)的狭缝上, 经单色仪分光后进入光电倍增管(美 31034 型), 这个被冷却的光电倍增管的暗记数约为 30 Hz, 光信号由光子计数器(美 Princeton 1109 型)记录, 并显示在记录仪上.

再将池温控制在 150—200 °C 之间, 然后分两步进行: 第一步用 572.46 nm 线激发 Rb( $5P_{3/2}$ ) 原子到  $7D_{3/2}$  态, 分别探测谱线强度  $I_1$  和  $I_2$ , 谱线峰值比给出  $n_1/n_2$ , 作出  $n_1/n_2$  与  $(Mv)^{-1}$  的关系图可得到  $\sigma_{12}$  和  $\sigma_{21} + \sigma_2$ ; 第二步将激光调到 Rb( $5P_{3/2} \rightarrow 7D_{3/2}$ ) 跃迁的两翼, 把 Rb<sub>2</sub> 低激发态激发到高激发态, 这个高激发态离解到 Rb( $7D_{3/2}$ ) 或  $7D_{5/2}$  态, 用与前面相同的方法测量  $I_1$  和  $I_2$ , 由(14)式可得到离解率之比  $B$ .

### 4 结果与讨论

用 570.8 nm 线激发 Rb<sub>2</sub> 分子(池温在 300—350 °C 之间), 对整个感生荧光光谱扫描得到  $I_E$ , 对  $I_1, I_2$  和  $I_3$  线扫描得到  $I_{7D}$ ,  $I_{7D} = I_1 + I_2 + I_3$ . 图 1

描绘了  $I_{7D}/I_E$  与 Rb 密度的关系, 由该直线的截距和斜率从(8)式得到,  $k/\Gamma_d = 9.1 \times 10^{-23} \text{m}^3$ .

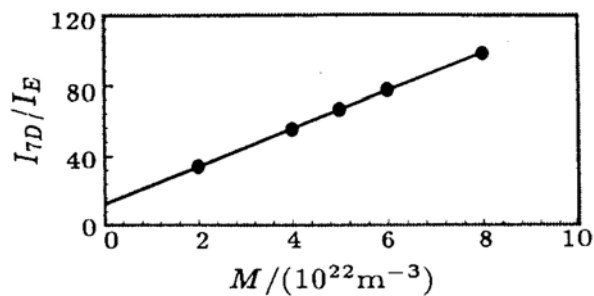


图 1  $I_{7D}/I_E$ 与 Rb 密度的关系(570.8 nm 线激发)

将激光调到  $\text{Rb}7D_{3/2} \rightarrow 5P_{3/2}$  的 572.46 nm(池温在 150—200 °C 之间), 图 2 给出了  $n_1/n_2$  随  $(Mv)^{-1}$  变化的实验结果, 由(13)式, 该直线的斜率为  $\tau_2 \sigma_{12}$ , 截距为  $(\sigma_{21} + \sigma_2)/\sigma_{12}$ , 结果为  $\sigma_{12} = 3.5 \times 10^{-17} \text{m}^2$ ,  $\sigma_{21} = 2.2 \times 10^{-17} \text{m}^2$ ,  $\sigma_2 = 1.0 \times 10^{-17} \text{m}^2$ , 将这些结果代入(14)式得到:

$$(R - 0.71)^{-1} = (B - 0.71)^{-1}(1 + \alpha Mv). \quad (15)$$

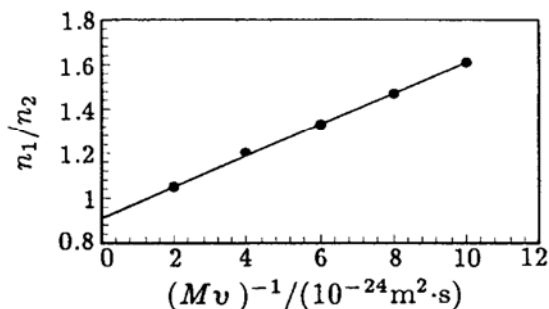


图 2  $n_1/n_2$ 随  $(Mv)^{-1}$  的变化

将激光调到  $\text{Rb}7D_{3/2} \rightarrow 5P_{3/2}$  的两翼  $\Delta$ ,  $\Delta =$  激光频率 -  $\text{Rb}7D_{3/2} \rightarrow 5P_{3/2}$  跃迁频率. 图 3 给出了  $\Delta = -40 \text{cm}^{-1}$  时  $[R - 0.71]^{-1}$  与 Rb 密度的关系, 每个点是对  $\text{Rb}7D_{3/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ ,  $\text{Rb}7D_{5/2} \rightarrow 5P_{3/2}$  线 5 次扫描的平均结果. 可以看出, 在本实验的密度范围内,  $[R - 0.71]^{-1}$  与 Rb 密度确成线形关系, 误差主

要是由光子计数的统计误差造成的. 将直线外推, 由其截距得到  $B = 2.4$ .

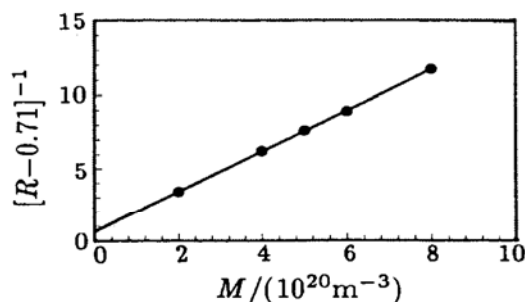


图 3  $[R - 0.71]^{-1}$ 与 Rb 密度的关系( $\Delta = -40 \text{cm}^{-1}$ )

图 4 给出了翼激发的实验结果, 可以看出,  $B$  和失谐量  $\Delta$  有很大的关系. 对于  $\Delta \gg 0$  或  $\Delta \ll 0$ ,  $B$  趋于 0.7, 即  $\text{Rb}7D_{3/2}$  与  $7D_{5/2}$  的统计权重之比, 但在近翼,  $B$  值大, 说明了  $\text{Rb}_2(E)$  态与离解到  $\text{Rb}7D_{3/2}$  和  $\text{Rb}5S$  的态有强的耦合作用.

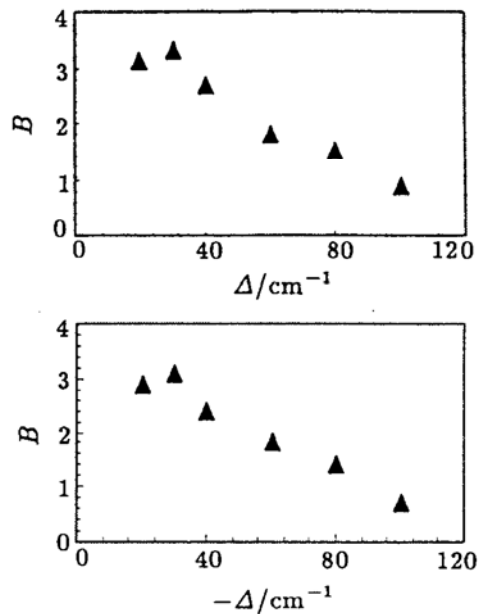


图 4 翼激发时  $B$  与  $\Delta$  的关系

参 考 文 献:

[1] 楼南泉, 朱起鹤, 王秀岩. 态-态反应动力学和原子分子激发态 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1997.  
 [2] Havey M D, Delahanty F T, Vahala L L, et al. Experimental Fine-structure Branching Ratios for Na-rare Gas Optical Collisions[J]. Phys

Rev, 1986, **A34**: 2 748.  
 [3] Wolnikowski J, Atkinson J B, Supronowicz J, et al.  $7^2D_{3/2} - 7^2D_{5/2}$  Excitation Transfer in Rubidium Induced in Collisions with Ground-state Rb and Noble-gas Atoms [J]. Phys Rev, 1982, **A25**: 2 622.

## Photodissociation of the Excited $\text{Rb}_2(E)$ State<sup>\*</sup>

SHEN Yifan<sup>1</sup>, SHEN Lun<sup>2</sup>

(1 Department of Physics, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2 Shanghai Union Printing Ink Co. Ltd., Shanghai 200237, China)

**Abstract:** An experimental study of the process  $\text{Rb}(5^2P_{3/2}) + \text{Rb}(5S) + nh\nu \rightarrow \text{Rb}(7^2D_J) + \text{Rb}(5S) + (n-1)h\nu$  is reported, where  $nh\nu$  represents a radiation field of  $n$  photons having frequency  $\nu$ . The frequency  $\nu$  is tuned in the wings of the  $\text{Rb}7D_{3/2} \rightarrow 5P_{3/2}$  transition. The branching ratio of  $I(7D_{3/2} \rightarrow 5P_{1/2})/I(7D_{5/2} \rightarrow 5P_{1/2})$  has been measured. The measurements show the interatomic potentials and nonadiabatic effects take important roles in the dissociation dynamics.

**Key words:** photodissociation; fine structure; branching ratio

---

(上接第 35 页 continued from page 35)

## Electron-atom Scattering in Multi-chromatic Laser Field<sup>\*\*</sup>

ZHU Zuir-lue, LIU Yur-fang, SUN Jir-feng

(College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University, Xixiang 453001, China)

**Abstract:** Electron scattering from atom in multi-chromatic laser field is investigated by employing the perturbation theory. The relations of differential cross sections of  $e$ -atom scattering, phase and commutative photon are obtained in a special scattering geometry (the incident electron beam is parallel to the polarization direction of the laser field). Our results are consistent with other correlative theories.

**Key words:** differential cross section; multi-chromatic laser field; perturbation theory

---

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(19864001)

\*\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10174019); Natural Science Foundation of Henan Province