

文章编号 : 0258-7025(2002)10-0879-03

# NaK(*E*)态的离解和 Na(*3P<sub>J</sub>*)精细结构分支比

沈异凡, 李万兴

(新疆大学物理系, 新疆乌鲁木齐 830046)

**提要** 研究了  $\text{Na}(3S) + \text{K}(4S) + n h\nu \rightarrow \text{Na}(3P_J) + \text{K}(4S) + (n-1)h\nu$  过程, 激光频率  $\nu$  调到 Na 共振跃迁的两翼, 分支比定义为  $I(D_1)/I(D_2)$ ,  $I(D_1)$ ,  $I(D_2)$  分别是  $\text{Na}D_1, D_2$  线的强度, 在 K 密度  $2 \sim 8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  范围内, 测量了从 Na 共振跃迁的蓝翼  $300 \text{ cm}^{-1}$  到红翼  $100 \text{ cm}^{-1}$  的分支比, 得到了离解率之比和精细结构转移截面, 在近翼, 分支比与  $\nu$  有很大的关系. 用对  $\text{Na}3P_J$  态共振激发的方法, 也得到了精细结构转移截面, 对结果进行了讨论.

**关键词** NaK(*E*)态, 离解, 分支比

中图分类号 O 562.4 ; O 562.5 文献标识码 A

## Dissociation of the NaK(*E*) State and Branching Ratio of the Na(*3P<sub>J</sub>*) Fine-structure Levels

SHEN Yi-fan, LI Wan-xing

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

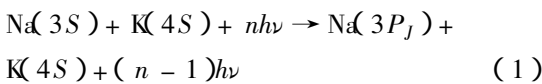
**Abstract** The process studied is  $\text{Na}(3S) + \text{K}(4S) + n h\nu \rightarrow \text{Na}(3P_J) + \text{K}(4S) + (n-1)h\nu$ , where the laser frequency  $\nu$  is tuned in the wings of the Na resonance transition. The branching ratio is defined as  $I(D_1)/I(D_2)$  where  $I(D_1)$  and  $I(D_2)$  are measured intensities of the atomic Na  $D_1$  and  $D_2$  lines, respectively. The branching is determined in the K density range of  $2 \sim 8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ . The ratio is measured for detuning ranging from about  $300 \text{ cm}^{-1}$  in the blue wing to  $100 \text{ cm}^{-1}$  in the red wing of the  $\text{Na}3P$  multiplet. The ratio of dissociation rates and the fine structure changing cross section are obtained. The branching is found to be strongly detuning dependent in the vicinity of the NaK near-wing satellites. Fine structure changing cross section has also been measured for resonant excitation of  $\text{Na}3P_J$  state. The results are discussed.

**Key words** NaK(*E*) state, dissociation, branching ratio

激发态碱分子的离解和碰撞能量转移过程, 作为产生激发态原子的一种机制, 对研制新型激光器有重要的意义, 因此引起人们的很大兴趣<sup>[1]</sup>. 而原子相互作用势和非绝热耦合作用在分子离解、原子精细结构能量转移等过程中起很大的作用<sup>[2]</sup>.

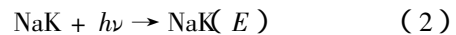
本文研究如下过程:

激光激发 K-Na 混合蒸气



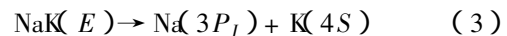
激光频率调谐到  $\text{Na}D_1$ (589.6 nm) 或  $D_2$ (589.0 nm) 线的两翼. (1) 式包含以下几个过程:

1) 基态 NaK 分子被激发

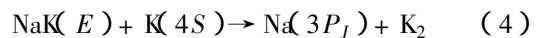


这里  $\text{NaK}(E)$  表示激发态分子.

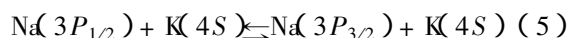
2)  $\text{NaK}(E)$  分子离解 (含预离解)



3)  $\text{NaK}(E)$  与 K 原子的碰撞能量转移



4)  $\text{Na}(3P_J)$  精细结构碰撞转移



测量了  $\text{Na}D_1$  与  $D_2$  线的强度比  $I(D_1)/I(D_2)$  随激光频率  $\nu$  的变化, 研究了分支比与激光频率的

收稿日期 2001-07-25; 收到修改稿日期 2001-10-24

基金项目 国家自然科学基金(编号:19864001)资助项目.

作者简介 沈异凡(1944—)男, 上海市人, 新疆大学物理系教授, 主要从事原子分子碰撞研究. E-mail: shenyifan01@sina.com

关系。

## 1 速率方程

用  $M, N, m$  分别表示基态 K 原子, NaK( $E$ ) 分子, Na3P 态原子密度 (3)(4) 式的稳态速率方程为

$$(\Gamma_d + kM)N - \Gamma_{3P}n = 0 \quad (6)$$

上式中,  $\Gamma_d$  为离解率,  $k$  为碰撞转移率,  $\Gamma_{3P}$  为 Na3P 态辐射率。Na3P 原子荧光与 NaK( $E$ ) 分子荧光强度比为

$$\frac{I_{3P}}{I_E} = \frac{\Gamma_{3P}}{\Gamma_E} \frac{h\nu_{3P}}{h\nu_E} \frac{\epsilon_{3P}}{\epsilon_E} \frac{n}{N} = \frac{\Gamma_d + kM}{\Gamma_E} \frac{\nu_{3P}}{\nu_E} \frac{\epsilon_{3P}}{\epsilon_E} \quad (7)$$

这里  $\Gamma_E$  为 NaK( $E$ ) 态辐射率,  $\epsilon$  为探测系统光谱响应因子。由 (7) 式得到

$$\frac{k}{\Gamma_d} = \frac{\text{slope of } I_{3P}/I_E}{\text{intercept of } I_{3P}/I_E} \quad (8)$$

根据我们的实验结果,  $k/\Gamma_d < 10^{-22} \text{ m}^3$ , 故在本实验中, 当 K 密度为  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  量级时,  $kM$  比  $\Gamma_d$  小二个数量级, 这时 Na3P 主要由过程 (3) 产生, 用  $n_1, n_2$  分别表示 Na3P $_{1/2}$  与 3P $_{3/2}$  的原子密度, 有下列速率方程

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

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

式中  $\Gamma_d^1, \Gamma_d^2$  为 Na3P $_{1/2}$  3P $_{3/2}$  的离解产生率,  $\tau_1, \tau_2$  分别为 Na3P $_{1/2}$  3P $_{3/2}$  的寿命, 在本实验条件下, Na 密度在  $10^{16} \sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$  范围内, 辐射陷获不存在, 故有  $1/\tau_1 = 1/\tau_2 = 6.13 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ ,  $Z_{12} = \sigma_{12}MV$  为 Na3P $_{1/2} \rightarrow 3P_{3/2}$  转移的非弹性碰撞频率,  $\sigma_{12}$  为 3P $_{1/2} \rightarrow 3P_{3/2}$  碰撞转移截面,  $V = (8kT/\pi\mu)^{1/2}$  为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 Na3P $_{3/2} \rightarrow 3P_{1/2}$  转移的非弹性碰撞频率, 由细致平衡原理,  $\sigma_{21} = \frac{1}{2} \sigma_{12} \exp(\Delta E/kT)$ ,  $Z_1, Z_2$  为向 Na3P 态以外能级的碰撞转移, 因 Na3P 态离 Na 的其他能级以及 K 的能级相距很远, 故  $Z_1, Z_2$  可略去, 从 (9)(10) 二式可解得

$$n_1/n_2 = R = (B + \alpha\chi MV)(1 + \chi MV) \quad (11)$$

上式中  $B = \Gamma_d^1/\Gamma_d^2$  是离解率之比,  $\alpha = \frac{1}{2} \exp(\Delta E/kT) \Delta E$  为 Na3P 精细结构裂距, 因  $\Delta E = 17.2 \text{ cm}^{-1}$ , 故  $\alpha = 0.53$ ,  $\chi = \sigma_{12}\tau_1(1 + B)$  将 (11) 式改写为

$$(R - 0.53)^{-1} = (B - 0.53)^{-1}(1 + \chi MV) \quad (12)$$

$R = n_1/n_2$  由测量 NaD $_1$  (589.6 nm) 与 D $_2$  (589.0 nm)

线荧光强度比得到

$$I(D_1)/I(D_2) = n_1 h\nu_1 \epsilon_1 \tau_2 / n_2 h\nu_2 \epsilon_2 \tau_1 \quad (13)$$

因 NaD $_1, D_2$  线 (间隔 0.6 nm) 较接近, 故  $\nu_1/\nu_2 = 1$ ,  $\epsilon_1/\epsilon_2 = 1$ , 由 (12), (13) 两式得到

$$[I(D_1)/I(D_2) - 0.53]^{-1} = (B - 0.53)^{-1}(1 + \chi MV) \quad (14)$$

由上式可看出  $[I(D_1)/I(D_2) - 0.53]^{-1}$  与  $M$  成线性关系, 测量  $I(D_1)/I(D_2)$  随  $M$  变化的关系, 可以得到离解率之比  $B$  以及精细结构转移截面  $\sigma_{12}$ 。

## 2 实验装置与测量方法

实验装置见图 1, 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 K 约百毫克, Na 数毫克, Na 的质量不超过 K-Na 合金的十分之一, 因在相同的温度下, 纯 K 蒸气密度比纯 Na 蒸气密度大二个数量级, 故在本实验条件下, K 原子密度比 Na 原子密度约大三个数量级<sup>[3]</sup>。在一个玻璃容器中, 用加热器加热样品池, 池温控制在 423 ~ 473 K 之间, 池温由热电偶监测。

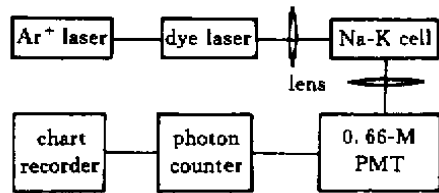


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

实验分两步进行, 第一步, 由 Ar $^+$  激光器 (Innova70 型) 抽运的染料激光器 (801 型 R6G 染料, 功率约 100 mW, 线宽约  $1 \text{ cm}^{-1}$ ) 激发 K-Na 混合蒸气, 激光束直径约 2 mm, 激光频率调到 Na3P 共振跃迁的两翼, 在与激光束垂直的方向探测 NaD $_1$  和 D $_2$  线荧光, 将荧光聚焦到 0.66 m 单色仪 (Acton AM566 型, 分辨率为 0.04 nm) 的狭缝上, 经单色仪分光后进入光电倍增管 (31034 型), 这个被冷却的光电倍增管的暗记数约为 30 Hz, 而最大的荧光信号约 5000 Hz, 单色仪在 NaD 线附近扫描,

光信号由光子计数器( Princeton 1109 型 ) 记录 , 并显示在记录仪上 , 而杂散光及暗记数作为背景扣除 , 谱线的峰值强度比给出了  $(I_{D_1}/I_{D_2})$  的值。

第二步 , 共振激发 NaD 线 , 分别测量共振荧光与转移荧光 , 一个简单的速率分析得到<sup>[4]</sup>

$$Z_{12} = (\eta_2 + \eta_1 \eta_2)(1 - \eta_1 \eta_2)\tau_1 \quad (15)$$

$$Z_{21} = (\eta_1 + \eta_1 \eta_2)(1 - \eta_1 \eta_2)\tau_2 \quad (16)$$

这里  $\eta_1 = I_{D_1}/I_{D_2}, \eta_2 = I_{D_2}/I_{D_1}$ , 分母中的  $I$  是共振荧光的谱线强度 , 分子中的  $I$  是转移荧光谱线强度 , 测量  $\eta_1, \eta_2$  与 K 密度的关系 , 得到精细结构碰撞转移截面 , 可以与由( 14 ) 式用非共振激发得到的截面值相比较。

### 3 结果与讨论

将激光调到 NaD 线的两翼  $\Delta, \Delta = \text{激光频率} - \text{NaD}_2 \text{ 线频率}$  , 在不同 K 密度下测量  $(I_{D_1}/I_{D_2})$  与 K 密度的关系 , 图 2 给出了  $\Delta = -40 \text{ cm}^{-1}$  时  $[I_{D_1}/I_{D_2}] - 0.53$  与 K 密度的关系 , 每个点是对 NaD<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 线 5 次扫描的平均结果 , 其标准误差为 10% ( 误差主要是由光子计数的统计误差造成的 ) 。 可以看出 , 在本实验的密度范围内 ,  $[I_{D_1}/I_{D_2}] - 0.53$  与 K 密度成线性关系。将直线外推 , 由其斜率和截距得到  $B = 3.2, \sigma_{12} = 3.9 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 。

图 3 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 0.5 , 即 Na3P<sub>1/2</sub> 与 3P<sub>3/2</sub> 的统计权重之比 , 但在近翼 , B 值大 , 说明了 NaK( E ) 态与离解到 Na3P<sub>1/2</sub> 和 K4S 的态有强的耦合作用。

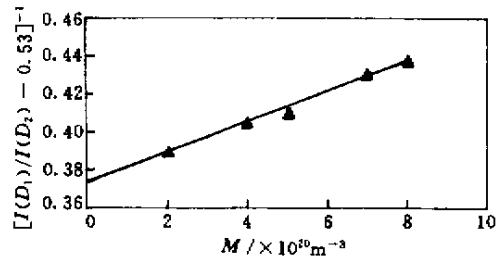


图 2  $[I_{D_1}/I_{D_2}] - 0.53$  与 K 密度的关系 ( $\Delta = -40 \text{ cm}^{-1}$ )

Fig.2 Measured density dependence of  $[I_{D_1}/I_{D_2}] - 0.53$  ( $\Delta = -40 \text{ cm}^{-1}$ )

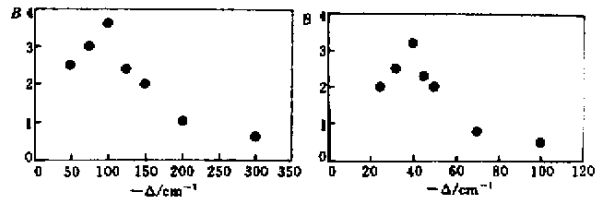


图 3 翼激发时 B 与  $\Delta$  的关系

Fig.3 Branching ratio B vs  $\Delta$  for wing

表 1  $\sigma_{12}$  和  $\sigma_{21}$  的确定

Table 1 Determination of  $\sigma_{12}$  and  $\sigma_{21}$

$\eta_1$	$\eta_2$	$\tau / \text{s}$	$Z_{12} / \text{s}^{-1}$	$Z_{21} / \text{s}^{-1}$	$M / \text{m}^{-3}$	$V / \text{ms}^{-1}$	$\sigma_{12} / \text{m}^2$	$\sigma_{21} / \text{m}^2$
$1.5 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-3}$	$1.63 \times 10^{-8}$	$1.66 \times 10^5$	$9.23 \times 10^4$	$10^{20}$	$7.9 \times 10^2$	$2.1 \times 10^{-18}$	$1.2 \times 10^{-18}$

共振激发 NaD<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> 线 , 测量( 15 ), ( 16 ) 式中的  $\eta_1, \eta_2$  , 得到共振激发的精细结构碰撞转移截面  $\sigma_{12} = 2.1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  , 见表 1 , 它与非共振激发的结果在数量级上是一致的 , 但非共振激发的截面值比共振激发的截面值大。原因如下 : 在共振激发中 , 测得的共振荧光强度中含有 Rayleigh 散射( 非荧光 ) 的成分 , 故分别使( 15 ) 中的  $\eta_2$  与( 16 ) 中的  $\eta_1$  减小 , 从而使  $Z_{12}, Z_{21}$  减小 , 而在非共振激发中 , D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> 线荧光中不包含 Rayleigh 散射的成分。

### 参 考 文 献

1 J. Jabbour, J. Huenekens. A study of the predissociation of

NaK molecules in the  $6\Sigma^+$  state by optical-optical double resonance spectroscopy [ J ]. *Chem. Phys.*, 1997, **107**:1094 ~ 1105

2 M. D. Havey, F. T. Delahanty, L. L. Vahala *et al.*. Experimental fine-structure branching ratios for Na-rare gas optical collisions [ J ]. *Phys. Rev. A*, 1986, **34**:2748 ~ 2766

3 S. Gozzini, S. A. Abdullah, M. Allegrini *et al.*. Heteronuclear energy pooling collisions : the Na( 3P ) + K( 4P ) reaction [ J ]. *Opt. Comm.*, 1987, **63**:97 ~ 102

4 R. W. Berends, W. Kedzierski, L. Krause.  $5^2P_{1/2} - 5^2P_{3/2}$  fine structure mixing in potassium atoms induced by collisions with noble gases [ J ]. *J. Quantum Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1987, **37**:157 ~ 164