

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0014-03

# K-He 光学碰撞精细结构分支比的测定\*

沈非凡 普拉提·艾合买提

(新疆大学物理系, 乌鲁木齐 830046)

**提要** 光学薄的 K 蒸汽和低密度的 He 的混合系统被 570 nm~600 nm 激光激发, K-He 分子激发态离解到 K(4P<sub>1/2</sub>)或 K(4P<sub>3/2</sub>)态, 分支比定义为 I(D<sub>1</sub>)/I(D<sub>2</sub>), I(D<sub>1</sub>), I(D<sub>2</sub>)分别是 KD<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> 线的强度, 在 He 密度(2~8) × 10<sup>23</sup> m<sup>-3</sup> 范围内测量了分支比, 得到了离解率之比和碰撞能量转移截面, 离解率之比约为 0.6 而与激发频率无关。

**关键词** 光碰撞, 离解, 精细结构, 分支比

中图分类号 O562.4; O562.5 文献标识码 A

## Experimental Fine-Structure Branching Ratio for K-He Optical Collision

SHEN Yi-fan Pulati Aihimaiti

(Department of Physics, Xinjiang University, Urumqi 830046)

**Abstract** An optically thin gaseous mixture of K and low-density He is excited by 570 nm~600 nm of the cw dye laser. The excited K-He molecule is dissociated into the K(4P<sub>1/2</sub>) or K(4P<sub>3/2</sub>). The branching ratio is defined as I(D<sub>1</sub>)/I(D<sub>2</sub>) where I(D<sub>1</sub>) and I(D<sub>2</sub>) are measured intensities of the atomic K D<sub>1</sub> and D<sub>2</sub> lines respectively. The branching ratio is determined in the He density range of (2~8) × 10<sup>23</sup> m<sup>-3</sup>. The ratio of dissociation rates and the fine structure changing cross section are obtained. The ratio of the dissociation rates approaches 0.6 as a limit which is independent of the laser frequency.

**Key words** optical collision, dissociation, fine-structure, branching ratio

### 1 引言

激发态分子和原子碰撞过程中的能量转移过程, 由于在理论和应用方面有重要意义, 因此引起国内外作者很大兴趣<sup>[1]</sup>, 而原子相互作用势和非绝热耦合作用在分子离解、光电离、原子精细结构能量转移等过程中起相当大的作用<sup>[2]</sup>, 成为研制新型激光器、激光物理、激光化学等领域的探索前沿。

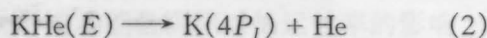
本文研究如下过程:

#### 1.1 激光激发光学薄的 K-He 混合蒸汽

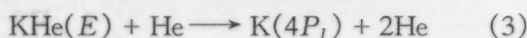


这里 KHe 表示基态分子, KHe(E) 表示激发态分子。

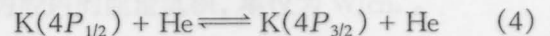
#### 1.2 KHe(E) 分子预离解(含直接离解)



#### 1.3 KHe(E) 与 He 原子的碰撞能量转移



#### 1.4 K(4P<sub>J</sub>) 精细结构碰撞转移



测量 KD<sub>1</sub> 与 D<sub>2</sub> 线的强度比随激发频率  $\nu$  的变化, 研究分支比与激发频率的关系, 本文第 2 节建立 KHe(E) 和 K(4P<sub>J</sub>) 态布居的速率方程, 得到分支比的关系式, 第 3 节描述实验装置和测量方法, 第 4 节给出分支比和碰撞能量转移截面的实验结果。

### 2 速率方程

用 M, N, n 分别表示基态 He 原子, KHe(E) 分子和 K4P 态原子密度, (2) 式、(3) 式的稳态速率方程为

$$(\Gamma_p + kM)N - \Gamma_{4P}n = 0 \quad (5)$$

上式中,  $\Gamma_p$  为预离解率, k 为碰撞转移率,  $\Gamma_{4P}$  为 K4P 态辐射率。K4P 原子荧光与 KHe(E) 分子荧光强度比为

$$\frac{I_{4P}}{I_E} = \frac{\Gamma_{4P} h\nu_{4P} \epsilon_{4P} n}{\Gamma_E h\nu_E \epsilon_E N} = \frac{\Gamma_p + kM}{\Gamma_E} \frac{\nu_{4P} \epsilon_{4P}}{\nu_E \epsilon_E} \quad (6)$$

\* 国家自然科学基金(19864001)资助课题。

这里  $\Gamma_E$  为  $\text{KHe}(E)$  态辐射率,  $\epsilon$  是探测系统光谱响应因子。由(6)式得到

$$\frac{k}{\Gamma_p} = \frac{\text{slope of } I_{4P}/I_E}{\text{intercept of } I_{4P}/I_E} \quad (7)$$

由本文以下的实验结果,  $k/\Gamma_p < 10^{-25} \text{ m}^3$ , 故在本实验中, 当 He 密度为  $10^{22} \text{ m}^{-3}$  量级时,  $kM$  比  $\Gamma_p$  小三个量级, 这时  $\text{K}4P$  主要由(2)式产生, 用  $n_1, n_2$  分别表示  $\text{K}4P_{1/2}$  与  $4P_{3/2}$  原子密度, 有下列速率方程:

$$\Gamma_p^1 N + n_2 Z_{21} = n_1 (1/\tau_1 + Z_{12} + Z_1) \quad (8)$$

$$\Gamma_p^2 N + n_1 Z_{12} = n_2 (1/\tau_2 + Z_{21} + Z_2) \quad (9)$$

式中  $\Gamma_p^1, \Gamma_p^2$  为  $\text{K}4P_{1/2}, 4P_{3/2}$  的离解产生率,  $\tau_1, \tau_2$  分别为  $\text{K}4P_{1/2}, 4P_{3/2}$  的寿命, 在本实验条件下, K 密度在  $10^{16} \sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$  范围内, 辐射陷获不存在, 故有  $1/\tau_1 = 1/\tau_2 = 3.8 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  [3],  $Z_{12} = \sigma_{12} MV$  为  $\text{K}4P_{1/2} \rightarrow 4P_{3/2}$  转移的非弹性碰撞频率,  $\sigma_{12}$  为  $4P_{1/2} \rightarrow 4P_{3/2}$  碰撞能量转移截面,  $V = (8kT/\pi\mu)^{1/2}$  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  $\text{K}4P_{3/2} \rightarrow 4P_{1/2}$  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  $\text{K}4P$  态以外能级的碰撞转移, 因  $\text{K}4P$  态离 K 的其他能级以及 He 的能级相距很远, 故  $Z_1, Z_2$  可略去, 从(8)式、(9)式可解得

$$\frac{n_1}{n_2} = R = \frac{B + \alpha\chi MV}{1 + \chi MV} \quad (10)$$

上式中  $B = \Gamma_p^1/\Gamma_p^2$  是离解率之比,  $\alpha = \frac{1}{2} \exp(\Delta E/kT)$ ,  $\Delta E$  为  $\text{K}4P$  精细结构裂距, 因  $\Delta E = 58 \text{ cm}^{-1}$ , 故  $\alpha = 0.62$ ,  $\chi = \sigma_{12} \tau_1 (1 + B)$ , 将(10)式改写为

$$(R - 0.62)^{-1} = (B - 0.62)^{-1} (1 + \chi MV) \quad (11)$$

$R = n_1/n_2$  由测量  $\text{K}D_1$  与  $D_2$  线荧光强度比得到

$$\frac{I(D_1)}{I(D_2)} = \frac{n_1 h\nu_1 \epsilon_1 \tau_2}{n_2 h\nu_2 \epsilon_2 \tau_1} \quad (12)$$

因  $\text{K}D_1, D_2$  线较接近, 故  $\nu_1/\nu_2 = 1, \epsilon_1/\epsilon_2 = 1$ , 由(11)式、(12)式得到

$$\left[ \frac{I(D_1)}{I(D_2)} - 0.62 \right]^{-1} = (B - 0.62)^{-1} (1 + \chi MV) \quad (13)$$

由上式可看出,  $[I(D_1)/I(D_2) - 0.62]^{-1}$  与  $M$  成线性关系, 测量  $I(D_1)/I(D_2)$  随 He 原子密度  $M$  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  $\sigma_{12}$ 。

### 3 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  $10^{-4} \text{ Pa}$ , 蒸馏入少量金属 K 和充入不同密度的 He。在一个玻璃容器中, 用电热器加热样品池, 池温控制在 373 K, 池温由热电偶监测。

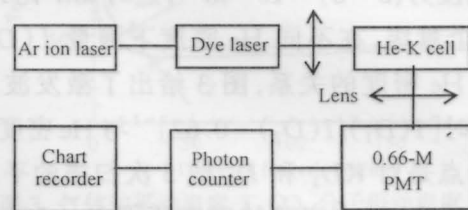


图1 实验装置方框图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

实验分二步进行, 第一步, 在 K-He 样品池中充入  $10^{25} \text{ m}^{-3}$  量级的 He, 由  $\text{Ar}^+$  激光器(美 Innova70 型)的 514.5 nm 线激发 K-He 混合蒸汽。激光功率约 200 mW, 在与激光束垂直的方向探测  $\text{K}D_1$  和  $D_2$  线和  $\text{KHe}(E)$  分子荧光, 荧光聚焦在单色仪(美 Acton AM566 型)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。

第二步, 在 K-He 样品池中充入  $10^{23} \text{ m}^{-3}$  量级的 He, 由  $\text{Ar}^+$  激光器抽运的染料激光器(长春光机所 801 型 R6G 染料, 功率约 100 mW)激发  $\text{KHe}$  分子, 激光束直径约 2 mm, 激光频率调到 570 nm ~ 600 nm 之间, 单色仪在  $\text{K}D$  线附近扫描, 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。

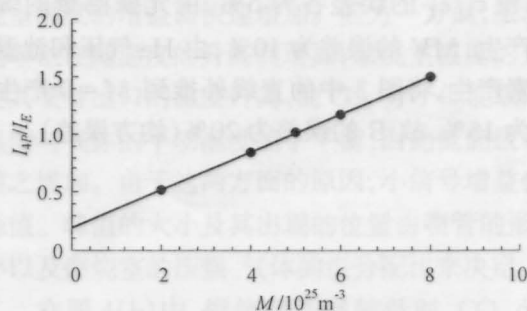


图2  $I_{4P}/I_E$  与 He 密度的关系(514.5 nm 激发)

Fig.2 Measured density dependence of  $I_{4P}/I_E$  with excitation at 514.5 nm

### 4 结果与讨论

用 514.5 nm 线激发 KHe 分子[He 密度在  $(2 \sim 8) \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$  之间],对整个感生荧光光谱扫描得到  $I_E$ ,对  $KD_1, D_2$  线扫描得到  $I_D, I_D = I_{D_1} + I_{D_2}$ 。图 2 描绘了  $I_{4P}/I_E$  与 He 密度的关系,由该直线的截距和斜率从(7)式得到,  $k/\Gamma_p = 8.6 \times 10^{-26} \text{ m}^3$ 。

将激光调到 570 nm~600 nm 之间,充入池中的 He 密度为  $(2 \sim 8) \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ,这时  $kM$  比  $\Gamma_p$  至少小三个量级,在不同 He 密度下测量  $I(D_1)/I(D_2)$  与 He 密度的关系,图 3 给出了激发波长为 600 nm 时  $[I(D_1)/I(D_2) - 0.62]^{-1}$  与 He 密度的关系,每个点是对  $KD_1$  和  $D_2$  线 5 次扫描的平均结果,可以看出,在本实验的密度范围内,  $[I(D_1)/I(D_2) - 0.62]^{-1}$  与 He 密度确成线性关系,误差主要是由光子计数的统计误差造成的。将直线外推,由其斜率和截距得到  $B = 0.65, \sigma_{12} = 5.3 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 。

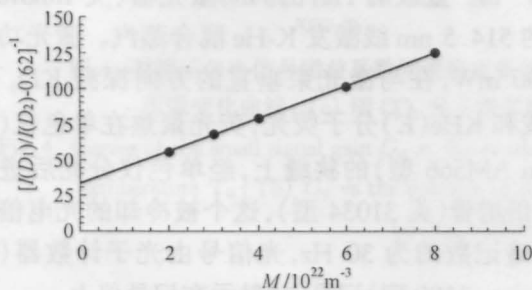


图 3  $[I(D_1)/I(D_2) - 0.62]^{-1}$  与 He 原子密度的关系(600 nm 激发)

Fig. 3 Measured density dependence of  $[I(D_1)/I(D_2) - 0.62]^{-1}$  with excitation at 600 nm

$B$  与激发波长的关系见图 4,  $K4^2P$  二个态的离解产生率之比约为 0.6,因此,  $4P_{3/2}$  比  $4P_{1/2}$  态更多地被布居。 $B$  的误差由(13)式分析得到,  $I(D_1)/I(D_2)$  和  $\epsilon_1/\epsilon_2$  的误差各为 5%,由光强测量的统计误差产生,  $MV$  的误差为 10%,由 He 气压和池温两个因素产生,将图 3 中的直线外推到  $M=0$  产生的误差为 15%,故  $B$  的误差为 20%(均方误差)。

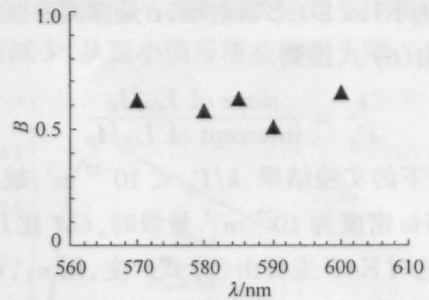


图 4  $B$  与激发波长的关系

Fig. 4 Branching ratio  $B$  vs laser excitation wavelength

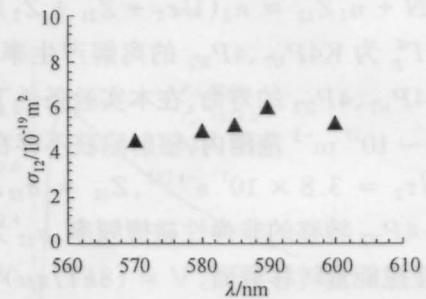


图 5 碰撞能量转移截面与激发波长的关系

Fig. 5  $\sigma_{12}$  vs excitation wavelength

碰撞能量转移截面大小与激发波长的关系见图 5,它的误差为 25%或更大一些,因为它要由图 3 中直线的斜率与截距二者决定,截面平均结果为  $(5.2 \pm 1.3) \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 。与文献[4]中表 3 列出的截面值是一致的。

### 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. 大连:大连理工大学出版社,1997
- 2 M. D. Havey, F. T. Delahanty, L. L. Vahala *et al.*. Experimental Fine-structure Branching Ratios for Na-rare Gas Optical collisions. *Phys. Rev. A*, 1986, **34**: 2748 ~ 2766
- 3 W. L. Wiese, M. W. Smith, B. M. Miles. *Atomic Transition Probabilities* U. S. GPO., Washington D. C., 1969. 228
- 4 J. Cuvellier, P. R. Fournier, F. Gounand *et al.*. Inelastic Collisions Involving Excited Cesium Atoms at Thermal Energies. *Phys. Rev. A*, 1975, **11**: 846 ~ 856