

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_{1/2})或 K(4P_{3/2})态, 分支比定义为 I(D₁)/I(D₂), I(D₁), I(D₂)分别是 KD₁, D₂ 线的强度, 在 He 密度(2~8) × 10²³ m⁻³ 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_{1/2}) or K(4P_{3/2}). The branching ratio is defined as I(D₁)/I(D₂) where I(D₁) and I(D₂) are measured intensities of the atomic K D₁ and D₂ lines respectively. The branching ratio is determined in the He density range of (2~8) × 10²³ m⁻³. 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.

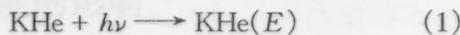
Key words optical collision, dissociation, fine-structure, branching ratio

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^[1], 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^[2], 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。

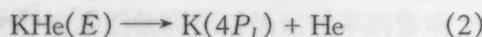
本文研究如下过程:

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_J) 精细结构碰撞转移



测量 KD₁ 与 D₂ 线的强度比随激发频率 ν 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_J) 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, Γ_p 为预离解率, k 为碰撞转移率, Γ_{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 Γ_E 为 $\text{KHe}(E)$ 态辐射率, ϵ 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} m^{-3} 量级时, kM 比 Γ_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 Γ_p^1, Γ_p^2 为 $\text{K}4P_{1/2}, 4P_{3/2}$ 的离解产生率, τ_1, τ_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, σ_{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, μ 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, $\alpha = \frac{1}{2} \exp(\Delta E/kT)$, ΔE 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 σ_{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} 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。

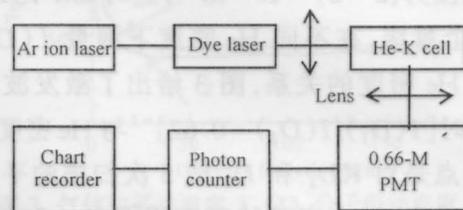


图1 实验装置方框图

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} m^{-3} 量级的 He, 由 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} m^{-3} 量级的 He, 由 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 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。

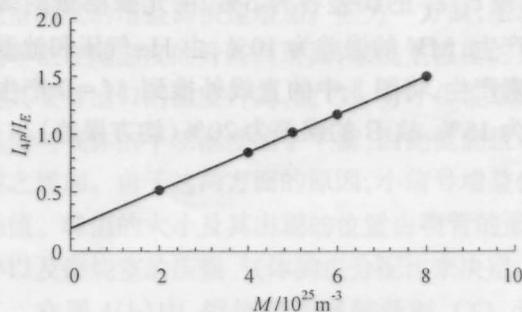


图2 I_{4P}/I_E 与 He 密度的关系(514.5 nm 激发)

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 Γ_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 $B = 0.65, \sigma_{12} = 5.3 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 。

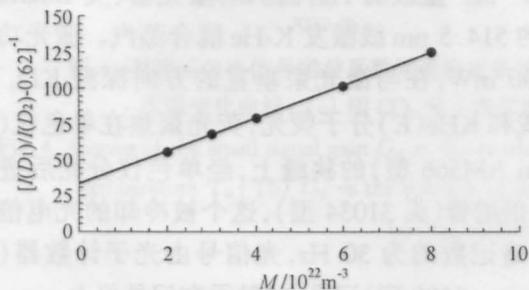


图 3 $[I(D_1)/I(D_2) - 0.62]^{-1}$ 与 He 原子密度的关系(600 nm 激发)

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 ϵ_1/ϵ_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)。

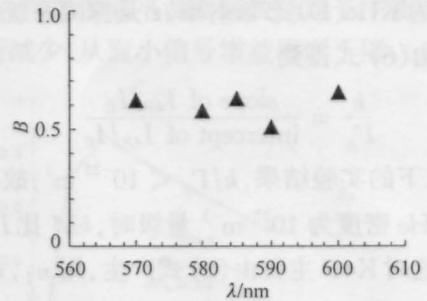


图 4 B 与激发波长的关系

Fig. 4 Branching ratio B vs laser excitation wavelength

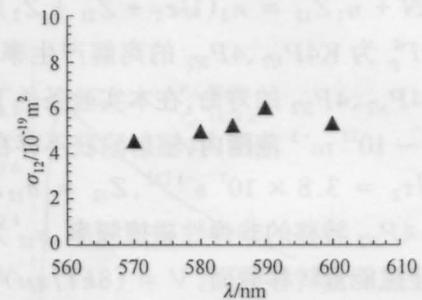


图 5 碰撞能量转移截面与激发波长的关系

Fig. 5 σ_{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