

文章编号: 0258-7025(2001)06-0523-04

# 氩原子参与的钠原子 Energy-pooling 碰撞过程

李永放<sup>1,2</sup> 张衍亮<sup>3</sup> 王永昌<sup>1</sup> 李 华<sup>3</sup> 王祖庚<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 西安交通大学理学院现代物理研究所 西安 710049; <sup>2</sup> 陕西师范大学物理系 西安 710062;   
<sup>3</sup> 教育部量子光学实验室, 中国科学院上海光机所和华东师范大学物理系  
量子光学联合实验室, 华东师范大学物理系 上海 200062)

**提要** 报道了钠原子在有惰性气体氩原子参与的 Energy-pooling 碰撞过程。观察到了由此而产生的分子三重态和原子高位态的紫区受激辐射。实验结果表明, 原子高位态的这种布居过程中角动量也起了一定作用。利用瞬时速率方程拟合了实验结果, 得到了相同的变化规律。

**关键词** Energy-pooling 碰撞, 紫区受激辐射, 钠原子

**中图分类号** O 562.4 **文献标识码** A

## Energy-pooling Collision Process of Atomic Sodium Assisted Argon Gas

LI Yong-fan<sup>1,2</sup> ZHANG Yan-liang<sup>3</sup> WANG Yong-chang<sup>1</sup> LI Hua<sup>3</sup> WANG Zu-geng<sup>3</sup>

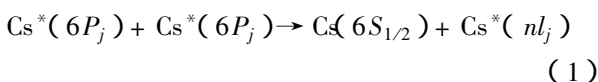
(<sup>1</sup> Institute of Modern Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049  
<sup>2</sup> Department of Physics, Shanxi Normal University, Xi'an 710062  
<sup>3</sup> Lab. for Quantum Optics National Education Commission, Joint Lab. for Quantum Optics,  
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics and East China Normal University,  
Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062)

**Abstract** In this paper, energy-pooling collision process of atomic sodium assisted argon atoms is reported. The stimulation radiation of violet region for the atomic sodium and sodium dimer of triplet state were observed. The experiment results showed that the angle momentum plays an role in the population process of high-lying states. The experiment results were fitted with temporal rate equation.

**Key words** energy-pooling collision process, stimulation radiation, Na atom

### 1 引 言

1972 年 A. N. Klyucharev 和 A. V. Lazarenko 报道了当共振激发铯原子蒸气到  $6P_j$  能级时, 观察到了  $6D$  辐射的荧光, 而  $6D$  态的能级高度接近  $6P_j$  能级的二倍。这种高位态的粒子布居是由激发态—激发态原子碰撞过程产生的。这一过程相当于两个激发态原子集聚它们的能量与其他原子碰撞, 产生一个基态原子和一个激发态原子。可写成



人们把这种类型的碰撞过程称为 Energy-pooling 碰撞过程, 简称 EP 碰撞过程。在过去 20 多年里主要研究对象大多集中在同核及异核碱金属原子和其他金属原子当中。研究的内容也从一般的结果报道到有理论及实验的对碰撞截面和速度的详细研究。1983 年 M. Allegrini 等<sup>[1]</sup>报道了钠原子的 EP 碰撞过程中  $5S$  和  $4D$  态获得粒子布居的碰撞参数。1996 和 1997 年 Z. J. Jabbour 和 R. K. Namiotka<sup>[2,3]</sup>等更详细地研究了钾原子和铯原子的 EP 碰撞过程。

EP 碰撞过程是个十分复杂的过程。高位态的粒子布居既可以由碰撞产生也可以通过电离复合而产生。而辐射过程也会受到多种因素的影响, 如辐射捕获、串级辐射及光抽运过程等。过去人们大多

研究的是没有第二种原子参与的 EP 碰撞,并通过观察荧光辐射来确定各能态的粒子分布。我们较为细致地研究了钠原子在惰性气体氩原子参与下的 EP 碰撞过程,通过观察钠原子和分子高位态产生的受激辐射来确定这一过程中的高能态粒子分布,以及粒子分布状态受氩气的影响。实验结果表明,EP 碰撞过程对高位态的粒子布居的几率大小不完全符合越接近二倍的  $Na(3P_j)$  能级,粒子分布几率越大的规律,且发现  $Na(nD)$  态的粒子布居几率要大于  $Na(nS)$  态,即粒子的布居有着一定的选择性。在理论上我们利用瞬时速率方程对实验结果进行了拟合,得到了和实验结果相一致的变化规律。

## 2 实验与结果

实验中用十字型热管炉为样品池产生钠原子和分子,加热区长约 15 cm。YAG:  $Nd^{3+}$  激光抽运的染料激光束聚焦在样品池中心。激光脉冲的重复频率为 10 Hz,脉冲宽度约为 10 ns,以 R590 为染料的染料激光器的输出线宽为  $0.3 \text{ cm}^{-1}$ 。纵向探测的受激辐射信号经滤光后进入单色仪,光电倍增管(PMT)接收,计算机处理信号。实验装置如图 1 所示。

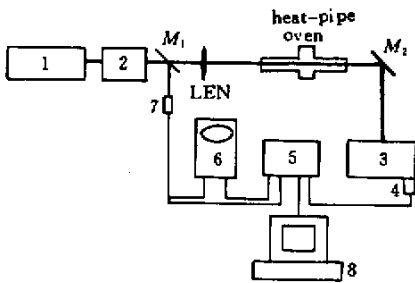


图 1 钠原子 EP 过程的实验装置

$M_1$ : 分束镜;  $M_2$ : 反射镜; 1: YAG 激光器; 2: 染料激光器;  
3: 单色仪; 4: 光电倍增管; 5: Boxcar 积分仪; 6: 示波器;  
7: 触发器; 8: 计算机

Fig. 1 Experiment setup for the energy-pooling process of the atomic sodium

$M_1$ : beam splitter;  $M_2$ : reflector; 1: YAG laser; 2: dye laser;  
3: monochromator; 4: PMT; 5: Boxcar; 6: oscilloscope;  
7: trigger; 8: computer

实验中激发光波长分别调到 589.0 nm 和 589.6 nm,激发光能量为 2.5 mJ,当温度为  $400^\circ\text{C}$  时观察紫光区的受激辐射信号。激发和辐射机制如图 2 所示。图中虚线为二倍的  $Na(3P_{1/2}, 3P_{3/2})$  能量高度。当以 589.0 nm 激发钠原子到  $Na(3P_{3/2})$  态时,受激辐射信号为 Na 原子从高位态  $Na(nD, nS)$  到

$Na(3P_{1/2})$  的跃迁。同样以 589.6 nm 激发原子到  $Na(3P_{1/2})$  时受激辐射是从  $Na(nD, nS)$  到  $Na(3P_{3/2})$  的跃迁。可以写成

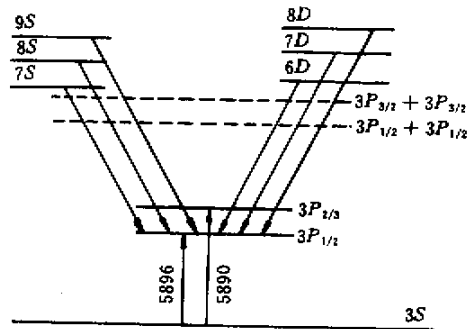
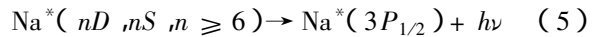
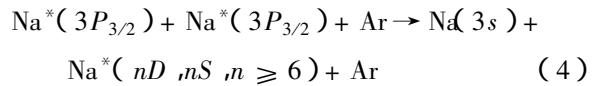
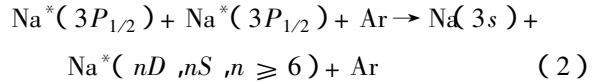


图 2 钠原子 EP 过程的部分能级及跃迁示意图  
图中的两条水平虚线表示两个  $3P$  能级的二倍能量位置

Fig. 2 Na energy-level diagram with the involved levels and transitions

The horizontal dash lines represent the double of the  $3P$ -levels energy

图 3 表示温度为  $400^\circ\text{C}$ ,样品池内充入 6000 Pa 氩气时钠原子的受激辐射谱。可以看到,589.0 nm 激发时的信号强于 589.6 nm 激发,且  $Na(nD)$  辐射大于  $Na(nS)$ ,  $Na(7D, 6D-3P)$  的辐射较强,相对应的能级高度与二倍的  $Na(3P_{1/2}, 3P_{3/2})$  能量高度差分别大于  $Na(7S, 8S)$ ,如图 2 所示。 $413.0 \sim 440.0 \text{ nm}$  的辐射对应着钠分子  $2^3\Pi_g-a^3\Sigma_u$  的辐射<sup>[4]</sup>。在 589.6 nm 激发时原子的高位态辐射信号较弱,反衬着分子辐射更明显。我们也观察了温度变化时的辐射情况。当温度为  $360^\circ\text{C}$  时,589.0 nm 激发时产生的 441.9 nm ( $Na(9S)-Na(3P_{3/2})$ ) 辐射较强,随着温度的升高而迅速变小。 $8D, 9D$  及  $6D$  态的辐射随着温度的升高有明显的增强,特别是  $466.5 \text{ nm}$  ( $Na(6D)-Na(3P_{3/2})$ ) 辐射更为明显。这表明  $Na(nS)$  态的粒子布居和  $Na(nD)$  相比受外界环境影响较大。分子辐射强度随着温度的升高而增加。图 4 表示辐射信号随氩气的变化情况,可以看到无论是强度大小还是变化规律图 4(a) 和 (b) 两者皆不相

同。

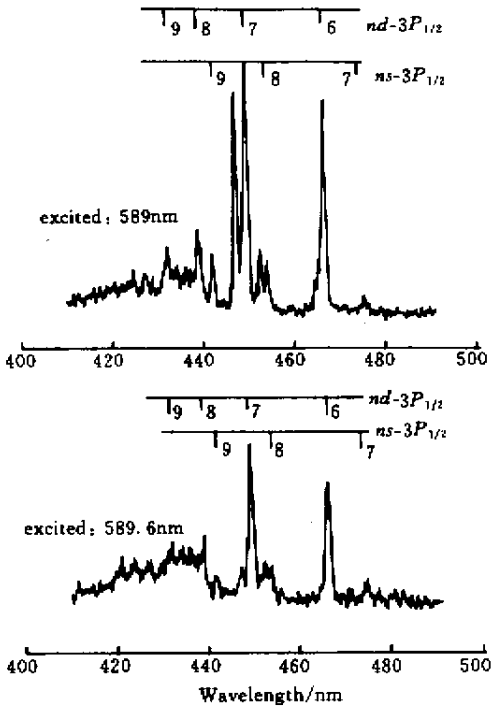


图 3 由 EP 过程产生的钠原子、分子受激辐射谱

Fig.3 Stimulation emission spectrum of the sodium by energy-pooling collisions

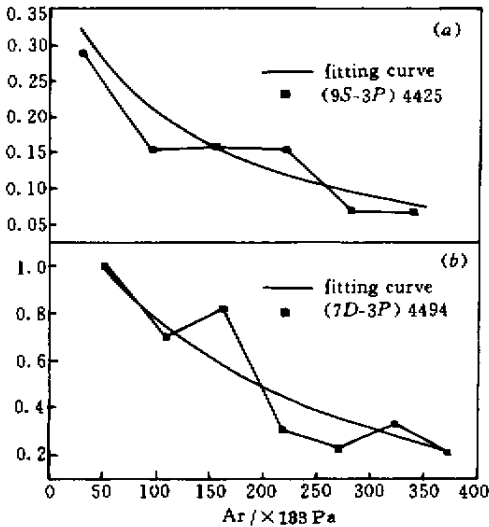


图 4 由 EP 产生的钠原子受激辐射信号随氩气压变化过程

Fig.4 Stimulated emission signal with argon pressure (a) Na(9S)-Na(3P), (b) Na(7D)-Na(3P)

### 3 理论与分析

EP 碰撞过程是一个多种机制并存的过程。人们对碰撞截面的实验测量由于受到诸多因素的影

响, 不同人测量的结果之间及理论计算结果之间差异很大。在理论上人们大多采用速率方程稳态解来处理 EP 碰撞过程, 并结合实验上测量的荧光信号而得出相应的碰撞截面。我们采用瞬时速率方程来处理有氩原子参与的 EP 碰撞过程, 并利用方程的解析解对实验结果进行拟合, 得出了 449.4 nm(7D-3P)和 442.5 nm(9S-3P)辐射信号随氩气变化趋势。此结果和文献 5 报道的实验结果相一致。原子系统的 EP 碰撞过程的变化是由激光激发、碰撞转移、自发辐射及各能态衰变等过程决定的。用速率方程描述可写成<sup>[1]</sup>

$$\frac{d(N_i)}{dt} = -[(\gamma_i + k_i)(P_0 + P) + 1/\tau_i]N_i - k_i(P_0 + P)N_i + W + k_n(P_0 + P)N_{nl} \quad (6)$$

$$\frac{d(N_{nl})}{dt} = k_i(P_0 + P)N_i - [(\gamma_{nl} + k_n)(P_0 + P) + 1/\tau_{nl}]N_{nl} \quad (7)$$

其中  $W$  为从 3S 到 3P 态的激发速率。  $N_i$  和  $N_{nl}$  为二倍的 Na(3P<sub>1/2</sub>, 3P<sub>3/2</sub>) 虚拟能态和 Na(*nD*, *mS*) 能态的相对粒子数。  $\tau_i$ ,  $\tau_{nl}$  为 Na\*(3P<sub>1/2</sub>, 3P<sub>3/2</sub>) 和 Na\*(*nD*, *mS*) 能态寿命。  $\gamma_i$ ,  $\gamma_{nl}$  为 Na\*(3P<sub>1/2</sub>, 3P<sub>3/2</sub>) 和 Na\*(*nD*, *mS*) 能态的衰变系数。  $k_i$  和  $k_n$  为二倍的 Na\*(3P<sub>1/2</sub>, 3P<sub>3/2</sub>) 能级位置和 Na\*(*nD*, *mS*) 能态间的碰撞转移速率。  $P_0$  和  $P$  分别为钠原子和氩原子在一定温度下的气压。

利用初始条件: 当  $t = 0$  时,  $N_i, N_{nl} = 0$ ; 及受激辐射光强与反转粒子数关系

$$I(\nu, P) \propto \exp[\Delta N c^2 g(\nu, \nu_0) L / (8\pi\nu^2 \tau_{nl})] \quad (8)$$

我们得到了如图 4 的拟合曲线。其中  $g(\nu, \nu_0)$  为线型因子,  $L$  为作用区长度,  $\tau_{nl}$  为激发态寿命。当温度为 700 K 时, 拟合中的参数选为脉宽为 10 ns, 热管炉中钠蒸气压  $P_0 = 140 \text{ Pa}$ <sup>[6]</sup>, 粒子的平均速率  $v = 2.11 \times 10^3$ , 各能态寿命和衰变系数来自文献 7: 3P 态  $\tau_i = 16.5 \text{ ns}$ ; 9S 态  $\tau_{nl} = 308 \text{ ns}$ ; 7D 态  $\tau_{nl} = 422 \text{ ns}$ 。这样拟合中的参数选取 (a):  $\sigma_i = 8 \times 10^{-18}$ ,  $\sigma_{nl} = 10^{-17}$ ,  $k_i = 6 \times 10^{-9}$ ,  $k_n = 13 \times 10^{-9}$  (b):  $\sigma_i = 8 \times 10^{-18}$ ,  $\tau_{nl} = 10^{-18}$ ,  $k_i = 10^{-9}$ ,  $k_n = 7.6 \times 10^{-9}$ 。

从图 4 中可以看到理论上得出了 449.4 nm(7D-3P)和 454.5 nm(8S-3P)辐射信号随氩气变化趋势。但和实验数据之间有一定的偏差, 其主要原因是: 实验中的测量误差, 或是理论模型有些简单。系统在不断地充入氩气的过程中, 碰撞截面应是气压的函数而不应为定值, 同时方程中没有考虑受激辐射的影响。再者实验系统中存在着多种激发过程。由于要实现分子高位态的粒子布居必然要求

有较高的温度保证有足够的分子浓度,以实现可观测的分子高位态跃迁,这样必然会出现在激发原子时同时又以双光子激发分子或多光子激发产生电离过程。另外过高的钠原子分子及氩原子浓度会引起多次碰撞使得钠原子的能量损失较大从而使系统变得更加复杂。尽管如此,我们的理论模型给出了和实验结果总体趋势一致的结果。所选取的参数和有关文献报道在数量级上接近<sup>[2,3]</sup>。

## 4 结 论

通过 EP 碰撞过程实现了钠原子和分子高位态的粒子布居,获得了紫区多条受激辐射光谱。实验结果表明,钠原子高位态由 EP 碰撞过程而获得粒子布居的几率大小受多种因素影响,角动量也起到一定的作用。利用瞬速率方程对实验结果进行拟合得到了和实验结果一致的变化规律。

致谢 本实验是在华东师范大学量子光学开放实验室完成,并得到了开放实验室的资助。实验中得到了丁良恩教授,孙真荣副教授的帮助,在此一并表示

感谢。

## 参 考 文 献

- 1 M. Allegrini, P. Bicchi, L. Moi. Cross-section measurement for the energy-transfer collisions  $\text{Na}(3P) + \text{Na}(3P) \rightarrow \text{Na}(5S, 4D) + \text{Na}(3S)$ . *Phys. Rev. A*, 1983, **28**(3):1338 ~ 1343
- 2 Z. J. Jabbour, R. K. Namiotka, J. Huennekens *et al.*. Energy-pooling collisions in cesium:  $6P_J + 6P_J \rightarrow 6S + (nl = 7P, 6D, 8S, 4F)$ . *Phys. Rev. A*, 1996, **54**(2):1372 ~ 1384
- 3 R. K. Namiotka, J. Huennekens, M. Allegrini. Energy-pooling collisions in potassium:  $4P_J + 4P_J \rightarrow 4S + (nl = 5P, 6S, 4D)$ . *Phys. Rev. A*, 1997, **56**(1):514 ~ 520
- 4 J. T. Bahns, W. C. Stwalley. Observation of gain in the violet bands of sodium vapor. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(9):826 ~ 828
- 5 S. Shahdin, M. A. Gondal, S. M. Sharada. Observation of UV and violet diffuse bands of sodium dimer excited by XeF (351 nm) excimer laser. *Opt. Commun.*, 1989, **71**(1-2):65 ~ 71
- 6 A. N. Nesmeyanov. Vapor Pressure of the Elements. Acad. Nauk SSSR, Moscow, 1961. 444445
- 7 A. Lindgard, S. E. Nielsen. Transition probabilities for alkali sequences. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1977, **19**(6):538 ~ 539