

Ar^{2+} 与 Li, Na 原子碰撞中单电子俘获过程的实验研究*

雷子明 杨 锋 于德洪¹⁾ 刘家瑞 潘广炎 孙 湘

中国科学院物理研究所

1988年12月5日收到

对 Ar^{2+} 与 Li, Na 碰撞过程中由于单电子俘获而产生的 ArII 谱线进行了绝对测量, 给出各谱线的发射截面数据. 入射离子能量为 40—300 keV. 从发射截面对势能亏损的依赖关系, 发现对应中等 $\Delta E(>0)$ 值的过程具有较大的截面. 并且还发现与观察到的光谱线相应的激发态属于一个电子组态中高 J 量子数的态.

一、引 言

在原子碰撞物理研究中, 近年来电子俘获到多重电荷离子的激发态过程的研究变得相当活跃^[1,2], 多重电荷离子与碱金属原子碰撞过程的研究更是如此. 由于碱金属原子的第一电离电势比较小, 电子俘获过程的截面往往比较大, 于是这些电荷交换过程在受控热核聚变研究和短波长激光器的发展方面都是非常重要的.

本文通过光学测量, 研究了 Ar^{2+} 与 Li, Na 的碰撞过程. 由光学多道分析系统 (OMA) 对碰撞中发射光谱进行了测量, 在 40—300 keV 的能量范围内给出了相应谱线的发射截面.

由于此碰撞体系属于多电子体系, 目前还没有合适的理论工作. 唯一的实验研究是在低能 ($<12\text{keV}$) 范围进行的, 其中给出了几条 ArII 线的发射截面以及 Ar^+ 激发态的相对布居的讨论^[3,4].

二、实 验 装 置

实验装置分四部分: 第一部分为 J59-200 加速器, 离子源为冷阴极潘宁源, 离子电荷态的选择由 90° 偏转分析磁铁完成. 第二部分是一个真空靶室, 本底真空度为 2×10^{-6} Torr. 第三部分是产生 Li 和 Na 原子束的炉子, 与 Kadota 等人用的炉子基本相同^[5]. 炉盖由不锈钢材料制成, 上边开有 8 个小孔. 对 Na, Li 体系炉温分别控制在 300°C 和 520°C , 使得原子束中心密度约 10^{12} atom/cm³. 炉子加热过程中, 真空度约 8×10^{-6} Torr. 第四部分为光学检测系统——TN1710-OMA, 由 TN6048-3 光谱仪, 512 个二极管组

* 国家自然科学基金资助的课题.

1) 现在地址: 曲阜师范大学激光研究所.

成的阵列和多道分析器组成。测量系统的量子效率由钨带灯在波长范围 200—800nm 内进行标定。

三、实验结果

Ar^{2+} 与 Li 碰撞过程中的发射光谱见图 1, 观察到的 ArII 线见表 1. 在 Ar^{2+} 与 Na 碰撞过程中, 观察到了相同的 ArII 谱线, 只是相应的势能亏损 ΔE 值比 Ar^{2+} 与 Li 碰撞过程的小 0.25 eV. 在这两个碰撞过程中, 由于双电子俘获过程的几率小, 因此未能观察到 ArI 谱线。

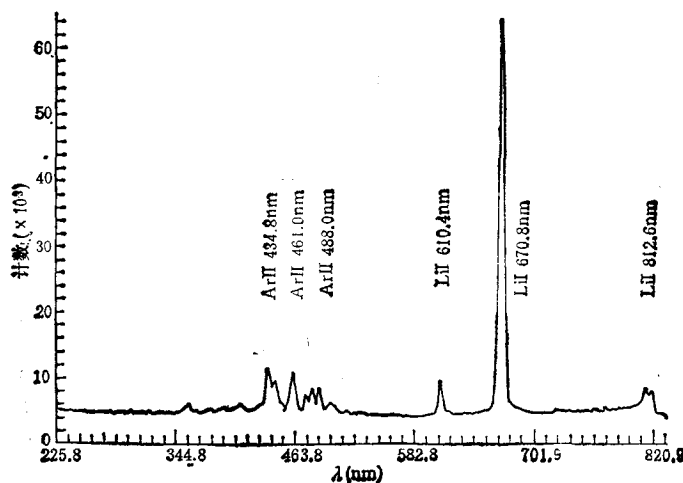


图 1 Ar^{2+} 与 Li 碰撞过程中的发射光谱碰撞离子能量为 160 keV

表 1 ArII 4p→4s, 4p'→4s' 发射谱线

跃 迁	$\lambda(\text{nm})$	$\Delta E(\text{eV})$
$4p^4D_{7/2} \rightarrow 4s^4P_{3/2}$	434.8	3.24
$4p^4P_{3/2} \rightarrow 4s^4P_{3/2}$	480.6	3.51
$4p^2D_{3/2} \rightarrow 4s^2P_{3/2}$	488.0	3.16
$4p^2P_{3/2} \rightarrow 4s^2P_{1/2}$	476.5	2.97
$4p^1F_{7/2} \rightarrow 4s^1D_{3/2}$	461.0	1.59

发射截面由下式定义:

$$\sigma_{ij} = \frac{4\pi}{\omega} \frac{S(\lambda)}{Q/qeK(\lambda)NL} P \frac{1}{T_i}, \quad (1)$$

式中 $S(\lambda)$ 是扣除本底的总光子积分计数, 由光学多道直接读出; $K(\lambda)$ 是光学测量系统的量子效率; Q 是总积累电荷量, 由法拉第筒接收, 束流积分仪读出, 束流积分仪由 Thurlby 1905Q 型 Intelligent digital multimeter 标定; q 是离子的电荷态; e 是单位电荷电量; Q/qe 是参加作用的总离子数; ω 是观察的立体角; N 是靶原子密度; L 是观察长度; P 是偏振修正因子, 来自光辐射的各向异性, 和单色仪对不同偏振方向光的量子效率的不同(平行和垂直于离子束方向), 根据 Kadota 等人^[2]对 He^{2+} 和 Li 体系的研究, 偏

振效应比较小,可以忽略不计, T_i 是寿命修正因子,由于我们在仪器上观察到的长度 ($L = 3 \text{ cm}$) 大于 ArII 谱线对应上能级的 $\nu\tau_i$ (ν 是离子速度, τ_i 是相应能级的寿命, $\nu\tau_i \approx 1.5 \text{ cm}$), 因而近似地令 $T_i = 1$.

(1) 式只对靶为均匀分布的气体原子适用,对于靶原子为 Li, Na 的情况,由于在靶室内不是均匀分布,在 (1) 式中要将 NL 换成 $\Pi = \int N(x)dx$, $N(x)$ 为靶原子的密度分布函数. (1) 式变成

$$\sigma_{ij} = \frac{4\pi}{\omega} \frac{S(\lambda)}{Q/qeK(\lambda)\Pi}. \quad (2)$$

为了求得 Π , 引用别人已做过的工作,利用已知的截面数据,得到下式:

$$\sigma_{ij0} = \frac{4\pi}{\omega} \frac{S_0(\lambda_0)}{Q_0/q_0eK_0(\lambda_0)\Pi}. \quad (3)$$

(2), (3) 两式相比即得

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij0} \frac{qQ_0K_0(\lambda_0)S(\lambda)}{q_0QK(\lambda)S_0(\lambda_0)}. \quad (4)$$

对靶为 Li 的体系,采用 Aumayr 等人关于 He^+ 与 Li 碰撞中, 20 keV 能量时的 LiI 670.8 nm 线的发射截面: $\sigma_{ij0} = 3.53 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$, 误差为 $\pm 10\%$ ^[6]. 对靶为 Na 的体系,采用 Aumayr 等人的 H^+ 与 Na 碰撞中, 20 keV 能量上的 $\text{NaI}589.0 + 589.6 \text{ (nm)}$ 线的发射截面: $\sigma_{ij0} = 3.59 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$, 误差为 $\pm 25\%$ ^[7].

按照上述方法,可以不必知道靶密度的绝对大小,通过 (4) 式就可以得到所需要的截面,并且可以消除许多系统误差.

本实验光子积分计数大于 10^3 , 因而统计误差小于 3% . 光学测量,电荷测量及量子效率标定误差分别约 $\pm 3\%$. 引入的归一截面误差见前面. 对 Ar^{2+} 和 Li 体系,发射截

表 2 Ar^{2+} 与 Li 碰撞过程中 ArII 谱线的发射截面 σ_{em}

$\lambda(\text{nm})$ $\sigma_{em}(\times 10^{-17} \text{ cm}^2)$ $E(\text{keV})$					
	434.8	461.0	476.5	480.6	488.0
40	21.7	42.5	8.09	5.80	12.8
60	20.6	37.9	6.92	4.59	10.8
80	26.8	47.4	9.41	9.22	13.2
100	23.7	41.2	7.25	5.94	9.79
120	21.3	34.6	6.03	6.18	8.86
140	30.7	50.1	9.13	9.02	12.8
160	28.4	48.1	8.63	8.61	12.1
180	26.7	43.1	8.07	8.16	10.3
200	23.6	41.2	5.65	6.76	8.79
220	23.9	42.3	5.70	6.48	8.55
240	16.7	30.0	3.86	5.18	6.51
260	15.9	37.8	4.41	4.90	6.64
280	12.8	25.0	2.96	3.73	5.50
300	11.57	29.4	3.23	4.18	5.40

表3 Ar^{2+} 与 Na 碰撞过程中 ArII 谱线的发射截面 σ_{em}

$\lambda(\text{nm})_k$ $\sigma_{em}(\times 10^{-16}\text{cm}^2)$ $E(\text{keV})$	434.8	461.0	467.5	480.6	488.0
60	6.90	9.53	4.04	3.33	4.02
80	6.11	7.93	3.06	2.72	3.24
100	5.24	6.90	2.63	2.39	2.69
120	4.30	5.88	2.42	2.24	2.53
140	4.49	6.32	2.06	1.83	2.18
160	4.08	5.55	1.86	1.54	1.95
180	3.92	5.37	1.86	1.48	1.85
200	3.81	5.48	1.88	1.53	1.92
220	3.86	5.27	1.98	1.62	1.96
240	3.38	4.73	1.87	1.57	1.88
260	3.35	4.56	1.76	1.39	1.75
280	3.25	4.93	1.69	1.50	1.72

面总误差约 $\pm 15\%$ 。对 Ar^{2+} 和 Na 体系,误差约 $\pm 27\%$ 。

Ar^{2+} 和 Li 体系 Ar^{2+} 和 Na 体系的 ArII 谱线的发射截面分别列在表 2 和表 3。

四、讨 论

图 2 和图 3 分别给出 Ar^{2+} 与 Li 和 Ar^{2+} 与 Na 碰撞过程中 ArII 谱线的发射截面随入射离子能量的变化曲线。图中表明,在此能量范围内,所有线的发射截面的能量依赖关系相似,在总趋势上都是随能量增加而减小。

在 Ar^{2+} 与 Li, Na 碰撞过程中,观察到的 ArII 谱线来自属于电子组态 $3p'(^3\text{P})4p$ 和 $3p'(^1\text{D})4p'$ 的激发态。两电子组态分别简记为 $4p$ 态和 $4p'$ 态。并且本实验观察到的谱线属于 Atsushi, Matsumoto 等人观察到的强谱线。 $4p$ 态包括 $^2\text{S}_{1/2}$, $^4\text{S}_{3/2}$, $^2\text{P}_{1/2,3/2}$,

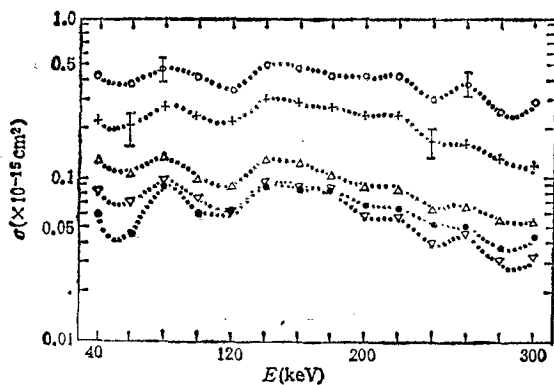


图2 Ar^{2+} 与 Li 碰撞过程中 ArII 谱线的发射截面随入射离子能量的变化关系 ○为 ArII 461.0 nm 线; +为 ArII 434.8 nm 线; △为 ArII 488.0 nm 线; ▽为 ArII 467.5 nm 线; ●为 ArII 480.6 nm 线

$^2\text{D}_{3/2,5/2}$, $^4\text{P}_{1/2,3/2,5/2}$ 和 $^4\text{D}_{1/2,3/2,5/2,7/2}$. $4\text{p}'$ 态包括 $^2\text{P}_{3/2,5/2}$, $^2\text{D}_{3/2,5/2}$ 和 $^2\text{F}_{5/2,7/2}$. 本实验观察到的谱线来自这些态中的高 J 多重态.

如: 434.8 nm, 480.6 nm 和 461.0 nm 分别对应态 $4\text{p}'^4\text{D}_{7/2}$, $4\text{p}'^4\text{P}_{5/2}$ 和 $4\text{p}'^2\text{F}_{7/2}$.

电子主要被俘获到 Ar^+ 离子的 4p 和 $4\text{p}'$ 态, 可以通过图 4 给出的近似绝热势能曲线给出定性的解释^[4].

由图 4 看到初态 $3\text{p}'(^3\text{P})$ 势能曲线在核间距 $R_0 \approx 10a_0$ 处与末态 4p 态的势能曲线相交, 因而引起 4p 态的激发. 在大约相同的 R_0 处, 末态 $4\text{p}'$ 势能曲线与初态 $3\text{p}'(^1\text{D})$ 势能曲线相交, 因而导致 $4\text{p}'$ 态的激发. 这些曲线的相交都对应中等大小的 R_0 值.

图 2 和图 3 表明, 较大截面的线是 434.8 nm 和 461.0 nm, 分别来自属于不同 Ar^{2+} 离子态的 4p 和 $4\text{p}'$ 态. 考虑组态 $3\text{p}'(^3\text{P})4\text{p}$, 最大截面的谱线是 434.8 nm, 对应于中等数值的 ΔE (见表 1).

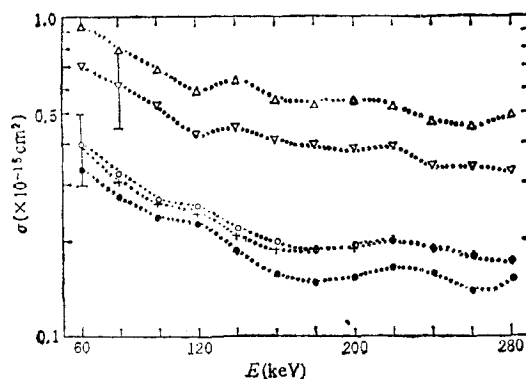


图 3 Ar^{2+} 与 Na 碰撞过程中 ArII 谱线的发射截面随入射离子能量的变化关系 $\triangle$ 为 ArII 461.0 nm 线; ∇ 为 ArII 434.8 nm 线; $\circ$ 为 ArII 488.0 nm 线; $+$ 为 ArII 476.5 nm 线

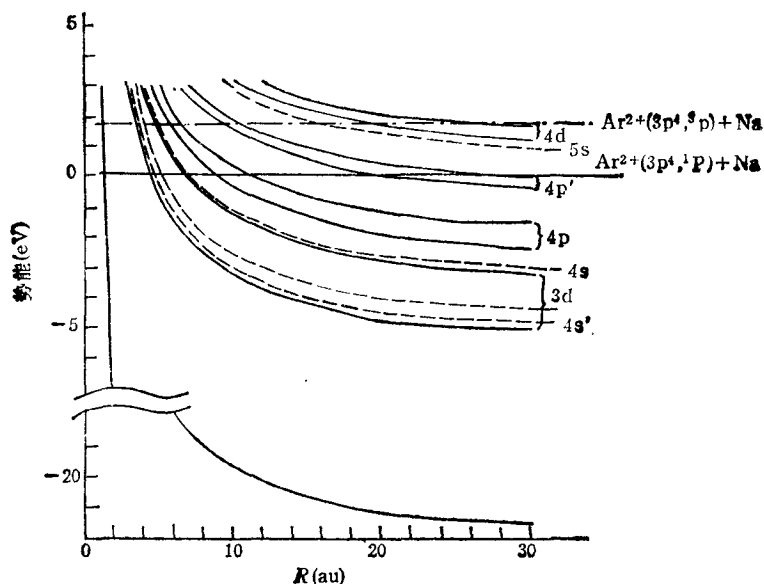


图 4 $\text{Ar}^{2+}(3\text{p}', ^3\text{P} \text{ 或 } ^1\text{D}) + \text{Na}(3\text{s}) \rightarrow \text{Ar}^+(3\text{p}'nl) + \text{Na}^+(2\text{p}')$. 碰撞过程中近似绝热势能曲线 $\text{Ar}^+(3\text{p}'nl) + \text{Na}^+$ 的势能曲线由 nl 表示

由于光学测量系统分辨率的限制, ArII 461.0 nm 线可能包括 ArII 459.0 nm 线, 对 Ar^{2+} 和 Li 体系, 还可能包括 LiI 460.3 nm 线.

通过图 2 和图 3 的比较, 看到 Ar^{2+} 和 Li 体系的发射截面比 Ar^{2+} 和 Na 体系的相应发射截面小. 这可能是由于 Na 原子比 Li 原子的电离电势小, 结果使得 Ar^{2+} 和

Na 体系的相应过程的势能亏损 ΔE 比 Ar^{2+} 和 Li 体系的值小的缘故。

五、结 论

通过上述讨论,可以得到如下结论:

- 1) 观察到的 ArII 谱线来自一个电子组态中的高 J 多重态。
- 2) 具有比较大的发射截面的过程对应中等势能亏损 ΔE 值。
- 3) Ar^{2+} 和 Na 体系比 Ar^{2+} 和 Li 体系能够得到较大的截面。

- [1] R. K. Janev and H. Winter, *Phys. Reports*, **117**(1985), 265.
- [2] 杨锋等,原子与分子物理学报, **6**(1989), 781.
- [3] Atsushi Matsumoto *et al.*, *J. Phys. Soc. Japan*, **48** (1980), 567.
- [4] Atsushi Matsumoto *et al.*, *J. Phys. Soc. Japan*, **48**(1980), 575.
- [5] K. Kadota *et al.*, *J. Phys. B*, **15**(1982), 3275.
- [6] F. Aumayr *et al.*, *J. Phys. B*, **18**(1985), L741.
- [7] F. Aumayr *et al.*, *J. Phys. B*, **20**(1987), 2025.

SINGLE ELECTRON CAPTURE INTO EXCITED STATES IN COLLISIONS OF Ar^{2+} WITH Li AND Na

LEI ZI-MING YANG FENG YU DE-HONG LIU JIA-RUI
PAN GUANG-YAN SUN XIANG

Institute of Physics, Academia Sinica

(Received 5 December 1988)

ABSTRACT

Absolute measurements of emission cross sections have been performed for the lines from ArII excited states in $\text{Ar}^{2+} + \text{Li}$ and $\text{Ar}^{2+} + \text{Na}$ collision. The energy of incident ions ranged from 40 keV to 300 keV. The dependence of the emission cross sections on the energy defect ΔE is discussed. We find that the processes with intermediate $\Delta E (> 0)$ have larger cross sections. We also find that the excited states correlated to the observed lines belong to the high J quantum numbers in an electron configuration.