

单、双电荷离子与原子碰撞中的 激发态和发射截面比较*

刘家瑞 雷子明 杨 锋 潘广炎 于德洪 孙 湘

(中国科学院物理研究所)

1987年10月15日收到

本文给出了单、双电荷离子和 He, Ne, Ar, 碰撞过程中产生的激发态的实验结果. He^{q+} , $\text{Ar}^{q+}(q=1,2)$ 离子束实验室能量为 $(70-170) \times q \text{keV}$. 光学测量由光学多道分析系统(OMA)完成, 波长范围为 200—800nm. 观察到单、双电荷离子和原子碰撞中各种不同的激发过程, 讨论了发射截面和入射离子电荷数、势能亏损的依赖关系.

一、引 言

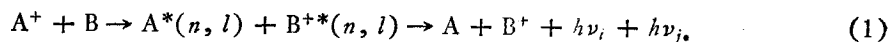
离子和原子、分子碰撞过程中产生的信息非常丰富, 许多物理学家对此领域发生了极大的兴趣^[1-5]. 最近, 我们完成了单、双电荷离子 He^{q+} , $\text{Ar}^{q+}(q=1,2)$ 和 He, Ne, Ar 碰撞激发态的实验研究. 在这些碰撞体系中, 入射离子和靶原子存在着大量的激发态通道. 我们测得 HeI, HeII, NeI, NeII, ArI, ArII 的发射光谱和发射截面, 对有关碰撞体系的实验结果进行了比较, 并做了一些定性讨论. 实验装置见文献[8].

二、实验结果

1. 单电荷离子与原子碰撞

实验结果表明, 各个碰撞体系都存在着两种激发过程^[6-8].

1) 单电子俘获产生的激发态



这里 $A^+ = \text{He}^+, \text{Ar}^+$; $B = \text{He}, \text{Ne}, \text{Ar}$. 未进行 $(\text{He}^+ + \text{He})$ 和 $(\text{Ar}^+ + \text{Ar})$ 碰撞实验.

2) 由于 A^+ 离子碰撞产生 B 的直接激发



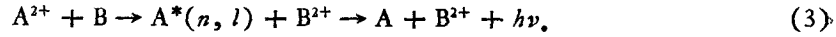
也就是说, 在碰撞过程中 B 的电子组态重排产生激发态.

2. 双电荷离子与原子碰撞

在双电荷离子和原子碰撞过程中, 各个碰撞体系都存在着三种激发过程.

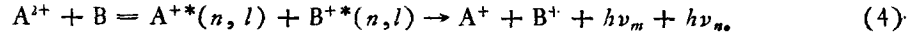
* 国家自然科学基金资助的课题.

1) 双电子俘获产生的激发态

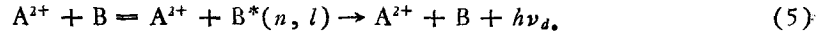


这里 $A^{2+} = \text{He}^{2+}, \text{Ar}^{2+}$; $B = \text{He}, \text{Ne}, \text{Ar}$. 未进行 $(\text{He}^{2+} + \text{He})$ 和 $(\text{Ar}^{2+} + \text{Ar})$ 碰撞实验.

2) 单电子俘获产生的激发态



3) 直接激发过程



举例说明, 图 1 给出了 Ar^{2+} 离子能量为 220keV 时和 He 原子碰撞产生的 HeI, HeII, ArI, ArII 线谱. 从光谱图上测得的线谱分析, 我们清楚地看到这个碰撞体系有三个激发通道:

- (1) $\text{Ar}^{2+} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}^*(n, l) + \text{He}^{2+} \rightarrow \text{Ar} + \text{He}^{2+} + h\nu(\text{ArI});$
- (2) $\text{Ar}^{2+} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}^{+*}(n, l) + \text{He}^{+*}(n, l) \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{He}^+ + h\nu(\text{ArII}) + h\nu(\text{HeII});$
- (3) $\text{Ar}^{2+} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}^{2+} + \text{He}^*(n, l) \rightarrow \text{Ar}^{2+} + \text{He} + h\nu(\text{HeI}).$

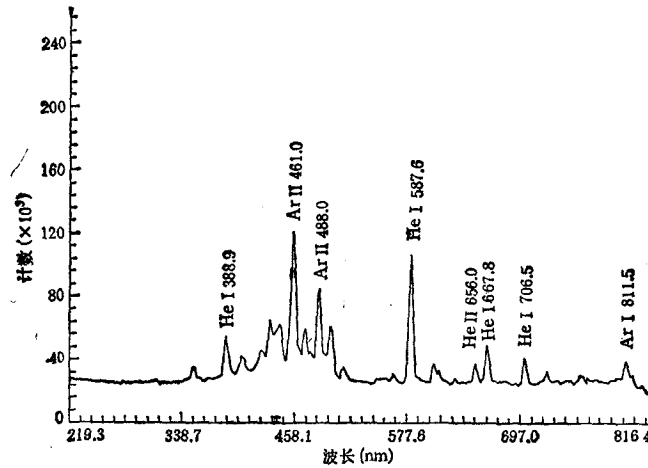


图 1 $\text{Ar}^{2+} + \text{He}$ 碰撞中的发射光谱 入射离子能量为 220keV

3. 发射截面

1) 双电子俘获产生的激发态

在 $\text{He}^{2+} + \text{Ne}, \text{Ar}$ 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{He}, \text{Ne}$ 碰撞实验中, 观察到由于双电子俘获产生的激发态, 然后退激发而发射 HeI, ArI 线谱. HeI, ArI 的发射截面数据在另处详细列表给出. 我们将 $\text{He}^{2+} + \text{Ar}$ 与 $\text{He}^{2+} + \text{Ne}$ 碰撞体系发射的 HeI 三重态谱线的发射截面做一比较, 又将 $\text{Ar}^{2+} + \text{Ne}$ 与 $\text{Ar}^{2+} + \text{He}$ 碰撞体系发射的 ArI 谱线的发射截面做一比较, 从表 1 列出的数据表明, $\text{He}^{2+} + \text{Ar}$ 碰撞体系中 HeI 三重态 $3^3\text{S} \rightarrow 2^3\text{P}$ ($\lambda = 706.5\text{nm}$), $3^3\text{P} \rightarrow 2^3\text{S}$ ($\lambda = 388.9\text{nm}$) 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{Ne}$ 碰撞体系中 ArI4p $[2\frac{1}{2}]_3 \rightarrow 4s[1\frac{1}{2}]_2$ ($\lambda = 811.5\text{nm}$) 的发射截面大得多.

2) 单电子俘获产生的激发态

表1 双电子俘获激发态的发射截面比较 $\sigma_{em}(\times 10^{-19} \text{cm}^2)$

E(keV)	HeI				ArI	
	$3^3S \rightarrow 2^3P$ ($\lambda = 706.5 \text{nm}$)		$3^3P \rightarrow 2^3S$ ($\lambda = 388.9 \text{nm}$)		$4p[2\frac{1}{2}]_s \rightarrow 4s[1\frac{1}{2}]_s^o$ ($\lambda = 811.5 \text{nm}$)	
	He ²⁺ + Ar ($\Delta E = -11.69$ eV)	He ²⁺ + Ne ($\Delta E = -30.95$ eV)	He ²⁺ + Ar ($\Delta E = -11.98$ eV)	He ²⁺ + Ne ($\Delta E = -31.24$ eV)	Ar ²⁺ + Ne ($\Delta E = -48.10$ eV)	Ar ²⁺ + He ($\Delta E = -64.46$ eV)
140	45.42	10.36	16.03	9.48	59.76	17.79
160	35.30	9.87	12.42	9.11	62.21	18.21
180	31.93	7.44	11.39	7.44	48.98	16.26
200	29.97	6.36	10.91	6.68	39.46	21.02
220	32.46	8.42	11.75	7.04	49.90	14.32
240	30.59	7.54	9.18	6.11	45.70	
260	28.77	6.93	8.82	6.99	35.90	12.58
280	29.25	7.16	9.15	5.90	31.51	11.01
300	24.87	6.26	7.93	5.85	30.87	9.54
320		5.84		5.67	30.24	9.74
340	25.26	5.80	8.71	5.44	24.25	8.16

在 He²⁺ + Ne, Ar 和 Ar²⁺ + He, Ne 碰撞实验中,同时观察到单电子俘获产生的激发态,然后退激发而发射 HeII, ArII 线谱. HeII, ArII 的发射截面数据在另处详细列表给出. 我们将 He²⁺ + Ar 与 He²⁺ + Ne 碰撞体系发射的 HeII 谱线的发射截面做一比较,又将 Ar²⁺ + Ne 与 Ar²⁺ + He 碰撞体系发射的 ArII 谱线的发射截面做一比较,从表 2 列出的数据表明, He²⁺ + Ar 碰撞体系中, HeII $6g^2G_{7/2,9/2} \rightarrow 4f^2F_{5/2,7/2}$ ($\lambda = 656.0 \text{nm}$) 和 Ar²⁺ + Ne 碰撞体系中 ArII $4p^2F_{9/2}^o \rightarrow 4s^2D_{5/2}$ ($\lambda = 461.0 \text{nm}$), $4p^2D_{5/2}^o \rightarrow 4s^2P_{3/2}$ ($\lambda = 488.0 \text{nm}$) 的发射截面也大得多.

表2 单电子俘获激发态的发射截面比较 $\sigma_{em}(\times 10^{-19} \text{cm}^2)$

E(keV)	HeII		ArII			
	$6g^2G_{7/2,9/2} \rightarrow 4f^2F_{5/2,7/2}$ ($\lambda = 656.0 \text{nm}$)		$4p^2F_{9/2}^o \rightarrow 4s^2D_{5/2}$ ($\lambda = 461.0 \text{nm}$)		$4p^2D_{5/2}^o \rightarrow 4s^2P_{3/2}$ ($\lambda = 488.0 \text{nm}$)	
	He ²⁺ + Ar ($\Delta E = -14.25 \text{eV}$)	He ²⁺ + Ne ($\Delta E = -20.05 \text{eV}$)	Ar ²⁺ + Ne ($\Delta E = -15.08 \text{eV}$)	Ar ²⁺ + He ($\Delta E = -18.11 \text{eV}$)	Ar ²⁺ + Ne ($\Delta E = -13.62 \text{eV}$)	Ar ²⁺ + He ($\Delta E = -16.65 \text{eV}$)
140	209.49	104.02	68.84	25.58	32.47	9.45
160	192.70	94.52	79.74	30.60	35.65	11.36
180	171.27	72.15	69.19	28.85	29.32	10.75
200	177.39	64.00	59.98	48.51	24.44	18.98
220	167.96	62.64	70.76	36.53	25.45	14.68
240	190.96	50.59	66.53		23.75	
260	172.50	58.93	50.64	34.86	17.83	14.31
280	145.24	49.27	47.92	25.93	16.46	10.62
300	127.54	48.37	45.84	25.14	15.75	10.95
320		46.18	47.57	24.69	15.92	11.21
340	120.64	43.81	36.93	20.24	12.18	9.28

3) 单、双电荷离子碰撞靶直接激发

在 $\text{He}^{2+} + \text{Ne}$, Ar 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{He}$, Ne 碰撞实验中, 同样观察到靶直接激发, 然后退激发而发射 HeI , NeI 和 ArI 线谱. HeI , NeI , ArI 的发射截面数据在另处详细列表给出. 我们将 $\text{He}^{2+} + \text{Ar}$ 与 $\text{He}^+ + \text{Ar}$ 碰撞体系发射的 ArI 谱线的发射截面做一比较, 又将 $\text{He}^{2+} + \text{Ne}$ 与 $\text{He}^+ + \text{Ne}$ 碰撞体系发射的 NeI 的发射截面做一比较, 表 3

表 3 靶直接激发的发射截面比较 $\sigma_{em}(\times 10^{-19}\text{cm}^2)$

E(keV)	ArI				NeI	
	$4p'[1/2]_0 \rightarrow 4s'[1/2]_0^{\circ}$ ($\lambda = 750.4\text{nm}$)		$4p[2\frac{1}{2}]_3 \rightarrow 4s[1\frac{1}{2}]_2^{\circ}$ ($\lambda = 811.5\text{nm}$)		$3p[1\frac{1}{2}]_2 \rightarrow 3s[1\frac{1}{2}]_1^{\circ}$ ($\lambda = 614.3\text{nm}$)	
	$\text{He}^{2+} + \text{Ar}$	$\text{He}^+ + \text{Ar}$	$\text{He}^{2+} + \text{Ar}$	$\text{He}^+ + \text{Ar}$	$\text{He}^{2+} + \text{Ne}$	$\text{He}^+ + \text{Ne}$
130		22.53		27.60		14.00
140	202.77		224.94		62.79	
150		20.76		21.60		
160	174.40		177.55		61.58	14.00

列出的数据表明: 在入射离子速度相同的条件下, $\text{He}^{2+} + \text{Ar}$ 碰撞体系中 $\text{ArI } 4p'[1/2]_0 \rightarrow 4s'[1/2]_0^{\circ}$ ($\lambda = 750.4\text{nm}$), $4p[2\frac{1}{2}]_3 \rightarrow 4s[1\frac{1}{2}]_2^{\circ}$ ($\lambda = 811.5\text{nm}$) 和 $\text{He}^{2+} + \text{Ne}$ 碰撞体系中 $\text{NeI } 3p[1\frac{1}{2}]_2 \rightarrow 3s[1\frac{1}{2}]_1^{\circ}$ ($\lambda = 614.3\text{nm}$) 的发射截面大得多. 同样, 将 $\text{Ar}^{2+} + \text{Ne}$ 与 $\text{Ar}^+ + \text{Ne}$ 碰撞体系发射的 NeI 谱线的发射截面做一比较, 又将 $\text{Ar}^{2+} + \text{He}$ 与 $\text{Ar}^+ + \text{He}$ 碰撞体系发射的 HeI 的发射截面做一比较, 表 4 列出的数据表明: 在入射离子速度相同的条件下, $\text{Ar}^{2+} + \text{Ne}$ 碰撞体系中 $\text{NeI } 3p[2\frac{1}{2}]_3 \rightarrow 3s[1\frac{1}{2}]_2^{\circ}$ ($\lambda = 640.2\text{nm}$), $3p[1\frac{1}{2}]_2 \rightarrow 3s[1\frac{1}{2}]_1^{\circ}$ ($\lambda = 614.3\text{nm}$) 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{He}$ 碰撞体系中 $\text{HeI } 3^3\text{D} \rightarrow 2^3\text{P}$ ($\lambda = 587.6\text{nm}$) 的发射截面大得多.

表 4 靶直接激发的发射截面比较 $\sigma_{em}(\times 10^{-19}\text{cm}^2)$

E(keV)	NeI				HeI	
	$3p[2\frac{1}{2}]_3 \rightarrow 3s[1\frac{1}{2}]_2^{\circ}$ ($\lambda = 640.2\text{nm}$)		$3p[1\frac{1}{2}]_2 \rightarrow 3s[1\frac{1}{2}]_1^{\circ}$ ($\lambda = 614.3\text{nm}$)		$3^3\text{D} \rightarrow 2^3\text{P}$ ($\lambda = 587.6\text{nm}$)	
	$\text{Ar}^{2+} + \text{Ne}$	$\text{Ar}^+ + \text{Ne}$	$\text{Ar}^{2+} + \text{Ne}$	$\text{Ar}^+ + \text{Ne}$	$\text{Ar}^{2+} + \text{He}$	$\text{Ar}^+ + \text{He}$
130		22.91		13.59		2.05
140	167.84		113.35		20.94	
150		26.62		15.96		1.63
160	191.85		127.86		26.40	

三、讨 论

从上述实验结果可以看出:

1. 在双电子俘获产生的激发态过程中, $\text{He}^{2+} + \text{Ar}$ 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{Ne}$ 碰撞体系的 HeI, ArI 谱线的发射截面分别比 $\text{He}^{2+} + \text{Ne}$ 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{He}$ 的大得多.
2. 在单电子俘获产生的激发态过程中, $\text{He}^{2+} + \text{Ar}$ 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{Ne}$ 碰撞体系的 HeII, ArII 谱线的发射截面分别比 $\text{He}^{2+} + \text{Ne}$ 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{He}$ 的大得多.
3. 在单、双电荷离子碰撞靶直接激发过程中, 在入射离子速度相同的条件下, $\text{He}^{2+} + \text{Ar, Ne}$ 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{Ne, He}$ 碰撞体系的 ArI, NeI, HeI 谱线的发射截面分别比 $\text{He}^+ + \text{Ar, Ne}$ 和 $\text{Ar}^+ + \text{Ne, He}$ 的大得多.

为什么这些发射截面要大得多呢? 下面作一些定性解释. 势能亏损定义为

$$A^{m+} + B = A^{(m-n)^+}(n, l) + B^{n+} + \Delta E. \quad (6)$$

这里 m, n 为电荷数目; ΔE 为势能亏损, 如果 ΔE 为正值, 称为放热势能亏损, 放热过程可以有较大的碰撞截面; 如果 ΔE 为负值, 称为吸热势能亏损, 而吸热过程碰撞截面较小^[4]. 表 5 列出了 He, Ne, Ar 的第一、第二电离势, 利用表 5 可以计算得到 ΔE .

表 5 电离势 (eV)

	IP ₁	IP ₂	IP ₁ + IP ₂
He	24.59	54.41	79.00
Ne	21.56	41.08	62.64
Ar	15.76	27.62	43.38

举例说明:

1. $\text{He}^{2+} + \text{Ar} = \text{He}(3^3\text{S}) + \text{Ar}^{2+} + \Delta E, \Delta E = -11.69\text{eV};$
2. $\text{He}^{2+} + \text{Ne} = \text{He}(3^3\text{S}) + \text{Ne}^{2+} + \Delta E, \Delta E = -30.95\text{eV}.$

因此, 在第一种情况下, $\text{He}^{2+} + \text{Ar}$ 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{Ne}$ 碰撞体系的 HeI, ArI 的发射截面必然分别比 $\text{He}^{2+} + \text{Ne}$ 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{He}$ 的大; 在第二种情况下, $\text{He}^{2+} + \text{Ar}$ 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{Ne}$ 碰撞体系的 HeII, ArII 的发射截面必然分别比 $\text{He}^{2+} + \text{Ne}$ 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{He}$ 的大; 在第三种情况下, 可以从库仑势找到定性解释, 因为 $\text{He}^{2+}, \text{Ar}^{2+}$ 离子的库仑势分别为 54.41eV, 27.62eV, 而 He^+, Ar^+ 离子的库仑势分别为 24.59eV 和 15.76eV, 因此, $\text{He}^{2+} + \text{Ar, Ne}$ 和 $\text{Ar}^{2+} + \text{Ne, He}$ 碰撞体系的 ArI, NeI, HeI 的发射截面必然分别比 $\text{He}^+ + \text{Ar, Ne}$ 和 $\text{Ar}^+ + \text{Ne, He}$ 的大.

1 R. K. Janev and H. Winter, *Phys. Reports*, 117(1985), 265.

2 The Physics of Highly Ionised Atoms Proceedings of the International conference on the Physics of Highly Ionised Atoms. Oxford, England, 2-5 July, (1984); Nuclear Instruments and Methods, (1985), B9, No. 4.

3 D. Dijkamp *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 54(1985), 1004.

- 4 Atsushi Matsumoto *et al.*, *J. Phys. Soc. (Japan)*, **48**(1980), 567, 575.
5 Pan Guangyan *et al.*, *Phys. Scripta*, **T3**(1983), 120.
6 Liu Jiarui *et al.*, *Chinese Phys. Lett.*, **3**(1986), 457.
7 潘广炎等, 物理学报, **36**(1987), 301.
8 雷子明等, 物理学报, **36**(1987), 533.

EXCITED STATES IN COLLISION OF SINGLE AND DOUBLE CHARGED IONS WITH ATOMS AND COMPARISONS OF EMISSION CROSS SECTIONS

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

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Recent experimental results on generating of excited states in collisions of single, double charged ions with He, Ne, Ar are presented. Laboratory energy range of the beams of He^{q+} , Ar^{q+} ($q=1, 2$) ions are $(70-170) \times q$ keV. The optical measurement was performed by Optical Multichannel Analysis System, the wavelength range covered was 200—800 nm. Different processes of excitation have been observed in single and double charged ions collisions with atoms. The dependence of emission cross sections on the charge number of incident ions and potential energy defect is discussed.