

Ar^+ 离子与原子碰撞中真空紫外辐射*

潘广炎 雷子明 杨 锋 卢小林

刘参文 刘家瑞 孙 湘

中国科学院物理研究所, 北京, 100080

1990 年 8 月 21 日收到

对 Ar^+ 离子与 He, Ne, Xe 原子碰撞中的真空紫外辐射进行绝对测量, 观察到入射离子的电离激发过程和靶原子电离激发过程, 并以 Fano 和 Lichten 的电子提升分子轨道模型和非绝热分子轨道相关图对此进行定性解释。

PACC: 3450

一、引 言

实验证明, 离子与原子碰撞中所产生的信息是非常丰富的^[1-4], 这引起原子物理学家们极大的兴趣。我们对碰撞过程中所产生的激发态进行了研究, 在可见光范围内, 已经获得大量的发射光谱、发射截面、激发截面的数据^[5-8]。

最近, 我们利用法国的 LHT-30 真空紫外光谱仪, 对 Ar^+ 离子与 He, Ne, Xe 原子碰撞中的真空紫外辐射进行绝对测量, 并通过测到的大量真空紫外发射光谱对碰撞激发过程进行了研究。同时, 给出发射截面和激发截面。

二、实 验 装 置

实验装置由三部分组成: 第一部分为 J59-200 加速器, 能量范围为 20—130keV, 束流强度为 5—60 μA , 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。第二部分为真空靶室, 本底真空度为 $2 \times 10^{-6}\text{Torr}$ 。第三部分为测量系统, 它是由 LHT-30 真空紫外单色仪、美国的 TN-1710A 多功能多道分析器和英国的 EMI-97899B 光电倍增管组成。详细情况见图 1。

LHT-30 真空紫外单色仪, 包括一个全息光栅, 550 条/mm, 波长范围为 20.0—150.0 nm, 效率最大值在 35.0nm, 相对孔径为 $f/10$, 聚焦长度为 320mm, 色散本领为 2.0 nm/mm, 狭缝高度为 2mm, 宽度为 0.2mm 时分辨率为 0.4nm。由于在实验中光信号较弱, 选用狭缝高度为 6mm, 宽度为 0.5mm, 分辨率约为 1nm。光栅的转动由步进电机驱动, 步进电机控制器的速度范围为 0.016—0.15nm/s。

* 国家自然科学基金和中国原子分子物理数据研究联合体资助的课题。

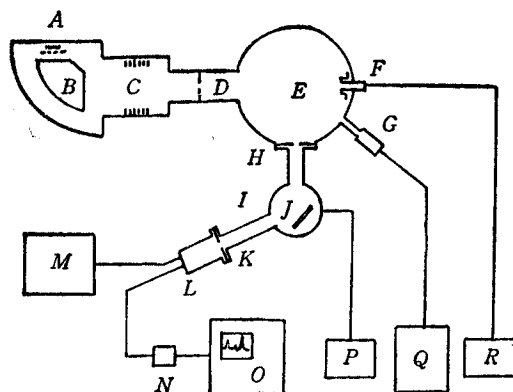


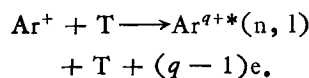
图1 实验装置 A为离子源;B为磁铁;C为加速管;D为准直孔;E为靶室;F为法拉第筒;G为真空规;H为 LHT-30VUV 单色仪;J为全息光栅;K为光电倍增管;L为放大器;M为 HV 电源;N为 TN-1710 多道分析器;P为步进电机控制系统;Q为真空测量系统;R为电荷测量系统;H K 为狭缝

单色仪的出射窗上涂有水杨酸钠,它可将真空紫外光转换成 420nm 左右的可见光,光信号由 EMI-9789QB 光电倍增管测量,数据采集由 TN-1710 多功能多道分析器完成。

三、实验结果

从测得的大量真空紫外光谱表明(见图2),在 Ar^+ 离子与 He, Ne, Xe 原子碰撞中,存在着以下两个碰撞激发过程:

1. 入射离子的电离激发过程



这里 $\text{T} = \text{He}, \text{Ne}, \text{Xe}$, 电荷数 $q = 2, 4$.

由于测到 $\text{ArV}(4s^3P^0) \lambda = 33.8\text{nm}$ 和 $\text{ArV}(3d^3D^0) \lambda = 44.9\text{nm}$ 两条真空紫外谱线,这表明离子 Ar^+ 与原子 He, Ne, Xe 碰撞过程中入射离子进一步电离,逸出 3 个电子后,外层某些电子处于激发态,然后退激发而发射上述两条谱线。同样, $\text{ArIII}(4d^3D^0) \lambda = 39.6\text{nm}$, $\text{ArIII}(3d^3D^0) \lambda = 53.0\text{nm}$, $\text{ArIII}(3d^3P^0)$

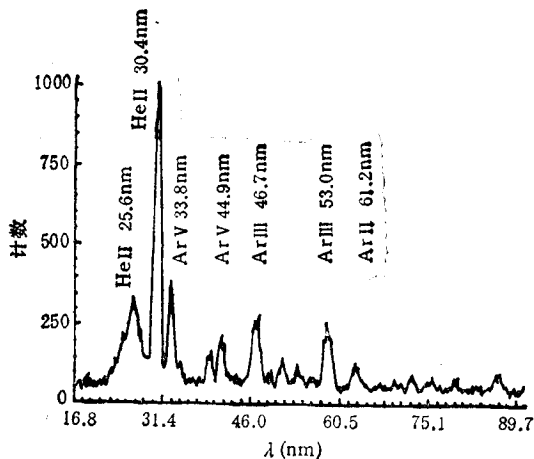
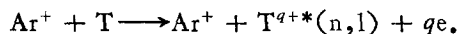


图2 Ar^+ 与 He 碰撞中 ArV, ArIII, ArII 和 HeII 谱线图。入射离子 Ar^+ 能量为 100keV。

$\lambda = 46.7\text{nm}$ 三条谱线的获得,也是由于入射离子 Ar^+ 电离出一个电子后处于激发态,然后退激发而发射的。

2. 靶原子的电离激发过程

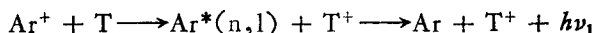


这里 $\text{T} = \text{Ne}$, $q = 2$.

实验结果得到 $\text{NeIII}(3s^1\text{D}^0)$ $\lambda = 30.1\text{nm}$, $\text{NeIII}(2p^5\text{P}^0)$ $\lambda = 42.8\text{nm}$ 和 $\text{NeIII}(2p^3\text{P}^0)$ $\lambda = 49.1\text{nm}$ 三条真空紫外谱线. 这表明在 Ar^+ 离子与 Ne 原子碰撞过程中, 靶原子 Ne 被电离出两个电子后, 靶离子的某些电子处于激发态, 然后退激发而发射上述 3 条谱线.

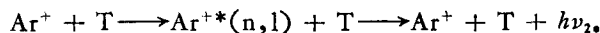
综合可见光范围光谱测量结果^[43], 在 Ar^+ 离子与 He , Ne , Xe 原子碰撞过程中, 存在着 5 个碰撞激发过程, 即

1) 电子俘获激发过程



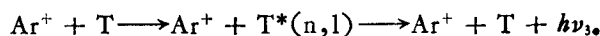
这里 $\text{T} = \text{He}, \text{Ne}$, $h\nu_1$ 为光子;

2) 入射离子直接激发过程



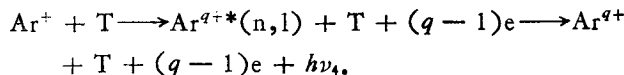
这里 $\text{T} = \text{He}, \text{Ne}$, $h\nu_2$ 为光子;

3) 靶原子直接激发过程



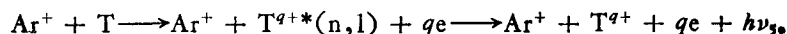
这里 $\text{T} = \text{He}, \text{Ne}$, $h\nu_3$ 为光子;

4) 入射离子电离激发过程



这里 $\text{T} = \text{He}, \text{Ne}, \text{Xe}$, $q = 2, 4$, $h\nu_4$ 为光子;

5) 靶原子电离激发过程



这里 $\text{T} = \text{Ne}, \text{Xe}$, $q = 2$, $h\nu_5$ 为光子.

四、发射截面与激发截面

发射截面定义为

$$\sigma_{\text{em}} = \frac{4\pi}{\omega NLK(\lambda)Q/qe} S(\lambda), \quad (1)$$

式中 $S(\lambda)$ 为扣除本底的总光子积分计数, 由多道分析器直接读出; $K(\lambda)$ 为光学测量系统的量子效率; Q 为总积累电荷量, 由法拉第筒接收, 束流积分仪读出; q 为离子电荷态; e 为单位电荷量; ω 为观察的立体角; L 为观察长度; N 为靶原子密速; Q/qe 为总离子数目; $S(\lambda)/K(\lambda)$ 为总光子数目.

激发截面定义为

$$\sigma_{n,l} = \frac{\sigma_{\text{em}}(nl \rightarrow mk)}{A_{nl,mk} \cdot \tau_{nl}} - \sum_{i>n} \sigma_{\text{em}}(ik \rightarrow nl) \quad (2)$$

式中 $A_{nl,mk}$ 为 nl 和 mk 态之间的跃迁概率,

$$\tau_{nl} = \left(\sum_{i < n} A_{nl,ik} \right)^{-1}$$

为 nl 态的寿命, $(A_{nl,ik}, \tau_{nl})$ 为分支比. (2) 式等号右端第二项表示扣除高能态级联到 nl 态的贡献.

Ar^+ 离子与 He, Xe 原子碰撞体系中, $\text{ArV}(4s^3P^0) \lambda = 33.8\text{nm}$ 和 $\text{ArV}(3d^3D^0) \lambda = 44.9\text{nm}$

两条真空紫外谱线的激发截面见表 1.

表 1

$\begin{matrix} \lambda(\text{nm}) \\ \sigma_{nl} \\ (10^{-18}\text{cm}^2) \\ E(\text{keV}) \end{matrix}$	Ar^+ 与 He		Ar^+ 与 Xe	
	33.8	44.9	33.8	44.9
20	612	58.8	41.5	29.0
30	762	68.1	—	—
40	645	39.9	53.1	33.3
50	621	54.8	—	—
60	610	49.7	41.3	21.4
70	567	53.5	—	—
80	486	58.6	37.2	29.8
90	474	44.9	—	—
100	549	61.4	43.8	28.0
110	583	81.8	—	—
120	565	114	45.7	18.5
130	493	69.9	—	—

Ar^+ 离子与 He, Ne, Xe 原子碰撞体系中, $\text{ArV}(4s^3P^0) \lambda = 33.8\text{nm}$ 谱线的激发截面随入射离子能量变化曲线见图 3.

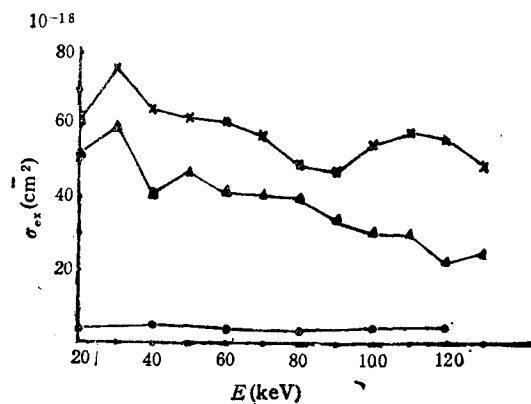


图 3 Ar^+ 离子与 He, Ne, Xe 原子碰撞体系中, $\text{ArV}(4s^3P^0) \lambda = 33.8\text{nm}$ 谱线的激发截面 σ_{ex} 随入射离子能量 E 的变化曲线. $\times$ 为 Ar^+ 与 He; $\triangle$ 为 Ar^+ 与 Ne; $\bullet$ 为 Ar^+ 与 Xe

五、讨 论

通过测量获得的大量真空紫外发射光谱图分析,发现在 Ar^+ 离子与 He, Ne, Xe 原子碰撞过程中,存在着入射离子的电离激发过程和靶原子的电离激发过程.这两个过程,在可见光范围测量中是未曾观察到的.

怎样解释以上两个过程呢? 这里引入 Fano 和 Lichten 提出的电子提升分子轨道模型(the “promotion” of electron of molecular orbit model)^[9-12].

若重离子入射速度比轨道电子速度(也就是说原子单位速度)小,碰撞时将形成瞬态分子轨道.在极限情况下,即两核接近距离很短,这些准分子轨道将过渡到对应两核之和的准原子轨道.在此过程中,当原子撤回后,电子可以从内壳层提升到外壳层而留下空穴.这些空穴由外壳层电子填充就导致(不是靶原子的,就是入射粒子的)特征X射线发射.这就是 Fano 和 Lichten 提出的电子提升分子轨道模型.

从 Ar^+ 离子与 He, Ne, Xe 原子碰撞体系来分析, Ar^+ 离子的能量为 20keV 时,重离子 Ar^+ 入射速度为 0.14au, 能量为 130keV 时,入射离子 Ar^+ 的速度为 0.36au, 都是远远小于轨道电子速度,因此在碰撞时将形成瞬态分子轨道.在极限情况下,即两核接近距离很短,这些准分子轨道将过渡到对应两核之和的准原子轨道.在此过程中,当原子撤回后, Ar^+ 离子进一步电离而逸出 3 个电子,而剩下的电子可以从内壳层 M 提升到外壳层而留下空穴.这些空穴由外壳层电子填充就导致 $\lambda = 33.8\text{nm}$ 射线的发射,即 $\text{ArV } 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4 s^1 P^0 \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3 P$ 填充 M 壳层 3p 空穴.

从表 1 所列的数据看出,

$$\text{ArV}(3p4s^3P^0) \lambda = 33.8\text{nm}$$

谱线的激发截面要比

$$\text{ArV}(3p3d^3D^0) \lambda = 44.9\text{nm}$$

谱线的大得多,这可以从非绝热分子轨道相关图(见图 4)得到解释.

当入射离子速度较低,它与靶原子接近时,停留时间较长,两者组成准分子体系.图 4 中一边为分离的原子(原子半径 $R_{au} \rightarrow \infty$),

一边由入射离子与靶原子合并而成的联合原子或离子(原子半径 $R_{au} \rightarrow 0$),在两者之间按照理论给出的原则,如联合原子的总量子数不低于分离原子的总量子数,形成准分子体系的分子轨道.如果某一分子轨道与另一分子轨道发生交叉,可以想象对应于这两条分子轨道的分离原子的电子必发生交换,例如图 4 中 $3d\sigma$ 轨道与 $4s\sigma$ 轨道交叉,势必导致 Ar 的 3p 态电子以极大的概率跃迁到 4s 态,也就是说提升到 4s 态.从 ArV 电子组态来看, $\text{ArV} 3p4s^3P^0 \rightarrow 3p^2 3P \lambda = 33.8\text{nm}$, $\text{ArV } 3p3d^3D^0 \rightarrow 3p^2 3P \lambda = 44.9\text{nm}$,前者

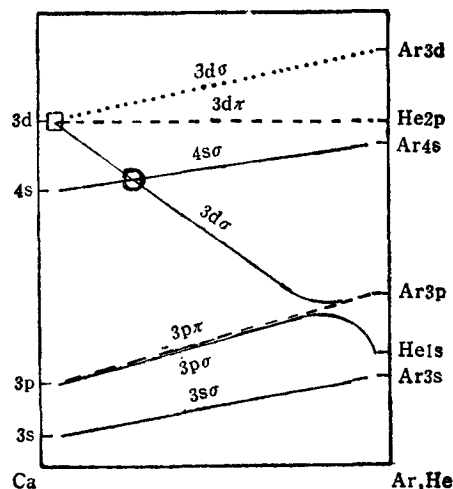


图 4 Ar-He 体系非绝热分子轨道相关图

存在着分子轨道交叉,因此激发截面要大得多。

- [1] R. K. Janev *et al.*, *Phys. Rep.*, 117(1985), 265.
- [2] K. Kadota *et al.*, *J. Phys. B*, 15(1982), 3275.
- [3] F. Aumayr *et al.*, *J. Phys. B*, 20(1987), 2025.
- [4] D. Dijkkamp *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 54(1985), 1004.
- [5] Yu Dehong *et al.*, *Phys. Rev.*, A39(1989), 2931.
- [6] Lei Ziming *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, B34(1988), 169; B42(1989), 38.
- [7] XVI International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions, Abstracts of Contributed Papers, New York, (1989), p. 476.
- [8] 潘广炎等,物理学报,38(1989),1306.
- [9] U. Fano and W. Lichten, *Phys. Rev. Lett.*, 14(1965), 627.
- [10] W. Lichten, *Phys. Rev.*, 164(1967), 131.
- [11] M. Barat and W. Lichten, *Phys. Rev.*, A6(1972), 211.
- [12] J. Eichler *et al.*, *Phys. Rev.*, A14(1976), 707.
- [13] 刘家瑞等,原子、分子物理学报,5,(1988),729.

VUV RADIATION IN COLLISIONS BETWEEN Ar^+ AND ATOMS

PAN GUANG-YAN LEI ZI-MING YANG FENG LU XIAO-LIN

LIU CAN-WEN LIU JIA-RUI SUN XIANG

Institute of Physics, Academia Sinica Beijing, 100080

(Received 21 August 1990)

ABSTRACT

The VUV emission spectra have been absolutely measured in collisions between Ar^+ and He, Ne, Xe by using LHT-30 Monochromator. The ionization excitation processes of incident ions and target atoms have been observed. The "promotion" of electron of molecular orbit model of Fano and Lichten, and adiabatic MO correlation diagram have been introduced. We have made attempt to work out some qualitative explanation.

PACC: 3450