

文章编号: 1007-1627(2001)01-0062-04

## 非全裸氟离子与氦原子碰撞中的转移电离过程\*

于得洋<sup>1</sup>, 陈熙萌<sup>2</sup>, 杨治虎<sup>1</sup>, 吴翠娥<sup>2</sup>, 刘惠萍<sup>1</sup>, 祁 中<sup>2</sup>

卢荣春<sup>1</sup>, 王 强<sup>2</sup>, 马新文<sup>1</sup>, 蔡晓红<sup>1</sup>, 刘兆远<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

<sup>2</sup> 兰州大学现代物理系, 甘肃 兰州 730000

**摘 要:** 采用位置灵敏探测和散射离子-反冲离子飞行时间测量技术, 测量了强相互作用区氟离子与氦原子碰撞中的转移电离截面与单电子俘获截面之比. 实验发现, 该比值随作用强度的增加而减小. 在本工作能区, 转移电离现象可视作一个电子被俘获、另一个电子被电离的两步过程; He 原子二重电离的主要机制为两步机制.

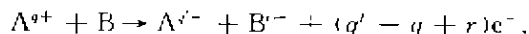
**关键词:** 离子-原子碰撞; 转移电离; 电子俘获

**中图分类号:** O562.4 **文献标识码:** A

### 1 引言

带电离子与原子发生碰撞可引起靶原子的激发和电离、入射离子与靶原子之间的电荷交换以及可能发生的人射离子自身的激发和电离, 是一个多体相互作用过程. 碰撞过程的研究涉及多体碰撞动力学, 具有重要的物理意义, 并在可控核聚变、等离子体物理和天体物理等应用物理研究中具有广泛的应用前景. 离子与氦原子碰撞引起的单次电离和单电子俘获过程(称单电子过程)已有较多的实验研究<sup>[1]</sup>和较成熟的理论模型<sup>[2]</sup>. 由于双重电离、双电子俘获及转移电离现象等多电子过程的几率远小于单电子过程, 实验精度要求很高, 难度很大, 实验数据还十分缺乏. 多电子过程的理论处理必须考虑多体关联作用, 这是目前理论处理的难点, 描述多电子过程的理论模型还很不完善.

离子-原子碰撞过程可由下式描述:



在理论处理方面, 通常引入以下参数进行描述<sup>[3]</sup>:

$$\kappa = \frac{3q}{v} \quad (1)$$

其中  $v$  和  $q$  为入射离子速度、电荷态(均为原子单

位),  $v_e$  为靶电子的速度,  $\kappa$  代表入射离子与靶原子作用的强度. 按照  $\kappa$  的大小可将碰撞过程分为微扰作用区( $\kappa < 0.1$ )、中间作用区( $0.1 < \kappa < 1$ )和强相互作用区( $\kappa > 1$ ).

在微扰作用区, 入射离子的速度很高, 俘获电子几率很小, 双重电离是最主要的双电子过程. 描述双重电离的主要理论模型是 Shake-off 模型<sup>[4]</sup>, 其主要特征是二次电离截面与单次电离截面比值为常数, 不随入射离子能量变化而变化. 在中间作用区, 主要理论模型是两步模型<sup>[5]</sup>, 即入射离子分别与两个电子发生碰撞, 使之发生电离. 两步模型的主要特征是二次电离截面与单次电离截面比值随着相互作用强度  $\kappa$  的增加而变大. McGuire 认为还存在另一种形式的两步机制<sup>[6]</sup>: 入射离子先与一个靶电子碰撞, 使之电离, 在该电子出射的过程中, 又与另一个靶电子碰撞并使之电离, 这种机制与 Shake-off 机制在实验上无法区分<sup>[7]</sup>. 事实上, Shake-off 机制和两步机制往往同时起作用, 但对不同的碰撞体系和不同的能区所占的相对份额不同<sup>[8]</sup>. 在强相互作用区, 基于独立粒子近似<sup>[9]</sup>的有关理论模型不再适用, 目前还没有有效的理论模型处理这个区域的多电子过程. Close-coupling 模型目前还不能处理太多电子参与的过程<sup>[10]</sup>, 而且其计

收稿日期: 2001-04-12; 修改日期: 2001-05-25

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19604004, 19704006, 19704012, 19974057)

作者简介: 于得洋(1974-), 男(汉族), 河南新乡人, 研究员, 在读硕士生, 从事实验原子物理研究.

算结果与实验结果相比也有明显的偏差; 另一种处理方法是 Russek<sup>[11]</sup>和 Cocke<sup>[12]</sup>等人发展的统计处理方法, 即离子与原子发生碰撞的过程中, 把一定的能量传递给靶原子, 并转化为靶原子电子的内部激发能, 随后电子按照统计规律从原子“蒸发”并带走激发能, 这种方法的计算结果与实验也有明显的偏差; 分子库仑过垒模型 (MCBM)<sup>[13]</sup>较好地处理了低能高电荷态入射离子与原子碰撞反应中的多电子俘获过程, 但是 MCBM 给出的反应截面不随入射离子能量的变化而变化, 也没有考虑碰撞过程中的直接电离过程。

本工作的实验数据全部处于强相互作用区,  $\kappa$  值在 1.4—4.4 之间, 我们研究了多重电离<sup>[14-15]</sup>及多电子俘获<sup>[16]</sup>过程, 有关此能区非全裸离子引起的转移电离过程的实验研究还未见报道。

## 2 实验方法

本工作是在兰州大学  $2 \times 1.7$  MV 串列加速器上的离子-原子碰撞实验束流线上进行的。特定能量和电荷态的氟离子经两级二维可调准直光栏准直后进入碰撞靶室, 与氦原子碰撞。氦气由一个空心针头导入, 并由自动调节阀门 RME010 及其控制单元 RVG040 控制气体流量。为了保证入射离子在飞行途中仅与一个原子发生碰撞, 气体流量必须足够小, 以保证碰撞区的气压维持在  $1 \times 10^{-4}$  mbar。被电离的氦原子 (即反冲离子) 由飞行时间谱仪<sup>[17]</sup>的引出电场引出, 经加速、无场漂移后, 最终被电子倍增器 (CEM) 记录并作为飞行时间谱仪的起始信号。离子束穿越碰撞靶室后继续飞行, 用一个平行板电场将不同电荷态的散射离子偏转不同的角度。

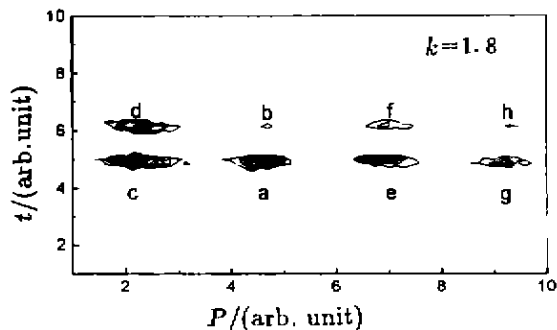


图1 5.271 MeV  $F^{2+}$  离子与 He 原子碰撞的二维等高线谱  
横坐标表示散射离子落在位置灵敏探测器上的相对位置  $P$ , 即散射离子的电荷态; 纵坐标表示反冲离子的相对飞行时间  $t$ , 即反冲离子的电荷态。

由位置灵敏的微通道板 (MCP) 探测器<sup>[18]</sup>记录, MCP 给出的时间信号经延迟后被作为飞行时间谱仪的停止信号。数据获取系统可以同时确定每次碰撞事件的散射离子和反冲离子的电荷态。实验获得的典型的二维谱如图 1 所示。

## 3 实验结果分析

以图 1 为例, 从实验获得的二维谱中可以鉴别出离子-原子碰撞过程的如下一些子过程:

- a.  $F^{2+} + He \rightarrow F^{2+} + He^{-} + e;$
- b.  $F^{2+} + He \rightarrow F^{2+} + He^{2+} + 2e;$
- c.  $F^{2+} + He \rightarrow F^{(q-1)+} + He^{+};$
- d.  $F^{2+} + He \rightarrow F^{(q-1)+} + He^{2+} + e;$
- e.  $F^{2+} + He \rightarrow F^{(q+1)-} + He^{+} + 2e;$
- f.  $F^{2+} + He \rightarrow F^{(q-1)+} + He^{2+} + 3e;$
- g.  $F^{2+} + He \rightarrow F^{(q+2)-} + He^{-} + 3e;$
- h.  $F^{2+} + He \rightarrow F^{(q-2)+} + He^{3+} + 4e.$

子过程 a—h 在二维谱中的位置见图 1 中标注。其中 c 和 d 分别代表单电子俘获过程和转移电离过程, 由于散射离子的电荷态是一样的, 所以它们落在位置灵敏 MCP 探测器的位置相同, 探测效率完全相同。在此将 c 和 d 的计数比, 即转移电离和单电子俘获之间的截面比, 定义为  $R$ 。在分析了相关的实验数据之后, 我们分别得出了  $F^{2+}$  离子入射与  $F^{3+}$  离子入射时  $R$  与  $\kappa$  之间的关系, 如图 2 所示。从图中可以看出, 无论是在  $F^{2+}$  还是  $F^{3+}$  入射的情况下,  $R$  都随着  $\kappa$  的增加而减小。

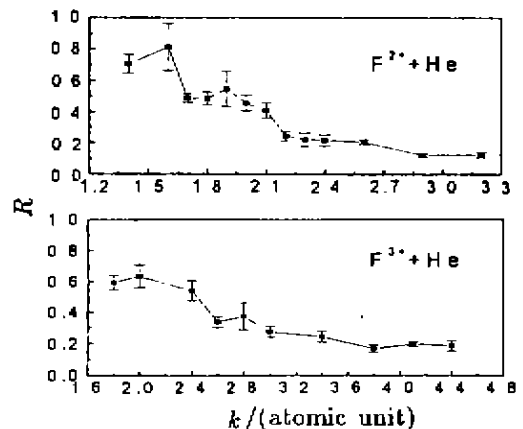


图2  $F^{2+}$  离子和  $F^{3+}$  离子与 He 原子碰撞过程中转移电离截面与单电子俘获截面比  $R$  与作用强度  $\kappa$  的关系

在强作用区, 没有合适的理论模型处理多电子过程. 与碰撞参数相关的转移电离截面可以表示为

$$\sigma_{TI}(q, \nu, b) = \langle \varphi^f | U | \varphi^i \rangle, \quad (3)$$

其中  $b$  为碰撞参数,  $\varphi^i$  和  $\varphi^f$  分别为初态和末态包含被俘获电子和被电离电子的系统波函数,  $U$  为碰撞过程中的相互作用势. 如果忽略 He 原子中两个电子之间的相互作用, 转移电离过程可认为是入射离子分别与两个电子发生作用的结果. 于是, 在两步过程的近似下可以得到:

$$\begin{aligned} \sigma_{TI}(q, \nu, b) &= \langle \varphi_1^f | U_1 | \varphi_1^i \rangle \langle \varphi_2^f | U_2 | \varphi_2^i \rangle \\ &= a_c(q, \nu, b) a_i(q, \nu, b), \end{aligned} \quad (4)$$

下角标 1, 2 分别代表第 1、第 2 个电子,  $a_c$  为单电子俘获几率振幅,  $a_i$  为单次电离几率振幅. 于是得:

$$\sigma_{TI}(q, \nu) = 2\pi \int_0^\infty |a_c(q, \nu, b) a_i(q, \nu, b)|^2 b db, \quad (5)$$

而

$$\sigma_c(q, \nu) = 2\pi \int_0^\infty |a_c(q, \nu, b)|^2 b db, \quad (6)$$

$$\sigma_i(q, \nu) = 2\pi \int_0^\infty |a_i(q, \nu, b)|^2 b db, \quad (7)$$

可以看出:

$$R = \frac{\sigma_{TI}}{\sigma_c} \propto \sigma_i(q, \nu), \quad (8)$$

即  $R$  与  $\sigma_i$  有相同的变化趋势. 在本实验能区, 由于入射离子的速度较低, Born 近似不再适用, Janev 等<sup>[3]</sup>用 Close-coupling 方法给出了较好的理论结果, 如图 3 中标有  $\sigma_{iv}^{(0)}$  和 Janev 的曲线所示.

在我们的实验中,  $F^{2+}$  束流的约化能量范围为 0.020 — 0.102 MeV/(u·q),  $F^{3+}$  束流的约化能量范围为 0.015 — 0.092 MeV/(u·q). 从图 3 中可以看出, 在此区间直接单次电离的约化截面 ( $\sigma_{iv}^{(0)}/q$ ) 随入射离子约化能量的增加而增大, 即随  $\kappa$  的增加而减小. 这就定性地解释了图 2 中的本实验的结果. 由此说明, 在本实验能区, 转移电离与单电子俘获截面比  $R$  随  $\kappa$  的增加呈减小趋势, 即作用强度越大,

该比值越小.

另外, 我们还研究了氟离子与氦原子碰撞过程中的转移电离现象<sup>[20]</sup>, 也发现了转移电离与单电子俘获截面比值  $R$  随作用强度  $\kappa$  的增加而减小.

### 4 小结

本工作通过对非全裸氟离子与氦原子碰撞过程的研究, 得到了转移电离截面与单电子俘获截面比值随作用强度的变化趋势, 并给出了实验结果的定性解释. 为了更深入地理解强相互作用区的多电子过程, 还需要积累更多的实验数据, 同时也需要更多的理论工作.

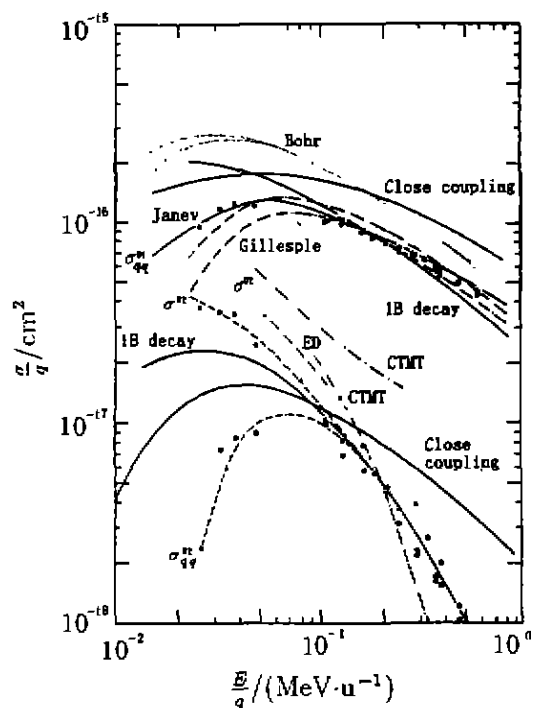


图 3 直接电离截面与入射离子能量的关系  
 ■ B( $q=4, 5$ ), ● C( $q=4-6$ ), ▲ D( $q=6-8$ ), 见文献[3]

致谢 感谢陈子纯工程师、李兰亭工程师在  $2 \times 1.7$  MV 串列加速器运行及维护上给予的大力协助, 感谢刘正民教授对本工作的支持与帮助, 感谢吴英硕士、丁宝卫硕士、张小东硕士在实验工作中所给予的大力协助.

### 参 考 文 献:

[1] Knudsen H, Haugen H K, Hvelplund P. Single-electron-cap-

ture Cross Section for Medium and High-velocity, Highly

- Charged Ions Colliding with Atoms [J]. *Phys Rev*, 1981, **A23**: 597-619.
- [2] Inokuti M, Itikawa Y, Turner J E, Addenda: Inelastic Collisions of Fast Charged Particles with Atoms and Molecules --- The Bethe theory revisited [J]. *Rev Mod Phys*, 1978, **50**: 23-35.
- [3] Knudsen H, Andersen L H, Heelplund P, *et al*. An Experimental Investigation of Double Ionization of Helium Atoms in Collision with Fast, Fully Stripped Ions [J]. *J Phys*, 1984, **B17**: 3545-3561.
- [4] Mittleman M H. Single and Double Ionization of He by Electrons [J]. *Phys Rev Lett*, 1966, **16**: 438-439.
- [5] Gryzinski M. Classical Theory of Atomic Collisions: I Theory of inelastic collisions [J]. *Phys Rev*, 1965, **138**: A336-A358.
- [6] McGuire J H. Double Ionization of Helium by Protons and Electrons at High Velocities [J]. *Phys Rev Lett*, 1982, **49**: 1153-1156.
- [7] Ishihara T, Hino K, McGuire J H. Photoionization of Two Electrons in Helium [J]. *Phys Rev*, 1991, **A44**: R6980-R6982.
- [8] Skogvall B, Chesnel J Y, Fremont F, *et al*. Double Ionization of He and Li by 95 MeV/u  $N^{11+}$  Impact [J]. *Phys Rev*, 1995, **A51**: R4321-R4324.
- [9] McGuire J H, Weaver L. Independent Electron Approximation for Atomic Scattering by Heavy Particles [J]. *Phys Rev*, 1977, **A16**: 41-47.
- [10] Fritsch W, Lin C D. The Semiclassical Close-coupling Description of Atomic Collisions: Recent developments and results [J]. *Phys Rpt*, 1991, **202**: 1-97.
- [11] Russek A, Thomas M L. Ionization Produced by Atomic Collisions at keV Energies [J]. *Phys Rev*, 1958, **109**: 2015-2025.
- [12] Cocke C L. Production of Highly Charged Low-velocity Recoil Ions by Heavy-ion Bombardment of Rear-gas Targets [J]. *Phys Rev*, 1979, **A20**: 749-758.
- [13] Niehaus A. A Classical Model for Multiple-electron Capture in Slow Collisions of Highly Charged Ions with Atoms [J]. *J Phys*, 1986, **B19**: 2925-2937.
- [14] Cai X H, Liu Z Y, Chen X M, *et al*. One and Two Electron Transition in Energetic Ion and Helium Collisions [J]. *Nucl Intr and Meth*, 1998, **B140**: 319-324.
- [15] 蔡晓红, 马新文, 刘惠萍等. 非全裸离子-原子碰撞中的多重电离研究[J]. *原子核物理评论*, 2000, **17**(3): 179-182.
- [16] Cai X, Chen X, Liu Z, *et al*. Multi-electron Transitions in  $Fv^{+}-Ne$  and  $Na^{9+}-Ne$  Collisions [J]. *Euro Phys J*, 1999, **D6**: 23-28.
- [17] 蔡晓红. 离子原子碰撞中的多重电离研究[D]. 兰州: 兰州大学现代物理系, 1995.
- [18] 马新文, 刘惠萍, 王友德等. 一维位置灵敏电阻阳极低能重离子探测器[J]. *核电子学与探测技术*, 1996, **16**(6): 439-442.
- [19] Janev R K, Presnyakov L P. Single-electron Excitation and Ionization Processes in Atom-multicharged-ion Collisions [J]. *J Phys*, 1980, **B13**: 4233-4244.
- [20] 于得洋. 非全裸氟离子与氦原子和氖原子碰撞中的多电子过程研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2001.

## Transfer Ionization Processes in Collisions of Partially Stripped Fluorine Ions on Helium Atoms\*

YU De-yang<sup>1</sup>, CHEN Xi-meng<sup>1</sup>, YANG Zhi-hu<sup>1</sup>, WU Cui-e<sup>2</sup>, LIU Hui-ping<sup>1</sup>, QI Zhong<sup>2</sup>

LIU Rong-chun<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>2</sup>, MA Xin-wen<sup>1</sup>, CAI Xiao-hong<sup>1</sup>, LIU Zhao-yuan<sup>2</sup>

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*;

2 *Department of Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** The cross-section ratios of the transfer ionization to the single electron capture of helium induced by fluorine ions in the strong-interaction region were measured by means of the position-sensitive-detecting and the time-of-flight (TOF) technologies. It is found that the cross section ratios decrease with the increasing of the interaction-strength  $\kappa$  in this work. In the energy range of this work, the transfer ionization can be considered as a two-step process that one electron is captured by projectile and another is ionized subsequently; the double ionization of helium is dominated by the two-step mechanism.

**Key words:** ion-atom collision; transfer ionization; electron capture

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (19604004, 19704006, 19704012, 19974057)