

文章编号: 1007-4627(2002)02-0172-04

非全裸氟离子与氖原子碰撞中的转移电离研究*

于得洋¹, 陈熙萌², 杨治虎¹, 王 强², 卢荣春¹, 刘惠萍¹,
祁 中², 吴翠娥², 蔡晓红¹, 马新文¹, 刘兆远²

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 兰州大学现代物理系, 甘肃 兰州 730000)

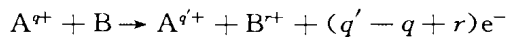
摘 要: 采用位置灵敏探测和散射离子-反冲离子飞行时间技术测量了强相互作用区 F^{2+} 和 F^{3+} 离子与 Ne 原子碰撞中的转移电离截面与单电子俘获截面之比. 与 F^{9+} -He 实验结果进行了比较, 并进行了定性讨论.

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

离子-原子碰撞过程由下式描述:



其中, A^{q+} 表示入射离子, B 表示靶原子, $A^{q'+r}$ 表示散射离子, B^+ 表示反冲离子. 如果入射离子在碰撞过程中俘获了电子 ($q' < q$), 同时系统还有自由电子发射 ($q' - q + r > 0$), 则称之为转移电离过程.

在理论处理方面, 通常引入以下参数描述碰撞过程^[1]:

$$\kappa = \frac{2q}{v}, \quad (1)$$

其中 v 为入射离子的速度, q 为入射离子的电荷态 (均为原子单位), κ 代表入射离子与靶原子作用的强度. 按照 κ 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^[2], 入射离子的速度很高, 与靶原子相互作用时间很短, 俘获电子的几率很小. 最主要的反应道是直接单次电离, 靶原子的直接二次电离主要由 Shake-Off 机制引起. 在中间作用区, 随着碰撞时间的增加, 离子有机会分别与两个或两个以上靶电子发生相互作用, 并使其电离, 即两步过程模型, 一般以 TS2 表示. H. Knudsen 提出了另一种形式的两步过程: 入射离子先与一个电子碰

撞, 使之电离, 在该电子出射的过程中, 又与另一个电子碰撞并使其电离, 这种机制与 Shake-Off 机制在实验上无法区分, 以 TS1 表示. 事实上, Shake-Off 机制和两步过程往往同时起作用, 但对不同的碰撞体系和不同的能区所占的相对份额不同^[2, 3]. 在强相互作用区, 碰撞过程中被激活的电子数目多, 而且开放的反应道也很多^[4, 5], 由于必须考虑多体关联作用, 目前还没有有效的理论模型. 同时, 由于多电子过程的实验测量相对困难, 实验数据至今仍很缺乏.

本研究小组曾在强相互作用区研究了多重电离^[6, 7]及多电子俘获^[4]过程, 并对 F^{9+} -He 碰撞过程中的转移电离现象进行了研究^[5, 8]. 本工作着重研究氟离子与氖原子碰撞引起的转移电离过程, 是以前工作的进一步深入. 实验数据处于强相互作用区, κ 在 1.6—4.1 之间, 此能区非全裸氟离子与氖原子碰撞引起的转移电离过程的实验研究还未见有报道.

2 实验方法

本工作在兰州大学 2×1.7 MV 串列加速器上进行. 氟离子在碰撞区与 Ne 原子发生单次碰撞, 散射离子经过静电分析器后由一个位置灵敏微道板

收稿日期: 2002-04-1; 修改日期: 2002-05-04

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10134010); 中国科学院百人计划资助项目(2001-2003)

作者简介: 于得洋(1976-), 男(汉族), 河南新乡人, 硕士, 研究员, 从事原子物理研究.

探测器探测记录. 反冲 Ne^{q+} 离子由飞行时间谱仪探测. 数据获取系统对散射离子信号和反冲离子信号进行符合关联测量^[5]. 实验获得的典型二维谱如图 1 所示. 图中按反冲离子和散射离子的电荷态对二维谱进行了划分.

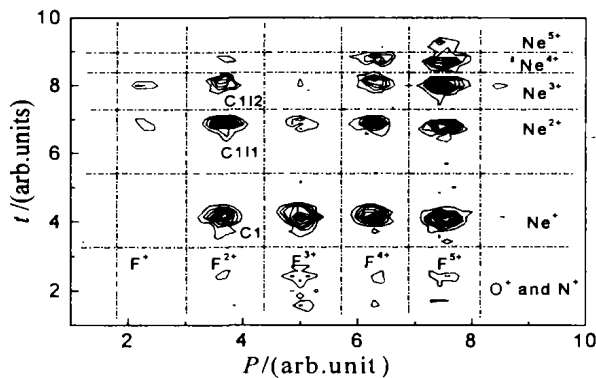
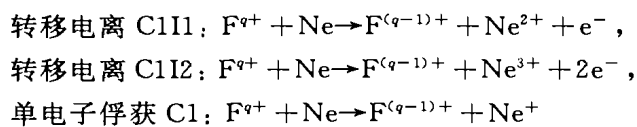


图 1 4.270 MeV F^{3+} 离子与 Ne 原子碰撞的二维等高线谱 $\kappa=2.0$. 横坐标表示散射离子落在位置灵敏探测器上的相对位置 P (散射离子的电荷态), 纵坐标表示反冲离子的相对飞行时间 t (反冲离子的电荷态).

3 实验结果与讨论

与 He 原子相比, Ne 原子的结构和电离能有很大的不同. Ne 原子比 He 原子有更多的核外电子, F^{q+} -Ne 碰撞的反应道也更复杂. 本工作着重研究了 F^{2+} 和 F^{3+} 离子俘获一个电子情况下, 氖原子多次电离与单次电离的截面比随作用强度 κ 的变化规律, 即



之间的相对截面随作用强度 κ 的变化. 对于以上 3 种反应过程, 由于散射离子 $\text{F}^{(q-1)+}$ 的电荷态是相同的, 所以它们落在位置灵敏 MCP 探测器上的相同位置上, 探测效率相同, 这样就避免了由 MCP 探测器效率引入的系统误差. 在此将转移电离 C1I1 和单电子俘获 C1 的计数比值定义为 $R(\text{C1I1}/\text{C1})$, 转移电离 C1I2 和单电子俘获 C1 的计数比值定义为 $R(\text{C1I2}/\text{C1})$, 转移电离 C1I2 和转移电离 C1I1 的计数比值定义为 $R(\text{C1I2}/\text{C1I1})$. 图 1 中标出了单电子俘获 C1、转移电离 C1I1 和转移电离 C1I2 的代表事件.

在分析了相关的实验数据以后, 我们分别得到

了 F^{2+} 和 F^{3+} 离子与氖原子碰撞反应中 $R(\text{C1I1}/\text{C1})$, $R(\text{C1I2}/\text{C1})$ 和 $R(\text{C1I2}/\text{C1I1})$ 随相互作用强度 κ 的变化关系, 如图 2 所示.

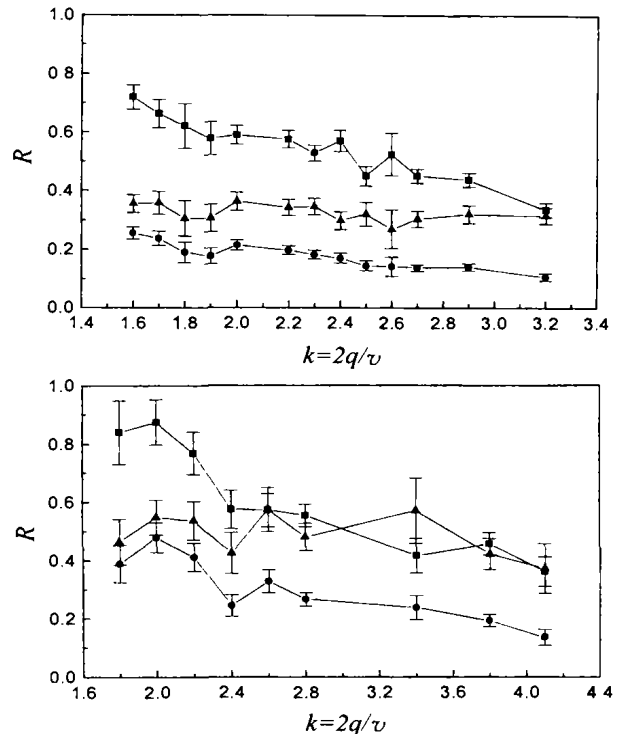


图 2 F^{2+} 和 F^{3+} 离子与 Ne 原子碰撞过程中转移电离截面与单电子俘获截面比与作用强度 κ 的关系
 ■为 $R(\text{C1I1}/\text{C1})$, ●为 $R(\text{C1I2}/\text{C1})$, ▲为 $R(\text{C1I2}/\text{C1I1})$.

从图 2 中可以看出, 截面比 $R(\text{C1I1}/\text{C1})$ 随作用强度 κ 的增加呈下降趋势, 与氟离子和 He 原子碰撞的结果相似^[8]. 这说明 Ne 原子的转移电离 C1I1 仍然可以被看作是一个电子被俘获、另一个电子被电离的两步过程, 即 $R(\text{C1I1}/\text{C1})$ 与单次电离截面 σ_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, 直接单次电离截面 σ_i 随作用强度 κ 的增加而减小.

还可以看出, $R(\text{C1I2}/\text{C1})$ 也随 κ 的增加以相同的速度下降, $R(\text{C1I2}/\text{C1I1})$ 基本是一个常数. 这说明转移电离 C1I2 不能被看作是一个电子被俘获、另外两个电子被逐次直接电离的三步过程. 与 He 原子不同, Ne 原子有两个壳层, 对其转移电离过程应进行更为详细的分析. 首先考虑“单电子俘获+俄歇过程”对转移电离 C1I1 的影响. 当氟离子从氖原子的内壳俘获一个电子后, 氖原子内壳留下一个空穴, 外壳电子可以有两种方式填充该空穴: 一种

是辐射跃迁，即在外壳电子填充内壳空穴时，剩余能量以辐射光子形式释放；另一种是俄歇过程，即外壳电子填充内壳空穴时，将剩余能量传递给外壳另一束缚态电子，使其电离。为了具体分析俄歇过程对转移电离 C1I1 的贡献，可以把单电子俘获 C1 细分为以下 3 种情况：

$$F^{9+} + Ne \rightarrow F^{(9-1)+} + Ne^+(1s^1 2s^2 2p^6), \quad (a)$$

$$F^{9+} + Ne \rightarrow F^{(9-1)+} + Ne^+(1s^2 2s^1 2p^6), \quad (b)$$

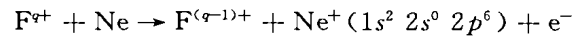
$$F^{9+} + Ne \rightarrow F^{(9-1)+} + Ne^+(1s^2 2s^2 2p^5), \quad (c)$$

这 3 种情况分别代表氟离子分别从氖原子的 1s, 2s 和 2p 壳层俘获了一个电子，而其它电子未受影响。氖原子核外电子的结合能如表 1 所示。显而易见，由于结合能的限制，(c)式代表的俘获过程不可能有后续的俄歇过程。(b)式代表的过程从能量方面考虑可以有后续的俄歇过程，但这时是同一主壳层内不同亚壳之间的跃迁，这种跃迁几率很小^[9]，可以忽略。现在考虑(a)式所代表的过程：入射离子要俘获一个电子，首先要使其得到足够的能量而脱离靶原子的束缚；离子-电子碰撞时，电子所能得到的最大动能为 $2m_e v_i^2$ ， m_e 是电子质量， v_i 是入射离子相对于靶电子的速度，借助于二体碰撞近似，只有当此能量大于束缚电子的结合能时，电子才能脱离靶原子的束缚；对于氖原子的 1s 电子，其结合能为 866.9 eV，相应的要求 F^{9+} 离子能量高于 7.56 MeV 时，才有可能引起氖原子的 1s 壳电离。本工作的 F^{9+} 离子能量全部低于 7.56 MeV，所以 1s 电子俘获过程实际上不可能发生。综上所述，在本工作中，转移电离 C1I1 无需考虑“单电子俘获+俄歇过程”的影响。

表 1 氖原子各壳层电子的结合能

壳层	结合能/eV
1s	866.9
2s	45
2p	18.3

对于转移电离 C1I2，如果认为是“转移电离 C1I1+俄歇过程”造成的，那么，从以上的讨论可知，转移电离 C1I1 产生的两个空穴应该都处于 2s 壳层，即只有



所代表的转移电离 C1I1 才可以有后续的俄歇过程。转移电离 C1I2 还可能由“转移电离 C1I1 + Shake Off 机制”产生，即在转移电离 C1I1 发生后，系统由初始时的存在电子关联的原子波函数跃迁至离子波函数(即电子重组)过程中，一个电子以一定的几率跃迁到连续态^[2]。此外，“转移电离+TS1 机制”也会对转移电离 C1I2 有贡献，即在转移电离 C1I1 中发射的电子在出射的路径上，又与另一个束缚电子碰撞并使其电离。在这 3 种情况下， $R(C1I2/C1I1)$ 均与作用强度 κ 无关，是一个常数。如果将转移电离 C1I2 看作是一个电子被俘获、另外两个电子被逐次直接电离的三步过程， $R(C1I2/C1I1)$ 应随作用强度 κ 的增加而减小，这与实验事实不符。综合以上分析，在本工作能区，转移电离 C1I2 不是一个三步过程，而可能是以上 3 种作用机制的结果。

与 He 原子靶相比，Ne 原子靶转移电离与单电子俘获截面比随相互作用强度 κ 的变化较缓慢，这可能是由于 Ne 原子有更多的核外电子的缘故。离子-原子碰撞中单重电离几率随入射离子速度的变化规律如图 3 所示。当入射离子的速度 v_i 与靶电子的速度 v_e 大致相当时，靶电子被电离的几率最大。He 原子的核外电子能量是单一的(电子速度相同)，而 Ne 原子则有很多核外电子，其速度分布在一个较大的范围内，因而其电离的几率随入射离子速度的变化相对缓慢，这与我们的实验结果相符合。

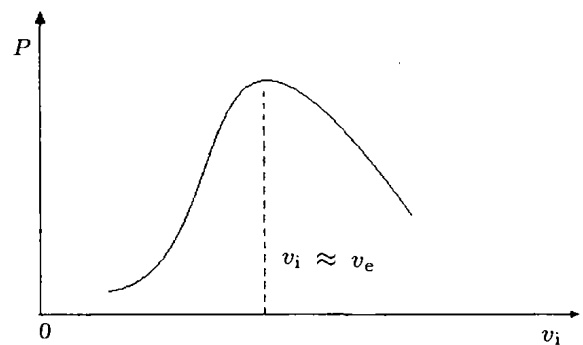


图 3 单次电离几率与入射离子速度的关系的示意图

4 总结

本工作研究了 F^{9+} -Ne 碰撞过程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，并与 F^{9+} -He 碰撞系统进行了对比，给出了实验结果

的定性解释. 实验发现, Ne 的转移电离 C1I1 与 He 的转移电离过程相似, 可以认为是一个电子被俘获、另一个电子被电离的两步过程; 而转移电离 C1I2 则应该看作是两步机制引起的转移电离 C1I2 和随后的靶原子电子发射过程的复合效应. Ne 的

转移电离过程与 He 的转移电离过程相比有许多新的特点. 为了更深入地理解强相互作用区 Ne 原子的转移电离过程, 还需要进一步积累相关的实验数据, 同时也需要更细致的理论工作.

参 考 文 献:

- [1] Knudsen H, Andersen L H, Hvelplund P, *et al.* An Experimental Investigation of Double Ionization of Helium Atoms in Collision with Fast, Fully Stripped Ions [J]. J Phys, 1984, **B17**: 3 545.
- [2] McGuire J H, Berrah N, Bratlett R J, *et al.* The Ratio of Cross Sections for Double to Single Ionization of Helium by High Energy Photons and Charged Particles [J]. J Phys, 1995, **B28**: 913.
- [3] Skogvall B, Chesnel J Y, Fremont F, *et al.* Double Ionization of He and Li by 95 MeV/amu N^{7+} Impact [J]. Phys Rev, 1995, **A51**: R4 321.
- [4] Cai X, Chen X, Liu Z, *et al.* Multi-electron Transitions in F^{9+} -Ne and Na^{9+} -Ne Collisions [J]. Euro Phys J, 1999, **D6**: 23.
- [5] 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]. 甘肃兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2001.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 于得洋, 陈熙萌, 杨治虎等. 非全裸氟离子与氦原子碰撞中的转移电离过程[J]. 原子核物理评论, 2002, **19**(1): 62.
- [9] Krause M O. Atomic Radioactive and Radiationless Yields for K and L Shells[J]. J Phys Chem Ref Data, 1979, **8**: 307.

Investigation of Transfer Ionization Processes in the Collisions of Partially Stripped Fluorine Ions on Neon

YU De-yang¹, CHEN Xi-meng², YANG Zhi-hu¹, WANG Qiang², LU Rong-chun¹, LIU Hui-ping¹,

QI Zhong², WU Cui-e², CAI Xiao-hong¹, MA Xin-wen¹, LIU Zhao-yuan²

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

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

Abstract: The ratios of the cross-section of the transfer ionization to the single electron capture of Neon induced by F^{2+} and F^{3+} ions are measured by means of the time-of-flight technologie. In the present energy range, the transfer ionization C1I1 of neon can be considered as a two-step process, in which one electron is captured by projectile and another one is directly ionized, and the transfer ionization C1I2 process should be considered as a subsequent rearrangement of neon following a transfer ionization C1I1 process. A qualitative interpretation is presented.

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

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (1013410); One Hundred Talents Project of Chinese Academy of Sciences(2001-2003)