

文章编号: 1007- 4627(2000)03-0179-04

非全裸离子-原子碰撞中的多重电离研究*

蔡晓红, 马新文, 刘惠萍, 杨治虎, 于得洋

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

陈熙萌, 刘兆远, 申自勇, 吕魁

(兰州大学现代物理系, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用加速器提供的非全裸重离子束 ($q=1-4$) 轰击氦、氖和氩原子, 研究了由非全裸离子引起原子多重电离的有效电荷效应和电荷交换效应. 提出用一个有效电荷来等价描述非全裸入射离子对靶原子的作用, 将描述全裸离子-原子碰撞过程的物理模型推广到处理非全裸离子-原子碰撞过程, 采用轨道贯穿模型对有效电荷的内在物理机制进行了解释, 提出一种新的理论方法将多重电离中俄歇过程的贡献予以扣除. 通过研究发现, 扣除俄歇过程贡献后, 多重电离截面随入射离子 q/v 的变化与多步过程的预言相符.

关键词: 离子-原子碰撞; 多重电离; 截面

中图分类号: O562.4 **文献标识码:** A

1 前言

入射离子与靶原子发生碰撞, 靶原子的一个或多个电子可发生电离, 形成靶原子的单次或多重电离态. 有关单次电离现象的研究已较为深入, 理论描述基本成熟, 实验数据积累趋于完备. 近年来, 在单次电离研究的基础上, 多重电离的研究受到了广泛的重视. 多重电离的几率远小于单次电离的几率, 实验研究所需要的技术手段较为复杂, 实验精度要求很高. 在理论处理方面, 独立粒子模型不再适用, 必须考虑多体相互作用. 另外, 原子中电子-电子的关联机制和关联强度仍是迄今为止悬而未决的问题, 研究离子-原子碰撞过程中的多重电离现象, 对于了解原子中电子之间的关联作用和发展多体相互作用动力学具有重要意义^[1,2].

目前, 有关多重电离的实验研究主要集中在全裸离子-氦原子碰撞中的单次和双重电离过程. 氦原子的双重电离主要有 shake off 和两步过程两种机制^[3]. 有关氦原子双重电离已有的实验数据主要集中在较轻的全裸离子-氦原子碰撞, 入射离子的能量大部分处于较高能段. 非全裸离子入射引起靶

原子的单次和双重电离, 存在有效电荷效应^[4], 此有效电荷的数值与碰撞参数、入射离子种类和能量以及靶原子的性质等因素相关. 目前, 对非全裸离子-氦原子碰撞过程还缺乏系统的实验和理论研究.

对核外电子数目较多的原子多重电离的研究, 由于其多重电离中有俄歇过程的贡献, 实验现象变得复杂化, 已有的实验数据很少, 其中大部分数据集中在对质子等较轻入射离子的研究. 整体上看, 对于重离子轰击多电子原子引起的靶原子多重电离过程, 目前还缺乏系统研究, 现有数据局限于少数碰撞系统和较小能量范围. 理论研究所必需的实验数据严重不足, 除氦原子外, 有关其它多电子原子的多重电离中俄歇效应的研究还未见报道^[5].

总之, 离子-原子碰撞过程中的许多实验现象无法用现有理论进行解释, 从适用范围和与实验的符合程度这两方面看, 理论模型都还有待于进一步深入和发展.

近年来, 本研究小组利用加速器提供的非全裸 Li^{q+} , C^{q+} , O^{q+} , F^{q+} , Na^{q+} , Cl^{q+} 和 K^{q+} 等重离子束 ($q=1-4$) 轰击氦、氖和氩原子, 对非全裸离子与

* 收稿日期: 2000-03-23

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19604004); 核工业基金资助项目; 中国博士后基金资助项目
作者简介: 蔡晓红(1965-), 女(汉族), 重庆人, 研究员, 从事离子-原子碰撞研究.

原子碰撞中的多重电离进行了系统的研究^[6-12]. 主要研究了由非全裸离子引起原子多重电离的有效电荷效应和电荷交换效应. 在对重离子与多电子靶原子的碰撞研究中, 提出一种新的理论方法多重电离中俄歇过程的贡献予以扣除. 通过研究发现, 扣除俄歇过程贡献后, 多重电离截面随入射离子 q/v 的变化与多步过程的预言相符.

本文将对本研究小组在多重电离研究方面的研究成果进行总结.

2 实验方法

本工作采用散射离子-反冲离子飞行时间快符合技术, 通过测量飞行时间谱将不同电荷态 (即不同电离态) 的反冲离子分辨开. 由 $2 \times 1.7 \text{ MV}$ 串联加速器提供的各种重离子束经由偏转磁铁进行能量和电荷态选择^[6], 然后由两个相距 1.5 m 的两维准直光栏准直. 准直后的束流在靶室的中心位置处与气体原子发生碰撞, 装有进气针阀, 气体经靶室上方的进气针通至碰撞区, 实验中控制靶室气压足够低, 以保证入射离子在碰撞区内只发生单次碰撞. 采用差分抽气系统对靶室进行差分抽气. 碰撞后, 入射离子将偏离原来的方向而被散射, 没有与气体原子发生碰撞的入射离子行进方向不变, 采用一个平行板电场对散射离子进行偏转, 使得未发生碰撞的入射离子打在位于散射离子探测器正前方的阻挡条上, 不被探测器记录, 以减小符合测量的本底. 采用平行板雪崩探测器 (PPAD) 探测散射离子. 靶室内的气体原子在碰撞后发生电离, 产生不同价态的反冲离子, 反冲离子在加速电场作用下飞行一段时间后, 由电子倍增器 CEM 探测.

将实验测得的原子多重电离和单次电离的截面比与全裸离子入射时相应的截面比进行比较, 得到非全裸离子入射时, 在碰撞过程中对靶原子电离实际上产生作用的入射离子有效电荷 q_{eff} .

3 结果和讨论

3.1 离子-氦原子碰撞

为研究非全裸离子与氦原子碰撞过程中, 氦原子的单次和双重电离随入射离子电荷态变化的物理规律, 将本实验测得的非全裸 $+1, +2, +3$ 和 $+4$ 价 C, O 和 F 离子-氦原子碰撞中双重电离和单次电

离的截面比 R_{21} 与 Knudsen 等人测得的全裸离子-氦原子碰撞的双重和单次电离截面比 R_{21}^0 进行比较, 求得不同能量及不同电荷态的非全裸离子引起氦原子电离的有效电荷 q_{eff} . 作为示例^[6-12], 图 1 中给出了经过有效电荷修正后, 非全裸碳离子-氦原子碰撞中双重电离和单次电离的截面比 R_{21} 随入射离子 v/q_{eff} 的变化规律, 图中实线为 $R_{21} \propto 1/(v/q_{\text{eff}})^2$ 的反平方规律. 由图 1 可知, 当入射离子速度与有效电荷 q_{eff} 的比值增大时, 氦原子双重电离与单次电离的截面比 R_{21} 减小, 在经过有效电荷修正后, R_{21} 与反平方规律基本一致, 实验测得的截面比随入射离子 v/q_{eff} 的变化趋势略比反平方规律预言的平缓, 这是由于忽略了电荷交换效应对总电离的贡献所致. 由此可知, 在本实验能区范围内, 引入有效作用电荷后, 可将全裸离子-氦原子碰撞的有关理论处理推广到非全裸离子-氦原子碰撞过程中, 氦原子双重和单次电离的截面比 R_{21} 与两步过程预言的反平方规律基本相符. 氦原子双重电离的作用机制主要为两步过程机制. 由于电荷交换效应的影响, 实验测得的氦原子双重电离和单次电离的截面比随入射离子 v/q_{eff} 的变化趋势略偏离于反平方规律.

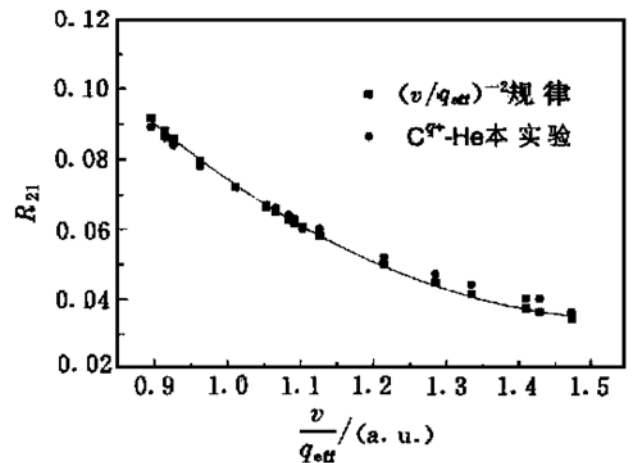


图 1 C 离子引起氦原子双重电离和单次电离的截面比随 v/q_{eff} 的变化规律

3.2 离子与多电子原子的碰撞

对于重离子与多电子原子碰撞, 由于从实验上无法将直接多重电离与俄歇过程对多重电离的贡献相互分辨开, 我们提出了一种方法将俄歇过程的贡献从总电离中予以扣除^[8, 12]. 以离子-氦原子碰撞过程为例, 当氦原子的一个 K 壳电子发生电离时, 通过 KLL 俄歇过程填充其 K 空穴, 而形成氦原子的双重电离态. 氦原子 K 壳的俄歇分支比为 0.982 ,

扣除俄歇过程贡献的氖原子双重和单次电离截面比可表示为

$$R_{21}^{qq} = R_{21}^{qq}(\text{exp}) - \frac{0.982\sigma_K^{qq}/\sigma_L^{qq}}{1 + \sigma_K^{qq}/\sigma_L^{qq}}$$

$$= R_{21}^{qq}(\text{exp}) - R_{21}^{qq}(\text{Auger}), \quad (1)$$

这里 $R_{21}^{qq}(\text{exp})$ 为实验测得的包括俄歇过程贡献的氖原子双重和单次电离截面比, σ_K^{qq} 和 σ_L^{qq} 分别为氖原子 K 壳和 L 壳的单次电离截面. K 壳和 L 壳单次电离的截面比可由 Bohr 理论计算得到:

$$\frac{\sigma_K^{qq}}{\sigma_L^{qq}} = \frac{1/I_K - 1/2mv^2}{1/I_L - 1/2mv^2}. \quad (2)$$

这里 I_K 和 I_L 分别为氖原子 K 壳和 L 壳的结合能, m 和 v 分别为电子的质量和入射离子的折合速度. Bohr 理论计算的原子各个壳层的电离截面与实验结果有较大偏离, 但在本工作中采用了 Bohr 理论计算了氖原子 K 壳和 L 壳的单次电离截面比. 对三重电离, 近似地有

$$R_{31}^{qq} = R_{32}^{qq} \cdot R_{21}^{qq} \approx R_{32}^{qq}(\text{exp}) \cdot R_{21}^{qq}, \quad (3)$$

其中 $R_{32}^{qq}(\text{exp})$ 为实验测得的包括俄歇过程贡献的氖原子三、双电离截面比, R_{21}^{qq} 为扣除俄歇过程贡献后的氖原子双重和单次电离截面比.

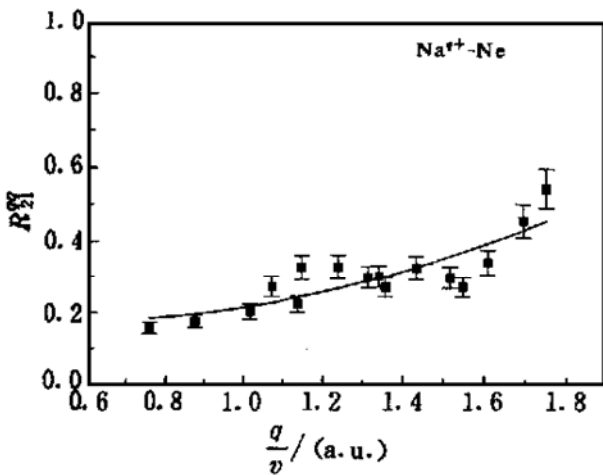


图 2 扣除碰撞中俄歇贡献的 Ne 的双重和单次电离截面比

作为示例, 图 2- 4 中给出了扣除俄歇过程贡献后 $\text{Na}^{q+}-\text{Ne}$, $\text{F}^{q+}-\text{Ne}$ 和 $\text{C}^{q+}-\text{Ar}$ 碰撞中靶原子的双重电离与单次电离截面比、三重电离与单次电离截面比以及四重电离与单次电离截面比, 图 2- 4

中实线分别为 $(q/v)^2$, $(q/v)^4$ 和 $(q/v)^6$ 拟合曲线. 由图 2- 4 中可以看到, 扣除俄歇贡献的多重电离与单次电离截面比分别与 $(q/v)^2$, $(q/v)^4$ 和 $(q/v)^6$ 规律符合. 这说明, 在扣除俄歇过程的贡献后, 靶原子的直接多重电离机制为多步过程机制.

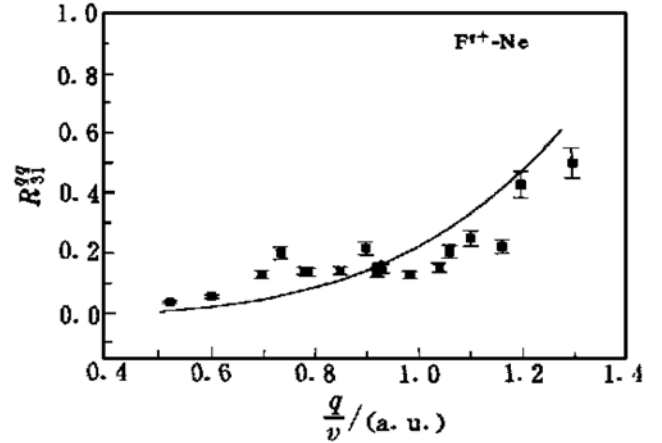


图 3 扣除碰撞中俄歇贡献的 Ne 的三、单电离截面比

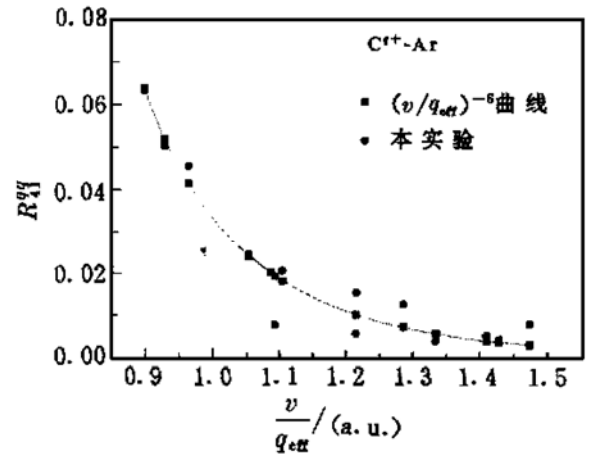


图 4 扣除碰撞中俄歇贡献的 Ar 的四、单电离截面比

4 结论

本工作对非全裸离子引起氢、氖和氩原子的单次和多重电离进行了系统的实验和理论研究. 主要系统研究了由非全裸离子引起原子多重电离的有效电荷效应和电荷交换效应. 提出可以用一个有效电荷来等价描述非全裸入射离子对靶原子的作用, 将入射离子视为一个无内部结构的点离子, 从而将描述全裸离子-原子碰撞过程的物理模型推广到处理非全裸离子-原子碰撞过程, 首次采用轨道贯穿模型对有效电荷的内在物理机制进行了解释. 研究发现, 有效电荷的数值与入射离子电荷态、能量和入射离子种类以及靶原子的电子结构有关. 在对重离

子与多电子靶原子的碰撞研究中, 提出一种新的理论方法多重电离中俄歇过程的贡献予以扣除, 通过

研究发现, 扣除俄歇过程贡献后, 多重电离截面随入射离子 q/v 的变化与多步过程的预言相符。

参 考 文 献:

- [1] McGuire J H. Multiple-electron Excitation, Ionization and Transfer in High-velocity Atomic and Molecular Collisions [J]. *Adv Atom Mol Opt Phys*, 1992, 29: 217- 323.
- [2] 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, 1- 117.
- [3] McGuire J H, Weaver L. Independent Electron Approximation for Atomic Scattering by Heavy Particles [J]. *Phys Rev*, 1977, A16: 41- 47.
- [4] Dubois R D, Toburen L H. Single and Double Ionization of Helium by Neutral-particle to Fully Stripped Ion Impact [J]. *Phys Rev*, 1988, A38: 3 960- 3 968.
- [5] Manson S T, Dubois R D, Toburen L H. Multiple-ionization Mechanisms in Fast Proton-neon Collisions [J]. *Phys Rev Lett*, 1983, 51: 1 542- 1 545.
- [6] Cai X, Liu Zhaoyuan, Chen Ximeng *et al.* Effective Charge Effect in 2. 0 - 7. 0 MeV Partially Stripped F^{q+} -helium Collisions [J]. *Austr J Phys*, 1996, 49: 945- 951.
- [7] Cai X, Chen Ximeng, Shen Ziyong *et al.* The Effective Charge Effect in Partially Stripped Ion-helium Collisions [J]. *Z Phys*, 1996, A355: 439- 442.
- [8] Cai X, Chen Ximeng, Shen Ziyong *et al.* The Investigation of the Multiple Ionization of Argon by Energetic Oxygen Ions [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1996, B119: 452- 456.
- [9] Cai X, Chen Ximeng, Shen Ziyong *et al.* The Ionization of Helium by 1. 5- 7. 5 MeV Partially Stripped C^{q+} -ions [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1996, B114: 208- 212.
- [10] Cai X, Chen Ximeng, Shen Ziyong *et al.* The Double Ionization of Helium by 1. 5- 7. 5 MeV Partially Stripped Fluorine Ions [J]. *Chin J Nucl Phys*, 1996, 18: 98- 101.
- [11] Cai X, Shen Ziyong, Chen Ximeng *et al.* Double Ionization of Helium by Partially Stripped Oxygen Ions [J]. *Chin Phys Lett*, 1996, 13: 428- 431.
- [12] Cai X, Liu Zhaoyuan, Chen Ximeng *et al.* One and Two Electron Transitions in Energetic Ion and Helium Collisions [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1998, B140: 319- 324.
- [13] Cai X, Chen X, Liu Z *et al.* Multi-electron Transitions in F^{q+} - Ne and Na^{q+} -Ne Collisions [J]. *The European Physical Journal*, 1999, D6: 23- 28.

Multiple Ionization in Partially Stripped Ion-atom Collisions*

CAI Xiao-hong, MA Xin-wen, LIU Hui-ping, YANG Zhi-hu, YU De-yang
(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

CHEN Xi-meng, LIU Zhao-yuan, SHEN Zi-yong, LU kui
(*Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The partially stripped C^{q+} , O^{q+} and F^{q+} ions ($q= 1- 4$) delivered by a 2×1.7 MV tandem accelerator were employed to bombard He, Ne and Ar targets. The cross section ratios of multiple ionization to single ionization were measured for different collision systems by using time-of-flight technique. The effective charge effects and charge exchange processes were studied. By using an effective charge q_{eff} , the multiple ionization processes induced by partially stripped ions could be considered to be equal to the those of the fully stripped ion, and the theoretical model developed for the fully stripped ion-atom collisions could be used to the partially stripped ion-atom collisions. The effective charge effect was explained by using orbital interpenetration. For the multiple ionization of multi-electron targets, a new method was proposed and presented to exclude the contribution of the Auger transition to the total multiple ionization. It is found that the cross section ratios of the pure multiple ionization (excluding Auger process) to those of the single ionization are in agreement with the q/v laws predicted by the multi-step model.

Key words: ion-atom collision; multiple ionization; cross section

* **Foundation item:** NSFC (19604004); the Chinese Nuclear Science Foundation; Post Doctoral Foundation of China