

中低能非全裸 C 离子与 He 原子的碰撞研究^{*}

高志民 陈熙萌[†] 刘兆远 丁宝卫 鲁彦霞 付宏斌
刘玉文 杜娟 崔莹 邵剑雄 张红强 孙光智

(兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

(2006 年 8 月 9 日收到, 2006 年 12 月 7 日收到修改稿)

采用反冲离子飞行时间-散射离子位置灵敏符合测量技术, 测量了能量范围在 $0.7v_0-4.4v_0$ (v_0 为玻尔速度) 的碳离子 C^{q+} ($q=1-4$) 与 He 原子碰撞过程不同出射道靶原子的双电离与单电离截面比 R , 包括入射离子不损失电子(直接电离)的出射道($R_{q,q}$), 入射离子俘获一个电子的出射道($R_{q,q-1}$)和入射离子损失一个电子的出射道($R_{q,q+1}$), 并研究了 R 随入射 C 离子的能量及电荷态的变化关系. 实验表明, 对给定电荷态的入射离子, 靶原子的双电离与单电离截面比 R 与出射道有很强的依赖关系, 即 $R_{q,q} < R_{q,q+1} < R_{q,q-1}$. 直接电离出射道截面比 $R_{q,q}$ 与入射离子电荷态几乎无关, 而入射离子俘获一个电子的出射道和损失一个电子的出射道靶原子双电离与单电离截面比 $R_{q,q-1}$ 和 $R_{q,q+1}$ 却与入射离子电荷态有很强的关系. 采用原子极化理论和电子屏蔽与反屏蔽作用对实验结果进行了解释.

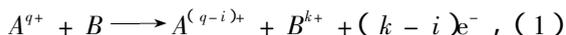
关键词: 离子-原子碰撞, 电离, 截面比

PACC: 3450H, 3470, 5220H

1. 引 言

离子与原子碰撞可以引起靶的激发和电离、入射离子的激发和电离、入射离子与靶原子间的电荷交换, 是一个多体相互作用过程. 碰撞过程的研究不仅对多体碰撞动力学的基础研究具有重要意义, 而且在可控核聚变、天体物理、离子加速器物理和激光技术等领域具有广阔的应用前景^[1-9].

离子-原子碰撞过程可由下式描述:



式中 A^{q+} 和 B 分别代表入射离子和靶原子, $A^{(q-i)+}$ 和 B^{k+} 分别代表碰撞后的散射离子和反冲离子. 如果 $i=0, k \geq 1$ (1)式称为直接电离过程, 其中 $k=1$ 为直接单电离, $k > 1$ 为直接多重电离; 如果 $1 \leq i \leq k$ 则称为电子俘获过程, 其中 $i=k$ 为纯电子俘获过程, $i < k$ 为转移电离过程; 如果 $i < 0$ 则称为入射离子电子损失过程, 这种过程往往伴随靶原子的单电离或多重电离过程.

全裸离子与原子碰撞的单电子过程(直接单电

离过程和纯单电子俘获过程)已经有了较多的实验研究^[1]并形成了较成熟的理论^[2], 但多电子过程(多重电离过程和多电子俘获过程)理论还很不成熟, 有些现象只能定性解释. 因此对多电子过程的研究成为目前离子-原子碰撞研究的一个热点^[3-9]. 非全裸离子与原子相互作用时由于入射离子电子的屏蔽(screening)与反屏蔽(antiscreeing)作用^[4,5], 使得碰撞过程更为复杂. He 原子是最简单的多电子原子, 离子与 He 原子的碰撞体系是研究碰撞过程中的多电子过程以及电子间关联作用的最理想系统.

对低电荷态离子与原子碰撞, 处理时按入射离子速度大小形成了不同的理论. 在高速时, 入射离子与靶原子作用时间短, 俘获靶电子的概率很小, 主要出射道是直接单电离、多重电离以直接双电离过程为主. 理论描述双电离的理论是震离(shake-off)机制, 即入射离子与靶原子的一个电子碰撞使其电离, 被电离了一个电子的靶离子在弛豫的过程中发射了第二个电子. 在中能区, 碰撞过程的出射道增多, 电子俘获、转移电离和直接电离同时存在并相互竞争. 这一能区的二次电离的理论主要是两种两步过程

^{*} 国家重点基础研究前期专项基金(批准号 2002CCA00900)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: chenxm@lzu.edu.cn

TS1 和 TS2. TS1 过程是指入射离子先与一个靶电子碰撞使之电离,该电子在出射的过程中又与另外一个靶电子碰撞并使其电离,这一过程在实验中与震离过程无法区分. TS2 过程是指入射离子分别与两个靶电子发生相互作用,并使其电离.在低能区,入射离子与靶原子存在很强的相互作用,碰撞中被激活的电子数目多,反应的出射道也很多,理论处理时涉及多体关联作用,因此目前尚没有合适的理论.

本文主要研究了低能到中能区($0.7v_0-4.4v_0$)非全裸碳离子 C^{q+} ($q=1-4$)与 He 原子碰撞过程中不同的出射道靶原子双电离与单电离截面比与入射碳离子的能量及电荷态的关系.研究的出射道包括直接电离出射道(直接单电离过程和直接双电离过程)、单电子俘获出射道(纯单电子俘获过程和转移电离过程)及单电子损失出射道(伴随入射离子损失一个电子的靶原子的单电离过程和双电离过程).其中靶原子直接双电离与直接单电离截面比记作 $R_{q,q}$,转移电离与纯单电子俘获截面比为 $R_{q,q-1}$,伴随入射离子损失一个电子的靶原子的双电离与单电离截面比为 $R_{q,q+1}$.本文通过较宽的实验能区、多种出射道过程全面研究了非全裸离子与 He 原子碰撞的双电离机制,其中单电子损失出射道截面比 $R_{q,q+1}$ 的研究国内报道很少.

2. 实验装置和方法

本实验是在兰州大学 2×1.7 MV 串列加速器离子-原子碰撞实验终端上完成的.实验采用反冲离子飞行时间-散射离子位置灵敏符合技术测量,并配以 MPA-3 型多参数获取系统纪录每次碰撞的符合事件,形成二维相关物理事件符合谱.下面对装置作简要描述.

特定能量和电荷态的 C 离子经加速器分析磁铁偏转后,经过相距约 1.5 m 的两个准直光阑后进入靶室,与 He 原子碰撞.He 气经靶室上端的进气针头通至碰撞区,并由自动调节阀控制进气量.实验中靶室真空维持在 3×10^{-3} Pa,以保证入射离子与靶原子只发生单次碰撞.碰撞后散射离子离开靶室时经过一个平行板电场,不同电荷态的散射离子偏转角度不同,最后由一维位置灵敏微通道板 (PSMCP) 探测器^[10]记录.碰撞后的反冲离子由飞行时间谱仪^[11]的引出电场引出,经加速、无场漂移后,最后由微通道板记录,并作为飞行时间谱仪的起始

信号,PSMCP 信号延迟后作为飞行时间的终止信号.MPA-3 型多参数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,得到二维相关物理事件的符合谱,如图 1 所示.

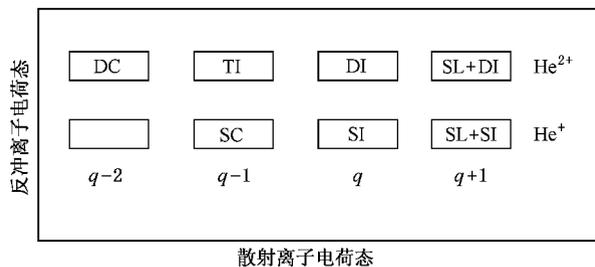


图 1 离子与 He 原子碰撞的二维相关物理事件的符合谱简图

在图 1 中,横坐标表示散射离子电荷态,通过测量散射离子落在位置灵敏探测器上的相对位置获得,纵坐标表示反冲离子电荷态,通过测量反冲离子的相对飞行时间获得.图 1 中 SL + DI 和 SL + SI 分别表示伴随入射离子损失一个电子的 He 双电离过程和单电离过程,DI 和 SI 分别表示直接双电离过程和直接单电离过程,TI 和 SC 分别表示转移电离过程和单电子俘获过程.由于三个出射道包含的两个过程(SL + DI 和 SL + SI,DI 和 SI, TI 和 SC)散射离子电荷态相同,散射离子落在 PSMCP 上同一个位置,所以探测效率相同.反冲离子 He^+ 和 He^{2+} 速度很大,微通道板工作在饱和区,可以认为反冲离子收集系统对 He^+ 和 He^{2+} 的探测效率也相同,因此各出射道 He 原子的双电离与单电离的截面之比 $R_{q,q}$, $R_{q,q-1}$ 和 $R_{q,q+1}$ 就是二维符合谱上对应事件的计数比.实验误差主要来自统计误差.

3. 实验结果及讨论

本工作的主要目的是研究 He 原子的双电离机制,主要讨论靶原子 He 的双电离与单电离截面比 R ,因为这个比值包含了双电离机制的主要信息^[12,13].图 2—图 5 是本实验测得的 $C^{q+} + He$ ($q=1-4$)碰撞过程 $R_{q,q}$, $R_{q,q-1}$ 及 $R_{q,q+1}$ 与入射离子能量及电荷态的关系.

图 2 给出的是入射离子各电荷态不同出射道的靶原子双电离与单电离截面比 $R_{q,q}$, $R_{q,q-1}$ 和 $R_{q,q+1}$ 随入射离子速度的变化关系.由图 2 可以得到以下主要特征:入射 C 离子能量很低时, $R_{q,q} \approx R_{q,q-1} \approx R_{q,q+1}$;而入射 C 离子能量较高时, $R_{q,q} < R_{q,q+1}$

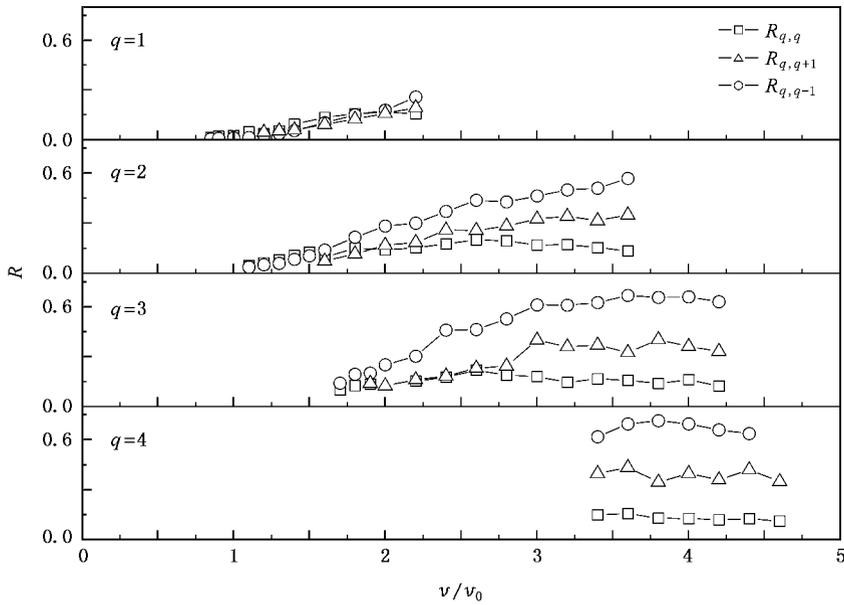


图 2 $C^{q+} + He$ ($q=1-4$) 碰撞过程中 He 原子的双电离与单电离截面比 R 与入射离子速度的关系

$< R_{q,q-1}$, 即靶原子 He 的双电离与单电离截面比和出射道有很强的依赖关系, 与相关文献实验结果相同^[12,14]. 这反映了三种出射道的平均碰撞参数之间的关系. 研究表明^[15], 单电离主要发生在大碰撞参数区域, 而双电离主要发生在小碰撞参数区域. 入射离子能量很低时, 三种出射道均发生在较大的碰撞参数, 双电离的概率很小; 随着入射离子能量的增加, 碰撞过程在不同的碰撞参数三种出射道的份额出现不同, 相对入射离子损失一个电子过程的平均碰撞参数, 直接电离过程的平均碰撞参数较大, 而发生转移电离时的平均碰撞参数最小.

图 3 是直接电离出射道 $R_{q,q}$ 与入射离子速度及电荷态的关系. 由图 3 可以看出 (1) $R_{q,q}$ 随入射离子能量的增加先增大后减小, 在 $v \approx 2.5v_0$ 处有极大值. (2) 在有限的实验点情况下观察, $R_{q,q}$ 几乎与入射离子的电荷态无关. 这与文献 [12] 中报道的 $Li^{q+} + He$ ($q=1, 2, 3$) 中 He 的直接双电离与直接单电离截面比与入射离子电荷态无关的结果相同. 下面我们采用原子极化效应^[16] 给予定性解释.

入射 C 离子与 He 原子碰撞过程的极化强度主要取决于 C 离子的速度和电荷态. 随着入射离子能量的增大, 碰撞的最接近距离减小, 原子的极化强度增大, 但同时 C 离子速度太大时又会导致碰撞时间减小, 使得极化强度减弱, 所以一定电荷态的 C 离子入射时, 极化强度随入射速度的变化存在一个极

大值. 由于直接单电离主要发生在大碰撞参数区域, 而直接双电离主要发生在小碰撞参数区域, 所以直接单电离对应的有效作用时间范围大于双电离对应的有效时间范围, 因而直接单电离极大值峰宽度大于直接双电离极大值峰的宽度, 对应的直接双电离与直接单电离截面比在极化强度最大处有极大值, 这就定性地解释了 $R_{q,q}$ 随入射离子能量的增加先增大后减小的特征.

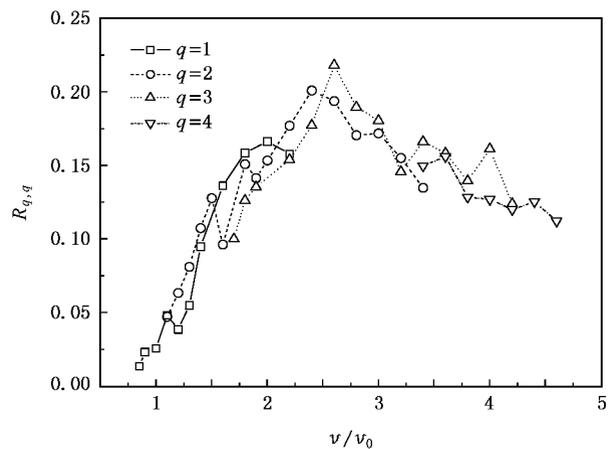


图 3 $C^{q+} + He$ ($q=1-4$) 碰撞过程中直接双电离与直接单电离截面比 $R_{q,q}$ 与入射离子速度及电荷态的关系

一般情况下, 特定靶原子的双电离与单电离截面比 R 应该与入射离子的核电荷数 Z , 入射速度 v

和电荷态 q 有关,即

$$R = R(q, Z, v). \quad (2)$$

然而,图 3 显示的在实验测量能区直接电离出射道 $R_{q,q}$ 与入射离子 C^{q+} ($q=1-4$) 的电荷态几乎无关,即 $R \neq R(q)$. 但是实验表明^[12],直接单电离和直接双电离绝对截面却随入射离子电荷态降低而下降. 这说明入射离子的伴随电子在靶原子的电离过程中是起作用的,只是对直接单电离截面和直接双电离截面的作用几乎相同.

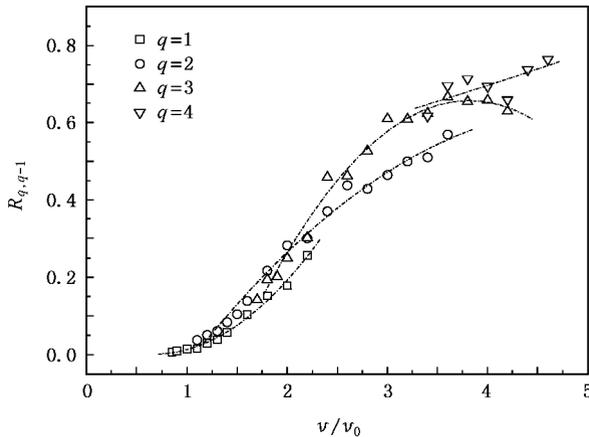


图 4 $C^{q+} + He$ ($q=1-4$) 碰撞过程中转移电离与纯单电子俘获截面比 $R_{q,q-1}$ 与入射离子速度及电荷态的关系

图 4 是 $C^{q+} + He$ ($q=1-4$) 碰撞过程中转移电离与纯单电子俘获截面之比 $R_{q,q-1}$ 与入射离子速度及电荷态的关系. 实验^[17]和理论^[18]表明,在本实验能区,单电子俘获截面随入射离子能量的增加而下降,而转移电离截面随入射离子的能量增加先上升后下降. 因此转移电离与单电子俘获截面比 $R_{q,q-1}$ 存在一个极大值,这与我们的实验结果相符. 转移电离过程在不同碰撞能区有不同的机制:在低能区(核子平均能量低于 1 eV),Niehaus^[19]指出转移电离是由碰撞中形成的准分子自电离引起的;对核子平均能量在 100 eV 附近,Cocke 等^[20]认为转移电离是入射离子双电子俘获后自电离的结果;核子平均能量接近 100 keV 的能区,Andersen 等^[21]证明转移电离是靶原子的两个电子转移到入射离子的高关联态后一个电子损失到连续态的过程;在更高的碰撞能区(核子平均能量高于 1 MeV),McGuire 等^[22]认为转移电离是由单电子俘获和直接单电离两步过程或单电子俘获后靶离子弛豫过程再自电离一个电子引起的. 从图 4 有限的实验点中可以看出,特别是 $C^{3+} + He$ 测量的能区较宽,转移电离与单电子俘获截面比

$R_{q,q-1}$ 出现极大值,这显示了转移电离从较低能区(伴随自电离的双电子俘获是主要机制)向较高能区(单电子俘获加靶原子直接单电离是主要机制)的转变. 从图 4 还可以看出,较高实验能区入射离子电荷态越高, $R_{q,q-1}$ 越大,这与文献^[12]实验结果相同;在 $v < 2v_0$ 的低能区, $R_{q,q-1}$ 与入射离子电荷态的依赖关系减弱.

伴随入射离子损失电子出射道靶原子的双电离研究较少,主要是碰撞过程涉及电子-电子相互作用,理论处理难度较大. 图 5 是 $C^{q+} + He$ ($q=1-4$) 碰撞过程中伴随入射离子损失一个电子的 He 双电离与单电离截面之比 $R_{q,q+1}$ 与入射离子速度及电荷态的关系. 从图 5 可以看出: $R_{q,q+1}$ 与入射离子的电荷态有较强的依赖关系,电荷态越高, $R_{q,q+1}$ 越大,在 $v < 2.8v_0$ 的低能区, $R_{q,q+1}$ 与入射离子电荷态的关系减弱. 这一特点和转移电离与单电子俘获截面比 $R_{q,q-1}$ 与电荷态的关系相同,而与直接电离出射道 $R_{q,q}$ 与电荷态的关系不同. 从碰撞前后入射离子电荷态变化情况看,入射离子俘获一个电子和损失一个电子的出射道均伴随入射离子电荷态的变化,而直接电离出射道碰撞前后电荷态没有变化. 这说明在入射离子电荷态变化的碰撞过程中,入射离子伴随电子的个数对靶原子的双电离截面影响大于对单电离截面的影响.

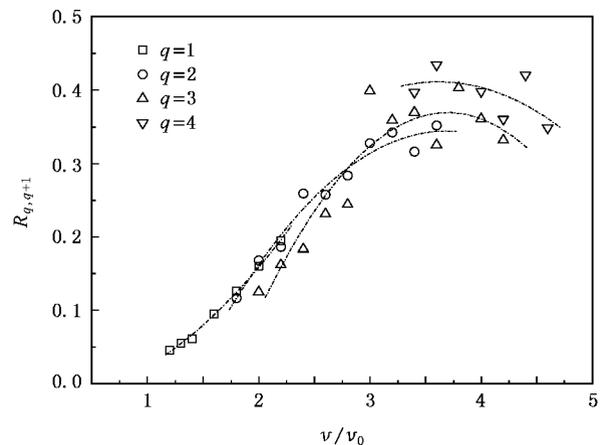


图 5 $C^{q+} + He$ ($q=1-4$) 碰撞过程中伴随入射离子损失一个电子的 He 双电离与单电离截面比 $R_{q,q+1}$ 与入射离子速度及电荷态的关系

入射离子的电子在碰撞过程中起着双重作用,即屏蔽作用和反屏蔽作用. 屏蔽作用(直接电离)过程,碰撞后电子仍处于其初始状态;反屏蔽作用过程

中,电子有效参与碰撞并被激发或电离.屏蔽作用包含着有效电荷与靶原子电子的作用,而反屏蔽作用包含着入射离子电子与靶原子电子间的相互作用.由图 2 中 $R_{q,q}$ 与 $R_{q,q+1}$ 比较可知,非全裸碳离子 C^{q+} ($q = 1-4$) 与靶原子 He 碰撞过程反屏蔽作用远远大于屏蔽作用,因为入射离子损失一个电子出射道靶原子的双电离与单电离截面比 $R_{q,q+1}$ 远大于直接电离出射道靶原子的双电离与单电离截面比 $R_{q,q}$.

4. 结 论

本文研究了能量范围在 $0.7v_0-4.4v_0$ 的碳离子 C^{q+} ($q = 1-4$) 与 He 原子碰撞过程不同出射道靶原子的双电离与单电离截面比,包括 $R_{q,q}$, $R_{q,q-1}$ 和 $R_{q,q+1}$. 实验发现,不同出射道靶原子的双电离与单电离截面比存在很大差异,并用平均碰撞参数做了定性解释.直接电离出射道的截面比 $R_{q,q}$ 随碰撞能

量的变化有极大值,采用原子极化效应理论给予了很好的解释.单电子俘获出射道的截面比 $R_{q,q-1}$ 和单电子损失出射道的截面比 $R_{q,q+1}$ 与电荷态的关系不同于直接电离出射道的截面比 $R_{q,q}$,其原因可能与碰撞过程中入射离子碰撞前后电荷态的变化有关,这有待于进一步证明.入射离子损失一个电子的出射道的截面比 $R_{q,q+1}$ 包含入射离子电子反屏蔽作用,直接电离出射道的截面比 $R_{q,q}$ 包含了入射离子电子屏蔽作用,对这些过程的深入研究可以更加细致地理解电子-电子相互作用及电子关联作用.总之,本实验从多个出射道全面地讨论了 $C^{q+} + He$ ($q = 1-4$) 碰撞的过程,一些细节仍需要作进一步的实验验证和理论研究,这将是我們下一步的工作.

感谢中国科学院近代物理研究所蔡晓红研究员、于得洋博士的帮助,感谢陈子纯工程师、李兰亭工程师在 2×1.7 MV 串列加速器运行及维护上给予的协助.

- [1] Knudsen H , Haugen H K , Hvelplund P 1981 *Phys. Rev. A* **23** 597
- [2] Inokuti M , Itikawa Y , Turner J E 1978 *Rev. Mod. Phys.* **50** 23
- [3] Kirchner T , Santos A C F , Luna H *et al* 2005 *Phys. Rev. A* **72** 012707
- [4] Montenegro E C , Melo W S , Meyerhof W E *et al* 1993 *Phys. Rev. A* **48** 4259
- [5] Montenegro E C , Sigaud G M , Meyerhof W E 1992 *Phys. Rev. A* **45** 1575
- [6] DuBois R D , Toburen L H 1988 *Phys. Rev. A* **38** 3960
- [7] Cao Z R , Cai X H , Yu D Y *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2943 (in Chinese) [曹柱荣、蔡晓红、于得洋等 2004 物理学报 **53** 2943]
- [8] Cai X H , Yu D Y , Cao Z R *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1679
- [9] Yang W , Cai X H , Yu D Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2128 (in Chinese) [杨威、蔡晓红、于得洋 2005 物理学报 **54** 2128]
- [10] Ma X W , Liu H P , Wang Y D *et al* 1996 *Nucl. Electron. Detec. Tech.* **16** 439 (in Chinese) [马新文、刘惠萍、王友德等 1996 核电子学与探测技术 **16** 439]
- [11] Cai X H , Chen X M , Feng J Z *et al* 1993 *J. At. Mol. Phys.* **10** 2982 (in Chinese) [蔡晓红、陈熙萌、冯嘉祯等 1993 原子与分子物理学报 **10** 2982]
- [12] Woitke O , Závadoszky P A , Ferguson S M *et al* 1998 *Phys. Rev. A* **57** 2692
- [13] Tains J A , Clark M W , Price R *et al* 1987 *Phys. Rev. A* **36** 1952
- [14] Forest J L , Tanis J A , Ferguson S M *et al* 1995 *Phys. Rev. A* **52** 350
- [15] Olsen R E 1989 *Phys. Rev. A* **39** 5572
- [16] Chen X M 1998 *Ph. D. Thesis* (Lanzhou : Lanzhou University) (in Chinese) [陈熙萌 1998 博士学位论文(兰州:兰州大学)]
- [17] DuBois R D 1989 *Phys. Rev. A* **39** 4440
- [18] Shingal R , Lin C D 1991 *J. Phys. B* **24** 251
- [19] Niehaus A 1986 *J. Phys. B* **19** 2925
- [20] Cocke C L , Dubois R , Grey T J *et al* 1981 *Phys. Rev. Lett.* **46** 1671
- [21] Andersen L H , Frost M , Hvelplund P *et al* 1984 *Phys. Rev. Lett.* **52** 518
- [22] McGuire J H , Salzborn E , Müller A 1987 *Phys. Rev. A* **35** 3265

Investigation of the processes in the collisions of partially stripped carbon ions with helium atom at low to intermediate energies^{*}

Gao Zhi-Min Chen Xi-Meng[†] Liu Zhao-Yuan Ding Bao-Wei

Lu Yan-Xia Fu Hong-Bin Liu Yu-Wen Du Juan Cui Ying

Shao Jian-Xiong Zhang Hong-Qiang Sun Guang-Zhi

(*School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

(Received 9 August 2006; revised manuscript received 7 December 2006)

Abstract

The cross-section ratios for the double-to-single ionization of He associated with no projectile charge change ($R_{q,q}$), single-electron capture ($R_{q,q-1}$) and single-electron loss ($R_{q,q+1}$) were measured using coincidence technique. The coincidences resulted from the signals of recoil ions and scattered projectiles. For a given incoming projectile charge state the double-to-single ionization ratios vary strongly with the outgoing reaction channel. It is found that $R_{q,q} < R_{q,q+1} < R_{q,q-1}$. For direct ionization, $R_{q,q}$ is nearly independent of the incident projectile charge state. However, for ionization associated with single-electron capture and single-electron loss by the projectile, $R_{q,q-1}$ and $R_{q,q+1}$ depend strongly on the incident charge state of the projectile. These ionization ratios are interpreted in terms of theories of the atomic polarization effect and the screening and antiscreening effect of the electrons around the core.

Keywords : ion-atom collision, ionization, cross-section ratio

PACC : 3450H, 3470, 5220H

^{*} Project supported by the Special Foundation for State Key Basic Research Program of China (Grant No. 2002CCA00900).

[†] Corresponding author. E-mail : chenxm@lzu.edu.cn