

中速 C^{3+} 与 Ne 原子靶相互作用过程中 单电子转移绝对截面的测量^{*}

刘会平 陈熙萌[†] 刘兆远 高志民 刘玉文 杜娟 张红强 孙光智 王俊 席发元 王媛

(兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

(2007 年 9 月 1 日收到, 2008 年 3 月 27 日收到修改稿)

实验测量了 $2.2v_0$ — $4.2v_0$ (v_0 为玻尔速度, $v_0 = 2.19 \times 10^8$ cm/s) 的 C^{3+} 与 Ne 原子碰撞过程中单电子转移绝对截面, 将实验结果与多体经典轨道蒙特卡罗模拟计算结果进行了比较, 用电离能的变化、屏蔽效应、动态关联对实验和理论计算结果间的数值差异做了分析. 总体上, 实验结果与多体经典轨道蒙特卡罗方法计算结果在趋势上相符很好. 此外, 还简单分析了多电子原子的转移多电离机制.

关键词: 离子-原子碰撞, 单电子转移, 绝对截面

PACC: 3470

1. 引言

离子与多电子原子碰撞过程中, 转移电离的实验和理论研究是一个活跃的领域, 反应过程涉及多体碰撞动力学, 反应的出射道非常丰富, 碰撞后俘获电子的入射离子和失去电子的靶原子都处于高激发态, 是传统的原子物理没有涉及的领域. 因此, 有关电子转移过程的研究不但对基础物理学有很重要的意义, 而且对应用物理学、等离子体物理学、天体等离子体物理学等领域也有重要的意义和直接的应用价值.

近几十年来, 国内外做了许多关于转移电离方面的研究^[1-5], 这些工作主要是在低能区或高能区利用截面比、出射电子谱、X 射线以高电荷态离子与 He 靶碰撞, 来研究转移电离的机制及转移电离对电子转移反应和靶原子多电离的贡献, 并取得了一定的成功. 在中能区, 对中、低电荷态离子与多电子原子 ($Z > 2$) 作用过程中的转移电离, 虽然做了一些实验测量和研究^[6-8], 但因反应过程复杂、参加的电子较多, 很难用一种理论对转移电离过程做出完整的描述.

本文给出了中能区 ($2.2v_0$ — $4.2v_0$, $v_0 = 2.19 \times$

10^8 cm/s 为玻尔速度) C^{3+} 与 Ne 原子碰撞过程中单电子转移绝对截面, 将实验结果与多体经典轨道蒙特卡罗 (nCTMC) 程序计算结果作了比较及分析. 此外, 还根据转移多电离与转移单电离的截面比, 简要分析了实验能区 C^{3+} 与 Ne 原子碰撞过程中的转移多电离机制.

2. 实验装置和方法

实验是在兰州大学 2×1.7 MV 串列加速器的离子-原子碰撞实验终端上完成的. 由加速器产生特定能量的 C^{3+} 入射离子经分析磁铁选择后, 经过相距 1.5 m 的两级准直光阑后进入靶室与气体靶原子发生碰撞, 然后采用飞行时间-散射离子位置灵敏符合技术测量, 并配以 MPA-3 型多参数获取系统记录每次碰撞的符合事件, 形成二维相关物理事件符合谱. 由于时间-脉冲幅度转换器总的时间门宽度小于散射离子平均脉冲周期, 可以确定在此时间内得到的是同一碰撞事件的符合计数.

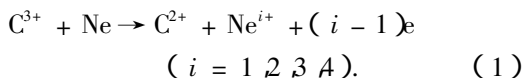
靶气体选择的是同位素纯度高的气体, 靶室压力为 3.6×10^{-3} Pa, 注入靶气体的针孔内径为 1 mm, 出气口距束流中心垂直高度为 3 mm, 碰撞区束斑面积估计在 0.2 mm^2 以下, 因此实验过程中单次碰撞

^{*} 国家重大基础研究专项基金 (批准号 2002CCA00900) 资助的课题.

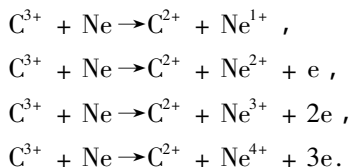
[†] E-mail: chenxm@lzu.edu.cn

条件是满足的.有关实验装置和方法的详细情况见文献[5,9].

C^{3+} 与 Ne 原子碰撞过程中单电子转移反应式表示如下:



在本次实验能区, C^{3+} 与 Ne 原子碰撞时的单电子转移反应包括以下过程:



实验中我们测量了以上单电子俘获(SC)、转移单电离(TI-1)、转移双电离(TI-2)、转移三电离(TI-3)过程的符合性事件的计数,将测得的数据归一化^[10]后得到单电子转移出射道的绝对截面.

单电子转移各反应道的绝对截面计算公式为

$$\sigma_{32}^i = \frac{n_{32}^i / \eta^i}{INLT}, \quad (2)$$

式中 n_{32}^i 为单电子俘获道散射离子与不同价态 i 下反冲离子的符合性计数, η^i 为价态 i 下反冲离子的探测效率, I 为入射离子束强度, N 为单位体积内的气体靶原子数, L 为碰撞区靶气体的有效长度, T 为碰撞后反冲离子能够到达探测器的传输效率.

绝对截面的误差主要来自统计误差(2%—17%)、归一化误差(10%)和其他误差(10%以下).本文中若无特别说明,各参数均采用原子单位.

3. 实验结果及分析

图1给出了 C^{3+} 与 Ne 原子碰撞的单电子转移道截面的实验测量值和 $nCTMC$ 程序计算值.

在本次实验能区,由于 Ne 原子核对其内壳层(K 层)的电子束缚很紧,相对于 L 壳层电子,发生内壳层电离和共振俘获的概率很低,计算时不考虑内壳层的两个电子.带三个正电荷的入射离子在计算中是一个整体,不考虑自身三个电子对核的屏蔽作用以及在反应中的反屏蔽作用,即计算中入射离子的电荷态是不变的. Ne 原子的最小碰撞参数是根据它的内壳层轨道半径选定的.屏蔽常数计算采用的是类氢方法,计算时没有考虑俄歇贡献.

用 $nCTMC$ 程序进行计算时,入射离子的电荷 q 、反应的多体数 n 、循环次数 N_{cycle} 、两核碰撞的起

始距离 r_{start} 、终止距离 r_{stop} 、最大碰撞参数 b_{max} 、最小碰撞参数 b_{min} 的取值如下: $q = 3, n = 10, N_{cycle} = 50000, r_{start} = r_{stop} = 6.8, b_{max} = 4.6, b_{min} = 0.3$.

从图1可以看出,在整个实验能区,单电子转移反应各截面的实验值与 $nCTMC$ 计算值的变化趋势相符很好,在数值上各截面的实测值与 $nCTMC$ 计算值之间有差异. SC 截面先与计算值相符很好,随能量的升高,实验值逐渐大于计算值.在本实验能区, TI-1 截面的 $nCTMC$ 计算值都大于实验值, TI-2 截面在误差范围内实验值与计算值符合很好, TI-3 截面的实验值基本上大于程序计算值.

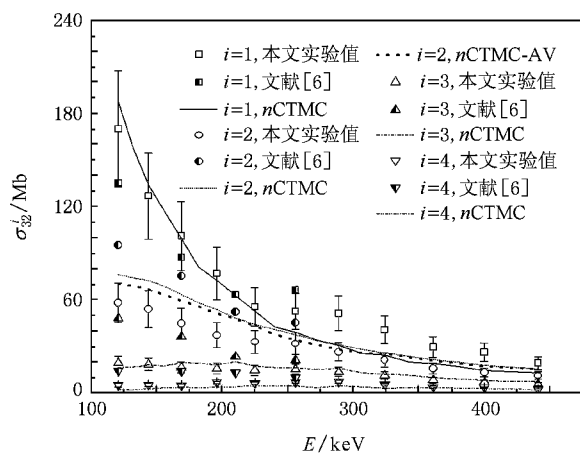


图1 C^{3+} 与 Ne 原子碰撞过程中的单电子转移绝对截面

当入射离子速度大于某一值^[11-13]时, SC 截面随入射离子能量的上升而迅速下降,实验也表明了这一点.但从图1可以看出,实验数据先是落在 $nCTMC$ 计算曲线的下面,随着入射离子能量的升高逐渐接近计算值,在入射离子单核子能量 $E > 160$ keV 后,实验值大于 $nCTMC$ 计算值. $nCTMC$ 计算采用的是经典模型,反应双方用点电荷描述,入射离子与靶电子、靶电子与靶核之间通过库仑势相互作用,且遵循牛顿运动定律.计算中不考虑非全裸离子上的电子,也没有考虑反应中电子的屏蔽和反屏蔽作用.但是入射离子自身带的三个电子,一方面对入射核形成屏蔽作用,另一方面加上俘获的一个电子,与余下的活性靶电子之间存在电子与电子相互作用,这种作用本身就可以使靶电子发生跃迁.在入射离子能量较低时这种动态关联作用对单电子俘获截面的影响很小,但随着能量的增大影响也增大,从而使实测值逐渐接近 $nCTMC$ 计算值.图1还给出了 Kirchner 等^[6]测量的截面,可以看出,在能量较低时

其 SC 截面居于本次实验截面之下,但在单核子能量 E 约为 200 keV 时与 n CTMC 曲线相交后,跃于本次实验数据之上.从文献 [14, 15] 中对动态关联对 SC 影响的讨论及文献 [6] 的数据看,本次测量的 SC 截面数据还是较合理的.

在整个实验能区, TI-1 截面在趋势上虽和计算曲线相符,但在数值上实测值小于计算值,这在 n CTMC 计算中并不奇怪.对全裸离子与 He 原子的反应中, n CTMC 计算总是过高地估计转移电离(多电子过程)截面^[9, 16, 17],但对于非全裸离子,国内外的报道很少.在 n CTMC 计算中,采用有效库仑势来描述靶的活性电子,多电子过程是在独立粒子模型框架内描述的,没有考虑第一个电子转移后其余活性靶电子束缚能的变化.事实上,当 Ne 原子的第一个电子被俘获后,其余电子被靶核束缚得更紧,电离能也由原来的 0.8 增加到 1.5,降低了第二个电子的电离概率,从而降低了转移电离截面.为了减小电离能对计算结果的影响,图 1 中还给出了用 Ne 原子的第一、第二电离能的平均值(即 $0.5 \times (0.8 + 1.5) = 1.15$)作为最先被电离的电子和第二被电离的电子电离能的 n CTMC 计算结果(图中 n CTMC-AV 曲线),可以看出实验结果与此计算结果符合得更好一些.此外,由于电子间的动态关联,使两者的差距随入射离子速度的增大而减小.

虽然都存在单电子俘获后活性电子电离能增大的现象,但在整个实验能区转移多电离截面却表现出不同. TI-2 截面在误差范围内与 n CTMC 计算值相符很好, TI-3 在趋势上与理论值相符,数值上基本都大于 n CTMC 计算值.在讨论 TI-1 时将计算值与实验值之间的差距归于活性电子电离能的变化上.按上述讨论,发生 TI-1 后,靶原子活性电子的电离能由 1.5 增加到 2.3,在 TI-2 后又上升到了 3.6.随着转移电离重数的增加,实验得到转移电离截面值按理应该越来越小于计算值,但结果却正好相反.这主要是由于在碰撞过程中随着电离重数的增加,对应的碰撞参数减小,使得入射离子有效电荷增大.虽然文献中没有讨论离子与 Ne 原子靶作用过程中各反应道平均碰撞参数间的关系,但我们可以从对 He 靶的讨论^[16, 18]中推出 C^{3+} 与 Ne 原子碰撞过程中单电子转移平均碰撞参数 $b_{32}^4 < b_{32}^3 < b_{32}^2 < b_{32}^1$. 根据文献 [19—21] 中的讨论,反应道及入射离子能量不同,平均碰撞参数不同,入射离子上的电子对核的屏蔽作用不同,使得入射离子的有效电荷 q_{eff} 不同.受计

算方法限制,本文中不能给出各能量点的有效电荷,但可以根据 TI-1 与 SC 的截面比 $R^{2,1}$ ($R^{2,1} = \sigma_{32}^2 / \sigma_{32}^1$) 峰的值近似给出 TI-1 反应的有效电荷为 3.2 (见图 2);用 n CTMC 方法粗略地算出 TI-3 的平均有效电荷约在 3.7 左右.

从图 1 可以看出,文献 [6] 的转移电离截面数据和本次实验虽在趋势上大致相同,但大于本次实验数据,其中 TI-1 数据是本次实验数据的 1.4—1.7 倍, TI-2 数据是本次实验数据的 1.4—2.5 倍, TI-3 数据是本次实验数据的 1.4—3.1 倍.

根据独立电子近似理论^[22],离子与原子碰撞时,在碰撞参数 b 处发生 m 重俘获、 n 重电离的概率 $P_{m,n}^b$ 可以表示如下:

$$P_{m,n}^b = \binom{N}{m} \binom{N-m}{n} P_c^m(b) P_i^n(b) \times [1 - P_c(b) - P_i(b)]^{N-m-n}, \quad (3)$$

式中 N 为靶原子某一层上活性电子个数, m 为入射离子俘获电子数, n 为电离重数, $P_c(b)$ 和 $P_i(b)$ 分别为碰撞参数 b 处单个电子的俘获概率和电离概率.在中能区, $P_c(b)$ 和 $P_i(b)$ 较大,计算中 $1 - P_c(b) - P_i(b)$ 项的影响不能忽略.

C^{3+} 与 Ne 原子碰撞时单电子转移截面可以表示为

$$\sigma_{32}^1 = \binom{8}{1} \binom{7}{i-1} \int_0^{+\infty} b db P_c(b) P_i^{i-1}(b) \times [1 - P_c(b) - P_i(b)]^{7-i}. \quad (4)$$

定义

$$R^{3,2} = \sigma_{32}^3 / \sigma_{32}^2, \quad (5)$$

$$R^{4,2} = \sigma_{32}^4 / \sigma_{32}^2. \quad (6)$$

那么,根据(4)式可以得出

$$R^{3,2} \approx \frac{\int_0^{+\infty} b db P_i^2(b)}{\int_0^{+\infty} b db P_i(b)} [1 - P_c(b) - P_i(b)]^{-1}, \quad (7)$$

$$R^{4,2} \approx \frac{\int_0^{+\infty} b db P_i^3(b)}{\int_0^{+\infty} b db P_i(b)} [1 - P_c(b) - P_i(b)]^{-2}. \quad (8)$$

图 2 给出了转移多电离与 TI-1 的截面比 $R^{3,2}$ 和 $R^{4,2}$ 随入射离子的单核子能量 E 的变化关系.从图 2 可以看出,虽然 $R^{3,2}$ 和 $R^{4,2}$ 与 n CTMC 计算曲线相符很好,但 $R^{3,2}$ 是计算值的 1.1—1.4 倍; $R^{4,2}$ 是计算

值的 1.4—2.8 倍。

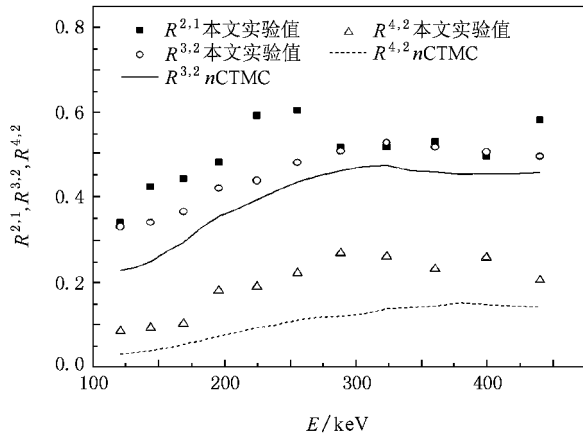


图 2 C^{3+} 与 Ne 原子碰撞中绝对截面比 $R^{2,1}$, $R^{3,2}$ 和 $R^{4,2}$

C^{3+} 与 Ne 原子作用过程中,入射离子不能提供足够的势能同时将两个靶电子俘获到激发态上,那么双电子俘获到高激发态后自电离形成转移电离的贡献并不大,且入射离子速度低,Ne 原子 K 壳层形成空位的可能小.因此, TI-1 主要是通过入射离子与靶原子的多次作用形成。

对于 TI-2,从图 2 可以看出当 E 在 120—200 keV 时,因受入射离子多电子关联态俘获的影响, $R^{3,2}$ 的实验测量值比 nCTMC 计算曲线上升缓慢.然后随着单核子能量 E 的提高,多电子俘获到入射离子高激发态后自电离形成转移电离的贡献逐渐减小, TI-2 主要由入射离子与靶原子的多次作用形成,实验值与计算曲线相符很好。

虽然文献 [6, 8, 10] 中也测量了 TI-3 截面和截面比,但反应涉及了四个电子,反应机制相对 TI-2 更为复杂,因此对 TI-3 的反应机制基本没做讨论.就本次实验而言,入射离子价态低,同时俘获四个甚至更多电子的概率非常小,所以不可能通过多电子俘获后自电离形成 TI-3.从图 2 中 $R^{4,2}$ 随 E 的变化趋势可以判断, TI-3 主要是入射离子与靶电子多次独立作用的结果。

4. 结 论

本次实验测量了中能区 ($2.2v_0$ — $4.2v_0$) C^{3+} 与 Ne 原子碰撞过程中单电子转移绝对截面,并将测量结果与 nCTMC 计算结果作了比较.由于 nCTMC 程序计算时采用了有效库仑势,没有考虑到入射离子所带电子在反应中的作用,使实验值与计算值出现了差距,但总体上实验结果还是合理的.此外,通过研究转移多电离与 TI-1 的截面比 $R^{3,2}$, $R^{4,2}$ 随入射离子的单核子能量 E 变化的关系可以发现,在能量较低时多电子关联态俘获对转移电离有一定的影响.随 E 的增大,关联态俘获的影响减小,入射离子与靶电子的多次作用才是本次实验能区 C^{3+} 与 Ne 原子作用过程中形成转移电离的主要途径。

感谢邵剑雄博士和鲁彦霞博士的有益讨论,感谢李兰亭工程师、陈子纯工程师在 2×1.7 MV 串列加速器运行和维护上给予的协助。

[1] Cocke C L, Dubois R, Gray T J, Justiniano E, Can C 1981 *Phys. Rev. Lett.* **46** 1671
 [2] McGuire J H, Sulzbom E, Müller A 1987 *Phys. Rev. A* **35** 3265
 [3] Cai X H, Yu D Y, Cao Z R, Lu R C, Yang W, Shao C J, Chen X M 2004 *Chin. Phys.* **13** 1679
 [4] Cao Z R, Cai X H, Yu D Y, Yang W, Lu R C, Shao C J, Chen X M 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2943 (in Chinese) [曹柱荣、蔡晓红、于得洋、杨威、卢荣春、邵曹杰、陈熙萌 2004 物理学报 **53** 2943]
 [5] Cai X H, Chen X M, Shen Z Y, Liu Z Y, Ma X W, Liu H P, Hou M D 1996 *Nucl. Instrum. Meth. B* **114** 208
 [6] Kirchner T, Santos A C F, Luna H, Sant'Anna M M, Melo W S, Sigaud G M, Montenegro E C 2005 *Phys. Rev. A* **72** 012707
 [7] Chen X M, Gao Z M, Liu Z Y, Ding B W, Lu Y X, Fu H B, Shao J X, Cui Y, Zhang H Q, Liu Y W, Du J, Sun G Z 2007 *Chin. Phys.* **16** 2040

[8] Chen L, Chen X M, Shao J X, Lu Y X, Ding B W, Cui Y, Gao Z M, Liu Y W, Du J, Xie J S, Sun G Z, Liu Z Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 2378
 [9] Chen X M, Lu Y X, Ding B W, Fu H B, Cui Y, Shao J X, Zhang H Q, Gao Z M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4461 (in Chinese) [陈熙萌、鲁彦霞、丁保卫、付宏斌、崔莹、邵剑雄、张红强、高志民 2007 物理学报 **56** 4461]
 [10] Melo W S, Sant'Anna M M, Santos A C F, Sigaud G M, Montenegro E C 1999 *Phys. Rev. A* **60** 1124
 [11] Hvelplund P, Haugen H K, Knudsen H 1980 *Phys. Rev. A* **22** 1930
 [12] Knudsen H, Haugen H K, Hvelplund P 1981 *Phys. Rev. A* **23** 597
 [13] Shao J X, Chen X M, Ding B W 2007 *Phys. Rev. A* **75** 012701
 [14] Mancev I 1999 *Phys. Rev. A* **60** 351
 [15] Mancev I 2001 *Phys. Rev. A* **64** 012708
 [16] Shingal R, Lin C D 1991 *J. Phys. B* **24** 251

- [17] Wetmore A E ,Olson R E 1988 *Phys. Rev. A* **38** 5563 24 1741
- [18] Woitke O ,Závodszky P A ,Ferguson S M ,Houck J H ,Tanis J A 1998 *Phys. Rev. A* **57** 2692 [20] McGuire J H ,Stolterfoht N ,Simony P R 1981 *Phys. Rev. A* **24** 97
- [19] Toburen L H ,Stolterfoht N ,Ziem P ,Schneider D 1981 *Phys. Rev. A* [21] Dubois R D , Toburen L H 1988 *Phys. Rev. A* **38** 3960
- [22] McGuire J H ,Weaver L 1977 *Phys. Rev. A* **16** 41

Measurement of single-electron transfer cross sections in collision of C^{3+} with neon at intermediate velocity^{*}

Liu Hui-Ping Chen Xi-Meng[†] Liu Zhao-Yuan Gao Zhi-Min Liu Yu-Wen Du Juan

Zhang Hong-Qiang Sun Guang-Zhi Wang Jun Xi Fa-Yuan Wang Yuan

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

(Received 1 September 2007 ;revised manuscript received 27 March 2008)

Abstract

Absolute cross sections for single-electron transfer of neon induced by C^{3+} at intermediate velocity ($2.2v_0—4.2v_0$) were measured and calculated using n -body classical trajectory Monte Carlo (n CTMC) method. Good overall agreement between experimental and n CTMC results is found. Screening effect , changes of the ionization potential and the effective charge are taken into account in interpreting the qualitative differences between theoretical and experimental results. In addition , the mechanism of transfer ionization is discussed briefly.

Keywords : ion-atom collision , single-electron transfer , absolute cross section

PACC : 3470

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

[†] E-mail : chenxm@lzu.edu.cn