

高电荷态 Xe 离子与 He 原子碰撞中的 电子转移过程研究*

曹柱荣^{1)B)} 蔡晓红^{1)†} 于得洋^{1)B)} 杨 威¹⁾ 卢荣春^{1)B)} 邵曹杰¹⁾ 陈熙萌²⁾

¹⁾中国科学院近代物理研究所,兰州 730000)

²⁾兰州大学物理科学与技术学院,兰州 730000)

³⁾中国科学院研究生院,北京 100039)

(2003 年 6 月 30 日收到,2004 年 1 月 16 日收到修改稿)

采用位置灵敏探测和飞行时间技术研究了高电荷态 Xe 离子($q = 15, 17, 19, 21, 23$)与 He 原子碰撞中双电子转移截面与单电子转移截面比随入射离子电荷态的变化规律. 提出一步过程假定,对扩展的经典过垒(ECB)模型进行了修正. 利用修正模型计算得到的单、双电子转移绝对截面与 Andersson 等人^[1]和 Selberg 等人的实验结果很好符合,所得截面比与本实验得到的双电子转移截面与单电子俘获截面比较好符合.

关键词:离子-原子碰撞,电荷转移,一步过程

PACC: 3470, 8230F, 7920N

1. 引 言

低能高电荷态离子与原子的碰撞研究是目前原子物理领域的研究热点之一. 离子-原子碰撞可以表示为

$$A^{q+} + B \rightarrow A^{(q-k)+} + B^{l+} + (l-k)e^{-}, \quad (1)$$

其中, q 为入射离子的电荷数; k 为俘获电子的数目; l 为靶原子失去的电子数, $(l-k)$ 为发射电子数. 对双电子靶原子来说,主要有三种过程:纯单电子俘获(SC)过程,即靶原子一个电子被入射离子俘获($k=l=1$),无电子发射;转移电离(TI)过程,即靶原子丢失两个电子,其中一个被入射离子俘获,另一个电子被发射($l=2$);纯双俘获(TDC)过程,即靶原子两个电子全部被入射离子俘获($l=k=2$),无电子发射. 目前,对单电子俘获过程的研究已经比较成熟,积累了大量实验数据. 随着实验技术的发展,对碰撞过程的研究逐渐深入到多电子俘获和转移电离等多电子过程^[1,2].

轻离子与少电子原子碰撞的理论处理已较为成熟^[3],高电荷态离子与多电子原子的碰撞涉及多体相互作用,采用完全的量子力学方法处理多电子过

程非常困难,目前常用的方法是经典或半经典模型. 如基于独立电子模型建立起来的过垒模型: Ryufuku 提出用经典过垒模型(COBM)处理单电子俘获过程^[4]; Búrányi 发展了拓展的经典过垒(ECB)模型,使之可以处理多电子俘获过程^[5]; Niehaus 引入分子化的概念,发展成了分子库仑过垒模型(MCBM)^[6].

He 原子是最简单的多电子原子,是研究电子-电子关联作用的理想体系. 目前有关 He 靶的主要研究集中在单、双电子俘获截面的测量,如 Andersson 等人: $Xe^{q+} - He, 11 \leq q \leq 31$ ^[7]; Iwai 等人: $Kr^{q+} - He, 7 \leq q \leq 25$ ^[8]; Tawara 等人: $I^{q+} - He, 10 \leq q \leq 41$ ^[9]; Mann 等人: $Ar^{q+} - He, 4 \leq q \leq 15$ ^[10]; Selberg 等人: $Xe^{q+} - He, 31 \leq q \leq 43$ ^[11]等. 另外,还可以通过俄歇谱的测量对散射离子能级结构进行研究,如 Flécharde 等人: $Ne^{10+} - He, n = 3, 4, 5, 6$ ^[12]. 整体上看,低能高电荷态离子与 He 碰撞的双电子转移过程的实验数据还很少.

本研究小组采用符合测量技术研究了高电荷态 Xe 离子($q = 15, 17, 19, 21, 23$)与 He 原子碰撞中靶原子双电子转移截面与单电子转移截面比随入射离子电荷态的变化规律. 提出一步过程假定,对 ECB 模型进行了修正,利用修正模型计算得到的单、双电

* 国家自然科学基金(批准号:10134010, 10375080 和 10304019)资助的课题.

† E-mail: Caixh@impcas.ac.cn, 电话: 0931-4969500.

子转移绝对截面与 Andersson 等人^[7]和 Selberg^[11]等人的实验结果很好符合,所得截面比与本实验得到的双电子转移截面与单电子俘获截面比较好符合.

2. 实验方法

由中科院近代物理研究所 ECR 源(electron cyclotron resonant ion sources)提供 Xe^{q+} 离子束,入射离子电荷态 q 分别为 15, 17, 19, 21 和 23. ECR 源的引出端电压在 10—25kV 之间可调,离子能量相应为 $10q-25q$ (keV),微波频率为 14.5GHz.

从 ECR 源引出的离子束,经过分析磁铁选择所需的离子电荷态,然后再经过两个双维可调的光阑准直、限束.低能高电荷态离子在运动过程中极易与残余气体发生碰撞而改变其电荷态,为保证在碰撞区与靶气体发生碰撞的入射离子具有单一电荷态,我们对以前的装置进行了改进,在靶室前安装一个 64° 同轴静电分析器对入射离子电荷态进行进一步选择.束流进入靶室与气体原子束发生碰撞后,反冲离子在平行板静电场的作用下被引出并加速,经过一个无场漂移区后被电子倍增器探测,散射离子经过一个平行板静电场进行偏转,最后到达位置灵敏微通道板探测器(PSD).通过 PSD 给出的位置信号,能够分辨出入射离子碰撞后的末电荷态,并测得其相对产额,PSD 给出的散射离子的时间信号作为飞行时间符合系统的起始信号.碰撞产生的反冲离子 B^{l+} 由通道电子倍增器(CEM)探测,CEM 给出的快时间信号被放大成形后送入时幅转换器 TAC,作为停止信号与位置灵敏探测器(PSD)给出的起始信号进行符合.根据所得到的两维关联密度谱可以分辨出电荷转移的各个子过程^[13].

本文主要研究了双电子转移与单电子转移的截面比,截面比的实验误差主要来自统计误差^[14].若两个过程的计数分别为 N_1, N_2 ,截面比可写为 $R = N_1/N_2$ 的形式^[15],由标准误差传递公式可得截面比 R 的误差为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta N_1}{N_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_2}{N_2}\right)^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}. \end{aligned} \quad (2)$$

对于统计事件 $\Delta N_1 = \sqrt{N_1}, \Delta N_2 = \sqrt{N_2}$.

3. 实验结果与讨论

为了排除入射离子速度的影响,本实验选择相同的入射离子能量,均为 1.86keV/u .在这个能区,电子俘获是主要作用机理,可以采用 ECB 模型的理论框架进行处理^[11].从实验测得的两维关联谱,可以得到双电子转移截面与单电子转移截面的相对比率 σ_2/σ_1 .其中双电子转移过程的主要包括两个过程,即转移电离(TI)过程和纯双电子俘获(DC)过程.当入射离子电荷态 q 分别为 15, 17, 19, 21, 23 时, Xe^{q+} -He 碰撞体系的截面比随入射离子电荷态的变化如图 1 所示.图 1 中理论值为 ECB 模型的计算结果,为 0.73 左右,远远大于实验值.另外,实验的截面比随入射离子电荷态的变化较为平缓,与 ECB 模型的计算结果基本一致.

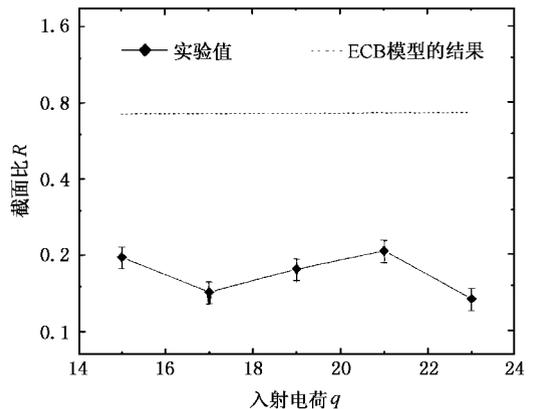


图 1 双电子转移截面与单电子转移截面比 $R = \sigma_2/\sigma_1$ 随入射离子电荷态的关系

在 ECB 模型中,随着入射离子与靶核的不断靠近,两核之间的库仑位垒逐渐降低,到达某一临界距离时,位垒完全消失,靶原子的电子随即可以向入射离子的空能级转移^[5].第 l 个电子发生转移的临界核间距为

$$r_l = \frac{2\sqrt{l}\sqrt{q-l+1}+l}{I_l}. \quad (3)$$

这里的 I_l 是靶原子第 l 个电子的电离能.第 l 个电子发生转移的截面为

$$\sigma_l = \pi(r_l^2 - r_{l+1}^2). \quad (4)$$

He 靶原子的双电子转移实际上是一个两步过程,即达到单电子转移的临界距离时,靶原子的一个

电子先发生转移,随着入射离子的进一步靠近,当达到双电子转移的临界距离时,靶原子的第二个电子再发生转移.

考虑到 He 靶原子电子之间较强的关联作用,可以假定,碰撞中的双电子转移过程是一个一步过程,即入射离子与靶原子达到一定核间距时,靶原子的两个电子同时发生转移,发生双电子转移的临界距离可由(5)式确定.即在一步过程的框架下,入射离子必须达到(5)式所述的临界距离,才能克服靶原子两个电子的共同势垒而发生转移.碰撞的最大核间距 r 只要处在 $r_1 \leq r \leq r_2$ 范围内,都被视为是单电子转移过程.单电子转移过程的截面可由(6)式确定,双电子转移截面相应地由(7)式给出:

$$r_2 = \frac{2\sqrt{2}\sqrt{q} + 2}{I_1 + I_2}, \quad (5)$$

$$\sigma_1 = \pi(r_1^2 - r_2^2), \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \pi r_2^2. \quad (7)$$

这样将(5)式的计算结果代入(6)(7)式,就可以得到双电子转移截面(σ_2)和单电子转移截面(σ_1).

为了证实上述假设,对 $Xe^{q+} - He$ 碰撞体系,将利用(6)(7)式计算得到的单、双电子转移截面与实验数据进行了比较,如图 2 所示.在图 2 中, $11 \leq q \leq 29$ 的实验数据来自文献[7],相应的入射离子能量为 $4q$ (keV); $31 \leq q \leq 42$ 的实验数据来自文献[11],相应的入射离子能量为 $3.8q$ (keV),实验误差在 $\pm 20\%$ 左右.

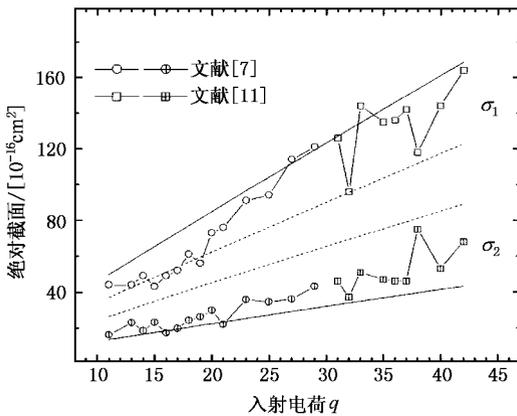


图 2 修正后模型给出的单、双电子转移截面值与实验的绝对截面值(文献[7,11]提供)的比较(上下两条实线分别表示修正后模型给出的单、双电子转移截面值;上下两条虚线分别表示 ECB 模型给出的单、双电子转移截面值)

从图 2 可以看出,利用一步过程假定得到的理

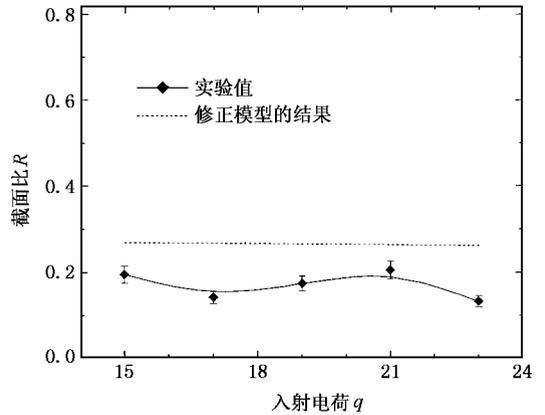


图 3 修正模型的截面比与实验值的比较

论计算结果与实验结果的符合情况明显好于两步过程的计算结果.由此说明,双电子靶原子的两个电子之间存在较强的关联,将靶原子丢失两个电子的情形考虑为一步过程是合理的.上述讨论中,理论给出的单电子转移截面(σ_1)对应于实验给出的 SC 截面,理论的双电子转移截面(σ_2)对应于 TI 截面与 DC 截面之和.

利用一步过程假定得到的截面比随电荷态的变化如图 3 所示.从图 3 可以看出,两步过程模型计算得到的截面比大约为 0.73,而一步过程模型的计算结果大约为 0.26,与本实验结果更为接近,采用一步过程假定的计算结果能够更准确地解释实验结果.另外,结合图 2 可以看到,虽然靶原子的单、双电子转移截面随着电荷态而增加,双电子转移截面与单电子转移截面比却基本保持不变,即截面比随入射离子电荷态的变化基本保持不变.由此可见,对于 $Xe^{q+} - He$ 碰撞系统,在一步过程假定下修正氦原子的电子转移截面是可行的.另外,单、双电子转移的截面比主要由靶原子自身的性质决定,与入射离子的电荷态无关.

图 1 和图 3 中截面比的实验误差主要来源于统计误差,误差小于 10%.

4. 结 论

本工作研究了 $Xe^{q+} - He$ ($q = 15, 17, 19, 21, 23$) 碰撞体系的双电子转移截面与单电子俘获截面比,提出一步过程假定,对 ECB 模型进行了修正,所得双电子转移截面与单电子转移截面比基本与实验结果符合,并与 Andersson 等人^[7]和 Selberg 等人^[11]测

得的单、双电子转移的绝对截面很好符合. 由此说明, 对于本实验研究的碰撞体系, 将 ECB 模型中的靶原子丢失两个电子的情形考虑为一步过程是合理的. 本研究还发现, 理论和实验给出的双电子转移与

单电子转移的截面比不随入射离子电荷态的变化而变化. 我们进一步认为, 对于高电荷态 Xe^{q+} -He 碰撞体系, 靶原子电子转移的截面比主要由靶原子自身的性质决定, 与入射离子的电荷态无关.

- [1] Cai X *et al* 1999 *Eur. Phys. J. D* **6** 23
 [2] Gillaspay J D 2001 *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.* **34** R93
 [3] Zhou X X and Li B W 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1426 (in Chinese)
 [周效信、李白文 1999 物理学报 **48** 1426]
 [4] Ryufuku H , Sasaki K and Watanabe T 1980 *Phys. Rev. A* **21** 745
 [5] Bárány A *et al* 1985 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **9** 397
 [6] Niehaus A 1986 *J. Phys. B* **19** 2925
 [7] Andersson H , Astner G and Cederquist H 1988 *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.* **21** L187
 [8] Iwai T *et al* 1984 *J. Phys. B* **17** L95
 [9] Tawara H *et al* 1985 *J. Phys. B* **18** 337
 [10] Mann R 1986 *Z. Phys. D* **3** 85
 [11] Selberg N , Biedermann C and Cederquist H 1997 *Phys. Rev. A* **56** 6
 [12] Flécharde X *et al* 2001 *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.* **34** 2759
 [13] Cai X H *et al* 1996 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **114** 208
 [14] Yu D Y *et al* 2002 *Nucl. Phys. Rev.* **19** 172 (in Chinese) 于得洋 等 2002 原子核物理评论 **19** 172]
 [15] Cai X H *et al* 1997 *Acta Phys. Sin.* **6** 蔡晓红等 1997 物理学报 **6** 6]

Study of the electron transfer in Xe^{q+} -He collisions^{*}

Cao Zhu-Rong^{1)†} Cai Xiao-Hong^{1)†} Yu De-Yang^{1)‡} Yang Wei¹⁾
 Lu Rong-Chun^{1)‡} Shao Cao-Jie¹⁾ Chen Xi-Meng²⁾

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

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

³⁾ *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences , Beijing 100039 , China)*

(Received 30 June 2003 ; revised manuscript received 16 January 2004)

Abstract

The cross section ratios of the double to single electron transfer of helium target induced by Xe^{q+} ($q = 15, 17, 19, 21, 23$) ions are measured by means of the position sensitive and time-of-flight techniques. By considering an one-step transfer mechanism, we modify the extended classical over-barrier model. It is found that the calculated single and double electron-transfer cross sections using the modified model show excellent agreement with the experimental data of Andersson *et al.* and Selberg *et al.*, and improves the agreement with the present measured double to single electron-transfer ratio considerably.

Keywords : ion-atom collision , electron transfer , one-step mechanism

PACC : 3470 , 8230F , 7920N

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10134010 , 10375080 and 10304019).

† Corresponding author : E-mail : Caixh@impcas.ac.cn ; Tel : 0931-4969500.