

低电荷态离子原子碰撞过程中的 转移电离机理的研究*

刘玉文 陈熙萌[†] 邵剑雄 丁宝卫 付宏斌 崔莹 张红强 鲁彦霞
高志民 杜娟 陈林 孙光智 尹永智 于得洋 蔡晓红

(兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

(2007 年 7 月 4 日收到 2007 年 8 月 29 日收到修改稿)

介绍了使用位置灵敏技术和飞行时间方法研究中低能低电荷态离子-原子碰撞过程中转移电离与单电子俘获过程. 对于确定的入射离子电荷态, 通过理论分析及与实验数据对比给出了转移电离与单电子俘获截面比 R_{TS} 随着入射离子速度 V_p 的变化规律和转移电离过程中电离的电子主要来自靶原子的最外亚壳层.

关键词: 转移电离, 逃离半径, 电离半径, 俘获半径

PACC: 3470, 3450H, 5220H

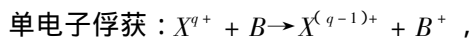
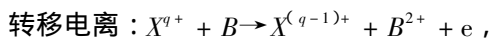
1. 引言

离子-原子碰撞过程的研究, 为深入了解直接电离、转移电离及电子俘获等多电子过程提供了重要的信息, 多电子过程又可以验证原子物理中的多体问题, 比如电子-核相互作用及电子-电子相互作用^[1]; 同时, 离子-原子碰撞还提供了一种研究多电子激发态离子性质的途径, 这是一般的激发手段难以实现的, 因此在基础物理和应用物理研究中离子-原子碰撞都占有非常重要的地位. 多电子过程非常复杂, 在中低能区电子俘获可以利用 Bohr-Lindhardt 模型^[2]、改进的经典过垒模型 ECBM^[3]、分子过垒模型 MCBM^[4]及双中心原子轨道紧耦合方法^[5,6]等理论来解释, 但转移电离过程的物理机理、被俘获电子在入射离子上的布居以及碰撞过程对靶原子的强烈扰动等物理内容还远未了解清楚. 目前, 研究主要集中在简单入射离子或近似全裸离子与原子的碰撞过程^[7-10], 对非全裸离子与原子碰撞的研究相对较少, 而且转移电离是一个多电子过程, 其概率远小于单电子过程(包括单次电离和单电子俘获), 实验精度要求很高, 难度很大, 所以国内外研究低电荷态非全裸离子-原子碰撞过程中转移电离过程的数据相对

缺乏.

本文在 $1-5 v_0$ (v_0 表示玻尔速度) 中低能区, 对转移电离和单电子俘获进行深入地理论分析并通过与实验数据的比较, 研究在本能区低电荷态非全裸离子-原子碰撞过程中转移电离与单电子俘获截面比 R_{TS} 随入射离子速度 V_p 的变化规律, 同时得到转移电离机理的一些重要信息, 比如电离的电子在靶原子中的布居. 基于我们的实验条件, 选择 $X^{q+} + B$ ($X = O, C; q = 1, 2; B = He, Ne, Ar$) 碰撞体系.

本实验中的离子-原子碰撞过程可描述如下:



其中 X 表示入射离子 O 或 C, B 表示靶原子 He, Ne 或 Ar.

2. 实验技术和方法

本实验是在兰州大学核科学与技术学院的 2×1.7 MV 的串列加速器上完成的, 前端利用溅射离子源产生各种负离子, 被 20 kV 高压加速进入两个 45° 偏转磁铁, 经偏转磁铁选出所需要的负离子, 通过剥离气体 N 气形成各种价态的正离子进入加速腔加

* 国家重点基础研究前期专项基金(批准号 2002CCA00900)和国家自然科学基金(批准号:10304019)资助的课题.

[†] E-mail: Chenxm@lzu.edu.cn

速,最后,不同价态和能量的正离子由分析磁铁选出引入到靶室进行实验.

加速器产生的束流经两个 $\varnothing 2\text{ mm}$ 光栏的聚焦和准直以确保束流发散角小于 0.1 mrad . 气体通过靶室上方的流量控制系统进入靶室,气流出口处直径 0.8 mm ,出气口距束流中心垂直高度为 3 mm ,气流方向与束流方向垂直交叉,通过限气系统控制气体流量保证靶室真空在 $10^{-3}\text{--}10^{-4}\text{ Pa}$ 及束流管道、漂移室真空在 10^{-5} Pa ,以满足单次碰撞条件.入射离子与靶气体发生碰撞产生的不同价态的散射离子经横向静电场偏转后,飞行一段距离到达一维位置灵敏微通道板探测器 PSMCP 产生横向位置 x 信号,根据不同横向位置 x 记录各价态散射离子的强度

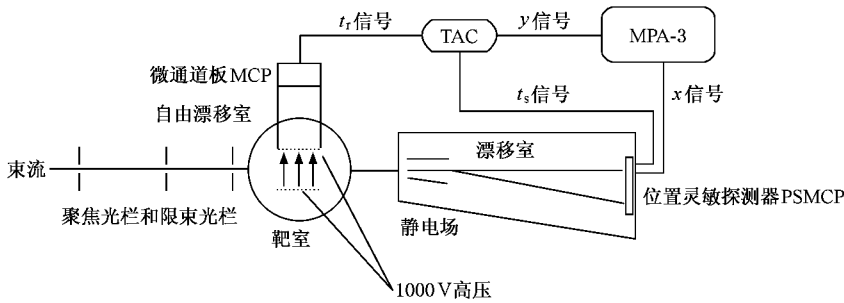


图 1 实验装置示意图

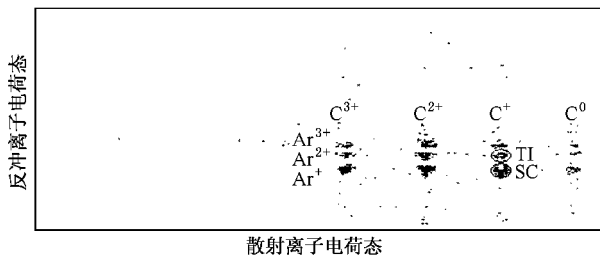


图 2 能量为 79 keV/u 的 C^{2+} 与 Ar 碰撞过程中形成的二维实验谱(TI 表示转移电离过程,SC 表示单电子俘获过程)

本实验中位置灵敏微通道板探测器 PSMCP 和飞行时间谱仪 TOF 的探测效率,根据文献 [11],在入射离子能量较高时,即 E/M 大于 2 keV/u 时,探测效率接近 100% . 本实验中入射离子能量符合以上条件故认为散射离子探测器的效率是 100% .

由于反冲离子能量受加速电压限制,需对反冲离子探测器应进行探测效率刻度.根据文献 [11] 的 $\eta\text{-}E/M$ 关系和反冲离子引出电压得到不同电荷态的反冲离子探测效率.本实验中 Ne^{q+} ($q = 1\text{--}4$) 的探测效率

和到达时间 t_s ,而反冲离子在靶室经引出栅网加速(电压 1000 V ,其通过效率 80% 以上)再经 15 cm 自由漂移引入到微通道板 MCP,反冲离子到达 MCP 的时间 t_r .不同反应反冲离子不同的价态,实验中反冲离子飞行时间的测量是将位置灵敏微通道板探测器 PSMCP 和飞行时间谱仪 TOF(由引出栅网 1000 V 高压、自由漂移室和微通道板 MCP 组成)来的两路时间信号 t_s, t_r 送入时幅转换器 TAC,将它们的差值转换成反应价态的模拟信号,最后将此模拟信号送入多参数数据获取系统 MPA-3 形成 y 信号,与散射离子位置形成的 x 信号进行复合(见图 1),得到二维实验谱(见图 2).

η 分别为 $0.30(1+), 0.50(2+), 0.60(3+), 0.681(4+)$. Ar^{q+} ($q = 1\text{--}4$) 的探测效率 η 分别为 $0.18(1+), 0.31(2+), 0.42(3+), 0.51(4+)$.

3. 理论分析

在中低能区,单电子俘获可以利用 Bohr-Lindhardt 模型、分子过垒模型 MCBM 及电子-核相互作用理论 [12,13] 等来解释,但是以上模型对电子电离和转移电离没有给出完整解释.文献 [14] 将转移电离理解为入射离子与靶原子上的两个电子独立相互作用的过程,并假设逃离的电子只存在俘获和电离两个过程,在此前提下得出的理论模型与实验结果符合得很好,即

$$P_i(b) = P_n(b) - P_{Ci}(b) \quad (b \leq R_{li}), \quad (1)$$

i 表示第 i 个逃离的电子, b 表示碰撞参数, R_{li} 表示电离半径 [14], 则 P_{li}, P_{ri} 和 P_{Ci} 分别表示第 i 电子发生电离、逃离和俘获的概率.从文献 [14] 中引入 $R_{ri}, R_{Ci}, P_{ri}, P_{Ci}$ 的计算方法,如下:

$$\frac{q_i}{(R_{ri} - a_i)^2} = \frac{Z_i}{a_i^2}, \quad (2)$$

$$R_{Ci} = \frac{2q_i}{V_p^2}, \quad (3)$$

$$P_{ri}(b) = \frac{2\sqrt{R_{ri}^2 - b^2}}{V_p} \cdot \frac{1}{T} \quad (b \leq R_{ri}), \quad (4)$$

$$P_{Ci}(b) = \frac{2\sqrt{R_{Ci}^2 - b^2}}{V_p} \cdot \frac{1}{T} \quad (b \leq R_{Ci}) \quad (5)$$

R_{Ci} 表示第 i 电子的俘获半径, R_{ri} 表示第 i 电子的逃离半径, Z_i 表示靶原子作用到第 i 电子的有效电荷数, 通过斯莱特法则得到 Z_i , $T = (2\pi a_i / v_i)$ 表示电子的轨道运动周期, a_i 表示第 i 电子的轨道半径, v_i 表示电子的轨道运动速度.

当前, 大多采用研究转移电离与单电子俘获截面比 R_{TS} 的方式间接得到转移电离过程中电离和俘获两个机理的信息. 本文同样采用这种方法, 讨论中做三点假设:

1) 靶原子静止不动, 入射离子沿直线运动, 在碰撞中不会改变其轨迹.

2) 忽略靶原子中的电子-电子相互作用, 转移电离过程是入射离子与靶原子的两个独立电子发生碰撞的结果.

3) 同样认为(1)式成立.

推导得到单电子俘获截面 σ_{SC} 、转移电离截面 σ_{TI} 、单电子俘获概率 P_{SC} 、转移电离概率 P_{TI} , A 表示靶的原子序数:

$$\sigma_{SC} = 2\pi \int P_{SC} \cdot b db, \quad (6)$$

$$\sigma_{TI} = 2\pi \int P_{TI} \cdot b db, \quad (7)$$

$$P_{SC} = \sum_{i=1}^A P_{Ci} \cdot \prod_{j=1, j \neq i}^A (1 - P_{rj}), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P_{TI} &= \sum_{i=1}^A \sum_{j=1, j \neq i}^A P_{li} \cdot P_{Cj} \cdot \prod_{k=1, k \neq i, j}^A (1 - P_{rk}) \\ &= \sum_{i=1}^A P_{li} \cdot \frac{\sum_{j=1}^A P_{Cj} \cdot \prod_{k=1, k \neq j}^A (1 - P_{rk})}{(1 - P_{ri})} \\ &\quad - \frac{\sum_{i=1}^A P_{li} \cdot P_{Ci} \cdot \prod_{j=1, j \neq i}^A (1 - P_{rj})}{\prod_{i=1}^A (1 - P_{ri})}. \quad (9) \end{aligned}$$

由(1)(4)和(5)式看出相同亚壳层上的电子对应的 P_{ri} , P_{Ci} , P_{li} 相等, 得到

$$P_{TI} \approx \sum_{i=1}^{A-1} \frac{P_{li}}{(1 - P_{ri})} \cdot \left[\sum_{j=1}^A P_{Cj} \prod_{k=1, k \neq j}^A (1 - P_{rk}) \right]$$

$$= \sum_{i=1}^{A-1} \frac{P_{li}}{(1 - P_{ri})} \cdot P_{SC}. \quad (10)$$

对(1)~(5)式分析得出入射离子与 He, Ne, Ar 或 Kr 碰撞过程中碰撞参数 $b \leq 0.5a_0$ (a_0 表示玻尔半径), 取碰撞参数 $b \approx 0$, 通过分析概率比间接得到截面比的规律, 即

$$R_{TS} = \frac{\sigma_{TI}}{\sigma_{SC}} \approx \frac{P_{TI}(0)}{P_{SC}(0)}. \quad (11)$$

将(4)(10)式代入(11)式, 得到

$$R_{TS} = \sum_{i=1}^{A-1} \frac{P_{li}(0)}{(1 - P_{ri}(0))}. \quad (12)$$

可以看出 R_{TS} 的变化规律取决于转移电离过程中电离电子的行为, 包括该电子的电离概率 P_{li} 和逃离概率 P_{ri} . 不同壳层电子对应的 P_{li} 和 P_{ri} 随入射离子速度 V_p 的变化规律不同, 从而使得不同壳层电子对应的 R_{TS} 随 V_p 变化规律也不同. 这为我们研究转移电离过程中电离的电子在靶原子上的布居提供了一种途径, 即通过比较理论得到的各壳层电子对应的 R_{TS} 变化规律与实验得到的 R_{TS} 变化规律是否符合, 以确定转移电离过程中电离的电子所处的壳层.

将(4)(5)式代入(1)式得到

$$P_{li}(0) = \left(\frac{2R_{ri}}{V_p} - \frac{4q_i}{V_p^2} \right) \cdot \frac{1}{T}. \quad (13)$$

将(9)(13)式代入(12)式得到 R_{TS} 的具体表达式:

$$R_{TS} = \frac{\left(\frac{2R_{ri}}{V_p} - \frac{4q_i}{V_p^2} \right) \cdot \frac{1}{T}}{1 - \frac{2R_{ri}}{V_p} \cdot \frac{1}{T}}. \quad (14)$$

由(14)式得到二价离子与 Ne 碰撞过程产生的各亚壳层电子对应的 R_{TS} 的理论变化曲线(见图3). 从图3中可以得到, R_{TS} 随入射离子速度 V_p 的变化趋势, 先迅速上升后平缓下降. 在 V_p 较低时, 随着 V_p 增大, 由(3)式看出 R_{Ci} 以 V_p 二次方反比的形式急剧下降, 造成电子的俘获概率 P_{Ci} 迅速减小, 电离概率 P_{li} 迅速增大, R_{TS} 迅速上升的趋势; 达到峰值后, 随着 V_p 增大碰撞持续时间逐渐减小, P_{li} 和 P_{ri} 都开始减小, R_{TS} 表现为入射离子速度 V_p 的近似倒数函数. 同时看到, 转移电离过程中来自内壳层电离的电子比外壳层电离的电子对应的 R_{TS} 峰位的 V_p 高. 靶原子最外各亚壳层电子对应的 R_{TS} 峰位的 V_p 理论值见表1.

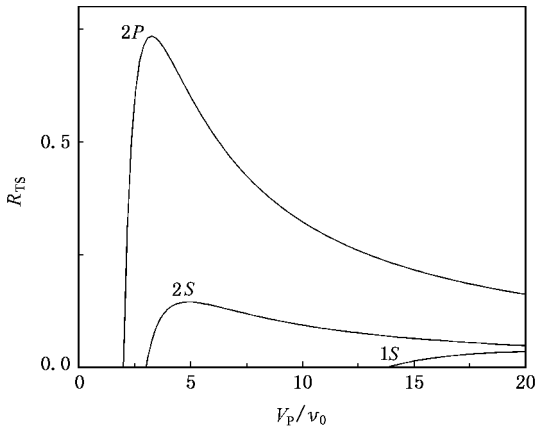


图3 二价离子与Ne碰撞过程产生的各亚壳层电子对应的 R_{TS} 随入射离子速度 V_p 的理论变化曲线

表1 最外各亚壳层电子对应的 R_{TS} 峰位的入射离子速度 V_p 理论值(单位: v_0)

$q+$	He		Ne		Ar		Kr	
	1S	2S	2P	3S	3P	4S	4P	
1	2.2							
2	2.9	4.6	3.1	3.4	2.6	3.8	2.6	

4. 实验结果与讨论

图5—图9, 看出在低电荷态入射离子与原子碰撞过程中转移电离与单电子俘获截面比 R_{TS} 随入射离子速度 V_p 的变化趋势与理论分析得到的最外亚壳层电子对应的 R_{TS} 变化趋势一致. 由图4, 在入射离子速度 V_p 很低时, 单电子俘获截面 s_{SC} 较大, 转移电离截面 s_{TI} 很小, 随着入射离子速度 V_p 升高, 碰撞

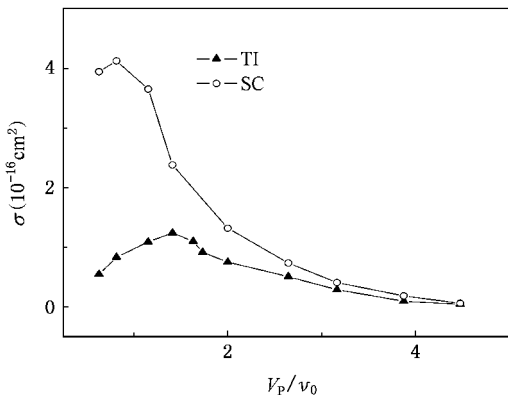


图4 文献[15]中 He^{2+} 与Ne碰撞过程中转移电离截面和单电子俘获截面随入射离子速度 V_p 的变化曲线(TI表示转移电离过程, SC表示单电子俘获过程)

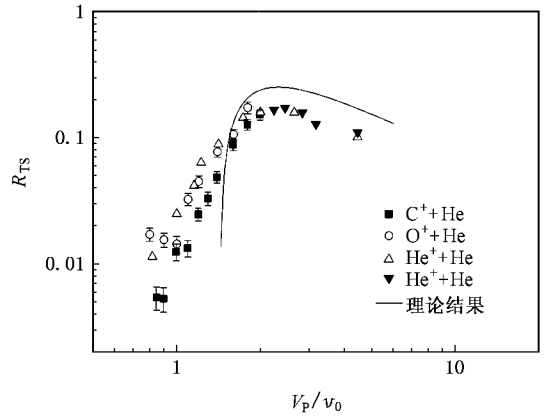


图5 C^+, O^+, He^+ 与He碰撞产生的转移电离与单电子俘获截面比(本次实验的数据: (■)— C^+ (○)— O^+ ; 文献[16]的数据(△)— He^+ ; 文献[15]的数据(▼)— He^+ ; He的1S壳层电子对应的 R_{TS} 理论曲线: —)

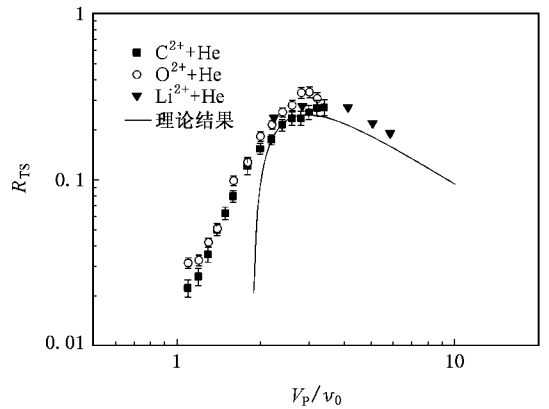


图6 C^{2+}, O^{2+}, Li^{2+} 与He碰撞产生的转移电离与单电子俘获截面比 R_{TS} (本次实验的数据: (■)— C^{2+} (○)— O^{2+} ; 文献[17]的数据: (▼)— Li^{2+} ; He的1S壳层电子对应的 R_{TS} 理论曲线: —).

持续时间变短, 单电子俘获截面 s_{SC} 迅速下降, 转移电离截面 s_{TI} 逐渐增大, 造成 R_{TS} 急剧上升, 反映出俘获和电离两个竞争机理对碰撞持续时间不同依赖关系. 电子俘获所需要的碰撞持续时间较长, 电离相对较短. 当入射离子速度 V_p 到达一定值后, 单电子俘获截面 s_{SC} 和转移电离截面 s_{TI} 受碰撞持续时间的影响都平缓下降, R_{TS} 表现为达到峰值后也开始缓慢下降.

从图5—图9中看到转移电离与单电子俘获截面比 R_{TS} 随入射离子速度 V_p 的变化趋势与理论得到的最外亚壳层电子对应的 R_{TS} 变化趋势一致. 入

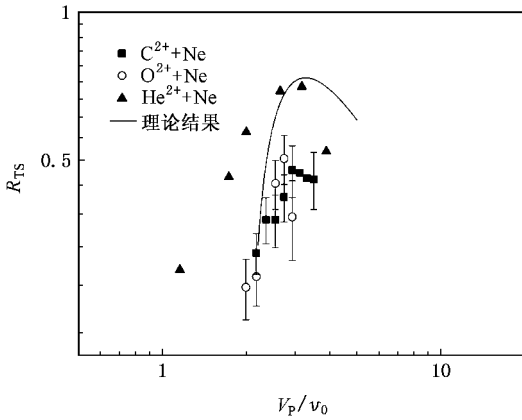


图 7 C^{2+} 、 O^{2+} 、 He^{2+} 与 Ne 碰撞产生的转移电离与单电子俘获截面比 R_{TS} (本次实验的数据 (■)— C^{2+} (○)— O^{2+} ; 文献 [11] 的数据 (▲)— He^{2+} ; Ne 的 2P 亚壳层电子对应的 R_{TS} 理论曲线 (—)).

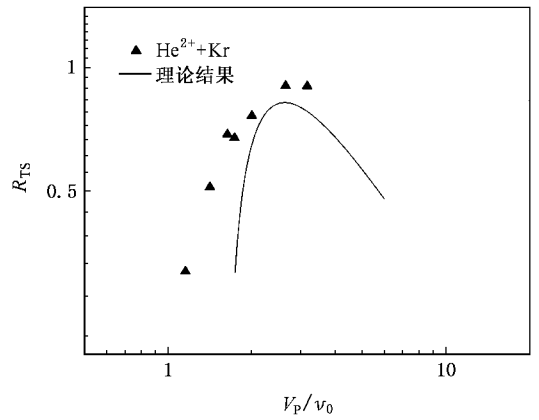


图 9 He^{2+} 与 Kr 碰撞产生的转移电离与单电子俘获截面比 R_{TS} (文献 [11] 的数据 (▲)— He^{2+} ; Kr 的 4P 亚壳层电子对应的 R_{TS} 的理论曲线 (—)).

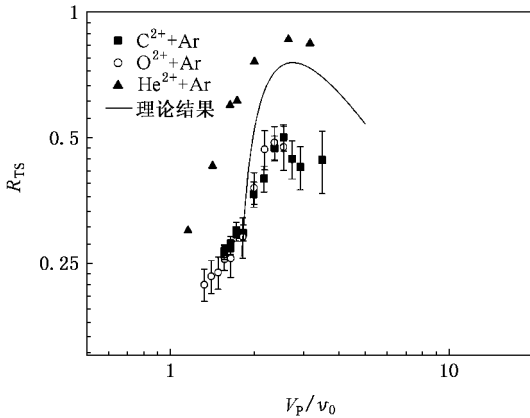


图 8 C^{2+} 、 O^{2+} 、 He^{2+} 与 Ar 碰撞产生的转移电离与单电子俘获截面比 R_{TS} (本次实验的数据 (■)— C^{2+} (○)— O^{2+} ; 文献 [11] 的数据 (▲)— He^{2+} ; Ar 的 3P 亚壳层电子对应的 R_{TS} 的理论曲线 (—)).

以及峰位一致,说明转移电离过程中电离出来的电子主要来自最外亚壳层,其他亚壳层的电子束缚能较大故在该能区电离概率 P_{li} 较小,对 R_{TS} 的贡献很小.

表 2 最外亚壳层电子对应的 R_{TS} 峰位的 V_p 理论结果与实验结果对比 (单位: v_0)

q	He		Ne		Ar		Kr	
	理论值 (1S)	实验值	理论值 (2P)	实验值	理论值 (3P)	实验值	理论值 (4P)	实验值
1	2.2	2.4						
2	2.9	2.9—3.3	3.1	2.9—3.1	2.6	2.3—2.6	2.6	2.7

射离子速度 V_p 较低时,由于碰撞持续时间较长使部分靶原子碰撞结束后产生激发态,即碰撞过程中靶原子上产生的处于逃离状态的电子碰撞结束后除了被电离、俘获还存在被激发的概率,从而造成 R_{TS} 随 V_p 变化的理论曲线与实验结果出现偏离; V_p 较高时,碰撞持续时间较短,碰撞过程中靶原子产生激发态的概率减小,理论曲线与实验结果符合得很好.同时得到 R_{TS} 峰位 (见表 2),表 2 显示理论得到的最外亚壳层对应的 R_{TS} 峰位与实验得到的 R_{TS} 峰位非常符合.通过以上比较看出理论分析得到的最外亚壳层电子对应的 R_{TS} 与实验得到的 R_{TS} 的变化趋势

5. 结 论

通过理论分析与实验结果的对比,我们发现:中低能低电荷态离子-原子碰撞过程中,靶原子上的电子-电子相互作用相对入射离子-靶电子的强相互作用而言较弱,转移电离过程可以理解为入射离子与靶原子上独立的两个电子分别发生作用的结果;转移电离过程电离的电子主要来自靶原子最外亚壳层,转移电离与单电子俘获界面比 R_{TS} 随入射离子速度 V_p 的变化规律取决于最外亚壳层电子的行为,包括该电子的电离概率 P_{li} 和逃离概率 P_{fi} ,其峰位出现在最外亚壳层电子对应的 R_{TS} 峰的位置.

衷心感谢刘兆远教授对本人的热心指导和帮助以及李兰亭、陈子纯两位工程师在实验过程中对加速器的调试与精心地维护,确保实验中获得稳定的束流.

- [1] Tanis J A , Clark M W , Price P , Olson R E 1987 *Phys. Rev. A* **36** 1952
- [2] Bohr N , Lindhardt J , Dan K 1954 *Mat-Phys. Meddr.* **28** 7
- [3] Ryufuku H , Sasaki K , Watanabe T 1980 *Phys. Rev. A* **21** 745
- [4] Niehaus A 1986 *J. Phys. B* **19** 2925
- [5] Bates D R , McCarroll R 1958 *Proc. R. Soc. A* **245** 175
- [6] 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]
- [7] Mancev I 2001 *Phys. Rev. A* **64** 012708
- [8] McCartne P C E , Shah M B , Geddes J , Gilbody H B 1999 *Phys. Rev. A* **60** 4582
- [9] Skogvall B , Grandin J P , B. Sulik , Salin A , Stolterfoht N 1995 *Phys. Rev. A* **51** 6
- [10] Wang Y D , Yang Zh H , Ma X W , Liu H P , Zhao M Ch , Zhou C X , Liu Zh W , Zhang W , Zhang X Z , Guo X H , Pang G Y , Yang F , Li D W 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 1636 (in Chinese) [王友德、杨治虎、马新文、刘惠萍、赵孟春、周嗣信、刘占稳、张 文、张雪珍、郭晓虹、潘广炎、杨 锋、李大万 1996 物理学报 **45** 1636]
- [11] DuBois R D 1987 *Phys. Rev. A* **36** 2585
- [12] McGire J H 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 1153
- [13] McGire J H 1987 *Phys. Rev. A* **36** 1114
- [14] Shao J X , Chen X M , Ding B W 2007 *Phys. Rev. A* **75** 012701
- [15] Forest J L 1995 *Phys. Rev. A* **52** 350
- [16] DuBois R D , Toburen L H 1988 *Phys. Rev. A* **38** 3960
- [17] Woitke O , Zavodszky P A , Ferguson S M , Houck J H , Tanis J A 1998 *Phys. Rev. A* **57** 2692

The transfer ionization mechanism in the low charge state ion-atom collisions *

Liu Yu-Wen Chen Xi-Meng[†] Shao Jian-Xiong Ding Bao-Wei Fu Hong-Bin Cui Ying Zhang Hong-Qiang
Lu Yan-Xia Gao Zhi-Min Du Juan Chen Lin Sun Guang-Zhi Yin Yong-Zhi Yu De-Yang Cai Xiao-Hong

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

(Received 4 July 2007 ; revised manuscript received 29 August 2007)

Abstract

In this work , the ionizations involving the charge transfer and single capture processes in low charge state ion-atom collisions in low-to-medium energy region , are investigated by the position sensitive and time-of-flight techniques . For a given charge state of the incoming projectiles , the dependence of the ratio R_{TS} of the transfer ionization to the single capture changing with the projectile velocity is obtained , and the conclusion that the ionized electron in the transfer ionization process comes from the outermost sub-shell of the target atom is confirmed by comparing our theoretical results with the experimental data .

Keywords : transfer ionization , release radius , ionization radius , capture radius

PACC : 3470 , 3450H , 5220H

* Project supported by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant No. 2002CCA00900) , and the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 10304019) .

[†] E-mail : Chenxm@lzu. edu. cn