

文章编号: 1007-4627(2010)04-0500-05

低能 He^{2+} 与 He 原子碰撞转移电离出射电子能谱研究*

冯文天^{1,2}, 马新文^{1, #}, 朱小龙¹, 张少峰^{1,2}, 刘惠萍¹, 李斌^{1,2}, 闫顺成^{1,2}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用反应显微成像谱仪对 70 和 100 keV He^{2+} 与 He 原子碰撞转移电离(TI)过程中不同出射角度的电子能谱进行了测量, 观测到出射电子能谱具有如下分布特征: 出射电子速度分布介于 0 和入射离子速度 v_p 之间; 在不同出射角度电子能谱分布均有一极大值存在, 随着出射角度的增大, 能谱分布极大值逐渐减小; 当电子出射角度等于 45° 时, 多数电子集中在 0 eV 附近。上述特征可由低能离子-原子碰撞“准分子”模型进行定性解释。在 100 keV He^{2+} -He 转移电离出射电子能谱中有靶电子被俘获至散射离子连续态(electron capture to continuum, 简称 ECC)电子的贡献, 这可看做是动力学两步过程的作用。

关键词: 反应显微谱仪; 转移电离; ECC 电子; “准分子”模型

中图分类号: O562.5

文献标识码: A

1 引言

高电荷态离子与原子(分子)碰撞多体动力学研究是近十几年原子物理学研究的热点之一^[1], 其具有丰富的反应通道, 依据碰撞过程中转移电荷的不同划分为靶核电离、入射离子电子损失、纯电子俘获和转移电离等。其中, 电子出射到连续态的反应道(靶电离、转移电离^[2-4]等)的深入研究在天体物理、行星的结构与演化、等离子体物理、核聚变、表面物理及材料科学的研究中具有重要意义^[5]。对靶电离、转移电离反应道研究的传统实验技术是采用电子谱仪, 它具有测量出射电子能量范围大且分辨率好的特点; 但它的探测立体角较小, 符合效率低, 这使得电子谱仪无法对靶电离和转移电离两种反应通道进行有效区分^[6, 7]。近几年, 反应显微成像谱仪(Reaction Microscope)的出现为离子-原子(分子)碰撞直接电离和转移电离反应的深入研究提供了技术保证。一方面, 它对一定能量电子的收集立体角可以达到 4π , 因此可以得到任意出射角度的电子能谱; 另一方面, 由于它可以测量得到反应末态

产物几乎所有的信息, 因此可以获得出射电子的多重微分截面。近几年来, Martinez^[6, 7] 等和 Schmidt^[8, 9] 等分别采用电子谱仪和冷靶反冲离子动量谱仪(COLTRIMS)对最简单碰撞体系之一的 He^{2+} -He 转移电离过程进行了研究。前者采用传统的电子谱仪对能量分别为 100 和 400 keV 的 He^{2+} -He 转移电离过程出射电子进行了测量, 通过散射离子与出射电子的符合测量获得了出射电子在不同角度的二重微分截面, 并对测得的实验结果进行了解释; 后者采用 COLTRIMS 对 70—100 keV He^{2+} -He 转移电离(TI)过程中出射电子进行了成像, 研究了离子俘获一个靶电子至不同量子态对出射电子空间分布特征的影响, 而对这个能区范围内出射电子的能谱则没有涉及。

本文利用中国科学院近代物理研究所的反应显微成像谱仪(ReMiLa), 对低能(70 和 100 keV) He^{2+} 与 He 原子碰撞转移电离(TI)出射电子能谱进行了研究。对实验获得的不同出射角度的出射电子能谱进行了分析, 之后对实验结果进行了分析和

* 收稿日期: 2010-03-29; 修改日期: 2010-05-01

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10434100, 10979007)

作者简介: 冯文天(1980-), 男(汉族), 甘肃武威人, 助理研究员, 从事高电荷态原子分子物理研究;

E-mail: fengwentian@impcas.ac.cn

通讯联系人: 马新文, E-mail: x.ma@impcas.ac.cn

讨论。

2 实验装置

实验是在中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子综合实验研究平台的反应显微成像谱仪(ReMiLa)上进行的。反应显微成像谱仪示意图如图 1, 详见文献[10, 11]。实验室坐标系定义如下: 束流方向为 z 轴, 超音速冷靶反方向为 y 轴, 反冲离子与电子探测器连线方向沿 x 轴(指向反冲离子探测器)。从 320 kV 高电荷态离子综合实验研究平台 ECR 离子源引出的 He^{2+} 离子束经过两个 90° 、一个 60° 偏转磁铁进行荷质比选择并经过一系列四极磁铁和光阑对束流进行优化和准直后进入碰撞靶室, 与液氮预冷却并经过二级差分的超音速 He 靶相碰, 交叉碰撞区的 He 靶直径大小约为 1 mm。碰撞反应后产生的反冲离子、出射电子在 x 方向的引出电场和均匀磁场共同作用下, 朝相反的方向运动, 经过加速、漂移后分别被反冲离子及电

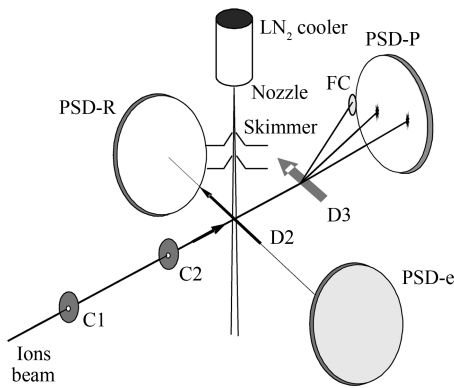


图 1 反应显微成像谱仪示意图

子探测器收集, 分别给出反冲离子和出射电子到达探测器的时间和位置信息。反冲离子飞行时间谱仪(TOF)满足二维位置和时间三维聚焦条件, 以减弱超音速冷靶弥散对反冲离子动量分辨的影响。电子 TOF 满足 Wiley-McLaren 聚焦条件。反应末态的散射离子被一静电偏转板进行电荷态分析后到达散射离子探测器, 散射离子探测器给出散射离子的电荷态及二维位置信息。反冲离子、电子及散射离子探测器都是具有多击响应的二维位置灵敏探测器(PSD), 探测器的有效探测面积均为 $\phi 75$ mm。实验中采用散射离子-反冲离子符合测量技术, 由基于 PXI 总线的获取系统对实验数据以 event-by-e-

vent 格式进行记录, 便于离线分析。由实验中测得的出射电子的 TOF、位置及磁场信息可对其初始动量矢量进行重构(具体重构方法参考文献[1]), 从而得到各个不同角度的出射电子能谱。

3 结果与讨论

在过去的几十年中, 离子-原子碰撞出射电子能谱的研究主要集中在以下特征电子: (1) 俄歇电子^[12], 其特征是出射电子能谱分布中有特征峰存在; (2) ECC 电子^[13], 其特征为出射电子几乎与入射离子同向且以相同的速度 v_p 前向出射; (3) BE (Binary Encounter) 电子^[7], 其主要出现在中高能入射离子与靶碰撞过程中, 出射电子能谱分布可近似由下式表示:

$$E_{BE} = 4E_e \cos^2 \theta, \quad (1)$$

其中, $E_e = m_e v_p^2 / 2$, v_p 为入射离子速度, θ 为电子出射角; (4) 鞍点电子^[14] (“saddle point” electrons, 简称 SP 电子), 1983 年由 Olson 提出, 速度满足以下关系:

$$v_s = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{q_p}{q_t}}} v_p, \quad (2)$$

其中, v_s 为鞍点电子速度, q_p , q_t 分别为入射离子与反冲离子电荷态, v_p 为入射离子速度, 对 He^{2+} -He 转移电离反应, $v_s \approx \frac{1}{2} v_p$ 。

从图 2 看出, 出射电子能谱主要分布在 $0 - m_e v_p^2 / 2$ 之间(对应出射电子速度在 0 和入射离子速度 v_p 之间); 不同出射角 θ 的电子能谱分布均有一极大值存在; 随着 θ 增大, 出射电子能谱分布极大值逐渐接近 0 eV。图 2(a) 中电子能谱分布极大值位于 SP 和 ECC 之间, 在 $E_e \approx 4$ eV (对应电子速度 $v_e \approx 0.6 v_p$) 处, 这与 Olson 预言的“SP 电子”速度接近。在图 2(a) 中没有观测到 ECC 电子。由于我们的实验装置对 45 eV 的出射电子可达到 4π 立体角测量, 因此在入射离子能量为 70 keV 时, ECC 电子对出射电子能谱无贡献。图 2(b) 中电子能谱分布极大值位于 $E_e \approx 3.8$ eV 处, 与(a)相比, 它更接近 SP。图 2(c) 中, 多数电子分布在 0 eV 附近。

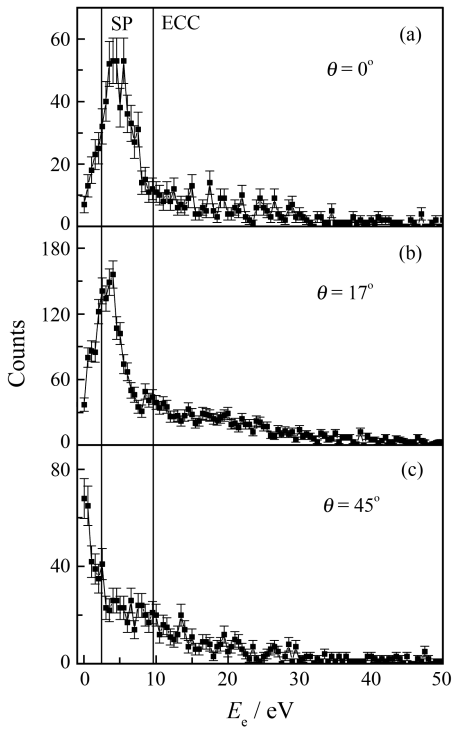


图 2 70 keV He²⁺-He 碰撞转移电离出射电子能谱, 左边的竖线表示 Olson 预言的 SP 电子所在的位置, 右边竖线是 ECC 电子所在位置, 图中电子出射角(出射电子的动量矢量与入射束流夹角) $\theta=0^\circ, 17^\circ$ 和 45° 。

图 3 具有与图 2 相似的能谱分布特征, 不同出射角度电子能谱分布均有一极大值存在, 随着 θ 的增大, 能谱分布极大值逐渐向低能方向移动; 大多数电子能量集中在 $0-m_e v_p^2/2$ 之间(电子速度介于 0 和入射离子速度 v_p 之间)。图 3(a) 中电子能谱分布极大值出现在 12.8 eV, 这可看做是来自 ECC 电子的贡献, 这与图 2(a) 有显著的不同; 图 3(b) 中电子能谱分布极大值在 $E_e \approx 7.7$ eV 处, 位于 SP 和 ECC 之间; 图 3(c) 与图 2(c) 中电子能谱分布具有相似性, 多数电子集中在 0 eV 附近。

从图 2 和图 3 中没有观测到来自 BE 电子和俄歇电子的贡献。多数电子能量分布在 $0-m_e v_p^2/2$ 之间(对应的电子速度介于 0 和 v_p 之间), 这是由于当入射离子速度小于核外电子绕核运动速度时, 在碰撞过程中可将入射离子与靶看做一“准分子”, 在入射离子逐渐靠近靶核的过程中, 靶电子被逐个“分子化”, 靶电子在入射离子与靶核共同构成的双中心势场中运动; 在入射离子远离靶核的过程中, He 靶的一个电子被入射离子俘获, 而另一个电子经由一系列分子轨道跃迁, 最终的出射速度介于入

射离子与反冲离子速度之间的连续态, 其速度介于靶核(0)和入射离子(v_p)之间。在碰撞过程中, 入射离子与靶核的动量交换是最主要的动量交换过程, 靶电子在碰撞过程中获得的横向动量很小。因此, 随着 θ 增大, 出射电子能谱分布极大值逐渐向低能方向移动, 在 $\theta=45^\circ$ 时, 无论入射离子能量是 70 或者 100 keV, 多数电子集中在 0 eV 附近。图 3(a) 中 ECC 电子的形成可归因于动力学两步过程, 它

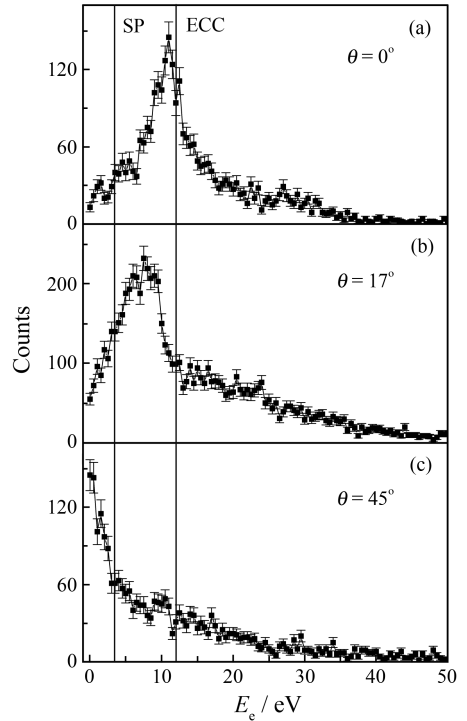


图 3 100 keV He²⁺-He 碰撞转移电离出射电子能谱, 左边的竖线表示 Olson 预言的 SP 电子所在的位置, 右边竖线是 ECC 电子所在位置。图中电子出射角 $\theta=0^\circ, 17^\circ$ 和 45° 。

指不考虑靶电子-电子之间的关联作用, 将转移电离看做电子俘获和靶单电离两个独立过程。在碰撞过程中, He²⁺ 首先俘获一个电子变为 He⁺, 紧接着, 由于 He⁺ 与另一个靶电子的库仑相互作用使其出射到连续态(或者先靶单电离后俘获)。对涉及两个电子的转移电离过程的这种解释最早由 Barrachina^[15] 提出, 之后得到了 Galassi^[16] 使用 CDW-EIS 计算结果的支持。而图 2(a) 中未观测到 ECC 电子的原因在于入射离子能量为 70 keV ($v_p \approx 0.84$ atomic unit, 小于玻尔速度) 时, 入射离子与靶作用时间较长, 反应过程中出射电子呈现出更明显的“分子化”电子特征, 出射电子速度主要分布在 $0-1$

atomic unit 之间, 因此 ECC 电子对出射电子能谱无贡献。

4 结论

利用反应显微成像谱仪对 70 和 100 keV He^{2+} -He 碰撞转移电离反应进行了运动学完全测量, 得到了不同出射角度的电子能谱, 观察到入射离子能量分别为 70 和 100 keV 时, 出射电子能谱分布具有相似特征: 不同出射角度的出射电子能谱分布均有一极大值存在, 随着出射角度的增大, 能谱分布极大值逐渐向低能方向移动; 电子能谱分布在 $0 - m_e v_p^2 / 2$ 之间; 在电子出射角度 $\theta = 45^\circ$ 时, 多数电子集中在 0 eV 附近。上述特征可由低能离子-原子碰撞“准分子”模型进行定性解释。在 100 keV He^{2+} -He 碰撞转移电离出射电子能谱中, 还看到了 ECC 电子的贡献, ECC 电子是动力学两步过程的作用。在不同角度的出射电子能谱中均未观测到明显的 Olson 预言的“SP 电子”, 这有可能是在入射离子的能量较低时, 入射离子与靶作用时间相对较长, 使得出射电子能谱分布呈现出明显的“分子化”特征, 而 Olson 预言的“SP 电子”仅是“分子化”特征电子的一部分。

参考文献 (References):

- [1] Ullrich J, Moshhammer R, Dorn A, *et al.* Rep Prog Phys, 2003, **66**(9): 1463.
- [2] Yu Deyang, Chen Ximeng, Yang Zhihu, *et al.* Nuclear Physics Review, 2002, **19**(2): 172(in Chinese).
(于得洋, 陈熙萌, 杨治虎, 等. 原子核物理评论, 2002, **19**
- (2): 172.)
- [3] Yu Deyang, Chen Ximeng, Yang Zhihu, *et al.* Nuclear Physics Review, 2002, **18**(1): 62(in Chinese).
(于得洋, 陈熙萌, 杨治虎, 等. 原子核物理评论, 2002, **18**(1): 62.)
- [4] Zhu Xiaolong, Ma Xinwen, Li Bin, *et al.* Acta Phys Sin, 2010, **59**(1): 620(in Chinese).
(朱小龙, 马新文, 李斌, 等. 物理学报, 2010, **59**(1): 620.)
- [5] Dörner R, Mergel V, Jagutzki O, *et al.* Physics Reports, 2000, **330**(2-3): 95.
- [6] Martinez S, Bernardi G, Focke P, *et al.* J Phys: At Mol Opt Phys, 2008, **B41**(14): 145204.
- [7] Martinez S, Bernardi G, Focke P, *et al.* J Phys: At Mol Opt Phys, 2002, **B35**(10): 2261.
- [8] Schmidt L P H, Afaneh F, Schoffler M, *et al.* Phys Scripta, 2004, **T110**: 379.
- [9] Schmidt L, Schöffler M, Stiebing K, *et al.* Phys Rev, 2007, **A76**(1): 012703-1.
- [10] Ma Xinwen, Zhu Xiaolong, Liu Huiping, *et al.* Sci China Ser, 2008, **G38**(1): 1 (in Chinese).
(马新文, 朱小龙, 刘惠萍, 等. 中国科学, 2008, **G38**(1): 1.)
- [11] Cao Shiping, Ma Xinwen, Dorn A, *et al.* Nuclear Physics Review, 2007, **24**(3): 44(in Chinese).
(曹士娉, 马新文, Dorn A, 等. 原子核物理评论, 2007, **24**(3): 44.)
- [12] Posthumus J H, Morgenstern R. J Phys: At Mol Opt Phys, 1992, **B25**(21): 4533.
- [13] Afaneh F, Schmidt L P H, Schoffler M, *et al.* J Phys: At Mol Opt Phys, 2007, **B40**(10): 1745.
- [14] Olson R E. Phys Rev, 1986, **A33**(6): 4397.
- [15] Barrachina R. Nucl Instr and Meth, 1997, **B124**(2-3): 198.
- [16] Galassi M E, Abufager P N, Martinez A E, *et al.* J Phys: At Mol Opt Phys, 2002, **B35**(7): 1727.

Investigation on Electron Energy Spectra of Transfer Ionization Process in 70 and 100 keV He^{2+} Colliding on He^{*}

FENG Wen-tian^{1, 2}, MA Xin-wen^{1, #}, ZHU Xiao-long¹, ZHANG Shao-feng^{1, 2},

LIU Hui-ping¹, LI Bin^{1, 2}, YAN Shun-cheng^{1, 2}

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

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The energy spectra of emitted electrons in transfer ionization process of 70 and 100 keV He^{2+} colliding on He have been measured by using Reaction Microscope. The energy spectra of the ejected electrons have been obtained in the angular range from 0° to 45° and energies from 0 to 45 eV. The characteristics of the energy spectra were analyzed. There is a maximum in each energy spectrum related to different emission angles; The position of the maximum decreases with increasing the emission angle; The velocity of emitted electrons is between 0 and v_p , where v_p is the projectile velocity; Most electrons are around 0 eV when electron emission angle is 45° . These characteristic could be qualitatively explained in a “quasimolecule” model. The ECC electrons were observed in the transfer ionization process of 100 keV He^{2+} colliding on He collision, It could be explained as dynamical two-step process.

Key words: reaction microscope; transfer ionization; ECC electron; quasimolecule model

* **Received date:** 29 Mar. 2010; **Revised date:** 1 May 2010

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10434100, 10979007)

Corresponding author: Ma Xin-wen, E-mail: x.ma@impcas.ac.cn