

文章编号: 1007-4627(2007)03-0208-06

近阈值下 He 原子的双电离实验反冲离子动量分析*

曹士娉^{1,2}, 马新文¹, A. Dorn³, M. Dürr³

(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;

3 Max-Planck-Institute for Nuclear Physics, Saupfercheckweg 1,
Heidelberg 69117, Germany)

摘要: 利用最新发展起来的适用于低能电子入射的反应显微成像谱仪, 对电子轰击 He 原子近阈值的双电离过程进行了研究, 实验测量了反应后 4 个粒子的全部动量, 获得了五重微分截面及出射粒子间的关联信息。着重分析了在入射电子束与出射电子构成的平面内, 3 个均分系统剩余能量的电子出射角关联关系, 并与理论计算进行了比较。研究表明, 当两个电子反向出射时, 第 3 个电子垂直于这两个电子动量方向出射的几率最大。在 1 个电子垂直于平面出射时, 通过理论计算结果与平面内出射角分布的比较, 发现 DS6C 理论能够较好地描述实验结果。

关键词: He 原子的近阈值双电离; 反应显微成像谱仪; 电子轰击电离

中图分类号: O562.4

文献标识码: A

1 引言

原子分子系统的多体动力学研究是目前原子物理学的一个重要课题。通过对多体动力学的研究可以帮助人们理解及处理现实中的多体复杂系统, 其应用范畴从最简单的三体动力学系统——带电粒子与 H 的碰撞反应及带电粒子与大分子的碰撞反应, 到各学科中的微观体系。为实验观测原子分子系统的多体动力学过程, 我们研究了原子的多重电离过程以获得多体系统中束缚态和自由态波函数的具体特性, 诠释碰撞过程。电子与 H 原子碰撞电离过程 ($e + H = 2e + H^+$), 是最简单的三体动力学系统之一, 在 20 世纪末物理学家已经很好地从理论上解决了此动力学过程^[1], 理论计算结果与电子轰击下 H 原子单电离 ($e, 2e$) 实验测量的绝对三重微分截面完全符合。对于四体系统及更复杂的多体问题, 无论是实验还是理论方面的研究都很少进行。电子轰击 He 原子的双电离 ($e, 3e$) 过程是最简单的四体动力学体系之一, 是本文讨论的重点。

在电子轰击原子电离的实验研究方面, 采用传

统的电子谱仪^[2], 在 ($e, 2e$) 实验中已积累了比较多的实验数据^[3-5]。但由于传统电子谱仪的探测立体角很小 (一般在 10^{-3} rad), 在进行符合测量, 尤其是进行多重符合测量时, 系统的探测效率很低, 使用传统谱仪进行 ($e, 3e$) 实验十分困难, 迄今, 仅有 Lahmam-Bennani 等^[6] 在非常特殊的实验条件下, 对 5.6 keV 电子轰击 He 原子的双电离全微分截面在某一空间立体角内进行了测量。为克服传统电子谱仪在进行 ($e, 3e$) 实验中的困难, Moshhammer 等^[7] 发展了能够对多个出射粒子进行全空间探测的实验装置——反应显微成像谱仪, 它对电子探测立体角能够到达 70% 以上并且具有较高的符合测量效率。Dorn 等^[8-10] 利用此技术对入射电子能量在 500 eV—3 keV 之间 He 原子的双电离微分截面进行一系列测量, 得到绝对微分截面。这些实验结果极大地促进了理论研究的发展。但受到这套实验装置条件的制约, 这些实验研究都集中在中高能区, 而对近阈值的双电离实验很少进行, 尤其是全微分截面的测量。在电子轰击原子的电离实验中, 为实

* 收稿日期: 2007-03-12; 修改日期: 2007-04-05

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10674140, 10434100)

作者简介: 曹士娉(1979-), 女(汉族), 河北廊坊人, 博士研究生, 从事电子与原子碰撞电离方面的研究;

E-mail: caoshiping@impcas.ac.cn

现对近阈值下 He 原子的双电离全微分截面在全空间范围内的测量, 根据实验要求对反应显微成像谱仪进行了改造, 使之适用于电子轰击气体原子(分子)的近阈值双电离实验的要求。

在改进后的新反应显微成像谱仪上, 我们初步进行了 106 eV 电子轰击 He 原子的近阈值双电离实验研究, 获得了五重微分截面等实验数据。在第 2 节中介绍适用于近阈值 He 原子双电离的反应显微成像谱仪结构及特性, 第 3 节对实验测得的动量谱进行分析, 第 4 节分析实验测量到的五重微分截面结果并与理论进行比较。在没有特别声明的情况下, 全文使用原子单位(a. u.)。

2 实验装置及特性

在利用反应显微成像谱仪进行低能电子轰击原子的电离实验中, 为避免电场与磁场对入射电子轨迹产生的影响, 我们使电场、磁场方向平行于入射电子束的方向, 构成纵向反应显微成像谱仪; 同时为避免入射电子束直接打在探测器上造成损伤, 采用了中心带孔的位置灵敏电子探测器。图 1 给出了用于研究低能电子引起原子电离反应的纵向反应显微成像谱仪结构图。反应显微成像谱仪由以下几部分构成: (1)超短脉冲电子源; (2)超音速冷气体靶; (3)多击响应中心带孔位置灵敏电子探测器; (4)反冲离子位置灵敏探测器; (5)飞行时间谱仪; (6)均匀磁场 B 。在此装置中, 我们定义电子束入射方向为 z 轴, y 轴与气体靶喷射方向相反, 垂直靶束与电子束的方向为 x 轴。此装置中的飞行时间谱仪总长为 660 mm, 由长度比为 1:2 的引出电场与漂移管共同构成, 具有一维时间聚焦特性, 即在相互作用区域沿 z 方向不同位置上出射的具有相同动量的电子到达探测器的飞行时间相同。电子源产生的脉冲电子束在谱仪中心与超音速 He 气体靶碰撞发生电离。超音速气体靶^[11]沿 $-y$ 方向动量为 5 a. u., x 和 z 方向上的动量分量约为 0 a. u.。反应后的出射电子在引出电场与磁场的作用下做螺旋线轨迹运动打到电子探测器上。入射电子束穿过电子探测器的中心孔被后方的法拉第筒收集。反冲离子则在引出电场的作用下被对面的反冲离子探测器收集。通过记录反冲离子和电子的飞行时间及其落在探测器上的二维位置, 可计算出反应产物的初始动量(矢量)。此实验中我们使用事件记录模式记录反应后

出射粒子的时间位置信息, 从而能够对反应事件进行离线关联分析。对于 He 原子的双电离实验, 通过探测反应后 4 个出射产物或 3 个产物的动量, 可获得反应的全微分截面。

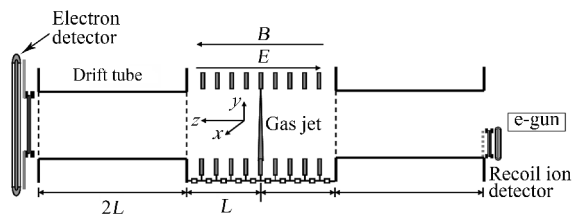


图 1 纵向反应显微成像谱仪结构示意图

在近阈值条件下, He 原子双电离后产生的两个出射电子与散射电子共同携带 27 eV 的剩余能量, 实验上无法区分出射电子与散射电子。它们同时或在极短的时间间隔内到达电子探测器, 这要求电子探测器具有多击响应功能。在此实验中, 我们使用多击响应三层阳极丝位置灵敏探测器探测每次反应中的多个电子, 多击响应 TDC 记录时间位置信号。关于多击响应三层阳极丝位置灵敏探测器的工作原理及其特性已在文献[12]中进行了详细的介绍, 这里不再赘述。

3 反应后反冲离子动量及全部产物间动量关联分析

电子轰击引起的 He 原子的双电离反应的末态由 3 个不可区分的电子和一个反冲离子构成, 它们遵守动量、能量守恒关系:

$$p_z^{\text{ion}} + p_z^a + p_z^b + p_z^c = 2.78, \quad (1)$$

$$p_x^{\text{ion}} + p_x^a + p_x^b + p_x^c = 0, \quad (2)$$

$$p_y^{\text{ion}} + p_y^a + p_y^b + p_y^c = 0, \quad (3)$$

$$E^{\text{ion}} + E^a + E^b + E^c + 79 \text{ eV} = 106 \text{ eV}, \quad (4)$$

其中, 上标 a, b 和 c 分别代表先后到达探测器的电子, ion 表示反冲离子 He^{2+} , 79 eV 是 He 的双电离能。由于反冲离子的质量远远大于电子的质量, 可知双电离反应后 3 个出射电子携带近乎全部的能量, 反冲离子携带大部分动量。由于靶气体沿 $-y$ 方向具有 5 a. u. 的动量, 因此反应后的反冲离子能够运动到达位于入射电子束下方的反冲离子探测器

上。实验中，第 1 个到达电子探测器的电子信号是系统中全部出射粒子飞行时间(TOF)的开门信号，第 1 个达到电子的飞行时间相对于电子束脉冲信号做单独测量。图 2 给出了反冲离子的飞行时间谱，其中最高的峰是 He 原子的单电离事件，位于 TOF 谱中 2 000 道，He 的双电离峰位于 TOF 谱的 300 道处。由于单电离事件计数率远大于双电离事件计数率，我们在测量过程中对单电离事件的计数率进行了衰减。He⁺ 和 He²⁺ 峰都位于较宽的本底上，这一本底是由偶然符合事件及噪声产生的。图 3 给出了反应后反冲离子落在探测器上的二维位置分布。在图 3(a)中，单电离所产生的 He⁺ 位于探测器下

单电离事件、偶然符合事件和噪声在双电离事件分析中的影响，我们在反冲离子的飞行时间谱上进行条件选择。选择 He²⁺ 反冲离子条件后得到了双电离事件中反冲离子在探测器上的二维位置分布谱，如图 3(b)所示。由图可见，反冲离子的二维位置分布呈椭圆形，这是由于 He 原子沿 y 方向具有较大的动量分散，导致所测谱沿 y 方向的分布较宽。同时可以看到所测谱形相对于 y 轴方向有一微小角度转动，且分布中心偏离 y 轴，这是由于磁场使反冲离子运动轨迹发生旋转而造成的。这些转动和位置偏离都可以通过软件进行校正。

经过对反冲离子在二维位置谱中的角度偏移及 y 方向狭长分布的修正后，计算得到了反冲离子的动量矢量。下面对 He 双电离中反冲离子 He²⁺ 的动量及反应后全部出射粒子间动量关系进行分析。在扣除反冲离子沿 y 方向的初始靶动量 5 a. u. 后，得到反冲离子沿 x, y 和 z 方向的动量分布，如图 4 所示。反冲离子沿 z 方向动量分布的峰值位于 2.4 a. u.，沿 x 和 y 方向动量分布的峰均位于 0 a. u. 处，且沿各个方向上都有较宽的分布。结合 3 个出射电子沿 x, y 和 z 方向上的动量分量分布得到了反应后全部出射产物的动量关联信息，3 个出射电子动量的具体计算见文献[13]。图 5 给出了反应后 3 个出射电子与反冲离子沿 x, y 和 z 方向上的动量分布关联图。图 5(a)给出了反应后全部出射产物沿 z 方向的动量之和。由图可见峰值位于 278 道，即所得动量和等于系统沿 z 方向的初始动量 2.78 a. u.。此峰宽度很窄，其半高全宽 $FWHM=0.1$ a. u.，为实验沿 z 方向所达到的动量分辨。图 5(b)给出了 3 个电子沿 x 方向的动量之和与反冲离子沿 x 方向的动量分布二维谱。由图中可见所测数据点分布在沿 135°方向且通过坐标原点的一条形区域内，并在远离坐标原点的区域消失。可以看出，所有出射产物沿 x 方向动量之和分布在 0 a. u.，即实验所得谱分布满足动量守恒关系 $p_x^{\text{ion}} = -(p_x^a + p_x^b + p_x^c)$ ，同时由二维分布谱可得实验系统沿 x 方向的动量分辨为 0.4 a. u.。图 5(c)给出了 3 个电子沿 y 方向的动量之和与反冲离子沿 y 方向的动量分布二维谱，与图 5(b)相同所测数据点分布在沿 135°方向且通过坐标原点的一条形区域内，并在远离坐标原点的区域消失。同样地所有出射产物沿 y 方向动量之和分布在 0 a. u.，谱分布满足动量守恒关系 $p_y^{\text{ion}} = -(p_y^a + p_y^b + p_y^c)$

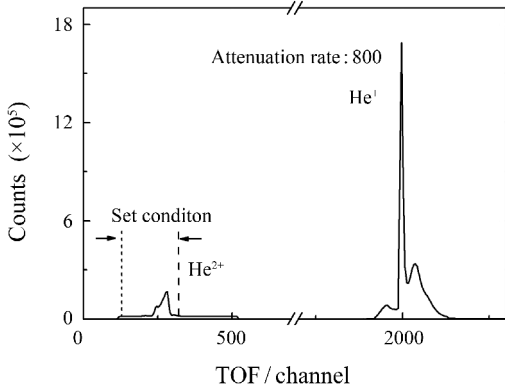


图 2 反冲离子飞行时间谱(每道对应 2.6 ns)

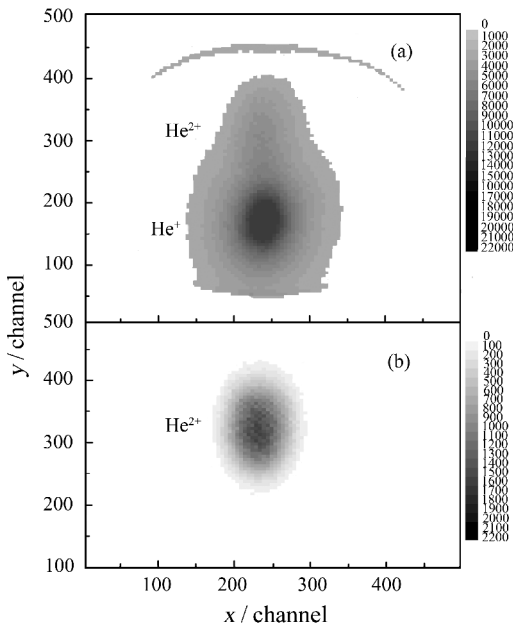


图 3 反冲离子在探测器上的二维位置

(a) He⁺ 和 He²⁺ 离子的位置谱；(b) 设置条件后 He²⁺ 离子的位置谱。

方，双电离所产生的 He²⁺ 位于探测器上方。为剔除

$+p_y^b + p_y^c$), 同时由二维分布谱可得系统沿 y 方向的动量分辨为 0.5 a. u., 系统沿 y 方向的动量分辨大于 x 方向的动量分辨, 这是由靶原子沿靶束方向上相对较宽的动量分布造成的。以上实验数据是在对 He 原子的双电离中所有 4 个产物进行完全测量所获得的结果。通过对出射产物间动量关联二维谱

的分析, 实验测量结果都很好满足能量和动量守恒关系。这说明实验设备和数据获取系统, 特别是多击响应系统都工作正常, 因此, 利用该系统原则上只需要测量 3 个反应产物即可得到完整的动力学信息。

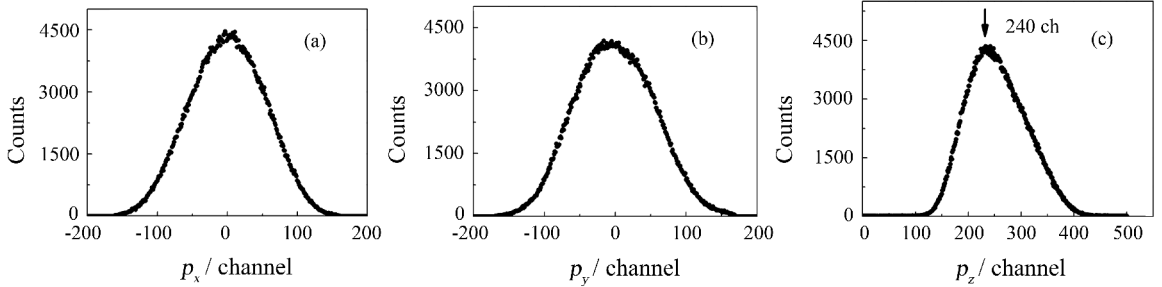


图 4 反冲离子 He^{2+} 沿 x, y 和 z 方向的动量分量分布(每道的动量为 0.01 a. u.)
(a), (b) 和 (c) 依次对应 x, y 和 z 3 个方向。

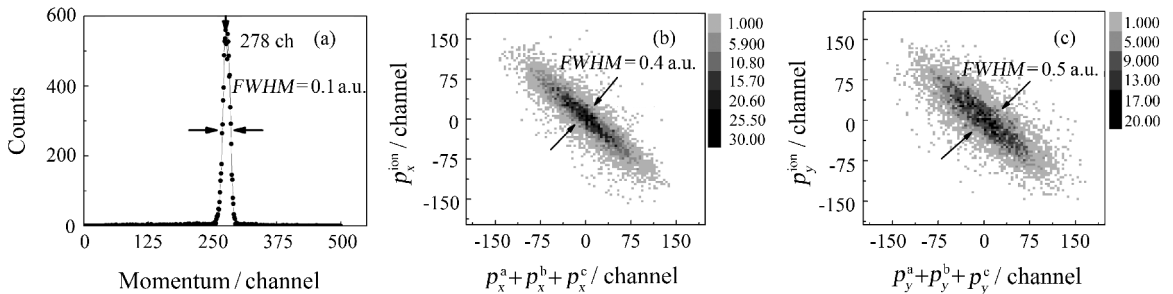


图 5 反应后全部出射产物沿 x, y 和 z 方向的动量分布(每道的动量为 0.01 a. u.)

(a) 全部出射产物沿 z 方向的动量之和, (b) 3 个出射电子沿 x 方向的动量之和与反冲离子沿 x 方向上的动量二维分布图, (c) 3 个出射电子沿 y 方向的动量之和与反冲离子沿 y 方向的动量二维分布图。

4 实验结果及理论比较

为了分析出射电子间的关联信息, 我们定义第 1 个到达探测器的电子与入射束流所形成的平面为参考平面, 在此平面内束流入射方向仍然定义为 z 轴, 与入射电子束垂直的方向为 T 轴, 其正向与第 1 个电子沿 T 轴分量的方向相同。在参考平面内, 当固定两个出射电子的动量矢量时, 考察第 3 个电子的角分布情况, 即双电离五重微分截面 $d^5\sigma / (dE_a dE_b d\theta_a d\theta_b d\theta_c)$, 其中 θ 为出射电子与 z 轴的夹角, 结果参见图 6。这 3 个电子能量均选择为 (9 ± 3) eV 且全部处于参考平面内, 其中一个电子与 z 轴夹角为 $45^\circ \pm 10^\circ$, 另一个电子与 z 轴夹角为 $225^\circ \pm 10^\circ$, 即这两个电子以相同的能量在参考平面内反向出射时, 能量相同的第 3 个电子处于此参考平

面内的角分布情况。由图 6 可见, 第 3 个出射电子分布在 $90^\circ-180^\circ$ 和 $250^\circ-350^\circ$ 的两个区域内, 显然, 其中在第 4 象限分布的峰值位于 310° , 在第 2 象限分布的峰值位于 135° 。由图 6 的结果和通过对其它数据的分析, 仍然可以得出以下结论: 3 个能量相同的电子在同一参考平面内出射时, 当其中两个电子以反方向出射时, 第 3 个电子主要在沿这两个电子连线的垂直方向上出射。

现在来研究一个电子垂直于参考平面出射时, 另外两个电子在平面内的角度关联分布。3 个出射电子的能量都固定在 (9 ± 3) eV 时, 图 7(a) 给出了一个电子在平面内与 z 轴夹角为 $45^\circ \pm 10^\circ$ 时, 另外一个电子的角分布。从图 7(a) 可以看出, 在参考平面内第 3 个出射电子主要分布在 $130^\circ-360^\circ$ 的区

内,并在 180° 附近出现极大值,在 210° — 300° 之间有一个平台。

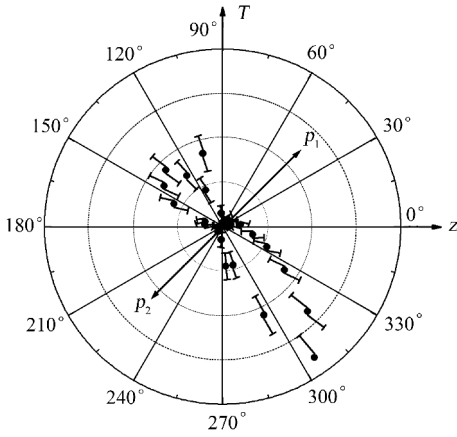


图 6 反应后在参考平面内 3 个出射电子中两个的动量固定后第 3 个电子的角分布

电子轰击 He 原子引起双电离反应后,处于连续态的 3 个电子及核间存在 6 对库仑相互作用,任意两个粒子间的库仑作用都会受到其它带电粒子的影响(电荷屏蔽效应),量子力学对末态有自由电子的处理非常繁杂。因此目前仅仅发展了几种能够描述末态有 3 个自由电子的模型。我们使用两种理论模型的计算结果与实验进行比较,其中 6C(6 body Coulomb wave)模型^[14]忽略了这种影响,平等地处理了 6 对库仑作用。而 DS6C(Dynamic Screen 6 body Coulomb wave)模型^[15]考虑了电荷屏蔽效应,在处理两个粒子的相互作用时,使用有效电荷计算末态中的两体库仑相互作用,代替粒子的带电量对两体库仑相互作用进行计算。图 7(b)给出了使用这两种理论模型分别对相同实验条件下的微分截面进行计算的结果。我们目前只讨论与比较了实验五重微分截面相对分布与理论计算的结果。从图 7(b)的比较可以看到,6C 模型计算的出射电子分布于 160° — 240° 之间,在 160° 附近有一个较小平台,在 210° 附近具有一个很宽的峰,此结果与实验测量的结果相差很大。DS6C 模型计算的电子角分布中出现两个分别位于 210° 和 320° 的峰,且位于 320° 的峰较高,计算结果的角分布趋势与实验中所测量到的角分布较接近,但两峰值的比例与实验测量偏差很大。从理论及实验结果的比较可以看到,DS6C 模型能较好地描述电子轰击 He 原子的近阈值双电离

过程,但是实验和理论之间还存在一定的偏离,一方面需要改进实验装置进一步进行实验研究,以提高五重微分截面测量结果的统计性,另一方面,理论有待进一步改进,使之能够更好地对实验现象进行解释。

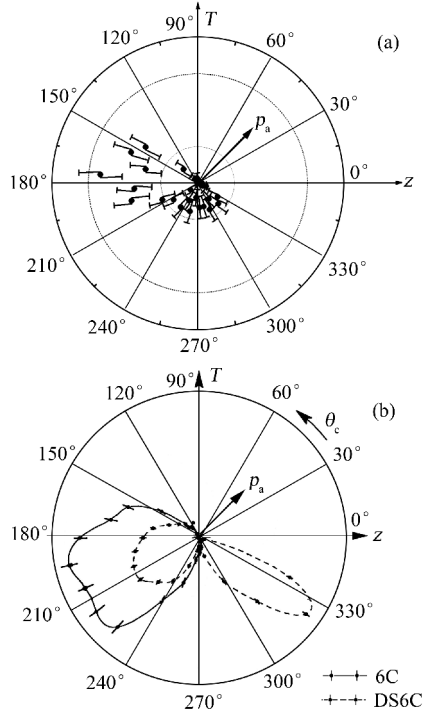


图 7 反应后一个电子垂直参考平面出射和另一个电子在参考平面内出射角为 45° 以及第 3 个电子在参考平面内的角分布

5 结论

我们使用纵向反应显微成像谱仪,进行了 106 eV 电子轰击 He 原子的双电离实验研究。本文介绍了电子轰击 He 原子的近阈值电离的实验装置及其特点,对反冲离子及出射产物间动量关联进行了分析,得到了五重微分截面的分布。分析了在入射电子束与出射电子构成的平面内,当 3 个出射电子均分系统剩余能量时,出射电子间的出射角关联关系,并得到以下结论:当两个电子反向出射时,第 3 个电子垂直于这两个电子动量方向出射的几率最大。在 1 个电子垂直于平面出射时,通过理论计算结果与平面内出射角分布的比较,发现 DS6C 理论能够较好地描述实验结果。

参考文献 (References):

- [1] Rescigno T N, Baertschy M, Isaacs W A, *et al.* Science, 1999, **286**: 2 474.
- [2] Ehrhardt H, Schulz M, Tekaas T, *et al.* Phys Rev Lett, 1969, **22**: 89.
- [3] Chen Xiangjun, Xu Chunkai, Jia Changchun, *et al.* J Phys, 2001, **B34**: 4 845.
- [4] Ding Haibing, Pang Wennin, Liu Yibao, *et al.* J At Mol Phys, 2004, **21**: 201(in Chinese).
(丁海兵, 庞文宁, 刘义保等. 原子分子物理学报, 2004, **21**: 201.)
- [5] Zhu Linfan, Ren Hengfeng, Liu Xiaojing, *et al.* J Chem Phys, 2005, **122**: 224 303.
- [6] Lahmam-Bennani A, Taouil I, Duguet A, *et al.* Phys Rev, 1999, **A59**: 3 548.
- [7] Moshhammer R, Unverzagt M, Schmitt W, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1996, **B108**: 425.
- [8] Dorn A, Moshhammer R, Schröter C D, *et al.* Phys Rev Lett, 1999, **82**: 2 496.
- [9] Dorn A, Kheifets A, Schröter C D, *et al.* Phys Rev, 2002, **A65**: 032 709.
- [10] Dorn A, Kheifets A, Schröter C D, *et al.* Phys Rev, 2003, **A68**: 012 715.
- [11] Zhang Shaofeng, Ma Xinwen, Liu Huiping, *et al.* Science in China Series, 2006, **G36**(5): 456(in Chinese).
(张少锋, 马新文, 刘惠萍等. 中国科学, 2006, **G36**(5): 456).
- [12] Cao Shiping, Ma Xinwen, Dorn A, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2007, **31**(3): 278(in Chinese).
(曹士娉, 马新文, Dorn A 等. 高能物理与核物理, 2007, **31**(3): 278.)
- [13] Cao Shiping, Ma Xinwen, Dorn A, *et al.* Acta Physica Sinica, 2007, have submitted.
- [14] Berakdar J. Phys Lett, 1996, **A220**: 237; *ibid* 2000, **277**: 35; Phys Rev, 1997, **A55**: 1 994.
- [15] Berakdar J, Briggs J S. J Phys, 1994, **B27**: 4 271.

Analysis of Recoil Ion Momentum in near Threshold Double Ionization of Helium by Electron Impact^{*}

CAO Shi-ping^{1, 2, 1)}, MA Xin-wen¹, A. Dorn³, M. Dürr³

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

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*;

3 *Max-Planck-Institute for Nuclear Physics, Saupfercheckweg 1, Heidelberg 69117, Germany*)

Abstract: An experiment on near threshold double ionization of helium impacted with 106 eV electron has been performed by using the newest developed reaction microscope. In this experiment the momenta of all products after double ionization of helium were measured and the five fold differential cross section was obtained for emitted electrons. The angular correlation between the emitted electrons, which equally shared the excess energy, was analyzed in the plane defined by the projectile and the first detected electron. The experimental result was compared with different theoretical calculations. It was found that DS6C model described the experimental reasonably.

Key words: near threshold double ionization; reaction microscope; electron impact ionization

* Received date: 12 Mar. 2007; Revised date: 15 Apr. 2007

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10674140, 10434100)

1) E-mail: caoshiping@impcas.ac.cn