

文章编号: 1007-4627(2014) 04-0538-05

## 300 和 600 keV $O^{7+}$ 离子与宏观玻璃管的相互作用

武晔虹<sup>1, 2</sup>, 陈婧<sup>1</sup>, 薛迎利<sup>1</sup>, 刘俊亮<sup>1</sup>, 张明武<sup>1</sup>, 王伟<sup>1, 2, 3</sup>, 杜凡<sup>1</sup>,  
阮芳芳<sup>1</sup>, 邵曹杰<sup>1, 2, 3</sup>, 卢荣春<sup>1</sup>, 于得洋<sup>1</sup>, 蔡晓红<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

**摘要:** 实验研究了 300 和 600 keV 的  $O^{7+}$  离子与宏观玻璃管内壁的相互作用, 利用位置灵敏法拉第筒测量了传输离子的偏转角和传输效率随倾斜角的变化关系, 观察到偏转角不等于倾斜角的不完全导向现象。实验结果证实, 高能入射离子在玻璃管内壁产生的沉积电势相对于入射离子动能横向分量较小, 难以使传输离子沿着玻璃管的轴向出射, 从而发生不完全导向现象; 并且, 入射离子的能量越高, 导向效应越不明显。

**关键词:** 不完全导向; 宏观玻璃管; 传输效率; 偏转角

**中图分类号:** O562.5      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.04.538

### 1 引言

自 2002 年 Stolterfoht 等<sup>[1]</sup>首次报道了导向效应, 高电荷态离子与微孔膜以及宏观玻璃管的相互作用越来越多地被人们所关注。在低能高电荷态离子 (~keV) 分别轰击微孔膜<sup>[1-5]</sup>和宏观玻璃管<sup>[5-7]</sup>的实验中, 观察到出射离子的电荷态和能量保持不变, 以及离子沿着管轴出射的导向效应。导向效应主要由管内壁的自组织充放电引起的, 即入射离子在管内表面形成沉积电荷, 阻止后续离子与管壁发生近距离碰撞, 并引导离子沿着管子的轴向出射。最近, Zhang 等<sup>[4]</sup>利用极弱流强的 7 keV  $Ne^{7+}$  离子轰击矩形和菱形不同管口形状的微孔膜, 观察到出射离子束斑形状分别对应为菱形和矩形的新奇现象。这种被称为塑形的现象主要是因为传输离子在微孔膜中受到了极弱流强离子的镜像电荷作用, 而非自组织充放电效应。此外, 能量为 MeV 量级的高电荷态离子入射锥形玻璃管时, 入射离子与管壁发生多次小角度散射, 引起出射离子电荷态的改变和能量的损失, 并且出现

出射束流密度大于入射束流密度的聚焦现象<sup>[8-10]</sup>。

同时, 在入射离子能量介于几个 keV 和 MeV 的导向实验研究中, Chen 等<sup>[11]</sup>利用 90 keV  $O^{6+}$  离子轰击锥形宏观玻璃管, 观察到出射离子保持了原有的电荷态和能量, 以及离子没有沿着玻璃管轴向出射的现象。为了深入研究此能量区域的离子与玻璃管的相互作用, 我们采用 300 和 600 keV 的  $O^{7+}$  离子轰击宏观玻璃管(管长 31 mm, 管内径 0.6 mm), 测量了传输离子的偏转角和传输效率随倾斜角的变化关系。实验发现, 随着玻璃管倾斜角的增大, 管中沉积电荷产生的电势相比于入射离子的横向能量仍然比较小, 出现了偏转角小于倾斜角的不完全导向现象。

### 2 实验装置

本实验是在中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子综合研究高压平台 4 号终端完成的。实验中所用的  $O^{7+}$  离子由 ECR 离子源提供, 经过逐次加速后, 能量达到 300 和 600 keV, 最终进入

收稿日期: 2014-01-25;      修改日期: 2014-03-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB832901); 国家自然科学基金资助项目(U1332206, 11179017); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(11205224)

作者简介: 武晔虹(1985-), 女, 山西文水人, 博士研究生, 从事原子分子物理学研究; E-mail: wuyehong@impcas.ac.cn

通信作者: 蔡晓红, E-mail: caixh@impcas.ac.cn。

实验终端的真空靶室。实验期间靶室真空度维持在 10<sup>-6</sup> Pa 左右。真空靶室内的实验布局如图 1 所示。实验束流首先穿过束流密度计<sup>[12]</sup>与宏观玻璃管相互作用, 然后再经过偏转板, 最终被 64 道位置灵敏法拉第筒(Distribution Sensitive Faraday Cup)探测器<sup>[11, 13]</sup>所接收。

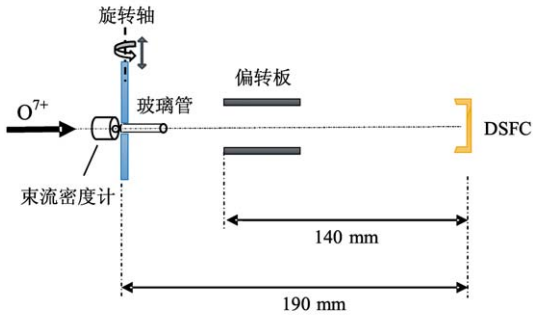


图 1 (在线彩图) 实验布局图

实验中所用的宏观玻璃管是高硼硅酸盐玻璃(管长 31 mm, 管内径 0.6 mm, 外径 1.3 mm)。玻璃管由接地的金属套管固定在一个二维可控的金属靶架上。金属套管可以防止玻璃管口的电荷累积。靶架由步进电机带动, 可在与束流的垂直方向上下移动以及在水平面左右旋转。玻璃管前面安装的束流密度计<sup>[12]</sup>的最大孔径为 2.4 mm, 最小孔径为 0.55 mm。在实验中束流密度计被用于束流准直、入射流强的实时测量和作为通孔使用。300 和 600 keV 的 O<sup>7+</sup> 离子的入射流强分别为 1.1 nA/mm<sup>2</sup> 和 1.6 nA/mm<sup>2</sup>。为了分析 300 和 600 keV 的 O<sup>7+</sup> 离子穿过玻璃管后出射离子电荷态和能量的变化, 在距探测器约 140 mm 处安放

有静电偏转板(偏转板入口与探测器的水平距离)。为了保证在探测器上可以观察到偏转板加偏压后任意倾斜角下出射离子的位置谱, 对两种能量的入射离子我们分别选取了在偏转板上加 2 和 3 kV 的偏压。64 道位置灵敏法拉第筒探测器被安放在距离玻璃管入口约为 190 mm 处, 其分辨率为 0.3 mm/channel, 接收角为 5.8°。实验中探测器的内壳加有 -200 V 的抑制电压, 用以抑制离子在探测器接收极上的二次电子发射, 保证束流测量的准确性。

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 位置谱

实验中玻璃管轴向和束流方向的夹角, 即倾斜角  $\phi$ , 由玻璃管随着靶架在水平面上转动的角度确定。玻璃管从一端没有传输离子出射的位置以步长 0.2° 开始转动, 直到转动至没有传输离子出射的位置停止。由于此种测量方式无法直接给出倾斜角  $\phi = 0^\circ$  的位置, 因此实验中通过两种方法确定玻璃管  $\phi = 0^\circ$  的位置。一种是入射离子在  $\phi = 0^\circ$  时传输效率最大; 另一种是入射离子穿过通孔和未倾斜的玻璃管在探测器 DSFC 上的位置相同。结合以上两种方法可以有效地确定玻璃管  $\phi = 0^\circ$  的位置。图 2 给出了入射离子穿过  $\Phi 0.55$  mm 通孔和玻璃管后在位置灵敏法拉第筒上的部分位置谱。其中, 图 2(a~c) 是 300 keV O<sup>7+</sup> 离子的位置谱, 图 2(d~f) 是 600 keV O<sup>7+</sup> 离子的位置谱。位置谱中主峰两旁的下冲信号是探测器受到离子轰击产生的二次电子, 其给出了出射离子位置谱的边界。如图 2 所示, 离子穿过  $\Phi 0.55$  mm 通

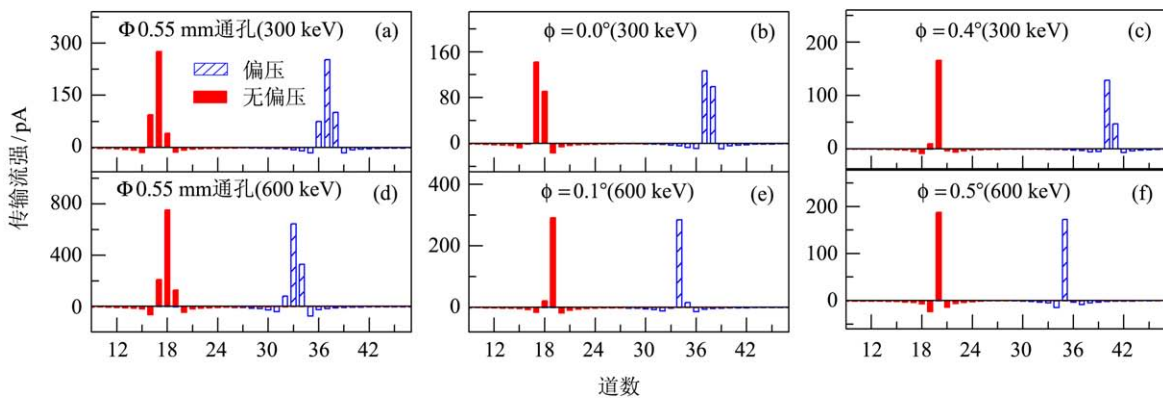


图 2 (在线彩图) 300 和 600 keV O<sup>7+</sup> 离子在偏转板有无偏压下分别穿过通孔和玻璃管的部分位置谱 其中(a, d)是 300 和 600 keV O<sup>7+</sup> 离子穿过  $\Phi 0.55$  mm 通孔的位置谱; (b, c) 是 300 keV O<sup>7+</sup> 离子穿过倾斜角分别为 0.0 和 0.4° 玻璃管的位置谱; 而 (e, f) 是 600 keV O<sup>7+</sup> 离子分别穿过被倾斜 0.1° 和 0.5° 玻璃管的位置谱。

孔的束流宽度在探测器上约占 3 道，因此，可知 300 和 600 keV  $O^{7+}$  离子的束流发散度均好于  $0.05^\circ$ 。对于 300 keV  $O^{7+}$  离子穿过通孔和玻璃管的两种情况，出射离子位置谱的中心位置与偏转板不加偏压相比均移动了约 20 道；而 600 keV  $O^{7+}$  离子在偏转板无偏压和加 3 kV 的偏压下，出射离子位置谱的中心位置则均移动了约 15 道。可知，300 和 600 keV  $O^{7+}$  离子在穿过玻璃管后电荷态和能量没有发生变化。实验中采用了强流离子束，束流在玻璃管内壁的充电过程几乎是瞬时完成的。因此，我们可以认为测量结果是在管壁沉积电荷达到平衡状态下得到的。

### 3.2 传输效率

图 3(a) 和 (b) 分别给出了 300 和 600 keV  $O^{7+}$  离子在偏转板有无偏压下，穿过玻璃管的传输效率随倾斜角的变化关系，其误差主要来源于探测器电子学的不稳定<sup>[14]</sup>。传输效率通过  $f = I_{out} / I_{in}$  来计算，其中  $I_{in}$  是束流密度计测量的入射流强， $I_{out}$  是探测器收集到的电流总和。实验中离子的传输效率在偏转板有无偏压时基本一致，证实了位置灵敏法拉第筒探测器的有效性。图 3 中虚线是对出射离子传输效率的高斯拟合结果。由拟合结果得到 300 和 600 keV  $O^{7+}$  离子传输效率的半高全宽分别为 1.33 和 1.19。显然 300

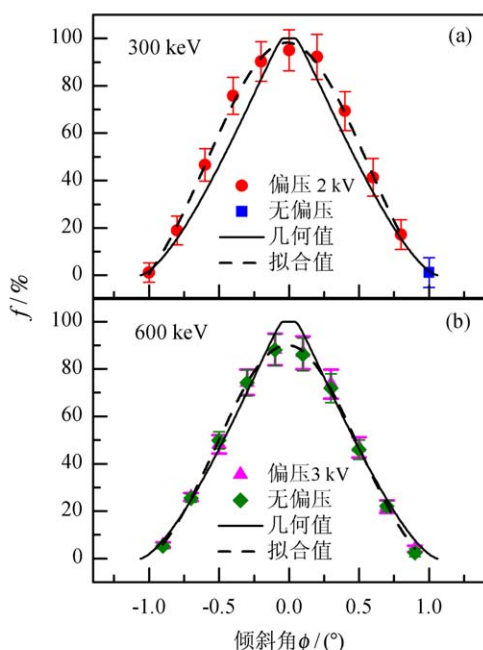


图 3 (在线彩图) 300 和 600 keV  $O^{7+}$  离子穿过玻璃管的传输效率随倾斜角的变化关系  
虚线是传输效率的高斯拟合值，实线为几何模型计算值。

keV 的传输效率的谱宽大于 600 keV 的传输效率谱宽。图 3 中实线是几何模型计算值。几何模型是假设离子穿过与玻璃管相同尺寸的金属管。由于在金属管中离子不会形成沉积电荷，因此入射离子在管中不会受到沉积电荷作用而直接出射。实验发现，300 keV  $O^{7+}$  离子的传输效率高于几何计算值，说明传输离子在玻璃管中受到了管壁沉积电荷的作用而出射。相反，600 keV  $O^{7+}$  离子的传输效率几乎等于几何计算值。因此，通过高斯拟合以及与几何计算值相比较，可以推断高能离子相对于低能离子，在玻璃管中受到沉积电荷的偏转作用较弱，传输效率谱变窄，并接近几何模型计算值。

### 3.3 偏转角

图 4 是 300 和 600 keV  $O^{7+}$  离子在偏转板有无偏压下，传输离子的偏转角与玻璃管的倾斜角之间的变化关系。其中，虚线表示完全导向，即偏转角等于倾斜角；点划线是假设离子穿过相同尺寸金属管的几何模型计算值。偏转角定义为  $\theta = \arctan(\Delta s / S)$ ，其中  $\Delta s$  是传输离子相对于玻璃管  $\phi = 0^\circ$  时在探测器上位置谱的移动距离， $S$  是玻璃管入口和探测器 DSFC 之间的距离。正如 Chen 等<sup>[11]</sup>在 90 keV  $O^{6+}$  入射锥形管时观察到的一样，300 和 600 keV  $O^{7+}$  离子穿过玻璃管后并没有沿着玻璃管的轴向出射，也非直接出射，两者的偏转角均稍微高于几何计算值。因此，实验离子在玻璃管中的确受到了沉积电荷产生

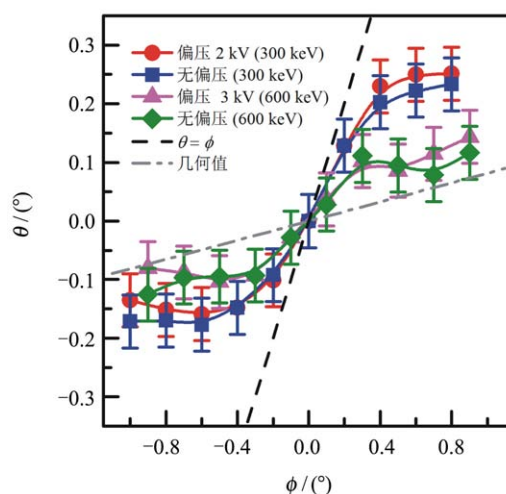


图 4 (在线彩图) 在偏转板有无偏压下，300 和 600 keV  $O^{7+}$  离子穿过玻璃管时，偏转角随倾斜角的变化关系  
虚线代表偏转角等于倾斜角；点划线是几何模型计算值。

的电场势的偏转,但因管中形成的电场势不够强,所以难以偏转离子使其沿着玻璃管的轴向出射;以及鉴于实验中倾斜角度在几何开角( $\pm 1.11^\circ$ )范围内,可以认为离子在玻璃管中只被偏转一次。在相同的倾斜角下,300 keV  $O^{7+}$ 离子穿过玻璃管的偏转角大于600 keV  $O^{7+}$ 离子的偏转角,说明玻璃管中的电场势对于低能离子的偏转作用相对比较明显,表现为入射离子能量越低,导向能力越强。

当玻璃管的倾斜角比较小时,300和600 keV  $O^{7+}$ 离子穿过玻璃管后,离子趋向于沿着玻璃管的轴向出射;而当倾斜角较大时,离子出射方向明显远离轴向且趋于平缓,如图4所示。入射离子首先在管内壁碰撞形成沉积电荷,之后沉积电荷会阻止后续离子与管壁的近距离碰撞,使离子保持原有的电荷态和能量。当倾斜角小于 $0.3^\circ$ 时,随着倾斜角的增大,沉积电荷片也会变大。由于小角度下,离子的横向能量不是很大,此时玻璃管中的沉积电荷量接近满足完全导向的条件,因此实验中观察到在小角度时,离子近似沿着玻璃管轴向出射。随着倾斜角的继续增大,玻璃管壁上的沉积电荷也持续增多直至饱和。当管中的沉积电荷量达到饱和时,离子的偏转角 $\theta$ 会保持不变,与倾斜角无关。在本实验中恒定偏转角 $\theta_c \approx qLU_c/2E_pD$ ,其中 $q$ ,  $E_p$ 为入射离子的电荷态和能量; $L$ ,  $D$ 为宏观玻璃管的管长和管径; $U_c$ 为饱和电势差。恒定偏转角是倾斜角较大时偏转角的平均值。图4中偏转角关于倾斜角 $0^\circ$ 的不对称性,主要是由 $\phi = 0^\circ$ 的不确定度引起的。在实验中300和600 keV离子的恒定偏转角分别约为 $0.20^\circ$ 和 $0.10^\circ$ ,可知管中的饱和电势差 $U_c$ 约为5.8 V。进一步发现,恒定偏转角和入射离子的能量成反比例关系,显然600 keV  $O^{7+}$ 离子的恒定偏转角小于300 keV  $O^{7+}$ 离子的恒定偏转角,从而证实了宏观玻璃管对能量高的入射离子的导向作用不明显。

## 4 结论

实验分别采用能量为300和600 keV的 $O^{7+}$ 离子轰击长度为31 mm,管内径为0.6 mm的宏观玻璃管,观察到了不完全导向效应的存在。实验发现不完全导向是因为玻璃管中沉积电势相对于入射离子横向能量不够强,使出射离子无法沿着玻璃管的轴向出射。此外,当玻璃管的倾斜角比较大时,管中的沉积电荷量

将达到饱和,相应的电势差趋于饱和,使得传输离子的偏转角在大倾角下保持为一常数。通过观察和分析偏转角和传输效率随倾斜角的变化关系,证实了入射离子能量越高,离子在管中越不容易被偏转,导向越不明显。

**致谢** 感谢320 kV高电荷态离子综合实验平台运行组成员的辛勤工作。

## 参考文献:

- [1] STOLTERFOHT N, BREME J H, HOFFMANN V, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **88**: 133201.
- [2] SAHANA M B, SKOG P, VIKOR G, *et al.* Phys Rev A, 2006, **73**: 040901.
- [3] SKOG P, SOROKA I L, JOHANSSON A, SCHUCH R, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2007, **258**: 145.
- [4] ZHANG H Q, AKRAM N, SKOG P, *et al.* Phys Rev Lett, 2012, **108**: 193202.
- [5] LEMELL C, BURGDREFFER J, AUMAYR F, *et al.* Sur Sci, 2013, **88**:237.
- [6] BERECZKY R J, KOWARIK G, AUMAYR F, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2009, **267**: 317.
- [7] IKEDA T, KANAI Y, KOJIMA T M, *et al.* App Phys Lett, 2006, **89**: 163502.
- [8] NEBIKI T, YAMAMOTO T, NARUSAWA T, *et al.* Sci. & Technol. A, 2003, **21**: 1671.
- [9] SEKIBA D, YONEMURA H, NEBIKI T, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2008, **266**: 4027.
- [10] GONG Z, YAN S, MA H, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2012, **272**: 370.
- [11] CHEN J, XUE Y L, LIU J L, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2012, **281**: 26.
- [12] LIU J L, YU D Y, RUAN F F, *et al.* Rev Sci Instr, 2013, **84**: 036107.
- [13] WANG Wei, YU Deyang, SHE Qianshun, *et al.* Nucl Phys Rev, 2010, **27**(2): 174. (in Chinese)  
(王伟, 于得洋, 余乾顺,等. 原子核物理评论, 2010, **27**(2): 174.)
- [14] SHE Qianshun. Design and implement of measurement system for weak current [D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences 2009: 55. (in Chinese)  
(余乾顺. 微弱电流检测系统的设计与实现[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2009: 55.)

## Interaction of the 300 and 600 keV $O^{7+}$ Ions with the Glass Macrocapillary

WU Yehong<sup>1, 2</sup>, CHEN Jing<sup>1</sup>, XUE Yingli<sup>1</sup>, LIU Junliang<sup>1</sup>, ZHANG Mingwu<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1, 2, 3</sup>, DU Fan<sup>1</sup>,  
RUAN Fangfang<sup>1</sup>, SHAO Caojie<sup>1, 2, 3</sup>, LU Rongchun<sup>1</sup>, YU deyang<sup>1</sup>, CAI Xiaohong<sup>1</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

**Abstract:** Transmissions of 300 and 600 keV  $O^{7+}$  ions through a single glass macrocapillary were investigated. The transmitted fraction and the deflection angle for various tilt angles were measured using the Distribution Sensitive Faraday Cup. The results show the incomplete guiding that the deflection angle is not equal to the tilt angle. The incomplete guiding results from that the potential established by the deposited charge is not strong enough in contrast to the high transverse velocity of the ions and it leads to the ions deviating from the capillary axis exiting out. The higher incident energy, the weaker guiding effect.

**Key words:** incomplete guiding; glass macrocapillary; transmitted fraction; deflection angle

---

**Received date:** 25 Jan. 2014; **Revised date:** 27 Mar. 2014

**Foundation item:** National Basic Research Program of China(973 Program)(2010CB832901); Joint Funds of National Natural Science Foundation of China(U1332206, 11179017); Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China(11205224)

**Corresponding author:** CAI Xiaohong, E-mail: caixh@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>