

# 空心原子的 K-x 射线谱\*

赵永涛<sup>1)†</sup> 肖国青<sup>1)</sup> 张小安<sup>1)‡</sup> 杨治虎<sup>1)</sup> 陈熙萌<sup>3)</sup> 李福利<sup>2)</sup>  
张艳萍<sup>1)</sup> 张红强<sup>3)</sup> 崔莹<sup>3)</sup> 绍剑雄<sup>3)</sup> 徐徐<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院近代物理研究所,兰州 730000)

<sup>2)</sup>西安交通大学应用物理系,西安 710049)

<sup>3)</sup>兰州大学物理学院,兰州 730000)

(2004 年 3 月 9 日收到,2004 年 3 月 27 日收到修改稿)

报道了利用兰州重离子加速器国家实验室 ECR 离子源首次引出的全裸 Ar 离子和类氢、类氦、类锂 Ar 离子与 Be 固体表面相互作用形成的空心原子 x 射线实验测量结果. 结果发现,同样条件下,由于 K 壳层电子的剥离,Ar 的 K-x 射线单离子发射产额增加了 5 个量级,约为  $3.6 \times 10^{-3}$  每原子,而当 L 壳层存在电子时,Ar 的 K-x 射线几乎观测不到.

关键词:高电荷态离子,空心原子,x 射线,单离子产额

PACC:3400,3450D

## 1. 引言

“高电荷态离子”可以产生很强的库仑势场,例如  $U^{91+}$  1s 态的库仑场强比氢原子 1s 态的库仑场强度高 6 个量级,为  $2 \times 10^{16}$  V/cm. 这是目前任何外场无法达到的. 另外,它携带着非常高的势能,该势能在数值上等于该离子电离能的总和. 例如,Ar<sup>18+</sup> 离子所携带的势能就是将 Ar 原子核外 18 个电子全部电离所需要的总能量,大约为 14keV. 研究表明,离子携带的总势能随电荷态增加是接近指数增长的. 因此,高电荷态离子物理成为极端条件下物理学研究的重要方法之一. 另一方面,在低速高电荷态离子与金属固体表面相互作用的过程中,表面电子会共振转移到入射离子的外壳层空轨道上形成空心原子. 空心原子衰变到基态的寿命很长,通常在 s—ms 量级,因此在离子进入下表面时,处于外壳层的电子多数会被自电离,与此同时,表面原子内壳层电子开始向入射离子共振转移,形成“二次空心原子”. 研究空心原子的衰变过程已经成为目前国际上广受关注的热点课题<sup>[1-3]</sup>.

高电荷态离子与表面相互作用过程中入射离子总势能中大约有 5% 的能量通过发射 x 射线释放,因此,研究高电荷态离子与表面相互作用中发射的 x 射线是研究空心原子形成和衰变过程的一个重要手段. Donets, Briand 等人先后测量了 Ar<sup>17+</sup> 离子和金属固体表面作用的 x 射线,研究了作用过程中电子的填充和衰变机理,并由此肯定了“空心原子”的形成和存在<sup>[4,5]</sup>.

随着实验技术的不断提高,离子源能够提供的重离子的种类数量和剥离度都有了较大幅度的提高<sup>[6]</sup>,真空探测技术也有了长足的发展. 根据现有的实验条件,我们在兰州重离子加速器国家实验室电子回旋共振离子源(ECRIS)原子物理实验平台上,进行了用高电荷态<sup>40</sup>Ar<sup>q+</sup> ( $15 \leq q \leq 18$ ) 离子作用于 Be 固体表面所产生的 x 射线的实验测量工作,并对入射离子电荷态(势能)与 x 射线产额的关系作了较为深入的分析.

## 2. 实验装置和测量方法

图 1 是实验平台的示意图. 高电荷态离子

\* 国家自然科学基金(批准号:10274088,19804012,10274058)国家自然科学基金重点项目(批准号:10134010)和科技部重大基础研究前期研究专项(批准号:2002CCA00900)资助的课题.

† E-mail: zyt326@impcas.ac.cn; 电话:0931-4969327.

$^{40}\text{Ar}^{q+}$  由兰州重离子加速器电子回旋共振离子源 (electron cyclotron resonance ion source in Lanzhou, ECRISL) 提供, 束流在不同的引出电压下引出, 利用  $90^\circ$  偏转分析磁铁将确定电荷态的离子引入原子物理实验平台, 然后经过四极透镜和光阑的聚焦准直, 离子进入内部具有电磁屏蔽功能的超高真空 (约  $10^{-5}\text{mPa}$ ) 靶室, 与样品表面相互作用。

在本实验中, 作用束流的束斑直径可控制在  $5\text{mm}$  范围内, 束流强度为  $\text{enA}$  量级, 离子以  $45^\circ$  方向斜入射于经过表面净化处理的化学纯度为  $99.9\%$  的 Be 固体表面, 其表面积为  $19\text{mm} \times 24\text{mm}$ , 厚度为  $0.1\text{mm}$ 。

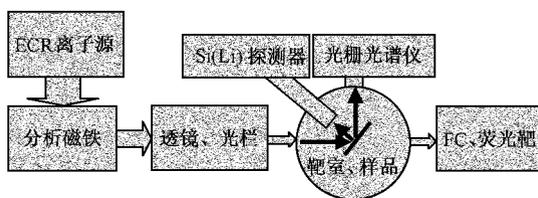


图 1 兰州重离子国家实验室 (ECR 源) 原子物理平台示意图

入射离子与固体表面相互作用所产生的  $x$  射线谱利用  $\text{Si}(\text{Li})$  探测器进行观测. 实验前利用  $^{241}\text{Am}$  和  $^{55}\text{Fe}$  放射源对探测器进行了刻度, 其能量探测范围为  $1\text{--}60\text{keV}$ , 当  $x$  射线能量为  $5.89\text{keV}$  时, 能量分辨为  $0.16\text{keV}$ , 相对探测效率为  $93\%$ . 本实验中, 探测器与入射束流方向成  $45^\circ$  角, 与靶表面垂直; 紧贴探测口的是厚度为  $0.05\text{mm}$  的 Be 窗. 当  $x$  射线能量为  $3\text{keV}$  时, 该 Be 窗的透射率约为  $83\%$ . 探测口口径为  $10\text{mm}$ , 距离靶点  $80\text{mm}$ , 探测时间选为  $5400\text{s}$  和  $4000\text{s}$  不等。

### 3. 实验结果与讨论

图 2 至图 5 是用入射动能约为  $275\text{keV}$  的  $^{40}\text{Ar}^{q+}$  ( $15 \leq q \leq 18$ ) 离子作用于 Be 固体表面所测得的  $x$  射线谱. 各图还分别给出了入射离子的种类, 初始动能 ( $T_0$ ), 束流强度  $I_{\text{beam}}$  (用靶电流强度表示) 以及探测时间 ( $\Delta t$ ) 等参数。

图 2 同时给出了  $\text{Ar}^{15+}$  与 Be 表面相互作用的  $x$  射线谱和没有相互作用时探测器的本底谱. 可以看出  $\text{Ar}^{15+}$  和 Be 表面相互作用, Ar 的 K- $x$  射线没有被激发, 在本实验有效探测范围里, 所测得到的只是本底谱. 然而从图 3 的结果看,  $\text{Ar}^{16+}$  与 Be 作用时, 有一条能量值为  $3.02\text{keV}$  的  $x$  射线. 根据玻尔经验公

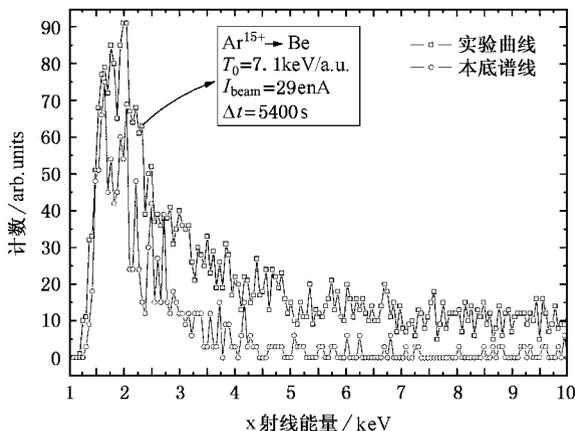


图 2  $\text{Ar}^{15+}$  的  $x$  射线谱与探测器的本底谱

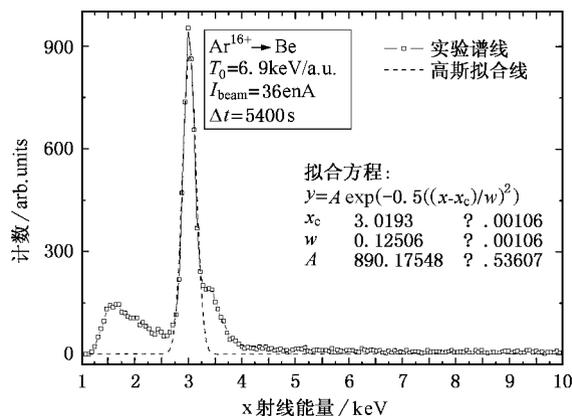


图 3  $\text{Ar}^{17+}$  与 Be 表面相互作用的  $x$  射线谱

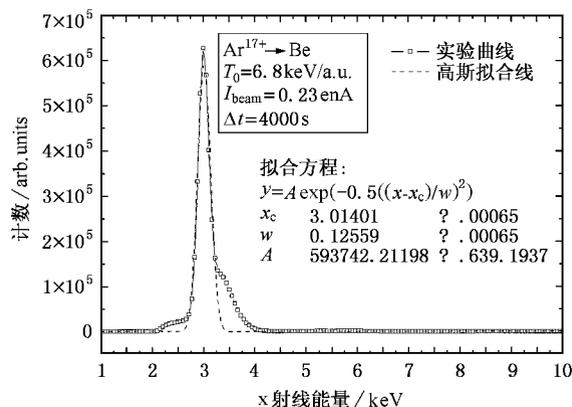


图 4  $\text{Ar}^{17+}$  与 Be 表面相互作用的  $x$  射线谱

式<sup>[7]</sup>

$$E_{K\alpha} = \frac{3}{4} \times 13.6 (Z-1)^2 \text{eV} \quad (1)$$

可以求出 Ar 的  $K\alpha$  线能量约为  $2.95\text{keV}$ , 因此实验

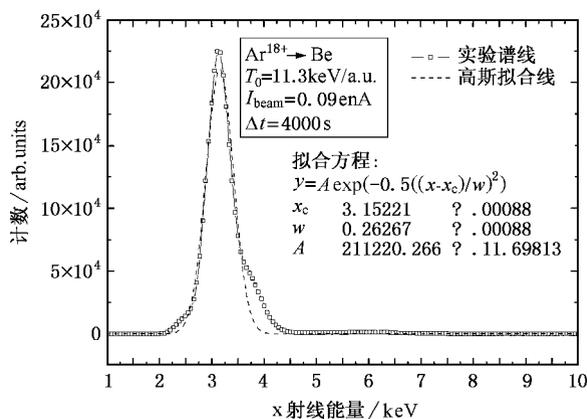


图5  $\text{Ar}^{18+}$  与 Be 表面相互作用的 x 射线谱

所测到的该条 x 射线就是 Ar 的  $K\alpha$  线。

根据本次实验条件和测量条件,并假定 x 射线发射是各向同性的,可以给出  $\text{Ar}^{q+}$  作用于 Be 表面的单离子 x 射线产额

$$Y = 2.6 \times 10^{-6} \times \frac{q \times w \times A}{I_{\text{beam}} \times \Delta t}, \quad (2)$$

其中,  $q$  是入射离子的电荷态,  $w$  (单位: keV) 和  $A$  分别是高斯拟合给出的半高宽度和峰计数,  $I_{\text{beam}}$  是用靶电流强度表示的束流强度(单位是 nA),  $\Delta t$  是测量时间。

图 2 至图 5 同时给出了 x 射线谱的高斯拟合曲线(虚线),拟合方程和参数在图中右侧方框内。根据(2)式可以求出图示中给定的实验条件下,  $\text{Ar}^{16+}$ ,  $\text{Ar}^{17+}$  和  $\text{Ar}^{18+}$  离子作用于 Be 表面后 Ar 的  $K\alpha$  线单离子产额分别为  $2.4 \times 10^{-8}$ ,  $3.6 \times 10^{-3}$  和  $7.2 \times 10^{-3}$ 。

图 3 和图 4 实验结果对比表明:低速高电荷态 Ar 离子与表面原子碰撞, L 壳层为空时 K 壳层电子被电离或激发从而产生一个空穴的概率非常小,根据本次实验结果推断,其概率约在  $10^{-5}$  量级;而当炮弹离子 L 壳层存在一个电子时,其 K 壳层电子几乎不会被电离或激发而产生空穴。在碰撞过程中,炮弹离子的内壳层电子能否被电离或激发,与其初始动能,弹靶组合等参数有关,其物理机理在后续文章中会有报道。

实验中我们发现,当  $\text{Ar}^{17+}$  离子的流强稍大,约为 2—3 enA 时,探测器会因为计数率过高而发生阻塞。对比显示,在入射动能近似相同的条件下,  $\text{Ar}^{17+}$  离子与 Be 表面作用后 Ar 的  $K\alpha$  线单离子产额比  $\text{Ar}^{16+}$  的高出 5 个量级,约为  $10^{-3}$ 。而相关研究表明,类氢离子 K 壳层俄歇(Auger)电子的单离子发射产

额约为  $10^{-3}$ — $10^{-2}$  量级<sup>[8]</sup>。这说明相对 Auger 电子发射过程,光辐射退激过程也是高电荷态离子在作用表面过程中释放其势能的一个重要途径。事实上,光辐射的速率随入射离子核电荷数的 4 次方增加而 Auger 过程却不强烈依赖入射离子核电荷数。对于电荷态大于 9 高电荷态重离子来说,其光辐射过程是不可忽略的<sup>[9]</sup>。

在现有条件下,  $\text{Ar}^{18+}$  离子只能在较高电压下引出,而且它是掺杂  $\text{O}^{7+}$  的混合束,原因是二者的荷质比十分接近以致分析磁铁不能区分。实验发现,随着分析磁铁电流的增加,束流强度虽然在减小,但是 Ar 的  $K\alpha$  线计数率却在上升,这是因为  $\text{Ar}^{18+}$  离子所占的比例和绝对强度在增加(这一点符合  $\text{Ar}^{18+}$   $\text{O}^{7+}$  荷质比稍大的物理要求)。当流强减小为 0.09 enA 时,计数率达到最大,我们近似认为此时束流是纯的  $\text{Ar}^{18+}$  离子,可以求出 450 keV 的  $\text{Ar}^{18+}$  离子与 Be 表面作用后 Ar 的  $K\alpha$  线单离子产额约为  $7.2 \times 10^{-3}$ ,正好是  $\text{Ar}^{17+}$  离子作用后  $K\alpha$  线单离子产额的 2 倍,而  $\text{Ar}^{18+}$  离子的 K 壳层空穴数正好是  $\text{Ar}^{17+}$  离子 K 壳层空穴数的 2 倍。这说明,空穴数与光辐射强度紧密关联,同时也进一步说明了低速高电荷态离子 K 壳层电子自电离概率非常小这一物理事实——x 射线荧光强度能够较好地反映入射离子的空穴数(电荷态)和入射剂量。

对比图 3 至图 5,我们发现,不同电荷态的离子与表面作用所发射的 x 射线谱的峰位置和半高宽度不同,这是不同电荷态的离子形成不同的空心原子所导致的结果。例如,  $\text{Ar}^{18+}$  与 Be 表面作用后形成的空心原子在  $1s$  态上有两个空位,没有  $1s$  电子的屏蔽作用,根据(1)式, x 射线的能量约为 3.3 keV,由于分辨关系,本探测器不能区分,从而导致了半高宽度的极大提高。因此,根据 x 射线的能量、半高宽度和荧光强度甄别离子种类并判断其束流强度是可行的。

此外,在图 3 至图 5 中,各主峰右边还有一个较高的“肩膀”,根据其能量可以判断它们是 Ar 的  $K\beta$  和  $K\gamma$  线。当高电荷态离子作用表面时, M 和 N 壳层会在“瞬间”填满,而相比之下, L 壳层的 Auger 中和过程要慢得多,因此空心原子衰变过程中常常伴有较强的  $K\beta$  和  $K\gamma$  射线的发射。这也正是空心原子 x 射线谱不同于一般激发 x 射线谱的一个重要特征。比主峰能量稍低的左边也有一个“肩膀”,这是 Be 样品中少量 Mg, Al 等杂质原子和探测器自身本

底造成的. 有关高电荷态离子激发 Al 等固体表面原子 x 射线的情况, 我们会在后续文章中报道.

## 4. 结 论

我们观测和分析了兰州重离子加速器国家实验室 ECR 离子源提供的高电荷态 Ar 离子与 Be 表面相互作用的空心原子 x 射线谱. 实验研究表明, 相对 K 壳层 Auger 电子发射, K-x 射线发射也是低速高

电荷态离子释放其势能的一个重要过程; 另一方面, 低速高电荷态离子与表面原子碰撞时, 光辐射强度与入射离子空穴数紧密关联, 根据 x 射线的能量、半高宽度和荧光强度可以简单地判定离子种类以及离子束的流强.

本实验是在兰州重离子加速器国家实验室 ECR 离子源全体工作人员的大力协助下完成的, 特此向他们表示衷心感谢.

- [ 1 ] Gillaspay J D 2001 *J. Phys. B* **34** R93  
 [ 2 ] Zhang X A *et al* 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1372  
 [ 3 ] Schenkel T *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 4325  
 [ 4 ] Beyer H F and Shevelko V P 1999 *Atomic Physics with Heavy Ions* ( Berlin Springer )  
 [ 5 ] Briand J P *et al* 2000 *Review of Scientific Instruments* **71** 627  
 [ 6 ] Zhang Z M *et al* 2003 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **27**

914

- [ 7 ] Yang F J 2000 *Atomic Physics* ( Beijing : Higher Education Press ) ( in Chinese ) [ 杨福家 2000 原子物理学 第三版( 北京 : 高等教育出版社 ) ]  
 [ 8 ] Niemann D 1999 *Physica Scripta T* **80** 61  
 [ 9 ] Zhao Y T *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2768 ( in Chinese ) [ 赵永涛等 2003 物理学报 **52** 2768 ]

## The x-ray spectra of hollow atoms \*

Zhao Yong-Tao<sup>1)</sup> Xiao Guo-Qing<sup>1)</sup> Zhang Xiao-An<sup>1 2)</sup> Yang Zhi-Hu<sup>1)</sup> Chen Xi-Meng<sup>3)</sup> Li Fu-Li<sup>2)</sup>  
 Zhang Yan-Ping<sup>1)</sup> Zhang Hong-Qiang<sup>3)</sup> Cui Ying<sup>3)</sup> Shao Jian-Xiong<sup>3)</sup> Xu Xu<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

<sup>2)</sup>*Department of Applied Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*

<sup>3)</sup>*School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

( Received 9 March 2004 ; revised manuscript received 27 March 2004 )

### Abstract

The x-ray spectra of hollow atoms in the interaction of highly charged argon ions with beryllium solid surface are reported. The interaction ions, provided by the electron cyclotron resonance ( ECR ) ion source in the National Laboratory of the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou ( HIRFL ), include bare argon ions, which are produced by the ion source for the first time, and hydrogen-like, helium-like and lithium-like argon ions. We found that the K-shell x-ray yield of single particles in the interaction of hydrogen-like argon ions is  $3.6 \times 10^{-3}$ , which is 5 orders more than that of helium-like argon ions, and the K-shell x-ray cannot be measured in the interaction of lithium-like argon ions with beryllium surface.

**Keywords** : highly charged ions ( HCI ), hollow atoms ( HA ), x-rays, the yield of single particle

**PACC** : 3400, 3450D

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10274088, 19804012, 10274058 ), the State Key Program of National Natural Science of China ( Grant No. 10134010 ), and the Special Program for Key Basic Research Projects of the Ministry of Science and Technology ( Grant No. 2002CCA00900 ).