

文章编号: 1007-4627(2013)01-0063-04

## $^{152}\text{Eu}^{20+}$ 与Au作用产生M-X射线的动能阈值

梁昌慧<sup>1,2</sup>, 张小安<sup>1,3</sup>, 李耀宗<sup>1,2</sup>

(1. 咸阳师范学院与中国科学院近代物理研究所联合共建离子束与光物理实验室, 陕西 咸阳 712000;

2. 咸阳师范学院物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000;

3. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 测量了动能为2.0 MeV的高电荷态离子 $^{152}\text{Eu}^{20+}$ 入射Au表面产生的Au的 $M_{\zeta}$ ,  $M_{\alpha}$ 和 $M_{\delta}$ 特征X射线和Eu的 $M_{\alpha}$ -X射线。对X射线产生的微观机制进行了初步分析, 并通过半经典两体碰撞近似, 估算了 $\text{Eu}^{20+}$ 与Au作用产生的Au的M-X射线和Eu的M-X射线的动能阈值。此结果对高电荷态离子与固体表面相互作用的动力学过程的研究以及在辐射能量转换效率研究中如何选取合适的弹靶组合具有重要的参考价值。

**关键词:** 高电荷态离子; X射线; 动能阈值

**中图分类号:** 0562.3   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.01.063

### 1 引言

高电荷态离子与固体表面作用的研究是近年来在国际上广受关注的热点研究领域<sup>[1-2]</sup>。高电荷态离子与固体表面相互作用的红外光谱辐射和X射线发射是研究空心原子形成和衰变过程的一个重要手段。目前, 应用较多的是经典过垒模型(Classical Overbarrier Model, 简称COBM)<sup>[3]</sup>。根据该模型, 速度小于Bohr速度( $2.19 \times 10^6$  m/s)的高电荷态离子入射金属表面过程中, 所携带较大势能的离子在瞬间(飞秒量级)与靶原子相互作用, 靶原子和入射离子被激发或离化, 其复合或退激过程辐射光谱线<sup>[4]</sup>。

当入射离子的动能达到MeV量级时, 离子速度接近或超过Bohr速度, 该条件下离子动能对相互作用过程的影响显著增强, 碰撞可导致离子及靶原子深层电子受激形成空穴, 产生离子和靶原子的特征X射线。通过测量相互作用过程发射的X射线, 可以直接得到高电荷态离子与靶原子核库仑势竞争电子形成空穴的微观动力学信息, 尤其在良好的探测分辨下, 根据测量到的靶原子及离子的特征X射线谱, 可以较直观地反映出高电荷态离子在中性化过程中的结构变

化, 较准确地判断出入射离子及靶原子内壳层电子电离的程度<sup>[5]</sup>。而产生特征X射线的动能阈值对于重离子束与物质相互作用中如何提高离子束与空腔表面作用产生的X射线辐射转换效率以及在实验设计和研究中, 离子的品种(核电核数、电荷态、速度)和靶材料的选取有着重要的参考价值<sup>[6-7]</sup>。

本文报道在兰州重离子加速器国家实验室320 kV高电荷态离子综合研究平台上, 用动能为2.0 MeV的 $^{152}\text{Eu}^{20+}$ 离子轰击Au表面, 激发的Au的 $M_{\zeta}$ ,  $M_{\alpha}$ 和 $M_{\delta}$ 和Eu的 $M_{\alpha}$ 特征X射线谱, 估算了 $\text{Eu}^{20+}$ 离子激发Au原子产生的Au的M-X射线和Eu的M-X射线的动能阈值。

### 2 实验装置和测量方法

图1给出了实验装置示意图。实验中的高电荷态离子 $^{152}\text{Eu}^{20+}$ 由兰州重离子加速器HIRFL的14.5 GHz电子回旋共振离子源(the electron cyclotron resonance ion source, 简称ECRIS)提供, 束流在不同的电压下引出, 利用90°偏转分析磁铁将确定电荷态的离子引入320 kV高电荷态离子综合研究平台, 然后经过四极

收稿日期: 2013-01-21   修改日期: 2013-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11075135); 陕西省自然科学基金基础研究项目(2010JM1012); 陕西省教育厅科研计划项目(2010JK895); 咸阳师范学院专项科研基金(09XSJK106)

作者简介: 梁昌慧(1973-), 女, 陕西武功人, 副教授, 硕士, 从事离子束与光物理研究; Email: liangchanghui73@163.com

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

透镜和光阑的聚焦准直, 进入内部具有电磁屏蔽功能的超高真空球形(约 $10^{-10}$  mPa)靶室, 与样品表面相互作用。实验中选择 Au 靶厚度为 0.1 mm, 面积约为  $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ , 通过调节光阑, 束流的束斑直径控制在 7 mm 范围内, 垂直轰击在靶表面中心。入射离子与 Au 表面相互作用所产生的 X 射线谱利用 AMPTEK 公司研制的 XR-100SDD 型 Si 漂移探测器(探测面积  $25\text{ mm}^2$ , Si 晶体厚度  $500\text{ }\mu\text{m}$ , 探测器 Be 窗厚度  $12.5\text{ }\mu\text{m}$ , 在峰化时间为  $9.6\text{ }\mu\text{s}$ , 增益为 100 的情况下, 可以探测的能量范围是  $0\sim 14.55\text{ keV}$ ) 进行探测。探头对准靶表面的中心位置, 并与入射束流方向成  $45^\circ$  夹角, 探测口的几何立体角为  $0.0066\text{ sr}$ 。实验前利用标准放射源  $^{241}\text{Am}$  和  $^{55}\text{Fe}$  对探测器进行了刻度, 在  $5.9\text{ keV}$  峰处分辨率可达  $136\text{ eV}$ 。入射离子由离子计数器计数, 1 个计数对应  $10^{-9}\text{ A}\cdot\text{s}$ 。

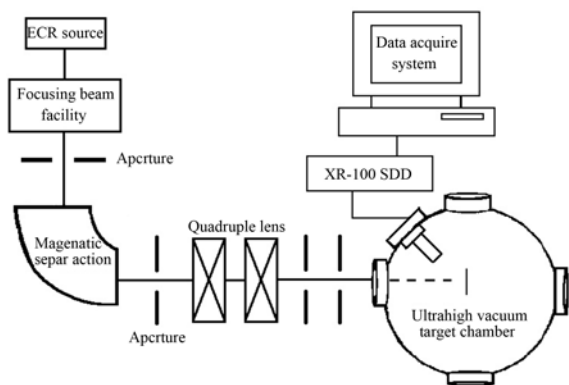


图 1 兰州重离子加速器国家实验室 320 kV 高电荷态离子综合研究平台

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 $\text{Eu}^{20+}$ 激发 Au 辐射的特征 X 射线谱

图 2 给出了动能为  $2.0\text{ MeV}$  的  $^{152}\text{Eu}^{20+}$  与 Au 表面相互作用产生的 X 射线谱。经 GaussAmp 拟合(拟合函数为:  $y = y_0 + Ae^{-(x-x_c)^2/2w^2}$ ;  $A$  为曲线的峰计数, 顶点的坐标为  $(x_c, y_0 + A)$ ;  $w$  为曲线宽度)后的 4 个峰位分别为  $1.22, 1.67, 2.23$  和  $2.82\text{ keV}$  左右, 通过和美国劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory) X 射线与现代光源中心(Center for X-ray optics and advanced light source)<sup>[8]</sup> 提供的数据对比分析后得到, 其中峰位为  $1.22\text{ keV}$  的为 Eu 的  $M_\alpha$  特征 X 射线, 是  $N_{\text{III}} \rightarrow M_{\text{III}}$  的跃迁, 其余 3 个峰位  $1.66, 2.23$  和  $2.85\text{ keV}$  依次为 Au 的  $M_\zeta, M_\alpha$  和  $M_\delta$  特征 X

射线, 分别是  $N_{\text{III}} \rightarrow M_{\text{V}}, N_{\text{VIII}} \rightarrow M_{\text{V}}, N_{\text{IV}} \rightarrow M_{\text{II}}$  的跃迁。

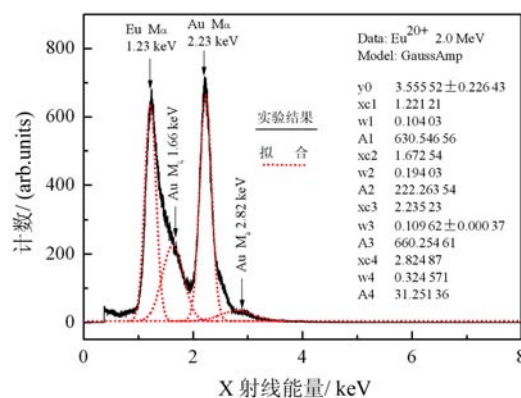


图 2 动能为  $2.0\text{ MeV}$  的  $^{152}\text{Eu}^{20+}$  与 Au 表面相互作用产生的 X 射线谱

根据 COBM, 当低速离子运动到临界距离  $R_c^{[3]}$  时, 开始俘获金属导带电子, 导带电子共振转移至入射离子的高  $n$  壳层, 形成空心原子(hollow atom), 同时在靶表面很小的区域(nm 量级)释放势能, 使靶原子激发和离化, 发射光子和电子, 入射离子的动能与靶原子的离化和激发没有强的关联, 靶原子的激发能量来自大部分炮弹的势能<sup>[4]</sup>。

在本次实验中, 入射离子的动能为  $2\text{ MeV}$ 、速度  $v = 1.59 \times 10^6\text{ m/s}$  (与 Bohr 速度同一量级), 当垂直入射时, 离子上表面过程经历的时间约为  $1.13 \times 10^{-15}\text{ s}$ , 远小于高 Rydberg 态原子的退激时间<sup>[9]</sup>。因此, 入射离子上表面过程俘获的高  $n$  电子没有足够的时间退激, 而入射离子下表面过程的势能沉积是由其高  $n$  电子退激实现的, 所以实验探测到的 X 射线是入射离子大量动能在下表面过程沉积的结果。

#### 3.2 $\text{Eu}^{20+}$ 入射 Au 辐射 Au 的 $M$ -X 射线的动能阈值的估算

根据半经典两体碰撞近似, 可以估计  $\text{Eu}^{20+}$  离子与 Au 作用激发 Au 的  $M$ -X 射线的动能阈值。

要产生靶的 X 射线, 靶的内壳层必须有空穴, 而靶原子内壳层形成空穴的必要条件是炮弹离子可以充分地接近靶原子, 根据能量和动量守恒, 两核碰撞时逼近的最小距离  $d_{\text{min}}$  可以由以下两式确定:

$$\frac{1}{2}m_1v_0^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2Z_{1\text{eff}}Z_{2\text{eff}}}{d_{\text{min}}} + \frac{1}{2}(m_1+m_2)v^2, \quad (1)$$

$$m_1v_0 = (m_1+m_2)v, \quad (2)$$

其中,  $Z_{1\text{eff}}$  和  $Z_{2\text{eff}}$  分别是考虑核外电子屏蔽后炮弹和靶原子距离最近时的有效核电荷数,  $m_1$  和  $m_2$  分别是炮弹和靶原子的质量,  $v_0$  是炮弹离子的初速度(在式(1)中由于炮弹的动能远大于势能, 为了简化, 忽略了炮弹的势能),  $v$  是炮弹离子和靶原子在  $d_{\text{min}}$  处的共同速度,  $e$  和  $\epsilon_0$  分别是基本电荷电量和真空介电常数。作为估算, 假设靶原子内壳层电子被激发的条件是: 炮弹离子的库仑势能大于或等于靶原子内壳层电子的束缚能  $E_{2b}$ , 靶原子内壳层电子在  $d_{\text{min}}$  处感受到的有效电荷为  $Z_{1\text{eff}}$  的炮弹离子的库仑势能为

$$E_{p-e} = \frac{e^2 Z_{1\text{eff}}}{4\pi\epsilon_0 d_{\text{min}}} \quad (3)$$

由式(1)、式(2)和式(3)可得高电荷态离子  $\text{Eu}^{20+}$  激发 Au 原子内壳层电子而产生空穴的动能阈值为

$$E_{\text{th}} = \frac{Z_{2\text{eff}}(m_1 + m_2)}{m_2} E_{2b} \quad (4)$$

$\text{Eu}^{20+}$  与 Au 作用激发 Au 的 M-X 射线, 碰撞过程至少应激发出 Au 的  $3d_{5/2}$  态空穴, 该态电子的束缚能  $E_{2b}$  为 2206 eV, 而 Au 原子的电子组态为  $[\text{Xe}]4f^{14}5d^{10}6s^1$ , 要产生 M-X 射线,  $3d$  轨道必须有空穴。在考虑  $3d$  轨道的电子所受到核的作用时, 必须考虑其内壳层电子  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$  对原子核具有屏蔽效应。作为估算, 忽略了  $3d$  之外旁观电子对核的影响, 因此,  $Z_{2\text{eff}}$  可以取  $79 - 18 = 61$ , 由式(4)可求出  $\text{Eu}^{20+}$  激发 Au 原子辐射 Au 的 M-X 射线的动能阈值为 0.238 MeV。而根据 Slater 法则<sup>[10]</sup>,  $Z_{2\text{eff}}$  取  $79 - 21.15 = 57.85$ , 则求出动能阈值为 0.226 MeV。

### 3.3 $\text{Eu}^{20+}$ 入射 Au 辐射 Eu 的 M-X 射线的动能阈值的估算

当  $\text{Eu}^{20+}$  的入射动能较大和离子与靶原子核间的距离接近最小距离时, Au 的 M 壳层电子受到 Eu 核的强库仑作用会发生电离, 同时, Eu 的 M 壳层电子也会受到 Au 核的强库仑作用而电离, 形成空穴, 空穴退激, 发射 Eu 的 M-X 射线。对于 Eu 的 M-X 射线的动能阈值的估算, 仍考虑离子与靶原子发生对心碰撞的情况, 要产生 Eu 的 M 层空穴, 要求离子与靶原子距离最近时, Eu 的 M 壳层电子受到 Au 原子核有效电荷的库仑势能必须大于等于其在 Eu 的束缚能, 类似

式(4)可得碰撞激发 Eu 的 M-X 射线的动能阈值满足

$$E_{\text{th}} = \frac{Z_{1\text{eff}}(m_1 + m_2)}{m_2} E_{1b} \quad (5)$$

由于此时 Eu 离子还未退激, 束缚能  $E_{1b}$  可取 Eu 的  $3p_{3/2}$  态电子的电离能 3822 eV, 而 Eu 原子的电子组态为  $[\text{Xe}]4f^7 6s^2$ , 要产生 M-X 射线,  $3p$  轨道必须有空穴, 可忽略  $3p$  之外旁观电子对核的影响。因此,  $Z_{1\text{eff}}$  可以取  $63 - 12 = 51$ , 由式(5)可求出  $\text{Eu}^{20+}$  激发 Au 原子辐射 Eu 的 M-X 射线的动能阈值为 0.345 MeV。而根据 Slater 法则<sup>[10]</sup>,  $Z_{1\text{eff}}$  取  $63 - 11.25 = 51.75$ , 则求出动能阈值为 0.351 MeV。

## 4 结论

我们观测和分析了动能为 2.0 MeV 的  $\text{Eu}^{20+}$  Au 表面作用产生的 X 射线发射。实验结果表明, 相互作用不仅激发出了 Au 的  $M_{\zeta}$ ,  $M_{\alpha}$  和  $M_{\delta}$  特征 X 射线, 还激发出了 Eu 的  $M_{\alpha}$ -X 射线。通过半经典两体碰撞近似, 估算了  $\text{Eu}^{20+}$  离子通过碰撞激发 Au 原子辐射 Au 的 M-X 射线的动能阈值为 0.226 (0.238) MeV, 辐射 Eu 的 M-X 射线的动能阈值为 0.351 (0.345) MeV。这个结果对高电荷态离子与固体表面相互作用的动力学过程的研究, 以及在辐射能量转换效率研究中如何选取合适的弹靶组合具有重要的参考价值。由于动能阈值是考虑炮弹离子与靶原子正碰时确定的, 而正碰的概率极低, 所以, 理论上当炮弹离子的动能明显大于动能阈值时, 才可能探测到相应的 Au 的 M-X 射线和 Eu 的 M-X 射线。显然, 实验中  $\text{Eu}^{20+}$  的入射动能远大于这两个动能阈值, 再加上高电荷态离子与金属表面相互作用是一个复杂的多体问题, 应用半经典近似理论处理有些不足, 尤其是有效电荷的校正, 所以实际的动能阈值, 还有待于在以后的实验中逐渐减小 Eu 离子的动能, 找出真正产生 M-X 射线的动能阈值, 并依靠更完善的理论分析确定。

**致谢** 作者对兰州重离子加速器国家实验室 320 kV 高电荷态离子综合研究平台全体工作人员的辛勤工作表示衷心感谢。

### 参考文献 (References):

- [1] CHEN Ximeng, JIANG Lijuan, ZHOU Peng, *et al.* Chinese Physics B, 2011, 20 (1): 013402.

- [2] DONG Chenzhong, FU Yanbiao. *Acta Phys Sin*, 2006, **55**(1): 0107 (in Chinese).  
(董晨钟, 符彦飙. *物理学报*, 2006, **55**(1): 0107.)
- [3] BURGDÖRFER J, LERNER P, MEYER F W. *Phys Rev A*, 1991, **44**(9): 5674.
- [4] LIANG Changhui, ZHNG Xiaoan, XIAO Guoqing. *Nuclear Physics Review*, 2007, **24**(3): 214 (in Chinese).  
(梁昌慧, 张小安, 肖国青. *原子核物理评论*, 2007, **24**(3): 214.)
- [5] LI Yaozong, ZHNG Xiaoan, LIANG Changhui, *et al.* *Acta Phys Sin*, 2012, **61**(6): 063201 (in Chinese).  
(李耀宗, 张小安, 梁昌慧, 等. *物理学报*, 2012, **61**(6): 063201.)
- [6] GREGORI G, GLENZER S H, FOURNIER K B, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2008, **101**(4): 045003.
- [7] ZHNG Xiaoan, LI Yaozong, ZHAO Yongtao, *et al.* *Acta Phys Sin*, 2012, **61**(11): 113401 (in Chinese).  
(张小安, 李耀宗, 赵永涛, 等. *物理学报*, 2012, **61**(11): 113401.)
- [8] ALBERT C T, DAVID T A, ERIC M, *et al.* X-RAY DATA BOOKLET, Center for X-ray Optics and Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory [EB/OL].[2012-12-15].  
<http://xdb.lbl.gov/>.
- [9] ZOU Xianrong, SHAO Jianxiong, CHEN Ximeng, *et al.* *Acta Phys Sin*, 2010, **59**(9): 6064 (in Chinese).  
(邹贤容, 邵剑雄, 陈熙萌, 等. *物理学报*, 2010, **59**(9): 6064.)
- [10] HU Qiaosheng, YANG Yanchao. *Journal of Yichun University*, 2002, **24**(6): 15 (in Chinese).  
(胡乔生, 杨衍超. *宜春学院学报*, 2002, **24**(6): 15.)

## Kinetic Energy Threshold of $M$ -X Spectra Emitted by Interaction of $^{152}\text{Eu}^{20+}$ on Au

LIANG Chang-hui<sup>1, 2, 1)</sup>, ZHANG Xiao-an<sup>1, 3</sup>, LI Yao-zong<sup>1, 2</sup>

(1. Ion Beam and Optical Physical Joint Laboratory of Xianyang Normal University and Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Xianyang 712000, Shaanxi, China;

2. College of Physics and Electronic Engineering; Xianyang Normal University, Xianyang 712000, Shaanxi, China;

3. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China )

**Abstract:** It is measured that the characteristic X-ray spectra of  $M_{\zeta}$ ,  $M_{\alpha}$  and  $M_{\delta}$  of Au and the characteristic X-ray spectra of  $M_{\alpha}$  of Eu produced by the interaction of highly charged ions of  $^{152}\text{Eu}^{20+}$  with kinetic energy 2.0 MeV on Au surface. The micro-mechanism of X-ray excitation is preliminary analyzed. The kinetic energy threshold of  $M$ -X ray of Au and  $M$ -X ray of Eu emitted by  $\text{Eu}^{20+}$  with Au is estimated by semiclassical approximation theory of binary collision. The threshold has important referenced value in the study on dynamics of the interaction of highly charged ions with solid surface and on how to choose better target and projectile combination in the conversion efficiency of radiation energy.

**Key words:** highly charged ion; X-ray; kinetic energy threshold

**Received date:** 21 Jan. 2013; **Revised date:** 22 Feb. 2013

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (11075135); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2010JM1012); Education Commission Foundation of Shaanxi Province (2010JK895); Scientific Research Foundation of Xianyang Normal University (09XSYK106)

1) E-mail: liangchanghui73@163.com

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