

# 氧离子轰击引起钽的 $L$ 壳层 X 射线 发射截面的研究\*

徐秋梅<sup>1)2)</sup> 杨治虎<sup>1)†</sup> 杜树斌<sup>3)</sup> 常宏伟<sup>3)</sup> 张艳萍<sup>3)</sup>

1)(中国科学院近代物理研究所,兰州 730000)

2)(中国科学院研究生院,北京 100190)

3)(中国原子能科学研究院,北京 102413)

(2010年5月12日收到;2010年11月15日收到修改稿)

在北京原子能研究院串联加速器上,利用20—45 MeV的 $O^{5+}$ 轰击Ta靶,研究靶的 $L$ 壳层X射线.给出了Ta的 $L$ 壳层各亚壳层 $Ll, L\alpha, L\beta$ 和 $L\gamma$ X射线发射截面的比值,并且与ECPSSR理论计算做了比较.结果表明,在误差范围内比值 $\sigma(Ll)/\sigma(L\alpha)$ 、 $\sigma(L\beta)/\sigma(L\alpha)$ 和 $\sigma(L\gamma)/\sigma(L\alpha)$ 的实验结果与理论计算符合得较好.

**关键词:**  $L$ 壳层X射线,发射截面, ECPSSR理论

**PACS:** 32.30.Rj, 32.50.+d, 34.50.Fa

## 1. 引言

重离子轰击固体靶引起X射线发射截面的研究已经有几十年的历史了,该研究一直是广受关注的热点研究领域之一.精确测量离子引起原子内壳层电离截面有助于研究原子内壳层的性质,同时对于建立合适的理论模型具有重要的意义.这方面的研究不仅对于多电子理论和计算物理学的发展十分重要,而且对于材料科学、等离子体物理以及天文物理也具有重要的研究意义.

早期的研究大部分仅限于轻的带电粒子,比如质子和氦离子等.目前,在重离子与固体靶碰撞的实验中,大部分的实验主要集中在较低能区测量碰撞中诱发X射线来研究原子的内壳层过程,包括单电离、多重电离和激发、电荷转移和相关的效应<sup>[1-4]</sup>.在理论研究方面,描述重离子与固体靶相互作用比轻离子入射要复杂得多,至今还没有一种行之有效的理论模型<sup>[5]</sup>.但是随着实验数据的不断丰富,理论模型得以不断发展,逐渐趋于完善.在非对称碰撞中,直接的库仑电离过程产生内壳层空缺,例如,激发一个束缚态电子到连续态.这一过程可以用一级微扰近似描述,也就是平面波波恩近似

(PWBA)<sup>[6]</sup>或半经典近似(SCA)<sup>[7]</sup>.直接电离也可以用二体碰撞理论(BEA)描述<sup>[8]</sup>.BEA是基于经典来处理碰撞过程的非微扰近似理论.基于PWBA方法,进一步扩展包括了束缚和极化效应、静态微扰论(PSS)近似、以及入射离子在靶核库仑场作用下的偏转效应( $C$ )、碰撞过程中能损效应( $E$ )和靶原子中电子的相对论运动效应( $R$ ),发展成新的ECPSSR理论.ECPSSR进一步修正,包含了联合原子和分离原子的束缚效应,就是ECUSAR理论.在SCA方法中,描述入射粒子直接电离一个束缚电子,用不定态一级微扰论,入射轨道采用经典轨道.在SCA计算中,双曲线入射轨道和相对论电子波函数可以非常的准确,但是束缚效应只能近似的处理独立原子或是联合原子一些特殊的例子.

实验研究表明:ECPSSR理论对于轻离子碰撞引起的内壳层电离截面的描述比较成功,而对于重离子入射, $L$ 支壳层电离截面的实验测量值和理论预测值存在较大的分歧.对 $L$ 支壳层电离截面的系统测量将为进一步的理论研究提供有用数据.Shatendra等人<sup>[9]</sup>利用60 keV的光子轰击固体Ta,测量了其发射截面.Semaniak等人<sup>[10]</sup>利用C和Ni离子轰击Ta靶,得到 $L_1, L_2$ 和 $L_3$ 支壳层的电离截面.本文用20—45 MeV的 $O^{5+}$ 离子入射Ta靶,测

\* 国家自然科学基金(批准号:10774149)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: z. yang@impcas. cn

量靶的  $L$  壳层 X 射线发射截面. 实验结果与 ECPSR 理论作了比较, 并进行了讨论.

## 2. 实验装置和方法

中国原子能研究院 HI-13 串联加速器提供的

20—45 MeV 的 O 离子束, 束流进入靶室与靶相互作用. 图 1 是实验装置示意图. 加速器产生的 O 离子束, 经过准直后入射到厚度为  $165 \text{ mg/cm}^2$  的 Ta 靶上, 束流与靶面成  $45^\circ$  角. 束流与靶相互作用发射的 X 射线穿过靶室的 Be 窗被 Si(Li) 探测器探测, 探测器垂直束流安放.

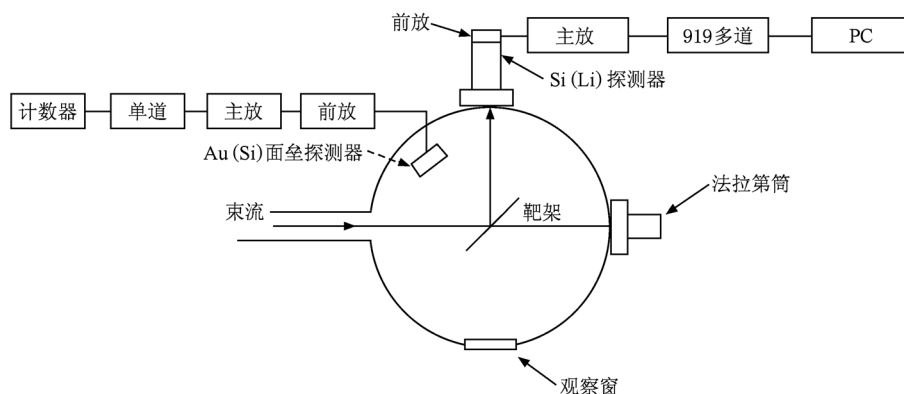


图 1 实验装置图

探测器是 ORTEC 公司生产的, 其在  $5.895 \text{ keV}$  ( $^{55}\text{Fe}$ ) 能量分辨为  $168 \text{ eV}$ . 在探测器的前面有一个聚酯膜, 用于吸收很强的  $M$  壳层 X 射线. 靶室的 Be 窗其作用一方面可以密闭真空, 另一方面之所以选择金属铍作为窗口材料, 是因为金属铍是最轻的 (原子序数最小) 稳定金属, 它对 X 射线的屏蔽作用最小. 这样 X 射线可以尽可能多的穿过窗被靶室外的探测器探测. 当然, 也可以用有机膜, 但一般的有机膜密实度不够, 无法长时间保证真空, 也有用特殊的有机膜作为探测器的窗口, 但造价太高. 为了得到尽可能大的 X 射线强度, 对于 Be 窗厚度也有要求, 铍窗越薄越好, 但太薄了强度无法保证, 因此, 本实验选择  $1 \text{ mil} (= 0.0254 \text{ mm})$  左右的窗.

实验前后利用标准放射源  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{152}\text{Eu}$  对 Si(Li) 探测器进行效率刻度, 所得效率曲线如图 2 所示, 其中实线是多项式拟合的结果. 效率的不确定度大概为  $1.9\% - 5.9\%$ , 包括了标准源活度误差、峰面积统计、拟合误差以及发射效率误差.

## 3. 结果与讨论

图 3 是  $25 \text{ MeV O}^{5+}$  入射时, Si(Li) 探测器测得的 X 射线谱. 每个谱线的积分时间为  $15 \text{ min}$ . 从图中可以看出 Ta 靶的  $L$  壳层 X 射线发射谱线是明显

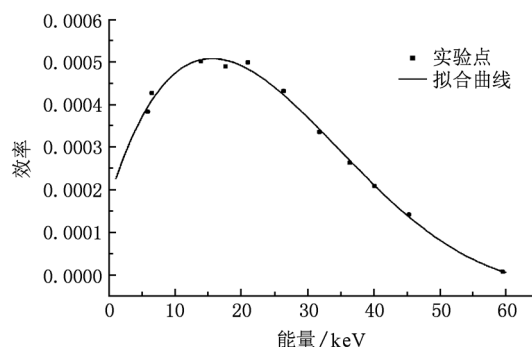


图 2 Si(Li) 探测器效率曲线

分立的, 其发射强度明显不同, 其中  $L\alpha$  强度最大, 约为  $L\beta$  强度的 2 倍,  $L1$  和  $L\gamma$  强度较小, 大约只有  $L\alpha$  强度的十分之一. 利用 originlab 软件拟合各峰面积, 利用

$$\sigma = \frac{SA}{N_A \epsilon N t \beta} \quad (1)$$

可以得到相应的 X 射线的发射截面. (1) 式中  $S$  为通过拟合所得的各峰面积;  $A$  为靶的原子质量 (单位为  $\text{g/mol}$ );  $N_A$  为阿伏伽德罗常数;  $\epsilon$  为 Si(Li) 探测器的探测效率;  $N$  为法拉第筒计数;  $t$  为靶厚 (单位为  $\mu\text{g/cm}^2$ );  $\beta$  为修正因子 ( $\beta = [1 - \exp(-\mu t)] / \mu t$ ), 其中  $\mu$  为 X 射线的吸收系数<sup>[11]</sup>.

理论上  $L$  壳层各亚壳层 X 射线截面可以通过以下各式得到:

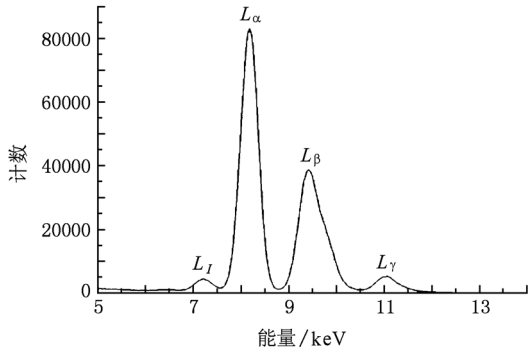


图3 25 MeV的O<sup>5+</sup>轰击Ta靶产生的X射线谱

$$\sigma_l = [\sigma_{L1}(f_{12}f_{23} + f_{13}) + \sigma_{L2}f_{23} + \sigma_{L3}] \omega_3 S_{L3}, \quad (2)$$

$$\sigma_\alpha = [\sigma_{L1}(f_{12}f_{23} + f_{13}) + \sigma_{L2}f_{23} + \sigma_{L3}] \omega_3 S_{\alpha3}, \quad (3)$$

$$\sigma_\beta = \sigma_{L1}[\omega_1 S_{\beta,1} + \omega_2 f_{12} S_{\beta,2} + \omega_3 (f_{13} + f_{12}f_{23}) S_{\beta,3}] + \sigma_{L2}(\omega_2 S_{\beta,2} + \omega_3 f_{23} S_{\beta,3}) + \sigma_{L3} \omega_3 S_{\beta,3}, \quad (4)$$

$$\sigma_\gamma = \sigma_{L1}(\omega_1 S_{\gamma,1} + \omega_2 f_{12} S_{\gamma,2}) + \sigma_{L2} \omega_2 S_{\gamma,2}. \quad (5)$$

将ECPSSR理论计算所得的L各支壳层直接电离截面代入(2),(3),(4)和(5)式可以得到L壳层L<sub>1</sub>, L<sub>α</sub>, L<sub>β</sub>和L<sub>γ</sub>-X射线的产生截面。(2),(3),(4)和(5)式中的σ<sub>*i*</sub>(*i* = l, α, β, γ)和σ<sub>*Li*</sub>(*i* = 1, 2, 3)分别表示L壳层各亚壳层的X射线发射截面和直接电离截面; ω<sub>*i*</sub>(*i* = 1, 2, 3)为荧光产额<sup>[12]</sup>; f<sub>*ij*</sub>(*i, j* = 1, 2, 3)是Coster-Kronig因子, s<sub>*ij*</sub>(*i* = α, β, γ, *j* = 1, 2, 3)是Super Coster-Kronig因子<sup>[13]</sup>, 本文采用的原子参数ω<sub>*i*</sub>和f<sub>*ij*</sub>考虑了多重电离效应<sup>[2,14]</sup>.

图4—6是实验值与ECPSSR模型计算结果的对比. 图中给出了20—45 MeV的O<sup>5+</sup>离子入射,Ta靶发射的L壳层X射线各亚壳层截面的比值σ(L<sub>1</sub>)/σ(L<sub>α</sub>), σ(L<sub>β</sub>)/σ(L<sub>α</sub>)和σ(L<sub>γ</sub>)/σ(L<sub>α</sub>). 实验上所得的Ta靶发射的L壳层X射线产生截面各亚壳层比值的误差范围为4.2%—19.4%.

从图4可以看出,入射能量20—40 MeV时,Ta靶发射的L壳层X射线比值σ(L<sub>1</sub>)/σ(L<sub>α</sub>),实验值比理论计算值分别高29.3%, 29.7%, 136.0%, 26.5%和14.2%(即(实验值-理论值)/理论值),而入射能量为45 MeV时,实验值比理论值低8.5%.

从图5可以看出,入射能量20—45 MeV时,Ta靶发射L壳层X射线比值σ(L<sub>β</sub>)/σ(L<sub>α</sub>),实验值比理论值分别低5.2%, 2.7%, 0.7%, 3.8%, 3.7%和4.8%.

从图6可以看出,比值σ(L<sub>γ</sub>)/σ(L<sub>α</sub>),除入射

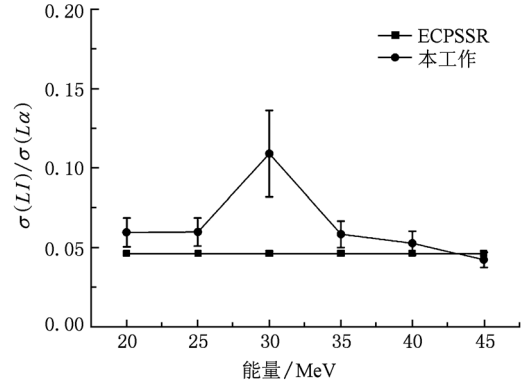


图4 能量为20—45 MeV的O离子入射Ta靶发射X射线的截面比值σ(L<sub>1</sub>)/σ(L<sub>α</sub>)

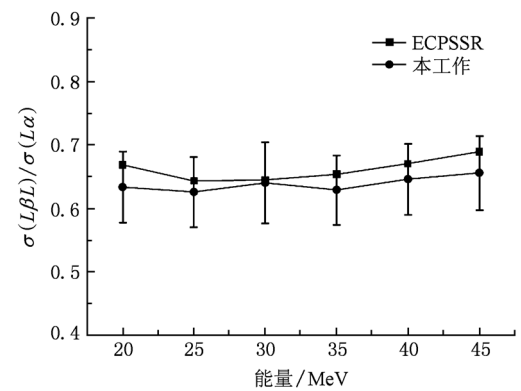


图5 能量为20—45 MeV的O离子入射Ta靶发射X射线的截面比值σ(L<sub>β</sub>)/σ(L<sub>α</sub>)

O<sup>5+</sup>离子能量为30 MeV和45 MeV,实验值与理论预测偏差相对较大以外,其他实验值与理论预测符合得很好. 入射能量为25 MeV和30 MeV时,实验值比理论值高3.0%和11.5%. 入射能量为20 MeV,35 MeV,40 MeV和45 MeV时,实验值分别比

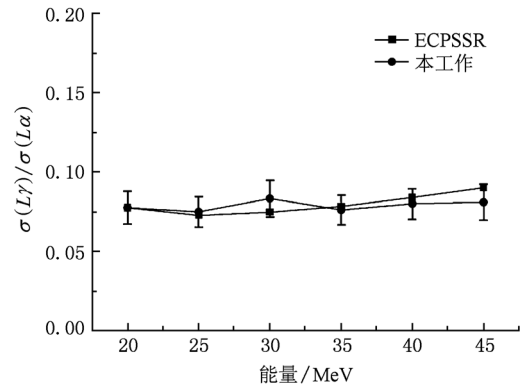


图6 能量为20—45 MeV的O离子入射Ta靶发射X射线的截面比值σ(L<sub>γ</sub>)/σ(L<sub>α</sub>)

理论值低 0.025% , 2.8% , 4.8% 和 10.1% .

由以上可知 20—45 MeV 的  $O^{5+}$  离子轰击 Ta 产生的 L 壳层 X 射线发射截面, 对于比值  $\sigma(LI)/\sigma(L\alpha)$ , 除入射能量为 45 MeV 时实验值稍低于理论值外, 其余入射能量点实验值均高于理论值; 对于比值  $\sigma(L\beta)/\sigma(L\alpha)$ , 实验值略低于理论值; 对于比值  $\sigma(L\gamma)/\sigma(L\alpha)$ , 入射能量为 25 MeV 和 30 MeV 时实验值比理论值稍高, 其余入射能量实验值比理论值均低. 还可以看出, 比值  $\sigma(L\beta)/\sigma(L\alpha)$  理论值与实验值偏差 (即理论值与实验值的差) 较大, 可能是由于计算公式引入的参数较多. 这与文献[15]的结论相一致. 对于不同的碰撞系统, 碰撞截面比值之间存在着差异. 同束不同靶<sup>[15]</sup> (即入射离子种类、能量和电荷态相同, 靶不同) 与同靶不同束 (即入射离子种类不同, 靶相同) 相比, 前者的差异较大, 后者虽然存在差异, 但是基本趋势相同. 同时从实验中我们观察到谱线存在明显的能移现象.

入射  $O^{5+}$  离子能量为 30 MeV 时, 对于比值  $\sigma(LI)/\sigma(L\alpha)$  和  $\sigma(L\gamma)/\sigma(L\alpha)$  与其他值相比实验值与理论值偏差较大, 比值  $\sigma(L\beta)/\sigma(L\alpha)$  实验值

与理论计算值最接近. 出现上述现象可能与不同能量入射时, X 射线发射强度有关. 入射  $O^{5+}$  离子能量为 30 MeV 时, 各亚壳层 X 射线发射强度远大于其他能量入射产生的强度.

#### 4. 结 论

入射  $O^{5+}$  离子能量为 20—45 MeV 时, Ta 靶发射的 L 壳层 X 射线  $L1, L\alpha, L\beta$  和  $L\gamma$  各亚壳层的截面, 除入射  $O^{5+}$  离子能量为 30 MeV 的能量点外, 实验与理论相比较比值  $\sigma(LI)/\sigma(L\alpha)$  偏差为 8.5%—29.7%, 比值  $\sigma(L\beta)/\sigma(L\alpha)$  偏差为 0.7%—5.2%, 比值  $\sigma(L\gamma)/\sigma(L\alpha)$  偏差为 0.025%—11.5%. 总的来说实验值与 ECPSSR 理论计算值符合得较好. 存在差别说明实验精度有待进一步提高, 理论模型及相关的参数需要进一步修正. 对于入射  $O^{5+}$  离子能量为 30 MeV 时, Ta 靶发射的 L 壳层 X 射线实验值与理论值出现较大偏差, 可能与 X 射线发射强度较大有关, 其他原因还有待于进一步探究.

- [1] Lugo-Licona M, Miranda J 2004 *Nucl. Instr. and Meth. B* **219**—220 289
- [2] Gregory Lapicki, Ramana Murty G A V, Naga Raju G J, Seetharami Reddy B, Bhuloka Reddy S, Vijayan V 2004 *Phys. Rev. A* **70** 062718
- [3] Banas D, Braziewicz J, Majewska U, Pajek M, Semaniak J, Czyzewski T, Jaskóla M, Kretschmer W, Mukoyama T 1999 *Nucl. Instr. and Meth. B* **154** 247
- [4] Banas D, Braziewicz J, Kubala-Kukus A, Majewska U, Pajek M, Semaniak J, Czyzewski T, Jaskóla M, Kretschmer W, Mukoyama T 2000 *Nucl. Instr. and Meth. B* **164**—165 344
- [5] T Kirchner, H J Lüdde, R M Dreizler 1999 *Physica Scripta*. T80 416
- [6] Merzbacher E, Lewis L W 1958 *Encyclopedia of Physics* **34** 166
- [7] Hansteen J M, Mosebekk O P 1970 *Z. Phys.* **234** 281
- [8] [方泉玉、颜 君 2006 原子结构、碰撞与光谱理论 (北京: 国防工业出版社) 第 321—323 页]
- [9] Shatendra K, Allawadhi K L, Sood B S 1985 *Phys. Rev. A* **31** 2918
- [10] Semaniak J, Braziewicz J, Pajek M 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1125
- [11] <http://physics.nist.gov> [OL]
- [12] Campbell J L, Wang J X 1989 *At. Data Nucl. Data Tables* **43** 281
- [13] Campbell J H 2003 *At. Data. Nucl. Data. Tables* **85** 291
- [14] Schieietz G, Grande P L 2001 *Nucl. Instr. and Meth. B* **177** 125
- [15] Zhang B L, Yang Z H, Du S B, Chang H W, Xue Y L, Song Z Y, Zhu K X, Tian Y 2009 *Acta Phys. Sin* **58** 6113 (in Chinese) [张泊丽、杨治虎、杜树斌、常宏伟、薛迎丽、宋张勇、朱可欣、田野 2009 物理学报 **58** 6113]

## *L*-shell X-ray emission cross section of tantalum by 20—45 MeV O<sup>5+</sup> bombardment \*

Xu Qiu-Mei<sup>1)2)</sup> Yang Zhi-Hu<sup>1)†</sup> Du Shu-Bin<sup>3)</sup> Chang Hong-Wei<sup>3)</sup> Zhang Yan-Ping<sup>3)</sup>

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

2) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

(Received 12 May 2010; revised manuscript received 15 November 2010)

### Abstract

With 20—45 MeV O<sup>5+</sup> ion bombardment we investigate *L*-shell X-ray emission processes on Ta film at HI-13 tandem accelerator in the Chinese Institute of Atomic Energy (CIAE). The ratios of X-ray emission cross section:  $\sigma(L\beta)/\sigma(L\alpha)$ ,  $\sigma(L\gamma)/\sigma(L\alpha)$ , and  $\sigma(Ll)/\sigma(L\alpha)$  are obtained. The results are compared with the predictions by the ECPSSR theory. Reasonable agreement between the ECPSSR theory and the experiment is obtained.

**Keywords:** *L*-shell X-ray, emission cross section, ECPSSR theory

**PACS:** 32.30.Rj, 32.50.+d, 34.50.Fa

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10774149).

† Corresponding author. E-mail: z. yang@impcas.ac.cn