

$^{129}\text{Xe}^{q+}$ 激发 Mo 表面产生的 X 射线谱*

梁昌慧^{1)†} 张小安²⁾ 李耀宗¹⁾ 赵永涛²⁾ 肖国青²⁾

1) (咸阳师范学院物理系, 咸阳 712000)

2) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2009 年 1 月 1 日收到; 2009 年 11 月 7 日收到修改稿)

研究了高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{q+}$ ($q = 25, 26, 27$) 入射金属 Mo 表面产生的特征 X 射线谱. 实验结果表明, 在束流强度小于 120 nA 条件下, 高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{q+}$ 可以激发 Mo 的 L 壳层特征 X 射线谱. 单离子 X 射线相对产额可达 10^{-8} 量级, 特征 X 射线的相对产额随入射离子的动能和电荷态 (势能) 的增加而增加. 通过 Mo 原子的 $L\alpha_1$ 特征 X 射线谱, 利用 Heisenberg 不确定关系对 Mo 原子的第 M 能级寿命进行了估算.

关键词: 高电荷态离子, X 射线, 产额, 能级寿命

PACC: 3450D, 3220R, 3270J

1. 引 言

根据 Bohr 理论, 原子的特征 X 射线是其内壳层电子被激发产生空穴, 其他电子填充该空穴时发射的. 目前, 产生的主要途径有多种, 利用 X 射线管中的快速阴极电子轰击靶材料发射特征 X 射线是主要途径之一, 但其由单电荷态、高能 (动能为 MeV 量级) 的重离子轰击 (如 ^{74}W 靶) 产生的 $K\alpha$ -X 射线的单离子相对产额也仅在 10^{-14} 量级^[1].

经典过垒模型 (classical over-barrier model, COBM) 表明, 低速高电荷态离子 (速度小于 Bohr 速度 $v_{\text{Bohr}} = 2.19 \times 10^6$ m/s) 在其逼近金属表面过程中, 当运动到临界距离 R_c 时, 入射离子与金属表面间的势垒高度低于费米面, 金属导带的电子会共振电离或共振转移到入射离子的高激发态, 形成空心原子. 空心原子通过自电离、俄歇过程等方式退激, 发射大量的电子和特征 X 射线, 并在 fs 时间内将几十到几百 keV 的能量沉积在固体表面 nm 空间尺度范围内, 使入射离子和靶原子激发和离化. 截止目前, 对高电荷态离子的势能使靶原子激发的机理尚不清楚, 因此, 通过测量相互作用过程中空心原子发射的 K, L 和 M 的特征 X 射线, 可以研究空心原子

的运动规律和衰变过程, 通过测量相互作用过程中靶原子发射的特征 X 射线, 可以研究在高电荷态离子强场条件下电子转移、靶原子内壳层电子激发辐射的微观机理^[2-4].

本文报道在兰州重离子加速器国家实验室用低速高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{q+}$ ($q = 25, 26, 27$) 轰击金属 Mo 表面, 激发 Mo 原子的特征 X 射线谱, 通过 Mo 原子的 $L\alpha_1$ 特征 X 射线谱, 利用 Heisenberg 不确定关系对 Mo 原子的第 M 能级寿命进行了估算, 发现由于入射离子的能量增加和库仑场的影响使得原子能级展宽, 给能级寿命估算带来影响.

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 $^{129}\text{Xe}^{q+}$ 由兰州重离子加速器电子回旋共振离子源 (the electron cyclotron resonance ion source, 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原子物理实验平台, 然后经过四极透镜和光栏的聚焦准直, 离子进入内部具有电磁屏蔽功能的超高真空 (约 10^{-5} 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 mm 范围内, 束流强度为 nA 量

* 国家自然科学基金 (批准号: 10574132) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2007A05, 2010JM1012) 和咸阳师范学院科研基金 (批准号: 09XSYK106) 资助的课题.

† E-mail: liangchanghui73@yahoo.cn

级,离子以 45° 方向斜入射于经过表面净化处理的化学纯度为 99.9% 的 Mo 固体表面,其表面积为 $19\text{ mm} \times 24\text{ mm}$,厚度为 0.1 mm .入射离子与固体表面相互作用所产生的 X 射线谱利用 Si(Li) 探测器进行观测.实验前利用标准的放射源 ^{241}Am 和 ^{55}Fe 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 keV 时,能量分辨为 0.16 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° 角,与靶表面垂直;探测窗口是厚度为 0.05 mm 的 Be 窗.当 X 射线能量为 3 keV 时,该 Be 窗的透射率约为 83%.探测器口径为 10 mm ,距离靶点 80 mm ,探测时间选为 5400 s .

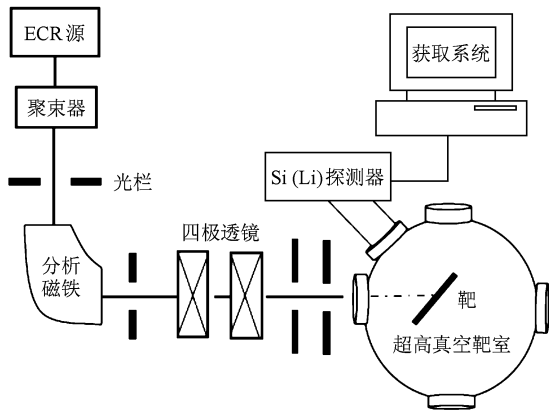


图 1 兰州重离子加速器国家实验室 ECR 源原子物理实验平台示意图

3. 实验结果与讨论

3.1. 电荷态一定、动能不同的离子激发的 X 射线谱

图 2(a), (b), (c) 是动能分别为 $400, 500, 600\text{ keV}$ 的 Xe^{27+} 与 Mo 表面相互作用产生的 X 射线谱,

经 GaussAmp 拟合(拟合函数为 $y = y_0 + Ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{2w^2}}$; 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)后的两个峰位分别为 1.59 keV 左右和 2.32413 keV ,其中峰位为 2.32413 keV 的为 Mo 的 $L\alpha_1$ 特征 X 射线(对于 X 射线谱的识别,以美国国家标准技术局光谱数据库(NIST Atomic Spectra Database)的数据为依据).而 NIST Atomic Spectra Database 公布的 Mo 的 $L\alpha_1$ 特征 X 射线是 2.29316 keV ,测量的结果与此相比略大,可能是 Si(Li) 探测器分辨率不高所致,但测量误差仅为 1.35% ,证明

实验值与理论值符合较好.

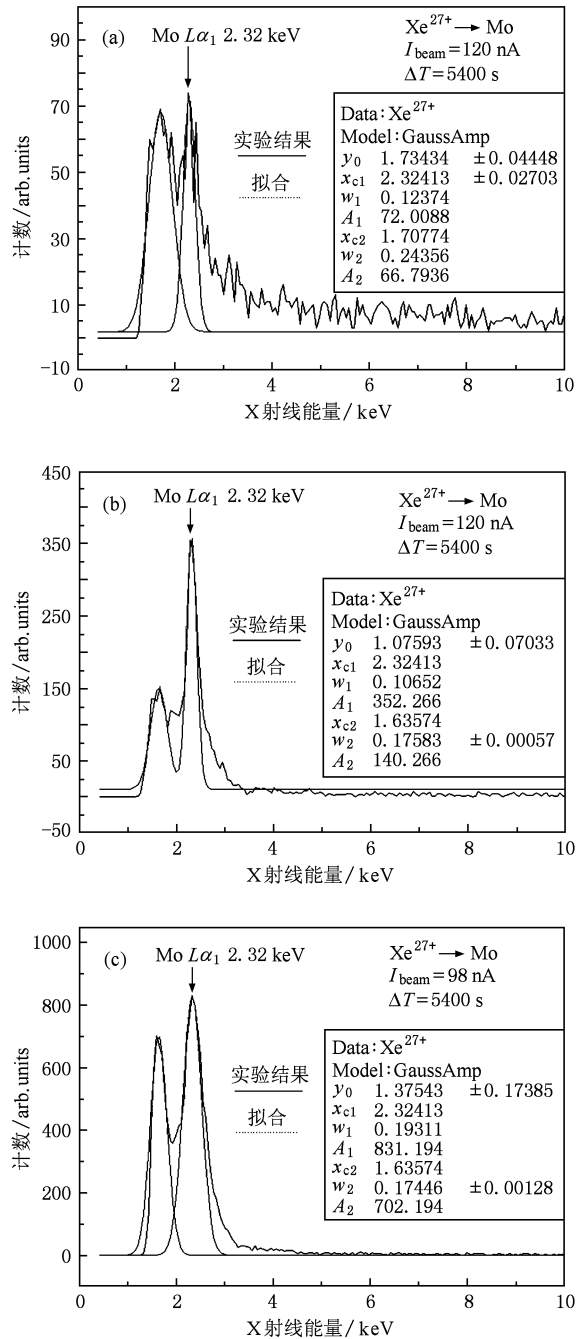


图 2 动能为 400 keV (a), 500 keV (b) 和 600 keV (c) 的 $^{129}\text{Xe}^{27+}$ 入射 Mo 表面激发的 X 射线谱

图 2(a) 背景辐射较大, X 射线峰计数为 72; (b) 背景辐射相对被抑制, 峰计数为 352; (c) 峰计数增大到 831, Mo- $L\alpha_1$ 特征 X 射线明显. 从图 2 可以明显看出, Mo- $L\alpha_1$ 特征 X 射线幅度随着入射离子的动能的增加而增加.

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 Xe^{q+} 作用于 Mo 表面的单离子 X 射线相对产额^[5]

$$Y = \frac{C}{N} = 2.7 \times 10^{-6} \times \frac{q \times \Gamma \times A}{I_{\text{beam}} \times \Delta T}, \quad (1)$$

其中, C 为总计数, N 为总粒子数, q 是入射离子的电荷态, $\Gamma = 2 \sqrt{\ln 4 w}$ GaussAmp 转换系数, 是半高宽(单位: keV), A 是峰计数, I_{beam} 是用靶电流强度表示的束流强度(单位是 nA). 利用(1)式, 可以计算出单离子 X 射线相对产额, 动能为 350 keV 的 $^{129}\text{Xe}^{27+}$ 离子, X 射线相对产额为 0.19×10^{-8} ; 动能为 600 keV 的 $^{129}\text{Xe}^{27+}$ 离子, X 射线相对产额为 5.05×10^{-8} . 图 3 给出不同动能的(350—600 keV)高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{27+}$ 离子入射 Mo 表面激发的 X 射线相对产额与入射离子的动能关系图, 误差为 5%. 从图 3 可以明显看出, X 射线相对产额随着入射离子的动能的增加而增加, 这是因为在相互作用过程中, 随着入射离子动能的增加, 入射离子激发靶原子内壳层电子的概率增加, 所以, X 射线的相对产额增加.

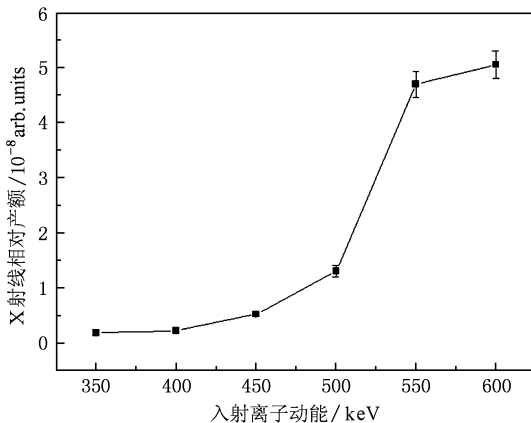


图 3 单离子 X 射线相对产额与入射离子 ($^{129}\text{Xe}^{27+}$) 动能的关系

3.2. 动能一定、电荷态不同的离子激发的 X 射线谱

图 4(a), (b), (c) 是动能为 600 keV 的高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{25+}$, $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 和 $^{129}\text{Xe}^{27+}$ 入射 Mo 表面激发的 X 射线谱. 峰位都为 2.32413 keV, 其中 (a) 峰计数为 367; (b) 峰计数为 484; (c) 峰计数为 831. 从图 4 可以明显看出, Mo- $L\alpha_1$ 特征 X 射线幅度随着入射离子电荷态(势能)的增加而增加.

利用(1)式和图 4 的数值, 计算出动能为 600 keV、电荷态不同的 Mo 单离子 X 射线相对产额, 并

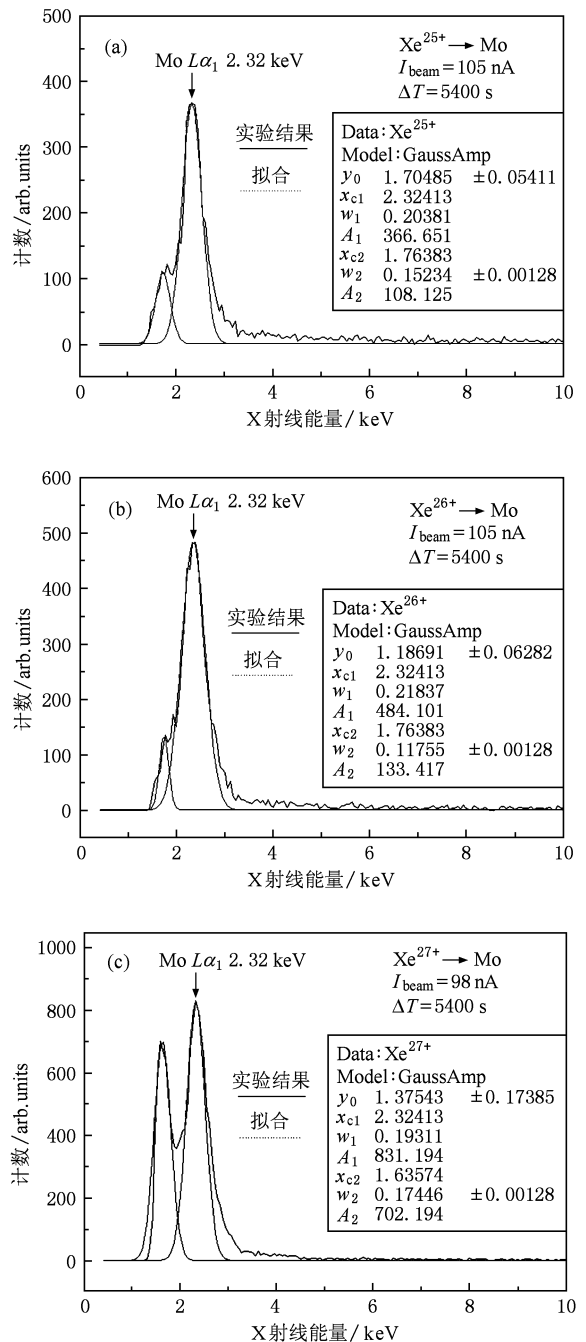


图 4 动能为 600 keV 的 $^{129}\text{Xe}^{25+}$ (a), $^{129}\text{Xe}^{26+}$ (b) 和 $^{129}\text{Xe}^{27+}$ (c) 入射 Mo 表面激发的 X 射线谱

绘出动能为 600 keV 的不同的高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{25+}$, $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 和 $^{129}\text{Xe}^{27+}$ 入射 Mo 表面激发的 X 射线相对产额与入射离子电荷态的关系如图 5 所示, 误差为 3%. 从图 5 可以看出, 对于同一动能的高电荷态 Xe 离子, X 射线相对产额随着入射离子电荷态(势能)的增加而增加.

我们可以从入射离子与靶原子的电子间的相

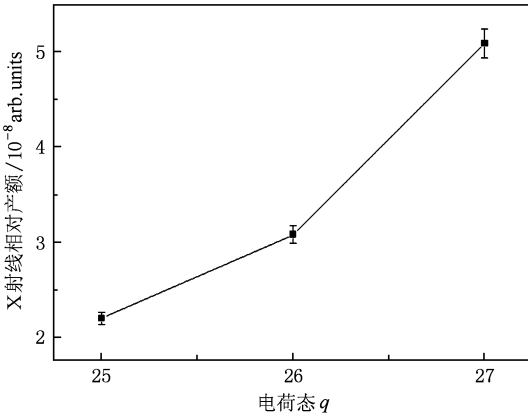


图5 动能相同(600 keV)电荷态不同的离子与单离子 X 射线相对产额的关系

互作用过程来理解图 1 到图 5 的实验结果。

携带大量势能的低速高电荷态离子在入射金属表面过程中,当离子运动至临界距离 R_c [6],

$$R_c = \frac{1}{2W} \sqrt{8q + 2}, \quad (2)$$

W 为金属的脱出功; q 为入射离子的电荷态. 离子与金属导带间形成的势垒低于金属的费米面时,金属导带电子共振转移到入射离子与导带匹配的能级,使入射离子中性化,释放其具有的势能在金属靶表面,使靶原子激发和电离. 另一方面,高电荷态离子入射到金属表面,金属表面对离子产生镜像加速,引起离子能量增益 ΔE [7], 即

$$\Delta E = \frac{Wq^{3/2}}{4\sqrt{2}}, \quad (3)$$

增益的能量也沉积在靶表面,加强了靶原子的激发和电离. 由于入射离子与金属表面这种瞬时(飞秒量级)强库仑相互作用释放的势能(Xe^{25+} , 856 eV; Xe^{26+} , 1493 eV; Xe^{27+} , 1570 eV),加上离子本身的动能,足以使 Mo 原子 L 壳层的电子电离,(电离 L 壳层的一个 $2p$ 电子,大约需要 4.25 keV 能量)形成空穴, M 壳层的电子填充 L 壳层空穴,辐射 $L\alpha_1$ 特征 X 射线. 根据电子偶极跃迁的选择定则

$$\Delta n \neq 0; \quad \Delta L = \pm 1; \quad \Delta J = 0, \pm 1.$$

据文献[8]可知,我们测量的 Mo 的 $L\alpha_1$ 特征 X 射线,是 $3d_{5/2} \rightarrow 2p_{3/2}$ 即 $M_V \rightarrow L_{III}$ 的跃迁.

3.3. Mo 原子 M 能级寿命估算

Mo- $L\alpha_1$ 特征 X 射线是能级 M 的电子退激到 L 能级辐射的,由 Heisenberg 不定关系 (uncertainty relation)

$$\Delta E t = \hbar, \quad (4)$$

其中 $\hbar = 6.63 \times 10^{-34} / 2\pi$ (J·s), ΔE 用我们测量的 X 射线谱的半高宽 Γ (keV) 代替,则能级寿命 τ 可以用下式估算:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{\hbar}{\Gamma \times 10^3 \times 1.6 \times 10^{-19}} \\ &= \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 10^{16}}{\Gamma \times 1.6 \times 2\pi} \\ &= \frac{6.6 \times 10^{-19}}{\Gamma} \text{ (s)}. \end{aligned} \quad (5)$$

将图 3 和图 4 的不同离子激发 X 射线谱的半高宽 (keV) 及根据(5)式估算的 Mo 原子 M 能级寿命 (s) 如表 1 所示,由表 1 估算出 Mo 原子 M 能级寿命 τ 约为 1.41×10^{-18} s,这种估算方法对能级寿命的结果有直接影响. 因为低速高电荷态离子和固体表面相互作用是强库仑场作用下的超快非线性过程(飞秒量级),能量的沉积引起的晶格振动以及强库仑场的作用使得表面靶原子所在位置的电场对称性被破坏,引起靶原子能级展宽且随着入射离子的能量的增加而增加,致使发射谱线均匀增宽 [8].

表 1 不同离子激发 X 射线谱的半高宽和能级寿命

入射离子	Γ / keV	寿命 / 10^{-8} s
Xe^{27+} (动能 400 keV; 势能 1.57 keV)	0.291	1.68
Xe^{27+} (动能 500 keV; 势能 1.57 keV)	0.302	1.29
Xe^{25+} (动能 600 keV; 势能 0.86 keV)	0.503	1.31
Xe^{26+} (动能 600 keV; 势能 1.49 keV)	0.514	1.28
Xe^{27+} (动能 600 keV; 势能 1.57 keV)	0.445	1.48

$$\text{另一方面,在能级寿命估算中, } \tau_\alpha = \frac{1}{\sum_\beta A_{\alpha\beta}}, A_{\alpha\beta}$$

为自发辐射系数,是单位时间原子从激发态 α 自发地跃迁到较低能 β 态的数目(β 指比 α 能级低的、所有满足偶极跃迁选择定则的态),而我们在估算中时,只考虑了 $M_V \rightarrow L_{III}$ 的跃迁.

4. 结 论

我们观测和分析了利用兰州重离子加速器国家实验室 ECR 源提供的高电荷态 $^{129}\text{Xe}^{q+}$ ($q = 25, 26, 27$) 离子与 Mo 表面作用产生的 X 射线发射,实验结果表明,在束流强度小于 120 nA 条件下,高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{q+}$ 可以激发 Mo 的 L 壳层特征 X 射线谱,单离子 X 射线相对产额可达 10^{-8} 量级,在电荷

态一定的条件下, X 射线相对产额随着入射离子动能的增加而增加. 对于同一动能的 Xe 离子, X 射线相对产额随着入射离子电荷态(势能)的增加而增

加. 并通过 Mo 原子 $L\alpha_1$ 的特征 X 射线谱, 利用 Heisenberg 不确定关系对 Mo 原子的第 M 能级寿命进行了估算.

- [1] Winter H P, Aumayr F 1999 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **32** R39
- [2] Schenkel T, Hamza AV, Barnes AV, Schneider D H, Banks J C, Doyle B L 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 2590
- [3] Dong C Z, Fu Y B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 0107 (in Chinese) [董晨钟、符彦斌 2006 物理学报 **55** 0107]
- [4] Zhang X A, Zhao Y T, Li F L, Yang Z H, Xiao G Q, Zhan W L 2004 *Science in China G* **34** 414 (in Chinese) [张小安、赵永涛、李福利、杨治虎、肖国青、詹文龙 2004 中国科学(G 辑) **34** 414]
- [5] Yang Z H, Song Z Y, Chen X M, Zhang X A, Zhang Y P, Zhao Y T, Cui Y, Zhang H Q, Xu X, Shao J X, Yu D Y, Cai X H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2221 (in Chinese) [杨治虎、宋张勇、陈熙

萌、张小安、张艳萍、赵永涛、崔莹、张红强、徐徐、邵建雄、于得洋、蔡晓红 2006 物理学报 **55** 2221]

- [6] Burgdörfer J, Lerner P, Meyer F W 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5674
- [7] Yang Z H, Song Z Y, Cui Y, Zhang H Q, Ruan F F, Shao J X, Du J, Liu Y W, Zhu K X, Zhang X A, Shao C J, Lu R C, Yu D Y, Chen X M, Cai X H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 803 (in Chinese) [杨治虎、宋张勇、崔莹、张红强、阮芳芳、邵建雄、杜娟、刘玉文、朱可欣、张小安、邵曹杰、卢荣春、于得洋、陈熙萌、蔡晓红 2008 物理学报 **57** 803]
- [8] Xu K Z 1998 *Advanced Physics of Atom and Molecule* (Beijing: Science Press) p160 (in Chinese) [徐克尊 1998 高等原子分子物理学(北京:科学出版社)第 160 页]

X-ray spectrum emitted by the impact of $^{129}\text{Xe}^{q+}$ on Mo surface*

Liang Chang-Hui^{1)†} Zhang Xiao-An²⁾ Li Yao-Zong¹⁾ Zhao Yong-Tao²⁾ Xiao Guo-Qing²⁾

1) (Department of Physics, Xianyang Normal College, Xianyang 712000, China)

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

(Received 1 January 2009; revised manuscript received 7 November 2009)

Abstract

We studied the characteristic X-ray spectra produced by the interaction of highly charged ions of $^{129}\text{Xe}^{q+}$ ($q = 25, 26, 27$) with surface of metallic Mo. The experimental result shows that highly charged ions can excite the characteristic X-ray spectra of L -shell of Mo when the beam's intensity is not more than 120 nA. The X-ray yield of single ion reaches a quantitative level of 10^{-8} and increases with the increment of the ion's kinetic energy and ionic charge (potential energy). By measuring the X-ray spectra of $\text{Mo}-L\alpha_1$, the M -level lifetime of Mo atom is estimated by using Heisenberg uncertainty relation.

Keywords: highly charged ions, X-ray, yield, level lifetime

PACC: 3450D, 3220R, 3270J

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10574132) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (Grant Nos. 2007A05, 2010JM1012) and the Scientific Research Foundation of Xianyang Normal College (Grant No. 09XSYK106).

† E-mail: liangchanghui73@yahoo.cn