

不同电荷态的  $^{129}\text{Xe}^{q+}$  激发 Au 的 X 射线发射研究

梁昌慧 张小安 李耀宗 赵永涛 梅策香 周贤明 肖国青

Study of X-ray spectrum emitted due to the impact of  $^{129}\text{Xe}^{q+}$  on different ion's charge on Au

Liang Chang-Hui Zhang Xiao-An Li Yao-Zong Zhao Yong-Tao Mei Ce-Xiang Zhou Xian-Ming  
Xiao Guo-Qing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 053201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.053201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.053201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同动能的  $^{129}\text{Xe}^{26+}$  与 Au 表面作用产生的 X 射线谱

X-ray spectrum emitted by the impact of  $^{129}\text{Xe}^{26+}$  of the different kinetic energies on Au surface

物理学报.2014, 63(16): 163201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.163201>

$\text{Eu}^{20+}$  入射 Au 靶发射 Eu L-X 射线产额与动能的相关性

Correlation of Eu L X-ray yield with kinetic energy based on the impact of  $\text{Eu}^{20+}$  on solid Au target

物理学报.2014, 63(16): 163202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.163202>

$\text{H}^+$  和  $\text{Ar}^{11+}$  激发 Si 的 K 壳层 X 射线发射研究

Study of Si K-shell X-ray emission induced by  $\text{H}^+$  and  $\text{Ar}^{11+}$  ions

物理学报.2013, 62(8): 083201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.083201>

近 Bohr 速度的  $^{152}\text{Eu}^{20+}$  入射 Au 表面产生的 X 射线谱

X-ray spectrum emitted by the impact of  $^{152}\text{Eu}^{20+}$  of near Bohn velocity on Au surface

物理学报.2013, 62(6): 063202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.063202>

重离子轰击 Ta 靶引起的多电离效应

Multiple ionization effect of Ta induced by heavy ions

物理学报.2012, 61(19): 193201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.193201>

不同电荷态的 $^{129}\text{Xe}^{q+}$ 激发Au的X射线发射研究\*梁昌慧<sup>1)</sup> 张小安<sup>1)†</sup> 李耀宗<sup>1)</sup> 赵永涛<sup>2)</sup> 梅策香<sup>1)</sup>  
周贤明<sup>2)</sup> 肖国青<sup>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, 咸阳 712000)

2) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2014年6月10日收到; 2014年9月16日收到修改稿)

报道了在兰州重离子加速器国家实验室测量动能为2.4 MeV的 $\text{Xe}^{q+}$  ( $q = 10, 15, 20, 26$ ) 轰击Au表面辐射的X射线的实验数据. 实验结果表明, Au的M-X射线有不同程度的能移, 这是由于入射过程引起了靶原子内壳层的多电离, 多电离的程度主要取决于离子的外壳层电子分布. 计算了X射线产额, 并与BEA理论计算值进行了比较, 讨论了电荷态对X射线产额的影响.

关键词: X射线, 产额, BEA模型, 电荷态

PACS: 32.30.Rj, 32.70.Jz, 34.50.Fa

DOI: 10.7498/aps.64.053201

## 1 引言

随着离子源技术的发展, 高电荷态离子与固体靶相互作用激发引起靶原子内壳层电离的研究工作受到了广泛关注并取得了重要进展. 当携带较高势能的高电荷态离子入射固体表面至临界距离时, 会引起靶原子内壳层的电离, 相应空穴的退激伴随着X射线和俄歇电子的发射. X射线辐射测量是研究离子-原子碰撞过程的一种重要方法<sup>[1]</sup>, 离子-原子碰撞过程中产生的原子参数数据和X射线截面数据, 在天体物理, 等离子体物理, 原子物理, 医学研究, 元素分析及环境保护等方面具有重要的参考意义<sup>[2,3]</sup>.

大量的离子-原子碰撞实验表明, 在入射离子速度小于波尔速度 ( $2.19 \times 10^6$  m/s) 的低能量区域, 高电荷态离子的势能沉积对作用过程的影响远大于其动能作用<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<sup>[5]</sup>, 碰撞可

产生一些与单电离不同的多重电离、多电子俘获及分子轨道跃迁等物理机理. 而在高能区域, 对离子电荷态在碰撞过程中产生X射线的影响的报道较少, 研究电荷态对X射线的影响对于提高X射线的辐射转换效率以及在实验设计中, 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]</sup>. 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(the electron cyclotron resonance ion source, ECRIS) 320 kV高电荷态离子综合研究平台上, 选择动能为2.4 MeV的 $\text{Xe}^{10+}$ ,  $\text{Xe}^{15+}$ ,  $\text{Xe}^{20+}$ ,  $\text{Xe}^{26+}$ 离子束入射Au表面, 测量了 $\text{Xe}^{q+}$ 与Au相互作用产生的特征X射线谱, 计算了不同电荷态的X射线产额的实验值, 并考虑了能损后, 与两体碰撞近似(binary encounter approximation, BEA)理论计算进行了比较和分析.

## 2 实验装置和测量方法

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平台1号实验终端上完

\* 国家自然科学基金(批准号: 11075135)、陕西省自然科学基金(批准号: 2010JM1012)和陕西省教育厅科研计划(批准号: 14JK1803)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangxiaonan2000@126.com

成的. 离子束由 ECRIS 提供, 束流在不同的电压下引出, 经过偏转分析磁铁、加速管加速等进入超高真空球形靶室, 与厚度为 0.1 m、面积约为 15 mm × 15 mm 的 Au 靶表面相互作用, 实验装置在文献 [1] 中有更详细的描述. 相互作用所产生的 X 射线谱利用 AMPTEK 公司研制的 XR-100SDD 型 Si 漂移探测器进行探测, 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 5.899 keV 峰处分辨率可达 136 eV [5,7,8].

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 不同电荷态发射的 X 射线谱

图 1 (a), (b), (c), (d) 是经归一化入射粒子数之后、动能为 2.4 MeV, 电荷态分别为 10, 15, 20 和 26 的  $\text{Xe}^{q+}$  入射 Au 表面产生的 X 射线谱实验结果. 实验得到的四个峰位分别为 1.652, 2.147, 2.433 和 2.829 keV. X 射线谱的不确定度大约为 6%, 主要包括计数统计误差 (大约 5%) 和 X 射线的探测器标定误差 (大约 2%), 通过与文献 [9] 的数据对比后可知, 这四个峰依次为 Au 的  $\text{M}\zeta$ ,  $\text{M}\alpha$ ,  $\text{M}\gamma$  和  $\text{M}\delta$  特征 X 射线, 分别是组态  $\text{N}_3$  到  $\text{M}_5$ ,  $\text{N}_7$  到  $\text{M}_5$ ,  $\text{N}_5$  到

$\text{M}_3$ ,  $\text{N}_4$  到  $\text{M}_2$  的偶极跃迁. 这些峰体现了 M 壳层的空穴结构、支壳层荧光产额和辐射跃迁的信息, 不同电荷态的特征 X 射线谱的能移如表 1 所示, 从表 1 可以看出, 除  $\text{M}\zeta$  射线外, 其余特征 X 射线都有不同程度的能移. 这是因为  $\text{Xe}^{q+}$  与 Au 碰撞过程中引起了靶原子内壳层的多电离, 而多电离会扰动轨道电子的结合能, 减小轨道电子对原子的屏蔽, 使得 X 射线的发射向着高能方向移动 [1,10]. 另外,  $\text{Xe}^{10+}$ ,  $\text{Xe}^{20+}$  比  $\text{Xe}^{15+}$ ,  $\text{Xe}^{26+}$  的 X 射线能量能移幅度大得多, 这说明多电离的程度与离子的电荷态有关, 即主要与离子的外壳层是否有空穴有关,  $\text{Xe}^{10+}$ ,  $\text{Xe}^{20+}$  的电子组态分别为  $[\text{Kr}]4\text{d}^75\text{s}^1$ ,  $[\text{Ar}]3\text{d}^{10}4\text{s}^24\text{p}^4$ , 两者外壳层都有空穴, 而  $\text{Xe}^{15+}$ ,  $\text{Xe}^{26+}$  的电子组态分别为  $[\text{Kr}]4\text{d}^15\text{s}^2$ ,  $[\text{Ar}]3\text{d}^84\text{s}^2$ , 两者外壳层都没有空穴.

表 1 不同电荷态的特征 X 射线的能移/eV

电荷态	$\text{M}\zeta$	$\text{M}\alpha$	$\text{M}\gamma$	$\text{M}\delta$
10	$-8\pm 0$	$24\pm 1$	$25\pm 2$	$34\pm 2$
15	$-28\pm 2$	$7\pm 0$	$11\pm 1$	$-2\pm 0$
20	$-29\pm 2$	$52\pm 3$	$25\pm 2$	$20\pm 1$
26	$-57\pm 4$	$4\pm 0$	$13\pm 1$	$15\pm 1$

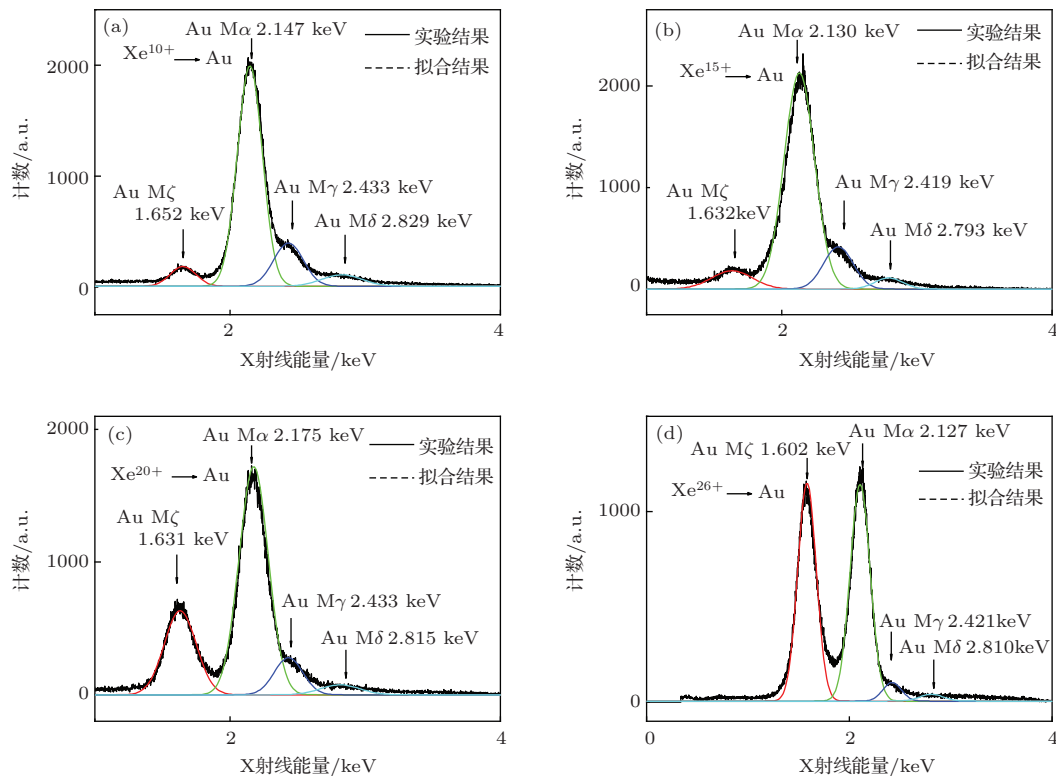


图 1 动能为 2.4 MeV 的  $\text{Xe}^{q+}$  ( $q = 10, 15, 20, 26$ ) 入射 Au 表面产生的 X 射线谱

### 3.2 单离子 X 射线产额实验值的计算

当  $Xe^{q+}$  动能为 2.4 MeV 时,  $Xe^{q+}$  作用在 Au 靶的入射距离为 0.25  $\mu\text{m}$ , 远远小于靶的厚度 0.10 mm, 所以靶的吸收系数可忽略, 并假设 X 射线发射是各向同性的, 根据实验条件和测量条件,  $Xe^{q+}$  入射 Au 表面产生的单离子 X 射线相对产额可用下式计算:

$$Y = \frac{N_X}{N_P} = \frac{A/0.00175}{Q/qe} \frac{4\pi}{\Omega} \frac{1}{\eta}, \quad (1)$$

其中,  $N_X$  为 X 射线计数,  $N_P$  为入射离子计数,  $A$  为峰面积, 0.00175 为探测器定标后的道宽,  $Q$  为离子计数器计得的电量值 (单位:  $10^{-9}$  C),  $q$  为入射离子的电荷态,  $e$  为电子电量,  $\Omega$  为探测器的立体角 (0.0066 sr),  $\eta$  为不同的 X 射线能量对应的探测器的探测效率. 利用 (1) 式, 计算了入射离子电荷态分别为 10, 15, 20, 26 时 Au 的单离子 X 射线相对产

额如表 2 所示. 产额的误差大约为 11%, 主要来源于入射离子数量的测量误差 (大约 10%) 和 X 射线的计数统计误差 (大约 5%).

表 2 不同电荷态的特征 X 射线的产额/ $10^{-5}$  a.u.

电荷态	M $\zeta$	M $\alpha$	M $\gamma$	M $\delta$	M $\Sigma$
10	1.38	11.10	2.38	0.78	15.64
15	3.37	21.67	3.78	0.88	29.70
20	12.24	22.58	3.29	1.11	39.21
26	22.32	17.69	1.29	1.90	43.20

### 3.3 单离子 X 射线产额理论值的计算

为了说明离子的入射过程, 我们把入射离子的能量为按照每减少 0.12 MeV 分为一段, 用 SRIM2008 计算了在不同能量下入射 Au 靶过程中的能损和穿透深度, 计算结果列于表 3.

表 3 不同能量下入射 Au 靶过程中的能损、穿透深度和产生截面

部分	入射离子能量 /MeV	电子能损 /( $10^9$ eV/mm)	核能损 /( $10^9$ eV/mm)	穿透深度 / $10^{-8}$ m	M 壳层总的产生截面/ $10^4$ bar*			
					$q = 10$	$q = 15$	$q = 20$	$q = 26$
1	2.40	2.105	4.167	1.9132	5.80	7.50	21.10	26.44
2	2.28	2.022	4.243	1.9154	5.24	6.77	18.91	23.81
3	2.16	1.938	4.322	1.9169	4.70	6.07	17.03	21.42
4	2.04	1.855	4.405	1.9169	4.19	5.42	15.23	19.15
5	1.92	1.772	4.492	1.9157	3.71	4.80	13.45	16.90
6	1.80	1.689	4.582	1.9136	3.26	4.22	11.84	14.82
7	1.68	1.607	4.676	1.9099	2.84	3.67	10.33	12.95
8	1.56	1.526	4.774	1.9048	2.45	3.17	8.86	11.20
9	1.44	1.447	4.876	1.8978	2.09	2.70	7.55	9.50
10	1.32	1.369	4.982	1.8895	1.76	2.27	6.34	7.99
11	1.20	1.293	5.092	1.8794	1.45	1.87	5.24	6.60
12	1.08	1.219	5.205	1.8680	1.18	1.52	4.25	5.35
13	0.96	1.148	5.320	1.8553	0.93	1.20	3.36	4.22
14	0.84	1.007	5.436	1.8625	0.71	0.92	2.57	3.23
15	0.72	1.004	5.548	1.8315	0.52	0.68	1.89	2.38
16	0.60	0.992	5.650	1.8253	0.36	0.47	1.31	1.65
17	0.48	0.826	5.730	1.8303	0.23	0.30	0.84	1.06
18	0.36	0.699	5.759	1.8581	0.13	0.17	0.47	0.59
19	0.24	0.571	5.669	1.9231	0.06	0.08	0.21	0.26
20	0.12	0.404	5.225	2.1319	0.02	0.02	0.05	0.07

1 bar =  $10^5$  Pa.

所以单离子 X 射线产额理论值可以表示为<sup>[11]</sup>

$$Y = \sum_i N \sigma_i L_i, \quad (2)$$

其中  $N$  是靶原子密度 (atoms/cm<sup>3</sup>),  $\sigma_i$  是第  $i$  部分的 X 射线的产生截面,  $L_i$  是第  $i$  部分对应的穿透深度.

而在单电离条件下, Au 的 M 壳层 X 射线的产生截面(单电离)的理论值上可由下式计算<sup>[5]</sup>:

$$\sigma_M^X = \sum_{i=1}^5 \sigma_{M_i}^X, \quad (3)$$

其中  $\sigma_{M_i}^X$  为  $M_i$  支壳层空穴通过辐射跃迁产生 X 射线的截面, 而  $\sigma_{M_i}^X$  可以利用以下公式计算:

$$\frac{\sigma_{M1}^X}{\omega_1} = \sigma_{M1}, \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_{M2}^X}{\omega_2} = \sigma_{M2} + s_{12}\sigma_{M1}, \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_{M3}^X}{\omega_3} = \sigma_{M3} + s_{23}\sigma_{M1} + (s_{13} + s_{12}s_{23})\sigma_{M1}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{M4}^X}{\omega_4} = & \sigma_{M4} + s_{34}\sigma_{M3} + (s_{24} + s_{23}s_{34})\sigma_{M2} \\ & + (s_{14} + s_{12}s_{24} + s_{13}s_{34} \\ & + s_{12}s_{23}s_{34})\sigma_{M1}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{M5}^X}{\omega_5} = & \sigma_{M5} + f_{45}\sigma_{M4} + (s_{35} + s_{34}f_{45})\sigma_{M3} \\ & + (s_{25} + s_{23}s_{35} + s_{24}f_{45} + s_{23}s_{34}f_{45})\sigma_{M2} \\ & + (s_{15} + s_{12}s_{25} + s_{13}s_{35} + s_{14}f_{45} \\ & + s_{12}s_{23}s_{35} + s_{12}s_{24}f_{45} + s_{13}s_{34}f_{45} \\ & + s_{12}s_{23}s_{34}f_{45})\sigma_{M1}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\omega_i$  为  $M_i$  支壳层的荧光产额,  $f_{ij}$  和  $S_{ij}$  分别表示  $M_j$  支壳层的电子填充  $M_i$  支壳层空穴产生 CK(Coster-Kronig) 跃迁和超级 CK 跃迁的概率,  $\sigma_{M_i}$  为对应  $M_i$  支壳层的电离截面,  $\sigma_{M_i}$  可以根据 BEA 模型, 用下面公式计算<sup>[5,12]</sup>:

$$\sigma_{M_i}^{BEA} = \left( \frac{NZ^2\sigma_0}{U^2} \right) G(V), \quad (9)$$

其中  $N$  为  $i$  壳层的电子数,  $Z$  为入射离子的有效电荷数(这里我们用刘少织算法<sup>[13]</sup>算得 Xe<sup>10+</sup>, Xe<sup>15+</sup>, Xe<sup>20+</sup>, Xe<sup>26+</sup> 的有效电荷分别为 15.53, 17.65, 29.52, 33.12),  $\sigma_0 = \pi e^4 = 6.56 \times 10^{-14}$  cm<sup>2</sup>·eV<sup>2</sup>,  $U$  为电子的结合能,  $G(V)$  为折合速度的函数,  $V = v_p/v_i$  ( $v_p$  为入射离子的速度,  $v_i$  为  $i$  壳层电子的平均速度), 目前的研究工作中, 当

$V < 0.206$ , 近似认为  $G(V) = 4V^4/15$ . 由 (3)—(9) 式计算得到的不同电荷态的 Au 的 M 壳层 X 射线的产生截面如表 3 所示.

### 3.4 单离子 X 射线产额实验值和理论值比较

利用表 3 的数据和 (2) 式就可以计算出单离子 X 射线产额的理论值, 图 2 为产额的实验值和利用 BEA 模型计算的理论与入射离子电荷态的关系图. 虽然和动能相比势能较小 (Xe<sup>26+</sup> 的势能为 1.49 keV), 但两者都随着入射离子电荷态(势能)的增加而增加. 而虽然实验结果比 BEA 模型大两个量级, 但两者增加的趋势相似, 而且随着电荷态的增加, 两者之间的差距在减小.

由于 BEA 模型起源于质子或其他全裸核作用在原子上发生电离时产生的电离截面, 所以计算的产额为单电离条件下的理论值. 而本实验的 Xe<sup>q+</sup> 入射 Au 表面时, 与靶原子中的多个电子同时发生了作用, 引起了靶原子内壳层的多电离. 不同条件下产生靶原子的多电离态不同, 不同的多电离态对荧光产额的影响各不相同, 对于 Si, 当 L 壳层有 4 个电子被多电离时, Si 的 K 壳层 X 射线荧光产额最大为 0.282, 约为单电离的 5.6 倍<sup>[1]</sup>. 而对于 Au, 目前没有相关文献报道其内壳层产生多电离时, 荧光产额的具体数值, 但只要产生了多电离, 荧光产额就比单电离的大, 利用 BEA 模型计算的产额值就与实验值越接近. 因此, 当考虑到靶原子的多电离对荧光产额的影响后, BEA 模型将会与实验结果符合得较好. 另外, 由于 BEA 模型是基于经典来处理碰撞过程的非微扰近似理论, 所以有待于考虑到入射离子的轨道电子屏蔽效应等因素后来校正 BEA 模型.

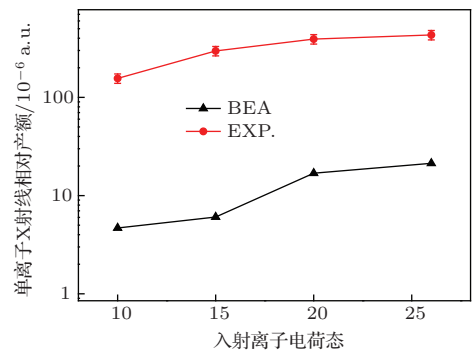


图 2 X 射线产额的实验值和理论值与入射离子电荷态的关系

## 4 结 论

我们观测和分析了动能为2.4 MeV的Xe<sup>q+</sup> ( $q = 10, 15, 20, 26$ )入射Au表面产生的Au的M $\zeta$ , M $\alpha$ , M $\gamma$ 和M $\delta$ 特征X射线发射, 计算了Au的M壳层X射线的产额, 并将理论值与实验值进行了比较. 实验结果表明, 除M $\zeta$ 射线外, 其余特征X射线都有不同程度的能移, 这是因为碰撞过程中引起了靶原子内壳层的多电离, 多电离的程度主要取决于离子的外壳层电子分布; 单离子X射线产额随入射离子电荷态的增加而增加, 当考虑到多电离对荧光产额的影响后, BEA模型可对实验结果给出较好的预测, 而高电荷态离子与固体表面相互作用是一个复杂的多体问题, 有待于以后用多种因素来校正BEA模型.

衷心感谢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研究人员在实验上提供的帮助和讨论.

## 参考文献

- [1] Zhou X M, Zhao Y T, Cheng R, Wang X, Lei Y, Sun Y B, Wang Y Y, Xu G, Ren J R, Zhang X A, Liang C H, Li Y Z, Mei C X, Xiao G Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 083201 (in Chinese) [周贤明, 赵永涛, 程锐, 王兴, 雷瑜, 孙渊博, 王瑜玉, 徐戈, 任洁茹, 张小安, 梁昌慧, 李耀宗, 梅策香, 肖国青 2013 物理学报 **62** 083201]
- [2] Zhou X M, Zhao Y T, Ren J R, Cheng R, Lei Y, Sun Y B, Xu G, Wang Y Y, Liu S D, Xiao G Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 113402
- [3] Luo X W, Hu B T, Zhang C J, Wang J J, Chen C H 2010 *Phys. Rev. A* **81** 052902
- [4] Cui Y, Yang S S, Yang Z H, Xu J Z, Zang H Q, Xu X, Shao J X, Liu Z Y, Xiao G Q, Zhang X A, Zhao Y T, Zhang Y P, Chen X M 2008 *Science in China G* **38** 1023 (in Chinese) [崔莹, 杨生胜, 杨治虎, 徐进章, 张红强, 徐徐, 邵剑雄, 刘兆远, 肖国青, 张小安, 赵永涛, 张艳萍, 陈熙萌 2008 中国科学 G 辑 **38** 1023]
- [5] Liang C H, Zhang X A, Li Y Z, Zhao Y T, Mei C X, Cheng R, Zhou X M, Lei Y, Wang X, Sun Y B, Xiao G Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 063202 (in Chinese) [梁昌慧, 张小安, 李耀宗, 赵永涛, 梅策香, 程锐, 周贤明, 雷瑜, 王兴, 孙渊博, 肖国青 2013 物理学报 **62** 063202]
- [6] Liang C H, Zhang X A, Li Y Z 2013 *Nuclear Physics Review* **30** 63 (in Chinese) [梁昌慧, 张小安, 李耀宗 2013 原子核物理评论 **30** 63]
- [7] Zhang X A, Zhao Y T, Hoffmann D, Yang Z H, Chen X M, Xu Z F, Li F L, Xiao G Q 2011 *Laser Part. Beams* **29** 265
- [8] Chen X M, Jiang L J, Zhou P, Zhou C L, Gao Z M, Qiu X Y, Cui Y, Wang X A, Lou F J, Lü X Y, Jia J J, Chen L, Shao J X, Lü Ying, Wang F 2011 *Chin. Phys. B* **20** 013402
- [9] Albert C T, Janos K, David T A, Eric M G, Malcolm R H, Jeffrey B K, Yan W L, Arthur L R, James H U, Kwang J K, Ingolf L, Piero P, Herman W, Gwyn P W, James H S 2009 *X-ray Data Booklet* (Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory)p16
- [10] Awaya Y, Kambara T, Kanai Y 1999 *International Journal of Mass Spectrometry* **192** 49
- [11] Mei C X, Zhao Y T, Zhang X A, Ren J R, Zhou X M, Wang X, Lei Y, Liang C H, Li Y Z, Xiao G Q 2012 *Laser Part. Beams* **30** 665
- [12] Gryziński M 1965 *Phys. Rev.* **138** A 336
- [13] Hu Q S, Yang Y C 2002 *J. YC. Uni. (Natural Science)* **24** 15 (in Chinese) [胡乔生, 杨衍超 2002 宜春学院学报 (自然科学) **24** 15]

# Study of X-ray spectrum emitted due to the impact of $^{129}\text{Xe}^{q+}$ on different ion's charge on Au\*

Liang Chang-Hui<sup>1)</sup> Zhang Xiao-An<sup>1)†</sup> Li Yao-Zong<sup>1)</sup> Zhao Yong-Tao<sup>2)</sup> Mei Ce-Xiang<sup>1)</sup>  
Zhou Xian-Ming<sup>2)</sup> Xiao Guo-Qing<sup>2)</sup>

1) (*Ion beam & Optical Physical joint Laboratory of Xianyang Normal University and Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Xianyang 712000, China*)

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

( Received 10 June 2014; revised manuscript received 16 September 2014 )

## Abstract

We report the experiment data of X-ray spectra produced by the impact of  $\text{Xe}^{q+}$  ( $q = 10, 15, 20, 26$ ) with 2.4 MeV kinetic energy on Au surface in the National Laboratory of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou. Results show that there is different broadening of Au M X-ray owing to multiply ionized effect in the collision with heavy ions, the degree of ionization mainly depends on the distribution of the electronic states in the ions' outer shell. The yield of X-ray is calculated and compared with BEA (binary encounter approximation) model, and the effect of ion charge state on the X-ray yield is also discussed.

**Keywords:** X-ray, yield, BEA model, charge state

**PACS:** 32.30.Rj, 32.70.Jz, 34.50.Fa

**DOI:** 10.7498/aps.64.053201

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11075135), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2010JM1012), and the Scientific Research Program of Education Bureau of Shaanxi Province, China (Grant No. 14JK1803).

† Corresponding author. E-mail: [zhangxiaoan2000@126.com](mailto:zhangxiaoan2000@126.com)