



Bragg峰能区Xe<sup>20+</sup>与不同靶作用产生的X射线

梁昌慧 张小安 周贤明 赵永涛 肖国青

X-rays produced by interaction of Xe<sup>20+</sup> with different targets in Bragg peak energy region

Liang Chang-Hui Zhang Xiao-An Zhou Xian-Ming Zhao Yong-Tao Xiao Guo-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 183201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210215

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210215>

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

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

<sup>129</sup>Xe<sup>q+</sup>离子入射Cu靶表面激发的近红外光谱线和X射线谱

<sup>129</sup>Xe<sup>q+</sup> induced near-infrared light and X-ray emission at Cu surface

物理学报. 2020, 69(21): 213301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200500>

近Bohr速度I<sup>20+</sup>离子在不同靶面上的L壳层X射线辐射

L-shell X-rays from near Bohr-velocity I<sup>20+</sup> ions impacting on various targets

物理学报. 2021, 70(2): 023201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201236>

CsI光阴极在10100 keV X射线能区的响应灵敏度计算

Calculation of CsI photocathode spectral response in 10–100 keV X-ray energy region

物理学报. 2018, 67(8): 085203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180029>

低速Xe<sup>q+</sup>(4q20)离子与Ni表面碰撞中的光辐射

Visible light emission from surface of nickel bombarded by slow Xe<sup>q+</sup> (4 q 20) ion

物理学报. 2018, 67(8): 083201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172570>

双能X射线光栅相衬成像的研究

Research on dual energy grating based X-ray phase contrast imaging

物理学报. 2017, 66(1): 018701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.018701>

等离子体中X射线透过率分析及潜在通信应用研究

X-ray transmission characteristics and potential communication application in plasma region

物理学报. 2019, 68(4): 040401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181973>

Bragg 峰能区  $\text{Xe}^{20+}$  与不同靶作用产生的 X 射线\*梁昌慧<sup>1)</sup> 张小安<sup>1)2)†</sup> 周贤明<sup>1)3)</sup> 赵永涛<sup>2)3)</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)

3) (西安交通大学理学院, 西安 710049)

(2021 年 1 月 28 日收到; 2021 年 5 月 7 日收到修改稿)

依托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, 测量了动能为 6.0 MeV 的  $\text{Xe}^{20+}$  离子与 V, Fe, Ni, Cu, Zn 靶表面作用产生的特征 X 射线谱, 分析了能量为 1.60 keV 的 X 射线的产生机制, 并利用经典过垒模型计算了  $\text{Xe}^{20+}$  与不同靶作用时第一代空心原子在上表面的存在时间. 结果表明: 对于没有初始 M 空穴的  $\text{Xe}^{20+}$  离子与不同靶相互作用时, 实验中没有观察到 Xe 的  $M\alpha$  X 射线, 而观察到了能量为 Xe 的  $M\alpha$  X 射线的两倍的 X 射线, 称此线为 Xe 的  $M\alpha\alpha$  X 射线, 认为其是由 Xe 在靶的上表面的双电子单光子过程产生的.

**关键词:** 高电荷态离子, X 射线, 布拉格峰能区, 双电子单光子

**PACS:** 32.30.Rj, 34.50.Fa, 34.80.Dp, 79.20.Rf

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210215

## 1 引言

高电荷态离子 (highly charged ion, HCI) 进入介质沿着离子径迹在单位路程上的能量损失曲线呈现布拉格 (Bragg) 曲线形状, 在接近射程末端的 Bragg 峰值附近释放其大部分能量. 在 Bragg 峰附近, HCI 的能损机制研究不仅在重离子医学辐照治疗、重离子驱动的高能量密度物理、惯性约束聚变等应用方面具有重要价值. 而且, 其与介质原子碰撞产生的内壳层过程研究是天体等离子体、受控核聚变等离子体等极端条件下原子物理的重要前沿课题<sup>[1-7]</sup>.

Bragg 峰能区带电粒子的速度在玻尔速度 ( $v_0$  为  $2.19 \times 10^6$  m/s) 附近, 该能区离子与固体中原子碰撞产生的内壳层过程具有特殊的复杂性. 对于小于玻尔速度的低速离子, 携带动能不足以产生

内壳层电离过程, 其与固体作用的主要过程是从表面原子中俘获电子的退激和中性化过程<sup>[8,9]</sup>. 对于快速重离子, 内壳层过程主要以直接库仑电离为主<sup>[10-12]</sup>. 而在 Bragg 峰能区, 入射离子既有足够的能量接近靶原子, 还有足够的时间保持原有电荷态记忆, 与靶原子发生相互作用形成分子轨道, 因此, Bragg 峰能区的内壳层过程极为复杂, 除了直接库仑电离, 还可能存在多电子关联激发、准分子电子晋升等机制.

以往的相关研究主要集中在小于玻尔速度的低能区<sup>[13,14]</sup> 和中高能区<sup>[15-17]</sup>, 而在布拉格峰能区, 受到实验条件的限制, 相关的实验研究较少, 现有理论模型的实用性也有待验证. 在该能区, 由于内壳层过程的复杂性, 存在一些有趣且悬而未解的问题. 本文研究动能为 6.0 MeV、速度为  $1.36v_0$  的重离子  $\text{Xe}^{20+}$  与不同靶表面作用产生的中心能量为 1.60 keV 的特征 X 射线谱, 其值等于 Xe 的特征

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11505248, 11605147) 和陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2020JM-624) 资助的课题.

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

M X 射线 (0.80 keV) 的两倍, 是既不属于靶原子也不属于炮弹离子的特征 X 射线. Song 等<sup>[2]</sup> 研究了能量为 350—600 keV 的  $Xe^{q+}$  ( $q = 27—30$ ) 离子与 Al, Mo 和 Be 表面相互作用过程中的 X 射线辐射, Zhang 等<sup>[18]</sup> 研究了能量为 350—600 keV 的  $Xe^{30+}$  离子与 Au 表面相互作用过程中的 X 射线辐射, Zhao 等<sup>[19]</sup> 研究了能量为 350 keV 的  $Xe^{q+}$  ( $q = 27—30$ ) 离子与 Be 表面相互作用过程中的 X 射线辐射, 都观察到了此线, 并给出了不同的解释. 本文将对该谱线的发射机制进行进一步的分析.

## 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 号实验终端上完成的, 实验平台示意图如图 1 所示. 束流  $Xe^{20+}$  由 14.5 GHz 电子回旋共振离子源 (electron cyclotron resonance ion source, ECRIS) 通过分析磁铁在不同的电压下引出, 再经过加速管加速、聚焦、准直后进入具有电磁屏蔽的超高真空 (约  $10^{-10}$  Pa) 球形靶室, 垂直轰击靶表面中心. 靶的面积约为  $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ , 厚度为 0.1 mm<sup>[20,21]</sup>.

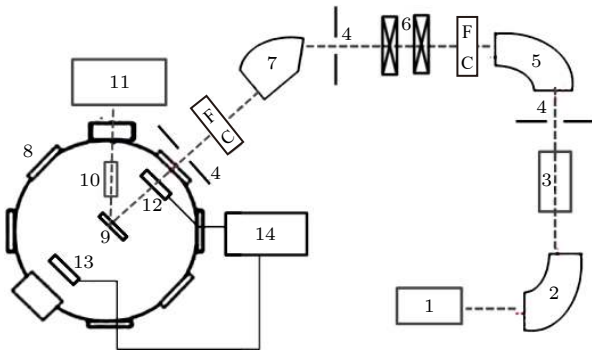


图 1 实验平台示意图 (1, ECR 离子源; 2, 分析磁体; 3, 高压加速平台; 4, 四级光阑; 5, 90°分析磁体; 6, 四极透镜; 7, 60°分析磁体; 8, 超高真空球形靶室; 9, 靶; 10, 硅漂移探测器; 11, X 射线获取系统; 12, 穿透式法拉第圆筒; 13, 法拉第圆筒; 14, 离子数获取系统)

Fig. 1. Schematic drawing of experiment setup. 1, ECR ion source; 2, analyzing magnet; 3, high volt accelerate platform; 4, four-stage aperture; 5, 90° deflection magnet; 6, magnetic quadrupled lens; 7, 60° deflection magnet; 8, ultra-high vacuum target chamber; 9, target; 10, silicon drift detector; 11, X-ray recording system; 12, penetrable faraday cup; 13, common faraday cup; 14, projectile number recording system.

离子与靶相互作用所产生的 X 射线利用 AMPTEK 公司研制的 XR100 SDD 型硅漂移探测器

进行探测. 探测器的有效探测面积为  $7\text{ mm}^2$ , 探头前的铍窗厚度为  $12.5\text{ }\mu\text{m}$ , 在 5.9 keV 峰位处的能量分辨为 139 eV (半高宽/FWHM). 当增益为 100 时, 探测器的有效能量测量范围为 0.5—14.3 keV, 探测效率如图 2 所示, 可以有效地阻止次级电子发射对 X 射线谱的影响. 探测器探头对准靶室中心, 离靶中心 32.52 mm, 并与靶表面成  $45^\circ$  夹角, 探测立体角为 0.0066 sr. 实验前用  $^{55}\text{Fe}$  和  $^{241}\text{Am}$  放射源对探测器进行了标定. 为避免二次电子发射的影响, 联合使用了穿透式法拉第筒和常规法拉第筒对入射离子计数进行了间接的测量<sup>[21]</sup>.

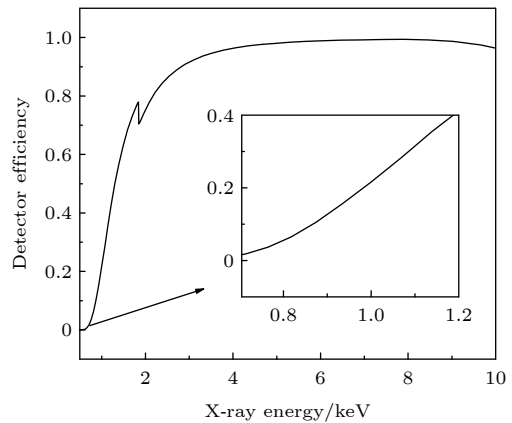


图 2 探测器的探测效率图  
Fig. 2. Efficiency values of the detector.

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 $Xe^{20+}$ 与不同靶表面作用产生的特征 X 射线谱

入射离子数目归一化后, 6.0 MeV 的  $Xe^{20+}$  离子分别与 V, Fe, Ni, Cu 和 Zn 靶表面相互作用产生的特征 X 射线谱图 (对 1.60 keV 谱线进行了高斯拟合) 见图 3, 通过和 LBNL<sup>[22]</sup> 提供的数据对比后可知: 图中能量为 4.11 keV, 4.42 keV, 4.94 keV 的谱线分别对应 Xe 的  $L\alpha_{1,2}$ ,  $L\beta_{1,4}$ ,  $L\beta_{2,15}$  特征 X 射线; 图 3(c) 中能量为 0.87 keV 的为 Ni 的  $L\beta_1$  特征 X 射线; 图 3(d) 中能量为 0.93 keV 的为 Cu 的  $L\alpha_{1,2}$  特征 X 射线; 图 3(e) 中能量为 1.01 keV 的为 Zn 的  $L\alpha_{1,2}$  特征 X 射线. 另外, 5 个图中都出现了能量为 1.60 keV 的特征 X 射线, 其既不是靶原子的特征 X 射线, 也不是 Xe 离子的特征 X 射线, 其值等于 Xe 的特征 M X 射线 (0.80 keV) 的两倍.

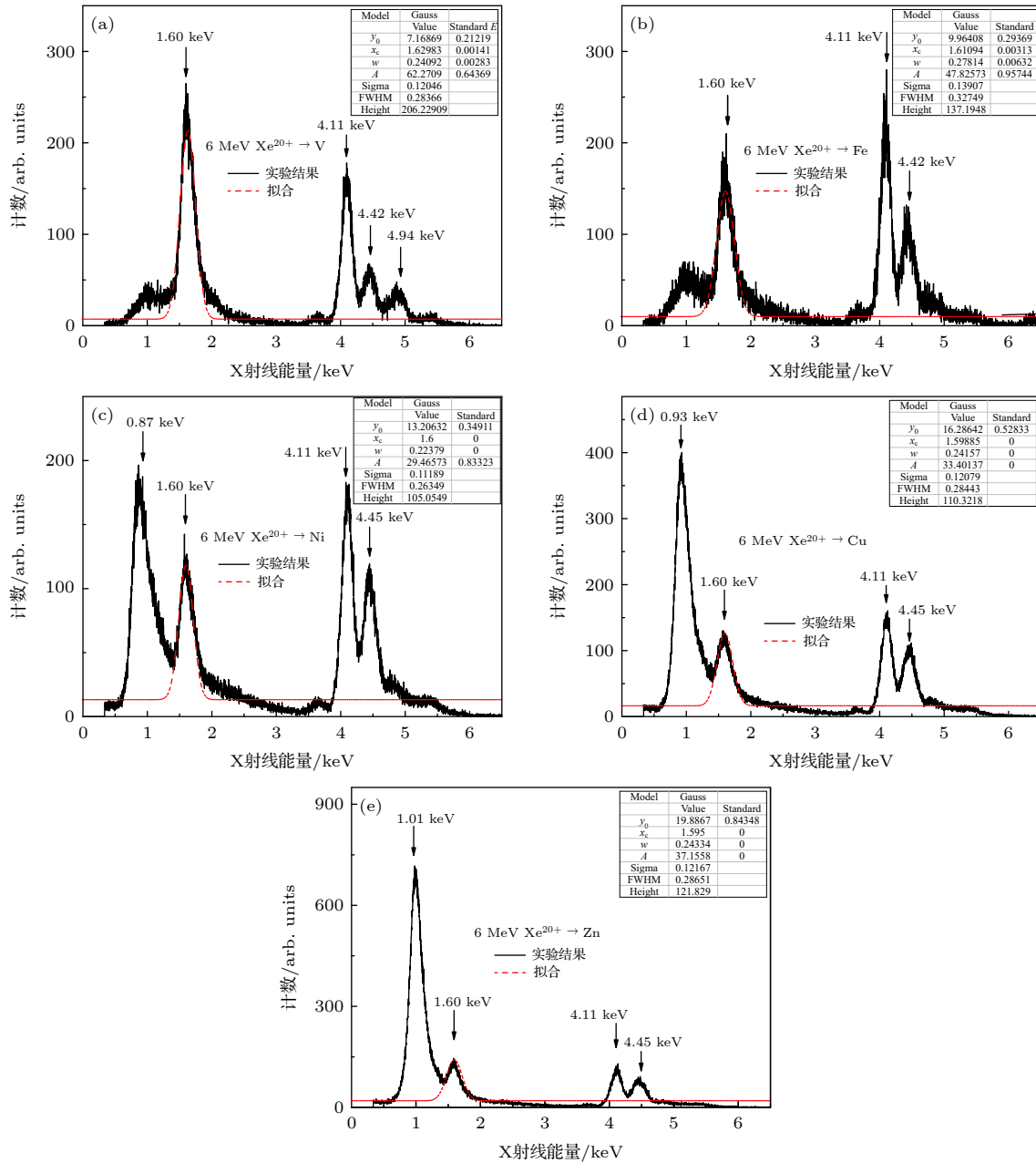


图 3 动能为 6.0 MeV 的  $Xe^{20+}$  离子与不同靶相互作用产生的特征 X 射线谱 (a) V; (b) Fe; (c) Ni; (d) Cu; (e) Zn

Fig. 3. Characteristic of X-ray spectra induced by the impact of  $Xe^{20}$  ion with 6.0 MeV kinetic energy on different target surface: (a) V; (b) Fe; (c) Ni; (d) Cu; (e) Zn.

以前的研究中也观察到了 1.60 keV 的 X 射线, 对此线的解释有两种情况: 一种情况认为是高里德伯态的退激, 如文献 [2,18]; 另一种情况认为是双电子单光子过程 (two-electron-one-photon, TEOP), 如文献 [19].

这里和以前的研究情况有两点不同: 一是入射离子能量不同; 二是入射离子  $Xe^{20+}$  的电子结构为  $[Ar]3d^{10}4s^24p^4$ , 没有初始 M 空穴. 对于炮弹不存在 M 壳层的初始空穴, 在碰撞过程中要发射此线,

需要先产生 M 空穴. 而 M 空穴可能是由上表面的高里德伯态原子退激过程中的内部双电子激发产生的 [23,24].

对应的 M 空穴的辐射退激有两种可能: 一种是高里德伯态的退激, 在这种情况下, 由于级联跃迁, 测量的谱线能量应该有一定的宽度, 比如: 利用 CROWN 程序计算得出 [2], 由高里德伯态  $30f-3d$  的跃迁能和  $4f-3d$  的跃迁能的差值为 640 eV, 而实验中测量的谱线是对称性较好的单峰, 谱线的

半高全宽约为 190 eV, 这主要来自于探测器的展宽, 此值远小于高里德伯态跃迁能的理论值, 因此, 可以排除这种机制. 另外一种双电子单光子过程, 即 M 壳层的两个空穴被外壳层的两个电子同时填充, 而只放出一个光子<sup>[25]</sup>. 所以, 认为这里的 1.60 keV X 射线应该是 Xe 在靶的上表面的 TEOP 过程产生的, 称此线为 Xe 的  $M\alpha\alpha$  X 射线. 当然, 这种猜想还需要进一步的实验验证.

### 3.2 $M\alpha\alpha$ X 射线产额与靶原子序数的关系

根据本次实验条件, 考虑到 X 射线发射是各向同性的, 以及离子在靶中的最大穿透深度远小于靶的厚度和探测器定标后的道宽为 0.00175 keV, 可以给出单离子 X 射线的产额为<sup>[21]</sup>

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

其中,  $C$  为 X 射线总计数,  $N$  为总离子数,  $A$  为峰面积,  $Q$  为电量值,  $q$  为入射离子的电荷态,  $e$  为电子电量,  $\Omega$  为探测器的立体角 (本次实验为 0.0066 sr),  $\eta$  为探测器的探测效率 (当 X 射线能量为 1.60 keV 时, 探测效率为 0.697). 利用 (1) 式, 分别计算了离子与不同靶作用时, 单离子  $M\alpha\alpha$  X 射线的产额, 图 4 为 Xe 的  $M\alpha\alpha$  X 射线产额与靶原子序数的关系图, 误差大约为 6%, 主要是由 X 射线的计数统计误差 (5%) 及入射离子计数误差 (3%) 所引起的. 从图 4 可以看出, 当  $Z$  从 23—28, 即从 V—Ni, 相对强度在减弱; 但当  $Z$  从 28—30, 即从 Ni—Zn, 相对强度在增强.

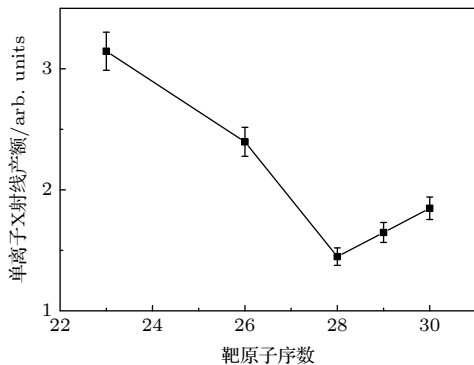


图 4 Xe 的  $M\alpha\alpha$  X 射线产额与靶原子序数的关系  
Fig. 4. Relation between relative yield of Xe  $M\alpha\alpha$  X ray and target atomic number.

如前所述, 这里认为  $M\alpha\alpha$  X 射线是 Xe 在靶的上表面的双电子单光子过程形成的. 既然  $M\alpha\alpha$

X 射线产生于靶的上表面, 那么 X 射线强度应该与第一代空心原子在靶的上表面的存在时间, 即 Xe 离子在靶表面形成第一代空心原子到碰到表面被剥离之前的时间有关.

根据经典过垒模型<sup>[14]</sup>, 第一代空心原子在上表面的存在时间可表示为

$$t = \frac{R_c}{\sqrt{\frac{2(E + \Delta E)}{M}}}, \quad (2)$$

其中  $M$  为入射离子的质量;  $R_c$  为炮弹开始捕获金属导带电子并形成空心原子时的临界距离, 可表示为

$$R_c = \frac{\sqrt{8q + 2}}{2W}; \quad (3)$$

$E$  为入射离子能量;  $\Delta E$  为离子的能量增益, 可表示为

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

(3) 式和 (4) 式中的  $q$  为入射离子的电荷态,  $W$  为金属的功函数.

由 (2)—(4) 式计算得到的动能为 6.0 MeV 的  $Xe^{20+}$  离子与不同靶作用时, 第一代空心原子在上表面的存在时间如表 1 所列. 图 5 为第一代空心原子在上表面的存在时间和原子序数之间的关系图, 误差为 2%.

表 1 6.0 MeV 的  $Xe^{20+}$  离子与不同靶作用产生的第一代空心原子在上表面的存在时间  
Table 1. Flight time of the first hollow atoms from 6.0 MeV  $Xe^{20+}$  ions above the different target.

靶	功函数 $W/eV$	能量增益 $\Delta E/eV$	临界距离 $R_c/arb.units$	存在时间 $t/10^{-16} s$
V	4.30	68.00	40.40	7.16
Fe	4.50	71.15	38.61	6.84
Ni	5.15	81.43	33.74	5.98
Cu	4.65	73.52	37.36	6.62
Zn	4.33	68.46	40.12	7.11

从图 5 可以看出, 第一代空心原子在上表面的存在时间, 从 V 到 Ni 在减弱, 但是从 Ni 到 Zn 在增强, 和图 4 中  $M\alpha\alpha$  X 射线相对产额随靶原子序数的变化规律一致, 进一步证明了此射线是 Xe 在靶的上表面的双电子单光子过程形成的, 不是下表面第二代空心原子的退激. 但对比图 5 和图 4 发现, 图 5 中 V 和 Zn 的空心原子存在时间差不多,

而图 4 中两者的 X 射线产额相差较多, 这是因为在 Bragg 峰能区附近的能量范围内, X 射线辐射会受到入射离子速度和弹靶组合等参数的影响, 不同的弹靶组合, 炮弹与靶原子之间的 X 射线辐射存在竞争现象. 图 1(e) 图中能量为 1.01 keV 的 Zn 的  $L\alpha_{1,2}$  特征 X 射线的峰计数大约为 700, 发射此 X 射线消耗了较多能量, 使得相应的  $M\alpha\alpha$  X 射线产额较低.

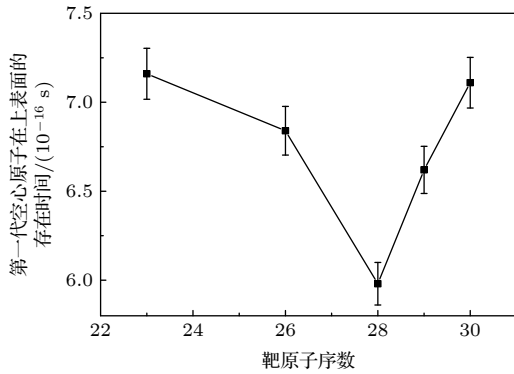


图 5 第一代空心原子在上表面的存在时间与靶原子序数的关系

Fig. 5. Relation between flight time of the first hollow atoms and target atomic number.

## 4 结 论

本文观测和分析了动能为 6.0 MeV 的  $Xe^{20+}$  离子分别与 V, Fe, Ni, Cu, Zn 靶表面作用产生的 1.60 keV 的特征 X 射线谱, 通过和以前对此线的两种解释做了比较分析. 结果表明: 对于没有初始空穴的  $Xe^{20+}$  离子, 在实验中没有观察到 Xe 的  $M\alpha$  X 射线, 而观察到了能量为 Xe 的  $M\alpha\alpha$  X 射线的两倍的 X 射线, 称此线为 Xe 的  $M\alpha\alpha$  X 射线, 是由 Xe 在靶的上表面的双电子单光子过程产生的. 并利用经典过垒模型计算了  $Xe^{20+}$  与不同靶作用时第一代空心原子在上表面的存在时间, 该存在时间和  $M\alpha\alpha$  X 射线产额随靶原子序数的变化规律一致, 进一步证明了此射线是 Xe 在靶的上表面的双电子单光子过程形成的.

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的老师在实验上提供的支持和帮助.

## 参考文献

[1] Zhou X M, Cheng R, Lei Y, Sun Y B, Wang Y Y, Wang X,

Xu G, Mei C X, Zhang X A, Chen X M, Xiao G Q, Zhao Y T 2016 *Chin. Phys. B* **25** 023402

[2] Song Z Y, Yang Z H, Zhang H Q, Shao J X, Cui Y, Zhang Y P, Zhang X A, Zhao Y T, Chen X M, Xiao G Q 2015 *Phys. Rev. A* **91** 042707

[3] Harsh M, Arvind K J, Mandeep K, Parjit S S, Sunita H 2014 *Nucl. Instrum. Methods B* **332** 103

[4] Bertol A P L, Trincavelli J, Hinrichs R, Vasconcellos M A Z 2014 *Nucl. Instrum. Methods B* **318** 19

[5] Watanabe H, Sun J, Tona M, Nakamura N, Sakurai M, Yamada C, Yoshiyasu N, Ohtani S 2007 *Phys. Rev. A* **75** 062901

[6] Mei C X, Zhang X A, Zhou X M, Zhao Y T, Ren J R, Wang X, Lei Y, Sun Y B, Cheng R, Xu G, Zeng L X 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 143401 (in Chinese) [梅策香, 张小安, 周贤明, 赵永涛, 任洁茹, 王兴, 雷瑜, 孙渊博, 程锐, 徐戈, 曾利霞 2017 物理学报 **66** 143401]

[7] Zhang X A, Mei C X, Zhang Y, Liang C H, Zhou X M, Zeng L X, Li Y Z, Liu Y, Xiang Q L, Meng H, Wang Y J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 213301 (in Chinese) [张小安, 梅策香, 张颖, 梁昌慧, 周贤明, 曾利霞, 李耀宗, 柳钰, 向前兰, 孟惠, 王益军 2020 物理学报 **69** 213301]

[8] Yamazaki Y, 2002 *Nucl. Instrum. Methods B* **193** 516

[9] Winter H P, Aumayr F 1999 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **32** R39

[10] Lapicki G, Ramana Murty G A V, Naga Raju G J, Reddy B S, Reddy S B, Vijayan V 2004 *Phys. Rev. A* **70** 062718

[11] Singh Y, Tribedi L C 2002 *Phys. Rev. A* **66** 062709

[12] Ouzina S, Amokrane A, Toumert I 2008 *Nucl. Instrum. Methods B* **266** 1209

[13] Briand J P, de Billy L, Charles P, et al. 1991 *Phys. Rev. A* **43** 565

[14] Burgdörfer J, Lerner P, Meyer F W 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5674

[15] Garcia J D, Fortner R J, and Kavanagh T M 1973 *Rev. Mod. Phys.* **45** 111

[16] Brandt W, Lapicki G 1974 *Phys. Rev. A* **10** 474

[17] Halpern A M, Law J, 1973 *Phys. Rev. Lett.* **31** 4

[18] Zhang X A, Zhao Y T, Hoffmann D H H, Yang Z H, Chen X M, Xu Z F, Li F L, Xiao G Q 2011 *Laser Part. Beams* **29** 265

[19] Zhao Y T, Xiao G Q, Zhang X A, Yang Z H, Zhang Y P, Zhan W L, Chen X M, Li F L 2007 *Nucl. Instrum. Methods B* **258** 121

[20] 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

[21] Liang C H, Zhang X A, Li Y Z, Zhao Y T, Zhou X M, Wang X, Mei C X, Xiao G Q 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 243201 (in Chinese) [梁昌慧, 张小安, 李耀宗, 赵永涛, 肖国青 2018 物理学报 **67** 243201]

[22] X-RAY DATA BOOKLET, Center for X-ray Optics and Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory [EB/OL] <http://xdb.lbl.gov/>[2020-07-09]

[23] Schuch R, Schneider D, Knapp D A, DeWitt D, McDonald J, Chen M H, Clark M W, Marrs R E 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1073

[24] Schuch R, Madzunkov S, Lindroth E, Fry D 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 5559

[25] Dong Z Q, Zhou S H, Ling J W, Hu A D, Ye Z Y 1990 *J. Atom. Mol. Phys.* **7** S1-241 (in Chinese) [董志强, 周书华, 李景文, 胡爱东, 叶宗垣 1990 原子与分子物理学报 **7** S1-241]

# X-rays produced by interaction of $\text{Xe}^{20+}$ with different targets in Bragg peak energy region\*

Liang Chang-Hui<sup>1)</sup> Zhang Xiao-An<sup>1)2)†</sup> Zhou Xian-Ming<sup>1)3)</sup>  
Zhao Yong-Tao<sup>2)3)</sup> Xiao Guo-Qing<sup>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, China*)

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

3) (*School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

( Received 28 January 2021; revised manuscript received 7 May 2021 )

## Abstract

The inner shell process produced by the collision of highly charged ion with medium atoms near the Bragg peak is an important frontier area of atomic physics under extreme conditions such as celestial plasmas and controlled nuclear fusion plasmas. Because of the special complexity of the inner shell process produced by the collision of ions with atoms in the Bragg peak energy region and the relevant experimental research is less, limited by the experimental conditions, there remain some interesting and unanswered questions.

We report the experimental data of X-ray spectra produced by the impact of  $\text{Xe}^{20+}$  with 6.0 MeV kinetic energy on V, Fe, Ni, Cu, and Zn surface in the National Laboratory of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, China. The generation mechanism of X-ray with energy of 1.60 keV is analyzed. The results show that when  $\text{Xe}^{20+}$  without initial holes interacts with different targets, the  $M\alpha$  X-ray of Xe is not observed, but X-ray with energy twice as great as that of Xe  $M\alpha$  X-ray is observed in the experiment, which is called Xe  $M\alpha\alpha$  X-ray and considered to be generated by the two-electron-one-photon process of Xe on the upper surface of the target. The existence time of the first-generation hollow atoms on the upper surface is calculated by using the classical over-barrier model when  $\text{Xe}^{20+}$  interacts with different targets, which is consistent with the variation of  $M\alpha\alpha$  X-ray yield with the atomic number of target, therefore it is further proved that  $M\alpha\alpha$  X-ray is formed by the two-electron one-photon process of Xe on the upper surface of the target. Of course, this conclusion needs further analyzing and verifying with more experimental data.

**Keywords:** highly charged ions, X-ray, Bragg peak energy region, two-electron-one-photon

**PACS:** 32.30.Rj, 34.50.Fa, 34.80.Dp, 79.20.Rf

**DOI:** [10.7498/aps.70.20210215](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210215)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11505248, 11605147) and the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province, China (Grant No. 2020JM-624) .

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