

近玻尔速度氙离子激发钒的K壳层X射线

周贤明 赵永涛 程锐 雷瑜 王瑜玉 任洁茹 刘世东 梅策香 陈熙萌 肖国青

Vanadium K-shell X-ray emission induced by xenon ions at near the Bohr velocity

Zhou Xian-Ming Zhao Yong-Tao Cheng Rui Lei Yu Wang Yu-Yu Ren Jie-Ru Liu Shi-Dong Mei Ce-Xiang Chen Xi-Meng Xiao Guo-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 027901 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.027901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.027901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Cd<sup>+</sup> 离子 5s<sup>2</sup>S<sub>1/2</sub> → 5p<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub> 电子碰撞激发截面和退激辐射光子极化度的理论研究](#)

[Theoretical study on electron-impact excitation cross section and polarization for 5s<sup>2</sup>S<sub>1/2</sub> → 5p<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub> of Cd](#)

物理学报.2015, 64(23): 233401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.233401>

[共面双对称条件下电子碰撞 Ar 原子单电离的一阶扭曲波 Born 近似](#)

[First-order distorted wave Born approximation for single ionization of Ar by electron impact in a coplanar doubly symmetric geometry](#)

物理学报.2014, 63(15): 153401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.153401>

[低能氢粒子沿不同角度轰击钨\(001\)表面的反射概率及入射深度分布的分子动力学研究](#)

[Molecular dynamics simulation of low-energy hydrogen atoms bombarding tungsten \(001\) surface at different angles and their depth distribution](#)

物理学报.2013, 62(22): 227901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.227901>

[共面不对称条件下低能电子碰撞电离 Ar\(3p\) 的三重微分截面](#)

[Triple differential cross section for the ionization of Ar\(3p\) by low-energy electron impact in the coplanar asymmetric geometry](#)

物理学报.2013, 62(18): 183401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.183401>

[近玻尔速度 Ne<sup>2+</sup> 离子穿过碳膜引起的电子发射](#)

[Secondary electron emission from carbon foils by Ne<sup>2+</sup> near Bohr velocity](#)

物理学报.2013, 62(15): 157901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.157901>

## 近玻尔速度氙离子激发钒的K壳层X射线\*

周贤明<sup>1)2)3)</sup> 赵永涛<sup>1)4)†</sup> 程锐<sup>1)</sup> 雷瑜<sup>1)</sup> 王瑜玉<sup>1)</sup> 任洁茹<sup>1)3)</sup>  
刘世东<sup>1)3)</sup> 梅策香<sup>4)</sup> 陈熙萌<sup>2)</sup> 肖国青<sup>1)</sup>

1)(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

2)(兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

4)(西安交通大学理学院, 西安 710049)

(2015年9月6日收到; 2015年10月17日收到修改稿)

测量了2.4—6.0 MeV  $Xe^{20+}$  离子轰击V靶表面过程中辐射的X射线. 计算了V的K壳层X射线发射截面, 并将实验结果与平面波恩近似、ECPSSR、两体碰撞近似的理论计算进行了对比. 讨论了近玻尔速度非对称碰撞过程中, BEA模型估算高电荷态重离子激发内壳层电离的修正因素. 结果表明, 综合考虑库仑偏转和有效电荷态修正后, BEA理论与实验结果符合较好.

**关键词:** 高电荷态重离子, X射线, 两体碰撞近似, 有效电荷

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

**DOI:** 10.7498/aps.65.027901

## 1 引言

基于原子物理, 天体物理等基础研究以及特殊材料制备、航天器件测试等实际应用的需要, 高电荷态离子与固体相互作用的机理研究受到了国内外学者的广泛关注, 也得到了一定的进展<sup>[1-5]</sup>. 高电荷态离子入射到固体表面时, 其主要与靶原子的壳层电子发生非弹性碰撞, 以电子能损的形式消耗其大部分能量, 引起靶原子内壳层电子的电离, 相应的空穴以辐射X射线和发射俄歇电子的方式进行退激. 相对于电子, X射线具有更大的吸收长度, 且与靶作用不会改变其能量, X射线发射研究是研究离子原子碰撞内壳层过程的一种重要手段. 对于相关作用的碰撞过程研究, 在低于玻尔速度的低能碰撞区, 实验上主要是利用晶体谱仪得到的高分辨X射线谱来分析靶表面附近空心原子的退激<sup>[6-8]</sup>, 理论上则建立了经典过垒模型(classical

over-barrier model)对这一过程进行描述<sup>[9]</sup>; 在大于玻尔速度的高能区, 大量工作主要集中于通过测量X射线的产生截面来研究内壳层的电离过程, 并且在某些碰撞体系中发展了较为成熟理论模型.

直接库仑电离、电子俘获和准分子晋升是高电荷态离子激发内壳层电子的三种基本通道. 对于 $Z_1 \ll Z_2$ ,  $v_p/v_i \gg 1$  ( $Z_1$ 是入射离子原子序数,  $Z_2$ 是靶原子序数,  $v_p$ 是入射离子速度,  $v_i$ 是目标电子速度)的高速非对称碰撞, 直接库仑电离是内壳层电子电离的主要机理, 其截面可以用两体碰撞近似(BEA)<sup>[10]</sup>, 平面波恩近似(PWBA)<sup>[11]</sup>和ECPSSR<sup>[12]</sup>理论来估算. 在 $Z_1 \leq Z_2$ ,  $v_p/v_i \geq 1$ 的非对称碰撞中, 除了直接电离, 内壳层的电离还需要考虑电子俘获的贡献<sup>[13]</sup>. 在 $Z_1 \approx Z_2$ ,  $v_p/v_i \ll 1$ 的低速近对称碰撞过程中, 内壳层空穴的产生以电子转移占主导地位, 此时的内壳层过程可以用准分子模型(quasi-molecular-orbital, MO)来描述<sup>[14]</sup>. 但是, 对于 $Z_1 > Z_2$ ,  $v_p/v_i \ll 1$ 的低速非对称碰撞

\* 国家自然科学基金(批准号: 11275241, 11505248, 11205225, 11375034, 11105192, 11275238)和陕西省教育厅科研计划(批准号: 14JK1803, 15JK1793)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaoyongtao@mail.xjtu.edu.cn

系统, 实验上研究较少, 截面数据比较匮乏<sup>[1-5]</sup>, 现有理论模型对内壳层过程的描述是否适用, 若适用, 该模型为精确估算电离截面是否需要修正, 该如何修正, 尚不明确, 这需要进一步的实验研究. 特别是在近玻尔速度能区, 入射离子虽然具有足够的能量来激发靶原子的内壳层电子, 但是受到靶原子核库仑场的作用, 实际碰撞能量会发生改变, 也不能简单地当作裸核处理, 电离截面与炮弹入射能、初始电荷态之间的关系如何, 这需要深入的实验研究. 我们初步实验探测发现近玻尔速度的Xe离子轰击V, Fe, Co等靶时, 能够激发靶原子的K壳层X射线, 相应的弹靶组合可以用来研究上述问题, 但是Fe, Co靶的X射线产生截面较低, 而V靶的截面大的多, 所以本文选用V靶作为研究对象.

本实验用2.4—6.0 MeV Xe<sup>20+</sup>离子(速度为0.86v<sub>0</sub>—1.36v<sub>0</sub>, v<sub>0</sub> = 2.19 × 10<sup>6</sup> m/s是玻尔速度)轰击V靶表面, 测量了V的K壳层X射线发射谱. 计算了X射线产生截面, 并将BEA, PWBA, ECPSSR的理论计算与实验值进行了比较. 讨论了0.043 ≤ v<sub>p</sub>/v<sub>i</sub> ≤ 0.068, Z<sub>1</sub>/Z<sub>2</sub> = 2.35的近玻尔速度非对称碰撞过程中库仑偏转、有效电荷态修正对BEA理论模型估算近玻尔速度高电荷态离子激发X射线产生截面的影响.

## 2 实验方法

本文实验是在中科院近代物理研究所320 kV高电荷态离子综合实验平台1#终端上进行的, 相关的实验方法已在前期文章中详细描述<sup>[3,15]</sup>. Xe<sup>q+</sup>离子由14.5 GHz电子回旋共振(ECR)离子源产生, 由15 kV初级加速电压引出, Xe<sup>20+</sup>离子由90°的电荷态分析磁铁偏转得到. 离子束经过加速、偏转、聚焦和准直后进入超高真空靶室, 垂直入射到靶材表面. 束流的发散度小于0.7°, 靶面上圆形束斑直径约为3 mm. 靶电流由电量积分仪进行记录, 真实束流强度由靶电流和二次电子发射产额修正得到, Q = Q<sub>t</sub>/(1 + γ/q) (Q<sub>t</sub>为测量到的靶上积分电量, γ为电子发射产额, q为入射离子初始电荷态). V的K X射线由硅漂移X射线探测器(SDD)进行测量. SDD器的探头面积为7 mm<sup>2</sup>, 探头前面的铍窗厚度为12.5 μm, 对于Fe<sup>55</sup>的Kα X射线其能量分辨率为136 eV. 探测器的能量探测范围约为0.5—14.3 keV. 探测器距离靶面上束斑80 mm, 与

束流方向成135°夹角, 探测立体角为0.0011 Sr. 探测器在实验前用<sup>55</sup>Fe和<sup>241</sup>Am源进行了刻度, 并由质子发射谱进行了刻度验证. 实验上所用钒靶的厚度为0.50 mm, 纯度为99.99%.

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 V的K X射线发射截面

图1给出了2.4—6.0 MeV的Xe<sup>20+</sup>离子轰击V靶产生特征X射线的束流强度归一谱. 实验同时观测到了入射离子的L壳层X射线和靶的K壳层X射线. 能量为4.952 keV的谱线为V的Kα X射线, 对应跃迁为2p-1s; 能量为5.427 keV的谱线为V的Kβ X射线, 发射于3p电子向1s空穴的填充过程.

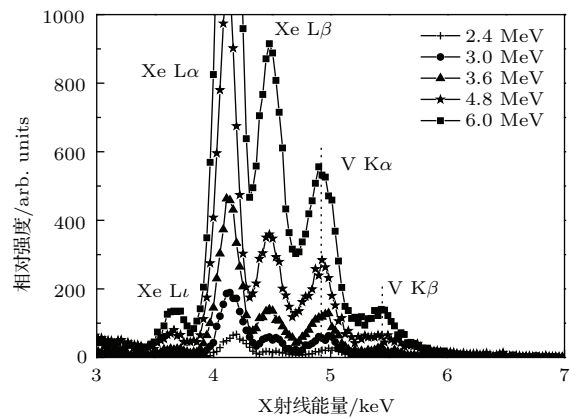


图1 Xe<sup>20+</sup>离子激发V的K壳层X射线归一谱

Fig. 1. Normalized argon K-shell X-ray induced by Xe<sup>20+</sup> ions impacting on V target.

实验中2.4—6.0 MeV Xe<sup>20+</sup>离子在V靶中的穿透深度为: 0.47—1.14 μm, 这远小于实验靶片的厚度, 因此, 实验用靶可以看成厚靶, V的K X射线发射截面σ<sub>X</sub>可以由厚靶公式进行计算<sup>[16]</sup>:

$$\sigma_X = \frac{1}{n} \frac{dY}{dE} \frac{dE}{dR} + \frac{\mu \cos \theta}{n \cos \varphi} Y, \quad (1)$$

式中n为靶原子体密度, dY/dE是产额函数Y(E)对能量E的斜率, dE/dR是入射离子单位路程上的能量损失, 由SRIM程序计算得到<sup>[17]</sup>, μ是靶材对自身特征X射线的吸收系数(1/cm)<sup>[18]</sup>, θ是束流方向与靶面法线方向的夹角, φ是探测器与靶面法线夹角; Y是X射线的单粒子产额, 由下面公式计算得到:

$$Y = \frac{N_X}{N_p \eta (\Omega/4\pi)}, \quad (2)$$

$N_X$  为探测器接收到的目标 X 射线总计数, 由实验谱线进行高斯拟合得到,  $N_p = Q/(q \times 1.6 \times 10^{-19})$  是观察时间内入射的离子个数,  $\eta$  是探测器对目标 X 射线的响应效率,  $\Omega$  是探测立体角. 实验产额测量误差主要产生于入射离子个数统计 (积分电量统计误差约为 10%), 射线计数统计 (原始谱线高斯拟合误差约为 5%), 探测立体角 (探测距离测量误差约为 2%), 经过误差传递处理以后, 最大值约为 11%; 截面计算误差主要来源于产额测量和能损计算 (约为 10%), 最大不确定度约为 15%.

表 1 给出了不同能量  $Xe^{20+}$  离子入射时, V 靶 K 壳层 X 射线的单粒子产额和发射截面数据. 显然, 随着入射离子动能的增加, 射线产额和发射截面也相应增加. 单粒子产额大约为  $10^{-6}$  量级, 截面约为 1 barn 量级. 6.0 MeV  $Xe^{20+}$  离子的单核子能量相当于 46 keV 质子的能量, 但是, 其激发钒 K X 射线的发射截面约为质子轰击时的  $10^4$  倍 [19], 这说明, 在近玻尔速度能区, 以相同的单核子能量入射, 重离子激发靶原子的特征 X 射线发射截面比轻子入射时大约大四个量级.

表 1  $Xe^{20+}$  离子激发 V 的 K 壳层 X 射线产额和发射截面

Table 1. V K-shell X-ray yield and production cross section induced by  $Xe^{20+}$  ions impact.

入射能量/MeV	产额	截面/barn
2.4	$3.31 \pm 0.36 \times 10^{-7}$	$0.38 \pm 0.06$
3.0	$7.69 \pm 0.84 \times 10^{-7}$	$0.64 \pm 0.09$
3.6	$1.50 \pm 0.17 \times 10^{-6}$	$0.94 \pm 0.14$
4.8	$3.23 \pm 0.36 \times 10^{-6}$	$1.46 \pm 0.22$
6.0	$5.86 \pm 0.64 \times 10^{-6}$	$2.18 \pm 0.33$

### 3.2 实验结果与不同理论计算的对比

X 射线发射截面与相应内壳层电子的电离截面、X 射线荧光产额有关:  $\sigma_X = \sigma_i \times \omega$ , ( $\omega$  为荧光产额,  $\sigma_i$  为电离截面). 当荧光产额一定时, X 射线的产生截面实际反应的是内壳层的电离截面. 一般而言, 在高电荷态离子原子碰撞过程中, 由于 L 和 M 壳层电子的多电离, K 壳层 X 射线的荧光产额会与原子数据有所不同. 然而, 对于固体靶, 使用单电离荧光产额对 X 射线产生截面计算造成的误差不会超过 10%, 这是因为 K 壳层的荧光产额不会改变太大, 除非 L 壳层电子完全电离 [20]. Tawara 等

的实验证明固体靶中 L 壳层多电离的概率很小, K 壳层荧光产额基本是一个常数 [21]. 本实验中没有观察到 V 的 K 壳层 X 射线明显的频移, 这说明 L 壳层没有发生多电离. 因此, 这里我们使用单电离的荧光产额来计算 X 射线发射截面, 对于 V, 其值为 0.243 [22].

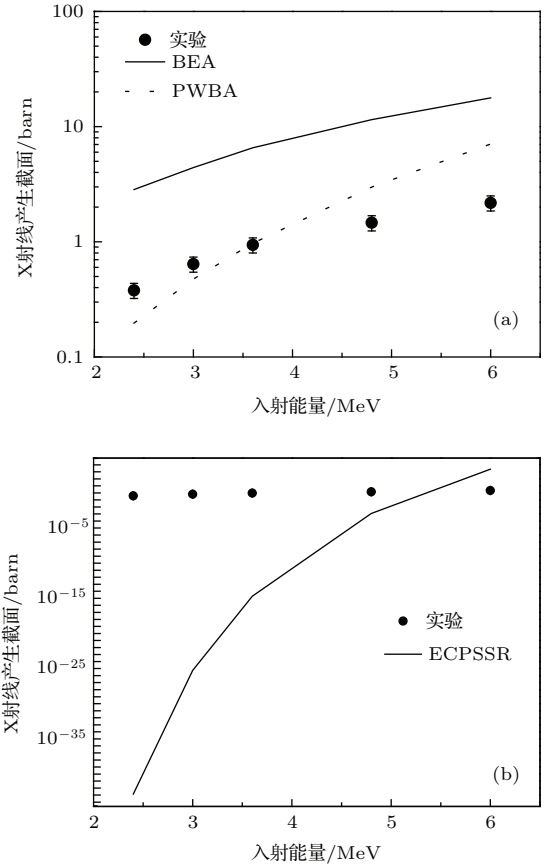


图 2  $Xe^{20+}$  离子激发 V 的 K 壳层 X 射线产生截面实验结果与理论计算值 (a) BEA, PWBA; (b) ECPSSR  
Fig. 2. Experimental V K-shell X-ray production cross section induced by  $Xe^{20+}$  ions, and various theoretical calculations: (a) BEA, PWBA; (b) ECPSSR.

图 2 给出了近玻尔速度  $Xe^{20+}$  激发 V 的 K 壳层 X 射线实验截面与不同的理论计算值. 平面波恩近似的估算, 在入射能为 3.6 MeV 时与实验结果比较符合, 但是, 在大于 3.6 MeV 的能量区域内高估了实验结果, 而在小于 3.6 MeV 的区域内又低估了实验值; 并且随着炮弹离子动能的增加, 估算值比实验值增加的快. ECPSSR 理论, 基于 PWBA 模型, 考虑了入射离子的能量损失、靶核库仑场对炮弹离子的偏转、被电离目标电子的扰动处理、电子质量的相对论调整等修正, 对于质子和  $Z_1 \ll Z_2$  碰撞系统中中、高能重离子激发的内壳层电离截面给出了比较准确的估算; 但是此理论对于入射离子和

靶原子参数的修正具有局限性, 在本实验的碰撞系统中, 相关修正过于严重, 导致其估算随能量迅速增加, 在 2.4 MeV 时比实验低了 60 多个量级, 而在 6.0 MeV 时又比实验值高约 3 个量级, 与实验值完全不符. 这说明, 近玻尔速度  $Z_1 \ll Z_2$  碰撞中, 高电荷态离子引起靶原子内壳层电子的电离过程不适合用平面波恩近似的方法来处理.

BEA 理论估算, 虽然高估了实验结果约一个量级, 但是随着炮弹离子动能的增加, 给出了与实验相同的生长趋势. 在低速碰撞过程中, 入射离子与靶核之间的库仑相互作用不能忽略, 其会改变入射离子的参数, 从而影响内壳层电离截面. 所以, 为了合理的描述近玻尔速度高电荷态离子引起内壳层电离的过程, 这里我们考虑对 BEA 进行修正.

### 3.3 BEA 理论计算的修正

BEA 理论将带电离子引起的内壳层电离过程看作是入射离子核与被电离电子之间的经典两体碰撞过程. 通过运动离子与轨道电子之间的能量转移估算了内壳层电离截面, 将  $i$  壳层电子的电离截面写为<sup>[10]</sup>

$$\sigma_i^{\text{BEA}} = \left( \frac{NZ_1^2\sigma_0}{U^2} \right) G(V), \quad (3)$$

$N$  是  $i$  壳层电子数目,  $Z_1$  是入射离子核电荷数,  $U$  是  $i$  壳层电子结合能,  $\sigma_0 = \pi e^4$ ,  $G(V)$  是比值速度  $V = v_p/v_i$  的函数. 经典的 BEA 理论, 将入射离子看成是裸核, 电子看成是自由电子, 并且不考虑靶原子核的影响, 仅用其来确定被电离电子的速度, 具有一定的局限性.

Magno 等<sup>[23]</sup> 的研究表明, 低速碰撞下, 靶原子核的作用不可忽略, 在估算带电离子激发内壳层电离截面时库仑排斥 (CR) 的修正影响较为明显. 在靶核库仑场作用下, 入射离子一方面改变其运动轨迹, 一方面降低其运动速度, 减小与靶电子的有效碰撞能, 进而改变碰撞概率. 考虑库仑排斥的 BEA 理论 (BEA-CR) 对电离截面的估算可以写为<sup>[23]</sup>

$$\sigma_i(E_p) = \sigma_i(E_{p0}) \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{E_p/E_{p0}} \right]^2, \quad (4)$$

$E_p = E_{p0} - Z_1(E_e + U)$  是有效碰撞能,  $E_{p0}$  是入射离子的初始动能,  $E_e$  和  $U$  分别是电子的动能和结合能.

另外, 在  $v_p \ll v_i$  低速情况下, 入射离子受到靶原子的库仑排斥作用, 不可能无限近的接近靶原子, 在处理其与靶电子的碰撞时, 不能简单的将其看成裸核, 应该将其与其剩余电子整体考虑, 看成带电原子实. 因而, 在 BEA 理论中, 入射离子参数不能再用电荷数  $Z_1$ , 而是考虑剩余电子的屏蔽用有效电荷  $Z_{\text{eff}}$  来代替. 本文中, 有效电荷由 Slater 法则<sup>[24]</sup> 求得:  $Z_{\text{eff}} = Z_1 - \delta$ ,  $\delta$  是屏蔽常数. 对于  $\text{Xe}^{20+}$  离子, 电子结构为  $1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^{10} 4s^2 p^4$ , 所以其剩余电子的屏蔽常数为 29.52, 有效电荷态为 24.48. 综合考虑库仑偏转和有效电荷修正之后, BEA 对电离截面的估算可以表述为

$$\sigma_i^{\text{BEA}} = \left( \frac{NZ_{\text{eff}}^2\sigma_0}{U^2} \right) G(V) \times \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{E_p/E_{p0}} \right]^2. \quad (5)$$

图 3 对比了实验截面与不同修正 BEA 理论计算结果, BEA-CR 考虑了库仑偏转修正; BEA- $Z_{\text{eff}}$  考虑了有效电荷修正; BEA- $Z_{\text{eff}}$ -CR 同时考虑了库仑偏转和有效电荷修正. 结果显示, 库仑修正对低能碰撞更有效, 随着碰撞能的增加, 修正减弱, 在 2.4 MeV 时修正可到 50%, 6.0 MeV 时修正为 30%, 但是修正结果仍高估了实验值 5—6 倍; 有效电荷较库仑偏转对 BEA 的修正更为明显, 单独的有效电荷修正将计算降为原始计算的 0.22 倍, 但是仍然高估了实验值; 而同时考虑库仑偏转和有效电荷修正, 在实验误差范围内 BEA- $Z_{\text{eff}}$ -CR 的估算与实验符合较好. 这表明, 在近玻尔速度能区, 高电荷态

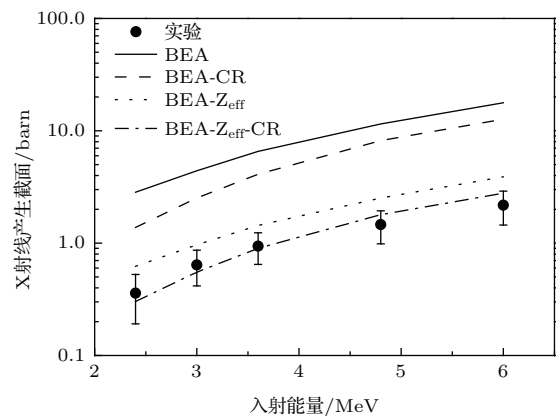


图 3  $\text{Xe}^{20+}$  离子激发 V 的 K 壳层 X 射线产生截面实验结果与原始 BEA、不同修正 BEA 理论计算值

Fig. 3. Experimental V K-shell X-ray production cross section induced by  $\text{Xe}^{20+}$  ions impact and theoretical calculations of original BEA and BEA with various corrections.

重离子激发内壳层的电离截面估算不仅要考虑已知的库仑偏转的影响, 还要考虑入射离子有效电荷态的修正.

## 4 结 论

实验测量了  $0.86v_0$ — $1.36v_0$   $\text{Xe}^{20+}$  离子激发 V 靶的 K 壳层 X 射线, 计算了 X 射线的发射截面, 并将其与理论计算值进行了比较. 结果分析表明, 近玻尔速度重离子激发 X 射线产生截面为 1 barn 量级, 比质子入射时约大 4 个量级. 近玻尔速度非对称碰撞过程中, V 原子 K 壳层电子的电离可以看成是  $\text{Xe}^{20+}$  离子与轨道电子的两体碰撞过程; 对于 X 射线产生截面的估算, 可以利用 BEA 模型但要同时考虑库仑偏转和入射离子有效电荷态的修正.

感谢 320 kV 实验平台工作人员对实验的技术支持和帮助.

## 参考文献

- [1] Mei C X, Zhang X A, Zhao Y T, Zhou X M, Ren J R, Wang X, Lei Y, Sun Y B, Cheng R, Wang Y Y, Liang C H, Li Y Z, Xiao G Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 103403
- [2] Ghanbari-Adivi E, Eskandari S 2015 *Chin. Phys. B* **24** 013401
- [3] Zhou X M, Cheng R, Lei Y, Sun Y B, Ren J R, Liu S D, Deng J C, Zhao Y T, Xiao G Q 2015 *Nucl. Instr. Meth. B* **342** 133
- [4] Liang C H, Zhang X A, Li Y Z, Zhao Y T, Mei C X, Zhou X M, Xiao G Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 053201 (in Chinese) [梁昌慧, 张小安, 李耀宗, 赵永涛, 梅策香, 周贤明, 肖国青 2015 物理学报 **64** 053201]
- [5] Li Y Z, Zhang X A, Liang C H, Zhao Y T, Zhou X M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 163202 (in Chinese) [李耀宗, 张小安, 梁昌慧, 赵永涛, 周贤明 2014 物理学报 **63** 163202]
- [6] Briand J P, Billy L de, Charles P, Essabaa S 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 159
- [7] Briand J P, de Billy L, Charles P, Essabaa S 1991 *Phys. Rev. A* **43** 565
- [8] Briand J P, Thuriez S, Giardino G, Borsoni G, Froment M, Eddrief M, Sébenne C 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1452
- [9] Burgdörfer J, Lerner P, Meyer F W 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5674
- [10] Garcia J D, Fortner R J, Kavanagh T M 1973 *Rev. Mod. Phys.* **45** 111
- [11] Johnson D E, Basbas G, McDaniel F D 1979 *At. Data Nucl. Data Tables* **24** 1
- [12] Brandt W, Lapicki G 1974 *Phys. Rev. A* **10** 474
- [13] Halpern A M, Law J 1973 *Phys. Rev. Lett.* **31** 4
- [14] Kavanagh T M, Der R C, Fortner R J, Cunningham M E 1973 *Phys. Rev. A* **8** 2322
- [15] Zhou X M, Zhao Y T, Cheng R, Wang Y Y, Lei Y, Wang X, Sun Y B 2013 *Nucl. Instr. Meth. B* **299** 61
- [16] Basbas G, Brandt W, Laubert R 1973 *Rhys. Rev. A* **7** 983
- [17] Dabich E, Paul H, Marwick D J, Cuomo G A, Poeter W A <http://www.srim.org/SRIM/SRIMLEGL> [2015-07-26]
- [18] Pajek M, Kobzev A P, Sandrik R, Iikhamov R A, Kuzmurodov S H 1989 *Nucl. Instr. Meth. B* **42** 346
- [19] Cipolla S J, Verzani C J 1995 *Nucl. Instr. Meth. B* **99** 18
- [20] Meyerhof W E, Anholt R, Saylor T K, Lazarus S M, Little A 1976 *Phys. Rev. A* **14** 1653
- [21] Tawara H, Richard P, Gray T J, Newcomb J, Jamison K A, Schmiedekamp C, Hall J M 1978 *Phys. Rev. A* **18** 1373
- [22] Krause M O 1979 *J. Phys. Chem. Ref.* **8** 307
- [23] Magon C, Milazzo M, Pizzi C, Porro F, Rota A, Riccobono G 1979 *Nuovo Cimento A* **54** 277
- [24] Slater J C 1930 *Phys. Rev.* **36** 57

# Vanadium K-shell X-ray emission induced by xenon ions at near the Bohr velocity\*

Zhou Xian-Ming<sup>1)2)3)</sup> Zhao Yong-Tao<sup>1)4)†</sup> Cheng Rui<sup>1)</sup> Lei Yu<sup>1)</sup> Wang Yu-Yu<sup>1)</sup>  
Ren Jie-Ru<sup>1)3)</sup> Liu Shi-Dong<sup>1)3)</sup> Mei Ce-Xiang<sup>4)</sup> Chen Xi-Meng<sup>2)</sup> Xiao Guo-Qing<sup>1)</sup>

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

2) (School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

3) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

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

( Received 6 September 2015; revised manuscript received 17 October 2015 )

## Abstract

The X-ray emission spectra produced by 2.4–6.0 MeV  $\text{Xe}^{20+}$  ions impacting on vanadium surface were measured. The V K-shell X-ray production cross sections were extracted from the experimental yield data and compared with the theoretical predictions of the binary encounter approximation (BEA), the plane wave born approximation (PWBA), and the energy-loss coulomb-repulsion perturbed-stationary-state relativist (ECPSSR). In order to predict reasonably the inner-shell ionization induced by highly charged heavy ions during the asymmetric collisions at near the Bohr velocity, the corrections of BEA model are discussed. It is found that the X-ray production cross section induced by highly charged heavy ions moving at near the Bohr velocity is on the magnitude of 1 barn, which is almost four orders of magnitude larger than that induced by proton. The ECPSSR, which is regarded as the best model to simulate the inner-shell ionization by light ions, may underestimate the experimental data at least three orders of magnitude. The PWBA model presents a prediction to the results on an order of magnitude better than the ECPSSR simulation, but gives a worse tendency than the BEA model. The BEA calculations, corrected both by Coulomb repulsion and effective nuclear charge, present the best agreement with the experimental results. It is proposed, that in the energy region near the Bohr velocity, during the asymmetric collisions of  $\text{Xe}^{20+}$  ions with V atoms, the K-shell electron of V is ionized by direct ionization, and that it can be described by the binary encounter process between the xenon ions and the bound electrons. The X-ray production cross section can be simulated by BEA model, but the corrections of Coulomb repulsion and effective nuclear charge must be considered.

**Keywords:** highly charged heavy ion, X-ray, binary encounter approximation, effective nuclear charge

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

**DOI:** 10.7498/aps.65.027901

\* Project supported by the National Natural Science foundation of China (Grant Nos. 11275241, 11505248, 11205225, 11375034, 11105192, 11275238) and the Scientific Research Program of Education Bureau of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 14JK1803, 15JK1793).

† Corresponding author. E-mail: zhaoyongtao@mail.xjtu.edu.cn