

近玻尔速度不同离子碰撞产生 Al 的 K X 射线*

周贤明¹⁾³⁾ 尉静¹⁾ 程锐²⁾ 梁昌慧¹⁾陈燕红²⁾ 赵永涛²⁾³⁾ 张小安^{1)2)†}

1) (咸阳师范学院, 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)

(2022 年 8 月 15 日收到; 2022 年 9 月 7 日收到修改稿)

在玻尔速度附近能区, 测量了 H^+ , He^{2+} 和 I^{22+} , Xe^{20+} 离子作用于 Al 靶时碰撞激发靶的 K 壳层 X 射线. 得到了相应 X 射线的发射截面, 并与不同理论模型进行对比. 研究表明, 单核子能量相同时, 轻离子入射激发的 X 射线产生截面比高电荷态重离子轰击时小了大约 4 个数量级. 质子、 He^{2+} 离子激发的实验截面可以由 ECPSSR 理论来很好的估算, 而 I^{22+} , Xe^{20+} 的实验结果与考虑有效电荷、低速库仑偏转修正的 BEA 理论计算符合较好.

关键词: 离子, X 射线, 截面, BEA, ECPSSR**PACS:** 34.35.+a, 32.80.Aa, 32.30.Rj, 34.10.+x**DOI:** 10.7498/aps.72.20221628

1 引言

带电离子轰击固体靶材表面, 与靶原子发生近距离相互作用会引起内壳层电子的电离, 相应空穴的回填过程向外辐射 X 射线或者发射俄歇电子. 相应 X 射线的辐射测量, 作为原子结构探索, 物质成分分析的一种重要方法, 不仅对于原子分子反应动力学、温稠密物质 X 射线诊断和天体物理等基础研究具有重要的意义, 而且在考古研究、环境检测、生物医药分析、新能源开发等方面具有广泛的应用^[1-7]. 随着加速器技术的发展和探测技术的进步, 高电荷态离子与物质相互作用的相关研究也一直备受关注. 大量研究表明, 对于轻离子入射, 或者炮弹离子 (Z_1) 远小于靶原子 (Z_2) 的碰撞, 靶的

电离主要以直接的库仑散射为主, 该过程可以由经典的两体碰撞近似 (BEA)^[8], 或者量子的平面波波恩近似 (PWBA) 以及 ECPSSR 理论模型, 即修正的 PWBA (PWBA 添加了能量损失 Energy-loss, 库仑偏转 Coulomb-repulsion, 束缚电子的微扰 Perturbed-Stationary-State, 相对论处理 Relativist 等修正) 来描述^[9,10]. 在近对称碰撞过程中, 除了直接电离, 电子转移机制对于内壳层空穴的产生也起到了重要的作用, 这可以用准分子 (quasi-molecular-orbital, Mo) 模型来估算^[11]. 然而, 对于低速 $Z_1 > Z_2$ 的非对称碰撞体系, 特别是在近玻尔速度附近能区, 入射离子不仅具有足够的动能与轨道电子发生弹性碰撞, 也具有足够的时间与靶原子发生相互作用并释放势能, 对于内壳层的电离, 除了直接的库仑电离外, 也可能存在电子转移, 准分子晋升等机

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2017YFA0402300)、国家自然科学基金 (批准号: 11505248, 11775042, 11875096)、咸阳师范学院学术带头人 (批准号: XSYXSD202108)、陕西省科技厅科研计划 (批准号: 2021JQ-812) 和咸阳师范学院重点培育项目 (批准号: XSYK21037) 资助的课题.

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

制, 如何利用现有的模型对该过程进行定量的估算, 目前尚无定论, 还需要进一步实验进行分析.

实验方面, 基于粒子激发 X 射线辐射 (PIXE) 元素分析标准数据测量和内壳层电离相关碰撞理论模型检验的需求, 对质子碰撞产生靶原子 X 射线的发射截面已经积累了丰富的数据. 但是对于重离子入射的情况, 尤其是对于玻尔速度附近能区的低速离子, 受到加速器的限制, 以及现有理论分析的局限性, 相关的研究还比较少 [12–15]. Al 在地壳中具有丰富的含量, 也是合金材料中的主要元素, 得益于其多种优良的性能, 在生活和工业上具有广泛的用途. 作为固态靶, Al 的原子结构比较简单, K 壳层 X 射线发射的原子数据只含有 K_{α} 谱线, 相关理论模型的对比分析较为简单. 因此, 本文选择固体 Al 靶作为研究对象.

本实验用 50–300 keV H^+ ($v_p = (1.41–3.46)v_0$), v_p 表示入射离子 (projectile) 的速度, $v_0 = 2.19 \times 10^6$ m/s 是玻尔速度)、100–600 keV He^{2+} ($v_p = (1.00–2.40)v_0$)、2.0–5.0 MeV I^{22+} ($v_p = (0.79–1.25)v_0$) 和 1.2–6.0 MeV Xe^{20+} ($v_p = (0.61–1.36)v_0$) 离子作用于固体 Al 靶表面, 测量了 Al 的特征 X 射线. 计算了其发射截面的实验数据, PWBA, ECPSSR 和 BEA 以及添加不同修正的理论数据; 并将实验和理论进行了对比. 讨论了有效电荷、低速库仑偏转修正对 BEA 模型在估算低速高电荷态离子激发内壳层电离过程中的影响.

2 实验装置

本实验是在中国科学院近代物理研究所 320 kV 实验平台 1#终端上进行的, 相关装置和技术已在原有工作中介绍 [16,17], 实验装置示意图如图 1. 实验所需离子, 在电子回旋共振离子源中, 由 14.5 GHz 的馈入微波离子化产生, 特定电荷态由 90° 磁铁偏转选择得到, 不同能量在加速管中由调节加速电压获得. 然后, 束流经过偏转、聚焦和限束校正后垂直入射到靶材中心, 束斑面积约为 7 mm². 炮弹离子计数由 Labview 读取电流表上的积分电量计算得到 [18]. 实验谱线由硅漂移 X 射线探测器 (SDD) 记录. SDD 置于靶面 45° 方向上, 立体角约为 0.0011 rad. 其探测效率取决于密封铍窗的透射率和探头的灵敏度, 在 0.5–4.0 keV 能量范围内, 如图 2 所示.

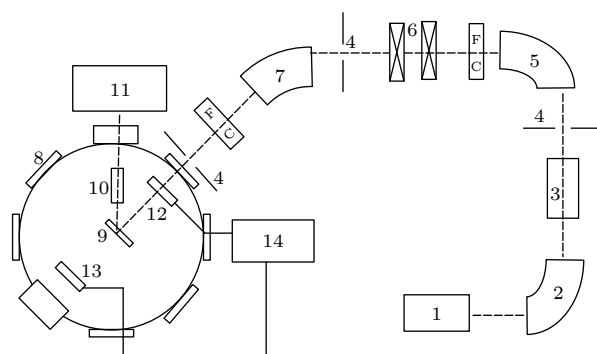


图 1 实验装置示意图 (1—离子源; 2—分析磁铁; 3—高压加速平台; 4—光阑; 5—90° 偏转磁铁; 6—四级透镜; 7—60° 偏转磁铁; 8—超高真空靶室; 9—靶; 10—X 射线探测器; 11—X 射线记录系统; 12—穿透式法拉第筒; 13—法拉第筒; 14—离子计数记录系统; FC 为束流线上可插拔式法拉第筒)

Fig. 1. Schematic drawing of experiment setup: 1—ECR ion source; 2—analyzing magnet; 3—high volt accelerate platform; 4—barrier; 5—90° deflection magnet; 6—magnetic quadrupole lens; 7—60° deflection magnet; 8—ultrahigh 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, FC is the faraday cup.

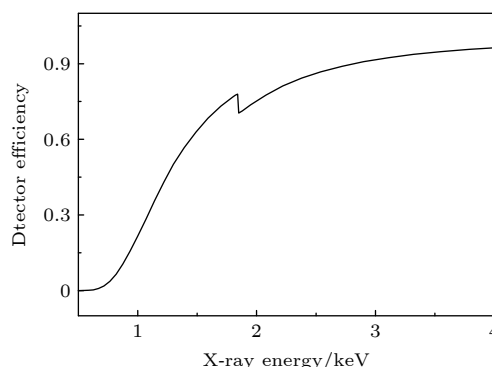


图 2 SDD 在 0.5–4 keV 范围内的探测效率

Fig. 2. Efficiency of the SDD detector in the energy region of 0.5–4.0 keV.

3 实验结果与讨论

3.1 Al 的特征 X 射线辐射谱

不同离子轰击时碰撞产生 Al 的典型 X 射线谱如图 3, 利用非线性曲线拟合的高斯程序进行分析, 发现实验谱线略有不同. H^+ , He^{2+} 离子入射时, 谱线形状是对称的高斯线型, 中心能量约为 1.488 keV 和 1.490 keV, 与标准的原子数据 1.487 keV 基本一致 [19,20]. Al 的原子结构为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$, 3p 上仅有一个电子且不存在更外壳层的电子, K_{β} 的荧光产额仅为 K_{α} 的 0.6% [21,22], 所以 K X 射线的原子谱主要是 K_{α} 谱线, 包括 $K_{\alpha 1}$ 和 $K_{\alpha 2}$ 两条线, 分

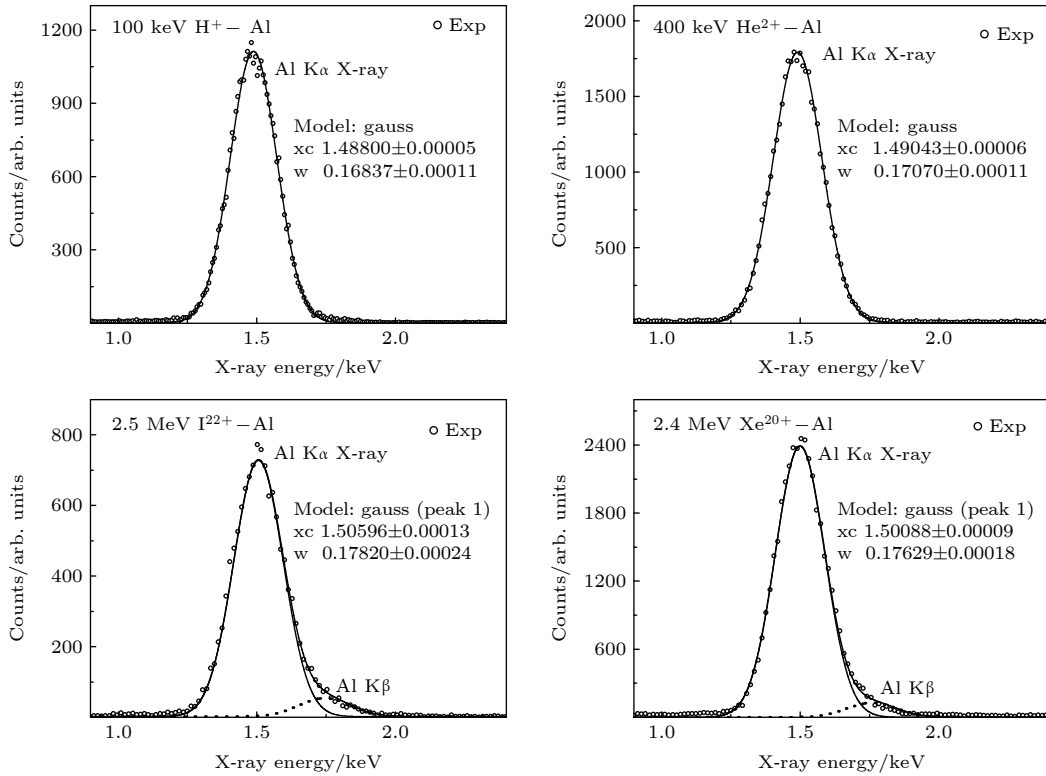


图3 不同离子入射激发 Al 的典型 X 射线谱 (曲线为高斯拟合, xc 为谱线中心能量, W 为谱线的半高全宽)

Fig. 3. Typical X-ray spectrum of Al induced by various projectile (The curve is Gauss fitting, xc and W is the central energy and full width at half maximum of the spectral line, respectively).

别来自于 $2p_{3/2}$ 和 $2p_{1/2}$ 电子向 $1s$ 壳层的跃迁. Al 的 $2p_{3/2}$ 和 $2p_{1/2}$ 轨道上的电子束缚能分别为 72.55 和 72.95 eV^[23], 退激到 $1s$ 空穴对应两条谱线的能量差约为 0.40 eV, 目前的 X 射线探测器无法分辨, 可认为是一条谱线. 所以, 实验测到轻离子激发的 Al 的谱线主要是 K_{α} X 射线.

I^{22+} , Xe^{20+} 离子入射时, 谱线的右翼出现了非对称的增强和延长, 并且主线的中心位置向着高能方向出现了蓝移, 中心能量分别为 1.506 keV 和 1.501 keV. 可认为这是由于重离子入射时产生 L 壳层的多电离引起的, 延长的右翼为增强的 K_{β} X 射线^[24–28]. 所以, 重离子激发 Al 的特征谱线包括 K_{α} 和 K_{β} X 射线.

3.2 Al 的 K X 射线发射截面的实验结果

本文 H^+ , He^{2+} , I^{22+} , Xe^{20+} 离子在 Al 靶中的最大射程分别为 2.80, 2.05, 1.74, 1.88 μm , 均小于靶材厚度 0.05 mm, X 射线的实验产生截面 σ_x 可由厚靶公式计算得到^[29]:

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

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

其中, n 为靶原子数密度, Y 是 X 射线的单粒子产额, dY/dE 是产额-能量曲线斜率, dE/dR 是炮弹离子的能损^[30], μ 为 X 射线自吸收系数^[31], θ , φ 是束流方向、X 射线探测器探测方向与靶面法线之间的夹角^[32]. N_x , N_p 分别为 X 射线和炮弹离子计数, η , Ω 分别是 X 射线探测器的效率和立体角^[32].

表 1 列出了本文实验中不同炮弹轰击时 Al 的 K X 射线发射截面. 其随单核子能量的变化由图 4 给出. 在本文能量范围内, 随着炮弹离子入射能的增大, X 射线的发射截面也逐渐的升高, 质子和 He 离子激发的截面约为 10^{-3} — 10^2 barn 量级, I 和 Xe 离子的数据约为 10^1 — 10^2 barn 量级. 以相同单核子能量轰击时, 随着炮弹离子的加重, X 射线的产生截面逐渐增大, 例如, 200, 400, 600 keV He^{2+} 离子的单核子能量为 50, 100, 150 keV/u, 其激发 Al 的 K 壳层 X 射线的截面约为同等能量质子入射时的 2.0, 1.8, 2.7 倍; 6.0 MeV Xe^{20+} (单核子能量约为 47 keV/u) 离子激发的截面约为 50 keV 质子轰击时的 1.1×10^3 倍, 为 200 keV He^{2+} (50 keV/u) 离子轰击时的 0.6×10^3 倍; 3 MeV I^{22+} ,

Xe²⁰⁺单核子的能量约为 23.6, 23.3 keV/u 与 100 keV He²⁺的单核子能量 (25 keV/u) 相当, 但是, 其激发 X 射线的截面约为 He 离子轰击时的 1.0×10^4 , 1.1×10^4 倍.

表 1 不同离子激发 Al 的 K X 射线实验发射截面
Table 1. Al K X-ray cross section excited by various projectile.

离子种类	入射能量/MeV	截面/barn
H ⁺	0.05	$(1.06 \pm 0.17) \times 10^{-1}$
	0.10	2.15 ± 0.34
	0.15	9.06 ± 1.45
	0.20	$(2.03 \pm 0.33) \times 10^1$
	0.25	$(4.50 \pm 0.72) \times 10^1$
	0.30	$(7.73 \pm 0.12) \times 10^1$
He ²⁺	0.10	$(5.98 \pm 0.96) \times 10^{-3}$
	0.20	$(2.14 \pm 0.34) \times 10^{-1}$
	0.30	1.10 ± 0.18
	0.40	3.88 ± 0.62
	0.50	9.25 ± 1.48
	0.60	$(2.42 \pm 0.39) \times 10^1$
I ²²⁺	2.00	$(3.93 \pm 0.63) \times 10^1$
	2.50	$(4.73 \pm 0.78) \times 10^1$
	3.00	$(6.09 \pm 0.97) \times 10^1$
	3.50	$(6.84 \pm 1.09) \times 10^1$
	4.00	$(7.57 \pm 1.21) \times 10^1$
	4.50	$(7.99 \pm 1.28) \times 10^1$
Xe ²⁰⁺	5.00	$(9.18 \pm 1.47) \times 10^1$
	1.20	$(1.94 \pm 0.31) \times 10^1$
	2.40	$(4.67 \pm 0.74) \times 10^1$
	3.00	$(6.32 \pm 1.01) \times 10^1$
	3.60	$(7.68 \pm 1.23) \times 10^1$
	4.80	$(1.04 \pm 0.17) \times 10^2$
	6.00	$(1.21 \pm 0.19) \times 10^2$

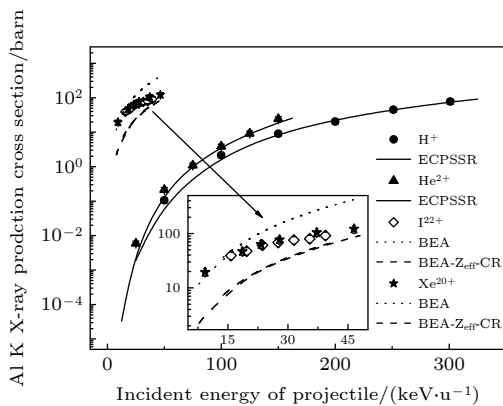


图 4 不同离子激发 Al 的 K 壳层 X 射线产生截面随单核子能量变化

Fig. 4. Al K X-ray cross section excited by various projectile.

3.3 理论截面的计算及修正

K 壳层 X 射线截面的理论值可由 1s 轨道电子的电离截面 σ_k 得到 [33]: $\sigma_x = \sigma_k \times \omega_k$ (ω_k 为荧光产额). 研究表明, 高电荷态重离子碰撞可产生靶的多电离, 伴随靶原子单个 K 电子的电离, L, M 等轨道电子将出现多电离的状态. 由于多电离使得部分轨道电子缺失, K 空穴退激的非辐射跃迁过程被减弱, 导致 X 射线辐射的几率发生变化, 所以, ω_k 的取值与外壳层电子的电离度有关. 本文中, 轻离子激发 Al 的 K X 射线能量没有移动, 与原子数据基本一致, 说明其 K X 射线辐射时, L 壳层电子处于满壳层的原子状态. 所以, H⁺和 He²⁺离子激发截面的计算, ω_k 取值为单电离原子参数 0.039 [23]. 重离子 I²²⁺和 Xe²⁰⁺入射时, Al 的谱线出现了明显的能量蓝移和 β 线的辐射增强, 说明 L 壳层发生了多电离, 发射截面理论计算的 ω_k 为多电离修正值 [34,35].

图 5 给出了质子入射时 Al 的 K 壳层 X 射线产生截面的本实验值、已有数据和不同的理论计算. 可以看出, 本文实验数据与 Brandt 等 [36]、Basbas 等 [29]、Shima [37] 的测量数据基本一致, 而略大于 Khan 等 [38,39] 的数据. 能量大于 100 keV 范围内, BEA 估算小于实验数据约 1—2 个量级, 并且随能量的增大, 两者的差别越来越大, 而能量小于 70 keV 时, 其估算又大于实验数据. PWBA 理论值在整体上大于所有的实验数据, 且与实验数据之间的差值随能量的增大而逐渐减小. 对于 ECPSSR 理论计算, 除略大于 Khan 等 [38,39] 的数据外, 与其他实验测量值符合得较好. 这说明, 对于轻离

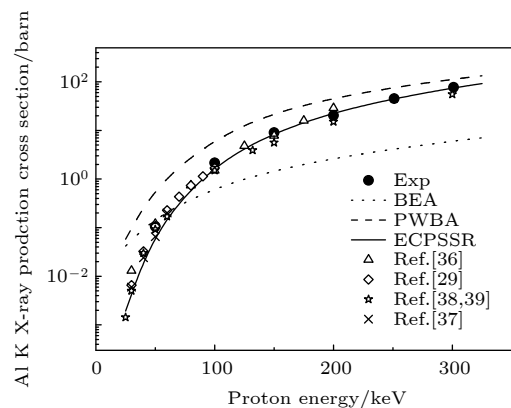


图 5 H⁺激发的发射实验截面与理论模拟

Fig. 5. Experimental cross section excited by H⁺, and theory simulations.

子激发 K 壳层 X 射线发射截面的预言, 在速度小于 3.5 倍玻尔速度的低速作用过程中, ECPSSR 是最为合适的理论模型.

图 6 对比了 He^{2+} 离子入射时激发 Al 的 K X 射线产生截面实验值、已有数据以及不同的理论计算结果. 本实验数据与原有的 Basbas 等 [29]、Brandt 等 [36]、Needham 等 [40] 以及 Shima 等 [41] 的测量值基本一致. BEA 的估算, 在 300 keV 时与实验结果较为接近, 当入射能小于 300 keV 时, 大于实验值, 而后, 随着入射能的增大, 又小于实验值; 在量级上与实验值相当, 但是随能量的变化趋势不同, 理论计算的增大幅度小于实验值的实际变化. PWBA 理论的计算, 在增长趋势上与实验结果趋于一致, 但是在数值上比实验值整体上了大约一个量级. 在实验误差范围内, 除个别数据点外, ECPSSR 估算与本实验结果完全符合. 结果表明, 对于 He 离子轰击激发靶原子 K 壳层的电离过程, 在 $(1-2.4)v_0$ 近玻尔速度的低能碰撞体系中, ECPSSR 理论模型仍然适用.

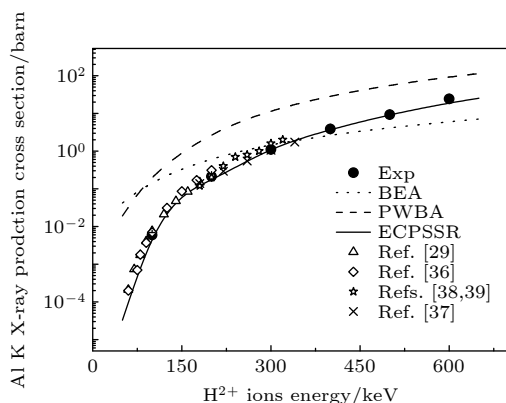


图 6 He^{2+} 激发的发射实验截面与理论模拟

Fig. 6. Experimental cross section excited by He^{2+} , and theory simulations.

高电荷态重离子 I^{22+} 和 Xe^{20+} 轰击 Al 靶激发其 K X 射线发射截面实验结果与 PWBA, BEA 以及考虑相关修正理论估算的比较, 如图 7 和图 8 所示, ECPSSR 估算远小于实验, 图中未给出. 分析发现, ECPSSR 的估算随着能量的增大迅速增大, 并且严重低估了实验结果, 例如, 对于 I^{22+} 离子, 能量从 2.0 MeV 到 5.0 MeV, 激发截面则由 10^{-42} barn 迅速增大到 10^{-13} barn, 低估了实验数值至少 14 个量级; 2.4—6.0 MeV Xe^{20+} 离子激发的截面为 10^{-36} — 10^{-13} barn, 低于实验结果也至少 14 个量

级. ECPSSR 模型, 对轻离子入射激发的 X 射线产生截面能够很好的估算, 但是, 对于 $Z_1 \gg Z_2$ 的低速重离子入射的非对称系统, 对 PWBA 的相关修正显然过于严重, 估算值过低, 不再适用. 对于 PWBA 理论, 在相对低能端低估了实验结果, 而在高能端高于实验值约一个量级, 并且随入射能量的增大其增长速率大于实验值的增幅; 经过有效电荷修正后, 其估算降低, 但变化趋势不变. 相比之下, BEA 计算在量级上与现有的实验结果最为相近, 但还不能完全的符合. 为进一步的比较实验结果, 考虑了低速重离子入射情况下 BEA 模型的有效电荷和库仑偏移修正.

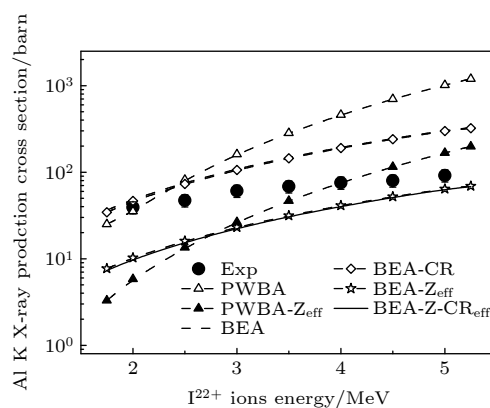


图 7 I^{22+} 激发的实验发射截面与理论模拟

Fig. 7. Experimental cross section excited by I^{22+} , and theory simulations.

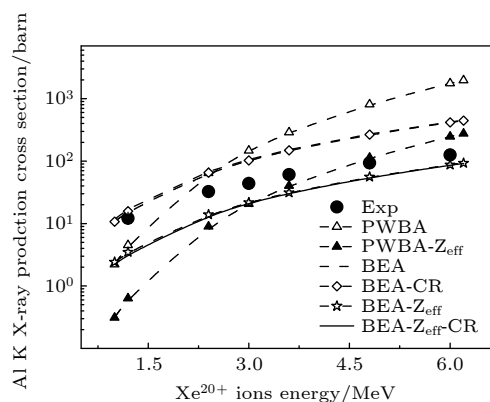


图 8 Xe^{20+} 激发的实验发射截面与理论模拟

Fig. 8. Experimental cross section excited by Xe^{20+} , and theory simulations.

在经典 BEA 理论中, 靶原子的轨道电子被认为是自由电子, 其电离被处理为炮弹离子原子核与目标电子两者之间的库仑散射过程, 并不考虑炮弹离子的带电问题和其与靶原子核之间的相互作用.

而实际上,在炮弹离子速度远小于目标轨道电子速度时,靶原子对炮弹离子的库仑排斥 (Coulomb repulsion, CR) 作用较为明显^[42,43],不可忽略.

一方面,在靶原子核库仑场的排斥作用下,炮弹离子速度减小并改变其运动路径,降低了与目标电子的有效碰撞能量,从而改变了其散射截面.再一方面,由于库仑排斥的减速,有效碰撞距离增大,电离发生时,靶中电子感受到的有效电荷不局限于炮弹的核电荷,而且还要考虑其携带剩余轨道电子的影响,此时的 BEA 模型运用,不能将炮弹离子近似为裸核,其带电量不能忽略,而是要将其作为整体处理,作为一个带电原子实,靶原子轨道电子感受到这个原子实的电荷量才是引起其自身库仑电离的碰撞有效电荷.计算时,入射离子参数 Z_1 用有效电荷 Z_{eff} 来代替.

综合考虑低速库仑偏转和有效碰撞电荷修正后, K 壳层电子电离截面的 BEA 估算公式可以写为^[42]

$$\sigma_k = \left(\frac{N Z_{\text{eff}}^2 \sigma_0}{U_k^2} \right) G(V) \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E_p}{E_{p0}}} \right)^2, \quad (3)$$

式中, $N = 2$ 是 K 壳层电子数目, $\sigma_0 = \pi e^4$, U_k 是结合能, $G(V)$ 是约化函数 ($V = v_p/v_k$, v_k 是 K 壳层电子的速率). $E_p = E_{p0} - Z_1(E_e + U)$, 为炮弹的有效碰撞能. E_{p0} 是入射能量, E_e 和 U 分别是 K 电子的动能和束缚能. 公式的第二项表示库仑排斥引起有效碰撞能改变的修正. 第一项与经典的 BEA 公式一致, 此处将 Z_1 换成了 Z_{eff} . 本文中, Z_{eff} 由 Slater 法则给出: $Z_{\text{eff}} = Z_1 - \delta$, δ 为屏蔽因子^[44,45]. Xe^{20+} 离子的核外电子排布为 $[\text{Ar}]3d^{10}4s^24p^4$, 屏蔽因子 δ 为 29.52, 有效电荷 Z_{eff} 为 24.48; I^{22+} 离子的剩余电子排布为 $[\text{Ar}]3d^{10}4s^24p$, 屏蔽因子为 38.45, 有效电荷为 24.55.

图 7 和图 8 展示了实验与 BEA 以及相应修正理论估算的比较. BEA-CR 表示只附加库仑排斥作用. BEA- Z_{eff} 表示只考虑有效电荷的影响. BEA- Z_{eff} -CR 为联合运用有效电荷和库仑排斥的修正估算. 可以看出, 库仑偏转的修正在相对低速时更为有效. 例如, I 离子在 2 MeV 时的修正截面比原来减小大约 7.2%, 在 6 MeV 时修正值约为原始值的 98.5%. 相比库仑排斥的修正, 有效电荷的修正作用更为重要, 对于 I 和 Xe, 该修正结果分别约为原始值的 17% 和 14%.

除 Xe 的 1.2 MeV 数据外, 实验值基本处于 BEA 和 BEA- Z_{eff} -CR 估算之间, 随入射能的增大, BEA- Z_{eff} -CR 估算与实验值越来越接近, 这说明, 低速重离子入射时, 综合考虑库仑排斥和初始带电量的影响, 靶原子 K 壳层电子的电离, 利用经典的两体碰撞近似模型来处理更为合适. 还可以看到, BEA 的模拟在数量级上与实验结果一致, 但是在随能量的变化趋势上不同, 随着能量的降低, 实验值的减小慢于理论计算. 可认为, 这是由电子俘获机制引起的. 在低速碰撞时, 重离子碰撞产生的内壳层的电离, 除了直接的库仑激发外, 还存在电子俘获的作用, 有效碰撞能越小, 电子俘获作用越明显, 直接电离截面在总截面中的比重就越小, 所以实验测量截面与 BEA- Z_{eff} -CR 估算之间的差异, 随入射能量的减小, 越来越大.

4 结 论

在近玻尔速度的低能区, 实验测量了质子、 He^{2+} 离子和高电荷态重离子 I^{22+} , Xe^{20+} 轰击固体 Al 靶时激发 Al 的 K X 射线产生截面, 并与 PWBA, ECPSSR 和 BEA 等理论估算进行了比较. 讨论了高电荷态重离子低速碰撞时的相关修正. 分析结果表明, 随着炮弹离子动能的增大, 特征 X 射线的实验截面增大, 同等单核子能量下, 重离子激发的截面约为轻离子入射时的 10^4 倍. 质子、 He^{2+} 离子入射时, K 电子的电离以直接电离为主, X 射线的产生截面可由 ECPSSR 理论很好的预言. 而重离子 I^{22+} , Xe^{20+} 轰击时, 除了直接的库仑相互作用, K 壳层的电离还存在电子俘获的机制, 电离截面的估算可近似由同时使用库仑偏转与有效电荷修正的 BEA 模型给出.

感谢中国科学院近代物理研究所 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] Zhou X M, Cheng R, Zhao Y T, Lei Y, Chen Y H, Chen X M, Wang Y Y, Ma X W, Xiao G Q 2018 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **416** 94
- [2] Whilhelm R A, Gruber E, Schwestka J, Kozubek R, Madeira T I, Marques J P, Kobus J, Krashennnikov A V, Schleberger M, Aumayr F 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 103401
- [3] Guo Y P, Yang Z H, Hu B T, Wang X L, Song Z Y, Xu Q M, Zhang B L, Chen J, Yang B, Yang J 2016 *Sci. Rep.* **6**

30644

- [4] Liu Y, Xu Z F, Wang X, Zeng L X, Liu T 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 043201 (in Chinese) [柳钰, 徐忠峰, 王兴, 曾利霞, 刘婷 2020 物理学报 **69** 043201]
- [5] 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, 周贤明, 王兴, 梅策香, 肖国青 2018 物理学报 **67** 243201]
- [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, Zhao Y T, Xu Z F, Zhou X M, Ren J R, Cheng R, Liang C H, Li Y Z, Zeng L X, Yang Z H, Chen X M, Li F L, Xiao G Q 2016 *Sci Sin-Phys. Mech. Astron.* **46** 073006 (in Chinese) [张小安, 梅策香, 张颖, 赵永涛, 徐忠峰, 周贤明, 任洁茹, 程锐, 梁昌慧, 李耀宗, 曾丽霞, 杨治虎, 陈熙萌, 李福利, 肖国庆 2016 中国科学: 物理学 力学 天文学 **46** 073006]
- [8] Gryzinski M 1965 *Phys. Rev. A* **138** A336
- [9] Johnson D E, Basbas G, McDaniel F D 1979 *At. Data Nucl. Data Tables* **24** 1
- [10] Brandt W, Lapicki G 1981 *Phys. Rev. A* **23** 1717
- [11] Meyerhof W E, Anholt R, Saylor T K, Lazarus S M, Little A, Chase L F 1976 *Phys. Rev. A* **14** 1653
- [12] Lapicki G 1989 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **18** 111
- [13] Lapicki G 2005 *X-ray Spectrom* **34** 269
- [14] Miranda J, Lapicki G 2014 *At. Data Nucl. Data Tables* **100** 651
- [15] Kahoul A, Nekkab M, Deghfel B 2008 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **266** 4969
- [16] Liang C H, Zhang X A, Zhou X M, Zhao Y T, Xiao G Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 183201 (in Chinese) [梁昌慧, 张小安, 周贤明, 赵永涛, 肖国青 2021 物理学报 **70** 183201]
- [17] Zhou X M, Wei J, Cheng R, Chen Y H, Mei C X, Zeng L X, Liu Y, Zhang Y N, Liang C H, Zhao Y T, Zhang X A 2022 *Chin. Phys. B* **31** 063204
- [18] Zhou X M, Wei J, Cheng R, Zhao Y T, Zeng L X, Mei C X, Liang C H, Li Y Z, Zhang X A, Xiao G Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 023201 (in Chinese) [周贤明, 尉静, 程锐, 赵永涛, 曾利霞, 梅策香, 梁昌慧, 李耀宗, 张小安, 肖国青 2021 物理学报 **70** 023201]
- [19] Bearden J A 1967 *Rev. Mod. Phys.* **39** 78
- [20] Krause M O and Oliver J H 1979 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **8** 329
- [21] Campbell J L 2003 *At. Data Nucl. Data Tables* **85** 291
- [22] Campbell J L 2009 *At. Data Nucl. Data Tables* **95** 115
- [23] Thompson A C, Attwood D T, Gullikson E M, Howells M R, Kortright J B, Robinson A I, Underwood J H, Kim K J, Kirz J, Lindau I, Pianetta P, Winick H, Williams G P, Scofield J H (Edited by Thompson A C, Vaughan D) 2001 *X-Ray Data Book* (<http://xdb.lbl.gov/>)
- [24] Czarnota M, Pajek M, Banaś D, et al. 2006 *Braz. J. Phys.* **36** 546
- [25] Semaniak J, Braziewicz J, Pajek M, Czyżewski T, Głowacka L, Jaskóła M, Hailer M, Karschnick R, Kretschmer W, Halabuka Z, Trautmann D 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1125
- [26] Sarkadi L, Mukoyama T 1980 *J. Phys. B Atom. Mol. Phys.* **13** 2255
- [27] Watson R L, Blackadar J M, Horvat V 1999 *Phys. Rev. A* **60** 2959
- [28] Banaś D, Pajek M, Semaniak J, Braziewicz J, Kubala-Kukuśa A, Majewska U, Czyżewski T, Jaskóła M, Kretschmer W, Mukoyama T, Trautmann D 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **195** 233
- [29] Basbas G, Brandt W, Roman L 1973 *Phys. Rev. A* **7** 983
- [30] Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P 2019 *Treatise on Heavy-Ion Science* (Springer) pp93–129
- [31] Pajek M, Kobzev A P, Sandrik R, Iikhamov R A, Kusmurodov S H 1989 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **42** 346
- [32] Zhou X M, Zhao Y T, Cheng R, Lei Y, Wang Y Y, Ren J R, Liu S D, Mei C X, Chen X M, Xiao G Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **65** 027901 (in Chinese) [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 2021 物理学报 **65** 027901]
- [33] Cohen D D, Harrigan M 1985 *At. Data Nucl. Data Tables* **33** 255
- [34] Lapicki G, Murty G A V R, Raju G J N, Reddy B S, Reddy S B, Vijayan V 2004 *Phys. Rev. A* **70** 062718
- [35] Lapicki G, Mehta R, Duggan J I, Kocur P M, Price J L, McDaniel F D 1986 *Phys. Rev. A* **34** 3813
- [36] Brandt W, Laubert R, Sellin I 1966 *Phys. Rev.* **151** 56
- [37] Shima K 1978 *Phys. Lett. A* **67** 351
- [38] Khan J M, Potter D L 1964 *Phys. Rev.* **133** A 890
- [39] Khan J M, Potter O L, Worley R D 1965 *Phys. Rev.* **139** A 1735
- [40] Needham P B, Jr., Sartwell B O 1970 *Phys. Rev. A* **2** 27
- [41] Shima K, Makino I, Sakisaka M 1971 *Jpn. J. Phys.* **31** 971
- [42] Magon C, Milazzo M, Pizzi C, Porro F, Rota A, Riccobono G 1979 *Nuovo. Cimento. A* **54** 277
- [43] Morita S, Kamiya M 1997 *Chin. J. Phys.* **15** 199
- [44] Slater J C 1930 *Phys. Rev.* **36** 57
- [45] Liu S Z 1986 *Atomic Structure and Chemical Periodic System of Elements* (Beijing: Science and Technology Press) p108

K-shell X-ray of Al produced by collisions of ions with near Bohr velocities^{*}

Zhou Xian-Ming¹⁾³⁾ Wei Jing¹⁾ Cheng Rui²⁾ Liang Chang-Hui¹⁾
Chen Yan-Hong²⁾ Zhao Yong-Tao²⁾³⁾ Zhang Xiao-An^{1)2)†}

¹⁾ (*Ion beam and Optical Physics Laboratory, Xianyang Normal University, 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 15 August 2022; revised manuscript received 7 September 2022)

Abstract

X-ray emission produced by highly charged ions with the energy range near the Bohr velocity involves complicated atomic process. However, due to the limitation of experimental conditions, the relevant researches are nearly absent. It is unclear whether the existing theory is applicable in such an energy range. This needs further exploring. In the present work, K X-ray spectra of Al excited by H^+ , He^{2+} and highly charged heavy ions I^{22+} and Xe^{20+} are investigated by using an Si drift X-ray detector in the energy range near the Bohr velocity. The X-ray production cross sections are extracted from the X-ray counts and compared with the theoretical simulations from PWBA, ECPSSR and modified BEA model. It is indicated that the cross section increases with the augment of projectile energy. With the same incident energy per nucleon, the cross section induced by highly charged heavy ions is a factor of about 10^4 larger than that by light ions. With the impact of H^+ and He^{2+} ions, the K-shell electrons are mainly knocked off through the direct Coulomb ionization, and the X-ray emission cross section can be well predicted by ECPSSR theory. For the bombardment of highly charged heavy ions I^{22+} and Xe^{20+} , except for the Coulomb ionization, the orbital electrons can also be excited by electron capture. The BEA simulation after being modified by both Coulomb repulsion and effective charge can well predict the X-ray production cross section.

Keywords: ions, X-ray, production cross section, BEA, ECPSSR

PACS: 34.35.+a, 32.80.Aa, 32.30.Rj, 34.10.+x

DOI: 10.7498/aps.72.20221628

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2017 YFA0402300), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11505248, 11775042, 11875096), the Academic Leader of Xianyang Normal University, China (Grant No. XSYXSD202108), the Scientific Research Program of Science and Technology Department of Shaanxi Province, China (Grant No. 2021 JQ-812), and the Key Cultivation Project of Xianyang Normal University, China (Grant No. XSYK21037).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangxiaonan2000@126.com

近玻尔速度不同离子碰撞产生Al的K X射线

周贤明 尉静 程锐 梁昌慧 陈燕红 赵永涛 张小安

K-shell X-ray of Al produced by collisions of ions with near Bohr velocities

Zhou Xian-Ming Wei Jing Cheng Rui Liang Chang-Hui Chen Yan-Hong Zhao Yong-Tao Zhang Xiao-An

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 013402 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221628

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221628>

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

采用薄靶方法测量低能电子致Al, Ti, Cu, Ag, Au元素K壳层电离截面与L壳层特征X射线产生截面

Measurements of K-shell ionization cross sections and L-shell X-ray production cross sections of Al, Ti, Cu, Ag, and Au thin films by low-energy electron impact

物理学报. 2022, 71(17): 173402 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220162>

数百MeV/u高能区C⁶⁺离子激发W的L壳层 X射线

W L-shell X-ray emission induced by C⁶⁺ ions with several hundred MeV/u

物理学报. 2022, 71(11): 113201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212322>

近Bohr速度I²⁰⁺离子在不同靶面上的L壳层X射线辐射

I L-shell X-rays from near Bohr-velocity I²⁰⁺ ions impacting on various targets

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

低能高电荷态离子与Al表面作用产生的X射线

X-ray emission produced by interaction of slow highly charged ions with Al surfaces

物理学报. 2021, 70(19): 193201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210757>

keV能量电子致Al, Ti, Zr, W, Au元素厚靶特征X射线产额与截面的研究

Characteristic X-ray yields and cross sections of thick targets of Al, Ti, Zr, W and Au induced by keV-electron impact

物理学报. 2020, 69(13): 133401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200264>

¹²⁹Xe ^{q+}离子入射Cu靶表面激发的近红外光谱线和X射线谱

¹²⁹Xe ^{q+} 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>