

类氦 C 离子诱发不同金属厚靶原子的 K-X 射线*

梅策香¹⁾ 张小安¹⁾ 周贤明¹⁾ 梁昌慧¹⁾ 曾利霞¹⁾
张艳宁¹⁾ 杜树斌²⁾ 郭义盼³⁾ 杨治虎^{3)†}

1) (咸阳师范学院, 离子束与光物理实验室, 咸阳 712000)

2) (中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413)

3) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2023 年 9 月 13 日收到; 2023 年 11 月 2 日收到修改稿)

利用中国原子能科学研究院 HI-13MV 串列加速器上提供的动能为 15—55 MeV 的类氦 C 离子分别轰击 Fe, Ni, Nb 和 Mo 金属厚靶, 采用 HpGe 探测器测量了 K-X 射线, 获得了相应的 K-X 射线的发射截面. 本文中由于各个靶原子外壳层电离度的不同, 类氦 C 离子与 Fe, Ni 靶原子相互作用发射的 K_β 与 K_α X 射线的分支强度比随入射离子动能增加而减小, 而 Nb, Mo 靶原子发射的 K-X 射线分支强度比变化不明显. 利用厚靶截面公式计算了靶原子 K-X 射线的发射截面, 并与不同的理论模型及质子的结果进行了对比. 结果表明随类氦 C 离子动能的增大, Fe, Ni 靶原子发射的 K_β 与 K_α X 射线的总产生截面与考虑多电离的两体碰撞近似修正模型最为符合 Nb, Mo 靶原子发射的 K_β 与 K_α X 射线的总产生截面与平面波恩近似模型的理论值最为接近. 质子与单核子 C 离子能量相同时, 质子比类氦 C 离子激发不同靶的 K-X 射线产生截面约小 3 个数量级.

关键词: X 射线, 粒子束, 截面, 两体碰撞近似, 平面波恩近似

PACS: 32.30.Rj, 32.80.Aa, 34.80.Dp

DOI: 10.7498/aps.73.20231477

1 引言

离子与靶原子碰撞过程中, 靶原子内壳层电子激发或离化, 退激发射光子、电子以及次级离子, 其中光发射和次级离子的产额、能量分布等从不同方面反映了参与碰撞的离子和原子的内部结构信息, 以及相互作用过程中的动力学规律. 近几十年来, 许多工作基于高能粒子束 (电子、质子、 α 粒子以及重离子和激光) 与原子碰撞相互作用过程中的物理学规律, 积累了大量的实验数据. 随着研究的深入, 人们能够清晰地了解碰撞过程的物理图像, 并给出了准确的量子力学方程. 而碰撞过程是

一个复杂的多体问题, 目前的精确实验测量和理论研究还不完善, 尤其是原子碰撞问题因为涉及多体非常复杂, 所以通常不可能对近似值设定, 即使是粗略的误差限制^[1]. 于是就有了 Born 近似^[2]、Bethe 方法^[3]、半经典近似^[4]、平面波恩近似 (PWBA)^[5]、两体碰撞近似 (binary-encounter approximation, BEA)^[6,7], 以及 Brandt 和 Lapicki^[8] 基于 PWBA 对靶电子态作准静态近似, 结合炮弹离子对靶原子的极化效应, 相对效应和炮弹的能损效应形成 ECP-SSR 理论. 这些近似理论都是成功的, 即每一个理论所得到的结论没有偏离其前期假设, 并在一定的范围与实验数据符合得较好, 其理论计算结果的不确定度来源于这些近似. 对已有工作调研发现

* 国家自然科学基金 (批准号: 12205247)、陕西省自然科学基金基础研究青年项目 (批准号: 2023-JC-QN-0080)、陕西数理基础科学研究项目 (批准号: 22JSQ040)、咸阳师范学院青蓝人才培养项目 (批准号: XSYQL201910)、咸阳市离子束与光物理重点实验室 (批准号: L2022-CXNL-ZDSYS-001) 和陕西省大学生创新创业训练计划 (批准号: S202010722055S) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: z.yang@impcas.ac.cn

不同弹靶组合的粒子与原子碰撞实验结果,特别是入射粒子为质子、电子、X射线时与上述理论符合较好[9-13].

常见原子的特征X射线(K, L壳层X射线)作为X射线的能量标准广泛应用于先进功能材料研究,高温等离子体的光学诊断和天体物理研究领域,多电荷态离子与原子相互作用的X射线产生截面数据也被用于原子结构探索和物质成分分析等[14-18].因此离子与原子碰撞作为研究X射线手段目前已成为重要的研究课题.在实验方面对于较轻离子如质子,He离子入射激发的靶原子X射线的发射截面已积累了丰富的数据,包括入射离子的速度范围,靶原子的原子序数等[19-21],而高电荷态重离子入射的碰撞系统,由于相互作用的物理过程及实验现象等比较复杂,特别是中能区,由于加速器和现有理论分析的限制系统研究相对较少,原子数据不完整,精度不高,天体元素X射线数据的研究更为匮乏[22,23].另一方面,考虑到在浩瀚的宇宙中C, Fe和Ni等15种元素的丰度最高[24],这些元素及其不同电荷态离子的 K_{α} 和 K_{β} 射线谱的强度,展宽和红移为星系核, X射线双星系统,超新星演化研究提供了重要依据.1999年和2004年多国合作先后建立Chandra和XMM-Newton X射线观测站,为天体物理学家的研究提供丰富的X射线数据,Santos-Lleo等[25,26]利用Fe的 K_{α} 特征X射线及其红移发现在银河系中存在质量是太阳的3000万倍的超质量黑洞,相信随着我国太空站的建设和运行,将为天文学家以及天体物理学家研究提供分辨更高的光谱数据.分析现有的文献[27, 28]发现,中能区类氦C离子与金属靶原子Fe, Ni和Mo等碰撞的K-X射线产生截面研究的报道较少. Fe, Ni元素是天体中丰度元素, Nb和Mo ($Z = 41, 42$)属过渡金属元素,是银河系中的极贫金属恒星中较轻的反铁(trans-Fe)丰度元素,其演化过程发生(快,慢)中子俘获或质子俘获,为天体物理学研究提供更重要的信息[24,29,30].

基于以上考虑,我们在中国原子能科学研究院HI-13 MV串列加速器上利用15—55 MeV的类氦C离子分别轰击Fe, Ni, Nb和Mo金属靶,测量了入射离子与这些金属靶相互作用过程中K-X射线的发射截面,分析和研究了K-X射线分支强度比,并将截面的实验数据分别与其他理论模型以及同核子能量下的氢离子入射做比较.

2 实验装置

实验是在中国原子能科学研究院HI-13 MV串列加速器上完成,实验装置如图1所示,该加速器可为终端提供2—13 MV的电压,本实验中使用的 C^{4+} 离子的能量为15—55 MeV.实验中离子束通过孔直径为1 mm的限束光阑射向靶,靶面与束流方向成 45° ,在与束流成 45° 方向处放置探测器,探测离子束与0.1 mm厚的金属靶相互作用产生X射线,靶室与探测器之间用 $50 \mu\text{m}$ 厚度的铍窗隔离,实验测量时,保持真空度在 10^{-5} Pa.通过调节参数可以使加速器提供相对稳定的束流,实验测量期间束流涨落在5%以内,实验前刻度好单位时间内的离子个数,靶前离子流强在nA量级,每个能量点测量选定1200 s.探测器的直径为10 mm,探头到靶中心的距离为112 mm,探测立体角为 6.22 msr .离子束-靶相互作用产生的X射线由ORTEC公司生产的HpGe探测器探测,该探测器在 ^{55}Fe 放射源下分辨为180 eV.实验测量中探测器靠近靶室的隔离Be窗,探测器Be窗厚度为 $127 \mu\text{m}$,靶室Be窗厚度为 $50 \mu\text{m}$,探测器与靶室隔离Be窗之间有0.8 cm空气层,实验数据通过多道计数记录技术获得.HpGe探测器探测效率曲线如图2所

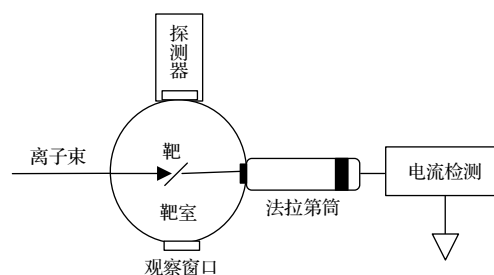


图1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental equipment.

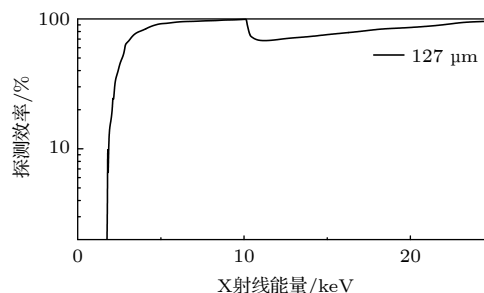


图2 $127 \mu\text{m}$ Be窗厚度的HpGe探测效率曲线

Fig. 2. Detection efficiency curve of HpGe with $127 \mu\text{m}$ Be window.

示,不同波段 X 射线的探测效率也不相同,例如对于 Fe 的 K_{α} X 射线,探测效率为 95%,考虑靶室 Be 窗(穿透率为 98.2%)和空气层(穿透率为 99.9%)的吸收,实际探测效率大约为 93%.

3 实验结果与讨论

3.1 类氦 C 离子与不同金属靶作用产生的 K-X 射线谱

利用 Origin 8.5 非线性曲线的高斯拟合对 15—55 MeV 的类氦 C 离子轰击 Fe, Ni, Nb, Mo 金属产生靶的 K-X 射线谱进行了拟合,图 3 为 15 MeV 的类氦 C 离子轰击各靶时产生光谱的拟合图.从图中可看出 K-X 射线主要为 K_{α} 和 K_{β} 谱,其能量与文献 [31] 数据基本符合, K_{α} 包括 $K_{\alpha 1}$ 和 $K_{\alpha 2}$ 两条线,分别对应 $2p_{3/2}$ 和 $2p_{1/2}$ 电子向 $1s$ 壳层的跃迁.由于靶原子 $2p_{3/2}$ 和 $2p_{1/2}$ 轨道上的电子束缚能差别较小,两个轨道上电子退激到 $1s$ 空穴时对应的两条谱线能量差比较小. K_{β} 包括 $K_{\beta 1}$ 和 $K_{\beta 3}$ 两条线,分别对应 $3p_{3/2}$ 和 $3p_{1/2}$ 电子向 $1s$ 壳层的跃迁对应的两条谱线,能量差比 K_{α} 的两条谱线能量差更小.例如, Fe 的 $2p_{3/2}$ 和 $2p_{1/2}$ 轨道上的电

子束缚能为 719.9 eV 和 706.8 eV,分别退激到 $1s$ 空穴对应的谱线的能量差为 13.1 eV; Fe 的 $3p_{3/2}$ 和 $3p_{1/2}$ 轨道上的电子束缚能均为 52.7 eV,分别退激到 $1s$ 空穴时对应的谱线能量相等.图 3 中数据拟合时自动生成的参数 xc1 和 xc2 分别代表靶原子的 K_{α} 和 K_{β} 射线的能量,图中已标出.

考虑到入射离子的能损、束流线与探测器的夹角等因素 [32],入射离子与厚靶表面相互作用过程中单粒子诱发 X 射线产生截面计算公式的具体表达式为

$$\sigma^X = \frac{1}{n} \cdot \left[\frac{dY}{dE} \cdot \frac{dE}{dR} + \frac{\cos\theta}{\cos\varphi} \cdot \mu \cdot Y \right], \quad (1)$$

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

$$\frac{dY}{dE} = \frac{Y}{E} \frac{d \ln Y}{d \ln E}, \quad (3)$$

其中, $n(\text{cm}^{-3})$ 为靶原子数密度, Y 为单粒子 X 射线产额, $E(\text{keV})$ 为入射离子能,入射能量 E_1 处 $Y(E)$ 导数 dY/dE 的取值,并不是简单的对 $Y(E)$ 进行多项式拟合并求导取得,而是先对产额和能量做了对数变换处理,给出 $\ln Y$ 和 $\ln E$ 之间的函数关系,然后通过换算得到 dY/dE ,具体表达式见 (3) 式 [33-35],

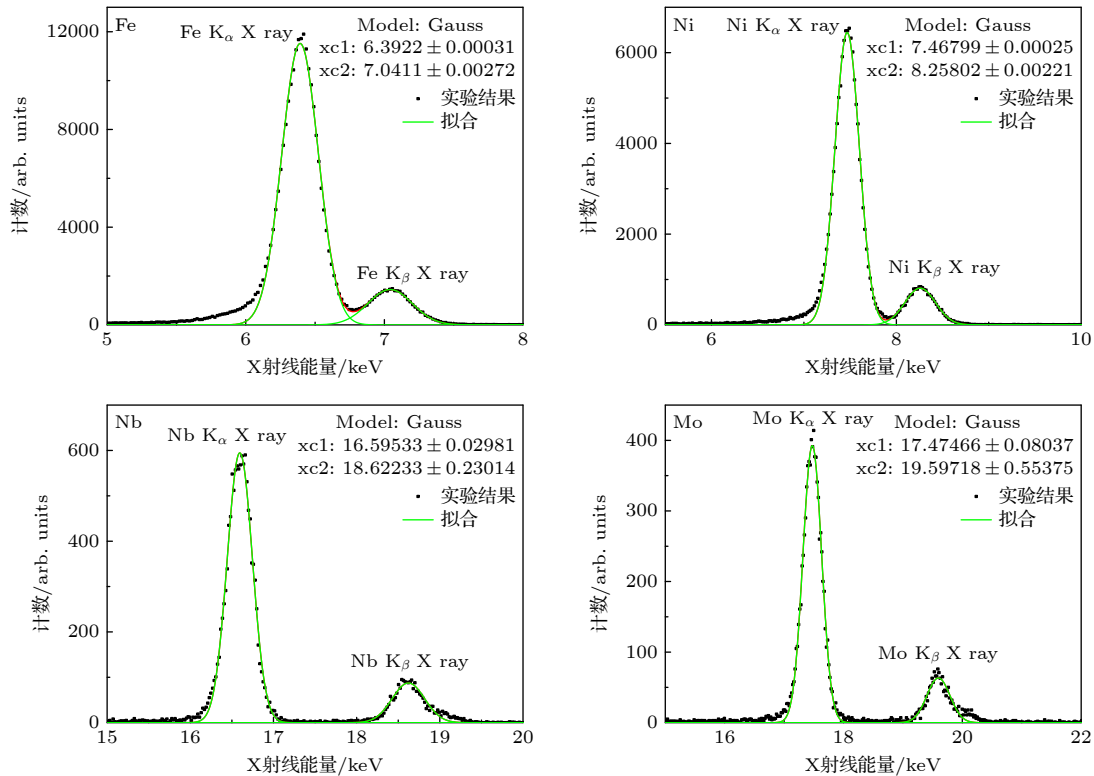


图 3 15 MeV 类氦 C 离子轰击各靶产生的靶的 K-X 射线谱
Fig. 3. Targets K-X ray spectra produced by 15 MeV helium-like C ions.

$\frac{dE}{dR}$ (keV/cm) 为入射离子的能损, 可由 SRIM2008^[36] 计算得到, μ 为目标 X 射线在靶材中的衰减常数, θ 为束流入射方向与靶面法线的夹角, φ 为 X 射线探测器探测方向与束流方向的夹角, N_X 为探测立体角内 X 射线的计数, N_p 为入射离子的计数, Ω 为探测立体角, η 为对应 X 射线能量的探测效率. 实验的误差主要来源有 X 射线计数的统计误差 (< 5%), 入射离子的计数误差 (< 5%), 探测立体角的测量误差 (< 3%), 能损计算 (< 10%) 和 dY/dE 的 Origin 7.5 拟合产生的误差 (< 10%) 等, 总误差通过误差传递公式可计算出, 产生截面的总误差范围在 16% 之内. 计算时先利用 (1) 式分别计算的 K_α 和 K_β 产生截面, 然后求和得到 K 壳层总的产生截面.

3.2 入射能对射线分支强度比的影响

为了进一步研究碰撞对多电离的影响, 对类氦 C 离子轰击各靶时产生的各靶 K-X 射线分支相对强度比随入射离子动能的变化进行分析, 考虑到探测器的效率以及厚靶对 X 射线的吸收, 计算 K-X 射线分支相对强度比时利用 X 射线产生截面的实验数据, 结果如图 4 所示. 分析发现, Fe 靶和 Ni 靶 K_β 与 K_α X 射线的相对强度比随入射离子动

能的增大而出现减小的趋势, 而 Nb 靶和 Mo 靶 K_β 与 K_α X 射线的相对强度比随入射离子动能变化无明显变化趋势. 从原子内壳层过程分析, 类氦 C 离子与各靶原子碰撞过程中, 靶原子产生了 K 壳层电离并形成 L, M 壳层的多电离, 电离度随入射能量的变化而变化^[37]. 靶原子 K 壳层空穴退激过程主要有特征 X 射线发射和俄歇电子发射, 退激概率的总和为 1. 当外壳层发生多电离时, 由于电子的缺失, 俄歇过程被抑制, X 射线增强. K_β X 射线发射对应的是 K-M 辐射跃迁, K_α X 射线辐射对应的是 K-L 辐射跃迁. Fe 的原子组态为 $[Ar]3d^64s^2$, Ni 的原子组态为 $[Ar]3d^84s^2$, 两种元素的 L 壳层全满而 M 壳层未满. 碰撞过程中随着入射动能的增大靶原子 L, M 壳层的多电离也发生了变化, 倘若 M 壳层以外的电子多电离度增加, 则俄歇电子缺失, X 射线发射概率增大, K_β 辐射增强, K_β 与 K_α X 射线的相对强度会随入射能的增大而增大. 但实验结果发现随着入射动能的增大, Fe 的 K_β 与 K_α X 射线的相对强度比减小, 以此推测随着入射能的增大, Fe, Ni 靶原子外壳层多电离度减小, 导致 K_β 辐射减弱. 而对于 Nb 和 Mo 其原子组态分别为 $[Kr]4d^45s^1$, $[Kr]4d^55s^1$, 两种元素的 L 和 M 壳层电子均为全满, 随着入射动能的增大,

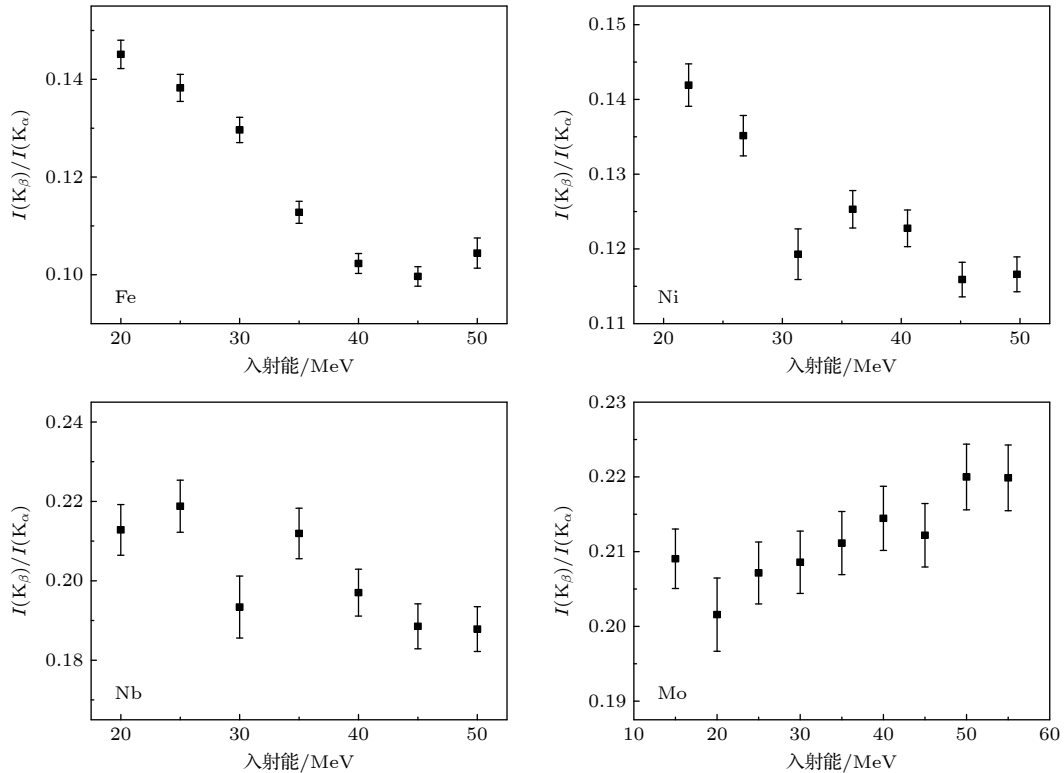


图 4 类氦 C 离子诱发不同金属靶的 K-X 射线分支比随入射能量的变化

Fig. 4. Variation of K-X ray branching ratio of different metal targets induced by helium-like C ions with incident energy.

Nb, Mo 原子 M 和 L 壳层的多电离变化不明显, 因此 Nb 靶和 Mo 靶 K_β 与 K_α X 射线的分支强度比随入射离子动能变化有浮动但无明显变化趋势. 综上, 支壳层电子全满和未全满明显影响该支壳层的电离度.

3.3 类氢 C 离子与质子分别入射各靶的 X 射线产生截面比较

同核子能量下高电荷重离子与氢离子入射产生截面的比较, 可以作为入射离子选择的依据, 因此本节对单核子能量在 1.6—3.75 MeV 的 C^{4+} 轰击各靶时产生的 K_β 与 K_α X 射线产生截面总和的实验值与参考文献 [19] 中质子轰击各靶的产生截面进行比较, 如图 5 所示. 比较发现, 对于 Fe 靶和 Ni 靶, 质子激发的截面在 10^1 — 10^2 barn 量级, C^{4+} 离子激发的截面在 10^4 barn 量级; 而对 Nb 靶和 Mo 靶, 质子激发的截面在 10^1 barn 量级, C^{4+} 离子激发的截面在 10^3 barn 量级. 即同核子能量下, 较高电荷态重离子激发 X 射线的截面比氢离子要大的多, 为 10^2 — 10^3 倍. 这是由于重离子轰击时靶原子 L 壳层发生了多电离, 导致靶的 K-X 射线产生截面增加 [38–40].

3.4 靶原子 X 射线的产生截面

按照原子结构和光谱理论, 靶原子 K 壳层 X 射线的产生截面理论上可以通过 (4) 式计算得到:

$$\begin{aligned}\sigma_{K_i}^X &= \sigma_K \omega_{K_i}, \\ \sigma_K^X &= \sigma_{K_\alpha}^X + \sigma_{K_\beta}^X,\end{aligned}\quad (4)$$

其中, $\sigma_{K_i}^X$ 是 K 壳层空穴辐射跃迁时 X 射线的产生截面, ω_{K_i} 是荧光产额, $i = \alpha, \beta$, 电离截面 σ_K 可由 BEA 模型计算得到:

$$\sigma_K = \left(\frac{NZ^2\sigma_0}{U^2} \right) G(V), \quad (5)$$

其中 N 是对应 i 壳层的电子个数, Z 是入射离子的电荷态, $\sigma_0 = 6.56 \times 10^{-14} \text{ cm}^2 \cdot \text{eV}^2$, U 为电子束缚能, $G(V)$ 是约化速度的函数, 约化速度 $V = v_p/v_i$ (v_p 是入射离子的速度, v_i 是 i 壳层电子的平均速度), $\alpha = 4V^2(1 + 1/V)$, 对于 $V < 0.206$ 时 [6] 可近似取 $G(V) = 4V^4/15$. 另外为了与实验数据对比, 根据 PWBA 和 ECPSSR 理论, 利用 ADDS-V4-0 版本的 ISICS 程序 [5] 分别计算各靶的 K-X 射线产生截面值, 结果见图 6. 已有的研究表明经典两体碰撞近似的 BEA 模型, 给出的 X 射线电离截面正比于 $G(V)$ 函数, 而 $G(V)$ 的代数表达式取决于

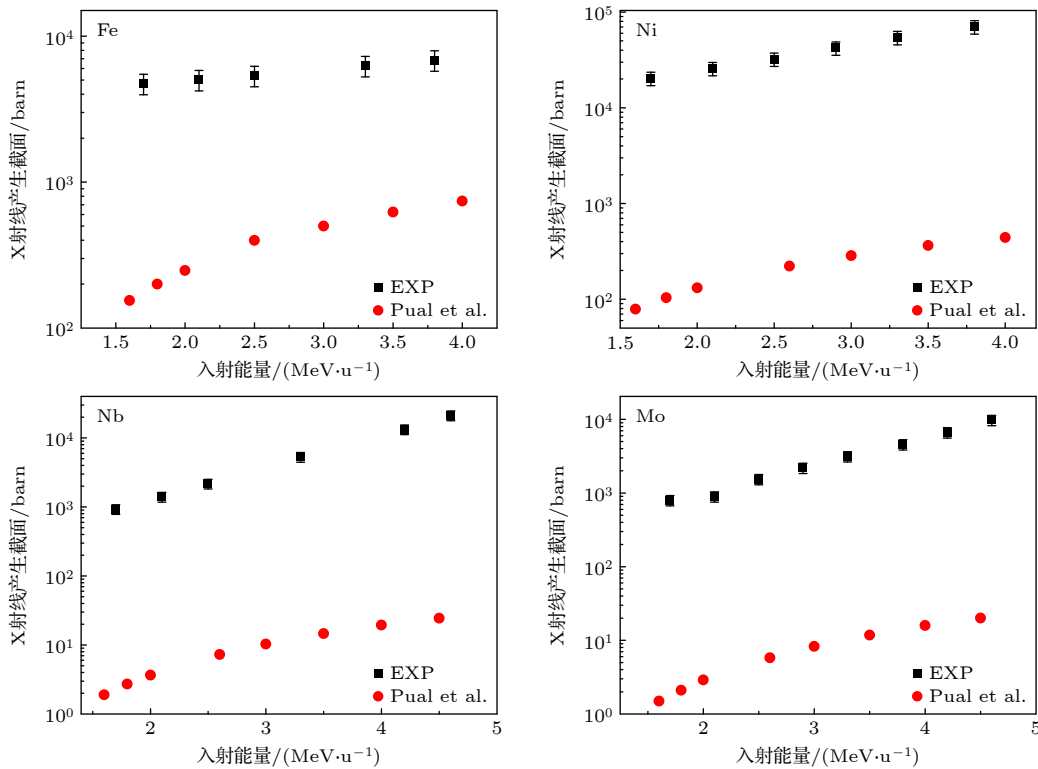


图 5 单核子能量下 C^{4+} 与 H 分别入射各靶的 X 射线产生截面比较

Fig. 5. Comparison of X ray generation cross sections of C^{4+} and H incident on each target at single nucleon energy.

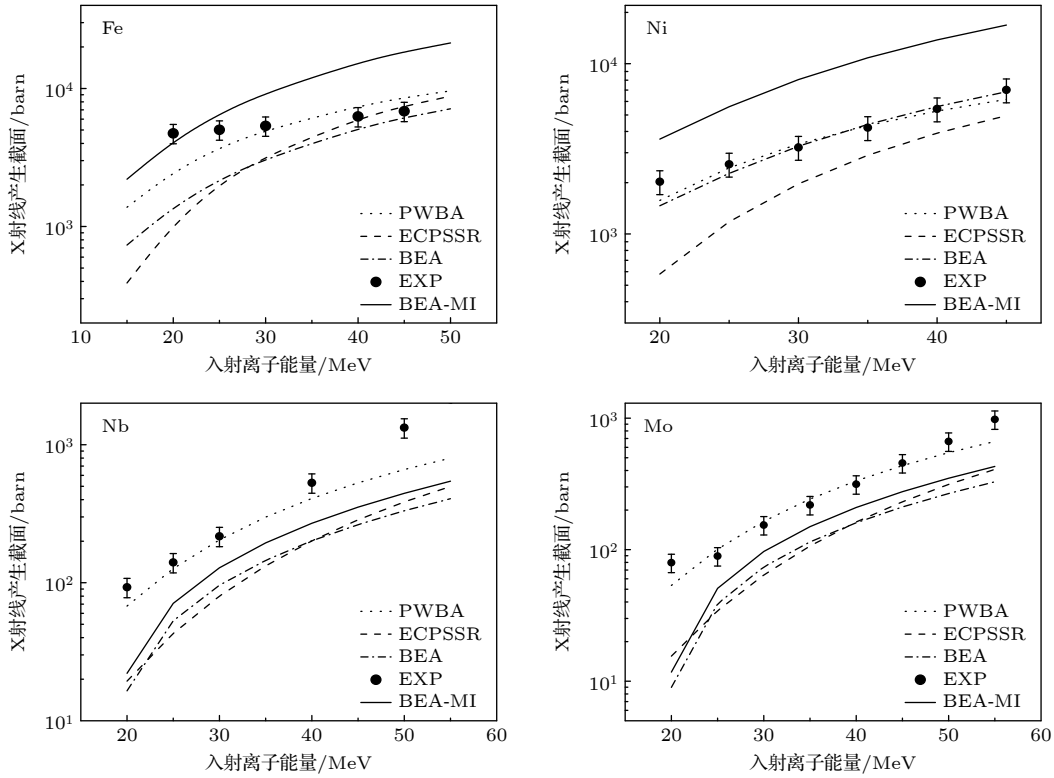


图 6 类氦 C 离子激发不同金属靶的 K-X 射线截面随入射能量的变化

Fig. 6. K-X ray cross sections of helium-like C ions excited different metal targets as a function of incident energy.

速度比 (v_p/v_i) 的取值范围, 该模型适合裸核入射时靶原子 K 壳层电离截面的描述^[6,7]. PWBA 模型是 Born 一级近似理论, 与满足条件 $Z_1 \ll Z_2$ 和 $v_p \gg v_i$ (其中 Z_1, v_p 表示入射离子的原子序数和速度, Z_2 代表靶原子序数, v_i 表示靶原子某壳层电子速度) 的碰撞系统符合^[5]. ECPSSR 模型为静态微扰理论近似, 目前较低能区 (~ 1 MeV) 理论和实验数据符合得较好^[8,41]. 而本文分析的弹靶组合 $Z_1 < Z_2$ (0.14—0.23), v_p/v_i (0.18—0.59) 与以往研究系统不同, 没有完全符合的理论, 需要将理论和实验进一步对比分析.

图 6 给出了类氦 C 离子束轰击不同金属靶时形成的 K_α 和 K_β X 射线产生截面总和随入射离子动能的变化曲线以及不同理论的计算结果. 结果表明, 对于 Fe 靶和 Ni 靶, PWBA 和 ECPSSR 模型的变化趋势与实验值相差甚远, 而半经典的 BEA 模型的理论值变化趋势与实验值变化趋势最接近, 但实验值均大于 BEA 的计算结果. 考虑到随着入射能的增大, 靶原子 L 壳层多电离增加, 导致 K-X 射线的荧光产额增大, 因此实验测量值会高于仅考虑单电离采用原子数据的 BEA 模型. 为了进一步讨论, 考虑多电离对荧光产额的修正, 假

设极限条件下 L 壳层以及以外壳层电子完全电离, 则荧光产额为 1, 将 BEA 模型修正为 BEA-MI. 从计算结果来看, 实验值基本上都包含在 BEA 与 BEA-MI 区域内, 且随入射动能的增大, 荧光产额发生了变化, 在入射动能较小时, 荧光产额增加越大, 实验值越接近 BEA-MI; 随着入射动能继续增大, 荧光产额逐渐变小, 实验值越接近 BEA 模型. 这说明, 对于较高电荷态的重离子碰撞激发 K 壳层电离的描述, 在 15—55 MeV 能区内 BEA 理论比较符合, 但是需要进一步修正.

对于 Nb 靶和 Mo 靶, PWBA 模型的理论值与实验值最为接近, 但实验值均大于 ECPSSR, BEA, BEA-MI 模型计算的理论值, 这与 Fe 靶和 Ni 靶明显不同. 随着靶原子序数的增加, 例如 Nb 靶原子 L 壳层 $2s_{1/2}, 2p_{1/2}, 2p_{3/2}$ 电子的束缚能 (分别为 2698, 2465, 2371 eV) 比 Fe 靶原子 L 壳层 $2s_{1/2}, 2p_{1/2}, 2p_{3/2}$ 电子的束缚能 (分别为 844, 719, 706 eV) 要大的多, 在相同入射动能条件下, 入射离子与靶原子碰撞引起的 Nb 靶 L 壳层多电离效应会减弱. 因此荧光产额的修正并没有使 BEA 模型得到改善. 综上, 该能区 Fe 靶和 Ni 靶实验数据与 BEA 模型符合度高, 而 Nb 靶和 Mo 靶与 PWBA 符合度高.

4 结 论

本文测量和分析了动能为 15—55 MeV 的类氦 C 离子分别与 Fe, Ni, Nb, Mo 靶作用产生的 K-X 特征谱线, 对射线的分支强度比以及射线的产生截面进行了讨论分析. 实验发现: 26 号元素 Fe 靶和 28 号元素 Ni 靶, 由于外壳层多电离效应减弱导致 K_{β} 与 K_{α} X 射线的相对强度比随入射离子动能的增加而减小, 而 41 号元素 Nb 靶和 42 号元素 Mo 靶多电离效应不明显导致 K_{β} 与 K_{α} X 射线的相对强度比随入射离子动能变化无明显变化趋势. 作为选择入射离子的依据, 比较分析了同核子能量下高电荷态重离子与氢离子入射金属靶的 K-X 射线产生截面, 由于重离子轰击时靶原子 L 及以外的壳层发生了多电离, 导致靶的 K-X 射线产生截面增加, 结果表明类氦 C 离子激发 X 射线的总截面比氢离子要为 10^2 — 10^3 倍.

入射能量不同的类氦 C 离子碰撞产生靶原子 L 壳层多电离的程度以及相应的电子排布会有所不同, 引起 K-X 射线荧光产额的变化也会不同, 实验发现, 靶原子序数较小时越明显. 如果考虑碰撞产生多电离的具体情况, 使用准确的多电离荧光产额数据 BEA 将会很好地预测实验结果, 因此可认为靶原子序数较小时, BEA 理论比 PWBA 和 ECPSSR 理论更适合描述该能区较高电荷态重离子碰撞激发靶原子内壳层电离. 多电离荧光产额的获得需要更多实验数据支持, 后续实验中将继续分析.

参考文献

- [1] Gerjuoy E 1961 *Rev. Mod. Phys.* **33** 544
- [2] Zeng J Y 2001 *Introduction to Quantum Mechanics* (2nd Ed.) (Beijing: Peking University Press) p287 (in Chinese) [曾谨言 2001 量子力学导论 (第二版) (北京: 北京大学出版社) 第 287 页]
- [3] Bethe H A 1950 *Rev. Mod. Phys.* **22** 213
- [4] Kocbach L, Hansteen J M, Gundersen R 1980 *Nucl. Instrum. Methods. B* **169** 281
- [5] Liu Z, Cipolla S J 1996 *Comp. Phys. Comm.* **97** 315
- [6] Gryziński M 1965 *Phys. Rev.* **138** A336
- [7] McGuire J H, Richard P 1973 *Phys. Rev. A* **8** 1374
- [8] Brandt W, Lapicki G 1979 *Phys. Rev. A* **20** 465
- [9] Basbas G, Brandt W, Laubert R 1973 *Phys. Rev. A* **7** 983
- [10] Basbas G, Brandt W, Laubert R 1978 *Phys. Rev. A* **17** 1655
- [11] Gray T J, Cocke C L, Gardner R K 1977 *Phys. Rev. A* **16** 1907
- [12] Lutz H O, Stein J, Datz S, Moak C D 1972 *Phys. Rev. Lett.* **28** 8
- [13] Brandt W, Laubert R, Mourinot M 1973 *Phys. Rev. Lett.* **30** 358
- [14] Timmerman R, Weeren R J V, Botteon A, Röttgering H J A, McNamara B R, Sweijen F, Birzan L, Morabito L K 2022 *Astron. Astrophys.* **668** A
- [15] Kimura K, Urushihara D, Kondo R, Yamamoto Y, Ang A K R, Asaka T, Happo N, Hagihara T, Matsushita T, Tajiri H, Miyazaki H, Ohara K, Iwata M, Hayashi K 2021 *Phys. Rev. B* **104** 144101
- [16] Lalande M, Abdelmouleh M, Ryszka M, Vizcaino V, Rangama J, Méry A, Durantel F, Schlathölter T, Pouilly J C 2018 *Phys. Rev. A* **98** 062701
- [17] Coskun A F, Han G J, Ganesh S, Chen S Y, Clavé X R, Harmsen S, Jiang S, Schürch C M, Bai Y H, Hitzman C, Nolan G P 2021 *Nat. Commun.* **12** 789
- [18] Collaboration H 2017 *Nature* **551** 478
- [19] Paul H, Sacher J 1989 *Atom. Data Nucl. Data* **42** 105
- [20] Yu Y C, McNeir M R, Weathers D L, Duggan J L, McDaniel F D, Lapicki G 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5702
- [21] Bertol A P L, Hinrichs R, Vasconcellos M A Z 2015 *Nucl. Instr. Meth. B* **365** 8
- [22] 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
- [23] Chen X M, Shao J X, Yang Z H, Zhang H Q, Cui Y, Xu X, Xiao G Q, Zhao Y T, Zhang X A, Zhang Y P 2007 *Eur. Phys. J. D* **41** 281
- [24] Kallman T R, Palmeri P 2007 *Rev. Mod. Phys.* **79** 79
- [25] Santos-Lleo M, Schartel N, Tananbaum H, Tucker W, Weisskopf M C 2009 *Nature* **462** 997
- [26] Wilkes B J, Tucker W, Schartel N, Santos-Lleo M 2022 *Nature* **606** 261
- [27] Wheeler R M, Chaturvedi R P, Duggan J L, Tricomi J, Miller P D 1976 *Phys. Rev. A* **13** 958
- [28] Bambynek W, Crasemann B, Fink R W, et al. 1972 *Rev. Mod. Phys.* **44** 716
- [29] Peterson R C 2011 *Astrophys. J.* **742** 21
- [30] Honda S, Aoki W, Ishimaru Y, Wanaajo S, Ryan S G 2006 *Astrophys. J.* **643** 1180
- [31] Thompson A C, Attwood D T, Gullikson E M, et al. (Edited by Thompson A C) 2009 *X-Ray Data Booklet* (Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory University of California) pp10–12
- [32] Garcia J D, Fortner R J, Kavanagh T M 1973 *Rev. Mod. Phys.* **45** 111
- [33] Zhang H Q, Chen X M, Yang Z H, Xu J K, Cui Y, Shao J X, Zhang X, Zhao Y T, Zhang Y P, Xiao G Q 2010 *Nucl. Instr. Meth. B* **268** 1564
- [34] Khan M R, Crumpton D 1978 *Appl. Phys.* **15** 335
- [35] McKnight R H, Thornton S T, Karlowicz R R 1975 *Nucl. Instr. Methods.* **123** 1
- [36] Open Program The Stopping and Range of Ions in Matter, Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P <http://www.srim.org/> [2008-04]
- [37] 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]
- [38] Burch D, Ingalls W B, Risley J S, Heffner R 1972 *Phys. Rev. Lett.* **29** 1719
- [39] Banaś D, Pajek M, Semaniak J, et al. 2002 *Nucl. Instr. Meth. B* **195** 233

[40] Zhou X M, Zhao Y T, Cheng R, Sun Y B, Wang X, Lei Y, 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]

[41] Zhou X M, Zhao Y T, Cheng R, Wang Y Y, Lei Y, Wang X, Sun Y B 2013 *Nucl. Instrum. Meth. B* **299** 61

K-X rays induced by helium-like C ions in thick target atoms of different metals*

Mei Ce-Xiang¹⁾ Zhang Xiao-An¹⁾ Zhou Xian-Ming¹⁾ Liang Chang-Hui¹⁾
Zeng Li-Xia¹⁾ Zhang Yan-Ning¹⁾ Du Shu-Bin²⁾
Guo Yi-Pan³⁾ Yang Zhi-Hu^{3)†}

1) (*Ion beam & Optical Physical joint Laboratory, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China*)

2) (*Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

3) (*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China*)

(Received 13 September 2023; revised manuscript received 2 November 2023)

Abstract

The physical process and experimental phenomena of the interaction between highly charged heavy ions and atoms are very complex, particularly in the intermediate energy region, because of the limitation of accelerator and existing theoretical analysis, less systematic researches, incomplete atomic data, and not so high accuracy. The research of celestial element X-ray data is more scarce and the research of X-ray data of celestial elements is even more scarce. Helium-like C ions with 15–55 MeV kinetic energy provided by the HI-13 MV series accelerator of the China Institute of Atomic Energy are used to bombard Fe, Ni, Nb and Mo thick targets. The HpGe detectors are used to measure the K-X ray emission, and the corresponding K-X ray emission cross sections are obtained. Due to the different ionization degrees of the shell layers of various target atoms, the branching intensity ratio of K_{β} to K_{α} X rays emitted by Helium-like C ions interacting with Fe and Ni target atoms decreases with the increase of the kinetic energy of the incident ions, while the branching intensity ratio of K-X rays emitted by Nb and Mo target atoms does not change significantly. The K-X ray emission cross section of target atom is calculated by using the formula of thick target cross section, and compared with the results of different theoretical models and proton. The results show that with the increase of the kinetic energy of helium-like C ions, the total emission cross section of the K_{β} and K_{α} X ray emitted from Fe and Ni target atoms are most consistent with the BEA correction model considering multiple ionization, and the total emission cross section of K_{β} and K_{α} X ray emitted from Nb and Mo target atoms are closest to the theoretical values of PWBA model. When the energy of proton is the same as that of single nucleon C ion, the cross section of K-X ray produced by proton is about three orders of magnitude smaller than that produced by helium-like C ion.

Keywords: X-ray, ion beam, cross section, binary-encounter approximation, planar Born approximation

PACS: 32.30.Rj, 32.80.Aa, 34.80.Dp

DOI: 10.7498/aps.73.20231477

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12205247), the Natural Fundamental Science Research Project of Shaanxi Province, China (Grant No. 2023-JC-QN-0080), the Fundamental Science Research Project for Mathematics and Physics of Shaanxi Province, China (Grant No. 22JSQ040), the Qinglan Talents Training Project of Xianyang Normal University, China (Grant No. XSYQL201910), the Key Laboratory of Ion Beam and Optical Physics of Xianyang, China (Grant No. L2022-CXNL-ZDSYS-001), and Shaanxi University Students Innovation and Entrepreneurship Training Program, China (Grant No. S202010722055S).

† Corresponding author. E-mail: z.yang@impcas.ac.cn

类氦C离子诱发不同金属厚靶原子的K-X射线

梅策香 张小安 周贤明 梁昌慧 曾利霞 张艳宁 杜树斌 郭义盼 杨治虎

K-X rays induced by helium-like C ions in thick target atoms of different metals

Mei Ce-Xiang Zhang Xiao-An Zhou Xian-Ming Liang Chang-Hui Zeng Li-Xia Zhang Yan-Ning Du Shu-Bin Guo Yi-Pan Yang Zhi-Hu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 043201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231477

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231477>

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>

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>

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>

复动量格林函数方法对n- α 散射研究

Investigation of n- α scattering by combining complex momentum representation and Green's function

物理学报. 2019, 68(9): 092101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182197>

晶体X射线劳厄衍射分束特性研究

Beam splitting characteristics of crystal X-ray Laue diffraction

物理学报. 2022, 71(4): 046101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211674>

近Bohr速度I²⁰⁺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 I²⁰⁺ ions impacting on various targets

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