

^{252}Cf 自发裂变 K X 射线发射与动能-电荷关系*

刘超 刘世龙[†] 杨毅 冯晶 李昱兆

(中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室, 北京 102413)

(2024 年 4 月 24 日收到; 2024 年 6 月 1 日收到修改稿)

原子核裂变后多物理量间的关联测量是认识裂变过程直接有效的实验手段, 然而由于初级裂变产物准确的电荷鉴别仍面临技术困难, 电荷相关的多参数研究相对匮乏. 为此, 通过高分辨的低能高纯锗探测器和金硅面垒探测器开展了 ^{252}Cf 自发裂变的裂变碎片 K X 射线和动能的符合测量. 利用 K X 射线可以很好地鉴别电荷数 $Z = 39-62$ 的裂变碎片, 电荷分辨 $\Delta Z \approx 0.7$, K X 射线产额呈现强烈的电荷相关性. 借助 K X 射线给出了碎片平均动能和平均总动能及其分布宽度随核电荷数的分布, 轻碎片动能分布具有鲜明的奇偶效应, 偶 Z 碎片的动能比奇 Z 碎片的高约 0.48 MeV; 平均总动能在 $Z = 52-53$ 处达到峰值, 总动能分布宽度在 $Z = 56$ 附近呈现凹坑, 这反映了形变壳结构对断点形状的显著影响. 裂变碎片 K X 射线发射的信息及动能-电荷关系研究可为裂变独立产额测量和裂变理论模型的检验提供必要的参考数据.

关键词: 裂变碎片, K X 射线, 电荷鉴别, 碎片动能**PACS:** 25.85.Ca, 21.10.Ft, 29.30.Kv**DOI:** 10.7498/aps.73.20240563

1 引言

原子核裂变反应一方面是核能利用的重要基础, 另一方面呈现了复杂量子多体系统丰富的物理现象, 为核物理基础研究提供了重要的探针. 裂变相关的实验和理论研究一直是核物理领域的热点课题. 尽管自裂变现象发现以来人们就试图对裂变后可观测量进行详尽的实验研究, 但目前仍存在裂变碎片电荷鉴别和裂变后多参数关联测量等技术难题. 核裂变的断点统计模型和以实验数据为基础的多维参数化模型可以定量给出裂变后物理量的分布^[1,2], 但理论模型的预测精度需要足够的多参数关联实验来检验. 其中, 碎片电荷与动能的关联研究是认识裂变过程的重要途径, 例如可以揭示球形壳和形变壳对断点形状的共同影响^[3,4] 以及质子对效应的作用机制^[5,6]. 然而, 对于低激发能条件下

的锕系核裂变体系, 由于裂变产物每核子能量较低, 依据 $\Delta E-E$ 法、电离径迹重心法和射程法等反映能量沉积过程的实验方法难以得到高分辨的电荷数据^[7-9], 目前关于动能-电荷关系的实验研究较为有限, 实验资料的匮乏制约着裂变理论的检验和发展.

特征 X 射线是电荷鉴别十分有效的依据之一, 通过碎片动能与 X 射线能量的符合测量可以给出 X 射线产额和碎片动能随核电荷数的分布. 裂变碎片的 K X 射线主要来自初级裂变产物退激时的内转换过程^[10], K X 射线发射与碎片质量和电荷强烈相关, 因此弄清 K X 射线产额与裂变碎片的依赖关系无论对于认识裂变动力学过程还是得到高质量的独立产额数据都有重要意义. 对裂变碎片的 X 射线研究集中在 20 世纪 90 年代以前^[11-13], 且主要采用 NaI 探测器和 Si(Li) 探测器, 这两类探测器分别存在能量分辨不足和对重碎片 X 射线探

* 核数据重点实验室基金 (批准号: JCKY23201C153) 和稳定支持基础科研计划 (批准号: BJ010261223282) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: liusl@ciae.ac.cn

测效率低的问题, K X 射线产额分布具有较大的不确定度. 为了得到更准确的裂变碎片 K X 射线发射的相关信息, 以及研究碎片电荷相关的裂变后参数的关联关系, 本工作基于金硅面垒半导体探测器和低能高纯锗探测器搭建了裂变碎片与 K X 射线符合测量装置, 开展了 ^{252}Cf 自发裂变 (sf) 的相关实验测量, 给出了裂变碎片 K X 射线产额分布和碎片放中子后的动能-电荷关系.

2 实验测量与数据处理

2.1 裂变碎片与 K X 射线符合测量

裂变碎片能量测量采用 Ortec 公司的 F-035 系列金硅面垒半导体探测器 (SBD), 其有效面积为 900 mm^2 , 对裂变碎片的能量分辨率好于 1.5% [14]. X 射线测量采用 Canberra 公司的 GL2015 R 低能高纯锗探测器 (LEGe), 探测器有效面积为 2000 mm^2 , 晶体厚度为 15 mm , 探头覆盖 0.5 mm 厚的铍窗, 适于 3 keV 以上的谱学测量. 基于真空转移技术制备的 ^{252}Cf 裂变源可忽略自吸收效应[15], 因而具有较为理想的裂变碎片能谱, 本实验所用的 ^{252}Cf 转移源每秒钟产生约 140 次裂变事件, 源底衬为厚 0.5 mm 的不锈钢片.

实验布局如图 1 所示, 裂变源与 SBD 置于真空腔室内, 二者中心距离 6 cm ; 为了减小多普勒效应带来 X 射线能谱的展宽, 两个 LEGe 放置在裂变碎片飞行路径的 90° 方向上; LEGe 在水平方向上紧靠裂变源, 垂直方向上距离 ^{252}Cf 源 8 cm ; 厚度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的黑色 Kapton 薄膜作为真空腔室的 X 射线出射窗, 同时为 SBD 起到遮光作用. 数据获取系统以 SBD 的时间信号作为触发信号, 通过逐个裂变事件记录的方式实现裂变碎片动能-X 射线能量的符合测量. 原始数据以一定的时间周期输出, 方便离线进行峰漂修正. 实验连续开展 26 d, 符合计数率约 0.18 counts/s , 净计数率约 0.078 counts/s .

采用 ^{241}Am 源和 ^{152}Eu 标准源的特征 X 射线和低能 γ 射线对 LEGe 进行能量刻度和探测效率测量, 并利用蒙特卡罗程序进行探测效率的模拟. 实验测得 LEGe 在 13.95 keV 处能量分辨 ΔE 为 0.48 keV (半高宽); 在 59.54 keV 处 ΔE 为 0.50 keV (半高宽). 放射源距离探头 25 mm 时的绝对探测效率如图 2 所示, 在裂变碎片的 K X 射线感兴趣

能区 ($15\text{--}50\text{ keV}$) 探测效率处于效率曲线的峰值附近, 且效率随能量变化不明显. 探测效率的模拟结果与实验值在 3% 的偏差范围内符合得很好.

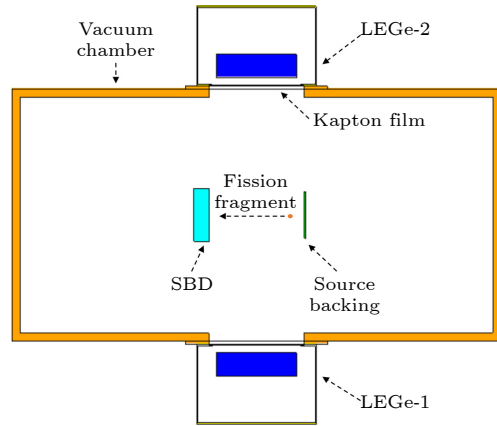


图 1 裂变碎片与 X 射线符合测量装置示意图

Fig. 1. Schematic view of the experimental setup for fission fragment and X-ray correlated measurement.

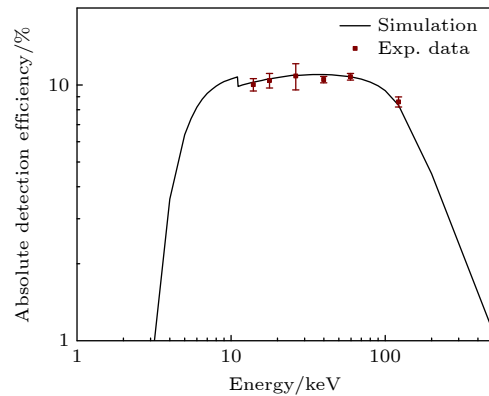


图 2 低能高纯锗探测器的探测效率曲线

Fig. 2. Detection efficiency curve for the low energy germanium detector.

裂变碎片在飞行过程中发射 X 射线, 实验系统的符合探测效率与 X 射线的产生位置有关. 研究表明多数裂变碎片在裂变后 1 ns 内发射 K X 射线[10,11], 而碎片平均飞行速度约 1 cm/ns , 因此可认为朝向 SBD 飞行的碎片 (前向碎片) 在离开源底衬 1 cm 附近发射 K X 射线; 与此同时, 互补碎片背向 SBD 发射并很快被阻止在底衬中, 其 K X 射线发射不受多普勒效应影响. 通过蒙特卡罗程序模拟给出符合测量装置对 K X 射线的绝对探测效率曲线, 如图 3 所示, 模拟结果表明, 来自前向碎片的 K X 射线探测效率比来自背向碎片的高约 7% , 这与实验测得的前向碎片与背向碎片的计数关系一致.

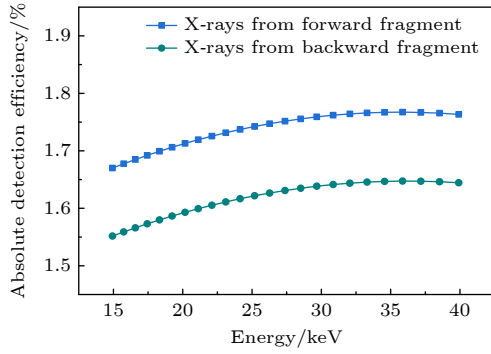


图 3 符合测量装置对 X 射线的绝对探测效率

Fig. 3. Absolute X-ray detection efficiency for the correlated measurement setup.

2.2 裂变碎片的 K X 射线能谱

同一元素的 $K\alpha_1$ 与 $K\alpha_2$ 射线能量相近, 且能量之差小于 LEGe 的能量分辨本领; 同种元素的 $K\alpha$ 与 $K\beta$ 射线能量相差 1.5—5.5 keV, 且随着电荷数的增加而逐渐增大, 因此在 K X 射线能谱解谱时必须细致考虑各种成分贡献。

实验测量得到的与裂变碎片符合的 K X 射线能谱可用以下函数拟合:

$$Y(E_i) = \sum_{j=1}^N P_j \sum_{k=1}^4 R'_{jk} \exp\left(-\frac{(E_i - \bar{E}_{jk})^2}{2\sigma^2}\right) + B(E_i), \quad (1)$$

$$R'_{jk} = \frac{R_{jk}}{\sum_{k=1}^4 R_{jk}}, \quad (2)$$

其中, 索引 j 代表不同的元素; P_j 表示各元素的 K X 射线相对强度; 各元素的 K X 射线能谱包含

$K\alpha_1$, $K\alpha_2$, $K\beta_1'$ 和 $K\beta_2'$ 四种成分, 各成分可用高斯分布描述, R_{jk} 和 \bar{E}_{jk} ($k = 1-4$) 分别表示 4 种 K X 射线分量的相对强度和平均能量峰位, 其推荐值由文献 [16] 给出; 高斯分布的标准偏差 σ 由探测器的能量分辨决定; $B(E_i)$ 为本底的贡献, 主要来自天然 γ 射线和裂变瞬发 γ 射线, 可通过多项式拟合得到。需要指出, 本工作中多普勒效应对 X 射线能谱的影响很小, 在解谱时可以忽略。

图 4 所示为 $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ 的裂变碎片 K X 射线实验谱及拟合谱, 拟合结果与实验谱符合得相当好。得益于测量系统的高分辨能力, 通过 K X 射线能谱可以很好地分辨电荷数 $Z = 39-62$ 的裂变碎片, 电荷分辨 ΔZ (半高宽) 约为 0.7 个电荷单位。

2.3 裂变碎片的动能分布

对于低能裂变体系, 裂变碎片的动能通常在 1 MeV/u 左右, 低能重离子测量受探测器幅度亏损影响而存在非线性能量响应问题 [17], 为此本工作在 K X 射线测量基础上通过电荷标记方法进行 SBD 的能量刻度, 刻度过程分两个步骤。首先对给定电荷的轻、重碎片采用 Schmitt 方法 [18] 给出其平均道址-能量对应关系, 刻度方程表示为

$$\bar{E}(A_Z, \bar{x}) = (a + a' \cdot A_Z) \cdot \bar{x} + b + b' \cdot A_Z, \quad (3)$$

$$a = \frac{a_0}{P_L - P_H}, \quad a' = \frac{a'_0}{P_L - P_H},$$

$$b = b_0 - aP_L, \quad b' = b'_0 - a'P_L, \quad (4)$$

其中, a_0 , a'_0 , b_0 和 b'_0 是与裂变体系和探测器类型相关的常数, 对于 $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ 反应和 Ortec F 系列

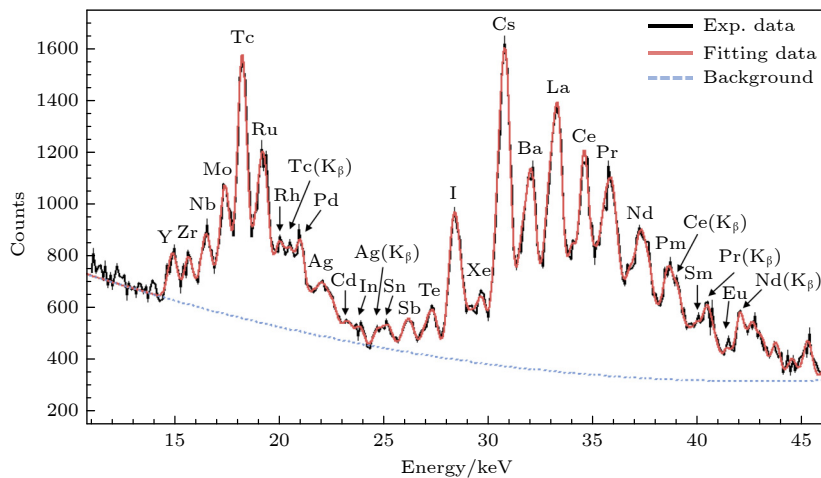

 图 4 ^{252}Cf 自发裂变的裂变碎片 K X 射线能谱

Fig. 4. Fission fragment K X-ray energy spectrum for $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$.

探测器, 文献 [19] 给出了这些常数的可靠取值; P_L 和 P_H 分别为本实验测量获得的裂变碎片脉冲高度谱的轻、重碎片峰位 3/4 高度处的中心道址; \bar{x} 表示给定电荷裂变碎片的平均道址; A_Z 为给定电荷裂变碎片的平均质量, 对于 $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ 反应有 [20]:

$$A_Z = \begin{cases} (Z + 1.2854)/0.4153, & Z < 45, \\ (Z + 3.5689)/0.4153, & Z > 47. \end{cases} \quad (5)$$

第二步对典型的平均道址-能量数据点进行二次多项式拟合得到全道址范围的能量刻度函数, 拟合结果如图 5 所示.

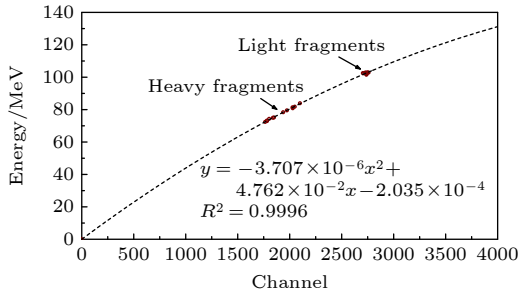


图 5 金硅面垒半导体探测器对典型裂变碎片的能量响应
Fig. 5. Energy response of the silicon surface barrier detector for typical fission fragments.

$^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ 反应的裂变碎片放中子后动能分布的实验结果与唯象模型计算结果如图 6 所示, GEF 模型 [21] 计算的能谱相比实验结果偏硬, 且轻碎片的平均分布宽度 $\sigma(E_L)$ 显著偏大; CGMF 模型 [2] 能够较好地再现动能变化的趋势. 动能分布的系统学参数——轻、重碎片的平均动能 \bar{E}_L , \bar{E}_H 和平均总动能 TKE 列于表 1, 实验结果与通过动能-速度法 [19] 和飞行时间法 [22] 测量得到的结果符合得很好.

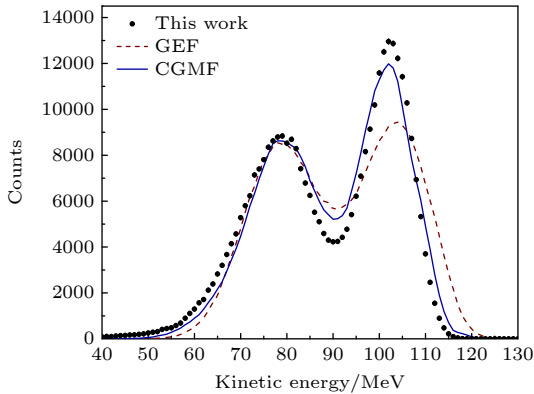


图 6 ^{252}Cf 自发裂变的放中子后裂变碎片能谱
Fig. 6. Kinetic energy distribution of the post-neutron fragment from $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$.

表 1 ^{252}Cf 自发裂变的平均动能和平均总动能
Table 1. Average kinetic energy and average total kinetic energy of fission fragments for $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$.

	\bar{E}_L/MeV	\bar{E}_H/MeV	TKE/MeV
本工作	102.42±0.02	78.65±0.03	181.07±0.04
Weissenberger ^[19]	102.61	78.42	181.03
Henschel ^[22]	102.58±1.15	78.67±0.60	181.25±1.30

裂变碎片的动能——K X 射线能量二维谱如图 7(a) 所示, 对不同元素依据 K X 射线能量开窗即可得到碎片的电荷数与动能分布的关系. 以 Cs ($Z = 55$) 为例, 依据其 $K\alpha$ 射线能量开窗得到前向碎片的动能分布如图 7(b) 所示, 呈现出轻、重碎片双峰结构, 前向碎片与 Cs 元素 X 射线的符合包含两种情况: 一是 X 射线来自前向碎片本身, 此时前向碎片即为 Cs, 重碎片动能较小, 动能分布体现为图 7(b) 的低能峰; 二是 X 射线来自背向碎片 Cs, 此时测得的前向碎片即为 Tc ($Z = 43$), 轻碎片动能较大, 动能分布体现为图 7(b) 的高能峰.

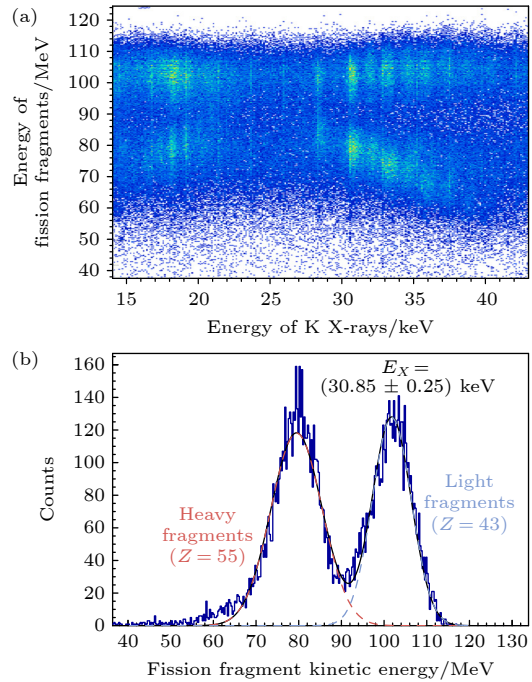


图 7 (a) 裂变碎片动能与 K X 射线能量二维谱; (b) 依据 K X 射线能量开窗的碎片动能分布
Fig. 7. (a) Two-dimensional histogram for fission fragment kinetic energies and K X-rays; (b) fission fragment kinetic energy distribution gated by K X-ray energy.

3 结果与讨论

3.1 $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ 的裂变碎片 K X 射线产额

对各元素的 K X 射线拟合谱分别积分, 并考

考虑能量相关的探测效率即可得到 K X 射线发射总数, 将其归一到 200% 得到裂变碎片的相对 K X 射线产额分布, 如图 8 所示, 其中, $Z > 49$ 重碎片的贡献约占 68%. 对于重碎片, 奇 Z 核的 K X 射线产额比相邻偶 Z 核高, 表现出显著的奇偶效应. 平均奇偶效应因子定义为

$$\delta = \frac{\sum_o Y(Z) - \sum_e Y(Z)}{\sum_o Y(Z) + \sum_e Y(Z)}, \quad (6)$$

其中, $\sum_o Y(Z)$ 和 $\sum_e Y(Z)$ 分别表示奇 Z 核与偶 Z 核 K X 射线产额之和, 本实验对于重碎片 $\delta \approx 13.3\%$, 与 Rao 等^[23]的结果一致.

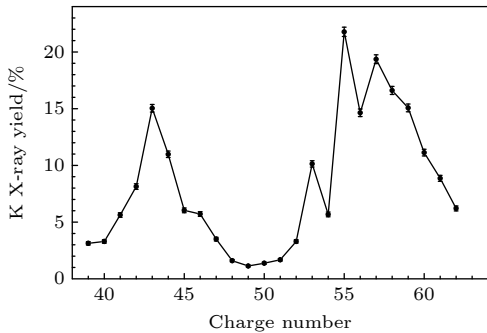


图 8 ^{252}Cf 自发裂变的 K X 射线相对产额与电荷数的关系
Fig. 8. K X-ray yields of fission fragments as a function of nuclear charge for ^{252}Cf (sf).

每个碎片平均发射的 K X 射线数随电荷的分布可表示为

$$Y_X(Z) = \frac{N_X(Z)}{\frac{1}{2}N_F Y(Z)}, \quad (7)$$

其中, $N_X(Z)$ 表示电荷相关的 K X 射线发射数; N_F 为总裂变碎片数; $Y(Z)$ 为 200% 归一的裂变碎片电荷产额分布, 采用 ENDF/B-VIII.0^[24] 数据库的评价值. 图 9 所示为裂变后约 6 ns 内 K X 射线的 $Y_X(Z)$ 分布数据与 Rao 等^[23]和 Reisdorf 等^[12]实验结果的比较. $Y_X(Z)$ 的不确定度来源主要包括 K X 射线测量的统计不确定度和电荷产额评价值的不确定度, 此外 X 射线绝对探测效率的不确定度在 3% 左右.

裂变碎片的 K X 射线发射主要来自内转换过程, K 壳层内转换系数总体上随核电荷数 Z 和 γ 辐射的角动量的增大而增大, 随跃迁能量的增大而减小, 这使得 K X 射线产额与裂变碎片的核结构和

退激过程密切相关. 从图 9 可以得出以下结论: 1) 平均每碎片的 K X 射线产额约为 0.601, 其中对于轻、重碎片分别为 0.146 和 0.455, 此结果与已有实验数据^[25,26]基本一致; 2) 近闭壳 ($Z = 50, N = 82$) 处 $Y_X(Z)$ 很小, 这是由于第一激发态的能级较高, 产生内转换的概率很低; 3) 远离闭壳的非对称裂变区域, 重碎片 $Y_X(Z)$ 增大得很快, 原因之一是重碎片的低能级数目显著增加^[27]导致了内转换概率的增大; 4) $Y_X(Z)$ 与 K X 射线的发射时间有一定相关性, 图 9 中本工作结果和 Rao 等^[23]和 Reisdorf 等^[12]的数据分别代表 6 ns, 1 ns 和 500 ns 内的 K X 射线发射情况. 对于轻碎片, 偶 Z 核在 1 ns 后发射 K X 射线的比例更高, 即偶 Z 核 K X 射线倾向于有更长的寿命; 对于重碎片, 奇 Z 核相比偶 Z 核长寿命 K X 射线占比更高; 在闭壳附近, $Z = 48$ 和 50 时长寿命 K X 射线占绝对优势, Reisdorf 等^[12]也讨论了类似的情形^[12]; 5) 在 $Z = 51-58$ 区域, K X 射线发射存在很强的奇偶效应, 这可以解释为对效应的影响使得偶核低能跃迁数较小而内转换概率低, 从而表现为偶 Z 核具有较小的 K X 射线多重数.

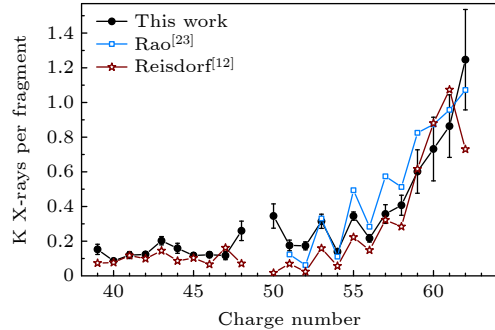


图 9 ^{252}Cf 自发裂变的平均每碎片 K X 射线产额与电荷数的关系

Fig. 9. Average K X-rays per fragment as a function of nuclear charge for ^{252}Cf (sf).

通过两个 LEGe 信号的符合可以给出裂变碎片发射多条 K X 射线的情形, 这主要来自级联内转换过程^[28]. 裂变碎片与两条 K X 射线三重符合下的 X 射线—X 射线二维谱如图 10 所示, 可以直观地看到重碎片核素 I, Cs, La, Pr 和 Nd 存在明显的级联 K X 射线发射, 且奇偶效应显著. 一对互补裂变碎片之间的 K X 射线发射也存在一定联系, 图 10 中展示了 Tc-Cs 互补碎片对有较大的概率同时发射 K X 射线.

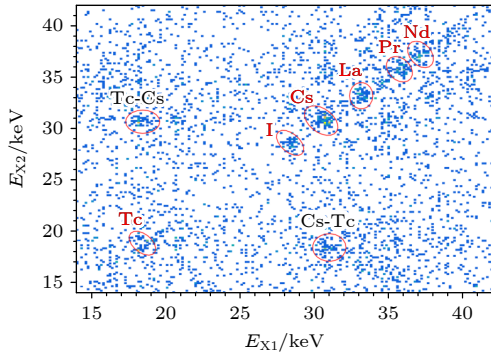


图 10 裂变碎片的 X 射线-X 射线二维谱

Fig. 10. Two-dimensional histogram of X-ray-X-ray for fission fragments.

3.2 $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ 的裂变碎片动能-电荷关系

裂变碎片放中子后的平均动能随核电荷数的分布如图 11 所示, 轻碎片的平均动能随 Z 表现出较强的稳定性, 而重碎片的平均动能与 Z 的相关性较大; 在 $Z = 50$ 闭壳处平均动能快速下降, 降幅在 20 MeV 左右. 平均动能随电荷数的变化整体上与随质量数的变化趋势一致 [18], 但轻碎片动能随电荷数的分布具有鲜明的奇偶效应, 偶 Z 碎片相比奇 Z 碎片动能的平均增幅约为 0.48 MeV; 重碎片动能分布的奇偶效应不显著, 主要体现在 $Z = 56$ 和 $Z = 58$ 区域, 探测器对重碎片的能量分辨不足, 这可能在一定程度上模糊了动能的奇偶效应, 另一方面 ^{132}Sn 闭壳和更重的形变壳的共同作用或许也减弱了动能分布的起伏.

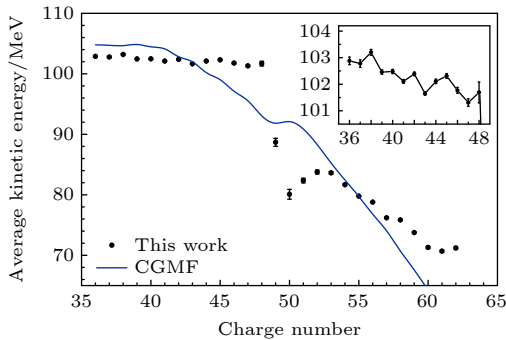


图 11 ^{252}Cf 自发裂变的放中子后裂变碎片平均动能与电荷的关系

Fig. 11. The post-neutron fragment average kinetic energy as a function of nuclear charge for $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$.

CGMF 模型计算结果没能重现裂变碎片动能分布的奇偶效应, 且在 $Z = 50$ 区域动能变化相比实验值要平滑得多. 一方面, 碎片动能的高精度描述是十分困难的, 通常要对断点形状做必要的简化; 另一方面, CGMF 在参考总动能相关实验数据的

基础上, 通过参数化公式来描述质量相关的平均总动能 $\overline{\text{TKE}}(A)$ 及其分布宽度 $\sigma_{\text{TKE}}(A)$, 其中对 $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ 体系参考了 Hamsch 等 [29] 基于双动能 (2E) 法的实验数据, 而 2E 法的质量分辨通常在 2—3 u, 这在一定程度上影响了动能计算的精度.

图 12(a) 所示为裂变碎片放中子后的平均总动能随核电荷数的变化. 本工作在 $Z = 56$ 和 $Z = 58$ 区域偶-偶电荷数碎片释放的总动能平均比相邻的奇-奇电荷数碎片释放的高约 1.1 MeV. 平均总动能在 $Z = 52—53$ 附近出现峰值, 在对称裂变处显著降低, 这与利用逆运动学方法得到的中等激发能下铀系核裂变的 $\overline{\text{TKE}}(Z)$ 分布表现出的趋势基本一致, 体现了质子和中子形变壳结构对裂变过程的显著影响 [4,30]. 图 12(a) 中同时比较了 CGMF 和 GEF 模型的 $\overline{\text{TKE}}(Z)$ 计算结果, CGMF 在对称裂变区附近 TKE 相比实验值系统偏高. GEF 模型的计算结果相比本工作偏离得更高, 已有研究表明, 对 $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$, $^{232}\text{Th}(\text{n}, \text{f})$ [21] 和 $^{239}\text{Pu}(\text{n}, \text{f})$ [31] 等多个裂变体系 GEF 计算的动能都系统高于实验值, 唯象模型在碎片动能描述上还需要进一步完善. 图 12(b) 给出了总动能分布宽度 σ_{TKE} 随电荷数的分布, 在 $Z = 55—57$ 区域 TKE 分布宽度最小, 或许可用 $Z = 56$ 和 $N = 88$ 壳结构来解释, 在 ^{144}Ba 核附近具有稳定的形变, 碎片形状的离散程度较小使得 TKE 分布宽度较窄.

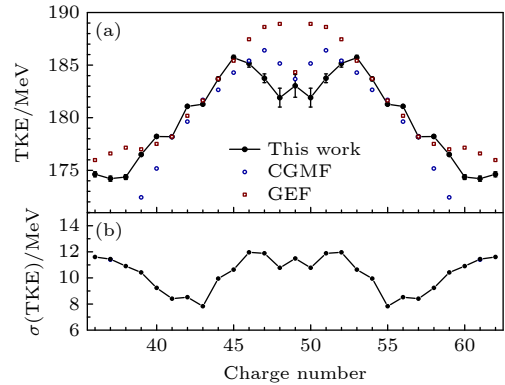


图 12 ^{252}Cf 自发裂变放中子后 (a) 平均总动能, (b) 总动能分布宽度与裂变碎片电荷的关系

Fig. 12. The nuclear charge-dependent of (a) post-neutron TKE and (b) the variance of the TKE distributions for $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$.

4 结 论

本文开展了 ^{252}Cf 自发裂变的裂变碎片和 K X 射线的符合测量. 通过特征 K X 射线能量得到

了高质量的裂变碎片电荷鉴别结果, 在 $Z = 39$ — 62 范围内平均电荷分辨 $\Delta Z \approx 0.7$. ^{252}Cf (sf) 反应平均每碎片发射约 0.6 条 K X 射线, 其中来自重碎片的 K X 射线占比约 68%, 且重碎片 K X 射线产额随核电荷数表现出显著的奇偶效应. 通过两条 K X 射线的符合, 发现重碎片元素 I, Cs, La, Pr 和 Nd 存在鲜明的级联内转换现象. 借助 K X 射线与碎片动能的关联, 研究了碎片平均动能和平均总动能随核电荷数的分布, 轻碎片的平均动能关于电荷数呈现明显的奇偶效应, 偶 Z 与奇 Z 碎片的动能相差约 0.48 MeV; 平均总动能的峰值在 $Z = 52$ — 53 附近, 总动能分布宽度在 $Z = 56$ 附近出现凹坑. 裂变碎片的 K X 射线产额及动能随核电荷数分布所展现出的对效应和壳效应的影响是低能铀系核裂变体系量子效应的有力证明. 本文同时进行了 GEF 和 CGMF 模型在碎片动能计算方面与本实验的对比, 两种模型都难以准确定量描述 ^{252}Cf (sf) 的动能分布, 本工作可为裂变唯象模型的检验和完善提供必要的参考数据.

参考文献

- [1] Lemaître J F, Goriely S, Hilaire S, Sida J L 2019 *Phys. Rev. C* **99** 034612
- [2] Talou P, Stetcu I, Jaffke P, Rising M E, Lovell A E, Kawano T 2021 *Comput. Phys. Commun.* **269** 108087
- [3] Scamps G, Simenel C 2018 *Nature* **564** 382
- [4] Caamaño M, Farget F, Delaune O, Schmidt K H, Schmitt C, Audouin L, Bacri C O, Benlliure J, Casarejos E, Derckx X, Fernández-Domínguez B, Gaudefroy L, Golabek C, Jurado B, Lemasson A, Ramos D, Rodríguez-Tajes C, Roger T, Shrivastava A 2015 *Phys. Rev. C* **92** 034606
- [5] Mariolopoulos G, Hamelin C, Blachot J, Bocquet J P, Brissot R, Crançon J, Nifenecker H, Ristori C 1981 *Nucl. Phys. A* **361** 213
- [6] Lang W, Clerc H G, Wohlfarth H, Schrader H, Schmidt K H 1980 *Nucl. Phys. A* **345** 34
- [7] Wang T F, Li G W, Zhu L P, Hen O, Zhang G L, Meng Q H, Wang L M, Han H Y, Xia H H 2017 *Phys. Rev. C* **96** 034611
- [8] Knitter H H, Hamsch F J, Budtz-Jørgensen C 1992 *Nucl. Phys. A* **536** 221
- [9] Boucheneb N, Asghar M, Barreau G, Doan T P, Leroux B, Sicre A, Geltenbort P, Oed A 1991 *Nucl. Phys. A* **535** 77
- [10] Glendenin L E, Griffin H C 1965 *Phys. Lett.* **15** 153
- [11] Kapoor S S, Bowman H R, Thompson S G 1965 *Phys. Rev.* **140** B1310
- [12] Reisdorf W, Unik J P, Griffin H C, Glendenin L E 1971 *Nucl. Phys. A* **177** 337
- [13] Griffin H C 1990 *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **142** 279
- [14] Liu S L, Yang Y, Li X, Jiang W G, Han H Y, Zhang C L 2017 *At. Energy Sci. Technol.* **51** 343 (in chinese) [刘世龙, 杨毅, 李霞, 姜文刚, 韩洪银, 张春利 2017 原子能科学技术 **51** 343]
- [15] Algutifan N J, Sherman S R, Alexander C W 2015 *Appl. Radiat. Isot.* **96** 135
- [16] Bé M M, Chechev V P, Dersch R, Helene O A, Helmer R G, Herman M, Hlaváč S, Marcinkowski A, Molnár G L, Nichols A L, Schönfeld E, Vanin V R, Woods M J 2007 *Update of X-ray and Gamma-ray Decay Data Standards for Detector Calibration and Other Applications* (Vol. 2) (Vienna: IAEA) p50
- [17] Tovesson F, Hamsch F J, Oberstedt S, Bax H 2002 *J. Nucl. Sci. Technol.* **39** 673
- [18] Schmitt H W, Kiker W E, Williams C W 1965 *Phys. Rev.* **137** B837
- [19] Weissenberger E, Geltenbort P, Oed A, Gönnerwein F, Faust H 1986 *Nucl. Instrum. Methods A* **248** 506
- [20] Waldo R W, Karam R A, Meyer R A 1981 *Phys. Rev. C* **23** 1113
- [21] Schmidt K H, Jurado B, Amouroux C, Schmitt C 2016 *Nucl. Data Sheets* **131** 107
- [22] Henschel H, Kohnle A, Hipp H, Gönnerwein G 1981 *Nucl. Instrum. Methods* **190** 125
- [23] Rao M N, Biswas D C, Choudhury R K 1990 *Nucl. Instrum. Methods B* **51** 102
- [24] Brown D A, Chadwick M B, Capote R, et al. 2018 *Nucl. Data Sheets* **148** 1
- [25] Dolce S R, Gibson W M, Thomas T D 1969 *Phys. Rev.* **180** 1177
- [26] Glendenin L E, Unik J P 1965 *Phys. Rev.* **140** B1301
- [27] Hopkins F F, White J R, Phillips G W, Moore C F, Richard P 1972 *Phys. Rev. C* **5** 1015
- [28] Laurent R S, Phillips G W, Richard P, Moore C F 1971 *Phys. Rev. C* **4** 1948
- [29] Hamsch F J, Oberstedt S 1997 *Nucl. Phys. A* **617** 347
- [30] Böckstiegel C, Steinhäuser S, Schmidt K H, Clerc H G, Grewe A, Heinz A, de Jong M, Junghans A R, Müller J, Voss B 2008 *Nucl. Phys. A* **802** 12
- [31] Chemey A, Pica A, Yao L, Loveland W, Lee H Y, Kuvín S A 2020 *Eur. Phys. J. A* **56** 1

K X-ray emission and kinetic energy-nuclear charge relationship of ^{252}Cf spontaneous fission*

Liu Chao Liu Shi-Long[†] Yang Yi Feng Jing Li Yu-Zhao

(Key Laboratory of Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(Received 24 April 2024; revised manuscript received 1 June 2024)

Abstract

Experimental study of physical quantities after fission provides crucial insights into the fission process, which is an indispensable way to test the fission theory. The characteristics of primary fission products before beta decay are of great value in unraveling fission kinematics and nuclear energy applications. However, the measurement of the fragment charge has always been challenging. Multi-parameter studies related to nuclear charge remain relatively scarce. The deexcitation of the primary fission products may undergo internal conversion and is often accompanied by characteristic X-ray emissions. Therefore, the correlated measurement of fragment kinetic energy and K X-rays for ^{252}Cf spontaneous fission is conducted. A silicon surface barrier detector is used to measure the fragment kinetic energy, while two low-energy high-pure germanium detectors are utilized for K X-ray measurement. Identification of fission fragments with $Z = 39\text{--}62$ is realized through characteristic K X-rays with a charge resolution of $\Delta Z \approx 0.7$. Fission fragment K X-ray yields exhibit a strong charge correlation, with an odd-even effect factor of about 13%. Based on K X-rays, the post-neutron-emission average kinetic energy, average total kinetic energy ($\langle\text{TKE}\rangle$), and its dispersion (σ_{TKE}) of fission fragments are determined each as a function of nuclear charge. The kinetic energy distribution of light fragments shows a pronounced odd-even effect, with even- Z elements exhibiting kinetic energy enhanced by about 0.48 MeV compared with odd- Z fragments. The peak of the $\langle\text{TKE}\rangle$ distribution is nearly $Z = 52\text{--}53$, while the minimum of the σ_{TKE} appears near $Z = 56$, indicating the significant influence of deformed shells in the highly asymmetric fission region. The post-neutron kinetic energy distribution of fission fragments from ^{252}Cf (sf) is calculated by using the GEF model and CGMF model. The CGMF model effectively reproduces the overall trend of kinetic energy as a function of charge number, while the results of the GEF calculation are systematically higher than the experimental values. Nonetheless, these two phenomenological models make it difficult to quantitatively describe the kinetic energy distribution of fission fragments accurately. In this study, the insights into K X-ray emissions and kinetic energy-nuclear charge relationships provide valuable reference data for independently measuring the fission yields and verifying the theoretical models of fission.

Keywords: fission fragment, K X-ray, nuclear charge identification, fragment kinetic energy

PACS: 25.85.Ca, 21.10.Ft, 29.30.Kv

DOI: 10.7498/aps.73.20240563

* Project supported by the Key Laboratory of Nuclear Data Foundation, China (Grant No. JCKY23201C153) and the Continues-Support Basic Scientific Research Project, China (Grant No. BJ010261223282).

[†] Corresponding author. E-mail: liusl@ciae.ac.cn

^{252}Cf 自发裂变K X射线发射与动能-电荷关系

刘超 刘世龙 杨毅 冯晶 李昱兆

K X-ray emission and kinetic energy-nuclear charge relationship of ^{252}Cf spontaneous fission

Liu Chao Liu Shi-Long Yang Yi Feng Jing Li Yu-Zhao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 142501 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240563

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240563>

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

中子诱发 ^{232}Th 裂变初始碎片质量及动能分布Monte-Carlo研究

Monte-Carlo study of pre-neutron emission mass and energy for neutron-induced ^{232}Th fission

物理学报. 2022, 71(1): 012501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211333>

态选择电荷交换实验测量以及对天体物理软X射线发射模型的检验

Experimental measurement of state-selective charge exchange and test of astrophysics soft X-ray emission model

物理学报. 2021, 70(8): 080702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201685>

近玻尔速度不同离子碰撞产生Al的K X射线

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

物理学报. 2023, 72(1): 013402 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221628>

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>

类氦C离子诱发不同金属厚靶原子的K-X射线

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

物理学报. 2024, 73(4): 043201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231477>

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>