

# 低能裂变反应的碎片角动量激发机制研究\*

韩洪银<sup>1,1)</sup> 夏海鸿<sup>1,2</sup> 王涛峰<sup>1</sup> 孟庆华<sup>1</sup> 朱丽萍<sup>1</sup> 王黎明<sup>1</sup> 侯龙<sup>1</sup>

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (西北核技术研究所 西安 710024)

**摘要** 用一个包含了半导体探测器, 液体闪烁计数器和 60% 效率的 HPGe 探测器的四参数关联实验测量了  $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$  反应的中子多重性和  $\gamma$  多重性与裂变碎片特征参数(质量, 总动能 TKE)间的关联. 由于在测量裂变中子多重性绝对值的同时, 本工作首次从实验数据确定了特定碎片的  $\gamma$  多重性的绝对值, 故测量数据为进一步深入研究碎片角动激发提供了新的信息. 结果表明, 角动激发并不与裂变核在断点的形变成正关联, 但两者间却存在着复杂的关联特性. 实验数据不能从现有核理论的弯曲(bending)和扭动(wriggling)碎片角动量激发模式得到理解; 但可用碎片角动激发与裂变核的断点核激发能存在正关联而得到部分解释.

**关键词**  $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$  反应 n- $\gamma$ -裂变关联 碎片角动激发机制

## 1 引言

核裂变是一个复合裂变核在它们的断点形成两个质量数相差不太多的大形变碎片过程. 现已知道, 由于弯曲(bending)和扭动(wriggling)激发以及断裂后碎片间 Coulomb 力矩引起的激发, 形成的大形变碎片将具有大的角动量. 当在断点分离后的碎片以无辐射跃迁方式回到它们的基态平衡形状后, 形变能与它们在断裂前取得的内部激发能一起构成了碎片发射中子的动力, 而碎片具有的角动量将以  $\gamma$  光子发射形式释放出来. 由于核的中子发射宽度  $\Gamma_n$  远大于  $\gamma$  光子发射宽度  $\Gamma_\gamma$ , 因此, 裂变碎片的  $\gamma$  光子发射是中子发射后的角动量退激过程. 近年来的测量<sup>[1]</sup>表明, 核弯曲和扭动激发模式并不能对诸多裂变  $\gamma$  光子发射现象给出合理解释, 因此, 可以说, 至今人们对于裂变碎片角动量激发机制的了解仍然是很不够的. 为了实验观测裂变反应中的碎片角动量激发现象, 我们利用中子在碎片运动方向上的运动学聚焦效应和  $\gamma$  光子从运动碎片发时的 Doppler 效应研究了  $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$  反应碎片质量数  $A^*=85\text{--}167$  范围内的中子多重性绝对值  $\nu$  和  $\gamma$  光子产额绝对值  $M_\gamma$  与裂变碎片的质量和裂变总动能间的关联特性.

## 2 实验数据获取和分析

实验测量用的  $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$  源为制备在厚  $40\mu\text{g}/\text{cm}^2$  碳膜上的自转移裂变源, 它的裂变率  $\sim 2 \times 10^4$  裂变/s, 源斑直径  $\Phi = 5\text{mm}$ . 源位于两个面对面安装的直径 20mm 半导体探测器 F1 和 F2 之间. 为了消除边缘效应, 半导体被准直后的活性面积直径为  $\Phi = 16\text{mm}$ . 安装裂变源和半导体的小铜真空室 ( $\Phi 30\text{cm} \times 25\text{cm}$ ) 的壁厚度为 2mm, 数据获取时的真空度好于 0.2Pa. 在小真室外, 半导体 F1 后面 46cm 距离处安装了一个用于记录裂变中子的液体闪烁探测器 ( $\Phi 10\text{cm} \times 5\text{cm}$ ). 为了记录裂变  $\gamma$  光子, 在两轮测量中分别将一个效率为 60% 的高纯锗 (HPGe) 探测器放在 F1-F2- $^{252}\text{Cf}$  裂变源轴线上 F2 后面距源 36cm 处和与此实验测量轴线成  $90^\circ$  方向上距源 36cm 处. 源面法线与 F1-F2- $^{252}\text{Cf}$  裂变源轴线间的夹角为  $45^\circ$ , 以便  $90^\circ$  位置的 HPGe 能很好看到裂变源. 自发裂变源与 F1 和 F2 的距离分别为 6cm 和 4cm. 液体闪烁探测器和高纯锗 (HPGe) 探测器的  $\gamma$  光子探测阈能分别设在 120keV 和 70keV. 由于中子探测器的绝对效率在过去的实验中已将确定, 故本工作仅在数据获取后用一系列  $\gamma$  放射源的能量线测量了高纯锗的响应函数. 安装裂变源、半导体探测

\* 国家自然科学基金(10175091)资助

1) E-mail: hyhan@iris.ciae.ac.cn

器、液体闪烁探测器和HPGe探测器时,特别地注意了它们的同轴性和位置的准确性.每个测量到的关联事件包含了数据分析时所需要的全部信息(碎片1和碎片2脉冲高度,中子飞行时间TOF和 $\gamma$ 光子脉冲高度).关联事件数据的采集是在专用KODAQ数据获取系统上完成的.高纯锗(HPGe)探测器放在与实验测量轴线成 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 方向上分别纪录到的累计有效关联事件数均为 $\sim 5 \times 10^7$ .

由于本测量的裂变探测器和中子探测器对自发裂变源所张的立体角均十分小,又因为运动碎片产生的运动学聚焦效应,被闪烁液体纪录到的中子基本上是由击中F1裂变探测器那个碎片所发射的,而互补碎片发射中子进入闪烁液体的几率是一个小的修正量.在确定特定质量数碎片 $A^*$ 的 $\gamma$ 光子多重性绝对值时,本工作仅利用了光子从运动源发时的Doppler效应和高纯锗(HPGe)探测器放在 $0^\circ$ 角时的测量数据.当高纯锗(HPGe)探测器位于 $90^\circ$ 方向上时,由于无Doppler效应存在,这种数据用于确定总的 $\gamma$ 光子多重性与碎片质量劈裂的关联.质量数 $A$ 裂变碎片的 $\gamma$ 光子产额 $M_\gamma(A)$ 可从下式<sup>[2]</sup>导出:

$$M_\gamma(A) = \frac{M_A(1+2\beta_B) - M_B(1-2\beta_A)}{4(\beta_A + \beta_B)}, \quad (1)$$

公式中的符号A和B分别表示每次二分裂变的两个互补碎片. $\beta_A$ 和 $\beta_B$ 分别为相应碎片的运动速度与光速之比, $M_A$ 和 $M_B$ 分别为在碎片A和B飞向HPGe探测器条件下测到的光子 $\gamma$ 产额.

### 3 实验结果和讨论

从本测量得到的中子多重性绝对值 $\nu(A^*)$ 和 $\gamma$ 光子产额绝对值 $M_\gamma(A^*)$ ,后者大体与Glässel等人测到的 $\gamma$ 光子相对产额随碎片质量变化趋势<sup>[2]</sup>相一致,可以导出 $\gamma$ 光子多重性与中子多重性间的关联函数 $M_\gamma(\nu)$ .测量到实验数据具有如下的特征.(1)对非对称裂变质量数 $A^*=85-123$ 的轻碎片,关联函数近似地是一个随 $\nu$ 变化十分慢的线性函数;当 $\nu$ 从0.4变化到3.2时,关联函数值近似线性地从约4.1增加到4.8.(2)对近对称裂变质量数 $A^*=124-131$ 的碎片来说,关联函数 $M_\gamma(\nu)$ 有着强的变化,当 $\nu$ 从0.45变化到约3.2时,它单调地从2.0增加到4.2.(3)对非对称裂变质量数 $A^*=132-167$ 的重碎片,观察到了一个强而复杂的关联函数,即 $\gamma$ 光子多重性与碎片形变间不存在正的相关特性,见图1.

从这些测量数据可得到的结论是, $\gamma$ 光子多重性

不与核碎片在断点的形变成正关联,因为,中子多重性绝对值 $\nu(A^*)$ 是与核碎片在断点的形变成正关联的.从图1可以得到的另一个结论是, $\gamma$ 光子多重性与中子多重性间不存正关联,这不同于Nifenecker等人的测量结果<sup>[3]</sup>.

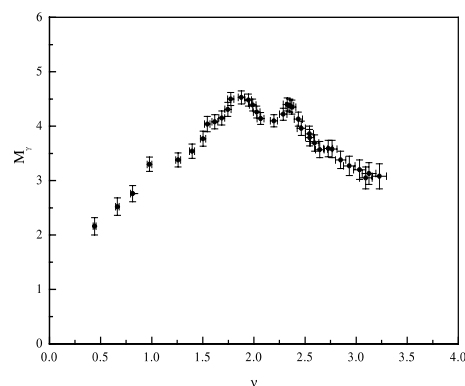


图1  $\gamma$ 多重性 $M_\gamma$ 随中子多重性 $\nu$ 的变化

总 $\gamma$ 光子多重性 $M_\gamma$ 随碎片总动能TKE的变化显示在图2中,两个变量( $M_\gamma$ 与TKE)间不存在简单的线性关系,在TKE=165—170MeV附近有极大值.

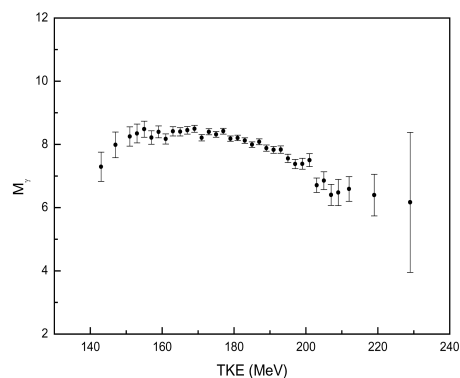


图2 总 $\gamma$ 多重性 $M_\gamma$ 随碎片总动能TKE的变化

这个结果的可靠性得到我们15年前实验测量数据<sup>[4]</sup>的支持.与现有测量相比,文献<sup>[4]</sup>的总 $\gamma$ 光子多重性函数 $M_\gamma(\text{TKE})$ 测量是用不同特性探测器系统,即是在运转电离室与NaI(Tl)组合探测器系统条件下完成的. $M_\gamma(\text{TKE})$ 的这种变化趋势这意味着,裂变碎片的 $\gamma$ 光子发射与裂变核在断点的激发能 $E_{\text{ex}}^{\text{sci}} = Q - \text{TKE} - E_{\text{def}}$ 或断点核温度 $T_{\text{sci}}$ 有关,因为,简单的估算<sup>[5]</sup>就可知道, $E_{\text{ex}}^{\text{sci}}$ 极大值既不出现在核的大形变处,也不出现在核的形变小的地方,而是存在于中等大小核形变处.这里, $Q$ 和 $E_{\text{def}}$ 分别为裂变反应 $Q$ 值和裂变核的断点形变能.总 $\gamma$ 光子多重性 $M_\gamma$ 与碎片总动能的这种关联特性还可从最近Krupa等人<sup>[6]</sup>用能量 $E_p=13, 20, 55\text{MeV}$ 质子对 $^{238}\text{U}(p,f)$ 和 $^{242}\text{Pu}(p,f)$ 反应进行研究所得到的部分支持.文

献[6]的图10给出裂变复合核对称质量劈裂条件下在TKE=95—220MeV能量区间内的总 $\gamma$ 光子多重性函数 $M_\gamma(\text{TKE})$ ,它引人注目的是,总 $\gamma$ 光子多重性的极大值出现在TKE~150MeV处,在TKE小于150MeV时, $M_\gamma(\text{TKE})$ 是单调增函数;但在TKE大于150MeV条件下, $M_\gamma(\text{TKE})$ 是单调减函数.本工作将进一步研究特定碎片的关联函数 $M_\gamma(A, \text{TKE})$ ,这种测量数据将能导致更清晰的结论.

本工作得到的数据将有助于人们了解裂变角动量激发激发机制.为了得到更多的信息,我们正在对实验数据做进一步的理论分析.应特别指出的是,裂变

中子多重性 $\nu$ 与 $\gamma$ 光子产额 $M_\gamma$ 间不存在正关联,而却有着复杂的关联特性这种事实是难于用现有的弯曲和扭动激发以及核断裂后的Coulomb激发模式得到解释的<sup>[7, 8]</sup>.因为,按照现有的理论模型,碎片在断点的形变越大,那末碎片的的中子多重性就越大,而同时碎片具有的角动量也愈大,即 $\gamma$ 光子多重性与碎片总动能TKE间,以及中子多重性与 $\gamma$ 射线多重性之间均应该存在着正关联.为了解释包括本工作观察到的中子与 $\gamma$ 射线发射间和 $\gamma$ 光子发射与裂变碎片(TKE)间关联现象在内的各种 $\gamma$ 光子发射实验数据,发展一个新的裂变角动量激发理论模型是极端重要的<sup>[1]</sup>.

## 参考文献(References)

- 1 Mikhailov N, Quentin P et al. Proceedings of the Second Int. Conf. on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei. Edited by J. H. Hamilton, W. R. Philips and H. K. Carter, Scotland, UK, June 28-July 3, 1999, 384—392
- 2 Glässel P, Schmid-Fabian R, Schwalm D. Nucl. Phys., 1972, **A502**: 315—324c
- 3 Nifenecker H et al. Proceedings of the Third IAEA Symposium on the Phys. and Chem. of Fission, Held by IAEA, Rochester, New York, USA, 13—17, Aug. 1973, **2**: 117
- 4 HAN Hong-Yin, LI An-Li, CHEN Jin-Hua et al. Beijing Int. Symp. on Fast Neutron Physics, Edited by Sun Zuxun et al. Beijing, China, 9—13 Sep., 1991, 79—84
- 5 Knitter H H, Hamsch F J et al. Nucl. Phys., 1992, **A536**: 221—259
- 6 Krupa L, Kniajeva G N, Bogatchev A A et al. Proceedings of the Third Int. Conf. on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei. Edited by J. H. Hamilton, A. V. Ramayya and H. K. Carter, Florida, USA, 3—9, Nov. 2002, 207—214
- 7 Wilhelmy J B, Cheifetz E et al. Phys. Rev., 1989, **C5**: 2041—2060
- 8 Zielińska-Pfabé M, Dietrich K. Phy. Lett., 1974, **B49**: 123—128

# Study of Fragment Angular Excitation Mechanism in Low Energy Fission\*

HAN Hong-Yin<sup>1,1)</sup> XIA Hai-Hong<sup>1,2</sup> WANG Tao-Feng<sup>1</sup> MENG Qian-Hua<sup>1</sup>  
ZHU Li-Ping<sup>1</sup> WANG Li-Ming<sup>1</sup> HOU Long<sup>1</sup>

1 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2 (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract** A four-parameter correlation measurement, including two semiconductors and a liquid scintillator as well as a 60% HPGe detector, was employed to measure the correlations of neutron multiplicity and  $\gamma$  yield with the fission parameters, such as fragment mass number  $A^*$  and total kinetic energy TKE of fragments. Because it is the first time that the absolute  $\gamma$  yield for the selected fragment is determined, so the angular momentum excitation of fragments can be investigated using the correlations of  $\gamma$  multiplicity with the neutron yield as well as with  $A^*$  and TKE. The results show that there is the complex correlation between the angular momentum excitation and the fragment deformation. The measured data can not be explained on the basis of the bending and wriggling excitation modes, but it could be understood partly by the assumption that there exists the positive correlation between the angular momentum excitation of fragments and the excitation energy of fission nuclei at the scission.

**Key words** <sup>252</sup>Cf(sf), n- $\gamma$ -fission Cor., mechanism of angular momentum excitation

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (10175091)

1) E-mail: hyhan@iris.ciae.ac.cn