

## 高激发 $^{213}\text{Fr}$ 核的形变研究\*

张保国 王素芳 段利敏 文万信 靳根明 李祖玉  
贺智勇 王宏伟 肖志刚 郑纪文 吴和宇 魏志勇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 对  $132\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$  反应产生的裂变碎片和巨偶极共振  $\gamma$  射线进行了符合测量,得到了  $E^* = 92\text{MeV}$  的高激发 $^{213}\text{Fr}$ 的  $\gamma$  衰变谱和  $\gamma$  角关联谱. 观测到复合核巨偶极共振  $\gamma$  角关联谱存在很大的各向异性. 利用改进的统计模型程序分析了实验数据,不考虑裂变延迟时,统计模型计算可以很好拟合地实验结果. 通过对  $\gamma$  角关联谱的理论计算与实验结果比较,可以得出高激发 $^{213}\text{Fr}$ 核 ( $E^* = 92\text{MeV}$ ) 的形状从集体长椭球向非集体扁椭球变化.

**关键词** 巨偶极共振 统计衰变 角关联 形变跃迁

### 1 引言

核的形变是核的重要性质,它反映了核物质之间的关联. 因此研究这些关联和找出这些关联存在的极限是非常重要的. 重离子熔合反应产生的高激发热核的巨偶极共振 (GDR) 为研究热核的形状提供了条件. 有很多理论预言核的形状随温度和角动量的增加而改变,在温度  $1\text{--}2\text{MeV}$  时,核的形状从集体长椭球跃迁到非集体的扁椭球<sup>[1,2]</sup>. 通过重离子熔合反应产生的热核 GDR,已经对热核的形变进行了大量的研究<sup>[3]</sup>. 在这些研究中,形变是通过 GDR 强度函数的劈裂得出的. 原则上讲从 GDR 的强度函数可以得出核形变的信息,但是准确地单独从  $\gamma$  谱得出这些信息是困难的<sup>[4]</sup>. 要确定形变究竟是集体长椭球还是非集体扁椭球,还需要测量 GDR  $\gamma$  角分布. 对于球形核,高激发核的 GDR  $\gamma$  角分布是各向同性的,而对于非球形形变核, GDR  $\gamma$  角分布则各向异性的<sup>[5]</sup>. 相对于复合核自旋轴的  $\gamma$  角分布的各向异性比相对于束流轴的更明显,因为后者是所有可能自旋轴的平均,很难得出核形变信息. 对于重核,复合核自旋轴可以直接由裂变碎片的方向确定,复合核自旋轴垂直于裂变碎片确定的平面. Butsch 等利用这种方法研究了高激发 Pb 核的形变,证实 GDR  $\gamma$  角分布对复合核的形变是很灵敏的<sup>[6]</sup>. 另外,过去对高激发核形变的研究主要集中在  $A < 200$  的核<sup>[7]</sup>,对于  $A > 200$  的高激发核形变的研究还很少. 因此,我

2000-06-22 收稿

\* 国家自然科学基金(19775054),中国科学院“九五”基础重大科学基金(KJ95T-03),国家重点基础研究发展规划(G2000077401)和国家自然科学基金重点项目(19735010)资助

们选择 $^{213}\text{Fr}$ 核作为研究对象.

本文通过测量 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应形成的高激发 $^{213}\text{Fr}(E^* = 92\text{MeV})$ 的 GDR  $\gamma$ 能谱及其相对于复合核自旋角分布,对 $^{213}\text{Fr}$ 的形变进行了初步的研究.

## 2 实验概况

实验在兰州重离子加速器(HIRFL)的大圆筒形散射室上完成的.采用 $8.25\text{MeV/u}$ 的 $^{16}\text{O}$ 轰击 $0.5\text{mg/cm}^2$ 厚的 $^{197}\text{Au}$ 靶,束流强度为 $150\text{--}200\text{nA}$ .反应中产生的 $\gamma$ 射线用两套 $\phi 76 \times 100$ 的BGO闪烁探测器测量,距靶均为 $50\text{cm}$ ,安装在相对于束流 $\theta = 90^\circ$ 方向,一套放在反应平面内,另一套放在靶的正下方.利用飞行时间法对中子和 $\gamma$ 进行鉴别.用来自9套 $\phi 40$ 的NaI闪烁探测器的统计衰变 $\gamma$ 作为起始时间信号,BGO闪烁探测器的信号作为停止信号.图1为BGO闪烁探测器的飞行时间谱,从图可以看出这种方法可以很好地鉴别n与 $\gamma$ 射线.在实验中,利用 $^{37}\text{Ge}(n, \gamma)$ 和 $^{70}\text{Ge}(n, \gamma)$ 反应产生的 $\gamma$ 射线(能量为 $10.2$ 和 $7.4\text{MeV}$ )及 $^{22}\text{Na}$ 源对BGO闪烁探测器进行能量刻度.为减少进入探测器的中子,在BGO闪烁探测器前加 $10\text{cm}$ 厚的有机玻璃.用 $^{22}\text{Na}$ 源监测BGO闪烁探测器输出信号的稳定性.BGO闪烁探测器对 $\gamma$ 射线的探测效率用EGS4程序<sup>[8]</sup>计算.

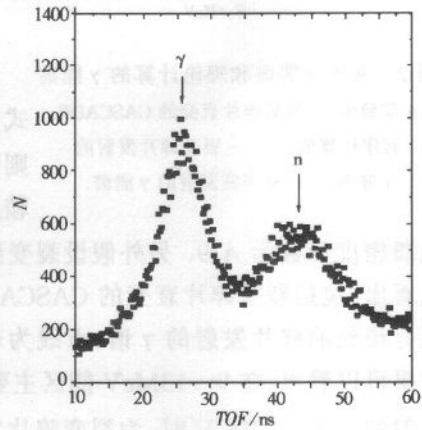


图1 BGO闪烁探测器飞行时间(TOF)谱

裂变碎片用两块大面积( $25\text{cm} \times 20\text{cm}$ )平行板位置灵敏雪崩探测器(PPAC)测量,距靶心 $24\text{cm}$ ,中心位于 $\theta = 70^\circ$ ,分别安放在束流两侧.另外,有6套 $\phi 15$ 的Si  $\Delta E\text{-}E$ 望远镜测量轻带电粒子,安装在束流线两侧,距靶 $12\text{cm}$ ,角度分别为 $\theta = 110^\circ, 135^\circ, 156^\circ$ .实验中测量了裂变碎片与 $\gamma$ 射线和轻带电粒子符合事件.

复合核的自旋轴方向由两个碎片的出射方向确定,两个 $\gamma$ 探测器与自旋轴的夹角分别为 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ ,因此,相对应于自旋轴 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 的 $\gamma$ 射线的产额比( $W(0^\circ, E_\gamma)/W(90^\circ, E_\gamma)$ )可以从两个 $\gamma$ 探测器与两个裂变碎片符合的 $\gamma$ 射线能谱得出.

## 3 实验结果及分析

### 3.1 $\gamma$ 射线能谱

图2为与裂变碎片符合的 $\gamma$ 射线能谱.这个谱包含了复合核和裂变碎片发射的 $\gamma$ 射线,实验上无法把二者区分开的,只能进行理论计算,得出它们各自的产额.从图上可以明显看出,在 $E_\gamma = 8\text{--}10\text{MeV}$ 的区间开始有一个明显的隆起,由于裂变碎片的GDR  $\gamma$ 能量比复合核的GDR  $\gamma$ 能量高得多,这表明存在复合核GDR  $\gamma$ 衰变.

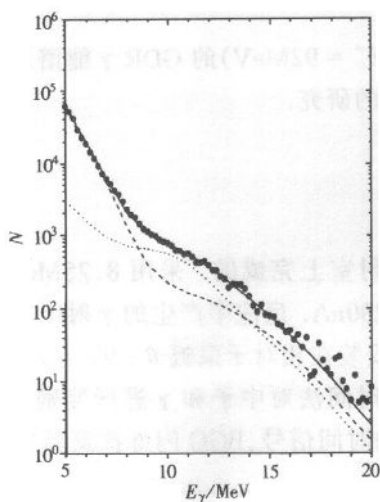


图 2 实验  $\gamma$  能谱和理论计算的  $\gamma$  能谱

- 实验值, — 包括碎片衰变的 CASCADE 程序计算值, - - - 裂变碎片发射的  $\gamma$  能谱, ..... 复合核发射的  $\gamma$  能谱.

GDR 衰变的  $\gamma$  射线可以在热核的整个衰变过程中发射,复合核统计衰变模型考虑了整个级联衰变过程,因此我们采用了包含裂变碎片衰变的 CASCADE 程序<sup>[9]</sup>分析实验结果.

在 CASCADE 程序中偶极光子统计发射率为

$$R_{\gamma} \cdot dE_{\gamma} = \frac{\rho(E_2)}{\rho(E_1)} \cdot F_{\text{GDR}}(E_{\gamma}) \cdot dE_{\gamma}, \quad (1)$$

其中  $\frac{\rho(E_2)}{\rho(E_1)}$  为终态和初态的能级密度比,  $E_{\gamma} = E_1 - E_2$ .

对于形变核, GDR 强度函数为双 Lorentz 分布

$$F_{\text{GDR}}(E_{\gamma}) = 2.09 \times 10^{-5} \cdot \sum_{i=1}^2 S_i \cdot \frac{N \cdot Z}{A} \cdot \frac{\Gamma_i \cdot E_{\gamma}^4}{(E_{\gamma}^2 - E_i^2)^2 + \Gamma_i^2 \cdot E_{\gamma}^2} \quad (2)$$

式中,  $E_i$ ,  $\Gamma_i$  和  $S_i$  分别为 GDR 的能量、宽度和求和规则强度. 计算中采用的复合核能级密度参数为  $A/8.8$ , 鞍点与平衡形变的能级密度参数比为 1, 裂变碎片的

能级密度参数为  $A/9$ . 另外假设裂变延迟时间为零. 理论拟合结果见图 2 中实线,从图可以看出,包括裂变碎片衰变的 CASCADE 程序可以很好地拟合实验谱. 图中虚线为理论拟合得到的碎片发射的  $\gamma$  谱,点线为理论拟合得到的复合核发射的  $\gamma$  谱. 从理论拟合的结果可以看出,在 9—13MeV 能区主要是复合核 GDR  $\gamma$ ,在  $E_{\gamma} > 15\text{MeV}$  能区主要为碎片发射的  $\gamma$ ,  $E_{\gamma} < 7\text{MeV}$  时,为裂变碎片发射的统计  $\gamma$ .

通过对实验  $\gamma$  谱的拟合得到的 GDR 参数见表 1. 对复合核,有两组参数均可以很好地拟合实验  $\gamma$  谱. 从表 1 的参数可以计算复合核和碎片的形变,核的形变与 GDR 能量的关系为

$$\beta = \sqrt{4\pi/5} (E_2/E_1 - 1) / (E_2/2E_1 + 0.8665). \quad (3)$$

利用(3)式可以得出热核的形变有可能为  $\beta = 0.37$  的长椭球形变或  $\beta = -0.30$  的扁椭球形变. 可见仅从 GDR 强度函数还不能完全确定热核的形变. 要确定核的形变,还需测量 GDR 的角分布.

表 1 拟合实验  $\gamma$  谱得到的 GDR 参数

	$S_1$	$E_1/\text{MeV}$	$\Gamma_1/\text{MeV}$	$S_2$	$E_2/\text{MeV}$	$\Gamma_2/\text{MeV}$
复合核	0.33	$11.0 \pm 0.3$	$7.0 \pm 0.5$	0.66	$15.0 \pm 0.3$	$9.0 \pm 0.5$
	0.33	$15.5 \pm 0.3$	$6.0 \pm 0.5$	0.66	$11.8 \pm 0.3$	$8.0 \pm 0.5$
裂变碎片	0.33	$14.5 \pm 0.5$	$8.0 \pm 0.3$	0.66	$16.0 \pm 0.5$	$10.0 \pm 0.5$

### 3.2 $\gamma$ 角关联

$\gamma$  射线角分布与核的振动及角动量  $J$  的取向有关,在轴对称形变中, GDR 分裂成平

行和垂直于核对称轴的振动. 它们的角分布为  $W(\theta) = 1 + a_2 P_2(\cos\theta)$ , 其中  $\theta$  是  $\gamma$  射线相对于复合核自旋轴的发射角,  $P_2(\cos\theta)$  是 Legendre 多项式. 对于集体转动核, 核的对称轴垂直于自旋轴, 自旋轴垂直于反应平面(反应平行(或垂直)振动  $a_2 = 1/2$ (或  $-1/4$ ). 对于非集体转动核, 其对称轴平行于自旋轴, 对于平行(或垂直)振动  $a_2 = -1$ (或  $1/2$ ).

考虑到集体形变核的对称轴在平衡形变和裂变鞍点相对于自旋轴有一个统计倾斜, 角动量为  $J$  的集体形变核的角分布为<sup>[6]</sup>

$$W_J(\theta) = 1 + a_2^* \left[ P_2(\cos\theta) - \frac{1}{2}(\cos^2\theta - \sin^2\theta) \sum_{k_s} \frac{3k_s^2}{J(J+1)} P_s(k_s) \right], \quad (4)$$

其中  $a_2^* = a_2 \left[ 1 - \sum_{k_{eq}} \sum_{k_s} \frac{3(k_{eq} - k_s)^2}{J(J+1)} P_{eq}(k_{eq}) P_s(k_s) \right]$ , 对于平行(或垂直)振动  $a_2 = 1/2$ (或  $-1/4$ );  $k_{eq}$  为平衡形变时自旋  $J$  在核对称轴上投影,  $P_{eq}(k_{eq})$  为归一的高斯分布, 其方差为  $K_{0,eq}^2 = T_{eq} I_{eff,eq} / \hbar^2$ ,  $T_{eq}$  和  $I_{eff,eq}$  分别为平衡形变时的温度和有效转动惯量;  $k_s$  为鞍点上自旋  $J$  在核对称轴上投影,  $P_s(k_s)$  为归一的高斯分布, 其方差为  $K_{0,s}^2 = T_s I_{eff,s} / \hbar^2$ ,  $T_s$  和  $I_{eff,s}$  分别为鞍点的温度和有效转动惯量.

对于非集体转动核, 其对称轴平行于自旋轴, 其角分布仍为

$$W_J(\theta) = 1 + a_2 P_2(\cos\theta), \quad (5)$$

这里, 对于平行(或垂直)振动  $a_2 = -1$ (或  $1/2$ ).

对熔合反应自旋分布的裂变部分求和, 得出  $W(\theta) = \frac{\sum_J \sigma_J^f W_J(\theta)}{\sum_J \sigma_J^f}$ ,  $\sigma_J^f$  为角动量为  $J$

时裂变的截面.

假定复合核的 GDR 强度函数劈裂成两种 Lorentz 成分, 与能量有关的  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 90^\circ$  的  $\gamma$  射线角分布之比为

$$\frac{W(0^\circ, E_\gamma)}{W(90^\circ, E_\gamma)} = \frac{F^{//}(E_\gamma) W^{//}(0^\circ) + F^\perp(E_\gamma) W^\perp(0^\circ)}{F^{//}(E_\gamma) W^{//}(90^\circ) + F^\perp(E_\gamma) W^\perp(90^\circ)}, \quad (6)$$

这里  $F^i(E_\gamma)$  ( $i = //, \perp$ ) 为轴对称核的 GDR 强度函数, 上标  $//$  ( $\perp$ ) 表示平行(垂直)于对称轴的振动. 求和规则强度  $S^{//} = 1/3$ ,  $S^\perp = 2/3$ . 对于长椭球形变核, 平行于对称轴的振动对应于 GDR 低能成分. 对于扁椭球形变核, 平行于对称轴的振动对应于 GDR 高能成分.

(6) 式仅包括了裂变以前从复合核发射的  $\gamma$  射线, 而实验测得的  $\gamma$  射线谱包括了处于激发态的碎片发射的  $\gamma$  射线. 裂前发射的  $\gamma$  射线和裂后发射的  $\gamma$  射线对发射的  $\gamma$  射线谱的贡献可以利用前面的  $\gamma$  射线谱拟合中得出的 GDR 参数, 用改进的 CASCADE 程序计算出裂前和裂后发射  $\gamma$  射线的截面  $\sigma_{pre}(E_\gamma)$  和  $\sigma_{post}(E_\gamma)$ .

考虑裂变碎片的贡献后,  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 90^\circ$  的  $\gamma$  射线角分布之比为

$$\frac{W(0^\circ, E_\gamma)}{W(90^\circ, E_\gamma)} = \frac{\sigma_{pre}(E_\gamma) W_{cn}(0^\circ, E_\gamma) + \sigma_{post}(E_\gamma) W_f(0^\circ, E_\gamma)}{\sigma_{pre}(E_\gamma) W_{cn}(90^\circ, E_\gamma) + \sigma_{post}(E_\gamma) W_f(90^\circ, E_\gamma)}, \quad (7)$$

其中,  $W_k(\theta, E_\gamma) = \frac{F_k^{\parallel}(E_\gamma)}{F_k^{\parallel}(E_\gamma) + F_k^{\perp}(E_\gamma)} W_k^{\parallel}(\theta) + \frac{F_k^{\perp}(E_\gamma)}{F_k^{\parallel}(E_\gamma) + F_k^{\perp}(E_\gamma)} W_k^{\perp}(\theta)$ , 下标  $k$  为  $cn$  或  $f$ , 分别代表复合核或裂变碎片.

从拟合测量的  $\gamma$  射线谱得到的 GDR 参数可以确定裂变碎片的形状为集体长椭球, 则其 GDR  $\gamma$  射线角分布为

$$W_f^{\perp}(\theta) = 1 + a_2 \left[ P_2(\cos\theta) - \frac{1}{2}(\cos^2\theta - \sin^2\theta) \sum_{k_i} \frac{3k_i^2}{J(J+1)} P_2(k_i) \right], \quad (8)$$

其中,  $k_i$  为裂片平衡形变时自旋  $J$  在其核对称轴上投影, 其分布  $P_f(k_i)$  为归一的高斯分布, 标准方差为  $K_0^f$ . 裂变碎片的自旋分布可以从裂变的自旋分布得出<sup>[10]</sup>, 裂变碎片的自旋  $J_f = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{7} J_{\text{nucl}} + S \right)$ , 其中  $S = 18.0 - 0.1 J_{\text{nucl}}$ ,  $J_{\text{nucl}}$  为裂变核的自旋.

图 3 为利用 CASCADE 程序计算得到的  $132\text{MeV}^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$  反应的自旋分布, 可以看出碎片的自旋分布很窄.

测量的  $W(0^\circ, E_\gamma)/W(90^\circ, E_\gamma)$  实验结果显示在图 4 中, 从图上可以看出, 在 8—13 MeV 能区存在明显的各向异性, 从能谱分析可以知道这个能区主要是复合核 GDR 成分, 即复合核是形变的. 由于这个能区  $W(0^\circ, E_\gamma)/W(90^\circ, E_\gamma) > 1$ , 因此可以确定核的形变可能是集体长椭球形变或非集体扁椭球形变<sup>[6]</sup>, 排除了集体扁椭球和非集体长椭球形变的可能性. 能量高于 14 MeV 时, 由于受复合核 GDR 和碎片 GDR 的共同影响, 各向异性没有低能时明显.  $E_\gamma < 7\text{MeV}$  时, 有一个小的各向异性, 从图 2 可以看出这个能区裂后发射的  $\gamma$  射线是主要的, 这也表明这些  $\gamma$  射线是从形变的碎片发射的. 图 4 中曲线为理论计算结果, 计算所用的 GDR 参数为表 1 中拟合实验  $\gamma$  谱得到的参数. 比较计算值和实

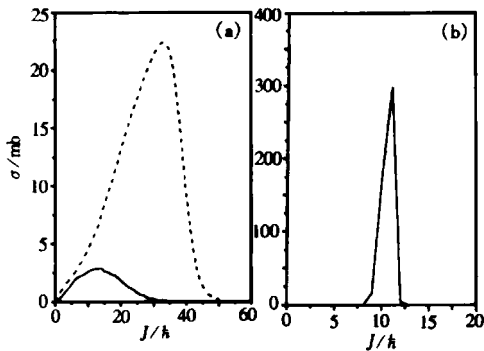


图 3  $132\text{MeV}^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$  反应的自旋分布  
(a) ..... 裂变道的自旋分布, —— 余核的自旋分布;  
(b) —— 裂变碎片的自旋分布.

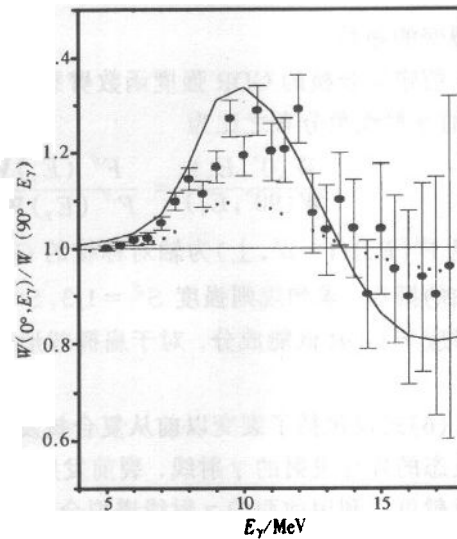


图 4 测量的和计算的  $W(0^\circ, E_\gamma)/W(90^\circ, E_\gamma)$  角关联谱  
● 实验值; 曲线为理论计算结果: —— 非集体扁椭球形变,  
..... 集体长椭球形变.

验值,还是不能确定是集体长椭球还是非集体扁椭球形变.但实验测量的各向异性度大于计算的集体长椭球形变的各向异性度而小于非集体扁椭球形变的各向异性度,这表明复合核的形状处于从集体长椭球向非集体扁椭球变化阶段。

## 4 讨论

本文研究了  $132\text{MeV}^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$  反应产生的高激发核 $^{213}\text{Fr}(E^* = 92\text{MeV})$ 的形变.通过符合测量反应产生的  $\gamma$  射线和裂变碎片,得到了  $\gamma$  射线能谱和角关联谱.理论和实验比较表明:仅从 GDR 的强度函数的劈裂不能确定热核的形变类型,GDR  $\gamma$  射线与复合核自旋之间的角关联对复合核的形变很灵敏,可以区分不同的长椭球和扁椭球形变.本项研究也证实了温度在 1—2MeV 时,核的形状从集体的长椭球向非集体的扁椭球跃迁.另外,利用包括裂变碎片衰变的 CASCADE 程序对  $\gamma$  射线能谱进行拟合还得出此反应不存在裂变延迟,这与  $140\text{MeV}^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$  反应的结果是不同的<sup>[9]</sup>,表明裂变延迟现象不仅与激发能有关,还与复合系统的裂变位垒有关.本工作只对一个激发的 $^{213}\text{Fr}$ 核进行了研究,还无法得出开始从集体的长椭球跃迁到非集体的扁椭球的温度,以及什么温度下完成到非集体扁椭球的跃迁,这些问题都需要进行进一步的系统性研究.

感谢北京大学技术物理系江栋兴教授和叶沿林教授提供  $\phi 76 \times 100$  的 BGO  $\gamma$  探测器.

## 参考文献 (References)

- 1 Alhassid Y, Levit S, Zingman J. Phys. Rev. Lett. , 1986, **57**: 539—542
- 2 Goodman A L. Phys. Rev. , 1986, **C33**: 2212—2214
- 3 Snover K A. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. , 1986, **36**: 545—603
- 4 Chakrabarty D R, Thoennessen M, Paul P et al. Phys. Rev. , 1988, **C37**: 1437—1441
- 5 Gaardhoje J J. Nucl. Phys. , 1992, **A538**: 573c—584c
- 6 Butsch R, Thoennessen M, Chakrabarty D R et al. Phys. Rev. , 1990, **C41**: 1530—1544
- 7 Gaardhoje J J. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. , 1992, **42**: 483—515
- 8 Nelson W R, Hirayama H, Rogers D W O. The EGS4 Code System, Stanford Linear Accelerator Center Report SLAC-265, 1985
- 9 Butsch R, Hofman D J, Montoya C P et al. Phys. Rev. , 1991, **C44**: 1515—1527
- 10 Schmitt R P, Mouchaty G, Haenni D R. Nucl. Phys. , 1984, **A427**: 614—638

## Investigation of Nuclear Deformation in Excited $^{213}\text{Fr}^*$

ZHANG Bao-Guo WANG Su-Fang DUAN Li-Min WEN Wan-Xin JIN Gen-Ming  
LI Zu-Yu HE Zhi-Yong WANG Hong-Wei XIAO Zhi-Gang ZHENG Ji-Wen  
WU He-Yu WEI Zhi-Yong

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

**Abstract** Angular correlations between  $\gamma$  rays and fission fragments were measured for the reaction  $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$  at 132MeV. The probability of giant dipole resonance  $\gamma$  rays emission relative to the spin axis of the compound system was extracted by using the correlations, which give direct information about nuclear deformation. Large anisotropy observed in the  $\gamma$  rays energy region of the compound nucleus giant dipole resonance demonstrates unambiguously a deformed shape of the  $^{213}\text{Fr}$  compound system at excitation energies of 92MeV. The fission coincidence  $\gamma$  ray spectra were fitted consistently in terms of the statistical  $\gamma$  ray decay of the compound system and excited fission fragments. The giant dipole resonance parameters obtained from the fits were then used to compute the  $\gamma$  ray angular distributions with respect to the compound nucleus spin axis for prolate and oblate shapes. The comparison between the calculation and the experimental results at excitation of 92MeV show that the  $^{213}\text{Fr}$  nucleus is in the transition from a collective prolate to a noncollective oblate shape.

**Key words** GDR, statistical decay, angular correlation, shape transition

---

Received 22 June 2000

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19775054), Major Subject of The Chinese Academy of Sciences(KJ95T - 03), Major State Basic Research Development Program (G2000077401) and Key Project of National Natural Science Foundation of China (19735010)