

$^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 垒下全熔合裂变*

刘祖华 许谨诚 张焕乔
钱兴¹⁾ 譙愚 林承键 徐侃

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1993年2月22日收到

摘 要

利用裂变碎片的折叠角分布,从实验上实现了全熔合裂变和转移跟随裂变两种成份的区分.在此基础上测量了质心系能量 72.61 至 80.11 MeV $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 全熔合裂变截面和碎片角分布.包含靶核静态形变效应的耦合道模型计算与实验激发曲线一致.然而,裂变统计理论无法解释实验上观察到的全熔合裂变碎片角分布.而鞍点模型与断点模型的理论预言有较明显的差别.

关键词 垒下熔合裂变,转移跟随裂变,裂变碎片各向异性.

1 引 言

重离子垒下熔合截面比简单一维位垒穿透模型的计算明显增强.实验和理论研究表明此种增强与碰撞核的结构密切相关^[1].耦合道模型^[2]计算显示,由于准弹道与弹性道之间的耦合,熔合形成的复合核自旋分布展宽.对于中重核系统, γ 多重性的测量^[3]证实了耦合道模型的预言.对于重核系统,形成的复合核主要通过裂变道衰变,因而无法用测量 γ 多重性的方法来研究自旋分布.然而,裂变碎片角分布与复合核的自旋分布(即入射道的穿透因子 T_l)有关,因而,可以由碎片角分布提取复合核自旋分布信息.出于上述原因,几年前人们开始对重离子垒下熔合裂变的研究产生兴趣.实验研究出人意料地发现碎片角分布各向异性明显大于鞍点过渡态模型计算^[4,5],且各向异性随轰击能量的变化在垒下能区存在一个峰结构^[5].这一异常现象的发现引起广泛的关注.究竟是什么原因造成此种异常,至今尚未找到合理的答案.由于实验上测量的裂变事件包含全熔合裂变和转移跟随裂变两种成份,为了弄清异常现象的物理原因,必须从实验上排除后者的影响.我们利用上述两种裂变的碎片折叠角分布的差异,实现了区分两种成份的目标,测得了质心系能量 72.61—80.11 MeV $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 全熔合裂变截面和碎片角分布.包含靶核静态形变的

* 国家自然科学基金资助.

1) 北京大学博士后.

耦合道模型^[6]计算与实验上测得的激发曲线一致。然而现有的裂变统计模型,即鞍点模型和断点模型都仍然无法解释实验上观察到的全融合裂变碎片角分布。

2 实验方法

实验是在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器上完成的。用准直的 ^{16}O 束轰击厚度约为 $350\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 ^{232}Th 靶。轰击能量为 $78\text{--}86\text{MeV}$ 。将一金硅面垒半导体探测器置于 -20° 处作为探测弹性散射粒子的监视器。裂变碎片用两块位置灵敏双栅雪崩计数器 (DGAC) 探测。DGAC 的灵敏面积均为 $25\text{cm} \times 20\text{cm}$, 位置分辨 4mm 。两个 DGAC 分别置于束流的两侧, 置于前角的 DGAC 距靶 15cm , 覆盖的探测角区为 $10^\circ \leq \theta_{\text{lab}} \leq 90^\circ$; 置于后角的 DGAC 距靶 16cm , 覆盖角区 $-77^\circ \leq \theta_{\text{lab}} \leq -153^\circ$ 。用两个 DGAC 信号的符合挑选裂变事件。实验上记录了两裂变碎片的实验室角度和飞行时间差。由于全融合和转移反应的线性动量转移不同^[7], 全融合裂变和转移跟随裂变的碎片折叠角分布形成两个各自的峰, 如图 1 所示。其中折叠角 θ_{FF} 值小的峰是转移跟随裂变,

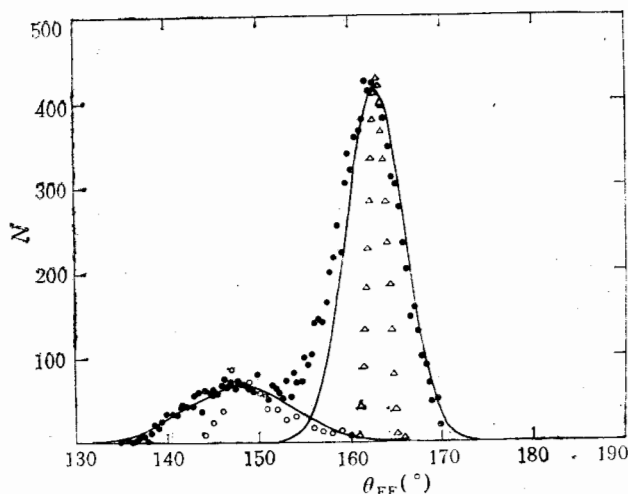


图 1 轰击能量 $82\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 的裂变碎片折叠角分布
朝前角方向飞出的碎片的实验室角度为 $40^\circ \leq \theta_{\text{lab}} \leq 50^\circ$ 。

而 θ_{FF} 值大的峰为全融合裂变。图中的虚线是高斯拟合, 空三角和空圆点分别为蒙特卡罗模拟计算^[8]。我们正是利用碎片折叠角分布的差异, 从实验上实现了两种裂变成份的区分。碎片折叠角分布的两个峰之间有些重叠。此种重叠随着朝前碎片探测角 θ_{lab} 的减小而增加。对测得的全融合裂变碎片角分布作了重叠修正, 其修正量在 $\theta_{\text{lab}} = 90^\circ$ 时为零, $\theta_{\text{lab}} = 20^\circ$ 时约为 -10% 。得到全融合裂变碎片角分布后, 通过对角分布作积分, 相对 Rutherford 散射截面归一, 得出全融合裂变截面。

3 实验结果

3.1 全熔合裂变激发函数

测量了质心系能量 72.61—80.11 MeV 全熔合裂变反应截面. 图 2 是激发函数. 图中的实点是实验值; 虚线是一维位垒穿透模型计算; 实线为耦合道模型计算^[6]. 在此计算中, 考虑了靶核静态形变对核势和库仑势的影响. 核势为

$$V_N(r, \theta) = \frac{V_0}{1 + \exp[(r - R_p - R_t(\theta) - 0.19)/a]}, \quad (1)$$

$$R_t(\theta) = R_t \left[1 + \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \beta_2 P_2(\cos \theta) + \sqrt{\frac{9}{4\pi}} \beta_4 P_4(\cos \theta) \right], \quad (2)$$

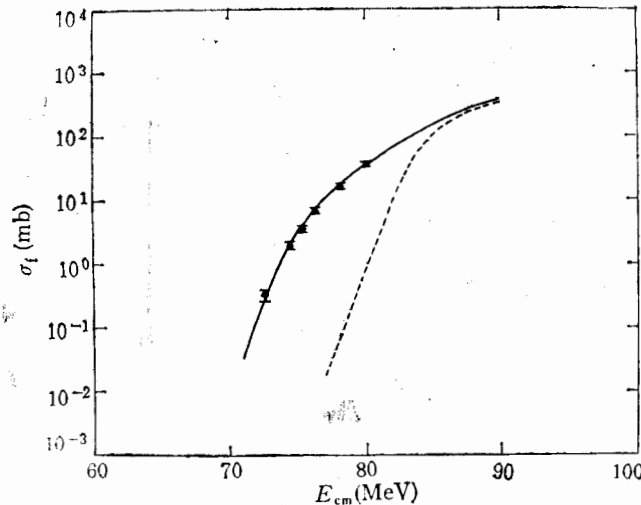


图 2 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 全熔合裂变激发函数

其中 r 是两碰撞核之间的距离, θ 为形变靶核对称轴与碰撞方向之间的夹角, R_p 为弹核半径, R_t 是把靶核看成球形时的等价核半径, $R_i = 1.233 A_i^{1/3} - 0.98 A_i^{-1/3}$, $i = p, t$, $V_0 = -31.67 R_p R_t / (R_p + R_t)$, $a = 0.63 \text{ fm}$. 靶核的四极形变 β_2 和十六极形变 β_4 分别为 0.217 和 0.119. 库仑势为:

$$V_c(\theta) = \frac{Z_p Z_t e^2}{r} \left[1 + \sqrt{\frac{9}{20\pi}} \beta_2 \frac{R_t^2}{r^2} P_2(\cos \theta) + \sqrt{\frac{1}{4\pi}} \beta_4 \frac{R_t^4}{r^4} P_4(\cos \theta) \right], \quad (3)$$

其中 Z_p 和 Z_t 分别是弹核和靶核的电荷数. 此外, 计算中还考虑了靶核 ^{232}Th 的 0.7744 MeV ($\beta_2 = 0.0932$) 态的非弹激发. 由图可见, 包含靶核静态形变的耦合道模型计算结果与实验数据很一致.

3.2 裂变碎片角分布

测量了质心系能量 72.61、74.49、75.43、76.36、78.24 和 80.11 MeV 六个能量点的裂变碎片角分布。图 3 显示了其中的 4 个。图中的实点是全熔合裂变实验值，空心圆为包含全熔合裂变和转移跟随裂变两种成份的测量结果。当 $\theta_{c.m.} > 155^\circ$ 时，探测器效率逐渐从 100% 下降。用蒙特卡罗方法作了探测器系统效率计算。图中 $\theta_{c.m.} > 155^\circ$ 的两三个实验点是作了效率修正后的实验值。由图可见，扣除转移跟随裂变成份后，碎片角分布的各向异性减小。

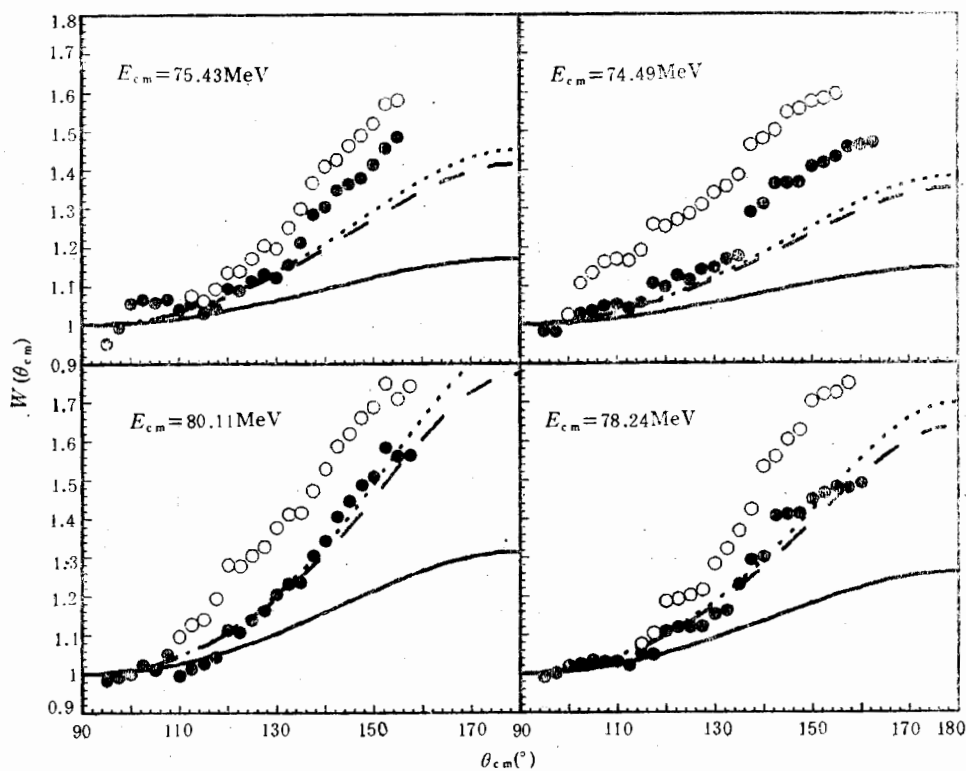


图 3 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 裂变碎片角分布

假定全熔合反应形成的复合核全部发生裂变，根据鞍点过渡态模型^[9]，碎片角分布为

$$W(\theta) = \frac{\sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l \sum_{k=-l}^l \frac{1}{2} (2l+1) |d'_{0k}(\theta)|^2 \exp(-k^2/2k_0^2)}{\sum_{k=-l}^l \exp(-k^2/2k_0^2)}, \quad (4)$$

其中 λ 为入射道约化波长； T_l 是穿透系数，由激发函数计算中抽取； k 是自旋在核对称轴上的投影，遵从高斯分布，其宽度 $k_0 = \sqrt{J_{\text{eff}} T_{**} / \hbar^2}$ 。 T_{**} 是鞍点处核温度， $T_{**} = \sqrt{(E_x - B_f - E_{\text{rot}}) / a}$ ， $a = A/8$ 。这里 A, E_x, B_f 和 E_{rot} 分别是裂变核的质量数、激发能、裂变位垒高度和转动能。有效转动惯量 $J_{\text{eff}} = J_{\parallel} J_{\perp} / (J_{\perp} - J_{\parallel})$ ， J_{\parallel} 和 J_{\perp} 分别

是鞍点处平行和垂直于核对称轴的转动惯量,由转动液滴模型^[10]计算。

按照断点态模型^[11],裂变碎片角分布取决于断点组态。此时,碎片角分布为

$$W(\theta) = \frac{\sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l \sum_{m=-l}^l \frac{1}{2} (2l+1) |d'_{0m}(\theta)|^2 \exp(-m^2/2s_0^2)}{\sum_{m=-l}^l \exp(-m^2/2s_0^2)}, \quad (5)$$

其中 m 是 l 在核对称轴上的投影,也是高斯分布,其宽度 $s_0 = \sqrt{\frac{2}{5} A \cdot b^2 T_{sc} / \hbar^2}$ 。假定对称裂变,且碎片具有椭球形状, b 和 c 分别是其短半轴和长半轴,其值按下面关系计算:

碎片总动能 $E_k = 0.107 \frac{Z^2}{A^{1/3}} + 22.0 \text{ MeV}$, A , Z 是裂变核的质量数和电荷数;则 $E_k = \left[\frac{Z}{2} e \right]^2 / (2c + 2)$, $b = \sqrt{r_0^3 A / 2c}$, $r_0 = 1.225 \text{ fm}$ 。断点处核温度为

$$T_{sc} = \left[\frac{E_{cm} + Q_{sym} - E_k - E_{def} - E_{rot}}{A/8} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

式中 E_{cm} , E_k , E_{def} 和 E_{rot} 分别是质心系能量、碎片总动能、碎片总形变能和断点处的转动能。 Q_{sym} 是质量对称划分时的 Q 值。 $E_{def} = 20 \text{ MeV}$, 而转动能 E_{rot} 因其值较小,在计算中被忽略。

图 3 中的实线是鞍点过渡态模型的理论计算,模型预言的碎片角分布的各向异性均明显低于实验值。而图中的虚线和点线分别是未作断裂前中子发射修正和作了断裂前中子发射修正的断点态模型的计算值。断裂前中子发射数据取自文献[12]。由图可见,断点模型的理论预言值在垒下区域明显低于实验值,而在近垒区域与实验值趋向一致。

3.3 裂变碎片角分布各向异性

碎片角分布各向异性定义为

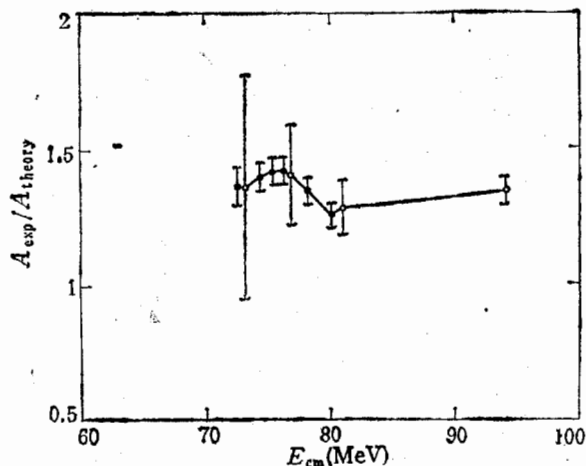


图 4 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 全熔合裂变碎片角分布各向异性实验值与鞍点过渡态模型计算值之比随质心系能量的变化

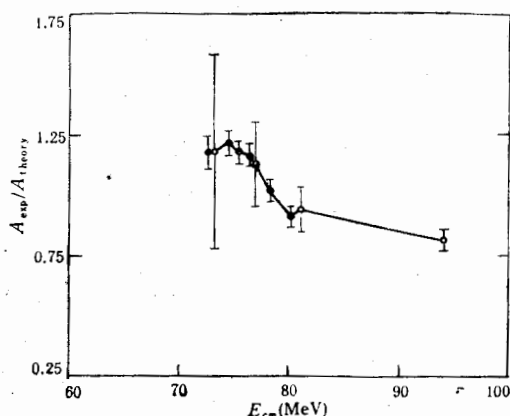


图 5 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 全熔合裂变碎片角分布各向异性实验值与断点过渡态模型计算值之比随质心系能量的变化

$$A = W(180^\circ)/W(90^\circ). \quad (7)$$

对实验上测得的裂变碎片角分布作了用勒让德多项式(只包含偶次项)拟合外推和实验数据平滑外推,求得碎片角分布各向异性值。两者在误差范围内一致。本文中采用了平滑外推的结果。图 4 是碎片角分布各向异性实验值与鞍点态模型计算值之比随质心系能量的变化。图中的实点是我们的结果,空心圆代表 Back 等人^[13]的数据。图 5 是各向异性实验值与断点态模型计算值之比随质心系能量的变化。由图可见,实验各向异性值系统偏离裂变统计模型预言。

4 总结与讨论

测量了质心系能量 72.61—80.11 MeV 的 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 全熔合裂变截面和碎片角分布。利用碎片折叠角分布,从实验上实现了全熔合裂变和转移跟随裂变两种成份的区分。包含靶核静态形变的耦合道模型理论计算与实验激发曲线相当一致。然而裂变鞍点过渡态模型无法解释实验上观察到的裂变碎片角分布。而断点态模型预言虽则在近垒区域似乎与实验结果一致,然而在垒下明显低于实验值,能量较高的垒上区域又明显高于实验值。由此可见,虽则从实验上排除了转移跟随裂变成份,裂变碎片角分布各向异性异常现象依然存在。

裂变碎片角分布主要取决于两个因素,即入射道的穿透因子 T_i 和出射道的有效转动惯量 J_{eff} 。后者在鞍点态模型中为 $J_{\parallel}J_{\perp}/(J_{\perp} - J_{\parallel})$,断点模型时近似等于 $\frac{5}{2} M_f(c^2 + a^2)$ 。 T_i 从激发函数耦合道模型计算中抽取。而本研究得出的事实是,一方面耦合道模型很好解释了重离子垒下熔合截面增强,因而如果此模型是正确的,可以认为由此抽取的 T_i 较合理;另一方面,碎片角分布的统计理论预言与实验观察相差甚远。总之,激发曲线和角分布二者不能自治描述。此种矛盾现象值得从实验和理论两方面作进一步研究和探讨。

参 考 文 献

- [1] M. Beckerman, *Phys. Rep.*, **129** (1985) 145.
 [2] C.H. Dasso, S. Landowne and A. Winther, *Nucl. Phys.*, **A405**(1983) 381.
 [3] R. Vandenbosh, B.B. Back, S. Gil, A. Lazzarini and A. Ray, *Phys. Rev.*, **C28**(1983) 1161.
 [4] R. Vandenbosh, T. Murakami and C.-C. Sahm et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986) 1234.
 [5] H.Q. Zhang, J.C. Xu and Z.H. Liu et al., *Phys. Rev.*, **C42**(1990) 1086.
 [6] J. Fernandez-Niello, C.H. Dasso and S. Landowne, *Comp. Phys. Comm.*, **54**(1988) 409.
 [7] 钱兴、张焕乔、刘祖华等, *高能物理与核物理*, **17**(1993)173.
 [8] 钱兴、许谨诚、刘祖华等, *高能物理与核物理*, **18**(1994)385.
 [9] R. Vandenbosh and J.R. Huizenga, *Nuclear Fission*, Academic Press, New York, 1973.
 [10] A.J. Sierk, *Phys. Rev.*, **C33**(1986) 2039.
 [11] P.D. Bond, *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984)414; *Phys. Rev.*, **C32**(1985)471. H. H. Rossner, J. R. Huizenga and W. U. Schröder, *Phys. Rev. Lett.* **53** (1984) 38; *Phys. Rev.* **C33**(1986) 560.
 [12] D.J. Hinde, H. Ogata, M. Tanaka, T. Shimoda, N. Takahashi, A. Shinohara, S. Wakamatsu, K. Katori and H. Okamora, *Phys. Rev.*, **C39**(1989) 2268.
 [13] B.B. Back, R.R. Betts and P. Fernandez et al., Sixth Winter Workshop on Nuclear Dynamics, Jackson Hole, Wyoming, U.S.A. (1990).

Subbarrier Complete Fusion-Fission Reactions of $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$

Liu Zuhua Xu Jincheng Zhang Huanqiao Qian Xing

Qiao Yu Lin Chengjian Xu Kan

(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

Received on February 22, 1993

Abstract

We have succeeded in isolating the complete arising from complete fusion-fission in terms of the fragment folding angle technique, and measured complete fusion-fission cross sections and fragment angular distributions for the $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ system in the center-of-mass energies between 72.61 and 80.11 MeV. The observed fission excitation function is in quite good agreement with the expectation of the coupled-channels theory. However, the measured fragment angular distributions are more anisotropic than the predictions of both the saddle-point transition-state model and scission model.

Key words subbarrier complete fusion-fission, excitation function, fragment angular distribution, coupled-channels theory, saddle-point transition state model, scission model.