

垒下熔合裂变中观察到的异常*

刘祖华 张焕乔 许谨诚 钱兴¹⁾ 譙愚 林承键 徐侃

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1994-06-06 收稿

摘 要

测量了 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 、 ^{238}U 和 $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 近垒和垒下熔合裂变截面以及碎片角分布。包含靶核静态形变的耦合道理论解释了垒下熔合截面增强,预言了复合核系统自旋分布展宽。而实验上观察到的碎片角分布各向异性明显与裂变统计理论的预言不一致。

关键词 熔合裂变, 碎片折叠角, 碎片角分布, 鞍点模型, 断点模型。

1 前 言

近几年来,人们对重离子垒下熔合过程的研究取得了长足的进展。与重离子垒上熔合不同,垒下熔合涉及到相互作用位垒的量子力学穿透,因而对位垒的高度、位置和形状很敏感。而相互作用核的核结构,例如核的静态形变,核的转动、振动、核子交换等,都会对位垒产生影响。这些静态和动态效应使相互作用核面对一个多维位垒。因而,熔合过程由原先的一维位垒穿透变成多维位垒穿透问题。正是考虑到了上述物理因素,Wong模型^[1],零点振动模型^[2],耦合道理论^[3],中子流模型^[4]等在解释垒下熔合截面增强和复合核自旋分布展宽方面取得成功。

然而,重离子垒下熔合反应研究中还存在着没有解决的问题,其中最突出的是垒下熔合裂变中发现的异常现象^[5,6]。一方面,Wang模型、耦合道理论等的理论预言通常与实验熔合裂变激发函数相当一致。另一方面,从激发函数理论计算中抽取的自旋分布, $(2L+1)T_L$ 用于裂变碎片角分布计算,却发现计算结果与实验碎片角分布明显不符。众所周知,由实验碎片角分布,可提取复合核自旋分布的平方平均值 $\langle L^2 \rangle_{\text{exp}}$ 。虽然上述模型预言了垒下重离子熔合中形成的复合核自旋分布展宽,然而理论计算的自旋分布的平方平均值, $\langle L^2 \rangle_{\text{theory}}$ 仍然比由碎片角分布中提取的 $\langle L^2 \rangle_{\text{exp}}$ 值小得多。

为了对此种异常现象进行探索,我们利用裂变碎片折叠角技术,区分了全熔合裂变和转移跟随裂变两种成分;测量了 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 近垒和垒下全熔合裂变截面和碎片角分布;用包含靶核静态形变的耦合道理论计算了熔合裂变激发函数;比较了裂变鞍点模型^[7]、断点模型^[8]的理论预言与实验碎片角分布;对造成异常现象的可

* 国家自然科学基金资助。

1) 北京大学博士后。

能原因作了探讨。

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 , ^{19}F 束轰击厚度约为 $350\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 ^{232}Th 和 ^{238}U 靶。一金硅面垒半导体探测器置于 -20° 作为探测弹性散射的监视器。裂变碎片用两块位置灵敏双栅雪崩计数器 (DGAC) 探测。DGAC 的灵敏面积为 $25\text{cm} \times 20\text{cm}$, 位置分辨 4mm 。两块 DGAC 分别置于束流的两侧。置于前角的 DGAC 距靶心 15cm , 覆盖角区为 $10^\circ \leq \theta_{\text{l,b}} \leq 90^\circ$ 。置于后角的 DGAC 距靶 16cm , 覆盖角区 $-153^\circ \leq \theta_{\text{l,b}} \leq -77^\circ$ 。用两块 DGAC 信号的符合挑选裂变事件。实验上记录了两个裂变碎片的实验室角度和飞行时间差。探测到的事件包括全熔合裂变和转移跟随裂变两种成分。由于全熔合和转移反应两种过程的线性动量转移不同, 上述两种裂变的碎片折叠角分布形成两个各自的峰^[9]。利用碎片折叠角分布的这种差异, 从实验上实现了两种裂变成分的区分, 测量了全熔合裂变碎片角分布。得到碎片角分布后, 通过对角分布作积分, 且利用 Rutherford 散射截面归一, 求得全熔合裂变截面。实验误差包括统计误差和角分布外推引入的误差等。碎片角分布数据的不确定性约在 $4\% - 6\%$, 而截面误差为 $7\% - 14\%$ 。

3 实验结果

3.1 熔合裂变截面

我们测量了 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 三个反应系统近垒和垒下能区熔合裂变截面。图 1 给出了实验熔合裂变截面与一维位垒量子力学穿透模型计算值之比, $\sigma_{\text{exp.}}/\sigma_0$ 随 $E_{\text{c.m.}}/V_b$ 的变化。其中 $E_{\text{c.m.}}$ 和 V_b 分别为质心系能量和熔合位垒高度。图中的实点是本实验结果, 实线是耦合道理论计算值与一维位垒量子力学穿透模型计算值之比, σ_c/σ_0 。在耦合道理论计算中, 我们考虑了靶核 ^{232}Th 的静态形变 ($\beta_2 = 0.217$ 和 $\beta_4 = 0.119$), 靶核 ^{238}U 的静态形变 ($\beta_2 = 0.224$ 和 $\beta_4 = 0.050$), 以及靶核 ^{232}Th 的 0.7744MeV 态 ($\beta_3 = 0.0932$), 靶核 ^{238}U 的 0.7319MeV 态 ($\beta_3 = 0.084$) 以及弹核 ^{19}F 的 0.1976MeV 态 ($\beta_2 = 0.55$) 的非弹激发。图 1 清楚地显示了垒下重离子熔合截面比一维位垒量子力学穿透模型计算呈现几个数量级的增强, 而耦合道理论很好地描述了此种增强。

由于耦合道理论计算中考虑了靶核的静态形变以及入射道与非弹道之间的耦合, 其预言的复合核自旋分布比起一维位垒量子力学穿透模型计算结果明显展宽。图 2 给出 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 在轰击能量 $E_{\text{l,b}} = 81.63\text{MeV}$ 时复合核 ^{248}Cf 的自旋分布。

3.2 裂变碎片角分布各向异性

我们测量了 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 近垒和垒下一系列能点的熔合裂变碎片角分布, $W(\theta)$ 。利用只包含偶次项的勒让德多项式将测得的角分布外推到 0° 。

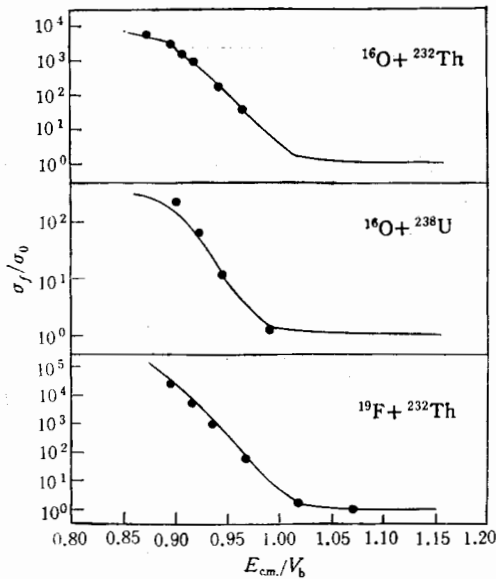


图 1 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 实验熔合裂变截面与一维位垒量子力学穿透模型计算值之比随 $E_{c.m.}/V_b$ 的变化

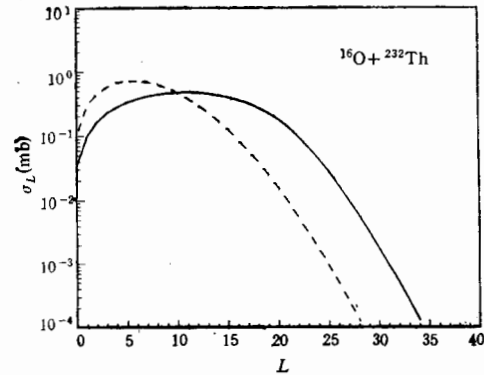


图 2 $E_{lab} = 81.63\text{MeV}$ ^{16}O 轰击 ^{232}Th 靶形成的复合核 ^{248}Cf 自旋分布
虚线是一维位垒量子力学穿透模型计算结果, 实线是耦合道理论预言.

外推误差约 4%。碎片角分布的各向异性定义为 $A = W(0^\circ)/W(90^\circ)$ 。下面我们将实验观察到的碎片角分布各向异性, $A_{exp.}$ 与裂变统计理论预言值 A_{theory} 作一比较。其中, 裂变统计理论主要指鞍点模型和断点模型。

鞍点模型的基本假定是, 角动量 L 在核对称轴上的投影 K 在裂变鞍点被“冻结”。在此种处理中, K 为高斯分布, 其宽度为

$$K_0^2 = g_{eff} \cdot T_{s,d} / \hbar^2, \quad (1)$$

其中有效转动惯量 g_{eff} 等于 $g_{\parallel}g_{\perp}/(g_{\perp} - g_{\parallel})$ 。 g_{\parallel} 和 g_{\perp} 分别是裂变鞍点处平行于核对称轴和垂直于核对称轴的转动惯量, 由转动液滴模型^[10]计算。 $T_{s,d}$ 是鞍点处核温度,

$$T_{s,d} = \left[\frac{E_{c.m.} + Q - B_f(L) - E_n}{A_{CN}/8} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

Q 和 $B_f(L)$ 分别是反应 Q 值和转动液滴模型计算的裂变位垒高度。 A_{CN} 是复合核系统的质量数。 E_n 是裂变前中子发射所带走的能量^[11]。图 3 显示了实验测定的碎片各向异性与鞍点模型预言值之比, $A_{exp.}/A_{theory}$ 随 $E_{c.m.}/V_b$ 的变化。其中倒三角是 Back 等人^[12]的数据。其它的实验点都是我们的数据。由图可见, 在近垒和垒下能区, 比值 $A_{exp.}/A_{theory}$ 明显大于 1, 而当能量 $E_{c.m.}$ 超过熔合位垒 V_b 之后 $A_{exp.}$ 逐渐趋向鞍点模型预言。

裂变断点模型假定, 裂变碎片角分布决定于断点组态。最近 Bond^[13] 提出了估计断点相空间因子的方案, 即两具有椭球形状的碎片独立转动。他得到道自旋为高斯分布, 其宽度为

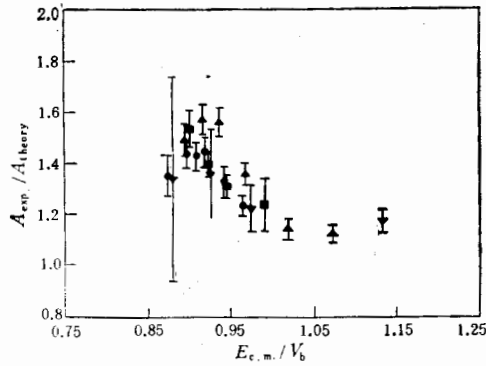


图 3 实验碎片角分布各向异性与鞍点模型计算值之比随 $E_{c.m.}/V_b$ 的变化

▼● $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$; ▲ $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$; ■ $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$.

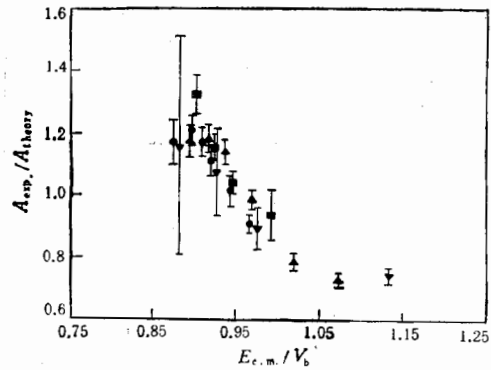


图 4 实验裂变碎片角分布各向异性与断点模型计算值之比随 $E_{c.m.}/V_b$ 的变化

▼● $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$; ▲ $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$; ■ $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$.

$$S_0^2 = g_{\parallel} T_{sc} / \hbar^2, \quad (3)$$

转动惯量是基于碎片具有椭球形状的刚体值计算

$$g_{\parallel} = \frac{2}{5} A_{CN} b^2, \quad (4)$$

椭球的短半轴 b 和长半轴 a 由下列关系估计:

$$2b^2 a = r_0 A_{CN}, \quad (5)$$

$$\left(\frac{Z_{CN}}{2} \right)^2 e^2 / (2a + \Delta) = E_k, \quad (6)$$

其中 $\Delta = 2\text{fm}$, $r_0 = 1.225\text{fm}$, Z_{CN} 是复合核系统的电荷数。碎片总动能 E_k 由 Viola^[13] 系统化公式计算。断点处的核温度

$$T_{sc} = \left[\frac{E_{c.m.} + Q_{sym} - E_k - E_{def} - E_n - E_{rot}}{A_{CN}/8} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

此处 E_{def} 和 E_{rot} 是总的碎片形变能和转动能。 Q_{sym} 是裂变核质量对称划分时的 Q 值。 E_{def} 约为 20MeV 。而 E_{rot} 因较不重要,在计算中被忽略。

图 4 显示了实验碎片角分布各向异性 A_{exp} 与断点模型计算值 A_{theory} 的比较。除了 $E_{c.m.} = 0.95V_b$ 附近外,其它能区断点模型计算值明显与实验值不一致。

4 总结与讨论

我们利用裂变碎片折叠角技术,从实验上实现了熔合裂变和转移跟随裂变两种成分的区别,测量了 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 三个反应系统近垒和垒下能区熔合裂变截面以及碎片角分布。实验观察到,在垒下能区熔合裂变截面比一维位垒量子力学穿透模型计算值呈现几个数量级的增强。包含靶核静态形变的耦合道理论令人满意地再现了垒下熔合截面增强和复合核系统自旋分布展宽。然而,当将由耦合道理论计算的

复合核系统的自旋分布 $(2L + 1)T_L$ 用于裂变碎片角分布的理论计算时,无论是鞍点模型还是断点模型的理论预言均与实验碎片角分布不符。其中鞍点模型预言的碎片角分布各向异性低于实验观察,而断点模型预言的角分布各向异性只有在 $E_{c.m.} = 0.95V_0$ 区域才接近实验观察值。

众所周知, 裂变碎片角分布各向异性可用以下近似关系表征:

$$A \approx 1 + \frac{\langle L^2 \rangle}{4K_0^2}. \quad (8)$$

在断点模型中,公式(8)中的 K_0^2 换成 S_0^2 。公式(8)清楚地表明了碎片角分布各向异性与入射道的特征量 $\langle L^2 \rangle$ 及出射道的特征量 K_0^2 或 S_0^2 之间的关系。由公式(8)可见,我们在重离子垒下熔合裂变中发现的异常,其原因或是由于重离子垒下熔合过程中某些重要的自由度尚未包含在目前的理论模型之中,因而 $\langle L^2 \rangle$ 值算得不合理,或是裂变统计模型在应用于重离子引起的熔合裂变方面有待改善。值得指出的是, Back 等人^[10]总结了他们的实验结果后得出结论: 当弹核质量 $A_p < 20$ 时, 鞍点模型计算的碎片角分布与实验角分布一致; 而只有当 $A_p \geq 24$ 时, 才明显地观察到非复合核裂变, 即快裂变或准裂变。他们的实验是在 GSI 完成的, 轰击能量在垒上能区。令人迷惑不解的是, 同样是 $A_p > 20$ 条件下, 在垒上能区鞍点模型能很好描述实验观察, 而到了垒下越来越明显低于实验观察值。由此可见, 上述实验与理论上的矛盾, 到底是入射道效应, 还是出射道效应, 有待由进一步的实验作出判断。

参 考 文 献

- [1] C. Y. Wong, *Phys. Rev. Lett.*, **31**(1973)766.
- [2] H. Esbensen, *Nucl. Phys.*, **A352**(1981)147.
- [3] C. H. Dasso and S. Landowne, *Comp. Phys. Comm.*, **46**(1987)187.
- [4] P. H. Stelson, *Phys. Lett.*, **B205**(1988)190.
- [5] R. Vandenbosch et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986)1234.
- [6] H. Q. Zhang, J. C. Xu, Z. H. Liu et al., *Phys. Lett.*, **B218**(1989)133.
- [7] R. Vandenbosch and J. R. Huizenga, *Nuclear Fission* (Academic Press, New York, 1973).
- [8] P. D. Bond, *Phys. Rev.*, **C32**(1985)471.
- [9] H. Q. Zhang, Z. H. Liu, J. C. Xu et al., *Phys. Rev.*, **C49**(1994)926.
- [10] A. J. Sierk, *Phys. Rev.*, **C33**(1986)2039.
- [11] H. Rossner, D. J. Hind, J. R. Leigh et al., *Phys. Rev.*, **C45**(1992) 719.
- [12] B. B. Back, R. R. Betts, P. Fernandez et al., *Fission at subbarrier energies, The Sixth Winter Workshop On Nuclear Dynamics, Jackson Hole, Wyoming, USA(1990)*.
- [13] V. E. Viola, K. Kwiakowski and M. Walker, *Phys. Rev.*, **C31**(1985)1550.
- [14] B. B. Back, R. R. Betts, J. E. Gindler et al., *Phys. Rev.*, **C32**(1985)195.

Anomaly Observed in Subbarrier Fusion-Fission Reactions

Liu Zuhua Zhang Huanqiao Xu Jincheng Qian Xing

Qiao Yu Lin Chengjian Xu Kan

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

Received 6 June 1994

Abstract

The fusion-fission cross sections and fragment angular distributions for the systems of $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ and $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ at near-and sub-barrier energies have been measured. The enhancement of fusion-fission cross sections at subbarrier energies is well explained in the framework of coupled-channels theory in which the target static deformations are explicitly taken into account. However, the experimental fragment anisotropies obviously deviate from the predictions of the statistic fission model.

Key words fusion-fission, fragment folding angle, fragment angular distribution, saddle point model, scission model.