

# 预平衡裂变\*

刘祖华 张焕乔 许谨诚 钱兴<sup>1)</sup> 譙愚 林承键

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1995-03-01 收稿

## 摘 要

实验证明,重离子熔合裂变与入射道的质量不对称有关,说明对于某些反应体系,熔合形成的复合体系,裂变时未忘记其形成的历史.在实验观察的基础上,我们提出了预平衡裂变模型,解释了重离子垒下熔合裂变碎片角分布各向异性异常.

**关键词** 垒下熔合, 临界质量不对称, 预平衡裂变.

## 1 前 言

众所周知,核裂变鞍点模型<sup>[1,2]</sup>是原子核裂变研究中的一个标准理论.自1956年A.波尔提出该理论以来,鞍点模型取得了很大的成功.从实验数据提取的裂变鞍点低位能级核谱和鞍点核形状参数的确与鞍点模型预言一致.然而,近十几年来,一些重离子引起裂变的实验结果<sup>[3]</sup>很难甚至不可能用裂变鞍点模型解释.有人<sup>[4]</sup>认为,与标准模型的偏离是熔合裂变过程中反应系统未经历复合核形成阶段的标志.为实验所证实的非复合核裂变有快裂变<sup>[5]</sup>和准裂变<sup>[6]</sup>.理论计算表明,当角动量超过临界角动量 $L_{Br}$ 以后,裂变位垒消失.由于没有裂变位垒的阻挡,熔合形成的复合体系在未达到各种自由度都平衡时就趋向裂变,即快裂变.用较重的弹核轰击重靶核时,反应体系除需克服一维熔合位垒外,还需要额外推力才能进入无条件鞍点以内,形成复合核.当没有足够的能量来提供额外推力,以至于反应系统未能进入无条件鞍点而趋向裂变,称为准裂变.快裂变和准裂变都是介于直接反应和复合核反应的中间过程.

近年来,近垒和垒下重离子( $A_p < 20$ )熔合裂变实验发现<sup>[7,8]</sup>碎片角分布各向异性值明显大于鞍点模型计算结果.我们曾利用各种理论模型对实验结果作了系统的分析比较,发现很难在现有的理论框架下解释实验上观察到的异常的各向异性.入射道方面,耦合道模型<sup>[9]</sup>,Wong模型<sup>[10]</sup>等非常好地拟合了实验熔合裂变激发函数,从而成功地解释了垒下熔合截面增强和自旋分布展宽.而且,有人<sup>[11,12]</sup>对垒下熔合实验结果做过系统的评价,发现除熔合裂变外,对于绝大多数反应体系,耦合道模型能同时自洽地解释熔合激

\* 国家自然科学基金和核工业基金资助.

1) 北京大学博士后.

发函数和自旋分布及其一次矩数据。由此可见，耦合道模型经过了实验数据较为严格的检验，由拟合激发函数的耦合道计算中抽取的自旋分布比较可靠。因此，垒下熔合裂变中观察到的异常不大可能起源于入射道。至于出射道，除鞍点模型无法解释实验结果外，我们发现，快裂变和准裂变也不能解释观察到的异常。这是因为，涉及到的角动量还没有高到使裂变位垒消失，因而在垒下和近垒能区，不可能发生快裂变。另一方面，准裂变只有在弹核质量重于  $A_p = 24$  时发生。而观察到异常的重离子近垒和垒下熔合裂变，弹核质量小于  $A_p = 20$ ，因而不可能是准裂变。

近垒和垒下重离子熔合裂变碎片角分布各向异性异常的发现引起国内外同行的广泛关注和讨论。在这篇文章中，我们将探讨其物理原因，提出预平衡裂变模型。

## 2 物理原因

在一项研究工作中<sup>[13]</sup>，我们发现垒下熔合裂变中有非平衡裂变的某种迹象。如果这种迹象能得到进一步证实，那么非平衡裂变，或称之为预平衡裂变，可能就是近垒和垒下重离子熔合裂变碎片角分布各向异性异常的物理原因。要证实预平衡裂变的存在，必须从实验上找到证据，证明原子核在裂变时在某些方面没有完全忘记其形成的历史。正如 Ramamurthy 和 Kapoor<sup>[14]</sup> 所指出，如果沿着条件鞍点岭考察 Businaro - Gallone (BG) 临界质量不对称点两侧的反应系统，碎片角分布各向异性值对入射道质量不对称的依赖将提供预平衡裂变的特征证据。这里，入射道质量不对称定义为  $\alpha = (A_T - A_p) / (A_T + A_p)$ ，其中  $A_T$ ， $A_p$  分别是靶核和弹核的质量数。而对于我们所研究的反应系统，Businaro - Gallone 临界质量不对称， $\alpha_{BG}$  约等于 0.9。

由于靶核很重，文献 [7,8] 给出的实验结果中包含熔合裂变和转移跟随裂变两种成份。利用碎片折叠角技术，我们从实验上成功地地区分了上述两种成份，测量了六个反应系统熔合裂变碎片角分布<sup>[15]</sup>。在测量的反应系统中，我们特别挑选了  $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$  和  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  两个反应体系。两者都形成  $^{248}\text{Cf}$ ，但入射道质量不对称值分别位于 BG 临界质量不对称  $\alpha_{BG}$  的两侧。调节轰击能量，使上述两反应系统具有相同的激发能。如果他们都经历复合核阶段，形成相同的复合核  $^{248}\text{Cf}$ ，且具有相同的激发能，由于忘记了形成的历史，其裂变行为应该相同。反之，如裂变行为不同，有入射道效应，则至少有一个反应系统没有经过球形复合核阶段，而对形成的历史有某种记忆。对于后一种情况，统计理论，例如鞍点模型自然无法解释非平衡的裂变过程。图 1 给出了  $\alpha + ^{244}\text{Cm}$ <sup>[16]</sup>， $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$  和  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ <sup>[15,17]</sup> 三个反应系统的  $A_{\text{exp}}/A_{\text{theory}}$  随激发能  $E_x$  的变化。其中  $A_{\text{exp}}$  是测量的碎片角分布各向异性值， $A_{\text{theory}}$  是鞍点模型计算的各向异性值。三个反应系统都形成  $^{248}\text{Cf}$  核，其中  $\alpha + ^{244}\text{Cm}$ ， $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$  两个系统的入射道质量不对称都是  $\alpha > \alpha_{BG}$ ，而  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  系统的  $\alpha < \alpha_{BG}$ 。由图可见，两个  $\alpha > \alpha_{BG}$  的反应系统，实验结果与鞍点模型计算一致，说明  $\alpha + ^{244}\text{Cm}$  和  $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$  熔合裂变过程可能都经历了复合核形成阶段。而  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  的实验碎片角分布各向异性值明显大于鞍点模型计算值，说明该反应系统的熔合裂变过程可能未经球形复合核阶段，因而对入射道有某种记忆。因此，图 1 清楚地显示了预平衡裂变的迹象。

图 1 的结果表明， $\alpha > \alpha_{BG}$  的反应系统与  $\alpha < \alpha_{BG}$  的反应系统的裂变行为不同。这一

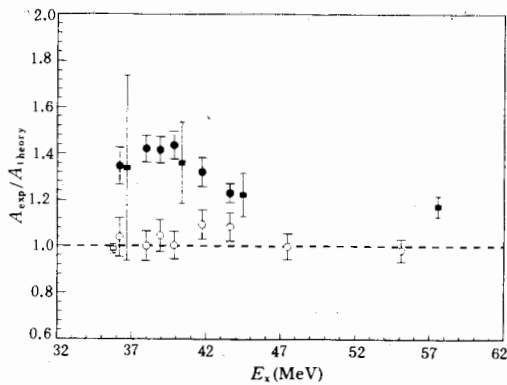


图1 实验碎片角分布各向异性与鞍点模型计算结果的比,  $A_{\text{exp}}/A_{\text{theory}}$  随激发能的变化

●  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ , ■  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  Back 等 (1990),  
○  $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$ , □  $^4\text{He} + ^{244}\text{Cm}$ .

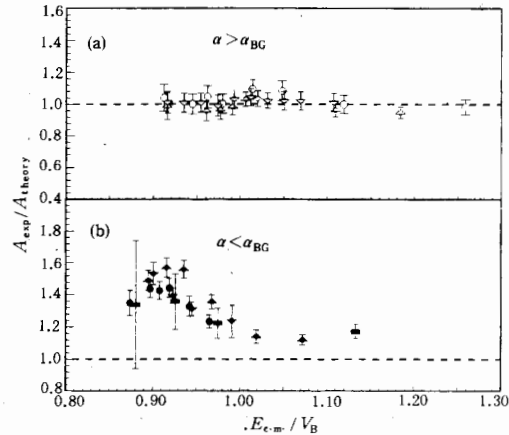


图2 实验碎片角分布各向异性与鞍点模型计算结果的比,  $A_{\text{exp}}/A_{\text{theory}}$  随  $E_{\text{c.m.}}/V_B$  的变化

(a) ○  $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$ , △  $^{12}\text{C} + ^{237}\text{Np}$ , ▽  $^{11}\text{B} + ^{238}\text{U}$ .  
(b) ●  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ , ■  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  Back 等, (1990),  
▲  $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ , ▼  $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ .

结论是否具有普遍性呢? 图2显示了六个反应系统的  $A_{\text{exp}}/A_{\text{theory}}$  随  $E_{\text{c.m.}}/V_B$  的变化. 此处  $A_{\text{theory}}$  仍然是鞍点模型的计算值.  $E_{\text{c.m.}}$  和  $V_B$  分别是质心系能量和熔合位垒高度. 六个反应系统中,  $\alpha > \alpha_{\text{BG}}$  的有  $^{11}\text{B} + ^{238}\text{U}$ ,  $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$  和  $^{12}\text{C} + ^{237}\text{Np}$ , 而  $\alpha < \alpha_{\text{BG}}$  的有  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ ,  $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$  和  $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ . 由图2可见, 三个  $\alpha > \alpha_{\text{BG}}$  的系统的实验碎片角分布各向异性  $A_{\text{exp}}$  与鞍点模型计算结果一致, 而  $\alpha < \alpha_{\text{BG}}$  的三个反应系统的实验碎片角分布各向异性明显大于鞍点模型的预言. 图1和图2的结果都表明, 位于 Businaro-Gallone 临界质量不对称两侧的反应系统, 熔合裂变的途径不同, 对于  $\alpha < \alpha_{\text{BG}}$  的反应系统, 熔合裂变过程未经历球形复合核阶段, 因而对入射道有某种记忆. 这就是在  $\alpha < \alpha_{\text{BG}}$  反应系统中, 观察到的近垒和垒下熔合裂变碎片角分布各向异性异常的物理原因.

### 3 预平衡裂变模型

从两碰撞核相互接触逐渐演化到裂变, 各种自由度也经历了由不平衡逐渐趋向平衡的弛豫过程. 对于复合核裂变, 反应系统先形成复合核, 各种自由度达到完全平衡, 然后复合核逐渐拉长, 经过鞍点趋向裂变. 对于预平衡裂变, 反应系统未经历球形复合核形成阶段, 其中弛豫时间比裂变寿命短的那些自由度, 裂变时已达到了平衡, 而那些弛豫时间比裂变寿命长的自由度, 裂变时未达到完全平衡. 根据实验观察和理论估算, 能量和荷质比最快达到平衡, 其次是质量不对称. 形状平衡, 即由接触到形成球形核经历的时间很长, 因此反应系统有很多机会在未形成球形核之前趋向裂变.  $K$  量子数是系统总角动量  $J$  在核对称轴上的投影. 理论估算表明,  $K$  自由度的弛豫时间甚至比形状平衡弛豫时间还长. 最近有实验结果<sup>[18]</sup>显示, 在某些情况下, 核裂变时  $K$  自由度远未达到平衡. 而我们的实验结果表明, 在近垒和垒下能区,  $\alpha < \alpha_{\text{BG}}$  的反应系统, 可能未经历球

形复合核阶段而裂变,也就是说对入射道有某种记忆.以上说明,核裂变时, $K$ 量子数分布未达到平衡的可能性最大.如果考虑 $K$ 量子数的平衡过程,在 $t$ 时刻, $K$ 量子数分布的方差应是

$$\sigma_K^2 = K_0^2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_K}\right) \right], \quad (1)$$

其中 $\tau_K$ 是 $K$ 量子数的弛豫时间, $K_0^2$ 是 $\sigma_K^2$ 的平衡值. $K_0^2$ 就是鞍点模型中假定的 $K$ 量子数分布的方差,决定于鞍点组态,

$$K_0^2 = g_{\text{eff}} \cdot T_{\text{sad}} / \hbar^2, \quad (2)$$

$g_{\text{eff}}$ 是鞍点时裂变核的有效转动惯量, $g_{\text{eff}} = g_{\parallel} g_{\perp} / (g_{\perp} - g_{\parallel})$ . $g_{\parallel}$ 和 $g_{\perp}$ 分别是平行对称轴和垂直对称轴的转动惯量,用有限力程转动液滴模型<sup>[19]</sup>计算.鞍点处的核温度为

$$T_{\text{sad}} = \left[ \frac{E_{\text{c.m.}} + Q - B_f(J) - E_n}{A_{\text{CN}}/8} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

其中 $Q$ 是反应 $Q$ 值, $B_f(J)$ 是总角动量为 $J$ 时的裂变位垒高度, $A_{\text{CN}}$ 是裂变核的质量数, $E_n$ 是裂变前发射中子带走的能量<sup>[20,21]</sup>.Døssing和Randrup<sup>[22]</sup>讨论了阻尼反应中的角动量转移和弛豫,发现 $K$ 量子数的弛豫时间 $\tau_K$ 反比于相对转动频率的平方 $\omega_R^2$ .如果考虑系综平均,经过一段很短时间之后, $\tau_K$ 可写成反比于 $J^2$ .在私人通信中,Døssing指出, $\tau_K \propto 1/\omega_R^2$ 关系不只适合于阻尼反应.我们在经过论证和作了一定近似后<sup>[23]</sup>,最后得到预平衡裂变 $K$ 量子数分布方差的表达式,

$$\sigma_K^2(J) = K_0^2 [1 - \exp(-gJ^2)], \quad (4)$$

其中参量 $g = cg^2 / (g_{\perp} g_{\text{eff}})$ .常数 $c$ 由 $E_{\text{c.m.}} > V_B + F$ 能区的实验数据决定.此处 $F$ 是入射道的准弹道与弹性道的总耦合强度.由Back等人的 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 的 $E_{\text{c.m.}} = 94\text{MeV}$ 处数据<sup>[17]</sup>定出 $c = 2.238$ .表达式(4)表明.系统的总角动量越低, $\sigma_K^2(J)$ 越偏离其平衡值 $K_0^2$ .为了检验 $\sigma_K^2(J)$ 对 $J^2$ 的指数依赖关系,我们在图3中比较了 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 系统的熔合裂变实验数据和基于(4)式的理论计算.其中,系统的平方平均角动量 $\langle J^2 \rangle$ 值由熔合激发函数的理论计算求得的分波截面 $\sigma_F(J)$ 求出.平均值 $\langle \sigma_K^2(J) / K_0^2 \rangle$ 根据下式计算,

$$\left\langle \frac{\sigma_K^2(J)}{K_0^2} \right\rangle = \frac{\sum_{J=0}^{\infty} \sigma_F(J) (\sigma_K^2(J) / K_0^2)}{\sum_{J=0}^{\infty} \sigma_F(J)}. \quad (5)$$

图3中的圆点和方块都代表实验数据,实线是理论计算结果.图3非常清楚地显示了预平衡裂变 $K$ 量子数分布方差 $\sigma_K^2(J)$ 与总角动量 $J^2$ 的指数关系.

为了进一步检验预平衡裂变模型,利用(4)式,我们重新计算了 $\alpha < \alpha_{\text{BG}}$ 三个反应系统的理论碎片角分布各向异性 $A_{\text{theory}}$ ,并与实验结果在图4中作比较.对于 $\alpha > \alpha_{\text{BG}}$ 的三个反应系统, $A_{\text{theory}}$ 仍然是鞍点模型计算结果.由图4可见,实验结果和理论计算总的来说趋向一致,原先观察到的近垒和垒下碎片角分布各向异性异常现象消失.换句话说,预平衡裂变模型成功地解释了 $\alpha < \alpha_{\text{BG}}$ 反应系统中观察到的碎片角分布各向异性异常.

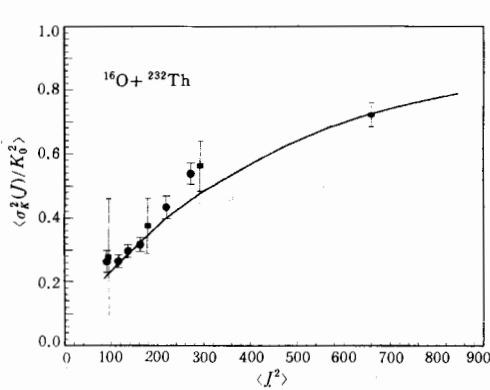


图3  $\langle \sigma_K^2(J)/K_0^2 \rangle$  随平方平均角动量  $\langle J^2 \rangle$  的变化

● Zhang 等, (1994), ■ Back 等, (1990)

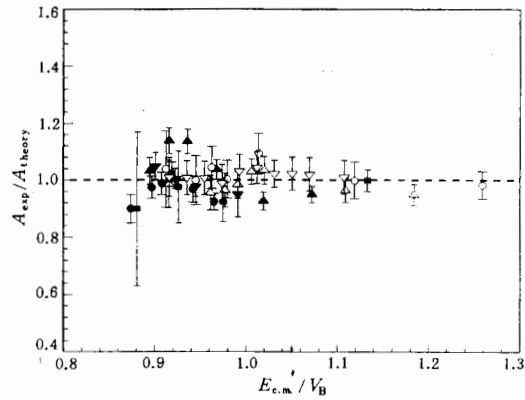


图4 实验碎片角分布各向异性与相应的理论值的比,

$A_{\text{exp}}/A_{\text{theory}}$  随  $E_{c.m.}/V_B$  的变化

●  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ , ■  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  Back 等, (1990), ▲  $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ ,  
▼  $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ , ○  $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$ , △  $^{12}\text{C} + ^{237}\text{Np}$ , ▽  $^{11}\text{B} + ^{238}\text{U}$ .

## 4 总 结

我们从实验上显示了近垒和垒下熔合裂变碎片角分布各向异性与入射道质量不对称有关. Businaro - Gallone 临界质量不对称  $\alpha_{\text{BG}}$  是个分水岭. 对于  $\alpha > \alpha_{\text{BG}}$  的反应系统, 鞍点模型能很好描写实验结果, 表明它们是复合核裂变. 而  $\alpha < \alpha_{\text{BG}}$  的反应系统, 鞍点模型无法解释实验结果, 表明这些反应系统在熔合裂变过程中可能未经历球形复合核阶段, 因而对入射道有某种记忆. 考虑到  $K$  量子数的弛豫过程之后, 我们得到了预平衡裂变  $K$  量子数分布方差的表达式. 在与实验结果比较中, 我们展示了预平衡裂变  $K$  量子数分布方差  $\sigma_K^2(J)$  与总角动量平方  $J^2$  的指数关系的正确性.

总之, 我们在实验观察的基础上, 提出了预平衡裂变模型, 成功地解释了近垒和垒下重离子熔合裂变碎片角分布各向异性异常. 作为非复合裂变模式之一, 我们对预平衡裂变的研究, 使人们对熔合裂变反应的复杂性和多样性有了新的理解.

## 参 考 文 献

- [1] A. Bohr, "On the Theory of Nuclear Fission", Proc. Int. Con. on Peaceful Uses of Atomic Energy, New York, 2 (1956) 151.
- [2] I. Halpern, V. M. Strutinsky, "Angular distributions in particle induced fission at medium energies", Proc. Int. Con. Peaceful Uses of Atomic Energy, New York, 15 (1958) 408.
- [3] L. C. Vaz, J. M. Alexander, *Phys. Rep.*, 97 (1983) 1.
- [4] B. B. Back, *Phys. Rev.*, C31 (1985) 2104.
- [5] C. Gregoire, C. Ngo, V. Remand, *Phys. Lett.*, B99 (1985) 17.
- [6] W. J. Swiaticki, *Phys. Scr.*, 24 (1981) 113.
- [7] R. Vandenbosch, T. Murakami, C.-C. Shahn *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 56 (1986) 1234.
- [8] H. Q. Zhang, J. C. Xu, Z. H. Liu *et al.*, *Phys. Lett.*, B218 (1989) 133.

- [9] C. H. Dasso, S. Landowne, A. Winther, *Nucl. Phys.*, **A405** (1983) 381; **A407** (1983) 221.
- [10] C. Y. Wong, *Phys. Rev. Lett.*, **31** (1973) 766.
- [11] D. E. DiGregorio, R. G. Stokstad, *Phys. Rev.*, **C43** (1991) 265.
- [12] R. Vandenbosch, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **42** (1992) 447.
- [13] Z. H. Liu, H. Q. Zhang, J. C. Xu *et al.*, *Phys. Rev.*, **C50** (1994) 1717.
- [14] V. S. Ramamurthy, S. S. Kapoor, in Proc. Int. Con. on Nuclear Physics, Harrogate, United Kingdom, 1986.
- [15] H. Q. Zhang, Z. H. Liu, J. C. Xu *et al.*, *Phys. Rev.*, **C49** (1994) 926.
- [16] R. F. Reising, G. L. Bate, J. R. Huizenga, *Phys. Rev.*, **141** (1966) 1161.
- [17] B. B. Back, R. R. Betts, P. Fernandez *et al.*, "Fission at Sub-barrier Energies", Proceedings of Sixth Winter Workshop on Nuclear Dynamics (Jackson Hole, Wyoming, 1990).
- [18] B. B. Back, S. Bjørnholm, T. Døssing *et al.*, *Phys. Rev.*, **C41** (1990) 1495.
- [19] A. J. Sierk, *Phys. Rev.*, **C33** (1986) 2039.
- [20] H. Rossner, D. J. Hinde, J. R. Leigh *et al.*, *Phys. Rev.*, **C45** (1992) 719.
- [21] A. Saxena, S. Kailas, A. Karnik, *et al.*, *Phys. Rev.*, **C47** (1993) 403.
- [22] T. Døssing, J. Randrup, *Nucl. Phys.*, **A433** (1985) 215.
- [23] Z. H. Liu, H. Q. Zhang, C. J. Xu *et al.*, *Phys. Lett.*, **B353** (1995) 173.

### Preequilibrium Fission

Liu Zuhua    Zhang Huanqiao    Xu Jincheng    Qian Xing  
Qiao Yu    Lin Chengjian

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Received 1 March 1995

#### Abstract

It is verified experimentally that the heavy-ion-induced fusion-fission reactions are entrance-channel mass asymmetry dependent. This dependence means that in some cases, the fused composite systems havenot forgot the history of it's formation. Based on the experimental observations, we have put forward a preequilibrium fission model. In framework of this model, we have successfully explained the anomalous fragment anisotropies from fusion-fission at near-and sub-barrier energies.

**Key words** sub-barrier fusion, critical mass asymmetry, preequilibrium fission.