

垒下 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 裂变碎片角关联模拟

钱 兴¹⁾ 许谨诚²⁾ 刘祖华²⁾ 张焕乔²⁾ 江栋兴¹⁾ 叶沿林¹⁾

1) (北京大学技术物理系 北京 100871)

2) (中国原子能科学研究院 北京 102413)

1993 年 1 月 2 日收到

摘 要

使用 Monte-Carlo 模拟计算了垒下 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 系统转移裂变和复合核裂变碎片角分布及角关联。转移过程、熔合过程和裂变过程分别用半经典模型、耦合道模型及鞍点过渡态统计模型进行模拟。考虑了各物理量分布产生的运动学效应及裂前中子发射和裂后碎片粒子蒸发对碎片角分布及角关联的影响。模拟结果和实验测量的分布相一致。使用折叠角技术借助 Monte-Carlo 模拟区分转移裂变和复合核裂变是可能的。考虑了转移裂变和裂前中子发射的影响,复合核裂变碎片角分布各向异性异常仍然存在。

关键词 转移裂变,复合核裂变,裂变碎片角分布,裂变碎片角关联。

1 引 言

近年来,近垒及垒下重离子熔合裂变反应机制一直是低能核物理研究的热点。主要原因是实验上发现了几个异常现象。首先,在某些熔合裂变反应中发现裂变碎片角分布各向异性实验值高于常规理论值^[1];其次,某些反应碎片角分布各向异性值随入射能量的变化过程在垒下呈现一个峰结构的异常^[2]。对于这些异常的起源提出了很多解释,其中有转移裂变, K 不平衡裂变,裂前中子发射以及断点过渡态统计模型等。虽然各种因素都对裂变碎片角分布各向异性产生影响,但到目前为止实验和理论都没能揭示异常起源的真正原因。主要困难在于反应过程中各种机制可能同时存在,而这些机制产生的碎片又很难在实验上区分。通常方法测量的碎片分布是各种机制产生的碎片总和。实验结果通常假设纯复合核裂变,忽略其它裂变,如转移裂变的贡献,但实际上对于易裂变的靶核,转移裂变的贡献可能很大,碎片角分布各向异性异常可能是转移裂变的贡献。已有少数实验提出垒下能区存在可观的转移裂变成份,并且试图加以区分^[3,4]。转移裂变过程比较复杂,同时有几个转移道存在,裂变核反冲角、激发能、角动量都是复杂的分布。实验上要做系统测量是比较困难的。然而这种复杂的过程特别适合于 Monte-Carlo 模拟。为了设计实验,分析实验数据,研究转移裂变对复合核裂变碎片角分布各向异性异常的影响,对转移裂变和复合核裂变过程做 Monte-Carlo 模拟分析是必要的。

2 模拟模型及参数

假定反应过程裂变核的形成与衰变是独立的二步过程,入射道中的转移过程使用半经典模型,融合过程使用包含弹靶核形变的耦合道模型,而出射道统一使用鞍点过渡态统计模型。

2.1 转移过程

在目前研究的体系和能量下 (Sommerfeld 参量约为 50), 半经典条件能很好地满足, 可以采用局域经典轨道近似。重离子之间的距离大于核力力程, 假设类弹核沿 Rutherford 轨道运动, 在高能情况下适当考虑核力尾部的修正。

在半经典模型中, 转移反应双微分截面可表达为^[5]:

$$d^2\sigma_{tr}/d\Omega dQ = \rho(Q)P_{tr}(\theta, Q)(1 - P_s(\theta))d\sigma_R/d\Omega, \quad (1)$$

式中 $d\sigma_R/d\Omega$ 是 Rutherford 散射微分截面, $\rho(Q)$ 是能级密度, $P_{tr}(\theta, Q)$ 为转移几率。

$$P_{tr}(\theta, Q) = N/\alpha^3 \sin(\theta/2) \exp[-2\alpha(D - D_c)] \exp[-(Q - Q_{opt})^2/2\sigma_0^2], \quad (2)$$

D 是最接近距离: $D = Z_1 Z_2 e^2 / 2E_{cm} [1 + 1/\sin(\theta/2)] - \Delta D$, ΔD 是核力的尾部修正。 $Q_{opt} = E_{cm} [Z_1^{(f)} Z_2^{(f)} / Z_1^{(i)} Z_2^{(i)} - 1]$, 其中 $Z_1^{(i)}, Z_2^{(i)}, Z_1^{(f)}, Z_2^{(f)}$ 是初末态弹靶核的核电荷数, $\alpha = (2\mu E_{eff})^{1/2} / \hbar$, E_{eff} 是有效结合能, N 是归一化常数, $\sigma_0 = f\alpha^{1/2} E_{cm} \eta$, f 是参数, 取 $f = 2, \eta = \hbar / (2Z_1 Z_2 e^2 \mu)^{1/2}$, 忽略虹 (rainbow) 效应吸收几率和接近距离有以下参数关系。

$$1 - P_s(D) = \begin{cases} [(D - D_c)/(D_s - D_c)]^{S(D_s - D_c)} & D \ll D_s \\ 1 & D > D_s \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $D_c = 1.4(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ 是弹靶核的接触距离, $D_s = a_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$, a_0 和 S 分别表示

吸收开始和吸收斜率的参数。它们可

从弹性散射微分截面的实验值中提取。

图 1 是 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 系统不同接近距离下弹性散射微分截面和 Rutherford 散射微分截面的比。实线是用(3)式参数拟合的结果。其中 $S = 0.6/\text{fm}$, $a_0 = 1.60 \text{ fm}$ 。点是实验值 (包括低激发能的非弹性散射截面)^[6]。这样反冲裂变核的角分布、激发能分布、裂变几率可以从半经典理论同有关实验的比较中提取。

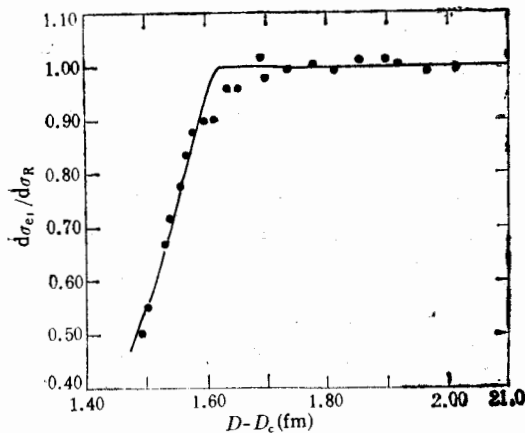


图 1 不同接近距离下准弹性散射和 Rutherford 散射微分截面比

实线是忽略虹效应下半经典模型的拟合。

2.2 融合过程

使用包含弹核和靶核形变的耦合道理论 (CCDEF^[7]) 来计算垒下融合截面,

利用我们以前测量的熔合裂变截面^[8], 对 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 系统仅需考虑非弹性道激发的耦合, 使用绝热近似(表 1 是计算中使用的参数^[9]) 从熔合截面中提取分波截面分布。

表 1 计算 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 熔合截面使用的表面振动标准弥散及相应的激发能参数

核	λ^*	$E_\lambda(\text{MeV})$	$\sigma_\lambda(\text{fm})$
^{232}T	2+	(0.049)*	0.454
	4+	(0.162)	0.248
	3-	0.770	0.195
^{16}O	3-	6.130	0.630

* 在绝热近似下, 括号内的值取为零。

2.3 裂变过程

对于复合核裂变, 根据鞍点过渡态统计理论, 裂变碎片角分布为:

$$W(\theta) = \pi \lambda^2 \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l \sum_{k=-l}^l (l+1/2) |d_{0,k}^l(\theta)|^2 \exp(-k^2/2k_0^2) \times \left[\sum_{k=-l}^l \exp(-k^2/2k_0^2) \right]^{-1}, \quad (4)$$

T_l 是穿透系数, k 是自旋在对称轴上的投影, $K_0^2 = J_{\text{eff}} T / \hbar^2$, J_{eff} 是鞍点有效转动惯量, 用 Sierk 有限力程转动液滴模型计算; $T^2 = 8(E_x - B_f - E_{\text{rot}}) / A$, E_x, B_f, E_{rot} 分别是裂变核激发能, 裂变位垒, 转动能。鞍点过渡态统计理论是建立在统计平衡基础上的。最近研究表明复合核态和鞍点态并不是达到瞬时的热力学平衡, 而是一个趋向平衡的过程。在这个过程中有中子的发射。裂前中子发射不仅改变裂变核的反冲方向和速度, 而且改变复合核的自旋分布和鞍点核温度, 这些改变又依赖于复合核的角动量。已被证明在低能下裂前中子发射对自旋分布影响不大, 但对过渡态核温度影响较大。考虑中子发射鞍点核温度的修正为:

$$T^2 = (E_x - B_f - E_{\text{rot}} - 11.2 \cdot \langle n \rangle) \cdot 8 / A, \quad (5)$$

$\langle n \rangle$ 是平均中子多重性, 11.2 MeV 是平均每个蒸发中子所带走的激发能。

对于转移裂变, 由于裂变核角动量和激发能都有分布, 因此模拟比较复杂。简单假设裂变核的自旋有两种成份组成: 其一是垂直于反应平面的方向极化, 由于核子转移而产生的角动量 J_T 其二是在反冲方向垂直的平面内顺排, 由于库仑激发和核力激发而产生的角动量 J_C , 在经典近似下自旋总角动量为:

$$J = (J_C^2 + J_T^2 + 2J_C J_T \cos \gamma)^{1/2}, \quad (6)$$

γ 是 J_C 和 J_T 之间的夹角, 在 0 到 2π 之间均匀分布。 J_C 和 J_T 随入射能和散射角度的关系为:

$$J_C = 2q\hbar \sin 2\theta_0, \quad (7)$$

$$J_T = \hbar(\eta_i - \eta_f) \text{ctg} \beta / 2, \quad (8)$$

θ_0 是靶核形变轴与束流方向之间的夹角, β 是散射角, $q = Z_1 e Q_0 / 4\hbar v D^2$, Q_0 是形变靶核的电四极矩, v 是弹靶核的相对速度, η_i, η_f 分别是入射道和出射道的 Sommerfeld 参

量。

转移核的裂变碎片角分布为:

$$W(\phi, \eta) \propto \sum_J b(J) \sum_{\gamma=-J}^J \exp(-k^2/2k_0^2) \int_0^{2\pi} A(\eta, \phi, \delta) d\gamma, \quad (9)$$

$$\text{其中: } \delta = \sin^{-1}(J_C/J \cdot \sin \gamma),$$

$$A(\eta, \phi, \delta) = d_{J,K}^2 [\cos^{-1}(\cos \eta \cos \delta - \sin \eta \sin \delta \sin \phi)]^2,$$

ϕ 是碎片和裂变核反冲方向的夹角, η 是反冲方向和束流方向所形成平面与碎片的夹角, 式中 γ 积分范围受 J 取值的限制。

裂变过程模拟中假设初始碎片质量分布是两个高斯分布之和, 对于高激发能的复合核裂变, 假设是对称裂变, 质量分布宽度弥散为: $A = 0.032 A_{CN}(E^*)^{1/4}$ 。对转移裂变假设是非对称裂变, 其一碎片中心在 130.8 左右, 弥散度用中子诱发裂变的实验值确定^[10]。碎片的 Z_i/A_i 等于裂变系统的 Z_{CN}/A_{CN} , 裂变过程的 Q 值用液滴模型的质量公式计算。激发能根据碎片的质量进行分配(即碎片具有相同的核温度), 在裂变核系中, 裂变碎片总动能是高斯分布, 平均值和弥散遵守 Viola 系统学^[11], 裂变碎片蒸发粒子, 蒸发宽度为:

$$\Gamma^i = [(2J_i + 1)\mu_i/(\pi^2 \hbar^2 \rho(E))] \cdot \int_0^{\epsilon_{\text{max}}} \sigma_{\text{inv}}(\epsilon_i) \epsilon_i \rho(E_i) d\epsilon_i, \quad (10)$$

其中 $\mu_i, \sigma_{\text{inv}}(\epsilon_i), J_i$ 分别是折合质量, 逆截面和发射核自旋, $\rho(E_i)$ 是能级密度, ϵ_i 是蒸发粒子的动能, $E = E_i + \epsilon_i + B_i$, B_i 是蒸发粒子的结合能。只考虑 n, p, α 粒子蒸发, 粒子动能按 Maxwell 分布抽样, 粒子在激发能允许的情况下连续蒸发粒子, 蒸发粒子各向同性发射, 并对碎片产生反冲效应。

3 模拟结果及讨论

$^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 系统主要是带电粒子的转移反应, 根据 Q 值截面最强的是 ($^{16}\text{O}, ^{15}\text{N}$), 其次是 ($^{16}\text{O}, ^{14}\text{C}$) 和 ($^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}$)。图 2 是半经典模型(1)式拟合 ($^{16}\text{O}, ^{12,14}\text{C}$) 的角分布。从图可见拟合得很好。从最佳拟合中提取参数 α 。 α 的值比理论计算要大且随能量的增加而减少。 α 的反常主要是由于靶核的形变所致。 裂变截面可以从

$$P_{\text{fiss}} = \int_{-\infty}^{Q_{\text{gg}} - B_f} P_{\text{tr}}(\theta, Q) \rho(Q) dQ / \int_{-\infty}^{Q_{\text{gg}}} P_{\text{tr}}(\theta, Q) \rho(Q) dQ, \quad (11)$$

中得到。其中 Q_{gg} 和 B_f 分别是基态 Q 值和裂变位垒。从(11)式可求得 ($^{16}\text{O}, ^{15}\text{N}$) 的转移裂变几率为 4%, 而 ($^{16}\text{O}, ^{12,14}\text{C}$) 为 60% 左右。这和实验结果相一致。从微分截面积分得到总截面。图 3 是不同能量下转移截面、转移裂变截面、融合裂变截面的理论拟合和实验测量的比较。实验数据取自文献 [4, 6, 8]。在 84 MeV 处转移裂变约占总裂变截面的 30%。

在模拟中使用逐个事件的 Monte-Carlo 模拟。对于转移反应, 主要考虑 ($^{16}\text{O}, ^{14}\text{C}$) 的转移道。考虑裂变碎片的质量、动量、角度等分布产生的运动学效应以及粒子发射的反冲效应。最后根据实验中探测器的几何安排, 选取被探测到的事件和实验结果进行比较, 适当考虑实验中探测器角度分辨的影响。图 4 是 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 系统不同碎片角区下的折

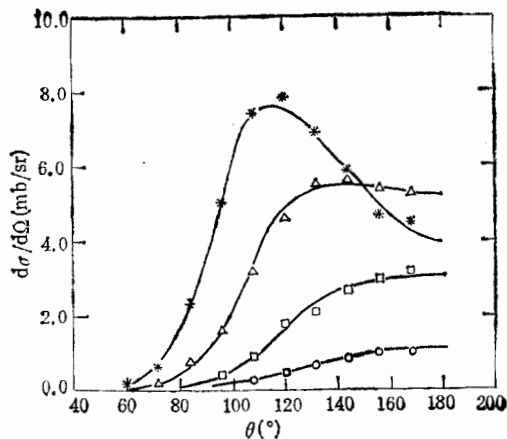


图 2 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 系统的 ($^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}, ^{14}\text{C}$) 转移道微分截面
实线是半经典模型拟合, 实验点取自文献[4], \circ , \square , \triangle , $*$ 分别表示能量为 80, 83, 86, 89 MeV 的实验值.

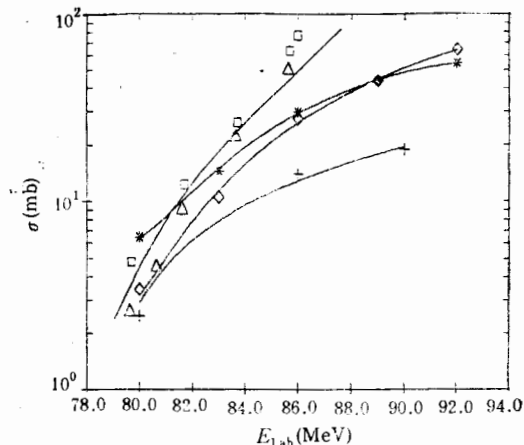


图 3 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 系统的转移截面、转移裂变截面和复合核裂变截面随能量的变化
 \diamond 、 $*$ 分别是 ^{15}N 、 $^{12,14}\text{C}$ 反应转移截面, $+$ 是总转移裂变截面, \triangle 和 \square 是熔合裂变截面, 实线是半经典模型和耦合道模型的拟合.

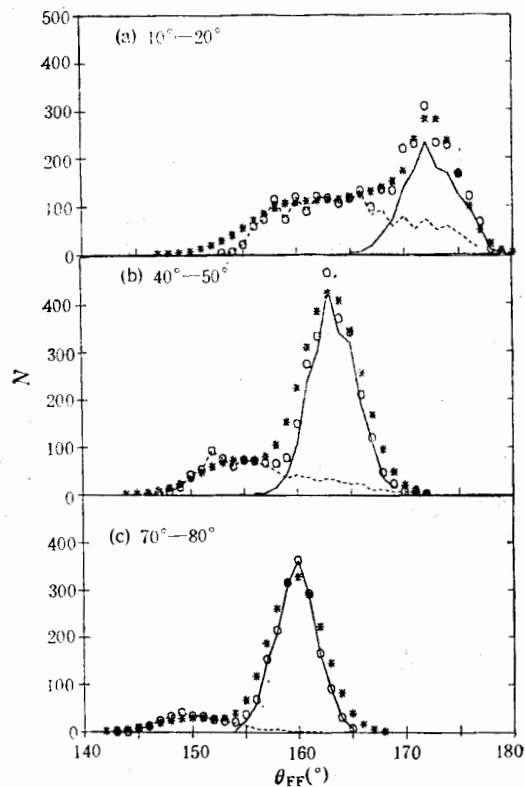


图 4 $84\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 不同碎片角区的折叠角分布
 $*$ 是实验点取自最近的实验值, \circ 是总裂变碎片折叠角拟合结果.

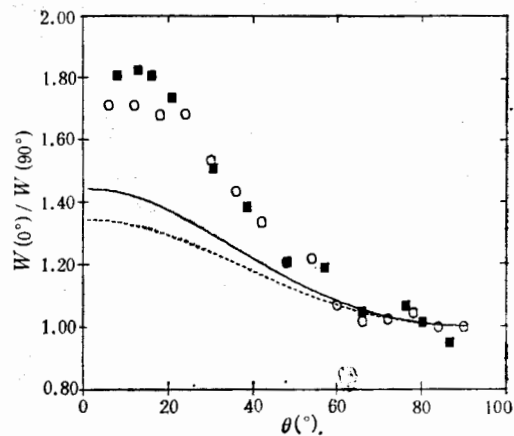


图 5 $84\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 裂变碎片角分布
虚线是复合核裂变碎片平均角分布, 实线是考虑裂前中子蒸发的复合核裂变碎片角分布. \circ 是转移裂变碎片在束流方向角分布的模拟结果, \blacksquare 是 $E_{1,ab} = 83.7\text{MeV}$ 总裂变碎片角分布实验测量结果[13].

叠角分布, (a)、(b)、(c) 分别是 $10^\circ-20^\circ$ 、 $40^\circ-50^\circ$ 、 $70^\circ-80^\circ$ 的角区。实验值是我们最近的实验结果。图中小折叠角的虚线对应于转移裂变, 而大折叠角实线是复合核裂变。从图可见在大角区($70^\circ-80^\circ$) 折叠角相差最大, 转移裂变峰在 150° 左右, 而复合核裂变在 160° 左右。随着角度的减少, 折叠角逐渐向 180° 移动, 二者的相差越来越小。从模拟结果可以推断: 使用折叠角技术并借助 Monte-Carlo 模拟区分转移裂变和复合核裂变是可能的。但在小角区(约 15° 以下) 要从折叠角区分转移裂变和复合核裂变就会比较困难甚至不可能。从图还可见模拟的折叠角平均值及宽度和实验测量的分布相一致, 表明影响折叠角分布的各种主要因素已被考虑。在裂变碎片角分布的模拟中, 裂前中子多重性是用实验的系统学, $\langle n \rangle = 0.0625E^* - 1.325^{[12]}$, E^* 是激发能, 忽略了鞍点到断点的中子发射。转移角动量从(7)、(8)式得到, 考虑到对经典近似的修正。对 J_C 和 J_T 分别乘以一个和能量及角度无关的因子^[9]。图5是 $84\text{MeV}^{16}\text{O} + {}^{232}\text{Th}$ 系统裂变碎片角度分布模拟结果。从图可见复合核裂变碎片各向异性度 1.34, 考虑中子蒸发后异性度增加为 1.47, 转移裂变在反冲方向异性度较大, 平均值为 2.0, 但在束流方向角分布异性度减少很大, 约在 1.7 左右。因此考虑转移裂变和裂前中子发射的影响, 复合核裂变碎片角分布异性异常依然存在。

4 结 论

使用逐个事件的 Monte-Carlo 模拟计算了 ${}^{16}\text{O} + {}^{232}\text{Th}$ 系统全下转移裂变和复合核裂变的碎片角分布和角关联。模拟计算能很好地拟合实验测量分布, 表明模拟过程中考虑了影响碎片角分布及角关联的各种主要因素。裂前中子的发射改变鞍点的核温度对碎片角分布影响很大, 裂变后碎片蒸发粒子产生的反冲效应是折叠角和出平面角分布展宽的主要原因。转移裂变中裂变核的激发能和角动量、反冲角、转移裂变几率都是复杂的分布。相对于某一反冲方向裂变碎片角分布各向异性度可能很大。但碎片分布在束流方向投影, 并对所有反冲方向求和, 碎片异性度减少很大。考虑转移裂变, 复合核碎片角分布异性异常依然存在。实验上使用裂变碎片折叠角技术来区分和研究转移裂变是可能的。由于运动学效应, 转移裂变和复合核裂变碎片折叠角之差与碎片发射角有关, 因此实验上要精确区分转移裂变和复合核裂变以及研究转移裂变的性质, 必须借助于 Monte-Carlo 模拟。本工作为这方面进行实验研究建立了基础。

参 考 文 献

- [1] R. Vandenbosch et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56** (1986) 1234.
- [2] H. Zhang et al., *Phys. Lett.*, **B218** (1989)133.
- [3] B. B. Back et al., Sixth Winter Workshop on Nuclear Dynamics, Jackson Hole, Wyoming. U. S. A. (Feb. 17-24, 1990).
- [4] J. P. Lestone et al., *Nucl. Phys.*, **A509** (1990) 178.
- [5] L. Corradi et al., *Z. Phys.*, **A334** (1990) 55.
- [6] T. Murakami et al., *Phys. Rev.*, **C34** (1986) 1353.
- [7] J. Fernandez-Niello et al., *Comp. Phys. Comm.*, **54** (1989) 409.
- [8] H. Zhang et al., *Phys. Rev.*, **C43** (1990) 1086.
- [9] H. Esbensen et al., *Nucl. Phys.*, **A467** (1987) 136.

- [10] R. Vandenbesch et al., "Nuclear Fission" Academic Press, New York and Landon, 1973.
[11] V. E. Viola et al., *Phys. Rev.*, **C32** (1985) 1150.
[12] H. Rossner et al., *Phys. Rev.*, **C33** (1986) 560.

Simulation of The Fission Fragment Angular Correlation For $^{16}\text{O}+^{232}\text{Th}$ At Barrier Energies

Qian Xing¹⁾ Xu Jincheng²⁾ Liu Zuhua²⁾

Zhang Huanqiao²⁾ Jiang Dongxing¹⁾ Ye Yanlin¹⁾

1) (*Department of Technical Physics, Beijing University, 100871*)

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

Received on January 2, 1993

Abstract

Fission fragment angular correlations and angular distributions have been simulated for $^{16}\text{O}+^{232}\text{Th}$ System at Sub-barrier energies. the combined kinematic effects of the distributions in mass, energy and angular for the heavy fragments and pre-scission, post-scission neutron emission have been considered. The completed fusion-fission and transfer-fission components can be separated by using fission fragment angular correlation technique with the Monte-Carlo simulation. The influence of pre-scission neutron emission and transfer fission on fission fragment anisotropies has been considered. The anomalous anisotropies still persist.

Key words transfer-fission, completed fusion-fission, fission fragment angular distributions, fission fragment angular correlations.