

文章编号: 1007-4627(2000)01-0001-05

近垒和垒下重离子熔合裂变碎片各向异性的异常*

张焕乔, 刘祖华, 许谨诚, 吕 骏, 钱 兴,

阮 明, 譙 愚, 林承键, 徐 侃

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 系统总结了研究近垒和垒下重离子熔合裂变反应碎片各向异性的异常的结果, 提出一个新的预平衡裂变模型, 成功地解释了碎片各向异性的异常现象. 但对异常宽峰结构不能说明, 有待进一步研究.

关键词: 熔合裂变; 碎片各向异性; 激发函数; 均方自旋; 预平衡裂变

中图分类号: O571.43

文献标识码: A

1 引言

80 年代初揭示出垒下重离子熔合截面比简单的一维势垒穿透模型计算值高数个量级, 且观察到这种增强的同位素效应. 这项研究成为重离子物理的一个热点, 相继提出了一些模型来解释垒下熔合增强, 如核静态形变、表面零点振动、非弹与转移道的耦合及颈生成(中子流)等. 1983 年, 我们注意到当时普遍采用单纯测量熔合激发函数来检验垒下熔合模型有相当的局限性, 有时不同模型都能重现相同实验激发函数. 为此, 我们想到用测量熔合反应自旋分布及其矩可以更严格判明垒下熔合模型的真实性的, 提出了用裂变碎片角分布作探针, 借以提取复合核的均方自旋值. 这样, 不仅开拓了垒下重离子熔合研究的新内容, 且使研究从熔合蒸发扩展到熔合裂变反应, 当时国际上还无人做这类研究. 1984 年我们正式开始这方面的研究, 直到 1987 年利用原子能院新建的 HI-13 串列加速器做了第一次实验. 这期间, 美国 Vandenbosch 等^[1]和 Murakami 等^[2]做了 $^{12}\text{C} + ^{236}\text{U}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 、 ^{208}Pb 系统的实验, 发现近垒和垒下熔合裂变碎片各向异性的异常现象, 但他们只测到垒下 4 MeV, 且只有少数几个能点, 表明这个问题亟待研究.

2 研究内容及主要结果

2.1 裂变碎片各向异性异常的揭示

1987 年开始采用云母探测器单举测量了 $^{19}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$, ^{232}Th , $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, ^{238}U , 和 $^{12}\text{C} + ^{237}\text{Np}$ 5 个系统的近垒和垒下熔合裂变的碎片角分布^[3,4], 用 Legendre 多项式拟合实验角分布积分并且得到相对于 Rutherford 散射截面的裂变截面. 利用耦合道理论能很好地重现裂变激发函数(见图 1), 由此抽取复合核的自旋分布及均方自旋 $\langle J^2 \rangle$ 值. 基于裂变角分布的鞍点过渡态理论, 碎片各向异性 $W(0^\circ)/W(90^\circ)$ 与 $\langle J^2 \rangle$ 值的近似关系为 $W(0^\circ)/W(90^\circ) \approx 1 + \langle J^2 \rangle / 4k_0^2$, 其中 k_0^2 值是总角动量 J 在裂变核对称轴上投影 K 角动量分布的方差. 利用转动液滴模型或系统学已知的 k_0^2 值, 由碎片各向异性实验值可以得到均方自旋实验值, 与模型重现熔合激发函数抽取的理论 $\langle J^2 \rangle$ 值比较. 得到的主要实验结果有: (1) 系统观察到近垒和垒下熔合裂变碎片各向异性的实验值大于裂变鞍点模型计算值的异常有普遍性; (2) 在 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 和 $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 等系统的碎片各向异性随质心能量变化中, 首次观察到异常宽峰结构(见图 2); (3) $^{19}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$ 系统的结

收稿日期: 1999-07-20

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(85163, 18975063, 19275067); 核工业科学基金资助项目(Y4120192600)

作者简介: 张焕乔(1933-), 男, 中国科学院院士, 研究员, 主要从事重离子核反应与核裂变研究工作.

果^[5,6]证实了 Dasso 等^[7]用耦合道理论作的预言: 在远离垒下能区复合核均方自旋值趋于常数.

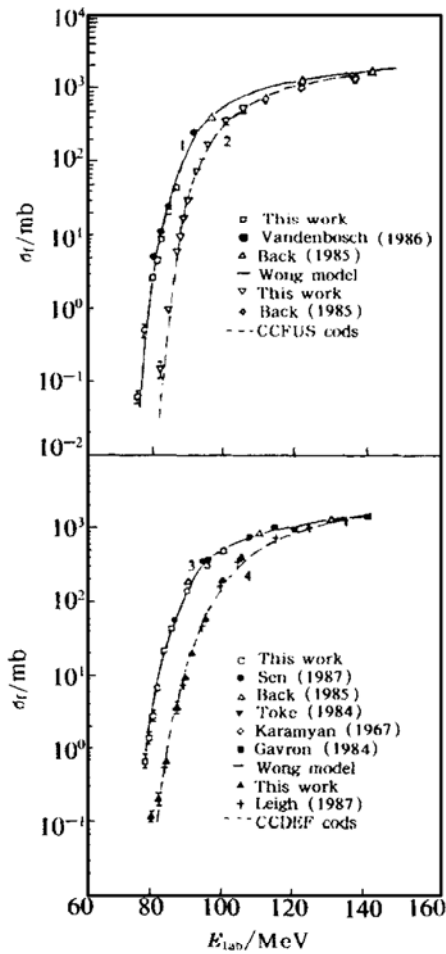


图 1 裂变激发函数的实验值与理论值的比较
曲线 1 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$; 曲线 2 $^{19}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$; 曲线 3 $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$; 曲线 4 $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$.

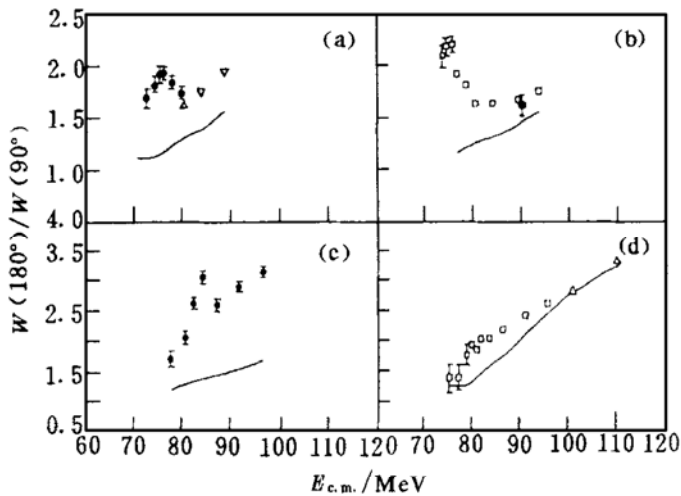


图 2 裂变碎片各向异性随质心系能量的变化
(a) $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 实验, \blacktriangle Vandenbosch (1986), \blacktriangledown Back (1985), \bullet 本工作, $-$ Wong 模型; (b) $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 实验, \blacktriangle Toke(1984), \square 本工作, $-$ Wong 模型; (c) $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 实验, \bullet 本工作, $-$ CCDEF 程序; (d) $^{19}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$ 实验, \triangle Leigh (1987), \square 本工作, $-$ CCFUS 程序.

2.2 全熔合裂变碎片各向异性异常的确证

在现有裂变碎片角分布理论中都假定发生全熔合裂变, 可是已有实验表明, 在重核近垒和垒下重离子反应中存在着转移跟随裂变^[8,9]. 那么, 在单举测量中观察到的裂变碎片各向异性的异常还有待确证是否可归之于全熔合核裂变. 为此, 要求在实验上将全熔合裂变与转移裂变分开, 进行全熔合裂变反应的碎片角分布测量. 我们首先发展了碎片折叠角技术且用于垒下熔合裂变实验, 实现了对两种裂变成份的区分. 近年来, 这项技术在国际上已得到普遍应用. 从 1991 年起, 我们利用两块大面积二维位置灵敏平行板雪崩计数器测量了碎片折叠角分布^[10], 由折叠角分布实现了对全熔合裂变与转移裂变的区分, 从而得到全熔合裂变的碎片角分布和激发函数. 现已完成 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, ^{238}U , $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$, $^{11}\text{B} + ^{238}\text{U}$, ^{237}Np 和 $^{12}\text{C} + ^{237}\text{Np}$ 6 个系统的测量. 首次实验确证在前三个系统中存在全熔合裂变碎片各向异性的异常现象^[11] (见图 3). 实验表明, 全熔合裂变的碎片各向异性比起单举值有所减小 ($\leq 10\%$), 但实验值仍大于理论值; 全熔合裂变的异常峰虽有所减弱, 但结构并未完全消失 (尤其是 $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 系统).

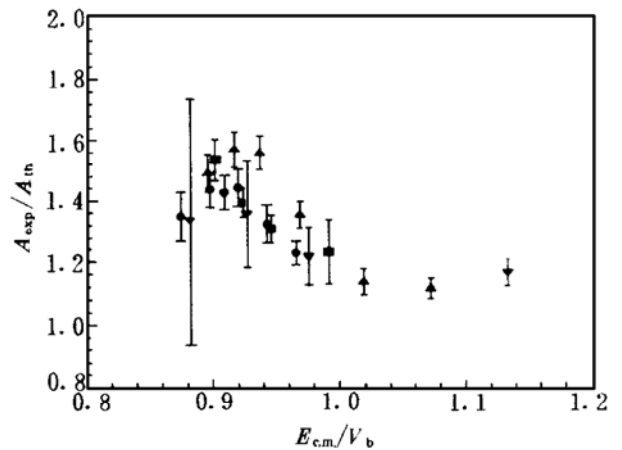


图 3 裂变碎片各向异性实验值与鞍点模型计算值之比随 $E_{c.m.}/V_b$ 的变化
 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, \blacktriangledown Back (1990), \bullet 本工作; $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$, \blacktriangle 本工作; $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$, \square 本工作.

2.3 探索异常的物理原因

近十多年来, 熔合裂变中观察到的碎片各向异性的异常现象已成为当前垒下重离子熔合反应研究中的一个难题. 出现这个异常的原因, 有可能是

描写入射道的熔合模型不完善, 如 Vandenbosch 提出可能是自旋分布展宽异常; 也有可能是裂变出射道的理论不完善或者是有不同来源的裂变混杂; 或者是入射道和出射道二者描述均存在问题. 为解决这个难题, 必须首先从实验上寻找异常的起因.

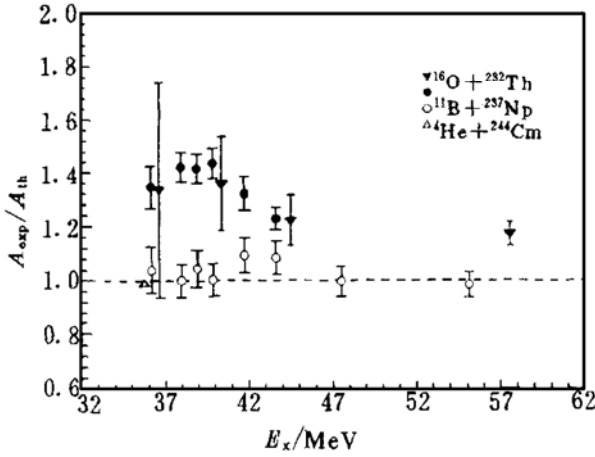


图 4 裂变碎片各向异性实验值与鞍点模型计算值之比随激发能的变化

$^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, \blacktriangledown Back (1990), \bullet 本工作; $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$, \circ 本工作; $\alpha + ^{244}\text{Cm}$, \triangle Reising (1966).

首先, 比较了由我们和 Back 等人的裂变角分布数据提取的有效转动惯量 J_0/J_{eff} , 结果两家的 J_0/J_{eff} 随 $\langle J^2 \rangle$ 的变化有相同趋势^[12], 而 Back 等人用 ^{28}Si 和 ^{32}S 等弹核引起的裂变被确认为是未经历复合核阶段的准裂变. 这个相同的趋势可能意味着我们确认的异常是非复合核裂变的贡献. Ramamurthy 等人指出, 作为垒下熔合裂变反应中存在预平衡裂变的直接标志是碎片各向异性的入射道依赖性. 为此, 我们在严格条件下研究了近垒和垒下全熔合裂变的碎片各向异性的入射道效应^[13], 实验测量了 $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$ ($\alpha = 0.911$) 和 $^{16}\text{O} + ^{232}$

Th ($\alpha = 0.871$) 两个反应系统, 它们形成相同的复合核 ^{248}Cf , 质量不对称 $\alpha [\alpha = (A_t - A_p)/(A_t + A_p)]$ 分别在 Businaro-Gallone 临界质量不对称 $\alpha_{\text{BG}} (\approx 0.9)$ 的两侧(见图 4). 在相同激发能条件下观测到两系统的全熔合裂变碎片各向异性明显不同. 前者碎片各向异性实验值与裂变鞍点模型计算值一致; 而后的测量值明显大于理论值. 实验证明, 在垒下全熔合裂变反应中存在入射道效应. 表明对于 $\alpha < \alpha_{\text{BG}}$ 的系统, 裂变可能未经历复合核阶段, 对入射道保持某种记忆, 标志着可能存在预平衡裂变, 这为解释碎片各向异性的异常提供了一个重要的物理原因.

2.4 一个新的预平衡裂变模型

基于我们的测量结果和 Dossing & Randrup 关于阻尼反应角动量分布动力学演化的理论框架, 提出了一个新的低角动量相依的预平衡裂变模型来解释我们确证的近垒和垒下全熔合裂变反应碎片各向异性的异常^[13]. 1956 年, A. Bohr 提出的裂变鞍点统计模型成为裂变碎片角分布的标准理论, 已取得巨大成功, 它的一个主要假定是裂变核的总角动量 J 在核对称轴上的投影 K 在鞍点达到统计平衡. 而现有的理论计算及某些实验数据表明, 在各种自由度中 K 量子数的弛豫时间可能比其他自由度长, 而 K 量子数的弛豫与组合系统的总角动量 J 有关, 转动越慢, 弛豫时间越长. 这样, 我们提出的模型基本内容为: (1) K 量子数分布的方差 σ_K^2 依赖于总角动量 J , 即 $\sigma_K^2(J) = \sigma_K^2(\infty) [1 - \exp(-gJ^2)]$; (2) 假定 σ_K^2 的平衡值 $\sigma_K^2(\infty)$ 决定于鞍点组态, 即 $\sigma_K^2(\infty) \equiv k_0^2 = I_{\text{eff}}T/\hbar$.

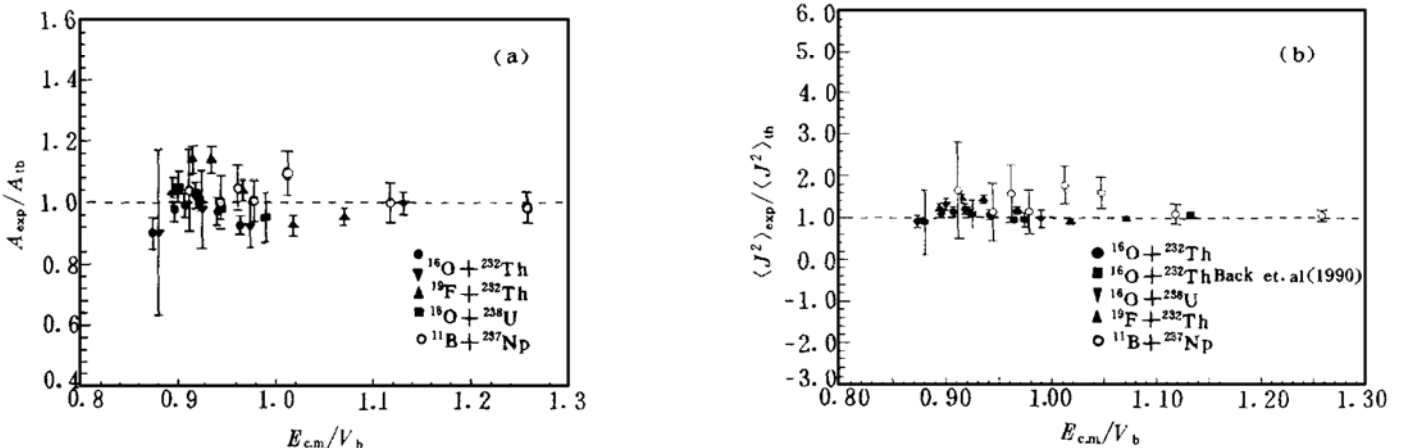


图 5 (a) 裂变碎片各项异性实验值与预平衡裂变模型计算值之比随 $E_{\text{c.m.}}/V_b$ 的变化和 (b) 均方自旋实验值与理论值之比随 $E_{\text{c.m.}}/V_b$ 的变化

提出的预平衡裂变模型给出的 K 角动量分布的方差为: $\sigma_K^2(J) = k_0^2 [1 - \exp(-gJ^2)]$, 其中 $g = 2.238 I_{\parallel}^2 / (I_{\perp}^2 I_{\text{eff}})$. 该常数是利用 Back 等人的在 $E_{\text{c.m.}} = 94.1 \text{ MeV}$ $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 反应的碎片各向异性与均方自旋的实验数据, 按 $\sigma_K^2(J)$ 公式和碎片各向异性公式定出来的.

运用这个模型很好地解释了 $\alpha < \alpha_{\text{BG}}$ 系统近垒和垒下全熔合裂变的碎片各向异性[见图 5(a)], 使得用耦合道理论能同时自洽地描述全熔合裂变的激发函数和碎片各向异性, 达到与实验 $\langle J^2 \rangle$ 值一致[见图 5(b)], 从而解决了近十多年来存在于垒下熔合研究中的一个难题.

3 研究成果水平及反响

3.1 创新点

(1) 在单举测量中第一次观察到熔合裂变碎片各向异性随质心能量变化中呈现出的异常宽峰结构. 排除转移裂变后, 在 $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 全熔合裂变反应中, 尽管峰已减弱但仍观察到这种异常结构. (2) 最先发展了碎片折叠角技术且成功地用于垒下熔合裂变实验, 首次确证近垒和垒下全熔合裂变反应碎片各向异性的确存在明显的异常现象. (3) 基于我们的测量, 提出了一个新的低角动量相依的预平衡裂变模型, 成功地解释了实验所观察到的异常现象. 回顾这方面的工作, 除单举测量由于加速器原因迟于 Vandenbosch 外, 我们在每个阶段的研究都是走在前列. 这项研究除了丰富垒下熔

合与裂变的动力学研究外, 有可能成为研究预平衡裂变的一个场所, 而对预平衡裂变的研究迄今了解甚少, 这是核物理中有兴趣的课题.

3.2 引用及反响

本工作从 1989 年起至今一直得到国际反响. 在最近连续四次国际核物理大会的有关邀请报告均有评述或引用, 也在多次有关的其它国际会议的邀请报告中被评述或引用. 例如, 1990 年 Siemssen 教授在“重离子物理及其应用国际讨论会”总结报告中指出: “张焕乔报告了在近库仑位垒能区熔合裂变中一个惊人的裂变角分布各向异性的异常. 这个异常是在北京串列加速器上首先被观察到的, 它已经引起很大的兴趣. 一个可能的解释是来自低能区转移裂变的竞争.”. 1995 年 Signorini 教授在国际核物理大会评述报告中指出, “他们已从全部裂变事件中分离出全熔合裂变成分. 从碎片各向异性抽出的有效转动惯量偏离 LDM 预言值, 同时从各向异性抽出垒下能区的均方自旋 $\langle J^2 \rangle$ 值比 CCDEF 预言值大得多. 这是未弄清楚的一个疑难问题, 也许说明在这一能区有别的东西. 假定这种趋势可能来自非复合核裂变迹象是十分自然的. 他们提出预平衡裂变假定排除了实验 $\langle J^2 \rangle$ 值与理论 $\langle J^2 \rangle$ 值之间的差异”. 另外, 在两篇权威评述文章中分别引用我们的文章. 一篇引用 $^{19}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$ 数据和图作为评论 Ramamurthy 等人 K 不平衡裂变理论的论据之一; 另一篇引我们工作分别作变形铀系靶核和球形靶核各向异性异常的分析, 并探讨了现有两种可能解释的困难.

参 考 文 献

- [1] Vandenbosch R, Murakami T, Shahm C-C *et al.* Anomalously Broad Spin Distribution in Sub-barrier Fusion Reaction. *Phys Rev Lett*, 1986, 56: 1 234~ 1 236.
- [2] Murakami T, Shahm C-C, Vandenbosch R *et al.* Fission Probes of Sub-barrier Fusion Cross Section Enhancements and Distribution Broadening. *Phys Rev*, 1986, C34: 1 353~ 1 365.
- [3] Zhang H Q, Xu J C, Liu Z H *et al.* Anomalous Anisotropies of Fission Fragment Angular Distributions in Sub-barrier Fusion-fission Reaction. *Phys Lett*, 1989, B218: 133~ 136; Zhang H Q, Xu J C, Liu Z H *et al.* Anomalous Anisotropies of Fission Fragments for the $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ Sub-barrier Fusion-fission Reaction. *Phys Rev*, 1990, C42: 1 086~ 1 091.
- [4] Zhang H Q, Liu Z H, Xu J C *et al.* Anomalous Anisotropies of Fission Fragments in near and Sub-barrier Fusion-fission Reaction. *Nucl Phys*, 1992, A538: 229c~ 240c.
- [5] Zhang H Q, Liu Z H, Xu J C *et al.* Fission-fragment Angular Distribution for the $^{19}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$ Near- and Sub-barrier Fusion-fission Reaction. *Nucl Phys*, 1990, A512: 531~ 540.
- [6] Liu Z H, Zhang H Q, Xu J C *et al.* Test of the Coupled Channels Model for Sub-barrier Fusion Reaction. *Phys Rev*, 1990, C42: 2 752~ 2 753.

- [7] Dasso C H, Landowne S. Entrance-channel Effects on the Average Angular Momentum of Compound Nuclei Produced in Fusion Reactions. *Phys Rev*, 1985, C32: 1 094~ 1 095; Dasso C H, Garrett J D. Multiplicity Distributions for the Decay of Erbium Produced by Symmetric Fusion. *Phys Lett*, 1985, B161: 36~ 38.
- [8] Leigh J, Diamond R M, Johnston A *et al.* Fission Following Transfer to ^{232}Th at Energies below the Coulomb Barrier. *Phys Rev Lett*, 1979, 42: 153~ 156.
- [9] Lestone J P, Leigh J R, Newton J O *et al.* Fission Fragment Angular Distributions Following Transfer Reaction for $^{232}\text{Th} + ^{16}\text{O}$. *Nucl Phys*, 1990, A509: 178~ 194.
- [10] Zhang H Q, Liu Z H, Xu J C *et al.* Fragment Anisotropy of Complete Fusion-fission at Sub-barrier Energies for the $^{11}\text{B} + ^{238}\text{U}$ and $^{12}\text{C} + ^{237}\text{Np}$ Reactions. *Chinese Phys Lett*, 1992, 9: 297~ 300.
- [11] Zhang H Q, Liu Z H, Xu J C *et al.* Anomalous Anisotropy of Fission Fragments in Near- and Sub-barrier Complete Fusion-fission Reactions of $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$, and $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$. *Phys Rev*, 1994, C49: 926~ 931.
- [12] Liu Z H, Zhang H Q, Xu J C *et al.* Signature of Non-compound-nucleus Fission at Sub-barrier Energies. *Phys Rev*, 1994, C50: 1 717~ 1 719.
- [13] Liu Z H, Zhang H Q, Xu J C *et al.* Preequilibrium Fission for Low Angular Momentum. *Phys Lett*, 1995, B353: 173~ 178; Liu Z H, Zhang H Q, Xu J C *et al.* Fission before K Equilibration. *Phys Rev*, 1996, C54: 761~ 766.

Anomalous Anisotropies of Fission Fragments in Near- and Sub-barrier Fusion-fission Reactions*

ZHANG Huan-qiao, LIU Zu-hua, XU Jin-cheng, LU Jun, QIAN Xin,
RUAN Ming, QIAO Yu, LIN Cheng-jian, XU Kan,
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Systematic summary on the anomalous anisotropies of fission fragments in near- and sub-barrier fusion-fission reactions is presented. A new version of the preequilibrium fission model is put forward to explain the anomalous anisotropies of fission fragments, except the bump of anomaly. Further study is still needed.

Key words: fusion-fission; fragment anisotropy; excitation function; mean square spin; preequilibrium fission