

# 激发能升高级联裂变到瞬发多重 碎裂的演化\*

吴和宇 戴光曦 贺智勇 漆玉金 李祖玉  
靳根明 罗清政 段利敏 文万信 张保国

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1994-02-03 收稿, 1995-01-23 收修改稿

## 摘 要

分析 $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ 、 $^{197}\text{Au}$ 、 $^{209}\text{Bi}$ (25 MeV/u) 中心碰撞产生的三体碎片产物的角关联, 配合  $\text{Ar} + \text{Au}$ (60 MeV/u) 三体出射的数据, 分析非完全熔合反应产生的高激发核衰变的演化过程, 证明了在 25 MeV/u 入射能时激发核产生的三重质量碎片是级联的两次出射的裂变形成的, 其时间差尺度大约为 1000 fm/c, 而对 60 MeV/u 入射能下的激发核观察到重碎片在  $120^\circ$  附近出现强的角关联, 这在理论上解释为发射时间差较短, 即出现了瞬发的多重碎裂。

**关键词** 级联裂变, 瞬发裂变发射, 多重碎裂, 发射时间差, 角关联函数。

## 1 引 言

低能重离子熔合反应生成的激发核, 主要通过蒸发轻粒子、裂变来退激。随着入射能升高, 非对称的反应系统在中心碰撞时发生非完全熔合反应, 并产生高激发的热核, 其出射道变得很复杂。对 44 MeV/u 的 Ar 入射的反应系统, 其非完全熔合过程完全消失<sup>[1]</sup>, 这并不意味着高激发态的类熔合核不存在, 而是在通常的蒸发、两体裂变的衰变中出现了新的机制: 多体碎片的出射。热核的性质和衰变机制成了当前人们研究的热点。

热核多体出射的机制是人们研究的焦点之一。多体出射过程可用级联衰变<sup>[2]</sup>或瞬发性的多重碎裂来解释<sup>[3,4,12]</sup>。不幸的是, 这两种极端理论在一定的可调参数近似下, 都能再现实验测得的出射粒子的多重性和出射粒子质量分布。这两种本质上不同的理论经过十多年的讨论, 并没有使人们清楚地认识到热核衰变的实质, 只知道低能级联、高能瞬发的可能更大些。本文引入一新的实验观测量——平均出射时间差, 来直观地讨论热核的多体衰变机制。

我们的工作主要侧重于低激发能和高激发能之间的能区, 研究三体出射。首先证明

\* 国家自然科学基金资助项目。

了在这一激发能区存在大质量三体出射,并初步研究了 $^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au}(47.5\text{MeV/u})$ 的三体出射的相对角度和速度<sup>[5]</sup>;研究了 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 的三体裂变相对于二体裂变的几率比的激发函数<sup>[6]</sup>;研究了有关形变势<sup>[7,8]</sup>,通过对品字型瞬发三分裂,拉长双脖子瞬发三分裂和级联裂变的分析,证明级联裂变过程在形变位势上占优势;三分裂的激发函数也成功地由无参数统计级联理论得到解释<sup>[9]</sup>;进一步的 $25\text{MeV/u Ar} + \text{Au, Bi, Tb}$ 实验用裂变的运动学关联方法也证明了级联出射的存在<sup>[10,11]</sup>。

$25\text{MeV/u Ar}$  轰击 $^{197}\text{Au}$ 、 $^{159}\text{Tb}$ 、 $^{209}\text{Bi}$ 形成的热核所出射的三体事件,已经对其运动学再构和关联测量结果作过总结<sup>[10]</sup>。这里主要讨论其相对夹角的角关联函数,强调三体事件来源于中心碰撞生成的热核,而所有探测到的符合碎片都来自于平衡的热力学系统;强调随机关联的本底分布的影响;基于终态库仑作用的思想,讨论多体出射发射时间尺度与角关联函数的关系<sup>[12]</sup>;最后用 $25\text{MeV/u}$ 和 $60\text{MeV/u Ar} + \text{Au}$ 反应<sup>[13]</sup>的角关联函数的实验数据与理论计算结果比较,给出了在 $25\text{MeV/u}$ 入射能条件下,三体出射来源于二次级联的出射。随入射能升高,热核的激发能也升高,角关联函数显示的发射时间差减小,到 $60\text{MeV/u}$ 入射能时,已可以认为是瞬发出射了。

## 2 选择出射的碎片来自于中心碰撞热平衡的非完全熔合(ICF)核

中能核反应实验中,出射道众多,研究热核的衰变机制需要避免不同反应机制产物的混合,避免来自于不同发射源的产物的混合。故首先要确定入射道的碰撞参数,决定其反应机制,其次要能够分离出平衡前和平衡后的出射产物。

为研究大质量的三体出射从蒸发到瞬发多重碎裂的过渡行为,使用了 $\text{Ar}(25\text{MeV/u})$ 束轰击 $\text{Au, Bi, Tb}$ 靶。实验是在HIRFL的大型通用散射靶室上完成的,共使用了八块大面积位置灵敏雪崩室(PPAC),其中在类熔合核质心系与束流方向成 $90^\circ$ 附近的平面上对称均匀地放置6块PPAC,用来测量二组对称三体裂变或三组二体裂变事件。在一侧后角连续地放置二块PPAC,使实验室系的测量范围从 $45^\circ$ 增加到 $150^\circ$ 。这种探测器布局避免了由于周边碰撞类弹出射后继跟随裂变而产生的三体事件的影响。PPAC本身有极好的位置分辨(4mm)和时间分辨(0.3ns),它的粒子探测阈为 $A=20$ 。

选择PPAC的三重性事件加以分析,其测量和运动学的分析见文献[10]。在实验中,测得的三体出射的质量对称性由Daliz散点来表示,即三体事件由正三角形中的一个点来表示,它到三边的距离正比于三块碎片的质量大小,图1(c)给出了实验的Daliz散点。由图可见实验的三体出射基本上对称分布,且在中心成峰。由理论事件产生器Eugene按不同碰撞参数产生的热核三体出射的Daliz散点,其中心碰撞的分布(图1(a))明显区别于周边碰撞的分布(图1(b))。周边碰撞的三体事件是由一个较轻的类弹粒子和两个裂变碎片组成,其类弹粒子质量在40附近,主要向前角发射,当测量角大于 $30^\circ$ 时,可以很好地将这种类弹跟随裂变和中心碰撞形成的近似对称三分裂分开。

为了检验出射的三体碎片是否来自于一个热平衡系统的发射,我们首先建立碎片的质心系,再在该质心系下确定各向同性度:

$$R = \frac{2}{\pi} \frac{\sum A_i |v_{i\perp}|}{\sum A_i |v_{i\parallel}|}, \quad (1)$$

其中  $A_i$  为碎片质量,  $v_{i\perp}$  和  $v_{i\parallel}$  表示碎片在该质心系垂直于和沿着束流方向的速度分量.

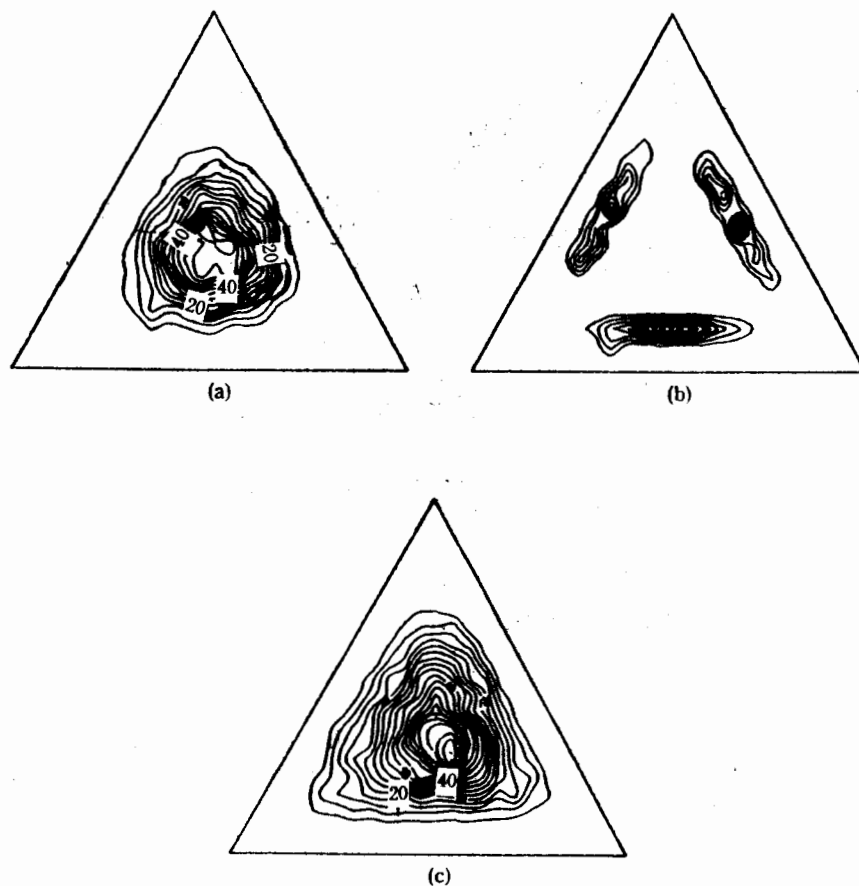


图1 实验 Daliz 散点图 (c) 与 Eugene 理论计算的中心碰撞 ( $b = 2\text{fm}$ ) 图 (a) 和周边碰撞 ( $b = 8\text{fm}$ ) 图 (b) 反应三体出射的 Daliz 图比较, 对应  $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$  反应系统

$R$  的分布如图 2, 用 Eugene 进行理论计算, 把中心碰撞事件(虚线)和周边碰撞事件分布(实线)与实验分布(直方)进行比较. 中心碰撞的分布峰值接近于 1, 说明碎片出射前核的动量分布趋于平衡; 周边碰撞分布的最可几值小于 1, 其长尾可解释为横向集体流对横向动量的贡献. 由于大量前角出射粒子特别是轻粒子未被探测到, 故测得粒子质心速度小于实际粒子质心速度, 使实验给出的分布大于 1, 并有很长的尾部. 可以肯定这主要来自于热核平衡后的发射.

为了描述热核热化程度, 我们在后角度 ( $\theta = 165^\circ$ ) 用  $\Delta E + E$  金硅面垒望远镜探测器记录与二体裂变关联的  $\alpha$  粒子能谱. 分析给出系统线性动量转移 (LMT) 在 0.2—1.0 区间时各激发核的核温度对应于 3.0—5.4 MeV, 其中最可几中心碰撞线性动量

转移为 0.85, 此时对应于核温度  $4.4 \pm 0.5$  MeV.

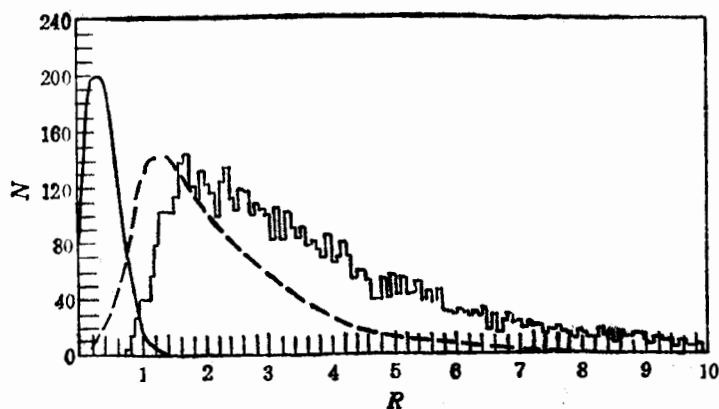


图2 三体裂变各向同性度分布

直方为三体出射实验值, 线为 Eugene 计算在周边(实线)和中心(虚线)碰撞下全粒子出射各向同性度.

### 3 级联裂变发射的角关联函数

我们已经用相对库仑速度最小化法成功地分析了来源于级联出射的三体出射的裂变过程<sup>[11]</sup>, 但对于发射的时间尺度却一无所知. 用角关联技术来分析发射时间差, 不仅要进

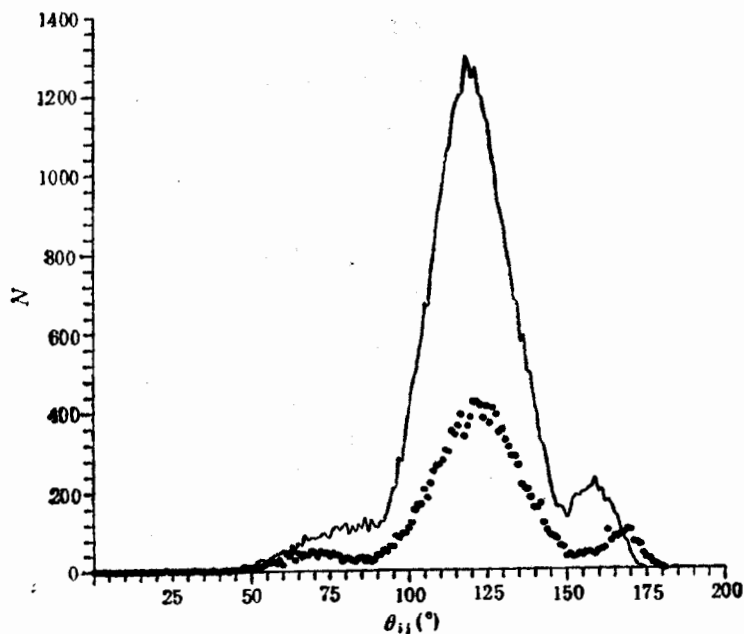


图3  $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}(25\text{MeV/u})$  三体裂变三体相对角度分布  
点为实验分布, 线为级联模拟的结果.

行关联函数的再构,而且需要理论模拟出对应不同发射时间差时的关联函数。

在出射三体确定的质心系中再构出三个相对角度,这些角度构成了三体出射的角关联谱,该谱以  $120^\circ$  为最可几。瞬发三裂和级联三裂都大约以  $120^\circ$  成峰,且实验的探测器布局更增加了这一角度成峰的趋势。为了再构出与探测效率无关、与随机关联本底无关的角关联相关函数谱,我们定义碎片  $i, j$  间的关联函数

$$R(\theta_{ij}) = \frac{Y_p(\theta_{ij}) - Y_u(\theta_{ij})}{Y_p(\theta_{ij}) + Y_u(\theta_{ij})}, \quad (2)$$

$Y_p(\theta_{ij})$ 、 $Y_u(\theta_{ij})$  分别为相对角度为  $\theta_{ij}$  时探测到的总关联产额和无关关联产额即随机关联产额。

无关关联是假定毫无关系的两次级联裂变。第一次裂变是在质心系中随机选取裂变方向,并以碎片  $F_1$ 、 $F_2$  出射,其中  $F_1$  碎片可以再裂,在  $F_1$  的质心系中随机选取裂变方向,分裂出  $F_3$ 、 $F_4$  碎片。使用实验获得的质量分布来确定  $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  的大小,用它确定其在各自质心系中速度和反冲速度大小,假定在断点处裂变的动能为 0,裂变碎片在各自裂变核的质心系中以库仑速度  $v_{FP} = 2.3\text{cm/ns}$  为相对速度分开,经实验探测器布局过滤后,Ar + Au 三体相对角分布如图 3 中的实线所示。由于布居使相对角分布以  $120^\circ$  为中心,分布并不宽;点谱为实验测得的角分布谱。可以看出这两个谱不仅形状相似,而且峰位和半高宽也一致,这预示着 25 MeV/u 时 Ar + Au 的三体出射为级联裂变结果。

图 4 给出 Ar + Au、Bi、Tb 的关联函数谱。由于在  $\theta_{ij}$  小于  $60^\circ$  及大于  $150^\circ$  时统计误差较大,故只给出了  $\theta$  从  $60^\circ$ — $150^\circ$  的关联值。此时该值近似为 0,意味着角度的相关性很小,故可近似地认为三裂是象无关关联一样发射的,只有小的 U 形分布。

#### 4 从级联到瞬发发射的过渡

多体碎片的级联发射,意味着每次分离之间的时间差足够长,跟随发射是发生在已出射碎片的强库仑场之外。瞬发过程之绝对同时出射是不可能的,一般认为只要其发射时间差小于  $200\text{fm}/c$ ,出射的碎片能强烈互相影响,就可认为是瞬发。

利用终态库仑作用的思想,引入特征发射时间的概念,对出射碎片进行了弹道运动学的分析<sup>[12]</sup>。假定裂变碎片三体已经形成,并用三球表示三体,则初期三球至少有两个相切

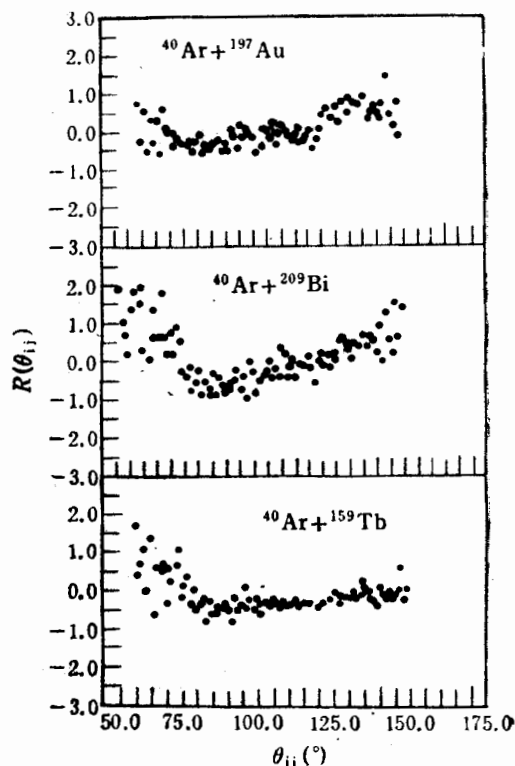


图 4 Ar + Au/Bi/Tb 三反应系统三体裂变的角关联函数

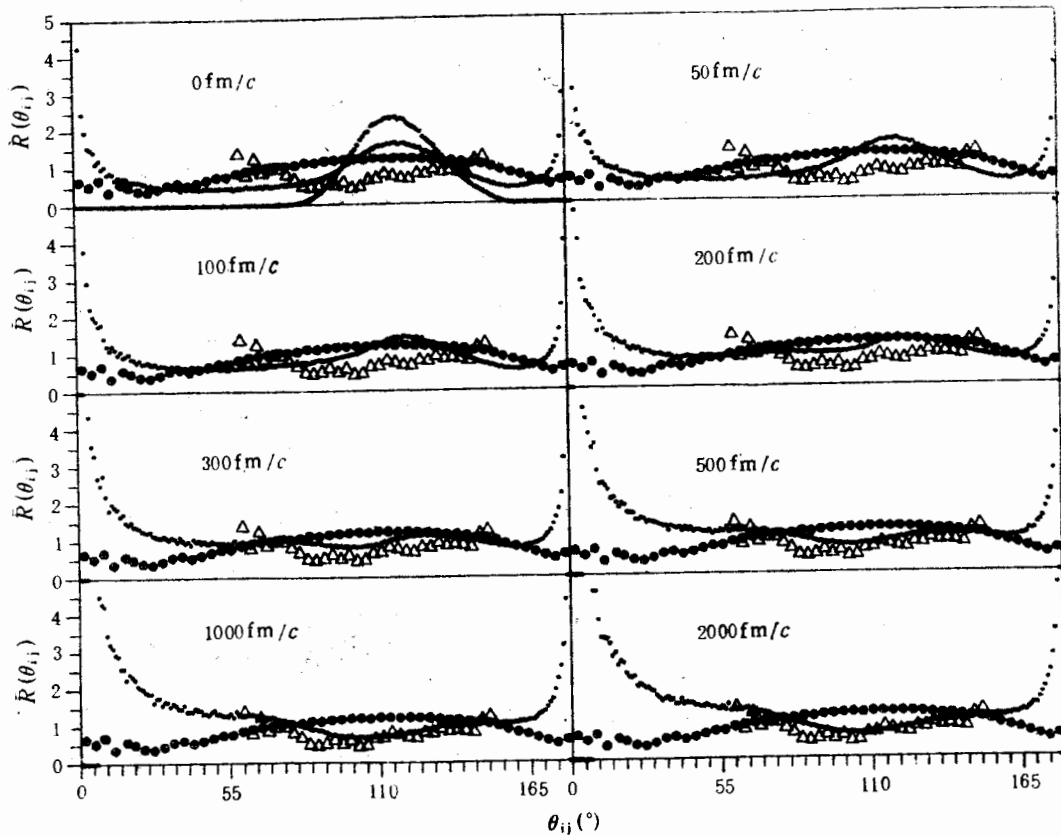


图5 不同发射时间差 Ar + Au 三体裂变关联函数分布(小圆点)与实验结果比较,大圆点为 60 MeV/u 实验数据,三角为 25 MeV/u 实验数据

点,而初态三体的质量分布满足实验测得的三分裂质量分布。位置和出射方式用 Monte Carlo 方法选取,首先一碎片出射经一特征时间后,剩余两体分离。出射道的微分弹道方程,则考虑了三体库仑作用下的平动和转动。

如图5中,发射模式的演化用不同的发射时间差 0—2000 fm/c 来描述,长的发射时间差意味着级联裂变,短的发射时间差意味着瞬发的多重碎裂,故可用它来分析由级联裂变角关联到瞬发多重碎裂角关联的过渡。图中的三角表示 25 MeV/u Ar + Au 的实验三体出射角关联函数,显然在 1000(±200)fm/c 的发射时间差时两者之间符合较好,这说明此激发核的三体出射是级联出射。

角关联的实质是研究三体间的相互作用对出射方向的微小改变,出射时间差越小即三体越近,这种方向改变越大。在上面的计算中,角关联主要决定于各碎片形成时的相对位置和碎片在分离过程的受力。前者由自由参数发射时间差决定,后者由与碎片大小相关的库仑力和弹道运动微分方程确定。激发能和核温度只决定在三体质量对称分布条件下的裂变几率,与角关联关系很小甚至无关。只要原始核的大小、发射粒子的时间差、出射粒子的对称性确定,这种角关联就唯一确定。故我们可以把 60 MeV/u<sup>40</sup>Ar + <sup>197</sup>Au 实验结果<sup>[13]</sup>与理论计算结果比较,如图5中的圆点所示,可见实验结果与较短的发射时间差

100( $\pm 50$ ) fm/c 符合很好,这与 Bondorf 程序的分析结果一致 (50fm/c), 两者的差异可能来自于两个能量点的三体质量分布差别。

纵观发射时间差从 50—1000 fm/c 的关联函数演化,可以看出关联函数的形状强烈地依赖于发射时间差,从 50 fm/c 时  $120^\circ$  附近成峰的凸形分布过渡到 1000 fm/c 时的凹形分布。从 100 fm/c 到 300 fm/c, 发射时间差处于两种形状关联函数的过渡区,其间的关联函数近似为 0。级联发射的角关联函数的 U 形分布类似于二体裂变的角分布的  $1/\sin\theta$  的形状,这可以解释为第一次裂变后,两裂片具有一定的角动量,这种转动对第二次裂变的取向有一定影响,使沿着第一次裂变轴成  $1/\sin\theta$  分布,这造成了相对角度关联函数的凹形分布。

核激发能较高时,一次衰变不可能带走全部的激发能,级联衰变自然就会发生。对于低温热核,常采用统计模型处理级联裂变<sup>[9]</sup>,若考虑裂片的轻粒子蒸发和再裂变的竞争,分析初级裂变碎片再分裂的几率和初级裂片的质量关系,则可发现:裂片的质量增加时,级联裂变的几率迅速增加。对低激发能这种增加更加迅速,它跨越了十多个数量级,此时的级联裂变主要是大质量碎片的贡献,小质量碎片则几乎不分裂。随着入射能增加,级联裂变的几率增加了,虽然仍主要是大质量碎片的贡献,但可能发生级联裂变的碎片质量范围变得很宽。用级联三分裂不仅可以预言三分裂几率随激发能升高而升高,还可以预言出它会随复合核可裂性的增加而增加。该结果与实验测得的三二比几率符合得很好。从能量上看,在第一次裂变断点处裂变碎片的形状为梨形,形变能储藏了一部分激发能,而初始形变能引起多极振荡,这种振动使级联第二次位垒降低,并使裂片在跨越蒸发时间弛豫后到达鞍点。这一部分能量很难被蒸发粒子带走,这对级联过程是有利的。

实验已经证明,热核的衰变出现了大量中等质量碎片 (IMF)( $5 > A > A_F$ ),如果把 IMF 中较大碎片的发射看作是一非对称裂变过程,则发射体的子核激发能是比较高的,它可以再次裂变形成三体出射。而对称三裂指三体质量大致相同,如果是级联过程,显然第一次为非对称裂变。

三种可能三分裂模式,瞬发品字型三分裂、拉长式三分裂、级联三分裂在文献[8]中进行过比较,同时采用了球面近似计算裂变位垒,并考虑了形变核系统的表面能、库仑能、壳能和子系统核之间的核能作用。结果给出:品字型三分裂跨越的位垒显著地高于拉长式三分裂和级联过程的裂变位垒。考虑到热的复合核会引起体积热膨胀、表面张力系数的变化、表面厚度的弥散,我们计算了不同核温度下的裂变位垒和裂变宽度。品字型三分裂与拉长模式三分裂和级联三分裂相比,存在一个较高的分裂位垒,使这种模式的分裂几率很小。虽然核温度增加时它与其它两种模式一样位垒降低,但并未见到它下降更快,故在 4MeV 的核温度以下,不太可能出现瞬发品字型三裂出射,而在很高的激发能时,才开放这一衰变道。拉长模式三分裂的质量移动太大,其衰变道被禁止。

在低能我们肯定多体出射是一级联过程,但随热核温度升高两次分裂的时间差减小,当时间差小于分裂过程所需时间时,多级形变过程将成为主要的衰变道,并进一步演化为瞬时的多体出射过程。

## 5 结 论

高激发核在单核子激发能小于或等于 3 MeV 条件下的对称质量三体裂变, 其裂变碎片出自于发射时间差大于或等于 1000 fm/c 的级联出射的裂变, 对称三体裂变与二体裂变间存在竞争, 随着入射能的进一步升高, 激发核的温度也升高, 两次破裂的时间间隔越来越小, 多次破裂的几率增加, 直到发射时间差小到与瞬发可以比较, 并最后过渡到瞬发的多重碎裂过程。对更高的核激发态, 蒸发粒子的时间尺度与能量的弛豫时间变得可以比较, 这时单独处理动力学过程和热平衡的统计衰变过程已不再正确, 这两步相互影响, 使统计多重碎裂模型不再有效, 此时动力学碎裂可能优于蒸发和裂变。由于碎片的动能是由碎裂多体的库仑能和核物质的膨胀能贡献的, 故与本文相关的角关联技术不再有效。

## 参 考 文 献

- [1] E. C. Pollacco et al., *Phys. Lett.*, **146b**(1984)29.
- [2] R. J. Charity et al., *Nucl. Phys.*, **A476**(1988)516.
- [3] 萨本豪, D. H. E. Gross, *Nucl. Phys.*, **A437**(1985)643.
- [4] J. P. Bondorf et al., *Nucl. Phys.*, **A443**(1985)321.
- [5] Dai Guangxi et al., *Chin. J. of Nucl. Phys.*, **15**(1993)101.
- [6] 吴和宇、戴光曦等, 高能物理与核物理, **15**(1993)680.
- [7] 戴光曦, 高能物理与核物理, **16**(1992)685.
- [8] 吴和宇、戴光曦, 物理学报, **43**(1994)540.
- [9] 吴和宇、戴光曦, 高能物理与核物理, **18**(1994)729.
- [10] 戴光曦、吴和宇等, 高能物理与核物理, **18** 增刊(1994)22.
- [11] 吴和宇、戴光曦等, 高能物理与核物理, **18** 增刊(1994)5.
- [12] 吴和宇、戴光曦等, 级联出射角关联函数——一种核时钟方法, 核技术, 待发表.
- [13] M. Lourtel et al., preprint LPC Cean 93-05.



## Evolution from Cascade Fission to Prompt Multifragmentation with Increasing Excitation Energy

Wu Heyu    Dai Guangxi    He Zhiyong    Qi Yujin

Li Zuyu    Jin Genming    Luo Qingzheng

Duan Limin    Wen Wanxin    Zhang Baoguo

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Received 3 February 1994, Revised 23 January 1995

### Abstract

The correlation functions of relative angle distributions of mass—symmetric ternary fissions in the reactions Ar+Au, Bi, Tb at 25MeV/u are presented. The evolution of decay mode of hot nucleus is studied by comparing the present data with Ar + Au (60MeV/u) experimental results. It is shown that the time scale for fragment emission is reduced from the characteristic time  $\tau = 1000\text{fm}/c$  at 25MeV/u for standard sequential decay to prompt emission one at 60 MeV/u with  $\tau = 50\text{fm}/c$ .

**Key words** cascade fission, prompt fission emission, multifragmentation, time interval of emission, correlation function of relative angle.