

^{40}Ar (25MeV/u) + ^{159}Tb 、 ^{197}Au 、 ^{209}Bi 的 三重关联裂片的测量*

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

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1994 年 2 月 3 日收到

摘 要

报道了中心碰撞中形成的激发能约为 3MeV/u 的热核衰变。对热核衰变发射的三重大质量碎片进行符合测量,给出了这种衰变方式的质量分布、相对角分布、相对速度分布。用 Monte-Carlo 分析三裂变和二体裂变的几何效率,给出了这种三重裂变事件相对于二体裂变的几率比。

关键词 热核,三分裂,级联裂变。

1 引 言

三体裂变本是一个很古老的课题,裂变过程中的 α 粒子发射^[1],后来被解释为断点附近 α 粒子发射或蒸发,1969 年原苏联和原西德的科学家合作,用 ^{40}Ar (6—9.5MeV/u)束流轰击 ^{197}Au 、 ^{209}Bi 、 ^{232}Th 、 ^{238}U ,由云母记录反应中产生质量大于 40 的三体事件,并用加热退火使其测量阈超过类弹质量($A = 40$)。结果表明,质量大体对称的三体裂变相对于二体裂变的几率比随激发能升高而升高,随 Z^2/A 的增加而增加,最大时可达 3.0%^[2]。后来的对称三分裂实验沿着两个方向发展:一是提高入射束的质量^[3,4],结果产生了大量三体事件和四体事件,但大多是来源于没有形成类复合核的跟随裂变事件。二是提高入射束流能量,高能重离子碰撞中不仅产生了大量大质量的三体事件,而且出现了瞬发多体事件,从而发展了多重碎裂的概念,它被解释为动力学碎裂或核物质的相变。而热核的多极形变和多体出射机制并没有多大进展,兰州重离子加速器(HIRFL)的建成正好提供了进行这方面研究的机会。

三体裂变的理论研究主要集中在热核的级联裂变、品字型裂变、拉长双脖子型裂变的形变研究上^[5,6]。1990 年我们用位置灵敏平行板雪崩计数器(PPAC)探测了 46.7MeV/u $^{12}\text{C}+^{197}\text{Au}$ 实验发射的碎片,测量的初步结果不仅显示确实存在对称三分裂,而且两两之

* 国家自然科学基金资助。

间相对角度约为 120° 、平均相对速度约为 $3.5\text{cm/ns}^{[7]}$ 。还利用云母对 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 反应的裂变碎片进行了测量,并给出了三分裂相对于二分裂的激发函数^[8,9],用统计级联模型成功地解释了这一激发函数曲线。

为进一步确定热核的三体出射机制,我们选用 $25\text{MeV/u Ar} + \text{Au, Bi, Tb}$ 三个系统,用 8 块 PPAC 探测器对质量大于 20 的碎片进行三重性符合测量。探测器分布在 $45^\circ - 150^\circ$,因而去掉了由深度非弹 (DIC) 等周边碰撞的类弹出射后的跟随裂变三重性事件的影响。分别对三个系统进行了相关事件的运动学分析并进行了讨论。

2 实验概况

实验于 1993 年 5 月在兰州 HIRFL 加速器的大型通用散射靶室终端上完成。用单核子入射能 25MeV/u 的 ^{40}Ar 轰击 ^{159}Tb 靶(靶厚度 $267.3\mu\text{g}/\text{cm}^2$)、 ^{197}Au 靶(厚度分别为 $374.3\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $1000\mu\text{g}/\text{cm}^2$)、 ^{209}Bi 靶(厚度为 $487\mu\text{g}/\text{cm}^2$)。束流强度为 $0.2 - 5\text{nA}$ 。裂变碎片由 8 块大面积($20\text{cm} \times 25\text{cm}$)位置灵敏雪崩室 (PPAC) 记录。这种探测器具有优越的位置分辨能力 (x, y 分辨均为 4mm) 和优越的时间分辨性能 (0.3ns)。它对带电粒子的探测效率从 $A = 6$ 时的 0 逐渐上升到 $A = 20$ 的 1.0, 裂变碎片的探测效率为 1.0, 工作气体为正庚烷。将位置信号由电极感应的双极性信号中负极性取出改为正极性取出,使得位置 (x, y) 的分辨有很大程度的改善,峰谷比分别达 $100:1$ 和 $2:1$ 。8 块 PPAC 分

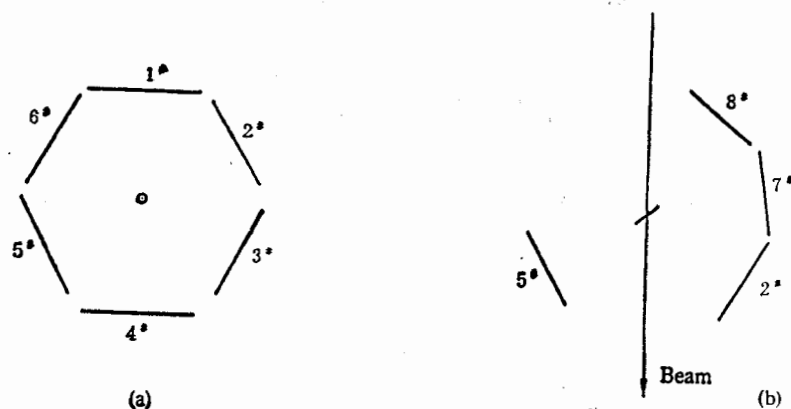


图 1 实验装置示意图

为两组:在 $\text{Ar} + \text{Au}$ 反应系统的质心系,垂直束流方向的平面内对称均匀地放置 6 块如图 1(a),它们可以测量三组二体裂变和两组对称三体裂变的碎片。 $7^\#$ 、 $8^\#$ PPAC 连续地放置在 $2^\#$ PPAC 的后角,它与 90° 平面的 $2^\#$ 、 $5^\#$ PPAC 构成一个反应平面,测量线性动量转移 (LMT) 从 1.0 到 0 的所有二体裂变,如图 1(b),同时还可以与出平面探测联合测量许多相对夹角不为 120° 的三体裂变事件,测量的范围从 $45^\circ - 150^\circ$ 。各探测器中心到靶之间距离均为 55cm 左右。还有 6 套 $\Delta E + E$ 半导体望远镜,对轻带电粒子进行探测。用 6 套 BGO 探测器测量 GDR 的 γ 射线。共计 89 个参数。用两重及两重以上的裂变碎片符合事件触发起动 GOOSY 数据获取系统进行数据获取,将数据以事件方式记

录在磁带上,本文主要讨论分析8块PPAC测得的三重裂片事件。

3 测量原理与假设

3.1 选择热核的三体裂变

中能重离子引起的周边和中心碰撞都会产生有三块大质量碎片出射的事件。对周边碰撞,类弹粒子向前出射,激发的类靶核可能发生二体裂变(跟随裂变)。中心碰撞形成类靶热核,该热核以一定的几率发射三个大质量碎片。实验中探测器布局使测量范围在实验室系的 $45^\circ-150^\circ$ 之间,可以有效地去掉周边碰撞引起的跟随裂变事件,因为这种跟随裂变事件的类弹在大于 $\theta_{1/4}$ 时(12° 左右)几率下降很快,在 θ 大于 30° 时这种跟随裂变就非常稀少。我们测的三体事件都是来自于中心碰撞热核的三体裂变。

3.2 三体运动学再构与假设

在二体裂变运动学中,人们为了提高数据分析精度,常使用相对飞行时间差代替绝对飞行时间。在本实验中,三体中的三个质量是未知量,而动量守恒只有三个方程(三分量),要确定三个碎片的速度,只靠相对时间差是不够的。由于实验中没能测量统一的时间起点,使数据分析过程不得不引入假设:假定热核形成满足Viola系统化线性动量转移值 ρ ,根据大质量转移假设,瞬时核的大小和速度满足:

$$A_{CN0} = \rho A_P + A_T, \quad (1)$$

$$v_{CN} = \rho v_P A_P / A_{CN0}, \quad (2)$$

A_{CN0} 并不能表示裂变核的质量。从瞬发核形成到裂变的过程中,大量的激发能以蒸发轻粒子的方式被带走,核的质量也不断减小。于是我们假定:(1)60%的激发能由蒸发粒子带走,每个核子平均带走14MeV的激发能。(2)蒸发轻粒子不影响裂变核的速度。估算出裂变核的质量 A_{CN} ,并利用质量守恒和动量守恒

$$\sum m_i = A_{CN},$$

$$\sum m_i v_{ij} = P_j (j \text{ 为 } x, y, z \text{ 三分量}). \quad (3)$$

其中 $A_{CN} = A_{CN0} - 0.6E^*/14$,这个关系可以用级联蒸发模型(GEMINI)近似给出。三个速度未知,但有两个相对时间差是已知的,自变量和方程数均为4,运动学唯一确定。设三个碎片中第*i*个的飞行距离 D_i ,飞行绝对时间 t_i ,裂变核的速度 v_{CN} ,出射方向为 θ_i , φ_i 。碎片1的绝对时间可得:

$$t_1 = \frac{D_1 D_2 D_3 C W_0 - v_{CN} D_1 D_2 (t_3 - t_1) C W_3 - v_{CN} D_1 D_3 (t_2 - t_1) C W_2}{v_{CN} D_1 D_2 C W_3 + v_{CN} D_2 D_3 C W_1 + v_{CN} D_1 D_3 C W_2}, \quad (4)$$

其中,

$$C W_1 = \cos \theta_2 \cos \varphi_2 \cos \theta_3 \sin \varphi_3 - \cos \theta_3 \cos \varphi_3 \cos \theta_2 \sin \varphi_2,$$

$$C W_2 = \cos \theta_1 \cos \varphi_1 \cos \theta_3 \sin \varphi_3 - \cos \theta_3 \cos \varphi_3 \cos \theta_1 \sin \varphi_1,$$

$$C W_3 = \cos \theta_1 \cos \varphi_1 \cos \theta_2 \sin \varphi_2 - \cos \theta_2 \cos \varphi_2 \cos \theta_1 \sin \theta_1,$$

$$C W_0 = C W_1 \sin \theta_1 + C W_2 \sin \theta_2 + C W_3 \sin \theta_3.$$

求出 t_1 后, v_i 和 m_i 就可以方便地求出。

3.3 探测效率的 Monte-Carlo 模拟

假设三个裂变碎片是来自于级联的裂变过程,两次裂变轴的方向随机地选取,裂变碎片的质量分布由实验分布给出。假定在断点裂片的相对动能为0,碎片最终的动能由库仑势给出,即裂变碎片相对速度为一常数 $v_{FF} = 2.3\text{cm/ns}$,称为库仑速度。模拟产生的大量三体事件由探测器过滤,进入探测器的三体事件数与总事件数的比为三体事件探测的几何效率 P_3 。

二体裂变的质量分布也由实验给出,假定这种裂变角分布满足 $1/\sin\theta$ 的关系,模拟出探测效率 P_2 ,实际的三体二体裂变比 P_{32} 与实验测得的三体裂变与二体裂变比 P'_{32} 的关系为:

$$P_{32} = P'_{32} P_2 / P_3. \quad (5)$$

4 测量结果与分析

实验测得 Ar + Tb、Au、Bi 的三分裂相对于二分裂的几率比分别为 0.0709%、

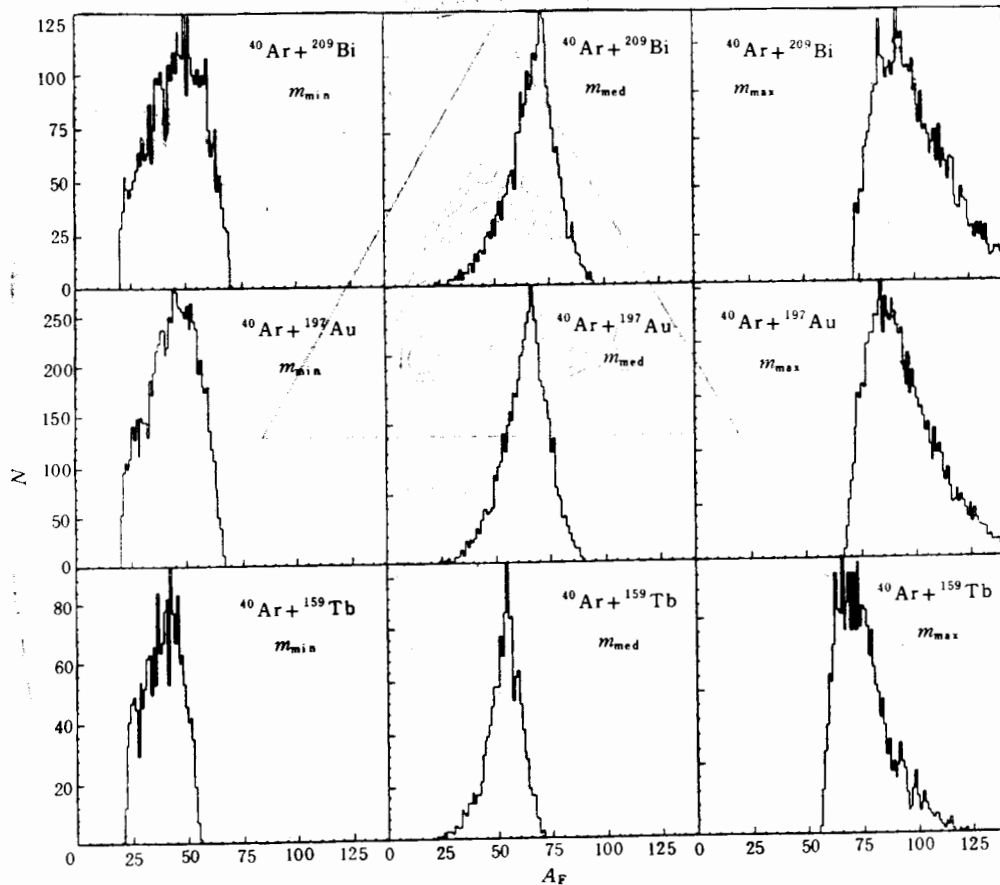


图2 三体裂变质量分布,按裂片质量相对大小排序

0.125%、0.273%，而三裂的探测效率分别为 1.06%、0.869%、0.769%，考虑几何效率因素后，全空间内实际的三体裂变与二体裂变的几率比分别为 0.65%、1.8%、4.4%。

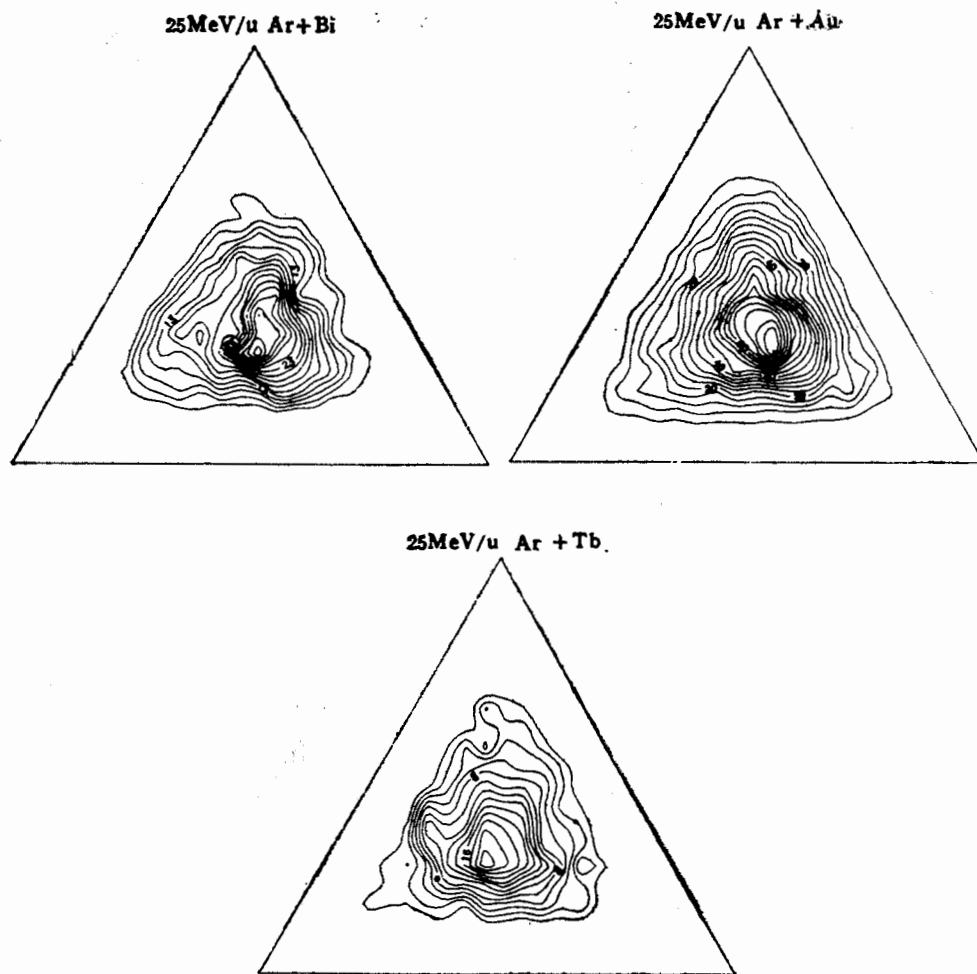


图3 实验测得 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}/^{197}\text{Au}/^{159}\text{Tb}$ 三反应系统，三分裂变质量分布 Dalitz 等高图

三体裂变的质量分布如图2，分析中为了直观考虑出射碎片大小，对相对质量大小进行了大、中、小分类。从图2可以看出三个反应系统的分布是相似的，峰位的差异来自于分裂核的大小。大质量峰位与小质量峰的峰位差也不是特别大，三分裂变是近似质量对称裂变。为了检验这种对称性，用 Dalitz 散点来描述。三体事件用在正三角形中的一个点来表示，点到三边的距离正比于这三体的质量，如图3三个反应系统都是在三角形的中心几率最大，具有对称分裂趋势。

图4给出了实验测得的任何两碎片之间的相对速度。从图中可以看出，相对速度分布都较宽，但都成峰于库仑速度，特别是对两个较重碎片之间是这样的。从图中还可以看出，中间质量碎片和重碎片的相对速度分布较窄，而与最小质量碎片有关的相对速度分布

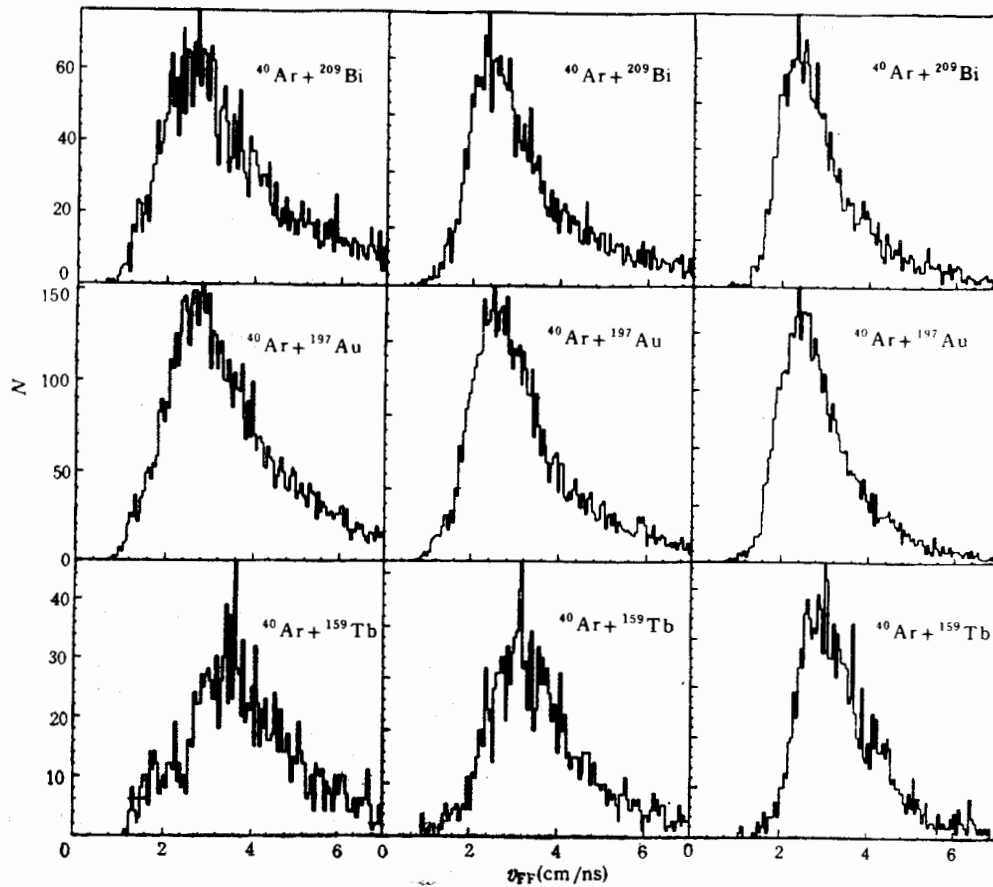


图4 三体裂变碎片的相对速度分布

左: 中质量碎片与小质量碎片相对速度, 中: 大质量碎片与小质量碎片相对速度, 右: 大质量碎片与中质量碎片相对速度.

都较宽。结合其相关角度分布,我们认为,中间质量碎片和重碎片很可能是一次两体裂变出射的,而最小质量的碎片则可能在早期出射。即从相对速度分布可以初步得出这样的结论:观测到的三裂事件是来自于两个相继的两体裂变过程。对于 $\text{Ar} + \text{Tb}$ 中相对速度分布的峰位偏离库仑裂变相对速度可能有两方面的原因:(1)两次两体裂变之间的时间缩短,使得三碎片之间的相对作用增加。(2)运动学假设带进了较大误差。

三体裂变中三碎片的相对方向(夹角)不仅直接提供了出射的方向信息,而且对分析三个碎片的出射机制也有一定的参考价值。图5给出了实验测得的三碎片之间相对夹角分布。谱中的结构是由于探测器布局所造成,总的印象是三碎片相互夹角分布在较宽的范围上,且都大致在 120° 成峰,其中大质量与中等质量之间夹角分布成峰位置大于 120° ($130^\circ - 140^\circ$),而最轻一块与中间质量一块的夹角分布偏向小角度一侧,成峰位置略小于 120° 。模拟计算表明,如果是瞬时裂开的三个碎片,其相互夹角分布较窄,而级联两体裂变出射的三个碎片,其相互夹角具有较宽分布,实验结果对级联二体裂变方式是有利的。

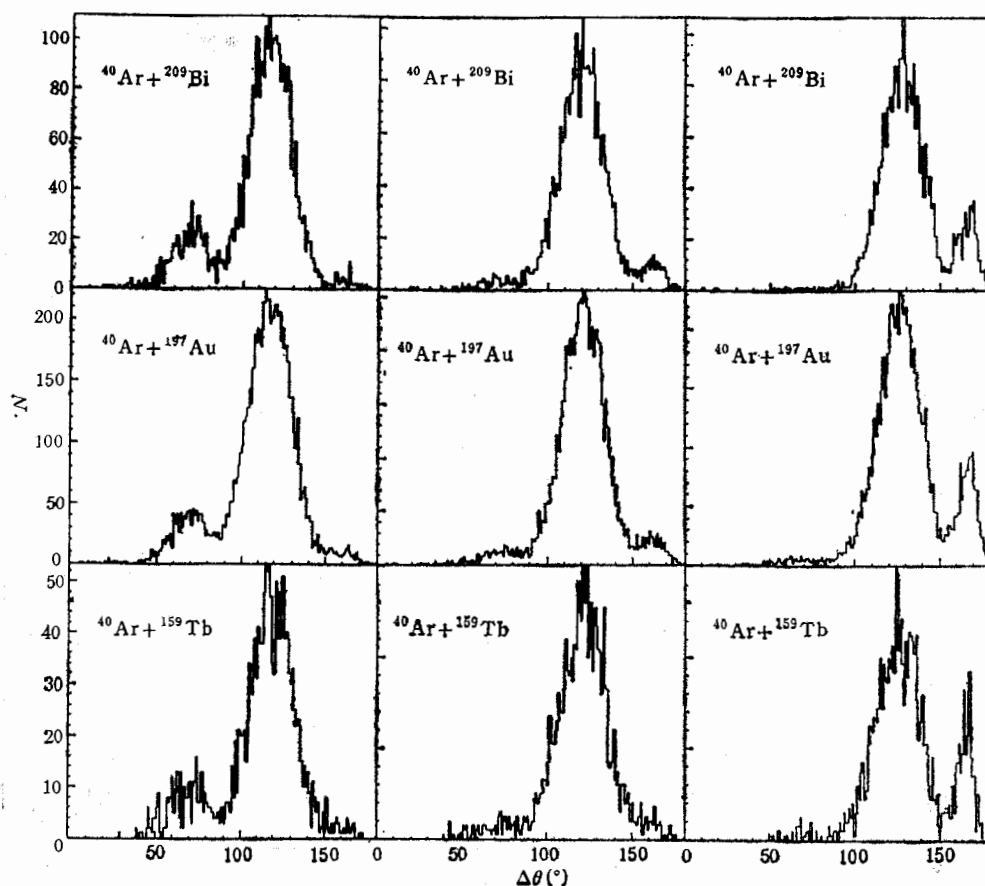


图5 三体裂变碎片的相对角度分布

左: 中质量碎片与小质量碎片相对夹角, 中: 大质量碎片与小质量碎片相对夹角, 右: 大质量碎片与中质量碎片相对夹角。

5 小 结

本文讨论了如何从实验中获得三体裂变的关联信息, 并给出了 $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 、 ^{209}Bi 、 ^{159}Tb 实验中三碎片出射裂变相对于二体裂变的几率比、质量对称性分布、相对角分布和相对速度分布。实验在 HIRFL 大型通用散射靶室终端上完成, 由 8 块 PPAC 组成的探测器系统对质量大于 20 的裂片进行测量, 并成功地去掉周边碰撞类弹出射后跟随裂变三体出射事件。分出了由中心碰撞产生的热核的三分裂事件。假设热核的大小由靶和类弹转入靶的核子数确定, 转入的比例满足 Viola 线性动量转移关系, 由实验数据推导出了三裂事件中, 三碎片间的相对速度和相对夹角分布。在实验数据的精度范围内, 相关信息给出三体出射可能主要来源于相继的二体裂变过程, 这对研究相继裂变怎样克服从形变到离开过程中粒子蒸发的竞争, 以及第一次裂变后剩余激发能允许发生第二次裂变提供了可能性, 对研究从低能时的一般粒子蒸发到高能瞬发多重碎裂在该能区的过渡行为具有十分重要的意义。

作者感谢国家实验室(HIRFL)的全体工作人员提供了良好的束流,感谢近物所数据获取室、NIM、CAMAC库工作人员的配合,感谢条件室气体探测器组、半导体探测器组、制靶组的良好服务。

参 考 文 献

- [1] 钱三强,重原子核三分裂与四分裂的发现,科学技术文献出版社(1989).
- [2] R. L. Fleischer et al., *Nucl. Phys.*, **A127**(1969) 577.
- [3] P. A. Gettschalk et al., *Phys. Rev. Lett.*, **42**(1978) 359.
- [4] P. Vater et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **147**(1977)271.
- [5] 戴光曦,高能物理与核物理,**16**(1992)651.
- [6] 吴和宇、戴光曦,物理学报,**43**(1994)540.
- [7] Dai Guangxi et al., *Chin. Journ. Nucl. Phys.*, **15**(1993) 101.
- [8] 吴和宇、戴光曦等,高能物理与核物理,**17**(1993)680.
- [9] 吴和宇、戴光曦,高能物理与核物理,**18**(1994)729.

Ternary Fission Fragments Correlation Measurement in Reactions of $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}, ^{197}\text{Au}, ^{209}\text{Bi}$ at 25MeV/u

Dai Guangxi Wu Heyu Jin Genming Qi Yujin Li Zuyu Duan Limin
He Zhiyong Luo Qingzheng Wen Wanxin Zhang Baoguo
Dang Bingrong Cai Wei

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

Received on February 3, 1994

Abstract

Three fragments emitted from the decay of hot nuclei formed in central collision of 25MeV/u ^{40}Ar with ^{159}Tb , ^{197}Au , ^{209}Bi were measured coincidentally. In these cases, the corresponding excitation energy of hot nuclei is about 3MeV/u. The distributions of the mass, the relative angle and relative velocities are obtained by correlation measurement. The probability ratio of ternary fission relative to binary fission in detector space has been modified to 4π geometry in terms of Monte-Carlo method.

Key words hot nuclei, ternary fission, cascade fission.