

## $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 中能对称三分裂实验研究

吴和宇 戴光曦 蔡薇 漆玉金 阎德宏  
张保国 党秉荣 罗清政 钱兴 文万信

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

### 摘 要

在云母上蒸镀靶物质, 做成叠层靶进行辐照, 用云母的  $2\pi$  几何空间探测对称三分裂, 给出了  $4\pi$  几何空间的三分裂相对二分裂的几率比, 测量  $^{12}\text{C}(25-47.5\text{MeV}/A) + ^{209}\text{Bi}$  反应形成的热核的对称三分裂相对于对称二分裂的激发函数, 并与级联裂变的理论分析结果相比较.

### 一、引 言

对称三分裂是指出射三个碎片的裂变过程, 热中子<sup>[1,2]</sup>,  $\alpha$  粒子<sup>[3]</sup>, 高能质子<sup>[4,5]</sup> 和重粒子<sup>[6,7]</sup> 轰击可裂变核都可能诱发分裂为三块质量可比较的三裂片的裂变过程, 本文主要讨论重粒子诱发质量对称三分裂.

Perelygin 等<sup>[6]</sup> 研究了 Ar 与 Bi 和 U 反应测得三裂变相对于二裂变的几率为 1%—3%, Fleischer 等<sup>[7]</sup> 用  $^{40}\text{Ar}(414\text{MeV})$ , 直接轰击 Thorte 晶体 ( $\text{ThSiO}_4$ ), 测得 Th+Ar 的三分裂二分裂比为 3.3%. 这些测量中, 入射粒子的深度非弹反应产生跟随裂变和类弹的第三径迹可能会被误认为是三分裂, 而采用热处理过程也只能部分地解决这一问题, 因此在三分裂二分裂比非常小的三裂测量过程中上述因素的影响是不可忽视的. 文献<sup>[6,7]</sup> 研究的反应都是在低能区, 它们的结果揭示了三裂几率随入射能增加而增加也随  $Z^2/A$  的增加而增加的趋势.

近年来的类似实验研究主要是用提高入射能和入射粒子质量的方法来研究跟随裂变反应, 得到了类弹径迹基本为擦边角出射的证据, 并根据三叉和多叉的几率随入射能的增加而非常快增加的事实, 发展了多重碎裂的概念, 解释为动力学碎裂过程, 但热的复合核的多体裂变过程研究实质上没有什么进展.

对称三分裂在理论上有许多解释方法: 裂变达到断点后, 快速形成第二个脖子, 进行第二次断裂<sup>[8]</sup>; 裂变达到断点后, 核子的动力学交换中突然形成两个脖子的过程<sup>[9]</sup>; 从鞍点到断点的过程中动力学势使核子聚集并完成集团发射<sup>[10]</sup>; Diehl<sup>[11]</sup> 讨论了三点一线型

裂变和品字型裂变跨越位垒动力学过程,认为三点一线型三分裂在位垒上占优势,它很难解释三裂片互为  $120^\circ$  (质心系);为了解释角度关系,戴光曦<sup>[12]</sup>用三叶回旋体模型,考虑到核温度与表面的张力关系,发现品字型三分裂过程是可能的。

本工作选用了  $Z^2/A=35.8$  的  $^{12}\text{C}+^{209}\text{Bi}$  系统,避免了入射粒子产生背景点本底,测量了三裂二裂相对激发函数,用具有  $2\pi$  几何空间探测效率的固体径迹探测器云母来记录,并用 Monte Carlo<sup>[13]</sup> 计算了三分裂与二分裂在  $4\pi$  空间的几率。

## 二、实验方法

在用 Ar 作为入射粒子的三分裂研究中<sup>[6,7]</sup>,热处理虽然能处理掉 Ar 和比 Ar 质量小的粒子的径迹,但由于深度非弹出射粒子的质量存在一个很宽的分布,类弹与靶核的部分跟随裂变会误认为三分裂事件.为了排除它的影响,实验选用了  $^{12}\text{C}$  作为入射粒子轰击  $^{209}\text{Bi}$  靶,避免了形成很重复合核,其裂变位垒为 0 的情形.我们的目的是研究热核是否存在三分裂,及它的激发函数。

使用新疆生产的白云母,在酒精中解理成为薄层,在新的洁净的解理面上蒸镀厚度为  $200\mu\text{g}/\text{cm}^2$  的 Bi 靶.实验装置如图 1,辐照在辐照站进行,不影响前方 PPAC 等探测器的工作.采用加降能片的方法把束流能量降到表 1 所示的几个能量值,其中  $d_i$  为云母厚度,  $d_i^*$  为相应的 Al 的厚度,使用金属 Al 作降能片是因为它与入射粒子的反应产物在云母上不产生径迹,更不可能出现类似裂片的径迹。

表 1 各能量的安排

$E/A(\text{MeV}/u)$	降至该能加 Al( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	加云母	总能分散(MeV)
47.5		$d_1$	0
45	$87-d_1^*$	$d_2$	1.167
40	$162-d_2^*$	$d_3$	1.974
35	$146-d_3^*$	$d_4$	2.487
30	$130-d_4^*$	$d_5$	2.867
25	$113-d_5^*$	$d_6$	3.161
20	$96-d_6^*$	$d_7$	3.391

$$d_1^* = 1.22125d_1$$

入射束垂直于靶和另一侧的探测器,由于  $^{12}\text{C}$  和  $^{12}\text{C}$  与  $^{27}\text{Al}$  的反应产物不在云母中产生径迹,束流可高达  $10^{11}$  个粒子/ $\text{cm}^2$ ,辐照后,用浓硝酸(65%—68%)溶去云母上的靶物质 Bi,然后用 40% 的 HF 在室温条件下( $18^\circ\text{C}$ )刻蚀 70min.云母能记录的质量阈为 40,质量数大于 40 的反应产物(主要是裂片)均可能被刻成径迹。

刻蚀后,将云母放在 500 倍的光学显微镜下观察,可以看到以下内容:

1)由入射粒子与 Al 作用产物(类似熔合),入射粒子与云母成分的作用产物的点背景,降能越多,背景点的本底也就较多.它的特点是具有菱形入口。

2)单径迹(单个事件),由于二裂、三裂只有一个径迹在实验室系中朝前出射,这种单

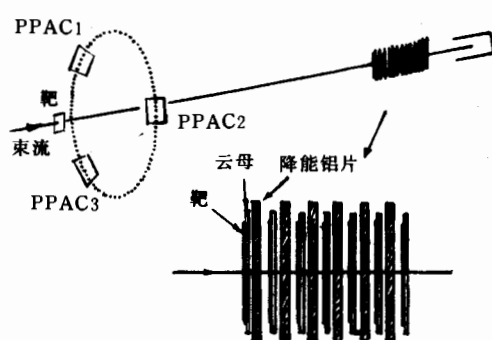


图1 实验装置示意图

径迹是明显不同于点背景, 横向径迹长度为背景点的两倍以上.

3) 相关二径迹(对事件)产生于二裂或三裂只有两裂片在实验室系中朝前出射, 它又分为三类事件, 一是中心碰撞(CF, ICF)产生的高温复合核的对称二分裂, 二径迹纵向呈  $180^\circ$ ; 二是周边碰撞(DIC)产生的二跟裂裂片, 纵向两裂片夹角为  $165^\circ-180^\circ$ ; 三是三裂二径迹, 两裂片的夹角较小, 为  $90^\circ-165^\circ$ .

4) 三叉事件, 所有三分裂的三裂片在实验室系中朝前, 图 2.

5) 稀有的四叉事件, 所有四分裂的四裂片在实验室系中朝前(图 3).

由于靶物质具有一定的厚度, 在靶物质的表面和在靶物质靠近云母的内层产生的相关事件也有不同的形式, 后者各径迹分支相交于同一个菱形的入口, 前者在复合核分裂后裂片在靶物质中运动一定距离, 溶去靶物质后各径迹入口有一定距离( $0-2\mu\text{m}$ ), 但它们的延长线相交于一点, 基于此可以很有效地辨认相关和不相关事件.

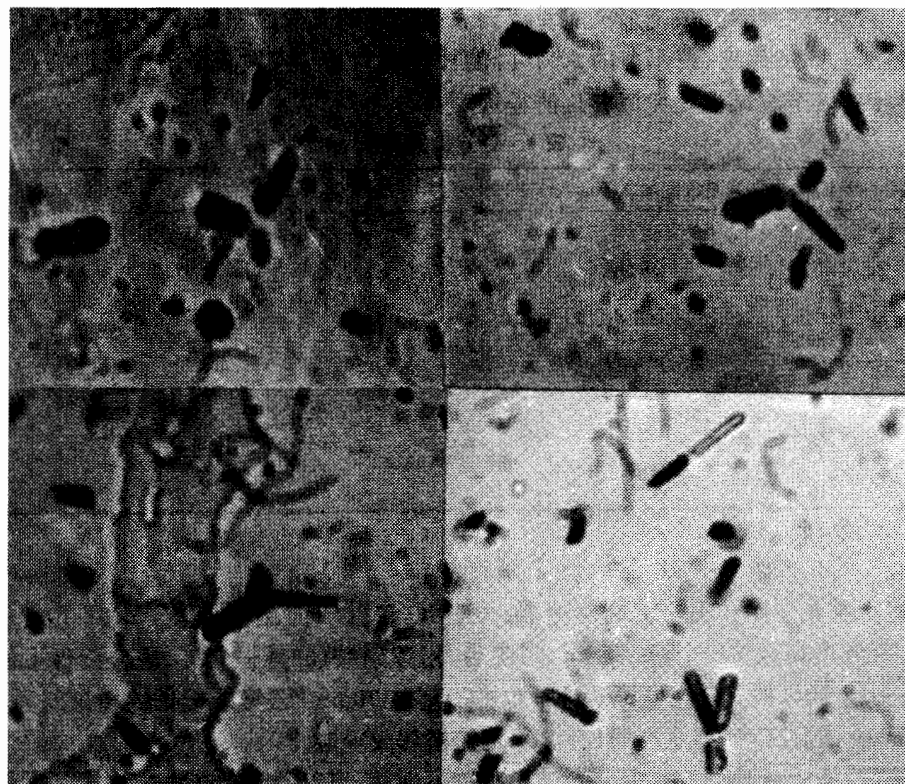


图2 典型的三分裂径迹

附加实验给出了云母本底信息, 将未照射的云母在相同的条件下蚀刻 90min, 未发现

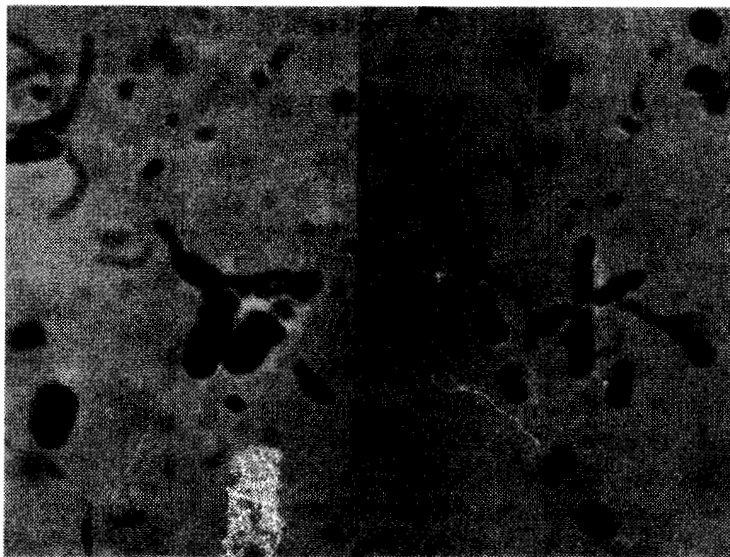


图 3 三分裂,二裂,四裂比较

任何类似于径迹的本底.

### 三、结果和讨论

通过对云母上的径迹观察和记录,可给出以下的信息:单径迹数、对裂二径迹数、折二径迹、三叉径迹、四叉径迹及其比例关系.由于确定单径迹事件有一定的点背景的影响,存在一定的误差,三裂二径迹存在不相关径迹的影响而加入人为判断因素,有较大的误差.我们直接用了三裂三径迹和二裂二径迹的比,利用效率修正推广到  $4\pi$  几何探测空间.

前  $2\pi$  几何空间探测,三分裂和二分裂的探测效率并不相等,它的三叉二叉比并不等于真正的三分裂、二分裂几率比,因为三体问题比二体问题复杂得多,三分裂的角分布又是不清楚的. Perelygin<sup>[6]</sup>曾断言不可能从实验中准确地计算出三分裂二分裂比.二裂的探测效率可以用代数式表达,三裂的三体问题只可用蒙特卡罗作模拟<sup>[13]</sup>,在本实验能区内从  $2\pi$  几何的探测空间三二比修正到  $4\pi$  几何空间三二几率比修正值为 10%—20%.

图 4 给出了本次实验  $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$  反应系统三分裂与二分裂的比同系统入射能的关系.图中的实线为以级联裂变模型拟合的结果<sup>[14]</sup>,表明了三分裂相对于二分裂的几率随入射能的升高而升高.不同的入射能,类熔合核的激发态也就不同.热核温度越高,以其它方式裂变的位垒也相对较低,多裂的几率也明显地升高,系统更重时,激发能升高到一定值时多重碎裂发生,三裂可能可以看成是多重碎裂的起点.

级联裂变模型考虑了直接二裂变的质量分布,分布宽度由实验给定,考虑到实验宽度的提取因素进行合理调整,对不同系统可以给出较好的拟合.假设裂片的激发能分配正比

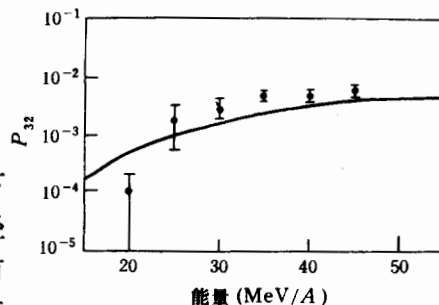


图 4 三分裂相对于二分裂的激发函数  
曲线为级联模型计算的结果

于质量,对裂片的所有衰变方式进行跟踪,用统计模型估计蒸发、裂变衰变几率,并用质量分布的权重计算级联裂变几率,用此简单模型可以在一定程度上与实验吻合,三分裂乃至多重碎裂很可能是级联裂变形成的,这还有待于进一步研究.

### 参 考 文 献

- [1] M. L. Muga, C. R. Rice, W. A. Sedlacek, *Phys. Rev.*, **161**(1967),1266.
- [2] R. W. Stoenner, M. Hillman, *Phys. Rev.*, **142**(1966),116.
- [3] R. H. Iyer, J. W. Cobble, *Phys. Rev.*, **172**(1968),1186.
- [4] R. Brandt, *Nucl. Phys.*, **A90**(1967),177.
- [5] M. Debaavais, R. Stein, *Nucl. Phys.*, **A90**(1967),186.
- [6] V. P. Pereygin, N. H. Shadieva, *Nucl. Phys.*, **A127**(1969),577.
- [7] R. L. Fleischer, P. B. Price, *Phys. Rev.*, **143**(1966),943.
- [8] I. Halpern, *Ann. Rev. Nucl. Science*, **21**(1971),245.
- [9] V. A. Rubchenya, Yavshits, *Z. Phys.*, **A329**(1988),217.
- [10] O. Tanimura, T. Fliessbach, *Z. Phys.*, **A328**(1987),475.
- [11] Diehl, Greiner, *Nucl. Phys.*, **A229**(1974),29.
- [12] 戴光曦,高能物理与核物理,**16**(1992),651.
- [13] 吴和宇、戴光曦、蔡薇,核技术,**15**(1992),76.
- [14] 吴和宇、戴光曦,“三分裂中的级联裂变模式,”高能物理与核物理,待发表.

## Study of Ternary Fission Produced in $^{12}\text{C}$ Bombarding $^{209}\text{Bi}$ Target with Medium Energy

WU HEYU DAI GUANGXI CAI WEI QI YUJIN YAN DEHONG  
ZHANG BAOGUO DANG BINGRONG LUO QINGZHENG QIAN XING WEN WANXIN  
(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

### ABSTRACT

Alternative layers of target material, which were prepared by evaporating  $^{209}\text{Bi}$  on the surface of mica foils, were irradiated with  $^{12}\text{C}$  ions. Ternary fission events in which three fragments of comparable mass were produced in  $25-45\text{MeV}/A$   $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$  reaction, were recorded by the mica detectors with  $2\pi$  geometry. The observed probability ratio of ternary fission relative to binary fission in  $2\pi$  geometry was modified to  $4\pi$  geometry spatial in terms of the Monte Carlo method. The values of ratios increase with the bombarding energy, and are compared with the calculation result of the cascade fission model.