

# 热核四重碎裂研究

戴光曦 吴和宇 罗清政 段利敏 贺智勇

张保国 李祖玉 文万信 漆玉金

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-07-03 收稿

## 摘 要

对单体热核四重碎裂的实验研究结果诸如碎片的质量、速度、关联角度、不同质量碎片的发射几率进行了报道。

**关键词** 四重碎裂, 单体热核, 异形形变, 热核质。

## 1 引 言

热核四重碎裂(fourfold-fragmentation)是指单体热核衰变成4块大小差不多的碎片。早在40年代末期,钱三强与何泽慧两位科学家在法国居里实验室,发现了铀核的四重碎裂径迹。1969年,苏、德科学家<sup>[1]</sup>在杜布纳联合所做了 $^{40}\text{Ar}(9.5\text{MeV}/u)+^{197}\text{Au}$ 和 $^{232}\text{Th}$ 的实验。用云母片上的径迹,记录了四重碎裂。为解释这些现象,德国的Greiner<sup>[2]</sup>提出扁椭球和长椭球两种形变方案,计算表明前者位垒高于后者,作者倾向于长椭球的二次级联裂变。80年代末期,在研究热核裂前蒸发中子与裂变竞争的实验中,发现裂变动力学延迟效应<sup>[3,4]</sup>,这使多重碎裂用级联裂变的解释有了问题。延时效应是裂变中的大形变过程有较大的惯性质量迁移,这就使通常的裂变时间变长,例如在重核区,裂变达到断点时间不小于 $3\times 10^{-20}\text{s}$ 。这样由于轻粒子蒸发过多,新生裂片的激发能一般很低,不依赖于复合核的激发能。一般新生裂片的质量数仅100左右,位垒通常在25MeV左右,很难再产生级联裂变。此外,测出的三裂与二裂产额比 $P_{32}$ 依赖于复合核的激发能,这就使级联裂变之说陷于困境。为此法国理论家Royer小组<sup>[5]</sup>考虑了温度降低核表面张力的因子,对整个多重碎裂的形变模式做了位垒计算,算出的位垒比较低。同时我们也对三重碎裂提出了三轴准卡西尼亚卵型体形变,并引入温度因子做了对称三重碎裂计算<sup>[6]</sup>。计算表明位垒可以降低到合理的数值,对热核来说是完全可以超越的。我们与美国Texas的科学家合作,推广上述计算到四重、六重和八重碎裂,取得了中重核区的依赖于核温度的对称多重碎裂的位垒值<sup>[7]</sup>。

从这些计算中可以认为,由于核温度增加,多重碎裂的位垒降低,增加了四裂的截面,从而可能对它进行测量。首先在兰州重离子加速器上用云母片加铝箔降能片,测量

了  $^{12}\text{C}+^{209}\text{Bi}$  的四重碎片径迹<sup>[8]</sup>. 本文报道用 25MeV/u 能量的  $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ 、 $^{197}\text{Au}$  和  $^{159}\text{Tb}$  靶, 测出四个关联碎片的发射方向与速度, 并且得到质量与角分布.

法国 GANIL 组<sup>[9-11]</sup>也在此期间测量了 60MeV/u 与 30MeV/u  $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$  靶, 测到了三重、四重碎裂事件.

选择反应系统  $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ 、 $^{197}\text{Au}$  和  $^{159}\text{Tb}$  靶, 是因为这些质量非对称系统有很大的非完全熔合反应截面, 非完全熔合后产生一个热复合核. 但是对于  $\text{Xe}+\text{Au}$  或  $\text{Au}+\text{Au}$  系统, 由于其有效裂变参数大于 47, 不存在熔合截面, 不可能形成单体热核. 若增加能量可能形成两个热核: 一个是类弹, 另一个是类靶热核. 两个热核的碎片同时发射, 无法将它们分开. 这样有可能误将两个热核各自裂变看成四重碎裂事件, 所以对单体热核碎裂得不到确定的结果. 由此可见选择反应系统是重要的.

## 2 实验结果

实验中 25MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  束流从兰州重离子加速器引出, 进入大筒形通用散射室. 碎片探测器是 8 块灵敏面积为  $20 \times 25\text{cm}^2$  的双维位置灵敏雪崩室, 照图 1 安置在靶周围.

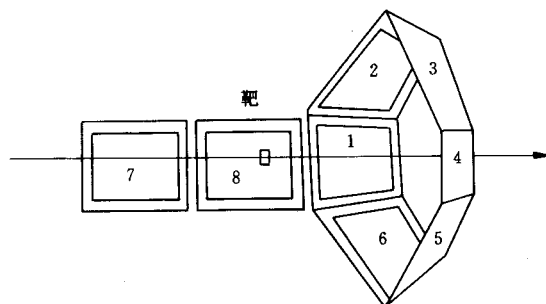


图 1 实验的 PPAC 探测系统

1—8 为 PPAC 编号.

每块雪崩室探测面与靶心连线相垂直, 距靶心为 50cm, 张角在极角方向为  $26^\circ$ , 在幅角方向为  $21^\circ$ . 雪崩室的位置分辨在  $x$  和  $y$  两个方向上都是 4mm. 为了避开大量朝前发射的粒子、碎片等干扰, 最小探测器角选为  $37^\circ$ . 这样在反应中深部非弹性碰撞 (DIC) 中的类弹碎片将从探测器中排除. 因为擦边角 (为  $10^\circ$ ) 比  $37^\circ$  小很多. 这种探测器的安排很重要, 因为 DIC 跟随裂变事件中类弹碎裂加上类靶裂变的两个碎片, 也会构成三重或四重事件. 这样保证了实验测出的符合碎片均源于热复合核的衰变.

实验测出符合碎片的速度  $v_i$  和角度  $\theta_i$ 、 $\varphi_i$ . 从而建立运动学方程:

$$\begin{cases} P_x = m_i v_{xi} = 0, \\ P_y = m_i v_{yi} = 0, \\ P_z = m_i v_{zi} = \langle LMT \rangle m_p v_0, \\ \sum_i m_i = \langle LMT \rangle m_p + m_t, \end{cases} \quad (i=3 \text{ 或 } 4) \quad (1)$$

式中碎片速度  $v_i$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  上的分量为原始测量量;  $m_p$  与  $m_t$  分别为弹核与靶核的质量, 而  $v_0$  为弹核  $^{40}\text{Ar}$  的速度,  $\langle LMT \rangle$  是弹核转移到复合核的线性动量百分比(本实验从裂变测出为 0.78). 从上述方程可以给出  $i$  重碎裂中碎片的质量  $m_i$ . 对于三重碎裂, 方程数多一个, 有探测余量. 所以可以用相对速度  $v_{ij}$  来代替  $v_i$ , 使数据再构更精确些. 但对于五重以上的事件, 由于方程数少于裂片重数, 无法进行再构. 从实验事件数可计算出, 四重与三重事件之比  $P_{43}$  大致在  $1/200$  的量级, 所以是很稀有的事件. 对于  $\text{Ar}+$

表 1 25MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  引起四重碎裂中的碎片平均质量与速度

	靶子	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
$m_i(\text{u})$	$^{209}\text{Bi}$	23.7	47.9	65.5	103.2
	$^{197}\text{Au}$	24.5	42.7	63.5	97.5
	$^{159}\text{Tb}$	19.7	31.9	58.7	79.9
$v_i(\text{cm/ns})$	$^{209}\text{Bi}$	3.39	1.86	1.23	1.04
	$^{197}\text{Au}$	3.11	1.98	1.24	1.13
	$^{159}\text{Tb}$	3.27	2.36	1.51	1.46

$\text{Au}$  系统的四重碎裂的裂片质量分布显示在图 2 中, 四重碎裂的碎片质量与复合核质量的比值, 从小到大依次大致为 (1, 3, 5, 7) / 16, 即四分整数律.

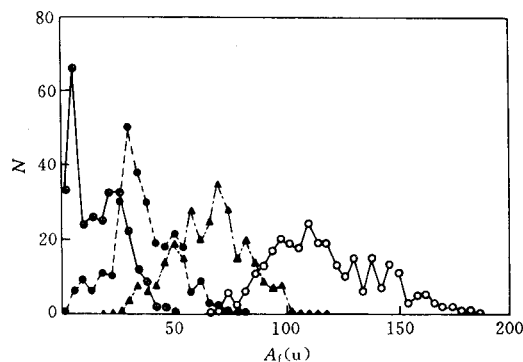


图 2 25MeV/u  $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$  反应中四重碎裂的 4 块碎片的质量谱

⊕  $f_1$ ; ●  $f_2$ ; ▲  $f_3$ ; ○  $f_4$ .

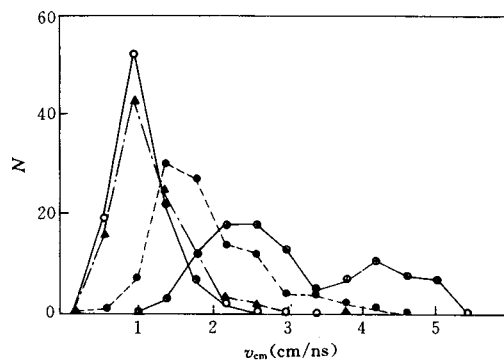


图 3 25MeV/u  $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$  反应中测到的 4 块碎片的质心速度谱.

⊕  $f_1$ ; ●  $f_2$ ; ▲  $f_3$ ; ○  $f_4$ .

对四重碎裂, 从表 1 列出的平均碎片质量可以看出, 中间两块碎片的质量和稍大于最轻与最重碎片的质量和, 在 5% 左右. 如果是双级联裂变, 应先对称裂变为相同的两块, 然后各自作十分不对称的裂变. 第二次裂变是质量数低于 100 的核(必须考虑第一次裂前的 20 多个核子蒸发丢失)作裂变. 正如上面提到的, 裂变动力学时间延迟大大降低了剩余激发能, 第二次裂变几率很小.

表 1 中还列出了四重碎裂的碎片平均速度. 质心系的平均速度随质量增加而减小. 对于  $\text{Ar}+\text{Au}$  的情况, 该速度分布显示在图 3 中. 从图 3 可见小碎片速度谱中有两组,

峰位在 2.4、4.2 cm/ns. 可能低速组来自蒸发碎片的干扰, 也可能由于该碎片的发射次序的效应; 先发射的组成高速组, 最后发射的组成低速组.

从图 2、图 3 可见, 大质量碎片比小碎片分布宽, 质量分布曲线下的面积对各个碎片是一样的. 大质量碎片比小碎片分布宽, 表示发射大碎片的几率小, 发射几率随碎片大小的变化显示在图 4 中. 图中的 3 个点为实验点, 由于四重碎裂的碎片的质量之和等于复合核质量, 所以仅有 3 个宽度值可用作实验点. 曲线为拟合的指数曲线, 指数曲线表示出发射几率  $dY/dM$  是随碎片质量数  $A_f$  增加呈指数下降:

$$dY/dM = 0.14 \exp(-0.013A_f).$$

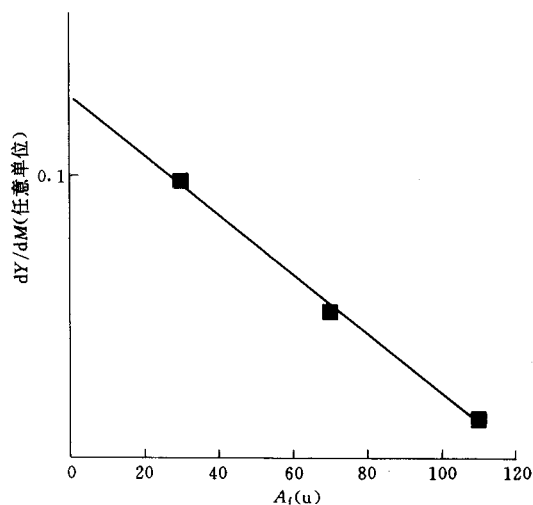


图 4 25 MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$  反应中测到的 4 块碎片的质量谱的分布宽度推出单举测量的碎片的质量分布指数曲线为拟合线, 表现了碎片发射过程的统计性质.

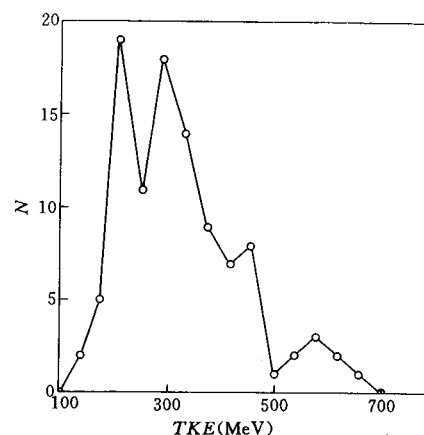


图 5 25 MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$  反应中四重碎裂的碎片总动能分布

图 5 可看作单举测量的质量谱, 它的指数行为表示了碎片发射的统计性质. 在测出碎片的质量与速度后, 可得到碎片总动能 ( $TKE$ ) 分布, 如图 6 显示了四重碎裂的总动能分布. 在表 2 中列出了复合核的激发能与温度. 同时在表 3 中分别列出四重碎裂下平均总动能  $\langle TKE \rangle$ 、最可几值  $TKE$  以及计算出的库仑能. 从最可几值小于平均值, 可知  $TKE$

表 2 25 MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  引起反应时复合核的特性参数

靶 子	$^{209}\text{Bi}$	$^{197}\text{Au}$	$^{159}\text{Tb}$
复合核	$^{249}\text{Bk}$	$^{238}\text{Np}$	$^{190}\text{Au}$
$Q(\text{MeV})$	-96.93	-87.3	-59.6
$E_m(\text{MeV})$	674.9	669.6	648.6
$E^*(\text{MeV})$	578.0	615.5	589.0
$E^*/A_c(\text{MeV}/u)$	2.41	2.70	3.10
$T^{\omega}(\text{MeV})$	4.91	5.20	5.57

(a) 能级密度参数  $a = A/10$

分布存在高能尾巴. 随着系统变轻, 复合核温度  $T$  增加, 导致  $TKE$  值增加. 这可能由于核温度上升造成表面张力(束缚核系统的核力)变弱, 从而在形变从鞍点到断点时有“早裂”现象出现. 这就导致  $TKE$  的增加. 用双级联裂变来解释单体热核四重碎片事件, 可能性不大, 至少是不完全的. 那么品字形变与四面体形变, 分别导致三重与四重裂变的可能性又如何? 在图 6 中显示了三、四与六重碎裂的位垒高度对于复合核质量数  $A$  的曲线. 图中显示了在核温度为  $5\text{MeV}$  及  $0$  时的两组曲线. 可以看出, 核温度大大降低了位垒值. 从表 2 可见, 对于我们的系统, 复合核总激发能在  $650\text{MeV}$  左右. 若蒸发中子及轻粒子将带走  $60\%$  的激发能, 这时还有  $380\text{MeV}$  来超越三、四重碎裂的位垒, 这是足够的(见图 6). 所以上述品字形与四面体形的形变位垒不会成为多重碎裂的障碍. 这类异形形变, 在零温度时的高自旋态已经存在, 如三轴形变. 这时转动驱动力是相当弱的, 异形形变仍旧发生了. 在热核时, 表面势变弱, 产生异形形变, 三轴与四轴形变都是可能的. 而四重碎裂在质心系中两碎片发射方向间的夹角共有 6 组. 图 7 给出

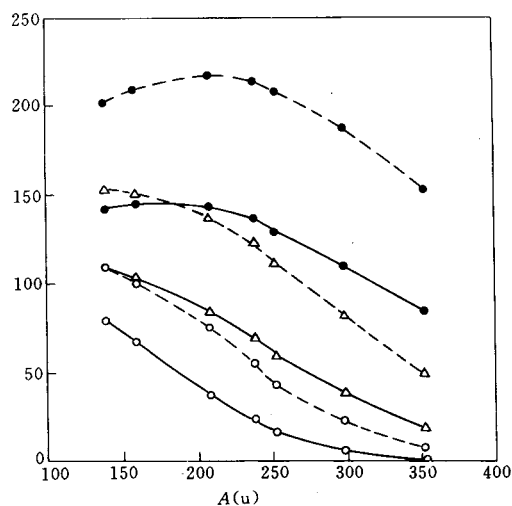


图 6 计算出的热核三、四和六重碎裂的位垒高度与其质量数  $A$  的关系  
实线的核温度为  $5\text{MeV}$ ; 虚线对应于冷核(核温度为零)的情况.  
○ 三重碎裂; △ 四重碎裂; ● 六重碎裂.

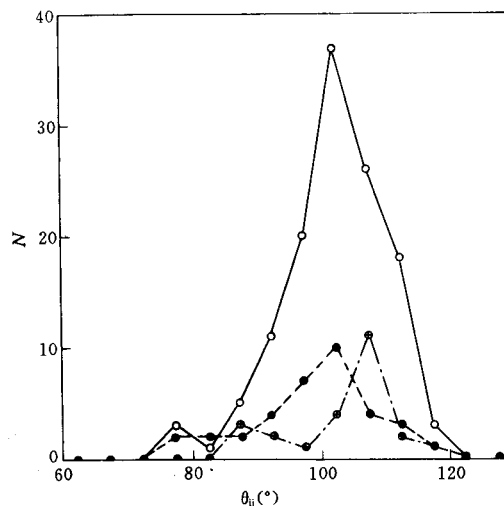


图 7  $25\text{MeV}/u$   $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$  反应在质心系中四重碎裂中两碎片夹角的总平均值的分布  
○  $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$ ; ●  $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ ; ⊕  $^{40}\text{Ar}+^{159}\text{Tb}$ .

表 3  $25\text{MeV}/u$   $^{40}\text{Ar}$  轰击各种靶测出四重碎裂的碎片总动能

靶子	$^{209}\text{Bi}$	$^{197}\text{Au}$	$^{159}\text{Tb}$
$\langle TKE \rangle (\text{MeV})$	341.4	331.8	363.2
$TKE (\text{MeV})$	260	280	300
Coul. (MeV)	306	286	219
$e^* (\text{MeV}/u)$	2.4	2.7	3.1
$T (\text{MeV})$	4.9	5.2	5.6

了平均相对角分布, 它在  $105^\circ - 110^\circ$  成峰. 若形变轴沿着正四面体的 4 个顶点发展, 则这成峰角应为  $109.5^\circ$ , 与实验测量一致. 如果 4 块碎片发射方向均在一平面内, 则应为  $120^\circ$ . 小于  $120^\circ$  则发射方向不共面. 所以从四重碎裂的相对角分布的成峰角, 也给出异形形变的旁证.

### 3 结 束 语

本文重点详细阐述了  $25\text{MeV}/u$   $^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}$ ,  $^{197}\text{Au}$  和  $^{159}\text{Tb}$  靶下, 用排除核反应直接过程的探测系统, 测量了核温度在  $4.9 - 5.6\text{MeV}$  热核四重碎裂事件, 测量了碎片速度、质量、碎片总动能等. 从四重碎裂中测到的 4 块碎片的质量谱的分布宽度推测出单举测量的碎片的质量分布图, 图中的指数曲线为拟合线, 表现了过程的统计性质. 得到四裂中的平均相对角分布  $110^\circ$  成峰的事实. 如果单轴形变若出现四裂, 则四碎片在无转动下是共线的; 存在相同转动方向是共面的. 所以热核作为整体的异形形变是多重碎裂的一种可能形变方式为本实验给出的结论. 同时本实验与法国 GANIL 所涉及的热核都小于核的极限温度, 此刻热核不存在解体式相变. 采用热的核液滴模型来解释多重碎裂是顺理成章的. 但是从核激发能与温度的关系上看, 似乎有液汽相变征兆和汽相的核子结团效应<sup>[12]</sup>. 可能由于液汽相变或者泡利阻塞效应变弱, 造成核内核子更自由和出现结团. 从整体看, 热核产生异形形变, 出现多个凸起. 或者说核的高温度使核表面张力减少(表面弥散度增加), 更容易产生异形形变. 本工作涉及的四重碎裂是单体热核的衰变. 目前在更高能时还发现热核质(不是热核)的多重碎裂, 它可能是一种核质的输运过程, 与我们研究的问题不一样.

### 参 考 文 献

- [1] V. P. Perehygin, N. H. Shadieva, S. P. Tretiakova *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A127**(1969)577.
- [2] A. Diehl, W. Greiner, *Nucl. Phys.*, **A229**(1974)29.
- [3] D. Hilscher, H. Rossner, B. Cramer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **62**(1989)1099.
- [4] D. J. Hinde, D. Hilscher, H. Rossner, Nuclear Dynamics and Nuclear Dissemble, J. B. Natowitz editor, World Scientific (1989).
- [5] F. Haddad, G. Royer, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, **18**(1992)L153.
- [6] G. X. Dai, AIP Conf. Proc. 250 Towards a Unified Picture of Nucl. Dynamics, (1991) 383 Nikko Japan.
- [7] G. X. Dai, J. B. Natowitz, R. Wada *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A568**(1994)601.
- [8] Wu Heyu, Dai Guangxi, Cai Wei, *Chinese J. of Nucl. Phys.*, **5**(1993)185.
- [9] M. Louvel *et al.*, AIP Conf. Proc. 250 Towards a Unified Picture of Nucl. Dynamics. (1991) 362 Nikko Japan.
- [10] G. Bizard *et al.*, Preprint, LPCC 91—10.
- [11] M. Louvel *et al.*, Preprint, LPCC 93—05.
- [12] J. B. Natowitz *et al.*, proc. in Cancun Meeting of American Mexican, Canadian Phys. Societies on Sept. 1994.

## Fourfold Fragmentation in Hot Nuclei

Dai Guangxi   Wu Heyu   Luo Qingzheng   Duan Limin   He Zhiyong  
Zhang Baoguo   Li Zuyu   Wen Wanxin   Qi Yujin

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

Received 3 July 1995

### Abstract

Experimental results of fourfold fragmentation of single hot nucleus are reported. Distributions of mass, velocity, correlation angles between fragments and emission probability versus mass of fragments are studied.

**Key words** fourfold fragmentation, single hot nucleus, abnormal deformation, hot nuclear matter.