

热核三重碎裂中的两种模式*

戴光曦 吴和宇 符彦飏 段利敏
贺智勇 李祖玉 张保国 刘国兴

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 在 $30\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ 反应中测量了热核碎裂成三块差不多大小的碎片的出射道。这种碎裂可能有两种模式：一种是接续的两体过程，如跟随裂变和级联裂变；另一种是瞬发的三重碎裂(3F)。从实验上区分了这两种模式并特别关注其中具有集体多轴形变的3F模式，对3F中的碎片质量分布和最可几碎片质量比进行拟合后找出了通用规律。用碎片发射平面的定向角分布来测量碰撞参数，从而将中心碰撞的3F事件与跟随准弹性散射或深部非弹性散射后的裂变事件分开。

关键词 瞬发的三重碎裂 三碎片发射平面的定向角 接续的两体过程

1 引言

早在40年代末期，钱三强与何泽慧两位前辈在法国居里实验室发现了铀核的三重裂变径迹。当时大多数科学家认为是裂变加上一个 α 粒子。钱三强与何泽慧^[1]用相关角的分析法证明最轻碎片应是比 α 粒子更重的碎片。

用主探测器PPAC在准裂变实验^[2]和多重碎裂事件^[3-5]中已经作了成功的测量。三重事件可被解释成接续两体过程，如中能^[3]或者低能重离子核反应^[4,5]的跟随裂变SF(sequential fission)以及级联裂变。对于轻离子的非对称反应系统，SF的三块碎片是由类靶的两裂变碎片加上一个类弹碎片所组成；另一类接续的两体过程的级联裂变(cascade fission)是高激发态的裂变，它是对称裂变；三块碎片质量比大致为2:1:1。这样从三块碎片质量比来鉴别三重事件是热核的3F，还仅是接续两体过程。在20—30MeV/u能区，有人认为三重碎裂都是接续的两体过程，不存在3F过程。

本实验再次用质量分布和碎裂平面的定向分布来证明热核存在瞬发的三重碎裂，并区分了三重碎裂存在两种模式：接续的两体过程和3F过程。正如裂变理论中存在鞍点那样，在3F过程中存在共同鞍点过渡态(transition state)；有共同的集体形变，尽管断点时间

1997-12-9收稿，1998-06-18收修改稿

* 国家自然科学基金(19275054)，兰州分院院长基金和中国科学院近代物理所所长基金的资助

可以有差别,它也不同于到达动力学不稳定区 (spinodal 区^[6]) 而发生的瞬发的三重或多重碎裂. 在单核能为 20—30MeV / u 的重离子反应中, 由于能量低, 达不到这个不稳定区, 计算表明^[6] 只有核质膨胀, 使核密度大致低于 $0.08/\text{fm}^3$ 才能达到. 例如从 30MeV / u Ar + In 实验的粒子谱表明¹⁾, 这时核保持在稳定的复合核状态. 本实验要证明, 瞬发的三重碎裂也存在于非 spinodal 区. 若存在这种有共同鞍点过渡态的 3F, 先要作多轴形变. 例如大的三轴形变使热核趋向共同鞍点. 例如, 即使在微弱的转动能驱使下的高自旋态, 集体三轴形变已被详细研究过. 对于三重, 甚至到八重对称碎裂形变的位能面的计算和它们随温度的变化在文献 [7—9] 中已经作了研究, 所预示的位垒高度比环形体的^[10] 低很多. 由能量最低原理, 使三轴形变最有可能发生. 这时在热核表面随机形成 3 个凸起, 然后发展到鞍点. 在 BUU 动力学计算^[11,12] 中发现环形体的稀有事件, 对应的人射能高于 60MeV / u, 它是动力学不稳定的结果. 另一种鉴别 3F 与级联裂变的方法是用碎片-碎片相对角分布来测定两断点的时差^[13,14]. 若是级联裂变, 该时差等于第二级的裂变时间, 一般大于 $1000\text{fm} / c$. 因为第二级裂变是第一级裂片之一的再裂变. 由于蒸发中子的竞争, 后一次裂变的激发能很低, 形变到鞍点的时间就很长^[15], 至少 $3000\text{fm} / c$ 以上. 对于 25—30MeV / u ^{40}Ar 引起的反应, 测定这个时差为 50—500fm / c, 对应的复合核质量数为 140—200 和总激发能为 1—1.2 GeV^[14], 它们不可能是级联裂变, 而是 3F.

2 实验设备与方法

本实验的 30MeV / u ^{40}Ar 束流从兰州重离子加速器 ($k = 450$) 引出, 进入大筒形通用散射室^[16]. 实验中束流强度为 0.7pnA. 碎片探测器采用 10 块灵敏面积为 $20\text{cm} \times 25\text{cm}$ 的双维位置灵敏雪崩室 (PPAC), 分布在 ^{159}Tb 靶周围的前半球. 每块雪崩室探测面与靶心距离为 50cm, 张角的极角为 26° , 幅角为 21° . 雪崩室的位置分辨在 x 和 y 两个方向上都是 4mm, 对应的角分辨为 0.5° . 为了避免大量朝前发射的粒子、碎片等干扰, 最小探测器角选为 32° . 10 块 PPAC 中的 6 块围绕着束流轴组成一个前锥环, θ 覆盖角 32° — 60° , 幅角 ϕ 覆盖角 0° — 360° . 其余 4 块 PPAC 置于束流两侧和上方, θ 覆盖角 62° — 90° . 这样在反应中深部非弹性碰撞 (DIC) 中的类弹碎片, 大部分不被探测器记录, 因为擦边角 7° 比最小探测器角 32° 小很多. 这种探测器的安排保证了测出的符合碎片大都源于热复合核的三体碎裂. 所使用的 PPAC 的本征时间分辨为 200ps. 通常飞行时间 (TOF) 决定于加速器的射频 RF 信号与 PPAC 的点火时间差. 为了消除加速器射频与束流团的时间漂移和抖动, 我们用 TOF 的时差来从数据再构中得到碎片的质量 (见附录). 这样使质量数分辨可达到 6. 但是对于四碎片事件必须用 TOF 值, 靠其它探测器的时间来实时校对 RF 时间, 这时质量数分辨为 10. 实验的中心碰撞线动量转移由裂片折叠角来定. 对于 ^{159}Tb 靶, 中心碰撞平均线动量转移率 $\langle lmt \rangle$ 依赖于 ^{40}Ar 离子的能量, 从 25MeV / u 的 0.75—30MeV / u 的 0.7. 由于裂变、3F、4F 等都是相似的复合核的不同的衰变道^[17]. 而 $\langle lmt \rangle$ 由入射道决定的, 所以它们的 $\langle lmt \rangle$ 是相同的. 对于三重碎片事件, 运动学方程为:

1) 徐珊珊. 博士论文, 中国科学院近代物理研究所, 1997

$$\sum_{j=1,2,3} m_j V_x(j) = \sum_{j=1,2,3} m_j V_y(j) = 0.0, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1,2,3} m_j V_z(j) = \langle lmt \rangle V_p M_p, \quad (2)$$

式中 m_j 为碎片质量, 其和等于复合核质量 $M_{CN} = \langle lmt \rangle M_p + M_t$, V_p 和 M_p 分别为弹核速度与质量, 而 M_t 为靶核质量; $V_x(j)$, $V_y(j)$ 和 $V_z(j)$ 分别为第 j 个碎片速度的 x, y 和 z 分量. 方程组的解将在附录中详述. 由于蒸发的竞争, 余核的质量等于 M_{CN} 减去 ΔM_{CN} . 可是 ΔM_{CN} 的不确定性大, 若采用碎片比 m_j / M_{CN} 会更好些. 同时碎片比还可用来对不同反应系统的三碎片质量进行比较, 实验得到的是 3 组质量分布, m_j 对各组质量求平均, 给出平均值 M_j .

3 实验结果

3.1 三块碎片的质量分布

图 1 显示了测出的三个关联碎片的 3 组质量谱 $m_i (i = 1, 2, 3)$, 记录谱的下阈质量数为 20. 从图 1 的质量谱可以看出, 三组质量分布的最可几质量的比 $M_1 : M_2 : M_3$ 大致为 2:3:4. 图中的拟合曲线的模型是在假定三块碎片之间不存在相互作用, 它们的大小是随机的, 唯一的限制仅仅是质量守恒. 这样 Monte-Carlo 模拟计算很容易作出. 令 $RAM(j)$ 是 0 到 1 的随机数, $A_j (j = 1, 2, 3)$ 为一事件的三个质量数, 则 $A_j = A_i \cdot RAM(j)$, 并满足 3 个质量数 A_j 之和等于总质量数 $A_t = \Sigma A_j$. 将所得到的 A_j 按大小分组, 并去掉存在 A_j 小于 20 的事件, 就得到图 1 中的 3 组质量分布的拟合曲线. 由图可见, 曲线与实验数据点的符合相当好, 还可得到各组曲线分布的最可几值, 它们之间的比值分别为 $(2, 3, 4) / 3^2$, 与表 1 的实验值相同. 同样对四重碎片的实验平均质量与用相同的随机方法给出的值也列入表 1 中. 对于 4 重碎片的随机预示值与实验值^[16]比较, 四碎片质量更加靠近, 表明四碎片之间的相互作用增加了彼此的质量差别, 近乎于排斥作用, 使碎片大小分开.

表 1 25MeV / u $^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}, ^{197}\text{Au}, ^{159}\text{Tb}$ 反应中^[13]多重碎裂的碎片的平均质量比和模型预示值

	质量比	^{209}Bi	^{197}Au	^{159}Tb	预示值
3F (%)	M_1 / M_{CN}	23.2	22.4	24.2	22.2
	M_2 / M_{CN}	32.6	32.8	32.2	33.3
	M_3 / M_{CN}	44.2	44.8	43.6	44.4
4F (%)	M_1 / M_{CN}	9.9	10.8	10.4	12.8
	M_2 / M_{CN}	20.0	18.7	16.8	23.1
	M_3 / M_{CN}	27.3	27.9	30.9	29.3
	M_4 / M_{CN}	43.0	42.8	42.1	34.7

为了将上述的瞬发碎裂 3F 与跟随裂变 SF 进行比较, 在图 2 显示了同一实验的质量谱, 但是轻质量组的质量数小于 20. 图中的中间质量组与重质量组十分靠近, 可以看作类

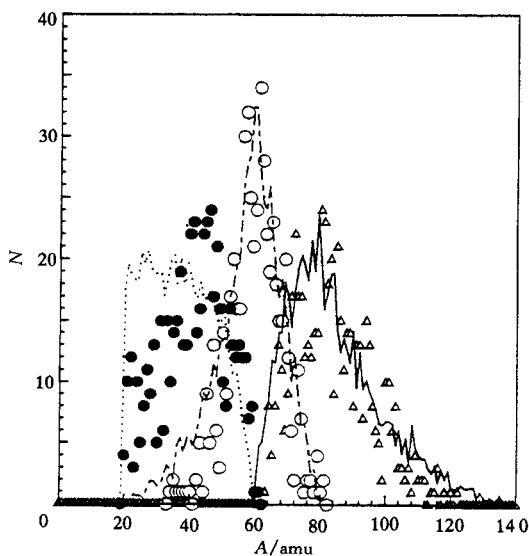


图 1 在 $30\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ 反应中测到的 3 组质量分布 (轻质量组的质量数大于 20, 拟合曲线从一简单模型给出, 见文内叙述)

黑点为轻质量组; 圈点为中质量组; 三角点为重质量组.

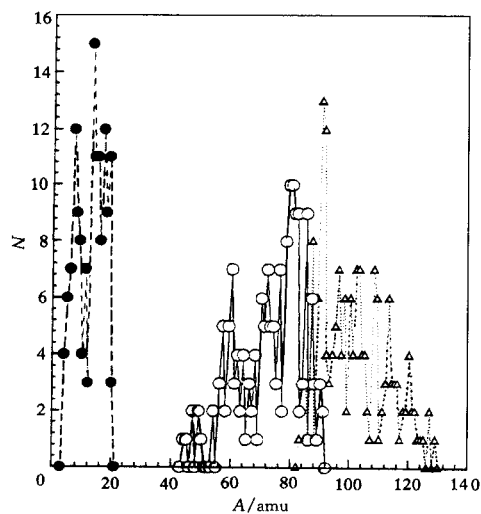


图 2 在 $30\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ 反应中测到的 3 组质量分布 (但是轻质量组的质量数小于 20)

图中符号说明同图 1.

靶核在高激发态的对称裂变下的两组碎片, 而轻碎片组显然是类弹碎片, 并且很像经过 DIC 到大角度的碎片. 这样本实验 SF 与 3F 同时出现, 有力地证明了 3F 与众所认可的 SF 是热核多重碎裂的两种模式.

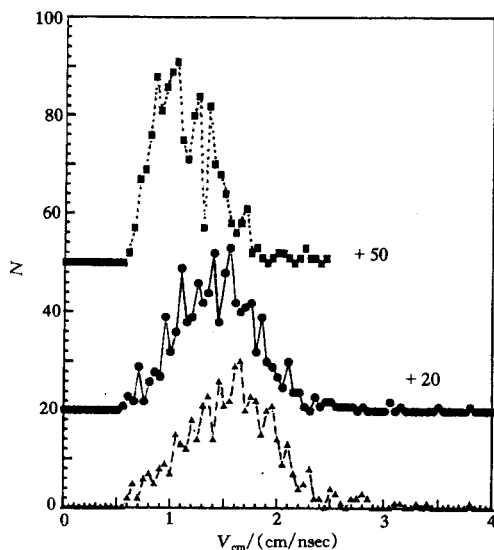


图 3 在 $30\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ 反应中测到的质心系的速度谱

方点为重质量组; 圆点为中质量组; 三角点为轻质量组.

3.2 碎裂碎片发射平面的定向

区分 SF 和 3F 除了碎片质量不同外, 它们的碎片发射平面的法线定向也有差别. 三块碎片发射速度向量的端点组成了碎片发射平面. 碎片发射平面与束流的交点是复合体系的质心, 图 3 显示了质心系下 3 组碎片的速度谱, 它们与图 1 的 3 组质量谱相对应, 质量较重的具有较低的速度谱. 结合图 1 和图 3 可以得到三碎片的总动能 (TKE), 它显示于图 4 中, 3F 总动能分布的峰值为 200MeV , 它与级联裂变的三碎片的总动能 196MeV 相一致 (考虑了实验质量分布). 所以用 TKE 无法鉴别 3F 与级联裂变.

但是 3F 和 SF 的碎片发射平面的法线定向角分布是不同的并显示在图 5 中. 可

以看到 3F 定向角分布在 θ_3 为 28° 呈高斯分布, 分布偏差 σ 为 18° ; 而 SF 的 θ_{SF} 则在 45° 成峰, 偏差 σ 约为 30° . 这种定向分布的不同是由 3F 与 SF 的碰撞参数 b 不同造成的, 显然应有 $\theta_3 < \theta_{SF}$.

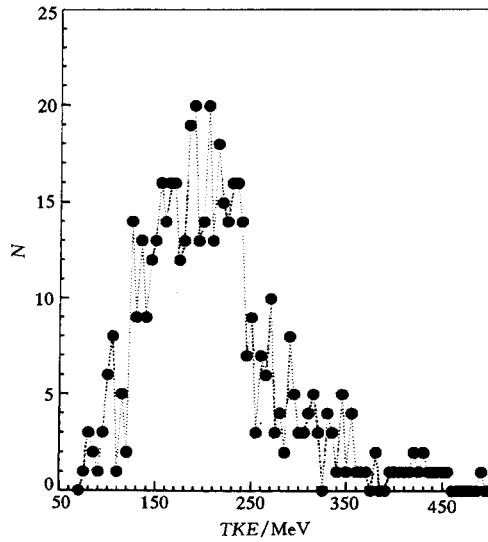


图4 图1中的三碎片的总动能(TKE)谱

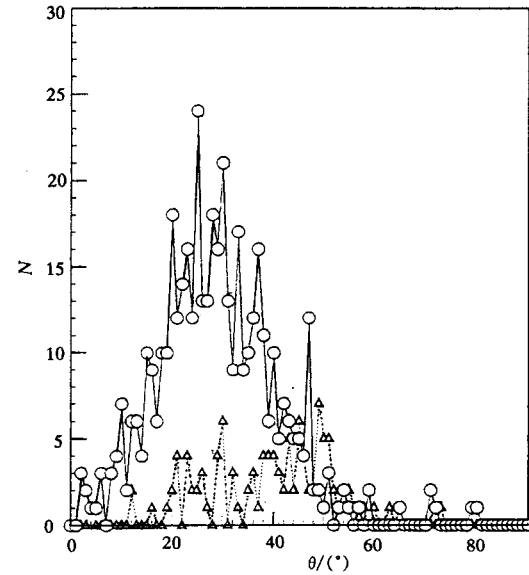


图5 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ 三碎片发射平面的法线方向分布

圈点是 3F 的定向角分布, $M_{\min} > 20$; 三角是 SF 的定向角分布, $M_{\min} < 20$.

4 结论

用一个简单而直接的碎片质量分布来判断三块碎片事件的反应机制. 对于级联裂变, 三块碎片的最可几质量或平均质量的比应为 2:2:4, 但是实验结果表明它为 2:3:4, 证明可能是瞬发 3F. 同样对于另一类接续两体过程 SF, 三块碎片质量分布是类靶裂变的两裂片加上一个在准弹性散射或 DIC 后的类弹碎片. 3F 的质量分布可以用碎片间无关联的随机统计过程来预示, 也可得到三个平均质量的比值. SF 过程中, 三块碎片发射平面的法线趋向垂直于束流轴. 在碎片发射平面的法线的定向上, 类弹碎片倾向于朝前发射, 与瞬发 3F 有所不同. 发生 3F 时, 碎片发射平面内三块碎片的相对发射角虽确定, 但是绝对角是各向同性的, 所以有 $\theta_3 < \theta_{SF}$ 的实验结果.

本实验因删除了三碎片中一碎片发射角小于 32° 的事件, 从而极大地压低了三重碎裂中的两体接续裂变, 即 SF 的份额, 因此相对提高了瞬发 3F 的产额. 瞬发 3F 与两体接续裂变在本实验中同时测到, 对它们进行质量和发射平面定向的比较证明了热核三重碎裂除了两体接续裂变外还有瞬发 3F 等模式, 3F 是复合核表面同时出现 3 个凸起, 发展成瞬发三碎裂, 而不是接续的两体过程. 同时本实验由于能量较低而出现 3F, 也证明了存在非

spinodal 区的瞬发的三重碎裂.

作者感谢中国科学院近代物理研究所 SSC 加速器运行人员给出高品质的 30MeV / u ^{40}Ar 束流, 使本实验得以完成.

参 考 文 献

- 1 Tsien San-Tsiang, Ho Zah-Wei, Chastel et al. J. de Phys., 1947, **8**:200—211
- 2 Toke J, Bock R, Dai G X et al. Nucl. Phys., 1985, **A440**:327—365
- 3 Stefanini A A, Casini G, Maurenzig P R et al. Z. Phys., 1995, **A351**:167—186
- 4 Glassel P, Harrach D V, Specht H J et al. Z. Phys., 1983, **A310**:189—216
- 5 Dai G X, Bock R, Gobbi A et al. Proc. of Tsukuba int. Symp. on H-I Fusion reaction held in 1984. In: Lee S M ed. Singapore: world Scientific, 1985, 205—216
- 6 Zhang F S. Z. Phys., 1996, **A356**:163—170
- 7 Lopez J A, Randrup J. Nucl. Phys., 1990, **A512**:354—368
- 8 Haddad F, Royer G. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 1992, **18**:L153—L158
- 9 Dai G X, Natowitz J, Wada R et al. Nucl. Phys., 1994, **A568**:601—616
- 10 Wang C Y. Ann. Phys., (N. Y.), 1973, **7**:279
- 11 Moretto L G, Kin T, Colonna N et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**:1884—1887
- 12 Xu H M. Phys. Rev., 1992, **C46**:R2144—R2148
- 13 Louvel M, Luban G, Bizard G et al. Phys. Lett., 1994, **B320**:221—226
- 14 Dai G X, Wu H Y, Duan L M et al. Chinese J. Nucl. Phys., 1996, **18**:187—199
- 15 Hilscher D, Rossner H, Cramer B et al. Phys. Rev. Lett., 1989, **62**:1099—1102
- 16 Dai G X, Chen K L, Jin G M et al. Nuclear Technique. (in Chinese), 1995, **18**:220—223
(戴光曦, 陈克良, 靳根明等. 核技术, 1995, **18**: 220—223)
- 17 Dai G X, Wu H Y, He Z Y et al. Nucl. Phys., 1995, **A583**:173c—180c

附 录

用 PPAC 探测器组, 对于三重碎片事件, θ_j , ϕ_j , t_j 和 N_j ($j = 1, 2, 3$) 是原始测量量; 在这里 t_j 和 N_j 分别为 TOF 值和探测器 PPAC 的号数. 从 (θ_j, ϕ_j, N_j) , 可以算出 PPAC 探测点与靶心之间的飞行距离 d_j , 进而可得到速度 $v_j (= d_j / t_j)$. 从运动学方程出发,

$$\sum_{j=1,2,3} m_j V_x(j) = \sum_{j=1,2,3} m_j V_y(j) = 0.0,$$

$$\sum_{j=1,2,3} m_j V_z(j) = \langle lmt \rangle V_p M_p = V_0 M_{CN} = P_0,$$

在此 P_0 , V_0 和 M_{CN} 分别是复合核的动量、速度和质量. 通过平均线动量转移 $\langle lmt \rangle$ 而非完全熔合形成复合核. 此外还有质量守恒

$$\sum m_j = \langle lmt \rangle M_p + M_t = M_{CN}. \quad (1)$$

我们用飞时差 $t_{21} = t_2 - t_1$ 和 $t_{31} = t_3 - t_1$ 来代替绝对 TOF 值 t_j . 这时将 t_1 看作一个未知变量. 因 $\langle lmt \rangle$ 是已知的, 所以 3 个 m_j 和一个 t_1 共 4 个未知量可以从 4 个方程解出来. 令 $[v_x(j), v_y(j), v_z(j)]$ 是

3 个碎片的速度 v_j 的方向单位向量, 速度向量为 $[V_x(j), V_y(j), V_z(j)]$, 这里 $V_x(j) = v_j v_x(j)$, $V_y(j) = v_j v_y(j)$ 和 $V_z(j) = v_j v_z(j)$. 而方向单位向量为

$$v_x(j) = \sin\theta_j \cos\phi_j, \quad v_y(j) = \sin\theta_j \sin\phi_j, \quad \text{和} \quad v_z(j) = \cos\theta_j.$$

首先, 解复合变量 m_j / t_j , 预先定义以下表达式:

$$DW(4) = \begin{vmatrix} v_x(1) & v_x(2) & v_x(3) \\ v_y(1) & v_y(2) & v_y(3) \\ v_z(1) & v_z(2) & v_z(3) \end{vmatrix} d_1 d_2 d_3, \quad (2)$$

$$DW(1) = [v_x(2)v_y(3) - v_x(3)v_y(2)]d_2 d_3 V_0, \quad (3)$$

$$DW(2) = [v_x(3)v_y(1) - v_x(1)v_y(3)]d_3 d_1 V_0, \quad (4)$$

$$DW(3) = [v_x(1)v_y(2) - v_x(2)v_y(1)]d_1 d_2 V_0. \quad (5)$$

然后解出 m_j / t_j 复合变量的 3 个式子

$$m_j / t_j = DW(j) M_{\text{CN}} / DW(4) \quad (j = 1, 2, 3), \quad (6)$$

将已知量 t_{21}, t_{31} 代到 (6) 式, 并考虑质量守恒 (1) 式, 解出飞行时间 t_1

$$t_1 = [DW(4) - DW(2)t_{21} - DW(3)t_{31}] / [DW(1) + DW(2) + DW(3)] \quad (7)$$

于是 t_2, t_3 都可取值, 可求得裂片的速度

$$v_1 = d_1 / t_1, \quad (8)$$

$$v_2 = d_2 / (t_1 + t_{21}), \quad (9)$$

$$v_3 = d_3 / (t_1 + t_{31}). \quad (10)$$

最后从 (6) 式就可得到碎片的质量 m_j .

Two Modes in Three-fold Fragmentation of hot Nuclei *

Dai Guangxi Wu Heyu Fu Yanbiao Duan Limin He Zhiyong
Li Zuyu Zhang Baoguo Liu Guoxing

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

Abstract Splitting of a hot nucleus into three comparable pieces in the $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ reaction at 30MeV / u was measured. For the splitting there are two modes: one is a successive binary process, such as sequential fission or a cascade fission, another is a prompt threefold fragmentation (3F). The paper presents the identification between the two modes of the threefold fragmentation by the experimental results, such as the mass distribution of the fragments, the orientation of the fragmentation plane, etc.. In the two modes, the prompt one with collective deformation is emphasized. Furthermore fitting the mass distribution and finding a scaling law about the most-probable mass ratio in the 3F are given. In addition, the orientation of the fragmentation plane could also be used to measure the impact parameters, there for to distinguish 3F events associated with central collision from the sequential fission after a quasi-elastic scattering or deep-inelastic collision.

Key words prompt threefold fragmentation, orientation of three fragmentation plane, successive binary process

Received 9 December 1997, Revised 18 June 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19275054), the Funds of Lanzhou Branch of Chinese Academy of Sciences and the Funds of Institute of Modern Physics