

文章编号: 1007-4627(2015)01-0030-06

重核三裂变反应过程中的能量耗散

李贤¹, 晏世伟^{2, 3}, 王诚谦¹

(1. 乐山师范学院, 四川 乐山 614000;

2. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875;

3. 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 兰州 730000)

摘要: 研究了 15 MeV/u $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 体系三裂变反应过程中体系的集体运动动能、核-核相互作用势、集体运动总动能以及核子激发能的演化过程, 并讨论了该反应过程的能量耗散问题。通过与两裂变时体系总动能 ε_{tot} 和 $\Theta_{\text{c.m.}}$ 关联图作对比, 初步得出三裂变反应体系的第一次裂变是极端深度非弹性散射过程; 进一步分析了三裂变与两裂变反应体系总动能与碰撞参数的关系, 发现小碰撞参数下两裂变比三裂变反应耗散的能量多大约 150 MeV, 大碰撞参数下三裂变比两裂变反应多消耗 300 MeV。

关键词: 三裂变; 体系总动能; 深度非弹性散射

中图分类号: O571.4, O571.6

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.32.01.030

1 引言

原子核的多重碎裂, 是中高能重离子碰撞过程中的一种普遍现象。随着入射能量的降低, 在库仑位垒之上费米能之下的能量区域, 大约 20 MeV/u 附近, 核反应主要有两种反应机制, 即小碰撞参数时的熔合反应与复合核形成, 和大碰撞参数下伴随着深度非弹性散射与快裂变的三体分裂^[1]。除以上两种反应机制外, 在该能量区域, 人们还观察到另外一种反应机制, 即动力学三分裂反应。对于很重的对称反应体系, 在相当充分的深度非弹性碰撞过程中, 体系发生快速的三体裂变, 形成三个质量相当的碎块, 而且这三个碎块在空间位置上呈一条直线出射^[2-4]。实验上, 这种新的反应机制最近在 15 MeV/u $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 反应的测量中得到证实^[5-6]。

这种新的反应机制与传统上人们对三体裂变过程的认识不同。早期的三裂变反应主要是指第三个碎块为 α 粒子等轻碎片的核反应, 而对于形成三个质量差不多的碎块的快速三裂变的了解不多。这种快速的三体裂变现象应该是介于二体熔合反应与准裂变过程之间的一种新的实验现象。因此, 对重核对称反应系统的三裂变反应进行系统的分析和讨论, 无疑会丰富人们对重离子碰撞动力学、能量耗散机制、入射道关联及核结构效应等的认识^[2-4, 7-11]。

原子核反应的能量耗散, 也就是集体运动动能向原子核内部核子激发能转化的过程, 一直以来都是核物理界非常关注的问题^[12]。一般人们认为, 中低能核反应过程中的能量耗散通常有两种极限形式: 单体耗散和两体耗散。单体耗散源于核子在自洽的平均场的作用下与原子核表面发生碰撞。两体耗散过程则产生于核子与核子之间的相互碰撞。在低能核反应中起主导作用是单体耗散, 在温度较高时起主导作用的是两体耗散^[13-14]。理论上, Carjan 等^[15]提出观测重核体系三裂变反应第三个碎块质量数的大小, 可能是一种合适的区分单体和两体耗散机制的方法。在两体耗散的情况下, 第三个碎块具有较大的质量数; 在单体耗散的情况下, 第三个碎块的质量数较小。实验上 Skwira-Chalot 等^[16]研究了低能重核 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 体系三裂变反应的质量分布情况, 其第三个碎块质量在 100 附近, 该过程可能是两体耗散过程占主导。为了研究重离子反应过程中的能量耗散机制, 本文使用微观动力学模型研究了 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 体系的裂变反应, 分析了各碰撞参数下系统的集体运动动能的耗散情况。

2 理论模型

低能重离子碰撞过程中主要是平均场起作用,

收稿日期: 2014-08-25; 修改日期: 2014-11-26

基金项目: 乐山师范学院人才启动科研资助项目(Z1166); 乐山师范学院国家项目培育资助项目(Z1317); 四川省教育厅资助科研项目(14ZB0248)

作者简介: 李贤(1983-), 女, 河北石家庄人, 博士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: lixianlxwcq@163.com。

研究该能区的微观动力学模型是 Time-Dependent-Hartree-Fock (TDHF) 方法^[17]。随着能量的增大, 核反应过程中两体碰撞作用增强, 平均场的作用变弱, 核反应是平均场和受泡利阻塞效应影响的两体碰撞部分共同起作用。常用的理论方法是 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck / Vlasov-Uehling-Uhlenbeck (BUU/VUU) 方法^[18]和量子分子动力学模型 (QMD)。

QMD 是一个半经典的微观动力学输运模型, 由 Aichelin 等^[19]在上世纪 80 年代提出, 模型中考虑了多体关联, 同一个初态, 由于涨落的原因可以得到好多终态, 能够用来研究有很多反应道的重离子反应。该模型被广泛应用于研究中高能重离子碰撞反应过程中, 并获得很大成功。该模型中每个核子的单粒子波函数用一个高斯波包来描述, 其表达式为

$$\phi_i(\mathbf{r}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_r^2)^{3/4}} \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}-\mathbf{r}_i)^2}{4L}\right] \exp\left[\frac{i\mathbf{p}_i \cdot \mathbf{r}}{\hbar}\right], \quad (1)$$

其中: \mathbf{r}_i , \mathbf{p}_i 分别表示第 i 个核子在坐标空间和动量空间中的波包中心; σ_r^2 为粒子在坐标空间的波包宽度。模型中核子在体系的平均场中运动, 核子坐标中心和动量中心的演化遵从正则方程:

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}_i}, \quad \dot{\mathbf{p}}_i = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{r}_i}. \quad (2)$$

对于研究低能的重核反应问题, 常采用利用改进的量子分子动力学 (ImQMD) 模型。该模型是在 QMD 模型的基础上, 对核子的波包宽度、相空间占有数和 Skyrme 相互作用力做了改进, 更适合研究低能核反应问题^[20]。体系哈密顿量表示为

$$H = T + U, \quad (3)$$

$$T = \sum_i \frac{\mathbf{p}_i^2}{2m}, \quad (4)$$

$$U = U_{\text{loc}} + U_{\text{coul}}, \quad (5)$$

其中 $U_{\text{loc}}(\mathbf{r})$ 、 $U_{\text{coul}}(\mathbf{r})$ 分别为短程的 Skyrme 相互作用势能和库仑相互作用势能。

$$U_{\text{loc}} = \int \mathcal{H}_{\text{loc}}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (6)$$

其中: \mathcal{H}_{loc} 是所采用的 Skyrme 相互作用势能密度, 其表达式为

$$\begin{aligned} U_{\text{loc}} &= \int \mathcal{H}_{\text{loc}}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \\ &= \int \left\{ \frac{\alpha}{2} \frac{\rho^2}{\rho_0} + \frac{\beta}{\gamma+1} \frac{\rho^{\gamma+1}}{\rho_0^\gamma} + \frac{g_0}{2} (\nabla\rho)^2 + \right. \\ &\quad \left. g_\tau \frac{\rho^{\eta+1}}{\rho_0^\eta} + \frac{C_S}{2\rho_0} \left[\rho^2 - \kappa_S (\nabla\rho)^2 \right] \delta^2 \right\} d\mathbf{r}, \quad (7) \end{aligned}$$

其中第一项为两体项; 第二项为三体项; 第三项为表面能项; 第四项为动量相关项; 第五项为对称能和表面对称能项。库仑相互作用势能表达式为

$$U_{\text{coul}} = \frac{1}{2} \int \rho_i(\mathbf{r}) \frac{e^2}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \rho_j(\mathbf{r}') d\mathbf{r} d\mathbf{r}'. \quad (8)$$

3 计算方法、结果及讨论

入射能为 15 MeV/u $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 三裂变实验 2007 年在意大利 Catania 的 LNS INFN 超导加速器上完成^[5-6]。Skwira-Chalot 等^[6]通过在全空间上观测 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 反应所形成的复合体系的裂变反应, 从中挑选出满足如下条件的三分裂反应。三个碎块的总质量数范围是

$$A_{\text{pro.}} + A_{\text{tar.}} - 70 \leq A_1 + A_2 + A_3 \leq A_{\text{pro.}} + A_{\text{tar.}}, \quad (9)$$

其中: A_1 , A_2 , A_3 分别是最大、中等和最小碎块的质量数; $A_{\text{pro.}}$, $A_{\text{tar.}}$ 是分别是弹核和靶核的质量数。三裂变事件的动量要满足如下条件:

$$\left| \sum_{i=1}^3 \mathbf{p}_{\text{long}}(i) \right| > 0.8p_0, \quad \left| \sum_{i=1}^3 \mathbf{p}_{\text{trans}}(i) \right| < 0.04p_0. \quad (10)$$

其中: p_0 , $\mathbf{p}_{\text{long}}(i)$, $\mathbf{p}_{\text{trans}}(i)$ 分别表示弹核 ^{197}Au 的入射动量、任意碎块的纵向和横向动量。沿着束流方向为纵向, 垂直于束流方向为横向。在所获得数据的基础上, 给出了末态三裂变碎块的质量分布、角分布情况, 分析了其动力学性质。

关于重核系统的三裂变过程, 人们比较接受的是一个两步反应模式, 即弹核与靶核首先经过极端的非弹性碰撞形成变形的复合体系进而分裂成类弹核 (PLF) 和类靶核 (TLF)。在这一极端的非弹性碰撞过程中, 会有大数目的核子从弹核(或靶核) 迁移到靶核(或弹核) 从而形成一个较重的 TLF (或 PLF) 和一个较轻的 PLF (或 TLF); 在第二步过程中, 较重的 TLF (或 PLF) 再次分裂成两个碎块^[21-22]。

宏观输运模型计算表明^[23], 两体核摩擦在三裂变反应过程中起着重要作用, 对三个重碎块的形成起着某种指标性的作用。本文将利用 ImQMD 模型对重核三裂变反应过程中的能量耗散问题做出初步的讨论。

本工作中, 在碰撞参数 $b = 0 \sim 12$ fm 时, 共模拟了 20 多万不同的 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 核反应道, 其中两裂变反应数目为 16 万, 三裂变反应的数目为 4 万。从中选出和实验条件一致的三裂变反应的数目为 26 000。统计了各碰撞参数下的两体和三裂变的概率, 如图 1 所示。

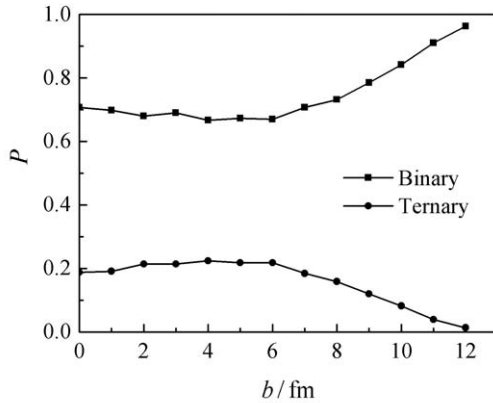


图 1 各碰撞参数下两裂变和三裂变的产生几率

图 1 中实方块和圆圈点线分别表示各碰撞参数下两裂变和三裂变的产生几率。在碰撞参数 $b = 6$ fm 之前, 三裂变反应产生几率逐渐增大。在 $b = 4 \sim 6$ fm 时, 达到最大且保持平稳, 然后三裂变几率迅速减小。对于两裂变反应, 在 $b = 6$ fm 之前几率缓慢减少, $b = 4 \sim 6$ fm 时保持平稳。在 $b > 6$ fm 后, 两体裂变几率急剧增加, 这种情况属于擦边碰撞, 仅有少量核子参与反应过程。各碰撞参数下, 两体和三裂变的几率之和接近 1 但不等于 1, 是因为在各碰撞参数下有少量的四裂变反应产生, 即 PLF 和 TLF 在以后的演化过程中都发生裂变, 分别又形成两个核碎片。

研究反应体系总动能与散射角的关联及分布, 可以分析出体系裂变反应具体经历如下的哪一过程: 熔合反应、深度非弹性散射、准弹性散射和弹性散射等。因此, 本论文研究 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 核反应的集体运动动能、核-核相互作用势、体系集体运动总动能和核子激发能等物理量。体系的核-核相互作用势表示为 E_{pot} , 其计算公式为

$$E_{\text{pot}} = E_{\text{tot}} - E_1 - E_2, \quad (11)$$

式中 E_1 和 E_2 分别是弹核和靶核的势能, 由下面两式得出:

$$E_1 = \int \mathcal{H}[\rho_1(\mathbf{r})] d\mathbf{r}, \quad (12)$$

$$E_2 = \int \mathcal{H}[\rho_2(\mathbf{r})] d\mathbf{r}. \quad (13)$$

其中的 \mathcal{H} 是弹核或靶核系统的有效相互作用势能, 为

$\rho(\mathbf{r})$ 的函数, ρ_{tot} , ρ_1 和 ρ_2 分别是总相互作用体系、弹核和靶核中的核子数密度瞬时分布函数, 可以用方程(5~8)得出。

根据相对论动能公式

$$E_{\text{kin}} = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} - m_0 c^2, \quad (14)$$

可以得到核体系的集体运动动能。式中: m_0 是核碎片的静止质量; p 为核碎片的动量, c 为光速。核反应体系集体运动总动能(总动能) ε_{tot} , 可通过

$$\varepsilon_{\text{tot}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}, \quad (15)$$

计算得出。体系激发能由公式

$$E_{\text{c.m.}} - \varepsilon_{\text{tot}} = E_{\text{c.m.}} - E_{\text{kin}} - E_{\text{pot}} \quad (16)$$

计算得出, 其中 $E_{\text{c.m.}}$ 是总入射能量。

图 2 表示碰撞参数 $b = 7$ fm 时, $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 体系核反应两裂变反应能量随时间的演化曲线, 其中红色点线是体系集体运动动能 E_{kin} , 蓝色点线是核-核相互作用势 E_{pot} , 青色点线表示核反应体系总动能 ε_{tot} , 紫色点线体系总激发能 $E_{\text{c.m.}} - \varepsilon_{\text{tot}}$ 。通过统计两裂变反应的时间节点, 得出 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 体系反应体系弹核和靶核发生接触的时间大概在 245 fm/c, 形成复合体系后发生两体裂变的时间大约在 625 fm/c。在 $t = 0$ 时, 体系集体运动动能部分转化成了两核相互作用势能, 这是由于模拟核反应程序中, 将弹核和靶核设置在相距 50 fm 处, 这样可以节约模拟的计算时间又不影响结果分析。在 $0 \text{ fm/c} < t < 245 \text{ fm/c}$ 范围内, 弹核和靶核逐渐靠近, E_{pot} 增加, E_{kin} 减少, 体系的总动能 ε_{tot} 几乎和体系入射能 $E_{\text{c.m.}}$ 相等。在到达两核接触点之后, E_{kin} 减少, E_{pot} 也开始减少, 体系的总动能 ε_{tot} 比 $E_{\text{c.m.}}$ 小很多, 二者之差即为系统的内部激发, 此阶段其急剧增加,

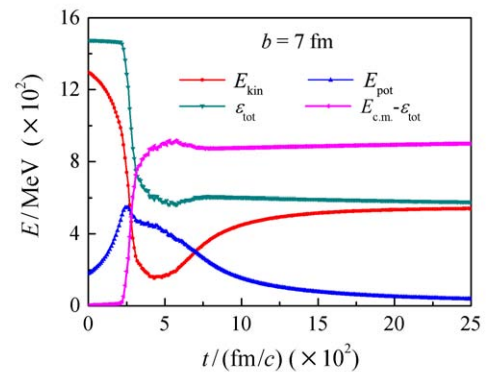


图 2 (在线彩图) $b = 7$ fm 时两裂变反应能量随时间的演化曲线

说明两核发生接触之后体系的核子被迅速激发。在发生分裂之后，核反应体系退激发，所以其激发能 $E_{c.m.} - \epsilon_{tot}$ 有稍微减少，同时体系的总动能 ϵ_{tot} 有所增加。时间大约在 750 fm/c 之后，系统的集体运动能量不再发生变化，核反应体系的内部激发能也不再发生变化，核反应系统达到了平衡状态。 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 体系三裂变反应可得到类似的能量演化曲线。

图 3 为在碰撞参数 $b = 0 \sim 12$ fm 时所有两裂变事件的 PLF、TLF 碎片的总动能 ϵ_{tot} 与 $\Theta_{c.m.}$ 的关系， $\Theta_{c.m.}$ 为体系发生两体裂变时的裂变轴和束流方向的夹角^[7]。图中有左右对称的两部分，分别表示 $\Theta_{c.m.}$ 小于和大于 90° 的裂变反应。结合表 1 可以发现，随着碰撞参数的增大，两裂变反应体系总动能分布越来越集中，主要分布在 1400 MeV 左右。能量损失约为 100 MeV。 $\Theta_{c.m.}$ 表主要分布在 25° 附近，也就是在虹角附近。在 Wilczynski 图中也给出过类似的结果^[5]。 $\Theta_{c.m.}$ 这一特征表明，体系非弹性散射的过程时间很短，体系很好地保持了入射方向的记忆。由图 1 可得两裂变反应较大的碰撞参数范围产生几率大，其特点是弹核和靶核几乎擦边反应，体系总动能损失较少。在小碰撞参数和中等碰撞参数下，弹核和靶核发生接触时重叠范围较大，参加反应的核子数较多，反应体系的最后动能越来越小，由集体运动能量耗散到单粒子激发的能量较多，体系总动能剩余较少， $\Theta_{c.m.}$ 各向同性，如图 3 总动能分布在 400 MeV 附近的区域，该能量区域的两裂变反应主要经历的是深度非弹性散射和强阻尼过程。

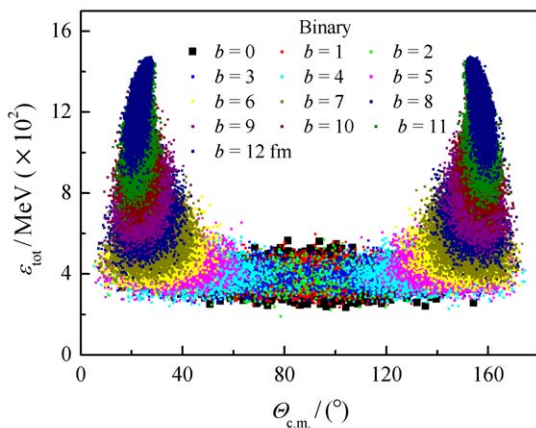


图 3 (在线彩图) 两裂变事件体系总动能 ϵ_{tot} 和 $\Theta_{c.m.}$ 的关联

图 4 为在碰撞参数 $b = 0 \sim 12$ fm 时所有三裂变事件第一次裂变形成的 PLF、TLF 碎片的总动能 ϵ_{tot} 与 $\Theta_{c.m.}$ 的关系。 $\Theta_{c.m.}$ 为体系发生第一次裂变时的裂变轴和束流方向的夹角。图中左右对称的点集中分布的区域，分别表示三裂变反应的类弹分裂和类靶分裂

两种裂变模式。从图 4 中我们可以看出，角分布和总动能的分布随碰撞参数的变化规律，其特征与两裂变的情况相同。结合表 1 中三裂变反应的事件数目，可以看到随着碰撞参数的增大，反应体系最后时刻的总动能越来越集中分布在某一区域，且总动能呈逐渐增大趋势。 $\Theta_{c.m.}$ 分布的峰值向虹角方向移动，峰值分布在 25° 和 165° 附近。这些特征说明三裂变事件第一次裂变经历的是非弹性散射过程。大碰撞参数下三裂变反应总动能分布在 1000 MeV 左右，小于两裂变的总动能，三裂变能量损失大约为 450 MeV，说明三裂变过程较两裂变过程，耗散了更多的集体运动动能到单粒子激发能中。结合图 1 三裂变反应主要发生在 $b = 0 \sim 6$ fm 的区域，在该参数区域体系总动能分布在 500 MeV 附近，有约 900 MeV 耗散到了核内部。故该参数区域的两裂变反应经历了极端深度非弹性散射过程。

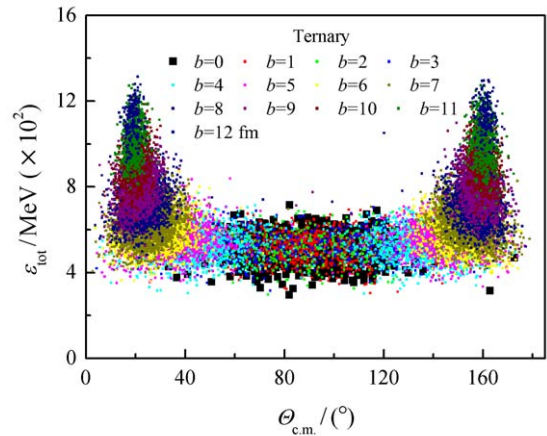


图 4 (在线彩图) 三裂变事件体系总动能 ϵ_{tot} 和 $\Theta_{c.m.}$ 的关联

表 1 各碰撞参数下两裂变和三裂变反应道的数目

b/fm	两裂变	三裂变	b/fm	两裂变	三裂变
0	3954	1048	7	18065	4709
1	4928	1350	8	15125	3283
2	2174	684	9	21980	3356
3	2802	869	10	14266	1389
4	7983	2680	11	27099	1162
5	7321	2375	12	26978	370
6	8738	2841			

图 5 进一步分析了体系总动能和碰撞参数的关联。方块点线是两裂变的情况，圆点线是三裂变的情况。从图中可以看到，对于两裂变事件在 $b = 0 \sim 5$ fm 时，体系发生两裂变后总动能 ϵ_{tot} 基本保持不变，大约在 350 ~ 450 MeV 左右。此参数范围的两裂变事件总动能 ϵ_{tot} 也维持不变，大约在 500 ~ 600 MeV 左右。与两裂变事件相比 ϵ_{tot} 大了约 150 MeV 左右。这一数

据说明, 在小、中等碰撞参数下两裂变事件比三裂变事件耗散到核子内部的能量多。 $b = 6$ fm 是一转折点, $b = 6 \sim 12$ fm 两裂变和三裂变事件的 ε_{tot} 都随着碰撞参数的增大逐渐增大, 但是增加的幅度不同, 两裂变事件比三裂变事件的体系总动能 ε_{tot} 增加得快。 $b = 9$ fm 是又一个转折点, 在 $b = 9$ fm 时, 三裂变与两裂变事件体系总动能 ε_{tot} 相等, 在 $b < 9$ fm 时, 三裂变比两裂变的 ε_{tot} 大, $b > 9$ fm 之后, 两裂变的体系总动能 ε_{tot} 迅速增大, 超越了三裂变事件的 ε_{tot} 。 在 $b = 9 \sim 12$ fm 时, 两裂变的体系总动能大约为 $800 \sim 1400$ MeV, 三裂变的体系总动能大约为 $800 \sim 1100$ MeV, 前者比后者多了 300 MeV。 在大碰撞参数下, 两裂变事件参与者与旁观者效应越来越明显, 参与反应的核子数目减少, 体系总动能消耗减少, 剩余总动能增多, 三裂变事件则有更多的能量耗散到了核子内部。 在实验上, Wilczynski 等^[5]统计了实验室中观测到的两裂变和三裂变反应系统的总动能分布峰值分别为 1350 MeV 和 1050 MeV, 无法得出各碰撞参数下总动能情况。 图 5 中清晰地显示了体系总动能和碰撞参数的关联情况, 可以得出系统总动能为 1350 MeV 的两裂变反应主要发生在 $b = 11.5$ fm 下, 系统总动能为 1050 MeV 的三裂变反应主要发生在 $b = 10.5$ fm 下。

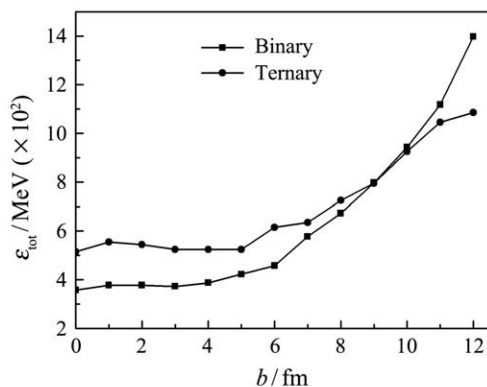


图 5 两、三裂变事件体系总动能 ε_{tot} 和 b 的关联

4 结论

在库仑位垒之上费米能之下的能量区域, 重核反应体系在经历了充分的深度非弹性碰撞后发生快速地三体裂变, 该过程不同于以往的轻粒子发射的三裂变反应, 其形成三个质量相当的碎块且三碎块在空间位置上呈一条直线出射, 是一种新的核反应机制。 本文利用微观输运模型 ImQMD 研究了该裂变模式在各碰撞下的产生几率, 其随碰撞参数增大呈现先增大后减小的规律, 在碰撞参数 $b = 4 \sim 6$ fm 时达到最大, 该裂变模式易发生在

该区域。

为了研究该裂变模式的反应机制, 本文首次对重核体系快速三裂变反应过程的能量耗散问题进行了动力学研究, 得出了体系核反应体系集体运动动能 E_{kin} , 核-核相互作用势 E_{pot} , 体系总动能 ε_{tot} 和总激发能 $E_{\text{c.m.}} - \varepsilon_{\text{tot}}$ 随时间演化的曲线。 通过对比两裂变与三裂变反应的体系总动能与角分布的关联图, 得出三裂变的初级分裂经历的深度非弹性散射过程。 本文还进一步分析了各碰撞参数下三裂变总动能和能量损失, 且与体系发生两裂变反应时的情况做了对比, 得出在碰撞参数为小于 6 fm 时, 两裂变比三裂变反应耗散的能量多大约 150 MeV, 在碰撞参数大于 9 fm 时, 三裂变比两裂变反应多消耗 300 MeV。 原子核能量耗散问题是核物理界研究的基本问题之一, 本文仅对快速三裂变反应的能量耗散问题进行了初步研究, 仍许多问题, 如在碰撞参数 $b = 6$ 和 9 fm 两裂变和三裂变能量耗散发生转折的问题, 还有待进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] LAUTESSE P, NALPAS L, DAYRAS R, *et al.* Eur Phys J A, 2006, **27**:349.
- [2] GLÄSSEL P, HARRACH D V, SPECHT H J, *et al.* Z Phys A, 1983, **310**: 189.
- [3] STEFANINI A A, GASINI G, MAURENZIG P R, *et al.* Z Phys A, 1995, **351**: 167.
- [4] CHARITY R J, FREIFELDER R, GOBBI A, *et al.* Z Phys A, 1991, **341**: 53.
- [5] WILCZYNSKI J, SKWIRA-CHALOT I, SIWEK-WILCZYŃSKA K K, *et al.* Phys Rev C, 2010, **81**: 067604.
- [6] SKWIRA-CHALOT I, SIWEK-WILCZYŃSKA K K, WILCZYNSKI J, *et al.* Phys Rev Lett, 2008, **101**: 262701.
- [7] LI X, TIAN J L, YAN S W, *et al.* Mod Phys Lett. A, 2011, **26**: 449.
- [8] HÖCHLI U T, ROHRER H. Phys Rev Lett, 1982, **48**: 188.
- [9] VON OERTZEN W, GEBAUER B, EFIMOV G, *et al.* Eur Phys J A, 2008, **36**: 279.
- [10] SINGER P, MUTTERER M, KOPACH Y N, *et al.* Z Phys A, 1997, **359**: 41.
- [11] DEGHEIDY A R, MARUHN J A. Z Phys A, 1979, **290**: 205.
- [12] YAN S W, SAKATA F, ZHUO Y Z. Phys Rev E, 2001, **63**: 021116.
- [13] FELDMIEIER H. Rep Prog Phys, 1987, **50**: 915.
- [14] AYIK S. Phys Rev C, 1987, **35**: 2086.
- [15] CÂRJAN N, SIERK A J, NIX J R. Nucl Phys A, 1986, **452**: 381.
- [16] SKWIRA-CHALOT I, SIWEK-WILCZYŃSKA K K, WILCZYNSKI J, *et al.* Int J Mod Phys E, 2006, **15**: 495.
- [17] VAUTHERIN D, BRINK D M. Phys Rev C, 1972, **5**: 626.
- [18] BERTSCH G F, DAS GUPTA S. Phys Rep, 1988, **160**: 189.

- [19] AICHELIN J. Phys Rep, 1991, **202**: 233.
- [20] WANG N. Development of Quantum Molecular Dynamics Model and its Application in Low Energy Nuclear Reaction[D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2003(7): 7.
- [21] LI Y J, YAN S W, JIANG X, *et al.* Nucl Phys A, 2013, **902**: 1.
- [22] JIANG X, YAN S W. Phys Rev C, 2014, **90**: 024612.
- [23] CÂRJAN N, SIWEK-WILCZYŃSKA K, SKWIRALCHALOT I, *et al.* Int J Mod Phys E, 2008, **17**: 53.

Energy Dissipation in the Process of Ternary Fission in Heavy Nuclear Reaction

LI Xian^{1, 1)}, YAN Shiwei^{2, 3}, WANG Chengqian¹

(1. Leshan Normal University, Institute of Physics and Electronic Engineering, Leshan 614000, Sichuan, China;

2. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Nuclear Theory Center, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract: We studied the evolution of the collective motion, interaction potential, the total kinetic and excitation energies in ternary fissions of $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ system at 15 MeV/u, and discussed energy dissipation of this reaction. Through the comparison with energy-angle correlation data in binary fissions, we preliminarily concluded that the first fission of ternary fission was an extreme deep-inelastic process. We further analyzed the correlation of the total kinetic energy with impact parameters in both binary and ternary reactions, and found that the total energy of binary reactions systems was lost about 150 MeV more than ternary fission with small impact parameters, and with larger impact parameters the total energy of ternary reactions were lost 300 MeV more than binary reactions.

Key words: ternary fission; total kinetic energy of reaction system; deep-inelastic scatter

Received date: 25 Aug. 2014; **Revised date:** 26 Nov. 2014

Foundation item: Talent Program of Leshan Normal University(Z1166); Cultivating Program of Leshan Normal University (Z1317); Program of Education Department of Sichuan Province(14ZB0248)

1) E-mail: lixianlxwcq@163.com.

<http://www.npr.ac.cn>