

文章编号: 1007- 4627(2000)02-0077-05

# “颈”发射过程中的中等质量碎片的研究\*

张虎勇, 马余刚, 苏前敏, 蔡翔舟, 方德清,  
胡鹏云, 沈文庆, 冯 军

(中国科学院上海原子核研究所, 上海 201800)

摘 要: 系统地研究“颈”发射过程中的中等质量碎片, 能使我们更好地理解中能核反应的动力学和热力学性质. 采用具有不同的同位旋靶核研究了靶同位旋与中等质量碎片的关系, 以及区分反应过程中类弹、类靶产生的中等质量碎片和“颈”发射过程中产生的中等质量碎片.

关键词: 中等质量碎片; “颈”发射; 同位旋

中图分类号: O571.42 文献标识码: A

## 1 引言

解释为何高激发态的核系统碎裂成许多块中等质量碎片(IMF)是当前中能重离子反应研究的前沿之一, 也是近几年来人们非常关注的一个研究课题. 多重碎裂意味着激发核系统同时碎裂成几块 IMF, 这已被实验证实. 目前, 对多重碎裂的过程无论在实验上还是在理论上都进行了许多研究, 但是这些研究并没有给出关于高激发态的核碎裂成多个 IMF 原因的非常明确的答案.

人们对 IMF 发射的物理根源有许多理论上的探索, 其中主要有两种观点: 即动力学涨落和热核的统计退激. 所建立的产生 IMF 物理图象主要集中于中心碰撞. 近几年来, 人们又发现形状不稳定性也是 IMF 发射的一种非常有趣的机制<sup>[1,2]</sup>, 例如中心碰撞中产生的泡、圈和盘形等奇异结构, 这些都有利于 IMF 的产生. 在稍低能量下的周边碰撞中, 颈结构的形成也是产生 IMF 的一种可能途径.

在低能深度非弹性碰撞(DIC)中早已发现了颈结构<sup>[3]</sup>, 在 DIC 中类弹和类靶余核通过“颈”结构相连并且通过颈结构发生能量、角动量、质量、电荷的输运以及核子之间的交换. 颈结构形成于弹核和靶核从开始接触到开始分离的那段时刻. 在反应后

期, 由于表面不稳定性的增大, 颈结构开始分裂, 导致两核分离, 这是一个动力学的过程. 而中能重离子碰撞中, 颈碎裂产生的 IMF 是近几年来许多核物理学家非常感兴趣的研究课题. 本文将对颈发射的 IMF 特征以及颈的形成和反应机制作一介绍.

## 2 “颈”发射 IMF 的特征

Chen 等<sup>[4]</sup>在  $E_{\text{lab}} = 200 \text{ MeV}$  的  ${}^4\text{He} + {}^{232}\text{Th}$  系统的反应中观测到三体裂变, 同时还发现 IMF ( $3 \leq Z \leq 8$ ) 有特征的能谱和角分布, 角分布峰位出现于垂直轴附近的一个很小的角度范围内, 见图1. 在  $\theta_{\text{MF-FF}}$  接近于  $90^\circ$  时出现峰位. 而这与颈裂变过程的发射是一致的. 实验中还观测到颈发射 IMF 的平均动能  $\langle E \rangle$  与电荷  $Z$  存在线性依赖性, 尤其是在能量稍低时, 但在高轰击能时这种现象将会消失. 经典的弹道模型计算表明: 这种  $\langle E \rangle$  和  $Z$  的线性依赖性说明了颈碎片的初始动能超过了测不准关系所要求的最小值. 当然,  ${}^4\text{He} + {}^{232}\text{Th}$  是先产生熔合核然后再分裂的. 对于  $Z \geq 4$  的颈碎片的能谱宽度没有显著的改变(实心点), 几乎是一个常数, 如图2所示, 它们分别是 Li, Be, B, C, N 和 O 的实验室能谱图. 这个常数说明了颈形成时的断点构形和热分布几乎独立于颈碎片的原子数, 即它们是类似的.

\* 收稿日期: 1999-12-10

\* 基金项目: 国家杰出青年基金项目(19725521); 国家自然科学基金项目(19705012); 上海市科技启明星计划(97QA14038); 中科院院长基金特别支持; 国家教委和国家人事部资助留学回国人员基金

作者简介: 张虎勇(1974-), 男(汉族), 浙江慈溪人, 硕士研究生, 从事中能重离子核反应以及极端条件下的核反应研究.

以上观测结果是与一个具有固定的初始速度的颈碎片发射机制是一致的。

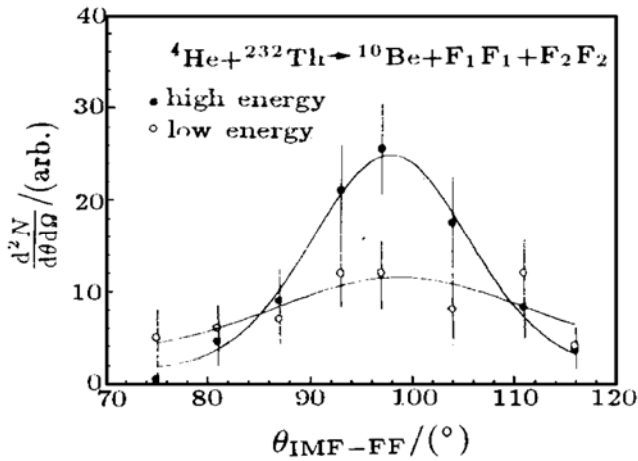


图1  $E_{lab} = 270 \text{ MeV}$  的  ${}^4\text{He} + {}^{232}\text{Th}$  反应中发射的  ${}^{10}\text{Be}$  碎片相对于裂变轴的角分布  
同时在反应中测量到两裂变碎片(用  $F_1 F_1$  来表示).

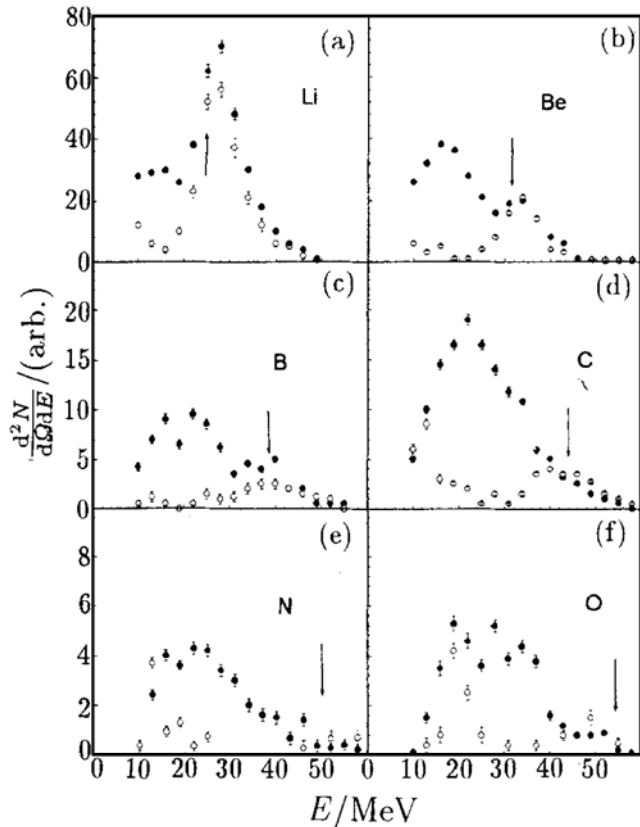


图2 碎片 ( $3 \leq Z \leq 8$ ) 的能谱分布  
● 表示垂直于裂变轴发射出来的 Li, Be, B, C, N 和 O 的碎片的实验室能谱图, ○ 为与裂变轴大约成  $50^\circ$  时测量到碎片的实验室能谱图, 箭头表示系统中各自碎片的库仑位垒的能量.

Toke 等<sup>[5]</sup>使用高效率的  $4\pi$  的探测器设备探测能量为  $E_{lab}/u = 28 \text{ MeV}$  的  ${}^{209}\text{Bi} + {}^{136}\text{Xe}$  系统产生的 IMF, 同时也探测到其它反应产物. 它们的发射机制表明了颈发射的 IMF 不仅是统计发射, 而且也

存在动力学过程, 这可从图3中明显地看出<sup>[6]</sup>. 图(a)中的点为蒸发衰变的实验数据, 也就是可以采用统计模型进行计算的统计发射那部分, 图(b)中的点为非蒸发衰变的实验数据. 从此图中我们可以很明显地知道系统反应是动力学的, 而不能只用统计模型进行处理. 这个过程在低能时比较明显, 在能量较高时就显得不太明显了. 在低于库仑位垒的低能区, 两个碰撞的核之间暂时形成了一个颈, 而这个颈可以看作是绝热的, 没有进行能量和核子的交换, 炮弹和靶核可以认为是独立的, 依然是两体问题. 可以想象在中等轰击能时形成一个颈区, 进行了能量和核子的交换, 不能进行绝热处理. 因而不能通过绝热的方法把三体问题转化为两体问题. 很明显, 当熔合体分裂时, 颈区被迫分裂或导致中等质量碎片的产生. 中能下的颈区不同于低能下的绝热颈和高能时的热“参与者”区.

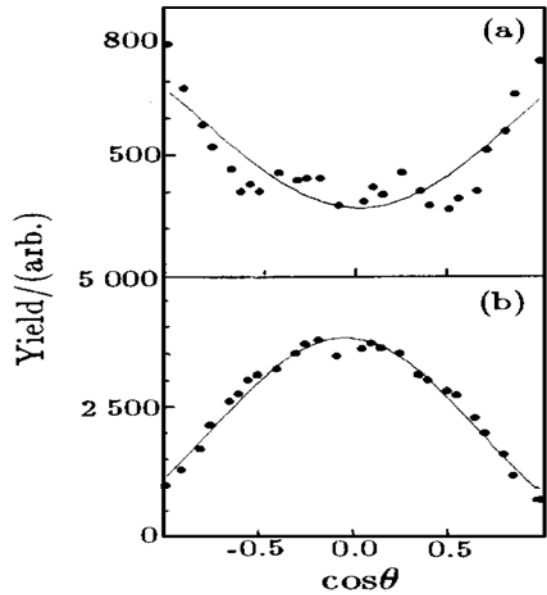


图3 碎片 ( $Z = 7$ ) 的角分布图  
(a) 蒸发衰变数据点的拟合, (b) 非蒸发衰变数据点的拟合.

从颈发射出来的 IMF 的速度一般在类弹和类靶之间<sup>[6]</sup>. 文献[6]采用的反应系统是  $E_{lab}/u = 50 \text{ MeV}$  的  ${}^{129}\text{Xe} + {}^{nat}\text{Cu}$ , 相对于从类弹余核中蒸发出来的碎片的电荷分布, 颈发射的碎片分布对于  $4 \leq Z_{imf} \leq 12$  显示出了一个增强的发射. 这个特征与非紧致的圆筒状轮廓形态的核发射的期待值是一致的. 颈发射的碎片与统计发射的产额之比大于1, 当  $Z_{imf} = 7$  时达到最大. 这个最大值部分是由于几何形状的破缺引起的. 文献[7]使用边界渗透计算, 得到亚

临界边缘破缺的可能性为  $p = 0.55$ , 核子安排在“亚铃状”几何空间中, 包括一个类弹碎片的外围和一个类靶碎片的外围以及通过中间圆筒状颈相连, 圆筒的长度为  $L = 12.6$  fm, 而半径是变化的. 在这一条件下进行了渗透计算, 发现颈产生的碎片在  $4 \leq Z_{\text{imf}} \leq 12$  范围内有增强发射. 当然, 利用不同的碰撞参数和入射能量的详细研究, 能够提供许多有关核物质不稳定性增长的一些信息. 例如是否产生了形状不稳定性, 即是否形成了气泡状的或者面包圈形状的, 或者圆盘状等过渡性的奇异核结构, 并随后如何碎裂, 又例如是否存在由 Spinodal 的力学不稳定性或化学不稳定性导致的碎裂过程等.

在对于颈发射过程的研究中, 一些作者<sup>[8]</sup>在数据中找到了明显的随机发射的特征, 然而另外一些作者<sup>[9]</sup>把颈的形成看作是一个动力学的过程. 建立动力学模式的理论研究表明碎片模式在碰撞的早期就决定了<sup>[10~12]</sup>, 但是并没有说明产生的中等质量碎片会出现在空间的何处. 然而, Donangelo 等<sup>[13]</sup>利用分子动力学模型结合早期团簇鉴别算法来鉴别 60 MeV/u 的 Xe+ Au 系统的 IMF 的数目、位置以及其速度. 表明中等质量碎片出现在系统的整个空间中, 并不是局限在任何一个特定的空间, 这也许是由于反应系统的动力学不稳定性的结果.

从图 4 可以看出: IMF 的原子数的平均值  $\langle Z_{\text{LMF}} \rangle$  和平均横向能量  $\langle E_{\text{LMF}}^{\perp} \rangle$  显示出相同的特征, 即它们与 IMF 的多重性  $N_{\text{IMF}}$  几乎是独立的. 这两个观测量暗示着 IMF 的形成是各自独立的, 这个假设可以通过下列过程来说明: 假定我们对每个事件的 IMF 多重性分成多重性几乎相等的两半, 分别标为  $Z_1$  和  $Z_2$  分布. 假定它们的方差分别为  $\sigma_{Z_1}^2$  和  $\sigma_{Z_2}^2$ , 同时它们的协方差  $\sigma_{Z_1 Z_2} = \langle \sum Z_1 Z_2 \rangle - \langle \sum Z_1 \rangle \langle \sum Z_2 \rangle$ , 那么我们可以定义关联系数  $\rho_{Z_1 Z_2} = \sigma_{Z_1 Z_2} / (\sigma_{Z_1}^2 \sigma_{Z_2}^2)^{1/2}$ . 如果两个 IMF 的  $Z_1$  和  $Z_2$  完全独立产生, 那么  $\rho_{Z_1 Z_2} = 0$ , 即无关联. 如果  $Z_1$  和  $Z_2$  是完全关联的, 则  $\rho_{Z_1 Z_2} = \pm 1$ . 图(c) 显示了  $\rho_{Z_1 Z_2}$  随  $N_{\text{IMF}}$  的结果, 显然在  $N_{\text{IMF}}$  不太大时,  $\rho_{Z_1 Z_2} \rightarrow 0$ . 但随着  $N_{\text{IMF}}$  的增加时, 由于碎裂源的有限尺寸效应,  $\rho_{Z_1 Z_2}$  会呈现一定的关联. 总之, 在  $N_{\text{IMF}}$  不太高时, 图 4 表明这类 IMF 的产生机制是几乎相互独立的, 它是一个新的碎裂机制, 具体参见文献[14]. 他们采用早期

的团簇鉴别算法来鉴别 IMF, 但是团簇并不是理想团簇, 因为它们受约束的, 可以定义它们之间的平均结合能来进一步研究. IMF 本身的结合能随着时间而增加, 因为团簇趋向于通过蒸发大多数高能核子而摆脱过多的激发能, 最后达到较低能量的稳定状态.

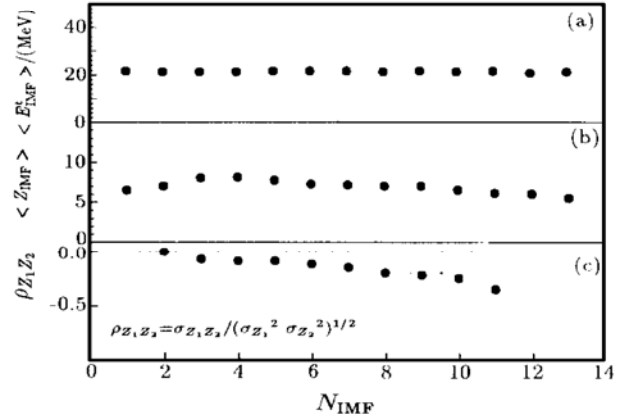


图 4 (a) 中等质量碎片的平均横向能量、(b) 平均中等质量碎片的原子序数和 (c) 关联系数随  $N_{\text{IMF}}$  的函数  
计算采用的系统是 60 MeV/u 的 Xe+ Au.

总之, 颈发射过程中发射的 IMF 主要在与裂变轴的垂直线附近某个较小的角度范围内, 从图 1 可看出中等质量碎片在垂直轴的附近有一个明显的增强. 在  $E_{\text{lab}} = 200$  MeV/u 的  ${}^4\text{He} + {}^{232}\text{Th}$  反应中, 对  $Z \geq 4$  的颈碎片的能谱宽度是一个相对常数. 颈发射过程不仅是一个统计发射过程, 而是一个动力学的过程. 颈发射过程产生的碎片的速度在类弹和类靶之间, 碎片会出现在系统的整个空间. 图 4 说明  $\langle Z_{\text{IMF}} \rangle$  和  $\langle E_{\text{IMF}}^{\perp} \rangle$  与 IMF 的多重性是相对独立的. 这些特征表明, 颈发射 IMF 是一个新的碎裂机制.

### 3 “颈”形成和反应机制

当然颈发射产生的 IMF 与颈的形成以及颈的碎裂有密切的关系, 探索中能重离子反应中颈的形成和碎裂对于颈发射产生的 IMF 也是一件非常有意义的事情. 文献[15] 对之进行了研究, 采用的是 30 MeV/u 的  ${}^{40}\text{Ca} + {}^{40}\text{Ca}$  系统, 他们发现在  $b = 6$  fm 时碰撞系统产生的 IMF 较多, 此时反应机制主要是 DIC 和多重碎裂, 另外还有少量的非完全融合 (ICF) 成分. 当  $b = 7$  fm 时, IMF 相对减少, 此时反

应机制主要是 DIC, 而 ICF 和多重碎裂占次要地位. 当  $b=8\text{ fm}$  时, 此时 DIC 占主要优势, 见表1. 他们认为 IMF 最多是由于碰撞过程中颈碎裂所造成的, 此外还发现颈结构形成过程中碰撞系统相对密度涨落增长较慢, 相对涨落饱和值较小. 密度分布的二阶矩定义为

$$\sigma^2 = \langle \rho^2(t) \rangle - \langle \rho(t) \rangle^2, \quad (1)$$

则相对涨落为

$$\sigma_{\rho^2} = \frac{\langle \rho^2(t) \rangle}{\langle \rho(t) \rangle^2} - 1. \quad (2)$$

相对密度涨落以指数增长, 到时候增长将达到饱和. 在指数增长区

$$\sigma_{\rho^2} = A \exp\left|\frac{t}{\tau}\right|, \quad (3)$$

其中  $A$  是常数.  $\tau$  为弛豫时间. 它反映相对密度涨落增长的快慢. 饱和值的大小与平均 IMF 的多少是一致的, 见表2. 这实际上也体现了形状不稳定性的特征.

表1 不同碰撞参数时的平均中等质量碎片数

$b/\text{fm}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$\langle M_{\text{IMF}} \rangle$	1.196	1.238	1.231	1.378	1.353	1.231	1.413	1.113	0.320

表2 不同碰撞参数相对密度涨落增长的弛豫时间  $\tau$  和平均饱和值

$b/\text{fm}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$\tau (\text{fm} \cdot \text{c}^{-1})$	114.2	103.0	105.8	122.6	117.8	119.0	133.7	125.4	116.5
平均饱和值	1.071	1.103	1.069	1.059	1.056	1.004	0.972	0.881	0.738

从表1和表2可知碰撞参数  $b$  为中间部分时  $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$  为最大, 此时  $\tau$  比较大, 指数增长较为缓慢, 反应早期相对密度的涨落较小, 但饱和值较大. 它可能是由于多重碎裂引起的. 但数据并不是很明显. 我们将寻找另外的物理量来对它进行深入的研究.

文献[16]采用的是29 MeV 的  $^{208}\text{Pb} + ^{197}\text{Au}$  系统的周边碰撞. 对三部分(类弹、类靶、颈)发射出来的碎片进行了系统的研究. 反应过程中存在颈结构的形成和碎裂的过程, 当然也存在 DIC 的过程. 颈形成过程中将会导致 IMF 的发射, 颈产生的 IMF 分布在两块深度非弹性散射产生的碎片之间, 同时还发现了反应中存在一个竞争过程. 在此过程中早期颈先被其中一块反应物(类弹或类靶)所吸收, 接着进行进一步的两体裂变, 最后导致三碎块出射.

综上所述, “颈”的形成以及发射 IMF 可能主要是与 DIC 和多重碎裂反应机制联系在一起的.

## 4 理论和实验研究的设想

对于颈发射的研究当然还有许多, 对于颈发射过程中的 IMF 也还有许多值得研究的问题, 要确切地了解颈发射过程中 IMF 特征, 当然可以从许多方

面着手进行系统的研究. 目前正在采用同位旋相关量子动力学(IQMD)模型对颈发射过程中的 IMF 进行系统的研究. 对于 IMF 需要解决的关键问题是如何去区分反应过程中的类弹、类靶产生的 IMF 以及颈发射过程中产生的 IMF. 我们计划在 IQMD 程序中加入一些包含物理因素的窗来区分系统中各部分产生的 IMF, 进一步研究颈发射过程中产生的 IMF 以及颈的性质.

对于中能重离子反应颈发射过程中产生的 IMF 的系统研究, 能够更好地理解中能核反应的动力学和热力学的性质. 许多核物理学家们正在研究 IMF, 然而他们在研究 IMF 时, 没有过多地考虑到靶系统对于 IMF 的影响. 为之我们将在兰州重离子加速器国家实验室做颈发射的实验, 采用两组不同的同位旋靶核  $^{58}\text{Ni}$  和  $^{64}\text{Ni}$  测量发射粒子和中等质量碎片的能谱、电荷分布和角分布, 并与类弹碎片进行符合测量. 数据分析时研究哪些条件可帮助区分颈发射和类弹发射或其它机制发射, 例如中快度窗、多重性窗等. 还可以深入研究 IMF 与靶核同位旋依赖性的关系. 同时我们加上探测器构型条件的

IQMD 和诸如中快度、多重性等条件对发射 IMF 的不同来源和特征进行理论探索。

## 参 考 文 献

- [1] Morreto L G, Kin Tso, Colonna N *et al.* New Rayleigh-Taylor-like Surface Instability and Nuclear Multifragmentation [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 69: 1 884~ 1 888.
- [2] Fields D E, Kwiatkowski K, Morley K B *et al.* Neck Emission of Intermediate-mass Fragments in the Emission of Hot Heavy Nuclei [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 69(24): 3 713~ 3 716.
- [3] Schroder W U, Huizenga J R. In *Treatise on Heavy-ion Science* [J]. Edited by Bromley D A. Plenum, New York, 1984, 2: 185~ 188 and reference therein.
- [4] Chen S L, de Souza R T, Cornell E *et al.* Emission of Intermediate Mass Fragments during Fission [J]. *Phys Rev*, 1996, C54(5): R2 114~ R2 118.
- [5] Toke J, Lott B, Baldwin S P *et al.* Intermediate-mass Fragment Decay of the Neck Zone Formed in Peripheral  $^{209}\text{Bi} + ^{136}\text{Xe}$  Collision at  $E_{\text{lab}}/u = 28$  MeV [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 75 (16): 2 920~ 2 923.
- [6] Montoya C P, Lynch W G, Bowman D R *et al.* Fragmentation of Necklike Structures [J]. *Phys Rev Lett*. 1994. 73 (23): 3 070~ 3 073.
- [7] Bauer W, Dean D R, Mosel U *et al.* New Approach to Fragmentation Reactions: The nuclear lattice model [J]. *Phys Lett*, 1985, 150B: 53~ 56.
- [8] Moretto L G, Jing K X, Wozniak G J. Transition State Rates and Complex Fragment Decay Width [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(18): 3 557~ 3 560.
- [9] Toke J, Agnihotri D K, Baldwin S P *et al.* Dynamical Fragment Production as a Model of Energy Dissipation in Heavy-ion Reactions [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 77(17): 3 514 ~ 3 517.
- [10] Dorso C, Randrup J. Early Recognition of Clusters in Molecular Dynamics [J]. *Phys Lett*. 1993. B301(4): 328~ 333.
- [11] Dorso C O, Aichelin J. When and How are Fragments Formed in Heavy Ion Collisions [J]. *Phys Lett*, 1995, B345(3): 197~ 202.
- [12] Bondorf J P, Indier K, Mishustin I N. Self-organization in Expanding Nuclear Matter [J]. *Phys Lett*, 1995, B359 (3, 4): 261~ 267.
- [13] Donangelo R, Souza S R. Mechanisms of Intermediate Mass Fragment Formation [J]. *Phys Rev*, 1998, C58(5): R2 659 ~ R2 662 .
- [14] Toke J, Agnihotri D K, Baldwin S P *et al.* Dynamical Fragment Production as a Mode of Energy Dissipation in Heavy-ion Reactions [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 77(17): 3 514~ 3 517.
- [15] 陈列文, 葛凌霄, 张丰收. 中能重离子反应中“neck”的形成和碎裂 [J]. *高能物理与核物理*, 1997, 21: 1 018~ 1 023.
- [16] Lecolly J F, Stuttge L, Aboufirassi M *et al.* Neck Formation and Decay in  $\text{Pb} + \text{Au}$  Collision at 29 MeV/u [J]. *Phys Lett*, 1995, B354(3): 202~ 207.

## Study on Intermediate Mass Fragment during Process of “Neck” Emission\*

ZHANG Hu-yong, MA Yu-gang, SU Qian-min, CAI Xiang-zhou, FANG De-qing,  
HU Peng-yun, SHEN Wen-qing, FENG Jun

(Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** By systematic study of the IMF produced the “neck” emission process, one can understand much better about the dynamics and thermodynamics of the intermediate energy nuclear reaction. The isospin dependence of IMF emission was studied for the reaction system with different isospin target nucleus and the different IMF production mechanisms that originate from projectile-like, target-like and the “neck” were distinguished.

**Key words:** intermediate mass fragment(IMF); “neck” emission; isospin

\* **Foundation item:** NNSF for Distinguished Young scholar (19725521); NSFC(19705012); Shanghai Science and Technology Development Fund (97QA14083); Special Foundation of Presidential of the Chinese Academy of Sciences; Scientific Research Foundations for Returnd Overseas Chinese Scholar by the National Human Resource Affair Administration and Education Administration of China