

25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应中前中角区碎片发射研究*

王金川 詹文龙 郭忠言 郝鸿飞 周建群 赵有雄 罗永峰

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(1999 年 8 月 22 日收到; 1999 年 10 月 3 日收到修改稿)

从 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应前中角区出射碎片的能谱、角分布和 Z 电荷分布出发, 讨论了碎片发射机制随出射角和核电荷数 Z 的渐进变化; 用改进的量子分子动力学 (MQMD) 模型研究了碎片角分布及 Z 电荷分布, 理论计算和实验值整体上符合较好, 但在前角区 MQMD 模型低估了碎片的产额, 在中角区对于 Z 接近弹核的碎片, 理论计算比实验值偏高, 碎片产物的角分布及 Z 电荷分布还与统计模型 GEMINI 进行了比较, 发现在前角区平衡蒸发的成分所占比例很小, 中角区所占的比例有所增加, 但仍然是较小的比例. 随着碎片核电荷数 Z 的减小, 平衡核的蒸发成分逐渐减少, 非平衡的中速成分逐渐占主导地位.

PACC: 2570, 2587

1 引 言

中能区(10–100MeV/u)重离子碰撞的实验和理论研究是当前核物理研究的热点之一. 复杂碎片(或中等质量碎片 IMF)发射是中能重离子反应的一个重要方面. 通过实验测量这些碎片产物, 并在理论上对其起源等问题进行深入研究, 可以探知核物质热力学性质和与能量耗散相关的碰撞动力学性质的有关信息, 区分不同的机制来源及它们的竞争和过渡, 可以深入了解高激发核物质的形成机制、内部特性和衰变过程等. 有鉴于此, 近年来关于复杂碎片发射的实验和理论研究受到了极大的关注^[1–4]. 研究表明, 中能重离子反应在不同碰撞参数下产生的碎片能谱、角分布、 Z 电荷分布、多重性等, 由于产生机制的不同而表现出不同的特征. 在后角区, 出射的碎片主要来自于非完全熔合热核的统计蒸发^[4–6]; 在前中角区, 弹核碎裂的类弹成分、非平衡的发射成分及非完全熔合的统计蒸发成分都有不同程度的贡献. 碎片的来源比较复杂, 其中非平衡成分发射机制的理论解释还不很清楚^[1,4,7]. 本文以 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应为例, 从前中角区碎片产物的能谱、角分布、 Z 电荷分布出发, 尝试结合 MQMD 等模型对物理观测量的实验数据进行分析讨论, 探讨碎片来源和反应机制的演化.

2 实验概况

实验是在 HIRFL 的 TR4 终端上进行的. 利用 25MeV/u ^{40}Ar 轰击厚度为 3.936 mg/cm² 的 ^{115}In 靶, 束流强度为 10–15 nA. 总的实验探测器布局见文献[8]. 本文所涉及的碎片探测器如下: 在前角区的 6° 和 8.5° 分别放置由起始时间探测器和粒子鉴别望远镜组成的两套 TOF 望远镜^[9], 11.5° 的望远镜则由 3 片穿透型 Si 探测器及光二极管 (PD) 读出的 CsI(Tl) 晶体组成^[10], 距离靶 20 cm. 置于 TR4 终端靶室内转臂上的对数密度多叠层望远镜由纵向气体电离室、大面积位置灵敏 Si 探测器、PIN 型大面积 Si 光敏二极管及 CsI(Tl) 闪烁体阵列组成^[11], 距靶心 30 cm, 完成其余角度的碎片测量. 实验中采用 $\Delta E - E$ 方法鉴别粒子, $Z \geq 3$ 以上的 IMF 被清楚地鉴别, 实验中所用的气体探测器、Si 探测器及 CsI(Tl) 闪烁体探测器分别做了能量刻度, 经过对不同探测器系统测量得到的能谱进行比对、归一, 得到反应产物的能谱, 在此基础上进一步得到碎片角分布和 Z 电荷分布.

3 数据分析

图 1(a) 是 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 在 $\theta_{\text{lab}} = 8.5^\circ$

* 国家自然科学基金(批准号: 19475054)资助的课题.

出射碎片 $Z=3$ 到 $Z=18$ 的能谱. 从此小角度碎片产物能谱可以大致看出, 至少存在两组成分: 一组是能量较高的组分, 其在接近弹核束流速度处成峰, 这对于那些 Z 接近炮弹的碎片更加明显, 质量较重

的靠近弹核电核的碎片的动量分布比远离炮弹的轻碎片的动量分布窄. 随着碎片 Z 的减小, 这一组分逐渐减少, 它主要来自于较周边的反应过程, 包括准弹和弹核碎裂过程等. 这组成分的低能量一端有

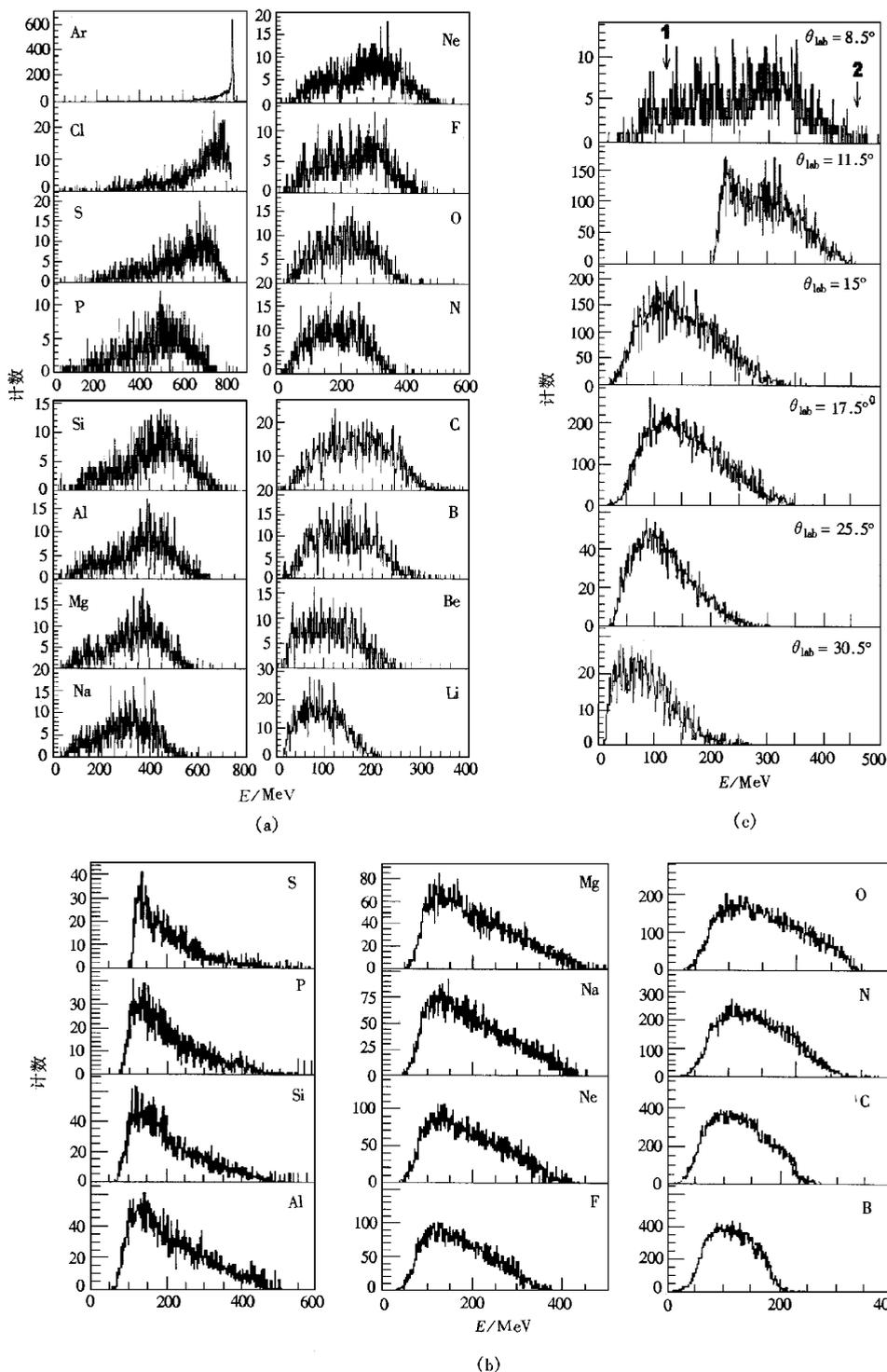


图 1 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应出射碎片能谱

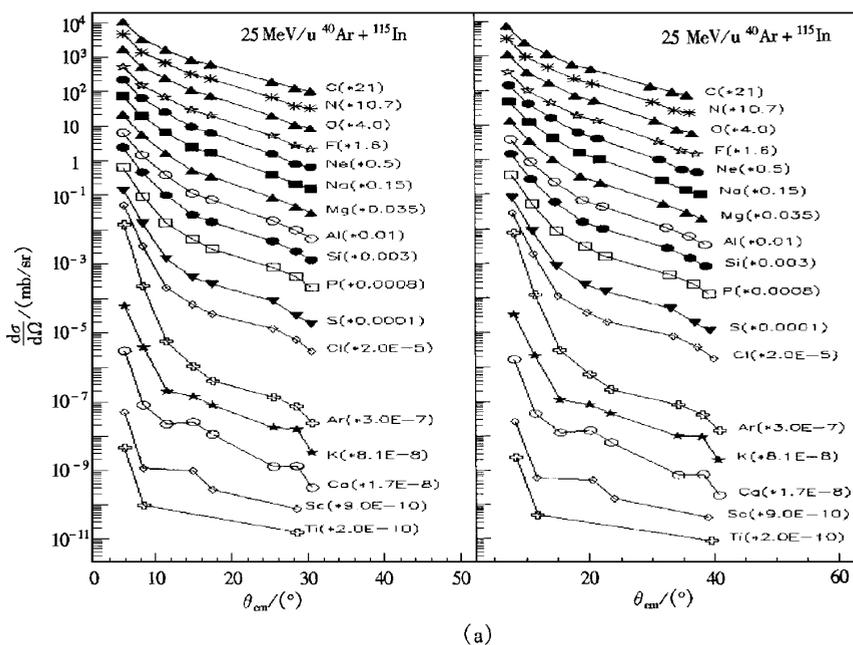
(a) $\theta_{\text{lab}} = 8.5^\circ$ (b) $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ$ (c) $Z=9$ 氟碎片在不同探测角度

一个尾巴,它们可能来自于碰撞参数更小的耗散较为强烈的反应过程的贡献;另一组能量较低的分,在比库仑位垒略高处成峰,随着 Z 的减小,此组低能耗散组分更加明显,这可能是深部非弹性碰撞(DIC)或类熔合产物的贡献,对应着一个强耗散过程,这在图1(b)中看得更为清楚.图1(b)为同一反应在 $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ$ 处碎片 $Z = 5$ 到 $Z = 16$ 的能谱.由于二维位置灵敏对数密度望远镜碎片测量时探测阈很低,故能谱的低能部分测得较完整.低能峰位随碎片 Z 的增加而略有增加.在这些碎片能谱中,主要是低能强耗散成分,具有接近于弹核速度的高能弹核碎裂成分基本可以忽略.由于 $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应系统的擦边角为 $\theta_{\text{gr}} = 6.5^\circ$,人们在研究像图1(b)这样的中角区能谱的有关成分时发现,低能成分不能完全由平衡源的发射来解释,其中相当大的一部分来自于非平衡的发射^[12].Joua及Borderie等^[13]通过 $27\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 测量与重余核符合的IMF,发现中等速度源IMF的主要部分来自于DIC过程.Xu等人^[14]通过研究 $22.3\text{MeV}/u$ $^{32}\text{S} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应的复杂碎片发射后指出,非平衡成分质心系下的角分布前角成峰,表明它们在系统达到完全统计平衡前发射出来,其能谱展宽,带有高能尾巴.图1(c)给出了氟碎片产物在 $\theta_{\text{lab}} = 8.5^\circ, 11.5^\circ, 15^\circ, 17.5^\circ, 25.5^\circ, 30.5^\circ$ 等时的能谱.其中 11.5° 的能量探测阈较高,而其他角度的能量阈较低,这是由于 11.5° 的 ΔE_1 采用Si探测器,而处于 8.5° 的TOF望远镜和处于其他角度的对数密度多叠层探测器的 ΔE_1 都是能量阈较低的气体电离室.图中箭头标号1对应着全阻尼时碎片分开前的库仑能,箭头2处代表束流速度所对应的能量.图1(c)显示出,随着探测角度的增加,碎片能谱逐渐由高能弹核碎裂成分向低能的耗散成分过渡.能谱中除了有比束流速度对应能量稍低的高能成分及低能平衡蒸发成分以外,可能还存在着介于二者之间的中速非平衡成分,能谱的运动源分析将在后续文章中给出.

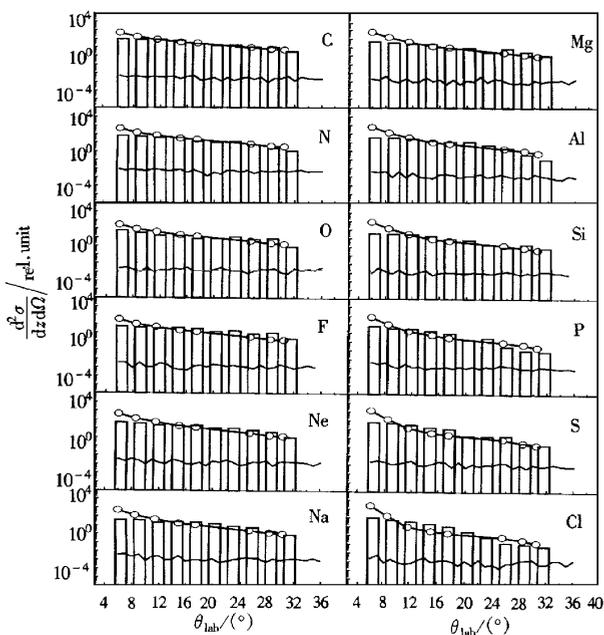
像能谱一样,角分布和 Z 电荷分布也能提供重离子反应机制的重要特征.图2(a)为 $25\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应 $Z = 6$ 到 $Z = 22$ 的碎片产物在实验室系和质心系下的角分布.从图可见,出射碎片产物的角分布呈前冲型,在前角区角分布的斜率更陡一些.随着探测角度的增大,截面逐渐减少,角分布随着碎片质量的减小而略有展宽.这表明,来自弹核碎裂的IMF产物主要在前角区,尤其在擦边角附近明显成

峰.对于邻近弹核的几个元素,由于还有来自准弹转移反应等快过程的贡献,故这种趋势更加明显.随着角度的增加,特别在 $\theta_{\text{lab}} = 12^\circ$ 到 30.5° 的中角区,正如能谱分析时所提到的,弹核碎裂成分逐渐减小直至忽略,渐渐过渡为来自非平衡成分和低能成分的贡献,角分布的斜率变化变缓.随着碎片电荷数和质量的减少,这种趋势更明显.图2(a)给出了 $25\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应的碎片产物在不同角度下的 Z 电荷分布.图中显示,碎片 Z 电荷分布随着实验室系探测角度的增大,从前角区随着 Z 的增加逐渐上升到某一峰值,变化到中角区呈逐渐下降的趋势,而且探测角度越大,下降的速率越快,碎片的产额越低.这表明,前角区的碎片主要是弹核碎裂的产物,核电荷数接近入射弹核的碎片产物的截面明显较高,说明还有来自准弹转移反应等直接反应过程的贡献,这与角分布的分析相一致.中角区随着角度的增加,靠近弹核的重碎片产额迅速降低,远离弹核的轻碎片产物产额升高.大部分可能是来自于由部分弹靶组成参加者区域反应衰变的产物或是阻尼耗散产物的贡献,在这些非平衡产物中夹杂着少量的低能平衡蒸发的成分.为了进一步了解碎片的各种来源,下面尝试用MQMD等模型对碎片产物的角分布和 Z 电荷分布做进一步的定量分析.

QMD模型是多体理论,实际计算时采用逐个事件方式模拟,保留了物理涨落和关联,可以自然地描述重离子碰撞中的碎块形成过程.这里采用的MQMD模型^[15],是在一般的QMD模型的基础上发展起来的.它克服了一般QMD模型的不足.通过引入参数化的Pauli势改进了对核子费米性质的描述,并考虑了质子与中子的区分,用重构模型描述碎块的形成过程,避免了非物理的线状核的产生;初始化采用摩擦冷却方法进行核基态抽样,使抽样的弹靶核处于真正的核基态.具体计算时核势采用软势, $K = 200\text{MeV}$.另外由于动量相关势(MDI)有利于碎片的产生,计算中也考虑了MDI的因素.如果两核子的距离小于 3.5fm ,则假设这两个核子属于同一个结团.对每种弹靶组合,在适当的选取范围内考虑一组碰撞参数值,对于每个设定的碰撞参数,计算500个模拟事例,每个碰撞事例的模拟演化时间取到 $500\text{fm}/c$ 时截断,最后根据不同碰撞参数的结果所占的不同权重因子将它们叠加起来,用PAW按逐个事件方式进行后处理后生成所需的物理结果.



(a)



(b)

图 2 前中角区碎片产物角分布

(a) 左为实验室系, 右为质心系 (b) $Z=6-17$ 碎片产物角分布与计算结果比较. 粗实线+空心圆点为实验点, 条状直方图为 MQMD 模型的计算结果, 细实线为统计蒸发模型 GEMINI 的计算结果

图 2(b) 为 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应的 $Z=6-17$ 碎片产物角分布和理论计算比较图, 图 3(b) 为碎片 Z 分布与理论计算的比较图. 理论计算值按出射碎片 $Z=6$ 在 $\theta_{\text{lab}}=15^\circ$ 的实验数据进行相对归一. 从整体上来说, 经过改善的 MQMD 模型由于恰当地考虑了各种相互作用、两体核子-核子碰撞、并

将相空间中 Pauli 阻塞效应通过参数化的 Pauli 势体现出来, 故计算结果不论是角分布还是 Z 分布都和实验点符合得比较好. 但在局部上也有不足之处. 例如图 3(b) 25.5° 以后的大角度, 对于弹核 ($Z=18$) 周围的碎片 ($Z=15-20$), 由于形成机制复杂, MQMD 模型考虑因素不够, 存在着理论计算值低于

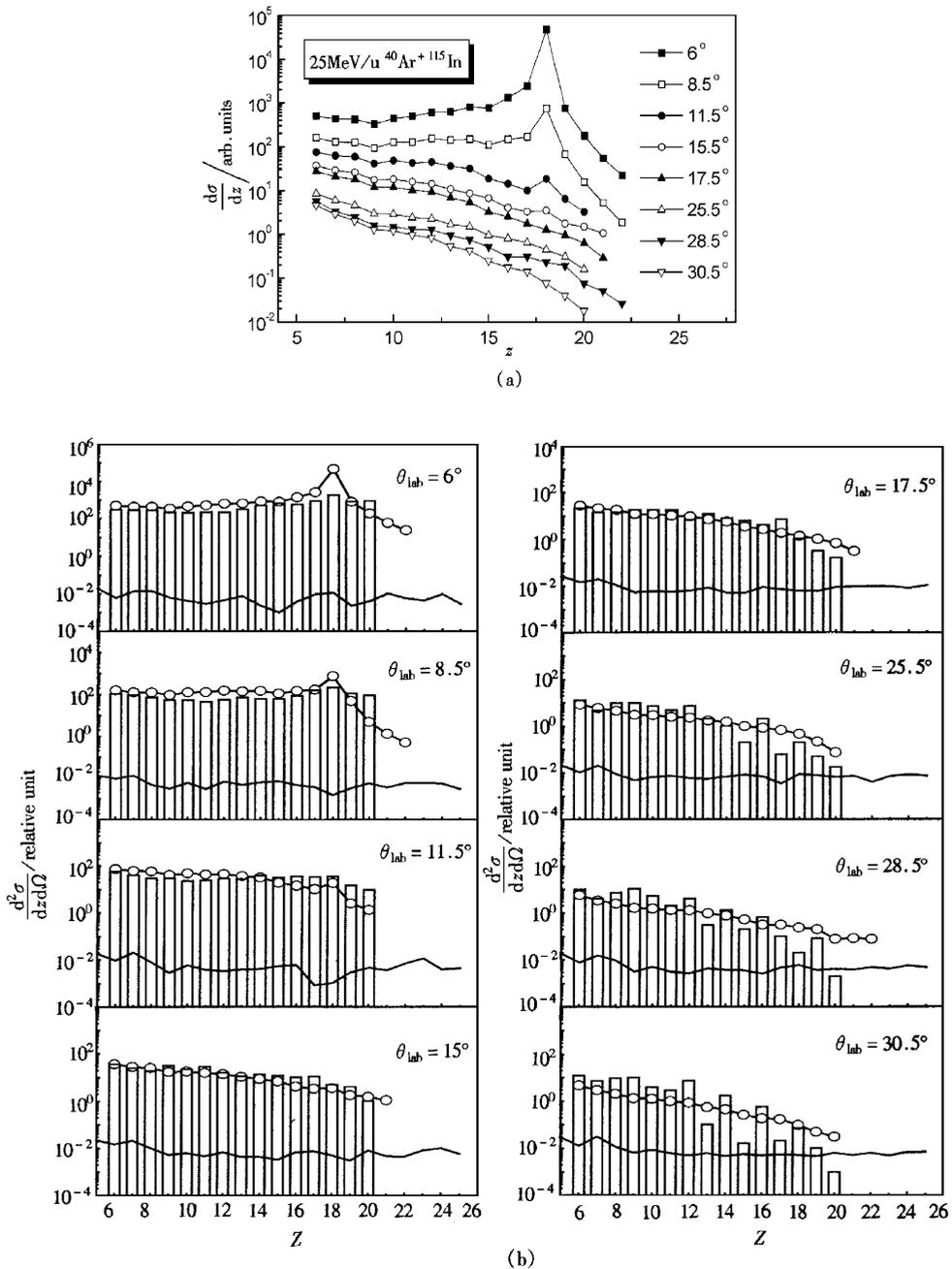


图 3 (a) 碎片产物在不同出射角的 Z 电荷分布 (b) 碎片产物 Z 电荷分布与计算结果比较, 粗实线 + 空心圆点为实验点, 条状直方图为 MQMD 模型的计算结果, 细实线为统计蒸发模型 GEMINI 的计算结果

实验值的趋势, MQMD 模型的计算所考虑的因素还进一步需要完善和改进. 在离擦边角较近的小角度, MQMD 模型计算也低估了重离子碰撞过程中的碎片的产额. 这主要是由于在擦边角附近多为直接反应的产物, 弹核和靶核重叠区域非常小, 多为表面或擦边相互作用, 弹靶核之间能量交换少, 能量耗散程度非常浅; 而对弹靶核重叠区域很少时碎片形成过程的完整描述, QMD 模型还不能做到. 从图 2(b) 还

可以看出, 在较小的中角度对于接近弹核的碎片, MQMD 的计算值高于实验点给定值. 究其原因, 可能是 QMD 低估了来自于周边碰撞的部分旁观者受激发的程度, 旁观者物质获得的能量不足, 如果旁观者物质中能够储存足够的能量使重碎片进一步碎裂成次重的碎片, 或许可以得到更符合实验的结果. 另一个原因是没有正确处理高激发碎片的衰变. 这个问题必需通过将动力学模型和统计模型结合起来

解决,通过动力学模型仔细研究系统达到平衡或准平衡的条件和判据,为后续的统计模型提供所需的输入参数来描述平衡或近平衡时的衰变行为.国际上已有人做了一些尝试^[16,17],取得了一定的成功,但将动力学模型和静态的统计模型耦合的做法,在两者衔接上仍存在许多不足,还有待今后加以研究解决.

还使用 GEMINI 程序计算了 $25\text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In } Z=6-17$ 碎片发射的角分布和 Z 电荷分布, GEMINI 程序使用两体级联衰变模型计算平衡的复合核的衰变,并考虑了从轻粒子蒸发到对称分开的所有可能的衰变过程.计算时采用非完全熔合反应的假设,即假定 75% 的弹核与靶核发生了反应.输入的物理参数如激发能和最大角动量等,分别采用碎裂统计模型 MMCSF^[18]和 Bass 模型^[19]估计.图 2(b)和图 3(b)分别给出了这些分布的实验点和 GEMINI 计算结果的比较.纵坐标数值按碎片 $Z=6$ 的实验数据进行相对归一.从图中实验点和 GEMINI 计算结果比较来看,在前角区平衡蒸发成分所占比例很小,中角区所占的比例有所增加,但仍然是较小的比例.从图 3(b) Z 分布可见, Z 值较小时的平衡蒸发成分所占比例比 Z 值较大时小.正如能谱分析时所说的那样,碎片在前角区主要是弹核碎裂成分,逐渐过渡到中角区为非平衡成分加少量的非完全熔合成分.而非平衡成分随着 Z 值的增加而逐渐减小.李祖玉等人在文献[5]中也得出了类似的结论.

4 结果讨论

用对数密度多叠层望远镜等多组探测器,在实验室系 6° 至 30.5° 的角度范围内测量了 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应的能谱、角分布和 Z 电荷分布.用 MQMD 模型和统计模型 GEMINI 研究了碎片角分布及 Z 电荷分布. MQMD 理论计算和实验值整体上符合得较好.在前角区碎片的高能成分主要来自于弹核碎裂的反应过程,弹核附近的类弹碎片还有准弹及转移反应的贡献.除此之外,碎片产物中还有少部分来自于 DIC 或类熔合核的能量较低的成分;在大于擦边角的中角区,出射碎片以非平衡的中速成分和低能平衡蒸发成分为主.随着出射碎片 Z 的减小,即产物越远离弹核,则平衡核的蒸发成分的所

占比例就越小,而非平衡的中速成分越来越占主导地位.对于非平衡的 IMF 成分,相当宽的碰撞参数范围都可贡献于它,因而不是单一的反应机制.它到底是来自于动力学过程,还是来自深部非弹碰撞或是来自于弹靶交叠的反应区域,目前还没有较统一的认识,还有待进一步的研究和证实.

感谢 HIRFL 的全体人员为本实验提供品质良好的 ^{40}Ar 离子束,感谢中国科学院近代物理所核反应室和核理论室提供有关的计算程序.

- [1] Z. Sosin *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A574**(1994), 474.
- [2] B. Tamain *et al.*, *GANIL P97 36/LPCC 97 18*, 1997.
- [3] P. Pawlowski *et al.*, *Z. Phys.*, **A357**(1997), 387; D. Benckroun *et al.*, *Z. Phys.*, **A356**(1997), 411; W. Q. Shen *et al.*, *Phys. Rev.*, **C56**(1997), 1996.
- [4] Zhi-yong He *et al.*, *High Energy Physics and Nuclear Physics*, **22**(1998), 13 [in Chinese] 贺智勇等, *高能物理与核物理* **22**(1998), 13.]
- [5] Zu-yu Li *et al.*, *High Energy Physics and Nuclear Physics*, **23**(1999), 753 [in Chinese] 李祖玉等, *高能物理与核物理*, **23**(1999), 753.]
- [6] Xing Qian *et al.*, *High Energy Physics and Nuclear Physics*, **20**(1996), 304 [in Chinese] 钱兴等, *高能物理与核物理*, **20**(1996), 304.]
- [7] D. Jouan *et al.*, *Z. Phys.*, **A340**(1991), 63.
- [8] Jin-chuan Wang, Ph. D. Thesis (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 1998), p. 42, [in Chinese] 王金川, 博士论文(中国科学院近代物理研究所, 1998), 第 42 页.]
- [9] Yuan-gen Lin *et al.*, *Acta Physica Sinica*, **47**(1998), 564 [in Chinese] 林源根等, *物理学报*, **47**(1998), 564.]
- [10] Zhong-yan Guo *et al.*, *High Energy Physics and Nuclear Physics*, **19**(1995), 333.
- [11] Jin-chuan Wang *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A368**(1996) 473.
- [12] A. Sokolov *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A562**(1993), 273; T. Kozik *et al.*, *Z. Phys.*, **A326**(1987), 421.
- [13] D. Jouan *et al.*, *Z. Phys.*, **A340**(1991), 63; J. Bondorf *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A488**(1988), 31c.
- [14] H. M. Xu *et al.*, *Phys. Rev.*, **C40**(1989), 18.
- [15] Hang Liu *et al.*, *Z. Phys.*, **A354**(1996), 311.
- [16] R. Wada *et al.*, Preprint of Cyclotron Institute, Texas A and M Univ. No. 96-05, 1996. p. 1.
- [17] H. Johnston *et al.*, Progress in Research, Ed. by Cyclotron Institute Texas A and M Univ, Texas, 1996, p. 44.
- [18] Sa Benhao *et al.*, *Phys. Rev.*, **C48**(1993), 628.
- [19] R. Bass, *Phys. Rev. Lett.*, **39**(1977), 265.

STUDIES OF FRAGMENT EMISSIONS AT FORWARD AND INTERMEDIATE ANGLES IN $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ REACTION*

WANG JIN-CHUAN ZHAN WEN-LONG GUO ZHONG-YAN XI HONG-FEI
ZHOU JIAN-QUN ZHAO YOU-XIONG LUO YONG-FENG

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

(Received 22 August 1999; revised manuscript received 3 October 1999)

ABSTRACT

On the basis of the energy spectra, the angular and Z distributions of the fragments emitted at forward and intermediate angle region in $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ reaction, the evolution of emission mechanisms of fragments with the emission angles of the fragments in the laboratory system and the charge numbers of the fragments is discussed. The model of modified quantum molecular dynamics (MQMD) is employed to investigate the angular and Z distributions of the fragments. The theoretical calculations are in good agreement with the experimental data in general. But in the forward angles the yield of the fragments is underestimated by MQMD model while in the case of the intermediate angle region, the calculated result is higher than the experimental data for the fragments whose charge numbers are in the vicinity of the projectile. The angular and charge distributions of the fragments are also compared with the statistical model of GEMINI. It is found that a small proportion of the statistical evaporation component exists in the forward angle region while in the intermediate angle region, this statistical evaporation component shows a little increase. With the decrease of the fragment charge number, the non-equilibrium intermediate-velocity component goes up step by step and plays a leading role while the equilibrium evaporation one diminishes gradually.

PACC : 2570 ; 2587

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19475054).