

# 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}, ^{58}\text{Ni}, ^{27}\text{Al}$ 反应中 前中角区碎片角分布和元素 Z 分布\*

王金川 詹文龙 郭忠言 郝鸿飞 刘航 周建群 赵有雄

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 测量了 25MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}, ^{58}\text{Ni}, ^{27}\text{Al}$  反应前中角区出射碎片的角分布和元素 Z 分布. 用改进的量子分子动力学 (MQMD) 模型研究了碎片的角分布和 Z 分布. 理论计算值和实验值整体上符合得很好, 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, 理论计算值比实验值偏高. 碎片产物的角分布和 Z 分布还与统计蒸发模型 GEMINI 进行了比较, 结果表明, 在前角区平衡蒸发成份所占的比例很小, 中角区所占的比例有所增加, 但仍然是较小的比例. 同时发现平衡蒸发成份随着出射碎片核电荷数 Z 的减小而逐渐减少.

**关键词** 碎片 量子分子动力学模型 统计蒸发 碎裂

## 1 引言

中能区 (10—100MeV/u) 重离子碰撞受吸引的平均场相互作用和排斥的核子-核子相互作用共同影响, 核碰撞过程和反应动力学紧密相关, 使反应机制和衰变产物变得相当复杂. 在中能重离子核反应中, 复杂碎片 ( $Z \geq 3$ , 或中等质量碎片 (IMF)) 的发射是很重要的方面. 通过对它的热力学性质和与能量耗散相关的碰撞动力学性质的研究, 可以对复杂碎片的不同来源进行有效的区分, 并搞清不同成份的竞争和过渡, 这将有助于对重离子碰撞反应机制的进一步了解. 已有的研究表明, 复杂碎片的产生可以来自对应于中心碰撞和周边碰撞之间的很宽的碰撞参数范围<sup>[1]</sup>. 在后角区, 复杂碎片来自于类靶平衡核的统计蒸发<sup>[2,3]</sup>; 但在前中角区, 碎片的来源就比较复杂, 弹核碎裂的类弹成份、非完全熔合形成的蒸发成份及非平衡的中速成份都有不同程度的贡献, 碎片的发射机制特别是非平衡成份的发射机制并不是很清楚<sup>[1,4]</sup>. 为了进一步了解前中角区的碎片的发射机制, 我们在  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}, ^{58}\text{Ni}, ^{27}\text{Al}$  核反应中, 对前中角区的碎片产物进行了测量, 得到了它

1998-11-25收稿

\* 国家自然科学基金资助项目 (19175057)

们的能谱、角分布及  $Z$  分布等. 本文重点利用量子分子动力学(QMD)等模型研究了前中角区碎片角分布和  $Z$  分布的特征, 其它物理观测量及相应的分析请见文献 [5, 6].

QMD 模型是用来描述中能重离子碰撞的较好的模型之一<sup>[7]</sup>. 它克服了 BUU 模型在通过系综平均得到缓变的平均场的同时, 将核子间重要的涨落和关联也平均掉的不足, 适合于中能重离子碰撞中碎片形成的研究. 以往 QMD 模型的理论研究多集中于重离子碰撞中非均匀核物质的动力学时间演化方面, 但直接用此模型和末态观测量(如角分布、 $Z$  分布等)的实验数据进行比较, 特别是像本文这样处于中能区低端的中重反应系统还不多见. 本文以  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ ,  $^{58}\text{Ni}$  反应系统为例在这方面做一定的尝试.

## 2 实验概况

实验是在兰州重离子加速器(HIRFL)的大面积位置灵敏电离室终端(TR4)上完成的. 使用  $25\text{MeV}/u$  的  $^{40}\text{Ar}$  分别轰击厚度为  $3.94\text{mg}/\text{cm}^2$  的  $^{115}\text{In}$  靶、 $2.06\text{mg}/\text{cm}^2$  的  $^{58}\text{Ni}$  靶及  $1.00\text{mg}/\text{cm}^2$  的  $^{27}\text{Al}$  靶等. 束流强度为  $10\text{--}15\text{nA}$ . 为探测出射的碎片产物, 在  $6^\circ$  和  $8.5^\circ$  分别放置由起始时间探测器装置和粒子鉴别望远镜组成<sup>[8]</sup>的两套飞行时间(TOF)望远镜,  $11.5^\circ$  的望远镜则由 3 片穿透性 Si 探测器及光二极管(PD)读出的 CsI(Tl)晶体组成<sup>[9]</sup>, 距离靶  $20\text{cm}$ . 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 Si 大面积光敏二极管及有多单元的 CsI(Tl)晶体 + PD 读出装置组成<sup>[10]</sup>, 距离靶心  $30\text{cm}$ .  $\Delta E$  的气体探测器和 Si 探测器的能量及相应的电子学系统的线性刻度采用  $\text{ThC--ThC}'$  标准  $\alpha$  源和精密仪器发生器进行. 对于气体探测器, 刻度时还应综合考虑半靶修正、粒子在入射窗膜中的能量损失及非灵敏体积中的能损修正等. CsI(Tl)闪烁体中的粒子能量刻度采用粒子在  $\Delta E(\text{Si})$  中的能量损失结合粒子的能量-射程表反推求得.

## 3 前中角区碎片角分布和 $Z$ 分布

### 3.1 碎片角分布特征

图 1(a), (b) 和 (c) 分别给出了  $25\text{MeV}/u$   $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{27}\text{Al}$  靶的前中角区出射碎片产物在实验室系下的碎片  $Z = 6\text{--}20$  微分截面随角度的变化规律. 为了便于对比, 不同  $Z$  碎片的角分布乘了一个倍数(标在图内括号中). 从图中可以看出, 对所有的靶子, 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. 图 1(a) 显示出来自弹核碎裂的 IMF 产物主要在前角区, 尤其在擦边角附近明显成峰(对于  $25\text{MeV}/u$   $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$  反应, 擦边角为  $\theta_{\text{gr}} = 6.5^\circ$ ), 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  $30.5^\circ$  的中角区, 正如文献 [6] 能谱分析时所提到的, 弹核碎裂成份逐渐减小直至可以忽略, 并渐渐过渡为来自非平衡成份和低能成份的贡献, 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. 对其它不同的靶子如  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{27}\text{Al}$  靶出射产物的角分布, 总的变化趋势是类似

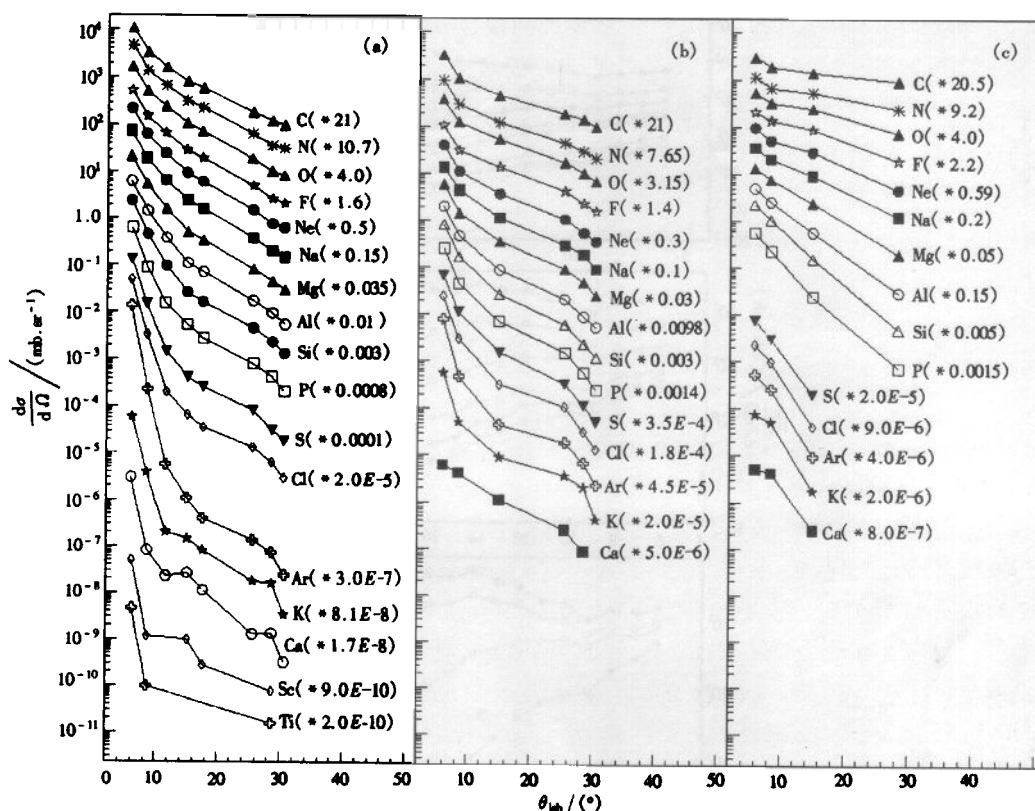


图 1 25MeV / u  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ (a),  $^{58}\text{Ni}$ (b),  $^{27}\text{Al}$ (c) 靶的前中角区出射碎片产物实验室系下的角分布

的,只是靶子越轻,角分布斜率的变化越小,越趋于平缓.这是由于靶子较轻时,反应系统的擦边角变小,实验探测角越来越远离擦边角的缘故.为了进一步了解碎片的各种来源,本文将结合 MQMD 和 GEMINI 模型做深入的理论分析.

### 3.2 碎片 Z 电荷分布

图 2(a), (b) 和 (c) 分别给出了三个反应的前中角区出射碎片产物在实验室系下的碎片 Z 分布图.从图中可以看出,不同靶的碎片 Z 分布都是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.图 2(a) 的 Z 分布显示出,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附近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,这与前面角分布的分析相一致.中角区随着角度的增加,靠近弹核的重碎片的产额迅速降低,远离弹核的轻碎片产物的产额升高.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份.

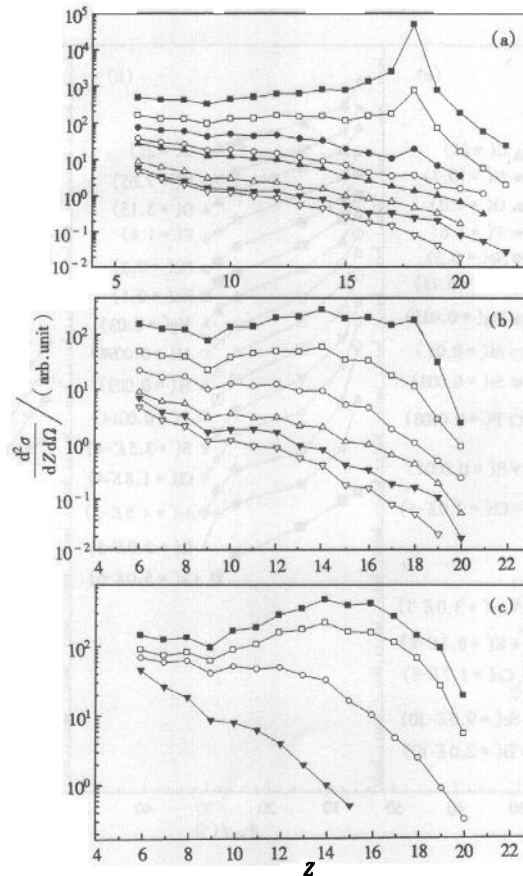


图 2 25MeV/u  $^{40}\text{Ar}+^{115}\text{In}$ (a),  $^{58}\text{Ni}$ (b),  $^{27}\text{Al}$ (c)靶的前中角区出射碎片产物 Z 分布  
 —■— $6^\circ$ , —□— $8.5^\circ$ , —●— $11.5^\circ$ , —○— $15^\circ$ , —▲— $17.5^\circ$ , —△— $25.5^\circ$ , —▼— $28.5^\circ$ , —▽— $30.5^\circ$

#### 4 MQMD 等模型的理论分析

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<sup>[11]</sup>, 是在一般的 QMD 模型<sup>[12]</sup>的基础上发展起来的. 它克服了一般 QMD 模型的不足. 通过引入参数化的泡利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 (RAM)<sup>[13]</sup>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 (FCM)<sup>[14]</sup>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, 即软状态方程参数,  $K = 200\text{MeV}$ . 另外由于动量相关势有利于碎片的产生, 计算中还加入了动量相关势 (MDI). 如果两核子的距离小于  $3.5\text{fm}$ , 则假设这两个核子属于同一个结团<sup>[15]</sup>. 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, 对于每一个设定的碰撞参数, 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.

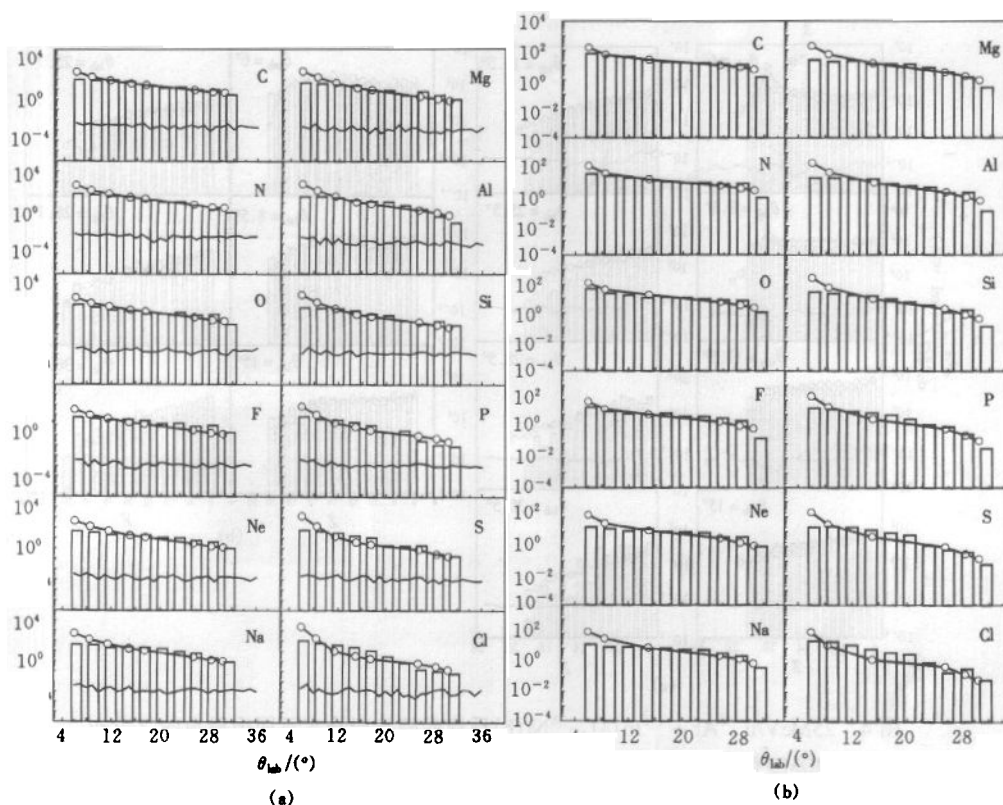


图 3 25MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ (a),  $^{58}\text{Ni}$ (b)反应的从 Z=6 到 Z=17 碎片产物角分布  
条状直方图: MQMD 模型的计算结果, 粗实线 + 空心圆点: 实验点, 细实线: GEMINI 模型的计算结果.

图 3 为 25MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ ,  $^{58}\text{Ni}$  反应的  $Z=6-17$  碎片产物角分布和理论计算比较图, 图 4 为实验室系的碎片 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. 虽然图 4 显示出  $25.5^\circ$  以后的中角度, Z 接近弹核的碎片 MQMD 理论计算的 Z 电荷分布的统计不够, 但从整体上来说, 经过改善的 MQMD 模型的计算结果不论是角分布还是 Z 分布都和实验点符合得相当好. 但从图中容易看出, 在离擦边角较近的小角度, MQMD 模型的计算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, 导致低估了碎片的产额. 从图 3 还可以看出, 在较小的中角度对于接近弹核的碎片, MQMD 的理论计算值高于实验点给定的值(图 3(b) Ni 靶时更容易看出). 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好高激发碎片的衰变. 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(我们另外一篇文章<sup>[16]</sup>中以费米能区的  $^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$  反应为例, 仔细研究了碰撞系统碎片形成由非平衡到

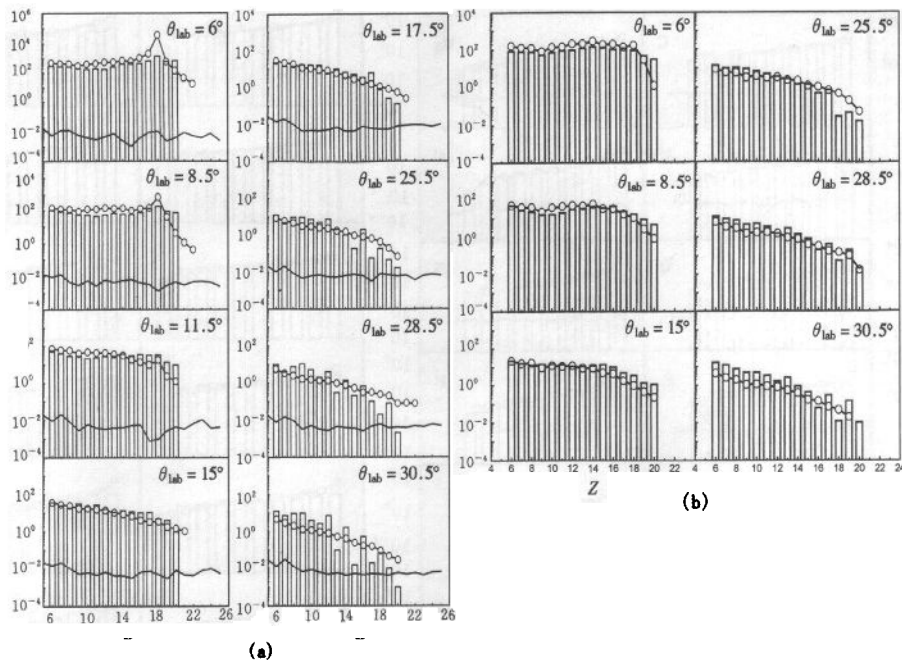


图 4 25MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ (a),  $^{58}\text{Ni}$ (b)反应的碎片产物在不同出射角的 Z 分布  
条状直方图: MQMD 模型的计算结果;粗实线 + 空心圆点: 实验点;细实线: GEMINI 模型的计算结果.

平衡的演化问题), 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<sup>[17,18]</sup>, 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, 在两者的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 25MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$   $Z = 6-17$  碎片发射的角分布和 Z 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<sup>[19]</sup>和 Bass 模型<sup>[20]</sup>估计. 图 3(a)和图 4(a)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  $Z = 5$  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份所占比例很小, 中角区所占的比例有所增加, 但仍然是较小的比例. 从图 4(a) Z 分布可以看出, Z 值较小时的平衡蒸发成份所占比例比 Z 值较大时小. 正如在文献 [6] 中分析能谱时所指出的那样, 碎片的主要成份在前角区主要是弹核碎裂成份, 逐渐过渡到中角区为非平衡成份加少量的非完全熔合成份. 而非平衡成份随着 Z 值的增加而逐渐减小, 这与图 3(a), 4(a) 的分析是一致的. 李祖玉等人在文献 [4] 中也得出了类似的结论.

## 5 结论

用对数密度多叠层望远镜等多组探测器, 在实验室系  $6^\circ$  至  $30.5^\circ$  的角度范围内测量了

$25\text{MeV}/u$   $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}, ^{58}\text{Ni}, ^{27}\text{Al}$  等反应的能谱、角分布和 Z 分布. 本文分析给出了前中角区角分布和 Z 分布的特征. 用 MQMD 模型研究了反应中前中角区出射碎片的角分布和 Z 分布. 理论计算值和实验值整体上符合得很好. 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, 理论计算值比实验值偏高. 碎片产物的角分布和 Z 分布还与 GEMINI 模型进行了比较. 结果表明, 在前角区平衡蒸发成份所占的比例很小, 中角区所占的比例有所增加, 但仍然是较小的比例; 同时发现平衡蒸发成份随着出射碎片核电荷数 Z 的减小而逐渐减少.

### 参考文献 (References)

- 1 HE ZhiYong et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1998, 22(1):13  
(贺智勇等. 高能物理与核物理, 1998, 22(1): 13)
- 2 QIAN Xing et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1996, 20(4):304  
(钱兴等. 高能物理与核物理, 1996, 20(4): 304)
- 3 JIANG DongXing et al. Chinese Journal of Nucl. Phys., 1995, 17:223
- 4 LI ZuYu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1999, 23(8):753  
(李祖玉等. 高能物理与核物理, 1999, 23(8): 753)
- 5 LIN YuanGen et al. Acta Physica Sinica (in Chinese), 1998, 47:564  
(林源根等. 物理学报, 1998, 47: 564)
- 6 WANG JinChuan et al. Investigation of Fragment Emission at the Forward and Intermediate Angles in the Reaction of  $25\text{MeV}/u$   $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ , Acta Physica Sinica (in Chinese), to be published  
(王金川等.  $25\text{MeV}/u$   $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$  反应中前中角区碎片发射研究, 物理学报, 待发表)
- 7 Hartnack Ch et al. Eur. Phys. J., 1998, A1:151
- 8 ZHAO YouXiong et al. Nucl. Instr. Meth., 1995, A355:464
- 9 GUO ZhongYan et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1995, 19(4):333
- 10 WANG JinChuan et al. Nucl. Instr. Meth., 1996, A368:473
- 11 LIU Hang et al. Z. Phys., 1996, A354:311
- 12 Aichelin J. Phys. Rep., 1991, 202:233
- 13 Ngo C et al. Nucl. Phys., 1989, A499:148
- 14 Kanada-Enyo Yoshiko. KUNS, 1991, 1271
- 15 Horiuchi H. Symp. On Heavy Ion Phys. and Application, Lanzhou, China Oct. 1990, 25.
- 16 WANG JinChuan et al. The Dynamical Aspects of the Fragments in the Reaction of  $^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$  at Intermediate Energy Region, Science in China (Series A, in Chinese), to be published  
(王金川等. 中能区  $^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$  反应的碎片动力学性质研究, 中国科学(A 辑), 待发表)
- 17 Wada R et al. Reaction Mechanism in Fermi Energy Domain. In: Preprint of Cyclotron Institute, Texas A & M Univ. No. 96-05. 1996. 1-5
- 18 Johnston H et al. Comparison of Z Distributions From the Reaction  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  at  $E/A = 33, 45$  MeV With the Prediction Made by QMD, BUU/ GEMINI. In: Cyclotron Institute Texas A&M Univ. Ed. Progress in Research. Texas: 1996. 44-46
- 19 SA BenHao et al. Phys. Rev., 1993, C48:628
- 20 Bass R. Phys. Rev. Lett., 1977, 39:265

## Angular and $Z$ Distributions of the Fragments at Forward and Intermediate Angles in the Reaction of $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}, ^{58}\text{Ni}, ^{27}\text{Al}^*$

WANG JinChuan ZHAN WenLong GUO ZhongYan XI HongFei  
LIU Hang ZHOU JianQun ZHAO YouXiong

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

**Abstract** The angular &  $Z$  distributions of the fragments emitted in the forward and intermediate angles are measured at the reaction of  $25\text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}, ^{58}\text{Ni}, ^{27}\text{Al}$ . Their characteristics are investigated based on the model of Modified Quantum Molecular Dynamics (MQMD). Generally, the theoretical calculations are in good agreement with the experiment data. 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 calculation is higher than the experiment data in some degree for the fragments whose charge numbers are in the vicinity of the projectile. The angular & charge distributions of the fragments are also compared with the statistical model of GEMINI. The results turn out to be that a small proportion of the statistical evaporation component exists in the forward angles while in the intermediate angle region, this component increases to some extent. However, its ratio is still small. It is found that the equilibrium evaporation component decreases gradually when the  $Z$  of the fragments becomes smaller.

**Key words** fragments, quantum molecular dynamics model, statistical emission, fragmentation

---

Received 25 November 1998

\* Project (19175057) Supported by Natural Science Foundation of China