

# $30\text{MeV} / u \text{ } ^{40}\text{Ar} + \text{}^{58,64}\text{Ni}, \text{}^{115}\text{In}$ 反应中 IMF 的元素分布\*

苟全补<sup>1)</sup> 诸永泰 徐珊珊 魏志勇 卢俊  
张玉虎 王琦 李松林 吴钟立

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 在 $5^\circ$ — $140^\circ$ 范围内测量了 $30\text{MeV} / u \text{ } ^{40}\text{Ar}$ 束流轰击不同靶核( $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{64}\text{Ni}$ 、 $^{115}\text{In}$ )时出射的中等质量碎片的元素分布. 在 $20^\circ$ — $80^\circ$ 之间, 观察到了原子序数大于弹核原子序数的出射碎片( $Z=3$ — $24$ ), 发现中等质量碎片的微分截面在其原子序数从小于弹核原子序数向大于弹核原子序数变化过程中是连续变化的, 该角区出射碎片的元素分布与弹核原子序数关系不大. 对中能区核反应的过渡性质做了讨论, 指出了探测阈对所测得的元素分布的影响, 并讨论了元素分布的幂指数规律.

**关键词** 中等质量碎片 元素分布 幂规律

## 1 引言

国际上对中能重离子碰撞的研究开始于80年代, 由于中能区介于由平均场主宰的低能区与由核子-核子碰撞主宰的高能区之间, 其重离子碰撞过程反映出平均场效应与核子-核子碰撞之间的过渡性质. 人们期望在中能重离子碰撞中得到新的现象、新的概念、新的机制和新的理论. 根据核力与范德瓦尔斯力的相似性建立起来的核状态方程预言, 在临界温度和密度下, 核物质会发生由处于正常状态的液相向气相的相变. 因为中能重离子核反应把相当大的相对运动动能转变为原子核碰撞系统的内部激发能和压缩能, 从而产生了高温高密度的核物质, 所以中能重离子碰撞正好可以使所形成的核或核物质达到核物质相变的临界条件. 对这种极端条件下(远离正常原子核性质)高温高密核的形成机制和衰变性质进行研究对于人类了解原子核的微观结构和变化规律具有非常重要的意义.

在相变中有两个转变点: 一个是由正常核态(液态)转变为液气共存状态; 另一个是由

1998-06-15收稿

\* 国家自然科学基金(19235012)和中国科学院九五重大(KJ95T-03)资助

1) 中国科学院近代物理研究所在职博士生, 兰州大学现代物理系讲师

液气共存态转变为气态. 有关核物质相变研究的一个很重要的意义是原子核是一个有限的体系, 理论上很早就预言了原子核的相变, 但实验上并没有找到充分的证据. 一些实验发现在中能重离子核反应中出射的中等质量碎片 (IMF) 的元素分布服从乘幂规律, 即  $Y(Z) \propto Z^{-\tau}$ , 其中  $Z$  为反应中出射的中等质量碎片的原子序数. 人们把 Fisher 的小液滴模型与液-气相变的临界指数联系起来, 同时考虑到核子-核子相互作用与范德瓦尔斯力很类似, 如果核的激发能升高并发射中等质量碎片, 就很可能发生了所谓的液-气相变. 因此中能重离子碰撞中产生的 IMF 的元素分布、角分布、能谱、核温度、多重性等测量越来越多地成为实验研究的对象<sup>[1-3]</sup>. 本文完成了 30MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  离子束流轰击具有不同  $N/Z$  值的  $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{64}\text{Ni}$  和  $^{115}\text{In}$  靶组成不同对称性反应系统的实验<sup>[4,5]</sup>. 重点讨论中能区的过渡性质、IMF 的元素分布的乘幂规律与液-气相变、及探测阈对所测元素分布的影响等问题.

## 2 实验

实验是在兰州重离子研究装置 (HIRFL) 的 TR4 实验终端上完成的. 所用束流是 30MeV/u 的  $^{40}\text{Ar}+^{16}\text{O}$  离子, 束流强度为 40—80nA. 靶核分别为  $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{64}\text{Ni}$  和  $^{115}\text{In}$  同位素, 靶厚均约为  $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ . 选用不同质量数的靶核是为了观察近对称系统和非对称系统的不同表现.

实验中用 5 套多叠层粒子鉴别望远镜系统对反应产物进行了鉴别<sup>[4]</sup>, 下文在讨论探测阈对元素分布的影响时提到了其中的 3 套, 它们是,  $T_2$ :  $30\mu\text{m Si}(\Delta E_1) + 500\mu\text{m Si}(\Delta E_2) + \text{CsI(T1)}(E_r)$ , 立体角为  $2.0 \times 10^{-3}\text{sr}$ ;  $T_3$ :  $20\mu\text{m Si}(\Delta E_1) + 580\mu\text{m Si}(\Delta E_2) + \text{CsI(T1)}(E_r)$ , 立体角为  $3.3 \times 10^{-3}\text{sr}$ ;  $\text{IC}_1$ :  $8\text{cm}$  气体电离室 ( $\Delta E$ ) +  $1000\mu\text{m Si(PSSD}, 8 \times 47\text{mm}^2)$ , 立体角为  $6.75 \times 10^{-3}\text{sr}$ . 这 3 套粒子鉴别望远镜的探测阈如图 1 所示. 我们对 5 套粒子鉴别望远镜分别做了能量刻度, 经过对不同探测系统测量得到的能谱进行比对、归一, 得到了反应产物的能谱.

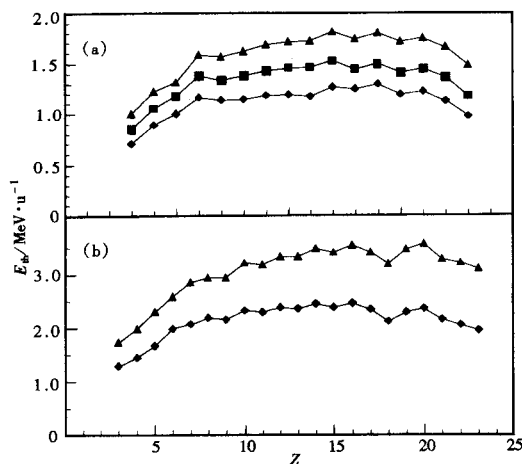


图1 探测器的能量阈

(a) 电离室 ▲: 1530pa, ◆: 1020pa, ■: 510pa;

(b) Si半导体 ▲: 30 $\mu$ 厚, ◆: 20 $\mu$ 厚.

## 3 实验数据的分析

### 3.1 中能区核反应的过渡性质

在低能区 ( $E < 10\text{MeV}/\text{u}$ ), 重离子碰撞主要是平均场相互作用, 其衰变方式主要是蒸发轻粒子和重碎片发射 (包括蒸发余核、裂变碎片等), 很少有 IMF 发射, 只观察到少量  $Z \geq 3$  的

来自于直接转移反应或深部非弹性碰撞的碎片. 在 高能区 ( $E > 100 \text{ MeV/u}$ ), 核子-核子碰撞起主导作用, 在中心碰撞中衰变产物主要是介子和核子, 随着轰击能量的增高观察到 IMF 的产额反而减少. 在中能区 ( $10 \text{ MeV/u} < E < 100 \text{ MeV/u}$ ), 重离子碰撞中产生的 IMF 的产额明显高于低能区和高能区. 人们很想知道中能区是否是一个从以集体运动或深部非弹性碰撞为标志的一体耗散反应向引起碎裂的两体碰撞反应过渡的能区<sup>[3]</sup>. 本实验测量得到的  $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$  和  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$  反应中出射的 IMF 的元素分布对了解这个问题会有所帮助.

对  $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$  和  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$  反应中出射的 IMF 的能谱进行能量积分, 得到 IMF 的微分截面及其元素分布. 在实验室系  $5^\circ - 140^\circ$  范围内, 测得了 3 个反应中出射的 IMF 的元素分布, 它们的形状有相同的趋势. 作为例子, 图 2 给出了  $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$  反应中出射的 IMF 的元素分布. 在  $5^\circ - 7^\circ$ , 反应截面随其原子序数增加而增大, 它表明中能区存在着弹核碎裂反应. 在  $20^\circ - 80^\circ$ , 测量得到了原子序数自小到大直至大于弹核原子序数的中等质量碎片. 由于探测器的限制, 在一些角度, 没有把原子序数大于弹核原子序数的 IMF 测量全, 分析出来的 IMF 的最大原子序数等于 24 (图 3). 从图 2 和图 3 可以看出, 微分截面在 IMF 的原子序数从  $Z$  小于弹核原子序数向  $Z$  大于弹核原子序数变化过程中是连续的, 没有发生突变, 而且反应截面随原子序数增加而缓慢减小. 原子序数大于弹核原子序数的那些出射产物, 与弹核碎裂反应关系不大, 也不可能是复合系统蒸发的产物, 可能来自于耗散碰撞反应机制的贡献或其它发射机制.  $90^\circ - 140^\circ$ , 实验上没有发现原子序数大于弹核原子序数的 IMF, 反应截面随其原子序数增加而迅速减小, 表现出通常的平衡发射特征. 总之, 实验测得的 IMF 的元素分布, 反映出了在中能区重离子碰撞过程中平均场效应与核子-核子碰撞之间的过渡性质. 这与我们在能谱和角分布分析中得到的结果是一致的.

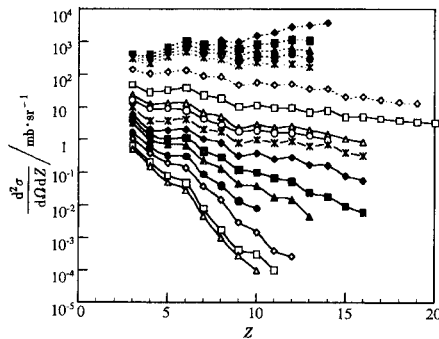


图 2  $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$  反应中产生 IMF 的元素分布

自上而下依次为  $5^\circ, 7^\circ, 9^\circ, 11^\circ, 13^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 100^\circ, 110^\circ, 130^\circ, 140^\circ$ .

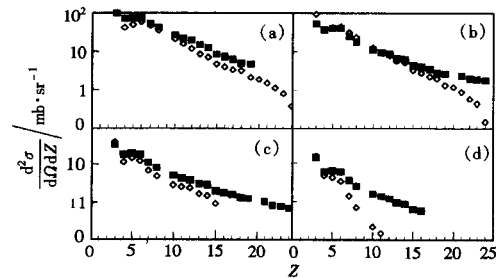


图 3  $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$  反应中产生的部分角度的 IMF 元素分布

■ 气体电离室望远镜 (ICT), ◇ 固体探测器望远镜 (SDT);

- (a) ICT 1530pa  $20^\circ$ , SDT  $T_2$   $19^\circ$ ;  
 (b) ICT 1530pa  $30^\circ$ , SDT  $T_2$   $27^\circ$ ;  
 (c) ICT 1530pa  $40^\circ$ , SDT  $T_3$   $39^\circ$ ;  
 (d) ICT 1020pa  $60^\circ$ , SDT  $T_2$   $60^\circ$ .

另外, 在 3 个反应产生的 IMF 的电荷分布中都观察到了奇偶效应, 即偶数  $Z$  产物的微分截面大于相邻奇数  $Z$  产物的微分截面, 还观察到 C 元素的微分截面比相邻元素的微分

截面大.

### 3.2 IMF 电荷分布的幂指数规律

对于不同的反应系统在不同的出射角区, IMF 的元素分布服从不同的规律. 出射碎片的元素分布服从指数规律预示着它们来源于系统的统计发射, 而出射碎片的元素分布服从乘幂规律表明它们来源于系统的动力学发射. 这里着重讨论乘幂规律.

形成一个质量数为  $A$  的碎片的几率为<sup>[6,7]</sup>

$$P(A) = P_0 \cdot \exp((\mu_g - \mu_l) \cdot A / T - 4\pi r^2(T) \sigma(T) / T \cdot A^{2/3} - \tau \cdot \ln A), \quad (1)$$

这里,  $P_0$  为常数,  $\mu_g$  和  $\mu_l$  分别为气相和液相的化学势,  $r$  为核半径,  $T$  为核温度,  $\sigma$  为表面能. 令

$$b(T) = 4\pi r^2(T) \sigma(T) / T, \quad (2)$$

在临界点,  $\mu_g = \mu_l$ ,  $T \rightarrow T_c$ ,  $b(T) \propto (T_c - T)^{3/2} \rightarrow 0$ , 由 (1) 式得

$$P(A) \propto A^{-\tau}, \quad (3)$$

由平均场近似得  $\tau = 7/3$ .

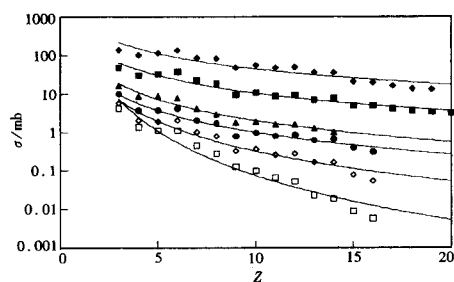


图 4 在  $20^\circ$ — $80^\circ$  角区  $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$  反应 IMF 的元素分布

连线为用幂函数拟合的结果;

◆ $20^\circ$ , ■ $30^\circ$ , ▲ $50^\circ$ , ● $60^\circ$ , ◇ $70^\circ$ , □ $80^\circ$ .

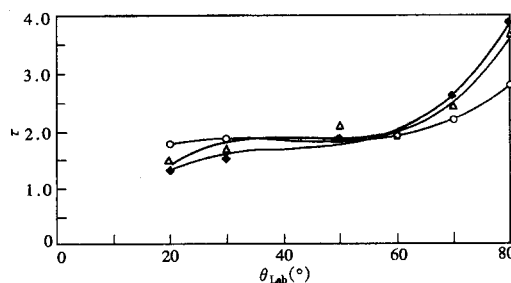


图 5 幂指数  $\tau$  随出射角的变化关系  
连线用来连接数据点; ◆ $^{58}\text{Ni}$ , △ $^{64}\text{Ni}$ , ○ $^{115}\text{In}$ .

有些实验发现<sup>[2,8]</sup>, 中能重离子碰撞产生的 IMF 的元素分布服从乘幂规律, 即  $P(Z) \propto Z^{-\tau}$ . 本文在  $20^\circ$ — $80^\circ$  角区, 用幂函数对  $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$  和  $^{115}\text{In}$  反应产生的 IMF 的元素分布做了拟合, 作为例子图 4 给出了对  $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$  反应产生的 IMF 的元素分布用幂函数拟合的结果, 图 5 给出了幂指数  $\tau$  随出射角的变化关系. 对于 3 个反应系统, 幂指数  $\tau$  随出射角的增大呈上升趋势, 其不同点是, 对于  $^{115}\text{In}$  靶,  $\tau$  随出射角变化比较平坦,  $^{58}\text{Ni}$  靶和  $^{64}\text{Ni}$  靶则上升得比较快. 在  $70^\circ$  附近,  $\tau$  值处于 2—3 之间, 它恰好接近于理想气体在临界温度点发生液—气相变的幂指数  $\tau$  值  $7/3$ . 但这并不表明已经发生液—气相变.

### 3.3 探测阈对元素分布的影响

对同一个反应系统产生的 IMF 在同一个出射角用不同探测阈的 Si 半导体探测器望

望远镜和气体电离室望远镜进行测量, 观察到其元素分布形状不一样. 低能量阈的探测器 IC<sub>1</sub> 测得的元素分布变化比较平坦, 而较高能量阈的探测器 T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 测得的元素分布变化比较陡峭, 并且随着角度增大, 这种差别越来越明显. 这是因为探测器阈下丢失部分的影响随着出射产物电荷数  $Z$  和出射角度的增大而增大的缘故. 图 3 展示了这种变化. 由不同探测阈的探测器测得的元素分布的  $\tau$  值不一样, 固体粒子鉴别望远镜测得的元素分布的  $\tau$  值偏大, 低能量阈的气体电离室望远镜测得的元素分布的  $\tau$  值相对来说更接近于由实际的元素分布得到的  $\tau$  值, 所以在讨论 IMF 的电荷分布时最好选用低能量阈的探测器或者对测得的元素分布进行探测阈修正.

## 4 结果与讨论

用 5 套多叠层粒子鉴别望远镜, 在实验室系  $5^\circ$ — $140^\circ$  范围内测量了  $30\text{MeV/u}$   $^{40}\text{Ar}$  轰击  $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{64}\text{Ni}$  和  $^{115}\text{In}$  靶产生的单举 IMF 元素分布. 在 3 个反应产生的 IMF 的元素分布中都观察到了奇偶效应, 而且发现 C 元素的微分截面比较大. 观察到 3 个反应在实验室系元素分布的形状有相同趋势,  $5^\circ$ — $7^\circ$ , 微分截面随 IMF 的原子序数增加而增大, 带有弹核碎裂特征. 而  $20^\circ$ — $80^\circ$ , 微分截面随其原子序数增加而缓慢减小, 带有从非平衡发射向平衡蒸发过渡的耗散特征, 在  $90^\circ$ — $140^\circ$ , 反应截面随其原子序数增加而迅速减小, 表现为通常属于低能区的平衡蒸发反应. 由此可见, 中能区重离子碰撞过程取决于平均场效应与核子-核子碰撞的竞争, 是一个从低能区向高能区过渡的能区. 就探测阈对所测元素分布的影响、幂指数  $\tau$  随出射角的变化关系做了讨论, 指出元素分布服从乘幂规律不是液-气相变的唯一判据. 在费米能区, 平均场相互作用与核子-核子碰撞相互作用共存并逐步过渡, 反应机制相当复杂, 系统地研究原子核从低激发能到中等激发能时核温度的变化, 特别是如何证明这种变化的确是一种相变, 还需要进行大量的实验研究.

感谢兰州重离子国家实验室全体工作人员提供品质优良的束流. 感谢数据获取室、NIM、CAMAC 库及半导体探测器组的良好服务. 感谢 VAX 中心有关人员在数据处理过程中的大力协助.

## 参 考 文 献

- 1 Wei Zhiyong, Zhu Yongtai. Progress in Physics (in Chinese) 1998, **18**: 33—46  
(魏志勇, 诸永泰. 物理学进展, 1998, **18**: 33—46)
- 2 Lou Y et al. Nucl. Phys., 1996, **A604**: 219—244
- 3 Guerreau D et al. Phys. Lett., 1983, **131B**: 293—296
- 4 Xu Hushan et al. Nucl. Sci. and Tech., 1996, **7**: 198—201
- 5 Zhu Y T et al. Journal of Qingdao University (Quarterly) (in Chinese), 1997, **10**: 35—37  
(诸永泰等. 青岛大学学报(自然科学版), 1997, **10**: 35—37)
- 6 Goodman Alan L et al. Phys. Rev., 1984, **C30**: 851—865
- 7 Moretto Luciano G, Wozniak Gordon J. Nucl. Phys., 1988, **A488**: 337c—352c
- 8 Hirsch A S et al. Phys. Rev., 1984, **C29**: 508—525

## Element Distributions of Intermediate Mass Fragments Emitted in 30 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$ and $^{115}\text{In}$ Reactions \*

Gou Quanbu<sup>1)</sup> Zhu Yongtai Xu Hushan Wei Zhiyong Lu Jun  
Zhang Yuhu Wang Qi Li Songlin Wu Zhongli

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

**Abstract** The element distributions of intermediate mass fragments (IMF) emitted over an angular region of  $5^\circ - 140^\circ$  have been measured in the reactions of 30MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$  and  $^{115}\text{In}$ . Within  $20^\circ - 80^\circ$  range the IMFs with  $Z = 3 - 24$  were observed. The IMF production cross section changes smoothly with its charge number, and the element distribution changes continuously when the IMF charge number increases across the charge number of the projectile. There is no strong dependence of the element distribution on the charge number of the projectile in this angular region. The transition nature of the reaction mechanism in the intermediate energy region and the power law of the IMF element distribution, as well as the dependence of element distributions on the threshold of the detectors were discussed.

**Key words** intermediate mass fragments, element distributions, power law

---

Received 15 June 1998

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19235012) and the Chinese Academy of Science (KJ95T-03)

1) Graduate student in IMP at His Post in the Modern Physics Department of Lanzhou University