

30MeV/u ^{40}Ar + $^{58,64}\text{Ni}$ 和 ^{115}In 反应中 中等质量碎片的角分布*

苟全补¹⁾ 诸永泰 徐瑚珊 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° — 140° 范围内测量了 30MeV/u ^{40}Ar 束流轰击不同靶核 (^{58}Ni 、 ^{64}Ni 、 ^{115}In) 后出射的中等质量碎片 (IMF, $Z = 3$ — 19) 的角分布. 用指数分布函数 $d\sigma/d\Omega = N \cdot \exp(-\theta/\alpha)$ 对出射碎片角分布分角区做了拟合. 对 3 个反应系统分别提取出与相互作用时间有关的衰减因子 α 和与发射源强度有关的物理量 N , 讨论了 α 与 N 在不同角区与反应系统和出射 IMF 电荷数的关系. 考察了角分布与同位旋自由度和反应系统对称性的关系.

关键词 中等质量碎片 角分布 同位旋自由度

1 引言

在低能区 ($E < 10\text{MeV/u}$), 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), 很少有中等质量碎片发射, 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中等质量碎片 (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, 这一现象在理论上和实验上均引起了人们的广泛关注. 因此中能区 IMF 的角分布、电荷分布、能谱、多重性等的测量越来越多地成为实验研究的对象.

不同角区出射同一碎片或同一出射角出射不同碎片的反应截面都不一样. 我们安排了一个 30MeV/u ^{40}Ar 离子束流轰击具有不同 N/Z 值的 ^{58}Ni 、 ^{64}Ni 和 ^{115}In 靶组成不同对称性反应系统的实验^[1-3], 来测量反应中出射的 IMF, 旨在研究费米能区重离子核反应中类弹碎片和 IMF 的可能来源, 并以这些碎片为“探针”来探讨中能重离子碰撞过程中可能出现

1998-05-25 收稿

* 国家自然科学基金 (19235012) 和中国科学院九五重大项目资助

1) 近物所在职博士生, 兰州大学现代物理系讲师

的反应机制, 以及所形成的核系统及其衰变性质.

据文献 [2—10] 的报道, 高温核的形成、鉴别和衰变性质的研究是当今中能区重离子核碰撞研究的前沿. 实验上测量中能重离子核反应碎片角分布对了解核反应的特性和考察产生碎片的机制是很重要的, 但是到目前为止, 这方面的系统工作还很少^[4].

2 实验描述

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. 反应靶分别为 ^{58}Ni 、 ^{64}Ni 和 ^{115}In 同位素靶, 靶厚均约为 1.5mg/cm². 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情况. 所选择的 3 个靶核的中子数与质子数之比相差较大, 可以用来研究同位旋自由度对出射碎片角分布的影响.

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^[1], 它们是 T_1 : 43.9 μm Si(ΔE_1) + 580 μm Si(ΔE_2) + 3000 μm Si(ΔE_3) + CsI(Tl)(E_R), 立体角为 1.7×10^{-4} sr; T_2 : 30 μm Si(ΔE_1) + 500 μm Si(ΔE_2) + CsI(Tl)(E_R), 立体角为 2.0×10^{-3} sr; T_3 : 20 μm Si(ΔE_1) + 580 μm Si(ΔE_2) + CsI(Tl)(E_R), 立体角为 3.3×10^{-3} sr; IC_1 : 8cm 气体电离室 (ΔE) + 1000 μm Si (PSSD, $8 \times 47\text{mm}^2$), 立体角为 6.75×10^{-3} sr; IC_2 : 8cm 气体电离室 (ΔE) + 1000 μm Si (PSSD, $8 \times 47\text{mm}^2$), 立体角为 1.545×10^{-2} sr. 5 套粒子望远镜系统分别安置在 TR4 终端的 1.5m 直径的真空散射室内的转臂和转盘上, 实验过程中不破坏真空条件即可改变探测器的探测角度. 束流的监测分别由放置在束流零度方向上距靶 4m 处的法拉第筒和放置在束流线两侧 $\pm 8^\circ$ 处的 2 个 CsI(Tl) 晶体来实现.

3 套固体粒子鉴别望远镜由于其阻止本领大, 主要用于前角区测量. 其缺点是对较重的出射碎片能量探测阈比较高. 2 套气体电离室望远镜的优点是能量探测阈低, 主要用于测量中后角区的出射碎片. 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对比、归一, 得到了反应产物的能谱. 把能谱按能量积分就能得到 IMF 的微分截面角分布.

3 实验数据分析

对 30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$ 和 $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应中出射的 IMF 的能谱经刻度和归一化以后, 按能量积分, 得到 IMF 的微分截面及其角分布. 在实验室系 5° — 140° 范围内测得的 3 个反应中出射的 IMF 角分布的形状有相同的趋势, 即随着角度增大, 微分截面逐渐下降, 而且在前角区下降得快, 在中后角区下降得慢. 中能重离子核反应产生的 IMF 能谱分析表明, 在不同角区有不同的反应机制^[5—8, 10—17]. 我们在对不同角区反应产物能谱进行分析时发现^[3], 在前角区 ($\theta_L < 20^\circ$) 和中后角区 ($20^\circ < \theta_L < 140^\circ$) 作出主要贡献的反应机制有所不同. 在 27MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}$ 反应中, Borderie B. 等发现能谱有不同反应机制的分界角度在 20° ^[12] 附近, 这和我们的测量结果是接近的. 图 1 给出了 30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{64}\text{Ni}$ 反应中出射的 IMF 角分布. 由于探测阈的原因, 较重的出射碎片和在角度较大处测得的

出射碎片阈下丢失严重,这是图 1 中角分布在较重的出射碎片处和在角度较大的地方下降得快的原因. 没有测量 20° 以前磷和硫的数据.

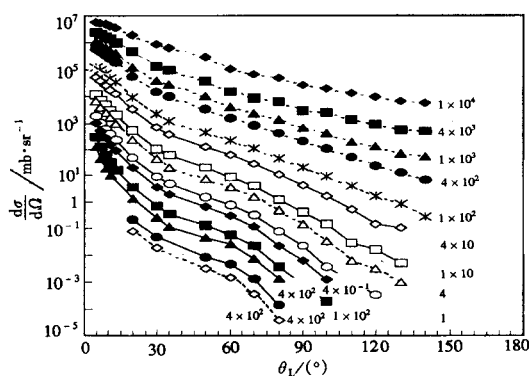


图 1 30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{64}\text{Ni}$ 反应中出射的中等质量碎片角分布

图中数字为微分截面值所乘因子;

--◆-- Li, --■-- Be, --▲-- B, ●●● C, ●●●●● N,
—◇— O, —□— F, --△-- Ne, —○— Na, —◆— Mg,
—■— Al, —▲— Si, —●— P, --◇-- S.

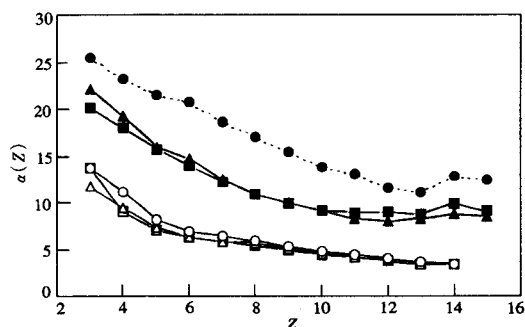


图 2 $^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$ 和 $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 3 个反应系统的 $\alpha(Z)$ - Z 曲线

▲ ^{58}Ni , ■ ^{64}Ni , ● ^{115}In , $20^\circ < \theta_L < 140^\circ$;
△ ^{58}Ni , □ ^{64}Ni , ○ ^{115}In , $\theta_L < 20^\circ$.

在 27MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中, Borderie B.^[13] 等把深部非弹性碰撞作为 IMF 的一个重要来源做了研究. 在分析 20—100MeV/u $^{14}\text{N} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$, ^{197}Au 反应产生的实验数据时, Wile J. L. 等^[17] 认为前角区和中角区的角分布具有 $W(\theta) \propto \exp(-D \cdot \theta)$ 形式. 在对实验测得的能谱进行分析时知道耗散碰撞是 IMF 的一个重要来源^[3], 这里我们试用指数分布函数

$$d\sigma/d\Omega = N \cdot \exp(-\theta/\alpha) \quad (1)$$

对反应产物的角分布进行拟合.

如果假定反应中形成的中间复合系统以一近似平均的角速度 ω 转动, 则在发射碎片前转过的角度为

$$\theta \propto \omega t, \quad (2)$$

指数衰减系数

$$\alpha \propto \omega \tau, \quad (3)$$

这里 τ 相应于相互作用的时间, 而 N 为所产生的中间发射源对应的强度. 由于可提取出与相互作用时间有关的衰减因子 α 和与发射源强度有关的物理量 N , 首先我们讨论 $^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$ 和 $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 3 个反应系统中 $\alpha(Z)$ 和 $N(Z)$ 与 Z 的关系见图 2, 3.

在 $\theta_L < 20^\circ$ 和 $20^\circ < \theta_L < 140^\circ$ 2 个角区内对实验数据分别进行了拟合. 图 2 显示了衰减系数 $\alpha(Z)$ 与 Z 的关系, 可以看出, 20° 以前, 在靠近弹核原子序数的地方, $^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$ 和 $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 3 个反应系统的 $\alpha(Z)$ - Z 曲线重合在一起, 近似为常数, 它表明在前角区相互作用时间对靶核的依赖性不大, 具有弹核碎裂的特征; 随着出射碎片电荷数远离弹核原子序数, α 值越来越大, 相互作用时间越来越长, 反之, 出射产物越靠近弹核, α 越小, 相互作用时间越短. 在 20° — 140° 之间的中后角区, $\alpha(Z)$ 值明显地比前角区大, 3 个反应的共同

特点是出射碎片的电荷数越靠近弹核原子序数, 衰减因子 α 越小, 相互作用时间越短. 总起来讲, 出射产物的 $\alpha(Z)$ 与同位旋自由度关系不大, 而与靶核轻重和反应系统对称性有关, 近对称系统的 $\alpha(Z)$ 比非对称系统的要小一些.

在图 3 展示的 $N(Z)-Z$ 曲线中, 我们观察到, 无论出射碎片电荷数大还是小, 20° 以前的发射源强度 $N(Z)$ 都比 $20^\circ-140^\circ$ 之间的大; 在 20° 以前, 出射碎片越远离弹核原子序数, 发射源强度 $N(Z)$ 越小; 在 $20^\circ-140^\circ$ 之间, 发射源强度 $N(Z)$ 可以近似看成常数, 也就是说, 在中后角区发射源强度 $N(Z)$ 几乎不随出射碎片电荷数变化.

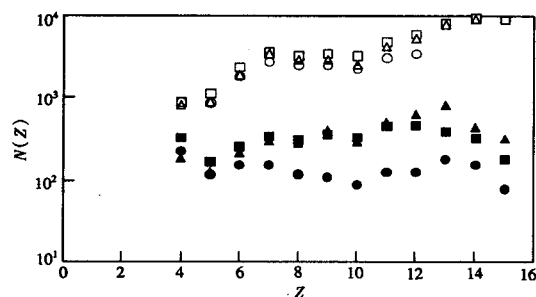


图 3 $^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$ 和 $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 3 个反应系统的 $N(Z)-Z$ 曲线
 $\triangle^{58}\text{Ni}$, $\square^{64}\text{Ni}$, $\circ^{115}\text{In}$, $\theta_L < 20^\circ$; $\blacktriangle^{58}\text{Ni}$, $\blacksquare^{64}\text{Ni}$, $\bullet^{115}\text{In}$, $20^\circ < \theta_L < 140^\circ$.

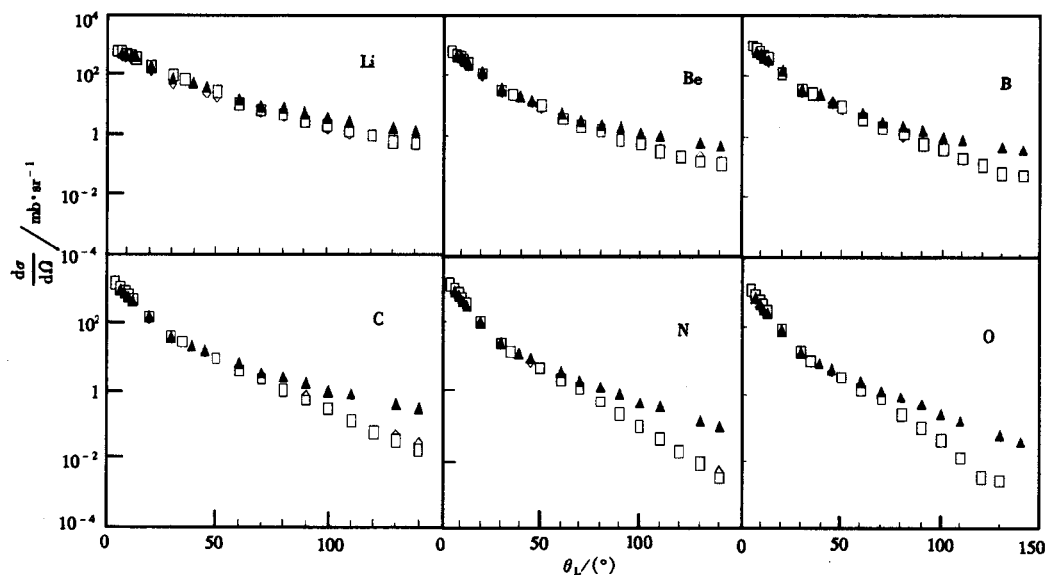


图 4 $^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$ 和 $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 3 个反应产生的部分出射碎片角分布比较
 $\diamond^{58}\text{Ni}$, $\square^{64}\text{Ni}$, $\blacktriangle^{115}\text{In}$.

图 4 给出了 3 个反应系统产生的部分出射碎片角分布的比较. 20° 以前, 对同一出射碎片, 3 个反应系统的微分截面基本上相同, 即出射产物的微分截面与靶核关系不大, 20°

—140°之间, ^{58}Ni 和 ^{64}Ni 靶的微分截面基本上相同, 而 In 靶的微分截面明显比 Ni 靶大, IMF 的电荷数越大, 反应产物的靶核相关性越明显; 对同一个反应系统, 比较不同反应产物的截面, 能够看出, 随着碎片电荷数的增加, 反应截面逐渐减小. 总起来讲, 角分布与同位旋自由度的关系不大, 而与反应系统的轻重和对称性有关.

4 结果讨论

对 3 个反应系统产生的部分出射碎片角分布比较后, 观察到角分布与同位旋自由度的关系不大, 而与反应系统的轻重和对称性有关, 出射角越大和出射碎片越重, 反应系统的轻重和对称性在角分布上的不同表现越明显.

IMF 的角分布、元素分布和能谱的测量与分析都是中能重离子碰撞的实验研究对象.

其中, 能谱的测量与分析做的较多, 而角分布的测量和分析在文献中报道的比较少. 我们通过能谱分析发现, 耗散碰撞是中等质量碎片的一个重要来源, 本文试用指数分布 $d\sigma/d\Omega = N \cdot \exp(-\theta/\alpha)$ 分角区对 3 个反应系统产生的出射碎片角分布做了拟合, 观察到, 在前角区 ($\theta_L < 20^\circ$) 发射源强度 $N(Z)$ 随出射碎片电荷数向弹核靠近而增大, 这可以理解为弹核碎裂是主要的反应机制, 在中后角区 ($20^\circ < \theta_L < 140^\circ$) 发射源强度 $N(Z)$ 几乎不随出射碎片电荷数变化, 这表明这些出射碎片可能来自于同一个发射源. 从 3 个反应系统的 $\alpha(Z)-Z$ 曲线可以看出, 与相互作用时间有关的衰减因子 α 与同位旋自由度关系不大, 而与反应系统的轻重和对称性有关, 也与碎片的出射角区和电荷数有关.

在不同角区测得的 IMF 角分布分析表明, 在费米能区反应机制相当复杂, 还应进行深入的研究.

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 Xu Hushan et al. Nucl. Sci. and Tech., 1996, 7:198—201
- 2 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)
- 3 Xu Hushan et al. Chin. Phys. Lett., 1997, 14:413—416
- 4 Liu G X et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1997, 21:777—782
(刘国兴等. 高能物理与核物理, 1997, 21:777—782)
- 5 Guerreau D. Nucl. Phys., 1985, A447:37c—66c
- 6 Qian Tao et al. Chin. Phys. Lett., 1998, 15:255—257
- 7 Kiss A et al. Nucl. Phys., 1989, A499:131—147
- 8 Qian X et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1996, 20:304—309
(钱兴等. 高能物理与核物理, 1996, 20:304—309)
- 9 Wu H Y et al. Nucl. Phys., 1997, A617:385—394
- 10 Sangster T C et al. Phys. Rev., 1992, C46:1404—1415

- 11 Royer G et al. Nucl. Phys., 1987, **A466**:139—156
- 12 Borderie B et al. Z. Phys., 1984, **A318**:315—321
- 13 Borderie B et al. Phys. Lett., 1988, **B205**:26—29
- 14 Hirsh A S et al. Phys. Rev., 1984, **C29**:508—525
- 15 Rami F et al. Z. Phys., 1987, **A327**:207—216
- 16 Sosin Z et al. Nucl. Phys., 1994, **A574**:474—500
- 17 Wile J L et al. Phys. Rev., 1992, **C45**:2300—2319

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

Gou Quanbu¹⁾ 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 angular distributions of intermediate mass fragments with $Z = 3—19$ emitted in 30 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$ and ^{115}In reactions over an angular range of $5^\circ—140^\circ$ have been measured. Exponential distribution function: $d\sigma/d\Omega = N \cdot \exp(-\theta/\alpha)$ was used to fit the measured angular distributions. We have extracted the decay factor α that can be connected with the interaction time τ , and the factor N that is related to the intensity of the emission source. The relationships of $\alpha(Z)$ with Z and $N(Z)$ with Z for different reaction systems and different angular ranges have been discussed. The dependence of angular distributions on isospin and the symmetry of reaction system have also been discussed.

Key words intermediate mass fragment, angular distribution, isospin

Received 25 May 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19235012) and the Chinese Academy of Sciences

1) Ph. D student of IMP, being on his job as a lecturer of Modern Physics Department of Lanzhou University