

25 MeV/u ^{40}Ar 引起的反应与 前角区产物的研究

林源根 詹文龙 郭忠言 周建群 赵有雄 刘冠华
王金川 罗永峰 雷怀宏 祈 中 张万生 秦礼军

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(1997 年 8 月 25 日收到)

描述了 25 MeV/u ^{40}Ar 反应中在前角区方向测得的出射碎片的协变速度谱, 提取碎片的平行动量分布宽度及其约化平行动量分布宽度, 进而对出射的产物进行了分析.

PACC: 2570; 2587

1 引 言

中能区重离子核反应机制的复杂性使得它仍是目前关注的课题. 考虑周边碰撞过程, 大量的产物是类弹碎片 (PLF). 在低能时, 即弹核能量小于 10 MeV/u 时, 平均场效应占主要地位, 一体耗散是主要过程, 相对运动动能转化为内部激发能, 相对运动角动量转化为内部角动量, 类弹碎片主要来自于深部非弹性碰撞过程 (DIC) 和准弹转移. 在高能情况下, 即弹核能量大于 100 MeV/u 时, 核-核作用时间内禀自由度弛豫时间短, 约化波长比核内核子间距离要短, 核子-核子碰撞是主要过程, 类弹碎片主要来自于弹核碎裂过程 (projectile fragmentation). 中能区 (10—100 MeV/u) 是介于低能与高能间的过渡能区, 该能区的反应既有低能下一体耗散的特点, 又有高能下核子-核子碰撞的特点, 多种反应机制共存并竞争的特点.

从法国大加速国家实验室 (GANIL) 的 44 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$ 实验来看^[1], 复杂碎片主要来自碎裂过程, 而在 20 MeV/u $^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$ 的反应中却没有碎裂. 希望这一过程的演化可能发生在 20—40 MeV/u 的能区. 此实验用 25 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$, 采用飞行时间-能量损失-总能量 (TOF- ΔE -E) 方法在小角区碎片进行质量鉴别、电荷鉴别、能量测量、碎片产物的测量, 进而对碎片来源及反应机制的演化进行研究.

2 实验装置

我们在 TR4 终端上, 用 25 MeV/u ^{40}Ar 的束流轰击 ^{115}In 靶, 靶厚度为 2.0 mg/cm², 束流的流强约为 10 nA. 总的实验探测器布局见文献[2]. 这里只简单描述 TOF 望远镜系统的探测器布局.

在 $6^\circ, 8.5^\circ$ 各放置一套 TOF 望远镜系统^[3], 用于探测小角区的碎片. 在 6° 方向的 TOF 系统由椭球面聚光器、塑料闪烁体 ($20\text{ }\mu\text{m NE102A}$)、光电倍增管 (XP2020Q) 构成起始时间探测器, 由 Si1 ($130\text{ }\mu\text{m}$) + Si2 ($190\text{ }\mu\text{m}$) + Si3 ($300\text{ }\mu\text{m}$) + CsI (TI) + 光二极管 (PD) 构成粒子鉴别探测器望远镜, 停止时间从 Si2 取出, 飞行距离为 4.53 m . 在 8.5° 方向的 TOF 系统, 起始时间探测器与 6° 的一样, 由电离室、Si (Li) 构成粒子鉴别望远镜, 停止时间由平行板雪崩电离室 (PPAC) 取得, 飞行距离为 3.98 m .

3 实验测量结果与分析

我们用 NE102A, PPAC, 电离室 (IC), Si (Li) 组成的 TOF 与 ΔE -E 联合的望远镜探测器测量了反应中的前方向出射产物. 图 1 给出了 $25\text{ MeV/u }^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应中 8.5° 方向的碎片 A_F 从 6—41 的碎片能谱, 从图 1 中可以看出, 在接近弹核的碎片的能谱中有很窄的能量分布, 这反映了此过程像几个核子的转移一样的低 Q 值过程; 对于 A_F 从 20—36 的碎片的能谱分布较宽而且非对称, 这是由于低能的拖尾, 高能部分随着质量数的减少向下移动, 这些现象与弹核碎裂、准碎裂一致; 对于 A_F 小于 20 的碎片的能谱分布更对称, 这意味着这些碎片主要来源于其他的机制.

早在 70 年代初期人们利用相对论能区的 ^{12}C 与 ^{16}C 轰击各种靶核时, 发现了弹核碎裂现象, 且在实验中发现, 弹核静止系中的碎片动量分布通常是高斯分布, 宽度与碎片质量及弹核有关, 但与靶核质量以及束流能量没有显著的关系. Goldhaber^[4] 利用独立粒子统计模型给出了碎片的动量分布宽度 σ 与碎片质量的关系式

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 A_F (A_p - A_F) / (A_p - 1), \quad (1)$$

式中 σ_0 为约化动量分布宽度, 它与碎片质量无关, 由费密运动决定, 当考虑三维情况下有

$$\sigma_0^2 = \langle P^2 \rangle / 3 = \frac{3 P_F^2}{5} \cdot \frac{1}{3} = \frac{P_F^2}{5}.$$

碎片平行动量分布宽度是按下面步骤提取的, 首先将其实验室系能谱转化为协变速度谱, 如图 2 所示. 图 2 中仅列出质量较重的 Al, Si, P, S, Cl, Ar 的碎片协变速度谱, 从这些速度谱可看出, 碎片均在稍小于束流处成峰. 然后对速度谱 (能谱的高端) 进行高斯拟合, 这样就可得到各碎片的速度分布宽度, 考虑了碎片质量后, 就可以得到相应的平行动

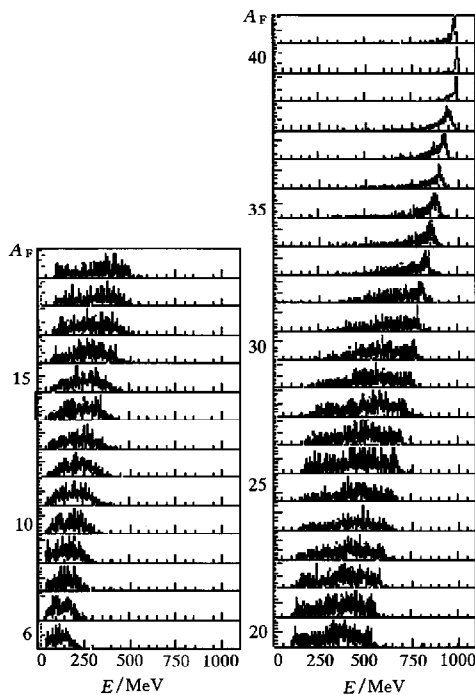


图 1 碎片能谱图

量分布宽度. 再根据 Goldhaber 公式可得到 σ_0 . 图 3 中给出了 $25 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应中提取的约化平行动量分布宽度 σ_0 与类弹碎片质量的关系, 提取的 σ_0 对于 $A_F < 36$ 类

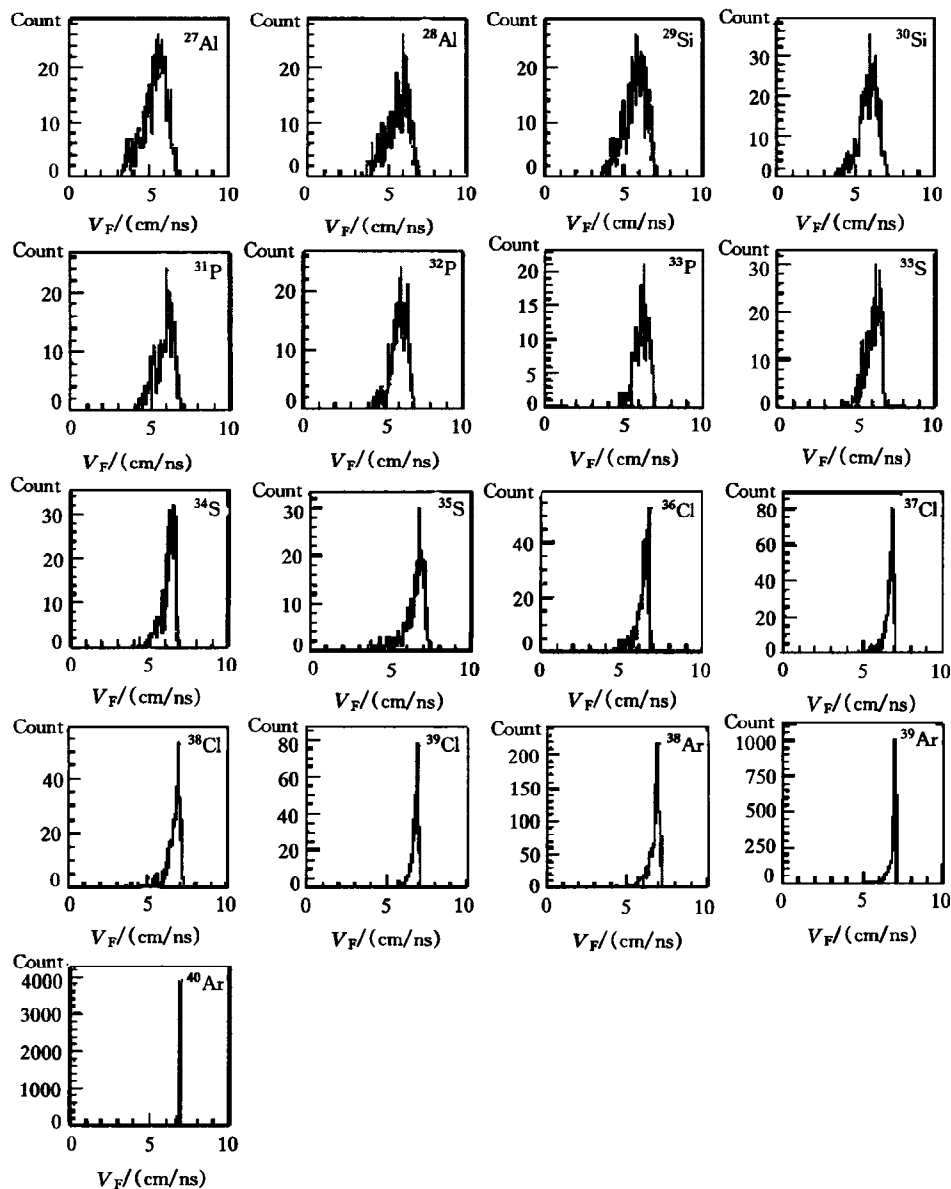


图 2 碎片的协变速度谱

弹碎片都有相近的值. 从图 3 中可以看到两组 σ_0 值, 这意味着现存两种反应机制. 对于 $A_F < 36$ 的碎片计算得到的 σ_0 值约为 84 MeV/c , 其值的波动范围是 $\pm 10\%$; 对于 $A_F = 36-39$ 的粒子得到 σ_0 的平均值为 54 MeV/c . 所提取的碎片的平行动量分布度 σ 与碎片质量的关系如图 4 所示, 图 4 中的曲线是 Goldhaber 关系式, σ_0 取 84 MeV/c , 从图 4 中可

以看出, 碎片的平行动量分布宽度很好地满足 Goldhaber 关系式, 对于 S, Cl 同位素所得的平行动量分布宽度较小.

目前, 关于 σ_0 已经有大量的数值, 图 5 列出了 σ_0 与 E/A 的关系. 如图 5^[5] 所示, 一般来说, 弹核的入射能为 $E_P > 40 \text{ MeV/u}$ 的系统, 其 σ_0 值的范围是 $80\text{--}115 \text{ MeV/c}$; 当弹核的入射能为 $E_P < 40 \text{ MeV/u}$ 的系统 σ_0 值小于 80 MeV/c , 甚至达到 25 MeV/c ^[6,7].

我们实验所得到的两组 σ_0 对应着两种不同的反应过程. 把这两组 σ_0 值与图 4 比较, 可以看到对于第一个值 $\sigma_0 = (84 \pm 8) \text{ MeV/c}$, 它与弹核的轰击能 E_P 为 213 MeV/u ^[8], $1, 2.1 \text{ GeV/u}$ ^[9] 的系统的 σ_0 值相一致, 在此反应过程观察到典型的高能碎裂过程, 对于轰击能 E_P 为 213 MeV/u , $1, 2.1 \text{ GeV/u}$ 的系统的 σ_0 值分别为 (94 ± 5) , (83 ± 2) , $(78 \pm 2) \text{ MeV/c}$; 对于第二个值 Cl^{36, 37, 38, 39} 的 $\sigma_0 = 54 \text{ MeV/c}$ 对应于图 4 中弹核入射能为 $20\text{--}40 \text{ MeV/u}$ 的系统. 无论怎样, 在此 $25 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 的反应系统中我们清楚地得到两组 σ_0 值, 意味着中等质量碎片的高能部分存在两种不同的反应机制^[10].

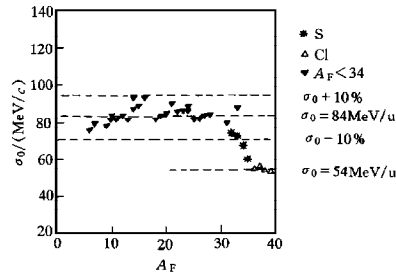


图 3 σ 和碎片质量的关系

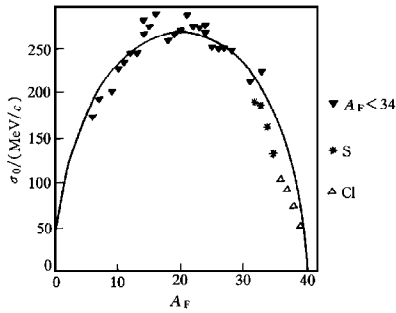


图 4 σ 与类弹碎片质量的关系 图注同图 3

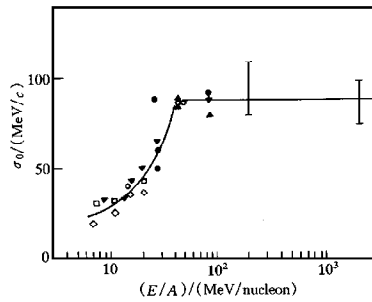


图 5 σ 与 E/A 的关系

在中能的低能区 ($20\text{--}40 \text{ MeV/u}$), 重离子核反应机制很复杂, 多种反应机制共存并竞争. 实验室系中的碎片能谱可以在假定弹核参考系中动量分布为高斯分布的基础上获得. 考虑平行动量和横向动量, 则质量为 A_F 的碎片的双微分截面为^[10]

$$\frac{d^2 \sigma}{dE d\Omega} \approx \exp \left(-\frac{p_{\parallel}^2}{2\sigma_{\parallel}^2} - \frac{p_{\perp}^2}{2\sigma_{\perp}^2} \right), \quad (2)$$

其中 $p_{\parallel}$, $p_{\perp}$ 分别为碎片的平行动量和横向动量; $\sigma_{\parallel}$, $\sigma_{\perp}$ 分别为碎片的平行动量分布宽度和横向动量分布宽度. 变换到实验室系中则有

$$\frac{d^2 \sigma}{dE d\Omega} = N \sqrt{2 A_F E} \exp \left[-A_F \left(\frac{E \sin^2 \theta}{\sigma_{\perp}^2} + \frac{E \cos^2 \theta \bar{E} - 2 \sqrt{E \bar{E}} \cos \theta}{\sigma_{\parallel}^2} \right) \right], \quad (3)$$

其中 A_F 为碎片质量, E 为碎片实验室系动能, $\bar{E}$ 是对应于碎裂部分的能量分布的最可几值, θ 为碎片实验室系出射角, N 是归一化常数. 当考虑前方向的出射产物时, θ 一般接近

于擦边角, 比较小, 又因为 $\sigma_{\parallel}$ 比 $\sigma_{\perp}$ 小得多, 因此(3)式可简化为:

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = N\sqrt{2A_F E} \exp\left[-\frac{A_F}{\sigma^2}(E - 2\sqrt{E\bar{E}} \cos\theta + \bar{E})\right], \quad (4)$$

式中的 σ 即是(3)式中的 $\sigma_{\parallel}$.

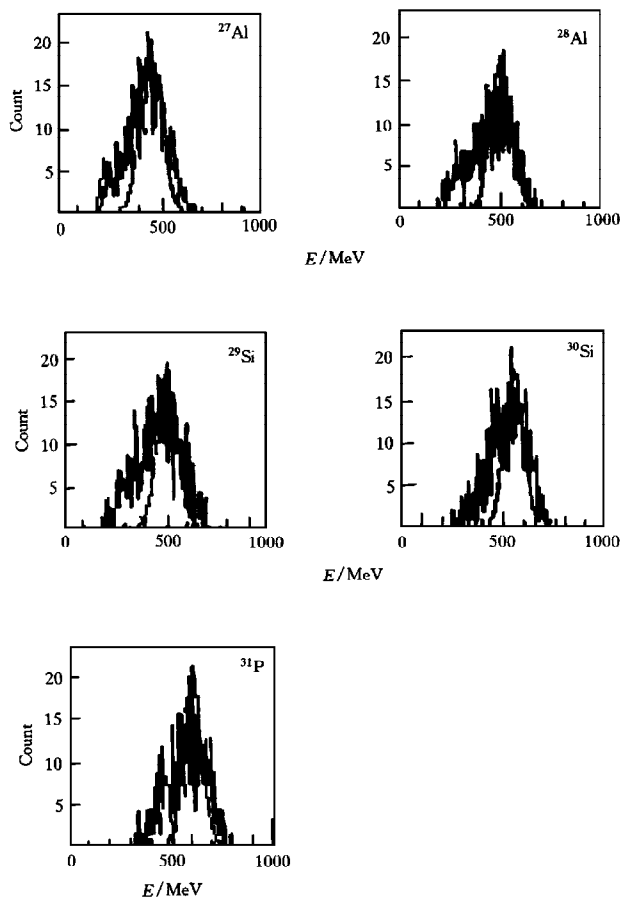


图 6 类弹碎片最可几能量的拟合

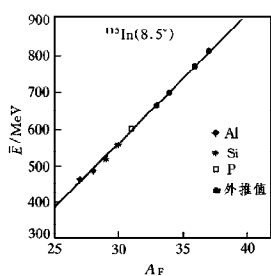


图 7 最可几能量 $\bar{E}$ 与 A_F 的关系

当类弹碎片质量远离弹核时, 可以认为能谱的高能部分主要是碎裂的贡献, 转移的贡献可以忽略. 用简化后的(4)式来拟合实验谱, 可以很好地重现实验能谱. 拟合中采用 $\sigma_0 = 84 \text{ MeV}/c$, 这是因为在上一节中, 对于 A_F 从 20—36 的碎片的 σ_0 值都在 $84 \text{ MeV}/c$ 左右, 拟合中 N 和 $\bar{E}$ 是可调参数, 这样对 $25 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 的系统的 ^{27}Al , ^{28}Al , ^{29}Si , ^{30}Si , ^{31}P 碎片的能谱可以拟合出碎裂部分如图 6 所示, 其最可几能量 $\bar{E}$, 如图 7 所示.

对于更重的类弹碎片如 ^{33}S , ^{34}S , ^{36}Cl , ^{37}Cl , 由于转移对

它们的形成有贡献, 能谱的高能部分是弹核碎裂和转移贡献的叠加, 所以实验测得的峰位比按碎裂预计的要高. 因此, 我们按照下面的步骤来获得碎裂部分的贡献^[11,12]:

1. 由第三节提取的约化动量分别宽度的第一组值 $\sigma_0 = 84 \text{ MeV}/c$, 对于较重的类弹碎片, 在拟合其碎裂能谱时仍选取相同的 σ_0 值.

2. 对于较重的碎片部分最可几能量值 $\bar{E}$, 由较轻碎片拟合出的最可几能量值的外推来获得, 这样得到的重的碎片 $A_F = 33, 34, 36, 37$ 的最可几能量 $\bar{E}$ 值分别为 660, 697, 771, 808 MeV.

3. (4) 式中的归一化系数 N 可调, 以拟合实验中测得的碎片能谱中高能端的低能部分.

通过上述步骤就可将 ^{33}S , ^{34}S , ^{36}Cl , ^{37}Cl 各类弹碎片能谱中的碎片能谱的高能部分分解为碎裂和转移部分. 如图 8 所示, 将碎裂贡献扣除后, 余下的高能部分和低能部分可认为分别来自于转移和耗散, 这样就可以粗略地将不同反应机制的碎片分开, 有利于进一步研究它们随反应系统的变化.

从图 1—图 4, 图 6—图 8 可以看出, 该 $25 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 的反应系统中, 其碎片产物对于 A_F 为 20—36 的碎片主要来自于准碎裂、碎裂过程; 对于 A_F 为 36—39 的碎片主要来自于转移过程, A_F 从 33 开始随着质量数的增加, 在碎

片的能谱中转移部分所占的比例越来越多; 对于 A_F 小于 20 的碎片来源于多种反应机制, 它主要来自弛豫的慢过程, (1) 对于低速的较轻的碎片来自于高温、高激发态的核系统

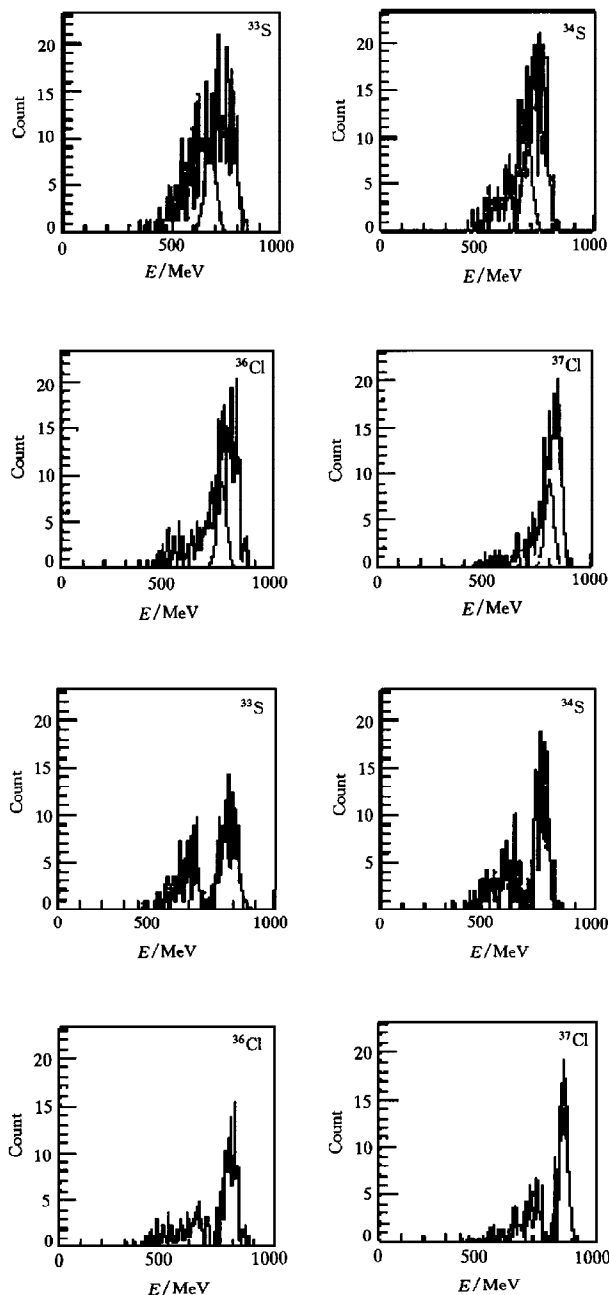


图 8 类弹碎片的碎裂和转移的分解

的粒子蒸发的过程,(2)对于速度接近于弹核的较轻碎片来自于弹核的碎裂或准碎裂过程,(3)对于中等速度的较轻碎片主要来源于深部非弹、参与者等。

- [1] Bonasera A. di Torom, C. Gregoire *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A463**(1987), 563.
- [2] Guo Zhongyan, Zhan Wenlong *et al.*, *High Energy Physics and Nuclear Physics*, **19**(10)(1995).
- [3] Zhao Youxiong, Guo Zhongyan, Zhan Wenlong *et al.*, *Nuclear Electronics & Detection Technology*, **15**(1995), 57.
- [4] A. S. Goldhaber, *Phys. Lett.*, **53B**(1974), 306.
- [5] F. Rami, J. P. Coffin *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A444**(1985), 325.
- [6] A. Menchaca-Rocha *et al.*, *Phys. Lett.*, **131B**(1983), 31.
- [7] K. W. McVoy and M. C. Nemes, *Z. Phys.*, **A295**(1980), 177.
- [8] Y. P. Viyogi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **42**(1979), 33.
- [9] D. E. Greiner *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **35**(1975), 152.
- [10] K. Van Bibber *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **43**(1979), 840.
- [11] V. Borrel *et al.*, *Z. Phys.*, **A324**(1986), 205.
- [12] Liu Guanhua, Ph. D Thesis(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, 1991), (in Chinese).

STUDIES OF 25 MeV/u ^{40}Ar INDUCED REACTIONS AND THEIR FORWARD EMITTED PRODUCTS

LIN YUAN-GENG ZHAN WEN-LONG GUO ZHONG-YAN ZHOU JIAN-QUN ZHAO YOU-XIONG
LIU GUAN-HUA WANG JIN-CHUAN LUO YONG-FENG LEI HUAI-HONG QI ZHONG
ZHANG WAN-SHENG QIN LI-JUN

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

(Received 25 August 1997)

ABSTRACT

The invariant velocity spectra of the forward emitted fragments in the 25 MeV/u ^{40}Ar induced reactions are investigated, their parallel momentum and reduced parallel momentum distribution widths of the fragments are extracted. Furthermore, the emitted products are summarized.

PACC: 2570; 2587