

30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中中等 质量碎片的发射源*

李祖玉 王宏伟 贺智勇 段利敏 张保国
戴光曦 符彦飙 靳根明 吴和宇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 在 6° — 110° 范围内测量了30MeV/u的 ^{40}Ar 轰击 $^{\text{nat}}\text{Ag}$ 靶产生的中等质量碎片($3 \leq Z \leq 16$)能谱,利用运动源模型拟合能谱,并详细讨论了类弹、类靶和中速这三种源的特性及其随角度和中等质量碎片电荷的变化规律.从前角区中等质量碎片的符合测量中得到关联测得的两个中等质量碎片分别来自于两个发射源,即一个来自于类弹源,另一个来自于中速源的几率占绝大多数.

关键词 中等质量碎片 运动源模型 类靶源 类弹源 中速源

1 引言

中能区(10—100MeV/u)核-核碰撞研究是当前核物理研究的一个重要领域,而在中能区核物质相互作用由吸引的平均场相互作用占主导向排斥的核子-核子相互作用过渡,使得反应机制和衰变产物变得相当复杂,大量中等质量碎片(IMF)的出射是其重要的衰变道,研究这些 IMF 的起源是探讨中能区核反应机制的重要手段.近年来,人们对中等质量碎片的发射进行了广泛的研究^[1-4],得到中能区出射的 IMF 既有类似于低能区出射的类靶蒸发成份,又有类似于高能区的碎裂成份,同时还包括有非平衡发射成份.怎样区分这些不同来源的 IMF 成为人们关注的焦点.江栋兴等^[5,6]对 HIRFL 上后角出射的 IMF 实验进行了分析,认为其主要来自于类靶平衡源的热核蒸发.本文通过单举和符合测量对不同来源的 IMF 随角度和电荷的变化规律进行初步的分析.

2 实验概况

实验在兰州重离子加速器(HIRFL)的筒型散射室上完成.采用30MeV/u的 ^{40}Ar 束轰击 $407\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚的 $^{\text{nat}}\text{Ag}$ 靶,束流强度约10—20nA.使用8套 ΔE - E 望远镜测量不同角度的

1998-06-08收稿

* 国家自然科学基金资助(19675053, 19505007)

中等质量碎片, 其 θ 角分别为 6° 、 9° 、 15° 、 21° 、 30° 、 50° 、 70° 和 110° 。前 6 套望远镜均采用 $100\mu\text{m}$ 厚的 Si 探测器作 ΔE 测量和 50mm 厚的 CsI 作 E 测量, 有效探测面积为 $\phi 15\text{mm}$, 离靶心距离分别为 82.0 、 70.5 、 71.2 、 72.5 、 61.4 和 37.0cm 。后两套望远镜采用 $50\mu\text{m}$ 厚的 Si 作 ΔE 测量和 5mm 厚的 Si 作 E 测量, 有效探测面积为 $\phi 12\text{mm}$, 离靶心距离分别为 24.5 和 11.0cm 。另外在前角区安装了一套 13 单元 ΔE - E 望远镜阵列探测器^[7]测量 IMF 并主要用于提取关联数据。该阵列探测器距靶心 650mm , 阵列中心与束流方向的夹角为 17° , 相邻两套探测器的夹角为 3° , 最远两套的夹角为 11° 。该阵列探测器中每一套望远镜均由一块 $200\mu\text{m}$ 厚的 Si 作为 ΔE 测量, 后接一 50mm 厚的 BGO 闪烁体作 E 测量, 其有效探测面积为 $\phi 17\text{mm}$ 。实验中采用传统的 ΔE - E 方法鉴别粒子。 $\Delta E(\text{Si})$ 探测器的能量及电子学系统的线性采用 ThC-ThC' α 源以及精密脉冲发生器进行刻度, 而对于 BGO 和 CsI 探测器的能量校准则采用碎片在 $\Delta E(\text{Si})$ 探测器中的能量损失结合粒子的能量-射程表反推求得。实验使用 GOOSY 数据获取系统, 事件逐一记录在磁带上以便进行离线分析。

3 单举测量结果

实验中, 8 个角度(从 6° — 110°)测到并分辨出的最重的 IMF 分别为 $Z = 19, 18, 12, 8, 10, 6, 6, 6$ 。采用运动源模型来拟合实验室系能谱, 其公式为

$$\frac{d^2\sigma}{dEd\Omega} = \sum_{i=1}^3 N_i \sqrt{E - U_c} \exp(-E_{sx}/T_i), \quad (1)$$

其中 $E_{sx} = E - U_c + E_i - 2\sqrt{E_i(E - U_c)} \cos\theta$, E 是实验室系中碎片的动能, $E_i = \frac{1}{2} m v_i^2$ 是质量为 m 的碎片以源速度 v_i 运动时的动能, N_i 是归一化系数, T_i 为发射源的核温度, U_c 为反应系统的库仑排斥能。表 1 列出 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中 $Z = 2$ 至 $Z = 16$ 碎片能谱运动源模型拟合的各参数值。

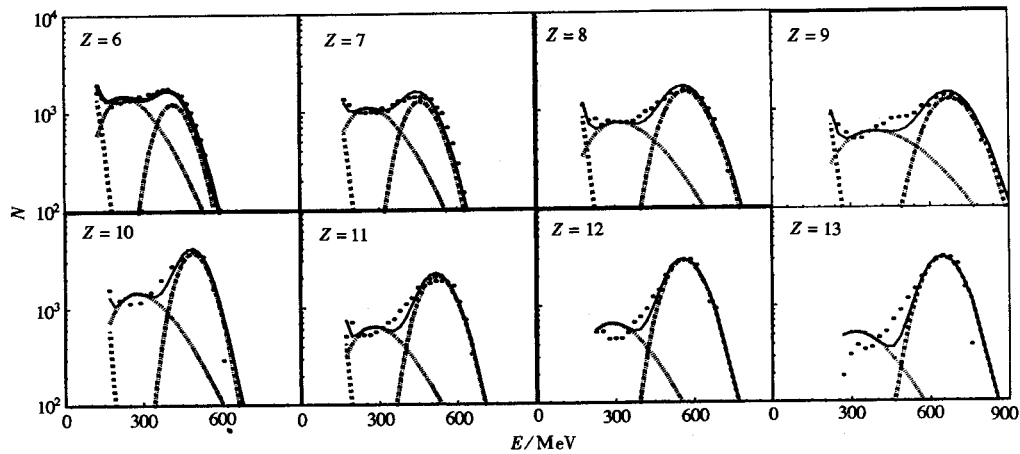
从表 1 的结果可以看出, 类靶和类弹源的温度(分别为 T_1 、 T_3)较低, 且类弹源温度略低于类靶源温度, 同时轻粒子 α 的源温度又低于 IMF 的源温度。类靶源速度 $v_1 = 0.05c = 1.5\text{cm/ns}$, 表明弹核约有 67% 与靶核结合成复合系统, 即类靶源实际上为弹核和靶核的非完全融合系统, 类靶源更容易发射较重的碎片, 中速源更容易发射较轻的碎片, 类弹源速度 $v_3 \approx 0.22c = 6.6\text{cm/ns}$, 略低于弹核速度 $v_p = 7.6\text{cm/ns}$, 而中速源速度 $v_2 \approx 0.13c = 3.9\text{cm/ns}$, 约为弹核速度的一半。中速源的 T_2 相当高(与文献 [8—14] 中运动源模型拟合结果类似), 且碎片越重, T_2 值越高, 对 $Z \geq 10$ 的碎片, 中速源温度达 30MeV , 这在物理上很难给出合理的解释。这些中速源成份究竟来自于何种机制, 至今仍无定论, 有人将其归因于弹靶重迭区域形成的“火球”发射, 有人认为是动力学过程产生的, 还有人认为是多重碎裂的结果。我们测量了这些中速成份的发射时间约为 $250\text{fm}/c$, (详见文献 [15]), 说明这些中速 IMF 主要来自于相继两体衰变过程, 可能来自于非平衡发射。

图 1 给出了此反应中 $\theta = 6^\circ$ 时 $Z = 6$ 至 $Z = 13$ 碎片的实验室系能谱及三源模型拟合结果。由于 $\theta = 6^\circ$ 处 ΔE - E 望远镜是选用 $100\mu\text{m}$ 的 Si 作 ΔE 测量, 随着碎片增重, 望远镜的

表1 30 MeV/u $^{40}\text{Ar}+^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中拟合碎片能谱的运动源模型参数值

N	N_1	v_1/c	T_1/MeV	N_2	v_2/c	T_2/MeV	N_3	v_3/c	T_3/MeV	U_C/MeV
2	10	0.050	4.5	10	0.130	7	8.0	0.210	3.0	8
3	10	0.050	6.5	5.0	0.135	15	4.0	0.220	5.0	16
4	10	0.050	6.5	4.0	0.120	18	4.0	0.220	6.8	23
5	10	0.050	6.5	3.0	0.130	20	4.0	0.220	6.0	33
6	10	0.050	6.5	1.8	0.130	20	2.8	0.230	6.8	40
7	10	0.050	6.5	1.0	0.132	28	2.0	0.217	5.8	45
8	40	0.055	6.5	1.5	0.132	30	4.0	0.217	5.0	45
9	40	0.055	6.5	1.0	0.132	30	4.5	0.215	5.8	60
10	80	0.055	6.5	1.0	0.130	30	5.5	0.215	5.8	63
11				1.0	0.140	30	6.0	0.215	6.0	66
12				1.0	0.140	30	6.0	0.215	6.0	70
13				1.0	0.140	30	8.0	0.215	6.0	75
14				1.0	0.140	30	9.0	0.215	6.0	80
15				1.0	0.140	30	9.5	0.215	6.5	85
16				1.0	0.140	30	9.5	0.215	6.5	90

探测阈增大, 而几乎测不到类靶碎片. 由图可见, 随着碎片增重, 中速成份逐渐减少, 类弹成份逐渐增多.

图1 不同碎片在 $\theta=6^\circ$ 时的实验室系能谱

曲线为运动源模型拟合结果

■■■■■■类靶源, - - - - - 中速源, - · - · - 类弹源, — 三源之和.

为了探讨 3 个源的相对产额随碎片角度和电荷的变化规律, 计算了不同碎片在不同角度下的 3 个源的相对产额

$$\sigma_i(\theta, z) = \int \sigma_i(E, \theta, z) dE, \quad (2)$$

式中 $i = 1, 2, 3$ 分别代表类靶、中速和类弹源.

图 2 显示 $Z=2$ 、3、4 和 5 碎片中 3 种源的比例随 θ 角的变化规律。图中纵坐标中的 $\sigma_i/\sigma_{\text{total}}$ 为类弹、中速和类靶 3 种成份之和。从图中可以看出,类弹成份主要集中在前角 30° 之内,类弹成份在前角区随着角度的增大具有单一下降的变化规律。中速成份主要集中在前角 70° 之内,在前角,它和类弹成份具有同样的重要性,但在中角 30° 附近,中速成份占绝对优势。而类靶成份在前、中、后角均存在,但它在后角 90° 之后占绝对优势。在中、前角由于类弹和中速成份太强,类靶成份占的比例很少。

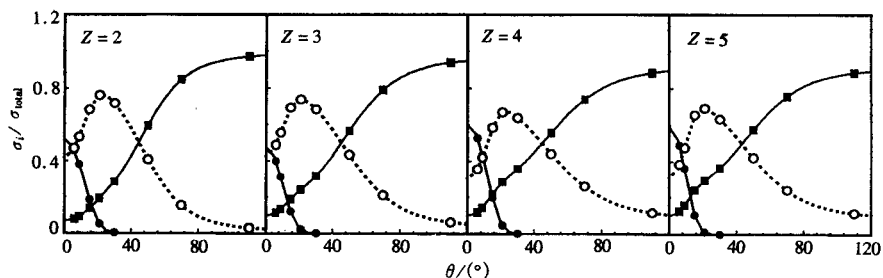


图 2 3 种源在碎片中所占的比例随 θ 角的变化规律

● 类弹源, ○ 中速源, ■ 类靶源.

图 3 显示了此反应 $\theta = 6^\circ$ 、 9° 、 15° 和 21° 处类弹和中速成份所占的比例随碎片电荷 Z 的演化规律。由于在前角区,类靶源成份所占比例较小,故图中没有显示类靶成份的演化规律。从图可看出,在较前角度 $\theta = 6^\circ$ 和 9° 处,类弹成份占很大比例,且随着碎片增重,类弹成份的比例逐渐增多,而中速成份的比例逐渐减少。在接近于中角 15° 和 21° 处,类弹成份所占的比例逐渐减少,而中速成份所占的比例逐渐增多,随着碎片的增重,类弹成份越来越少,中速成份越来越多。

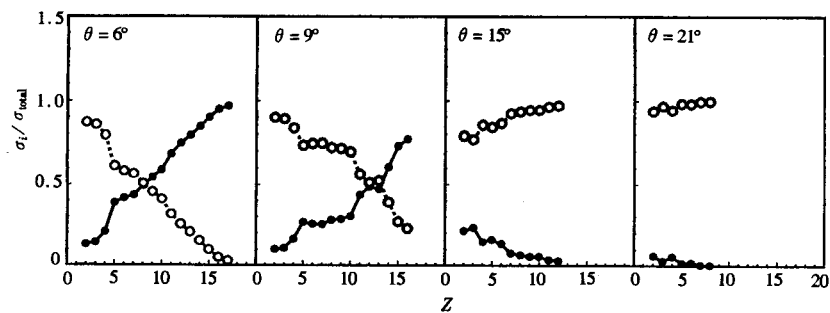


图 3 类弹和中速成份所占比例随碎片电荷 Z 的演化规律

● 类弹源, ○ 中速源.

4 符合测量结果

为了对 IMF 能谱的各个组成部分作更深入的研究,从安置在前角区的 13 单元阵列探测器得到了关联测量能谱。图 4 为与 IMF 关联的 α 粒子能谱,图 5 为与 IMF 关联的 Li 碎

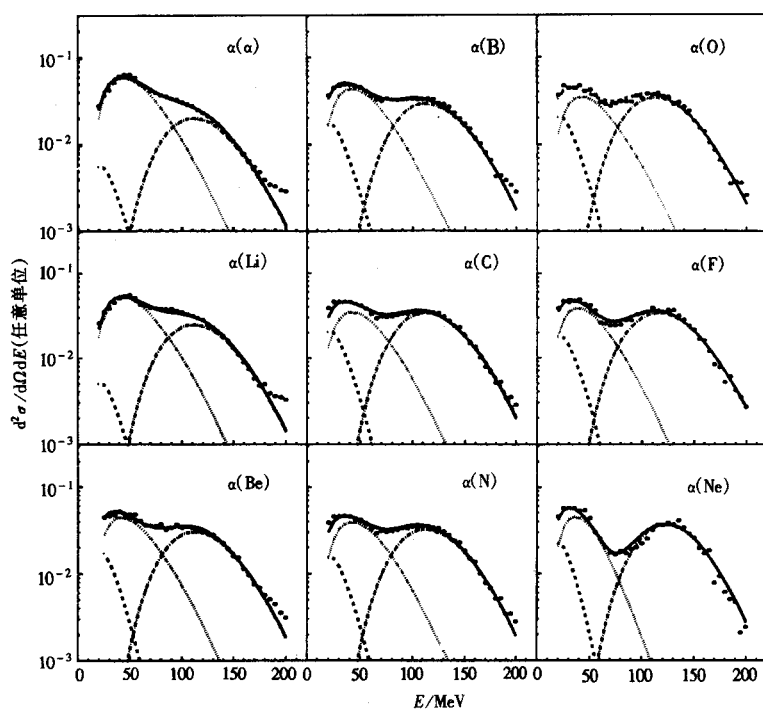


图4 与中等质量碎片关联的 α 粒子能谱($\theta=17^\circ$)

图中曲线含义同图1.

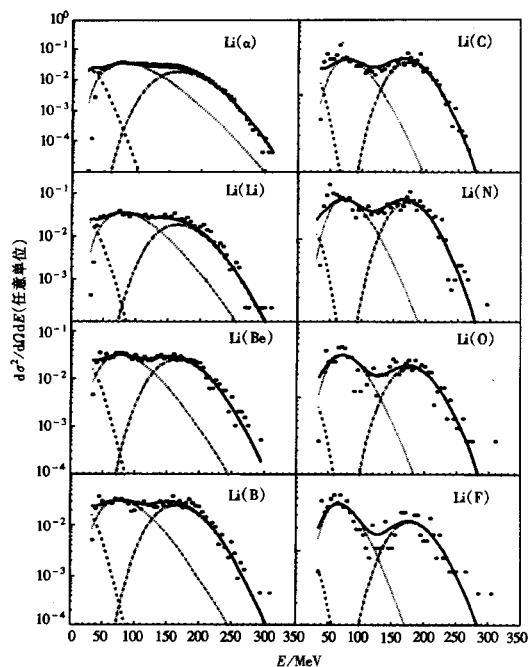


图5 与中等质量碎片关联的Li粒子能谱($\theta=17^\circ$)

图中曲线含义同图1.

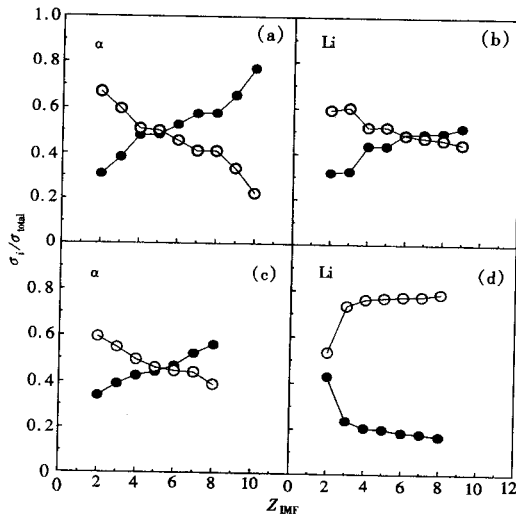


图6 类弹和中速成份占的比例随电荷 Z 的演化规律

(a)、(b)分别对应于图4、图5, (c)、(d)除IMF能量 $E/A > 18\text{MeV/u}$ 外,其余分别相同于(a)、(b);

● 类弹源 $\frac{\sigma_{PLF}}{\sigma_{total}}$, ○ 中速源 $\frac{\sigma_{mid}}{\sigma_{total}}$

片能谱($\theta = 17^\circ$), 曲线为运动源模型拟合的结果。图 6(a)、(b)分别显示了图 4 和图 5 中类弹和中速成份所占的比例随碎片电荷 Z 的演化规律。从图 6(a)可以看出, 随着与 α 粒子关联的 IMF 的 Z 值增加, 中速成份逐渐减少, 从 α - α 关联的 70% 减到 α -Na 关联的 20%, 而类弹成份则逐渐增加, 从 α - α 关联的 30% 增到 α -Na 关联的 70%。图 6(b) 为与 IMF 关联的 Li 碎片的结果, 具有和 α 同样的规律, 只是百分比值稍有差别。为了对中速和类弹成份对能谱的贡献有更深入的理解, 对关联的 IMF 的能量进行限制, 选取 $E/A > 18\text{MeV/u}$ 的 IMF (认为是类弹碎片) 与 α 及 Li 关联, 得到类弹和中速成份所占比例随碎片电荷 Z 的演化规律分别如图 6(c)、(d) 所示。其中图 6(c) 与图 6(a) 没有多大变化, 但图 6(d) 与图

6(b) 却有很大的差别, 说明一个碎片来自于类弹 ($E/A > 18\text{MeV/u}$) 而 Li 也来自于类弹的比例随碎片 Z 的增大而下降, 从 Li- α 关联的 40% 下降到 Li-Na 关联的 20%。也就是说, 两个碎片同时来自于一个类弹源的几率只有 20%, 而一个来自于中速源, 另一个来自于类弹源的几率达 80%。

5 总结

通过单举和符合测量研究了 30MeV/u 的 ^{40}Ar 轰击 ^{nat}Ag 靶在 6° - 110° 范围内产生的中等质量碎片能谱, 利用运动源模型拟合来详细讨论类弹、类靶和中速这 3 种源的特性及随角度和 IMF 电荷的变化规律。从单举测量中我们得到: 在前角区, 类弹和中速成份占很大的比例, 而类靶的份额很小; 在中角区类弹成份很少, 而主要为中速成份和类靶成份, 且随着角度增大, 中速成份逐渐减少, 类靶成份逐渐增多; 在后角区主要为类靶源蒸发成份, 但仍有少量的中速成份, 随着角度的增加, 中速成份越来越少。从前角区的符合测量中得到关联测量的两个中等质量碎片分别来自于两个发射源, 即一个来自于类弹源, 另一个来自于中速源的几率占绝大多数。

参 考 文 献

- 1 Kim Y D et al. Phys. Rev., 1992, C45:338
- 2 Sangster T C et al. Phys. Rev., 1992, C46:1404
- 3 Natowitz J B. Nucl. Phys., 1992, A488:263C
- 4 He Zhiyong et al. High Energy Phys. and Nuclear Phys. (in Chinese), 1998, 22:13
(贺智勇等. 高能物理与核物理, 1998, 22:13)
- 5 Jiang Dongxing et al. Chinese Journal of Nucl. Phys., 1995, 17:223
- 6 Qian Xing et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1996, 20:304
(钱兴等. 高能物理与核物理, 1996, 20:304)
- 7 Li Zuyu et al. Nucl. Instr. and Meth., 1996, A373:198
- 8 Pochodzalla J et al. Phys. Rev., 1987, C35:1695
- 9 Chen Z et al. Phys. Rev., 1987, C36:2297; Phys. Lett., 1987, B199:171
- 10 Nayak T K et al. Phys. Rev., 1992, C45:132
- 11 Phair L et al. Nucl. Phys., 1992, A548:489
- 12 Kim Y D et al. Phys. Rev., 1992, C45:388
- 13 Wada R et al. Nucl. Phys., 1992, A539:316
- 14 Sokolov A et al. Nucl. Phys., 1993, A562:273
- 15 Li Zuyu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, 22(8):684
(李祖玉等. 高能物理与核物理, 1998, 22(8):684)

Origins of Intermediate Mass Fragments for $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ Reaction at 30 MeV/u *

Li Zuyu Wang Hongwei He Zhiyong Duan Limin Zhang Baoguo
Dai Guangxi Fu Yanbiao Jin Genming Wu Heyu

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

Abstract The energy spectra of intermediate-mass fragments (IMF) ($3 \leq Z \leq 16$) have been measured from 6° to 110° for $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ reaction at 30 MeV/u. The energy spectra were analyzed by the moving source model. The natures of the projectile-like source, target-like source and mid-rapidity source as well as the evolution with angle and nuclear charge were discussed. Two intermediate mass fragments, measured by correlation method in forward angles, come from two sources. One comes from projectile-like source, and other one mainly comes from intermediate source respectively.

Key words intermediate mass fragment, moving source model, projectile-like source, target-like source, mid-rapidity source

Received 8 June 1998

*Supported by the National Natural Science Foundation of China (19675053, 19505007)