文章编号: 1007-4627(2013) 02-0122-06

6 MeV/u 的 ^{19}F+^{27}Al 反应碎片的发射机制

白 真[1, 2]，韩建龙[1]，陈志强[1]，王建松[1]，王 琦[1]

(1. 中国科学院近代物理研究所，甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要: 重离子核反应中的碎片发射机制是近年来人们十分关注的研究课题。利用 ΔE-E 探测器，测量了 ~6 MeV/u 的 ^{19}F+^{27}Al 反应中核电荷数 $Z = 2 \sim 13$ 的出射碎片。对产物的能谱、角分布、激发函数及能量自关联函数的分析表明，出射产物主要来自弹靶核深部非弹性碰撞所形成的转动的双核系统。

关键词: 核反应；轻系统；碎片发射；激发函数

中图分类号: O571.4　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.02.122

1 引言

核反应是核物理研究的基本手段，核反应机制一直是核物理研究的一个基本内容。不同的反应机制有不同的物理图像，促使了各种理论模型的产生，用以揭示并预言核反应中的种种现象及其物理本质。随着加速器技术与核探测技术的迅速发展，核物理实验研究的能量范围已经从 keV、MeV 到了 GeV，出射的产物从简单的轻粒子到了复杂的中等质量碎片，涉及的核素从 β 稳定线附近的几百个到了滴线和超重预言的数千个。核物理依然是一门活跃发展的学科，世界各国的诸多核物理实验室都致力于实验数据的不断积累和理论的积极进展。

重离子核反应中的碎片发射是近年来人们十分关注的研究课题[1]。这些碎片可能来自各种各样不同的反应机制，如弹性散射、炮弹碎裂、深部非弹性碰撞、熔合裂变、复合核蒸发等[1–8]。特别是那些能量耗散较大的出射碎片有高的产额，其出射过程涉及弹靶之间从单个到多个电荷数、质量数和角动量等的转移，涉及到不同反应机制的动力学演化过程，引起了人们的极大兴趣。

在重离子核反应的碎片发射机制研究中，早期大量的工作积累着重于重系统[9–11]，轻系统的研究开展比较晚，成果也比较少[7–8, 12]，碎片发射机制多数被归结为熔合裂变[13–20]，同时不排除深部非弹 orbiting (即弹靶核因深部非弹性碰撞而形成转动的双核系统) 的参与和竞争[21–26]。对于轻系统而言，熔合裂变和深部非弹 orbiting 这两种反应机制的出射产物具有近似的元素分布和能量分布，比较难以区分[1, 12, 27–28]。轻系统出射碎片的反应机制研究方兴未艾，这既是对实验探测和分辨能力的挑战，也是对理论模型的检验。

我们测量了 ~6 MeV/u 的 ^{19}F+^{27}Al 反应中的出射碎片，以类弹碎片 B，C，N 和 O 为主，分析了产物的能量分布、角分布、激发函数及其能量自关联函数，对碎片发射的主要反应机制进行了讨论。我们的实验研究为轻系统碎片来自深部非弹性 orbiting 发射机制增添了数据。另外，在传统的对能量分布和角分布分析的基础之上，利用激发函数及其特点论证碎片发射机制，也是具有一定新意的物理分析方法。

2 实验结果及讨论

实验是在中国原子能科学研究院 HI-13 串列静电加速器上完成的[29–30]。入射束流 ^{19}F 的能量从 110.25 MeV 到 118.75 MeV，能量步长 250 keV；^{27}Al 同位素

收稿日期: 2012-11-15;　**修改日期:** 2012-12-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(10905076)

作者简介: 白真(1976–)，男，甘肃兰州人，助理研究员，博士研究生，从事重离子核反应研究；E-mail:bazh@impcas.ac.cn.

通信作者: 韩建龙，E-mail: hanjl@impcas.ac.cn

http://www.npr.ac.cn

靶的厚度为 60 μg/cm^2；3套 ΔE-E 望远镜分别置于实验室系 57°，31° 和 −29°，用于鉴别反应产物的电荷数 Z，望远镜系统的 Z 分辨 $Z/\Delta Z$ 可达到 30；其中 ΔE 探测器为流气式的气体电离室，充以 100 mb 的 P10 (90%Ar+ 10%CH_4) 混合气体，气体长度为 6 cm；E 探测器为厚度 500 μm 的金硅面垒半导体；在束流两侧 $\theta_{lab} = \pm 7.5°$ 放置两个对称的 Si 探测器作束流监测；在 $\theta_{lab} = 0°$ 用法拉第筒收集束流电荷。

图 1 给出了实验中获得的典型的 ΔE-E 散点图。入射束流能量 110 MeV，探测角度为实验室系 31°。从图中可以看到，元素 He，Li，Be，B，C，N，O，F，Ne，Na，Mg 和 Al 等都能够清晰地区分出来。

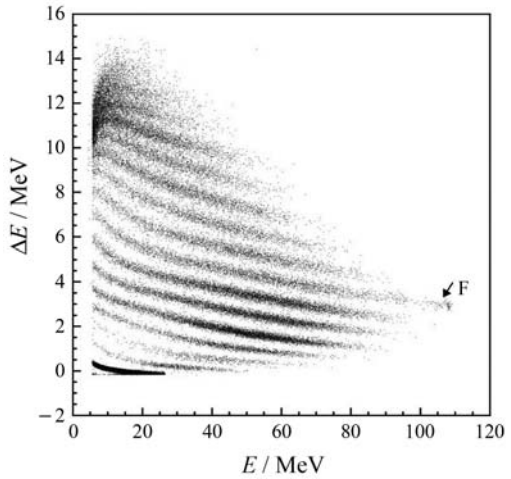

图 1　实验中获得的 ΔE-E 散点图 (图中箭头所示为元素F)

2.1　能谱

图 2 给出了实验室系 31° 出射的类弹碎片 B，C，N 和 O 的能谱，入射束流能量 110 MeV。能谱的主要部分可以用高斯曲线拟合，高斯拟合的中心能量值 E_{cen} 在图中用箭头表示。相对于束流能量而言，这些出射碎片的能量有较大的耗散，其最可几值 E_{cen} 远远低于准弹反应的产物。假设碎片发射来自弹靶核碰撞所形成的中间复合系统。如果碎片发射自弹靶核深部非弹性碰撞所形成的能量全驰豫的双核系统，那么，两体反应的 Q 值近似为 $Q_{full} = V_{coul} - E_{cm}$，$V_{coul}$ 和 E_{cm} 分别是反应系统的库仑位垒和弹核在质心系的入射能量[31]。将 Q_{full} 带入 Q 方程，可以得到不同产物的最可几能量 E_{DIC}，如表 1 所列。计算的碎片能量值 E_{DIC} 略低于实验能谱的中心值 E_{cen}。如果碎片发射来自熔合裂变机制，按照 Viola 给出的系统性公式并经过非对称修正[32−33]，求得其最可几能量 E_{FF}，结果也列于表1之中。计算的熔合裂变碎片能量值 E_{FF}

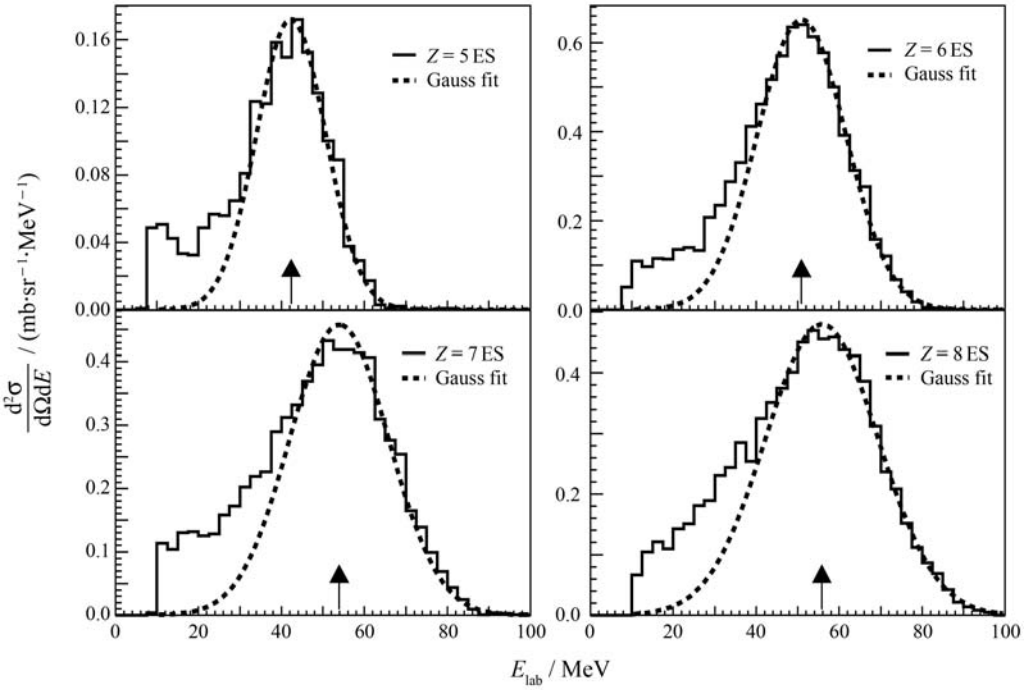

图 2　110 MeV $^{19}F+^{27}Al$ 反应产物 B，C，N 和 O 的能谱

实线表示能谱 (Energy Spectrum，简称 ES)，虚线为能谱的 Gauss 拟合，箭头对应表 1 中的 E_{cen} 值。

http://www.npr.ac.cn

远低于 E_{cen}。

从表 1 可以看出，实验值 E_{cen} 更接近计算值 E_{DIC}，这说明，~6 MeV/u 的 $^{19}F+^{27}Al$ 反应碎片主要来自弹靶核碰撞所形成的转动的深部非弹双核系统。由于转动的深部非弹双核系统的能量自由度并没有达到完全驰豫，所以，实验值 E_{cen} 要高于能量全驰豫双核系统所预期的最可几能量值 E_{DIC}；而熔合反应机制更接近反应系统各个自由度的统计平衡，所以，熔合裂变的最可几能量 E_{FF} 与实验值 E_{cen} 的差距也就更大。

表 1　110 MeV $^{19}F+^{27}Al$ 反应产物 B，C，N 和 O 的能量最可几值

碎片	E_{cen} / MeV	$E_{FF}[\lvert E_{FF}-E_{cen}\rvert]$ / MeV	$E_{DIC}[\lvert E_{DIC}-E_{cen}\rvert]$ / MeV
B	42	28[14]	39[3]
C	50	31[19]	42[8]
N	54	35[19]	39[15]
O	55	37[18]	39[16]

另外，实验所获得的能谱在低能部分比高斯拟合值有明显的增强，它可能来自初级碎片的次级衰变，这也表明了碎片发射机制的复杂性[28]。

2.2　角分布

图 3 给出了在入射能量为 114 MeV 时测量的 $^{19}F+^{27}Al$ 反应碎片B，C，N，O，F，Ne，Na，Mg 和 Al 的角分布。测量中用一套 ΔE-E 望远镜在真空室中转动，测量角度分别为 $\theta_{lab}=9°$，24°，40°，55°，70° 和 80°。元素 N，O，F，Ne，Na 和 Mg 的角分布类似，在前角区和后角区分别可以用两条不同斜率的直线拟合，具有典型的深部非弹产物角分布的特点。元素 B 和 C 离弹核较远，作为类弹产物，从弹核转移的核子数较多，在反应的早期阶段，这样多核子的转移比较困难，所以在小角区(对应核反应的早期阶段)截面较小 (对应多核子转移比较困难)。元素 Al 产物角分布的截面下降很快，一方面是因为弹核多核子转移几率迅速减小，另一方面是因为弹核拾取核子要比削裂核子困难得多。纵观不同碎片角分布的变化过程，既反映了这些碎片发射随时间的演化，也佐证了弹靶核反应中有一个转动的中间双核系统形成。

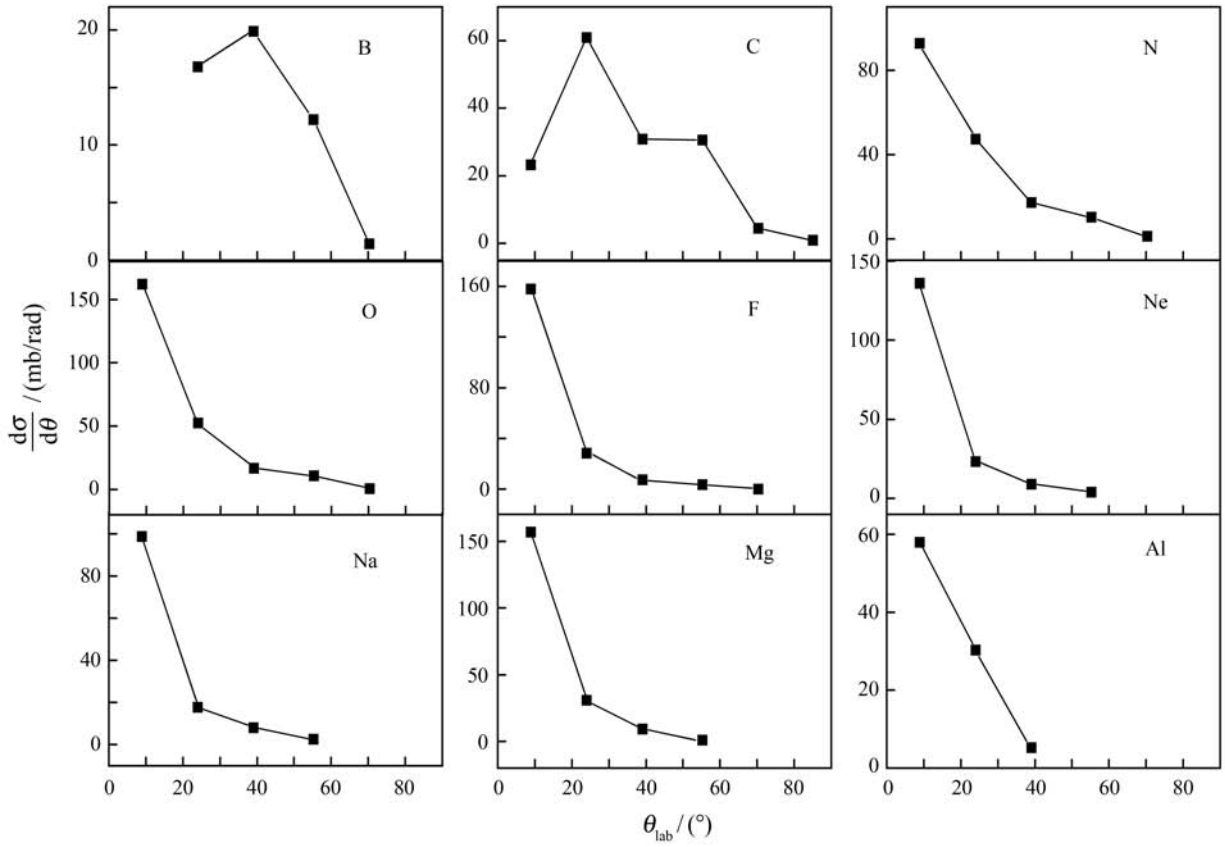

图 3　114 MeV $^{19}F+^{27}Al$ 反应产物的角分布

http://www.npr.ac.cn

2.3　激发函数和能量自关联函数

核反应统计理论指出，复合核中一旦有能级重叠，出射产物的激发函数中就存在涨落结构[34−35]。重离子深部非弹反应中形成的中间双核系统有高的激发能，存在能级重叠，所以，其激发函数中存在涨落结构。这种涨落结构不能平滑，即将实验中不同出射角度、不同元素的激发函数相加后，所得的激发函数中，仍然存在涨落结构[36]。这说明各个元素、各个角度的激发函数之间存在强烈的关联，这是深部非弹性碰撞反应机制区别于其他反应机制的特征之一[36–38]。

图 4 给出了实验室系 31° 探测器探测到的不同产物在质心系的激发函数。分析激发函数中能量结构现象的基本方法是统计理论的能量自关联函数 (Energy Auto-correlation Function，简称 EAF) 方法[34−35]。能量自关联函数的定义如公式 (1) 所示：

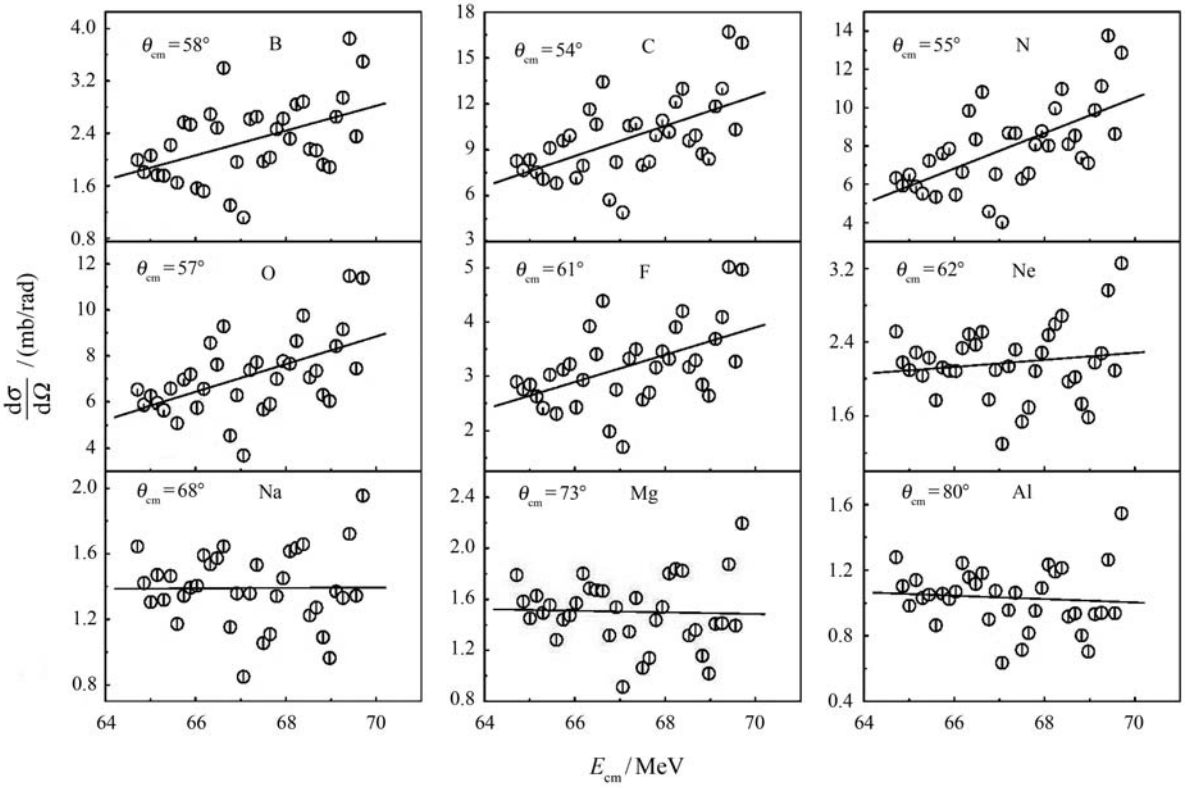

图 4　实验室系 31° 探测器探测到的不同产物在质心系的激发函数

实线表示最小二乘法拟合得到的平均值。

$$C(\varepsilon,\theta)=\left\langle\left(\frac{\sigma(E,\theta)}{\overline{\sigma}(E,\theta)}-1\right)\left(\frac{\sigma(E+\varepsilon,\theta)}{\overline{\sigma}(E+\varepsilon,\theta)}-1\right)\right\rangle, \tag{1}$$

其中：$\varepsilon = kE_{\text{step}}$，$0\leqslant k\leqslant N$，$E_{\text{step}}$ 代表激发函数测量中的能量步长，N 则为总的测量数据点的数目；$\sigma(E,\theta)$ 表示入射能量为 E 时在出射角 θ 处测量到的产物的截面值；<>表示对所有测量数据求算术平均；$\overline{\sigma}$ 表示反应截面随能量的平均变化趋势，如图 4 中的实线所示。

复合核反应产物激发函数的能量自关联函数 $C(\varepsilon)$ 呈 Lorentzian 型[34−35]，$C(\varepsilon)$ 曲线的半高全宽就等于复合核的平均衰变宽度 Γ，Γ 标志了复合核的寿命。与复合核反应不同，重离子深部非弹反应中形成的中间双核系统的很多自由度没有达到全驰豫，出射碎片的激发函数中存在不可平滑的涨落结构，其能量自关联函数 $C(\varepsilon)$ 不再是简单的 Lorentzian 型，而呈现出准周期性的复杂能量结构[36–39]。

利用公式 (1)，计算得到了图 4 中所示的激发函数的能量自关联函数 EAF，如图 5 所示，EAF 呈现出 Non-Lorentzian 形的准周期性结构。图 5 中实线所示为 Lorentzian 函数计算的结果，对应着理论预期的达到统计平衡的复合核反应产物的能量自关联函数的形状。

http://www.npr.ac.cn

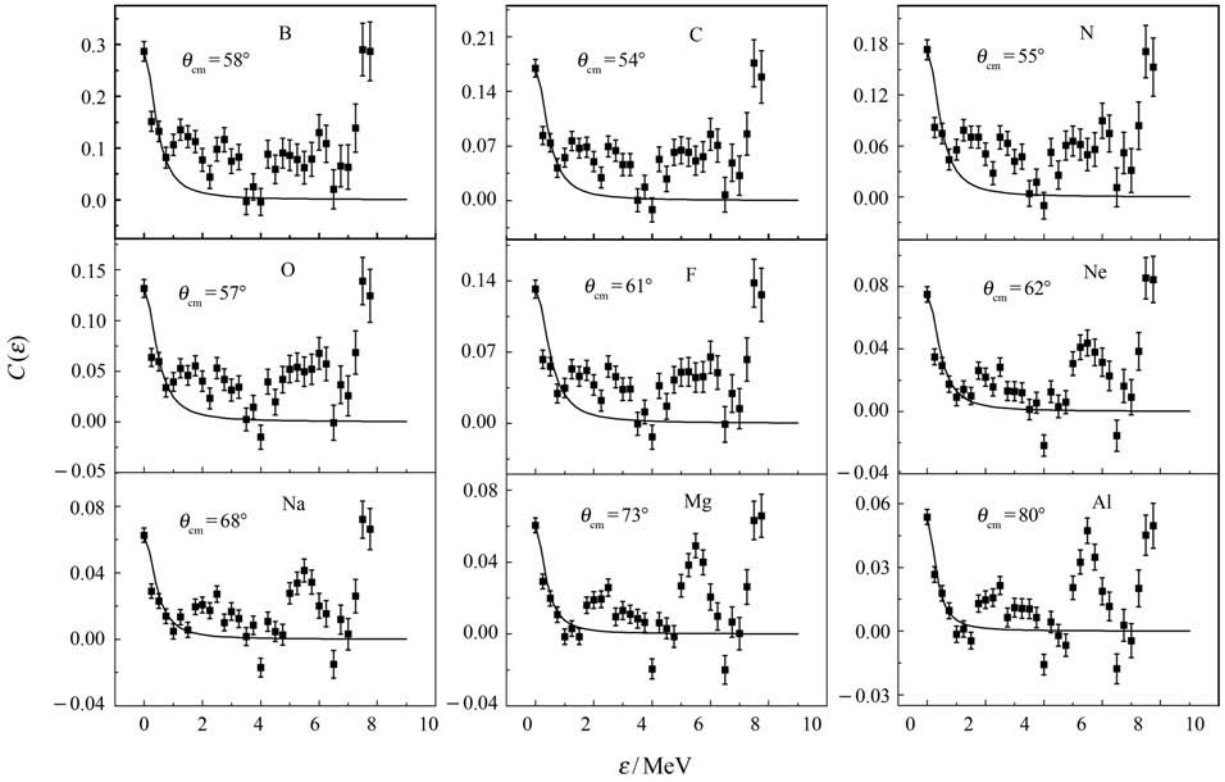

图 5　对应图 4 中激发函数的能量自关联函数

实线为 Lorentzian 函数计算结果。

激发函数和能量自关联函数的这些特征，进一步说明，~6 MeV/u 的 $^{19}F+^{27}Al$ 反应的出射产物，主要来自弹靶核深部非弹性碰撞所形成的转动的双核系统。

3　总结

在中国原子能科学研究院的HI-13串列静电加速器上完成了 $^{19}F+^{27}Al$ 反应碎片的激发函数测量。入射束流的能量从 110.25 MeV 到 118.75 MeV，能量步长 250 keV。本文着重分析了类弹碎片的能谱、角分布及激发函数。分析显示，碎片的最可几能量略高于理论预期的能量自由度达到全驰豫的耗散碎片的能量；碎片的角分布在前角区和后角区分别可以用两条不同斜率的直线拟合；碎片的激发函数具有涨落结构且不能平滑，其能量自关联函数有 Non-Lorentzian 形的准周期性结构。这些特点表明，~6 MeV/u 的 $^{19}F+^{27}Al$ 反应生成的 B，C，N 和 O 等类弹碎片主要来自弹靶核深部非弹性碰撞所形成的、尚未完全驰豫的、转动的中间双核系统。

致谢　感谢中国原子能科学研究院HI-13串列静电加速器国家实验室提供高品质的束流。特别感谢中国原子能科学研究院李志常、赵葵、路秀琴研究员在实验和数据分析中所作的重要贡献。

参考文献(References)：

[1] KUNDU S, BHATTACHARYA C, BANERJEE K, *et al*. Physical Review C, 2012, **85**: 064607.

[2] KALANDAROV S A, ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, *et al*. Physical Review C, 2011, **84**: 064601.

[3] DEY A, BHATTACHARYA C, BHATTACHARYA S, *et al*. Physical Review C, 2007, **76**: 034608.

[4] DEY A, BHATTACHARYA C, BHATTACHARYA S, *et al*. Physical Review C, 2007, **75**: 064606.

[5] SZILNER S, HAAS F, BASRAK Z, *et al*. Nuclear Physics A, 2006, **779**: 21.

[6] BHATTACHARYA C, DEY A, KUNDU S, *et al*. Physical Review C, 2005, **72**: 021601.

[7] BHATTACHARYA C, BHATTACHARYA S, BHATTACHARJEE T, *et al*. Physical Review C, 2004, **69**: 024607.

[8] BHATTACHARYA C, MULLICK K, BHATTACHARYA S, *et al*. Physical Review C, 2002, **66**: 047601.

[9] SOBOTKA L G, PADGETT M L, WOZNIAK G J, *et al*. Physical

http://www.npr.ac.cn

Review Letters, 1983, **51**: 2187.

[10] SOBOTKA L G, MCMAHAN M A, MCDONALD R J, *et al.* Physical Review Letters, 1984, **53**: 2004.

[11] MCMAHAN M A, MORETTO L G, PADGETT M L, *et al.* Physical Review Letters, 1985, **54**: 1995.

[12] POP A, ANDRONIC A, BERCEANU I, *et al.* Nuclear Physics A, 2001, **679**: 793.

[13] MORETTO L G. Nuclear Physics A, 1975, **247**: 211.

[14] SIERK A J. Physical Review C, 1986, **33**: 2039.

[15] SANDERS S J. Physical Review C, 1991, **44**: 2676.

[16] BECK C, DJERROUD B, HAAS F, *et al.* Physical Review C, 1993, **47**: 2093.

[17] DHARA A K, BHATTACHARYA C, BHATTACHARYA S, *et al.* Physical Review C, 1993, **48**: 1910.

[18] SZANTO DE TOLEDO A, CARLSON B V, BECK C, *et al.* Physical Review C, 1996, **54**: 3290.

[19] MATSUSE T, BECK C, NOUICER R, *et al.* Physical Review C, 1997, **55**: 1380.

[20] SZANTO-DE T A, SANDERS S J, BECK C. Physical Review C, 1997, **56**: 558.

[21] SHAPIRA D, FORD J L C, CAMPO J G, *et al.* Physical Review Letters, 1979, **43**: 1781.

[22] SHAPIRA D, NOVOTNY R, CHAN Y D, *et al.* Physics Letters B, 1982, **114**: 111.

[23] SHAPIRA D, FORD J L C, CAMPO J. Physical Review C, 1982, **26**: 2470.

[24] RAY A, GIL S, KHANDAKER M, *et al.* Physical Review C, 1985, **31**: 1573.

[25] SHIVAKUMAR B, AYIK S, HARMON B A, *et al.* Physical Review C, 1987, **35**: 1730.

[26] SHIVAKUMAR B, SHAPIRA D, STELSON P H, *et al.* Physical Review C, 1988, **37**: 652.

[27] SZANTO DE TOLEDO A, FANTE L, ANJOS R M, *et al.* Physical Review C, 1990, **42**: R815.

[28] KUNDU S, DEY A, BANERJEE K, *et al.* Physical Review C, 2008, **78**: 044601.

[29] WANG Qi, DONG Yuchuan, LI Songlin, *et al.* Chinese Physics Letters, 2004, **21**: 1911.

[30] HAN Jianlong, WANG Qi, BAI Zhen, *et al.* Nuclear Physics Review, 2008, **25**: 322.(in Chinese)
(韩建龙，王琦，白真，等. 原子核物理评论，2008, **25**: 322.)

[31] MERMAZ M C, SUOMUARVI T, LUCAS R, *et al.* Nuclear Physics A, 1986, **456**: 186.

[32] VIOLA V E, KWIATKOWSKI K, WALKER M. Physical Review C, 1985, **31**: 1550.

[33] BECK C, DJERROUD B, HAAS F, *et al.* Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei, 1992, **343**: 309.

[34] ERICSON T. Physical Review Letters, 1960, **5**: 430.

[35] ERICSON T. Annals of Physics, 1963, **23**: 390.

[36] KUN S Y. Zeitschrift Für Physik A, 1997, **357**: 367.

[37] HAN J L, WANG Q, BAI Z, *et al.* Chinese Physics Letters, 2008, **25**: 1251.

[38] PAPPALARDO G. Nuclear Physics A, 1988, **488**: 395.

[39] DE-ROSA A, INGLIMA G, RUSSO V, *et al.* Physics Letters B, 1985, **160**: 239.

Fragment Emission in Reaction of ^{19}F+^{27}Al at ∼6 MeV/u

BAI Zhen[1, 2]，HAN Jianlong[1]，CHEN Zhiqiang[1]，WANG Jiansong[1]，WANG Qi[1]

(*1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In recent years, extensive studies have been made to understand the fragment emission mechanisms in low energy light heavy-ion reactions. These fragments are found to be emitted from quasielastic/projectile breakup, deep-inelastic and fusion-fission processes. Fragments of $Z = 2 \sim 13$ induced by the collision of ^{19}F+^{27}Al have been measured by ΔE-E telescope. The analysis of the energy spectra, angular distributions, excitation functions and energy auto-correlation functions of these fragments shows that the emission of fragments is coming from a rotational dinuclear system formed in the dissipative collision of the projectile and target nuclei.

Key words: nuclear reaction; light system; fragment emission; excitation function

Received date: 15 Nov. 2012；　**Revised date:** 7 Dec. 2012

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10905076)

Corresponding author: HAN Jianlong，E-mail：hanjl@impcas.ac.cn

http://www.npr.ac.cn