

文章编号: 1007-4627(2008)04-0322-05

$^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物激发函数的长程关联*

韩建龙^{1,2}, 王琦^{1, #}, 白真^{1,2}, 董玉川^{1,2}, 李松林¹, 段利敏¹, 徐珊珊¹,
徐华根^{1,2}, 陈若富^{1,2}, 吴和宇¹, 李志常³, 路秀琴³, 赵葵³,
周平³, 刘建成³, 许国基³, Sergey Yu Kun^{4,5}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

4 Centro de Ciencias Fisicas, National University of Mexico (UNAM), Cuernavaca, Mexico;

5 Center for Nonlinear Physics, RSPHYSSE, Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia)

摘要: 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 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的激发函数测量。束流 ^{19}F 的入射能量从 110.25 MeV 到 118.75 MeV, 步长 250 keV, 测量了实验室系 $+57^\circ$, $+31^\circ$, -15° 和 -29° 出射的类弹产物 B, C, N, O, F 和 Ne 的激发函数。观测到激发函数具有耗散反应的特征涨落结构, 分析了激发函数之间的长程角度关联以及强烈的电荷数关联。

关键词: 重离子耗散反应; 激发函数; 关联

中图分类号: O571.4 **文献标识码:** A

1 引言

1985年, Rosa等人首先观测到重离子耗散反应产物激发函数中的特征涨落结构^[1], 为分析重离子耗散反应中各物理量的演化过程提供了一种有效的方法。人们知道, 在耗散碰撞的初期, 弹核与靶核形成了一个演化的中间双核系统, 当各个自由度还达不到完全的统计平衡时, 中间双核系统就分裂, 于是, 耗散反应产物呈现出与处于统计平衡状态的复合核反应产物有明显不同的特征。例如, 按照Ericson的复合核统计涨落理论^[2], 在同一散射角度而具有不同电荷数 Z 的产物激发函数之间的关联系数(Z 关联)应该为0, 在不同散射角度而具有相同电荷数 Z 的产物激发函数之间的关联系数(θ 关联)应该很小^[3, 4]。然而, 耗散反应的实验结果^[5-12]却发现, Z 关联系数和 θ 关联系数都远大于复合核统计理论的预言。为此, 理论家们发展了复合核统计涨落理论,

提出新的假设^[13-16]用于解释耗散反应的实验结果。本文报道 $^{27}\text{Al}(^{19}\text{F}, x)y$ 耗散反应产物激发函数测量的实验结果, 并在统计理论框架下研究耗散反应产物激发函数之间的关联特性^[4, 5, 16]。

2 实验

实验是在北京中国原子能科学研究院的 HI-13 串列静电加速器上完成的, 实验装置布局如图 1 所示。入射束流 ^{19}F 的能量从 110.25 到 118.75 MeV, 能量变化的步长为 250 keV; 在 $\theta_{\text{lab}}=0^\circ$ 安排有法拉第筒收集束流电荷计数; ^{27}Al 同位素靶的厚度为 $60 \mu\text{g}/\text{cm}^2$; 4 套由气体电离室和 Si(Au) 面垒型位置灵敏半导体探测器 (PSD) 组成的 ($\Delta E-E$) 望远镜 (Tel. 1, Tel. 2, Tel. 3, Tel. 4) 用来鉴别反应产物的电荷数 Z , 测量反应产物的激发函数。其中, 电离室有效长度为 6 cm, 充以 P10 气体, 气压为 100

* 收稿日期: 2008-02-22; 修改日期: 2008-04-01

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10675149); 中国科学院方向性项目资助(KJCX3-SYW-No1); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB81500)

作者简介: 韩建龙(1980-), 男(汉族), 河北石家庄人, 博士, 从事重离子核反应机制实验研究;

E-mail: handong@impcas.ac.cn

通讯联系人: 王琦, wangqi@impcas.ac.cn

mb, 作为 ΔE 探测器; PSD用于探测产物的剩余能量 E , 其有效面积为 $8\text{ mm}\times 45\text{ mm}$, 厚度为 $500\text{ }\mu\text{m}$; 各PSD几何中心到靶点的距离 d 以及实验室系覆盖的散射角度 θ_{lab} 的范围分别为 $d_{\text{Tel.1}}=147\text{ mm}$, $48^\circ\leq\theta_{\text{Tel.1, lab}}\leq 65^\circ$; $d_{\text{Tel.2}}=334\text{ mm}$, $28^\circ\leq\theta_{\text{Tel.2, lab}}\leq 34^\circ$; $d_{\text{Tel.3}}=391\text{ mm}$, $-18^\circ\leq\theta_{\text{Tel.3, lab}}\leq -12^\circ$; $d_{\text{Tel.4}}=335\text{ mm}$, $-32^\circ\leq\theta_{\text{Tel.4, lab}}\leq -26^\circ$; PSD的位置分辨为 $\pm 0.5\text{ mm}$, 对应的实验室系角分辨率好于 0.5° ; PSD的能量分辨经标准 α 源和数个不同能量 ^{19}F 束流在Au靶上的弹散峰刻度。在与束流方向对称的两侧 $\theta_{\text{lab}}=\pm 7.5^\circ$, 分别装有一个Si半导体探测器监测束流。

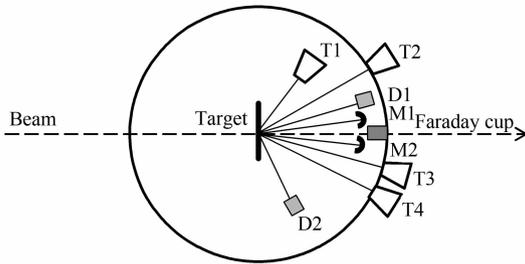


图1 长程角度关联实验装置示意图

3 实验数据处理

采用如下方法在质心系逐事件地分析实验数据: 对一个被探测到的耗散反应事件, 其在实验室系的散射角 θ_{lab} , 总动能 $(\Delta E+E)$ (电离室和PSD中分别沉积的能量之和) 以及质量数 A (这里 A 是被探测到的具有电荷数 Z 的稳定同位素的质量数) 被当作初始参数, 然后根据两体反应运动学计算该事件的质心系散射角 θ_{cm} 以及相应的 Q 值。

为了减小所测量产物截面的统计误差, 将一个 $\Delta E-E$ 望远镜所探测到的具有相同电荷数 Z 并且满足 $-62\text{ MeV}\leq Q<0\text{ MeV}$ 的事件的能谱积分, 得到相应的激发函数。作为例子, 图2给出了探测器Tel. 1所探测的耗散反应类弹产物B, C, N, O, F和Ne的激发函数, 其误差是纯统计误差。从图中可以看到, 各产物的激发函数都呈现出明显的具有耗散反应特征的振荡结构^[1, 5-13], 图中的直线是对数据点作最小二乘法拟合得到的, 表示激发函数中产物的截面随入射能量变化的平均趋势。另外, 图中还标出了各产物对应的质心系出射角 θ_{cm} 。其它3套探测器测得的产物的激发函数与图2中的类

似。

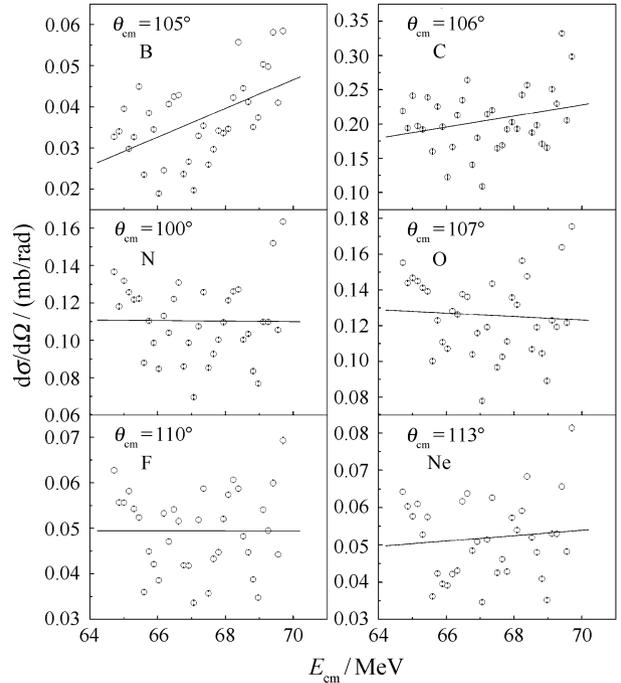


图2 探测器Tel. 1测量到的耗散反应产物B, C, N, O, F和Ne的激发函数

直线由最小二乘法拟合所得, 表示截面随能量的平均变化趋势。

4 激发函数之间的关联分析

归一化的 Z 关联系数, 可以由公式(1)^[1, 4]计算得到:

$$C(Z_1, Z_2) = \frac{\langle \left[\frac{\sigma_i(Z_1)}{\bar{\sigma}_i(Z_1)} - 1 \right] \left[\frac{\sigma_i(Z_2)}{\bar{\sigma}_i(Z_2)} - 1 \right] \rangle}{\sqrt{C(Z_1)C(Z_2)}} \quad (1)$$

其中, 尖括号 $\langle \rangle$ 表示对所测量的能量区间求算术平均; 下标 i 表示激发函数中第 i 个能量点的截面值; $\bar{\sigma}_i$ 对应于图2中的平均变化趋势直线拟合值。将公式(1)中的 Z_1 和 Z_2 分别用 θ_1 和 θ_2 代替可以得到 θ 关联系数 $C(\theta_1, \theta_2)$ 的计算公式。公式(1)表明, 激发函数之间的关联实际上是激发函数的涨落结构之间的关联。表1和表2分别为 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物激发函数间的 Z 关联系数 $C(Z_1, Z_2)$ 和 θ 关联系数 $C(\theta_1, \theta_2)$ 。关联系数的误差来自所测数据的有限性(Finite Range of the Data, 简称FRD)^[17]。

从表1可以看到, 绝大部分 θ 关联系数都大于0.5。复合核统计理论预言, 只有当两个探测角度 θ_1 和 θ_2 之间的差值不大于 $1/L_g$ 时, 被探测产物的激发

表1 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物激发函数之间的 θ 关联系数 $C(\theta_1, \theta_2)^*$

| | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| $\theta_{\text{cm}}/(\text{°})$ | 105 | 58 | -28 | -68 | $\theta_{\text{cm}}/(\text{°})$ | 106 | -54 | -25 | -54 |
| 105 | 1.00 | | | | 106 | 1.00 | | | |
| 58 | 0.77 ± 0.16 | 1.00 | | | -54 | 0.91 ± 0.09 | 1.00 | | |
| -28 | 0.58 ± 0.12 | 0.80 ± 0.17 | 1.00 | | -25 | 0.88 ± 0.12 | 0.97 ± 0.03 | 1.00 | |
| -68 | 0.81 ± 0.17 | 0.96 ± 0.04 | 0.85 ± 0.15 | 1.00 | -54 | 0.91 ± 0.09 | 0.99 ± 0.01 | 0.98 ± 0.02 | 1.00 |
| $\theta_{\text{cm}}/(\text{°})$ | 100 | 55 | -24 | -54 | $\theta_{\text{cm}}/(\text{°})$ | 107 | 57 | -24 | -57 |
| 100 | 1.00 | | | | 107 | 1.00 | | | |
| 55 | 0.76 ± 0.16 | 1.00 | | | 57 | 0.81 ± 0.17 | 1.00 | | |
| -24 | 0.74 ± 0.16 | 0.98 ± 0.02 | 1.00 | | -24 | 0.74 ± 0.16 | 0.98 ± 0.02 | 1.00 | |
| -54 | 0.77 ± 0.16 | 0.99 ± 0.01 | 0.99 ± 0.01 | 1.00 | -57 | 0.82 ± 0.17 | 0.98 ± 0.02 | 0.97 ± 0.03 | 1.00 |
| $\theta_{\text{cm}}/(\text{°})$ | 110 | 61 | -26 | -60 | $\theta_{\text{cm}}/(\text{°})$ | 113 | 62 | -32 | -64 |
| 110 | 1.00 | | | | 113 | 1.00 | | | |
| 61 | 0.70 ± 0.15 | 1.00 | | | 62 | 0.80 ± 0.17 | 1.00 | | |
| -26 | 0.64 ± 0.14 | 0.98 ± 0.02 | 1.00 | | -32 | 0.47 ± 0.10 | 0.66 ± 0.14 | 1.00 | |
| -60 | 0.80 ± 0.17 | 0.92 ± 0.08 | 0.88 ± 0.12 | 1.00 | -64 | 0.77 ± 0.16 | 0.96 ± 0.04 | 0.55 ± 0.12 | 1.00 |

* 从左到右上部对应元素B和C, 中部对应元素N和O, 下部对应元素F和Ne。

表2 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物激发函数之间的 Z 关联系数 $C(Z_1, Z_2)^*$

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----|
| Z | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Z | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 5 | 1 | | | | | | 5 | 1 | | | | | |
| 6 | 0.90 ± 0.10 | 1 | | | | | 6 | 0.97 ± 0.03 | 1 | | | | |
| 7 | 0.75 ± 0.16 | 0.89 ± 0.11 | 1 | | | | 7 | 0.96 ± 0.04 | 0.99 ± 0.01 | 1 | | | |
| 8 | 0.71 ± 0.15 | 0.84 ± 0.16 | 0.97 ± 0.03 | 1 | | | 8 | 0.93 ± 0.07 | 0.99 ± 0.01 | 0.98 ± 0.02 | 1 | | |
| 9 | 0.66 ± 0.14 | 0.77 ± 0.16 | 0.94 ± 0.06 | 0.94 ± 0.06 | 1 | | 9 | 0.94 ± 0.06 | 0.99 ± 0.01 | 0.99 ± 0.01 | 0.99 ± 0.01 | 1 | |
| 10 | 0.67 ± 0.14 | 0.77 ± 0.16 | 0.90 ± 0.10 | 0.90 ± 0.10 | 0.90 ± 0.10 | 1 | 10 | 0.75 ± 0.16 | 0.85 ± 0.15 | 0.83 ± 0.17 | 0.91 ± 0.09 | 0.88 ± 0.12 | 1 |
| Z | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Z | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 5 | 1 | | | | | | 5 | 1 | | | | | |
| 6 | 0.90 ± 0.10 | 1 | | | | | 6 | 0.98 ± 0.02 | 1 | | | | |
| 7 | 0.82 ± 0.17 | 0.98 ± 0.02 | 1 | | | | 7 | 0.96 ± 0.04 | 0.99 ± 0.01 | 1 | | | |
| 8 | 0.81 ± 0.17 | 0.98 ± 0.02 | 0.99 ± 0.01 | 1 | | | 8 | 0.86 ± 0.14 | 0.93 ± 0.07 | 0.96 ± 0.04 | 1 | | |
| 9 | 0.81 ± 0.17 | 0.97 ± 0.03 | 0.98 ± 0.02 | 0.98 ± 0.02 | 1 | | 9 | 0.77 ± 0.16 | $.86 \pm 0.14$ | 0.90 ± 0.10 | 0.97 ± 0.03 | 1 | |
| 10 | 0.80 ± 0.17 | 0.93 ± 0.07 | 0.96 ± 0.04 | 0.93 ± 0.07 | 0.96 ± 0.04 | 1 | 10 | 0.58 ± 0.12 | 0.71 ± 0.15 | 0.76 ± 0.16 | 0.90 ± 0.10 | 0.95 ± 0.05 | 1 |

* 从左到右上部对应Tel. 1和Tel. 2探测到的产物的激发函数, 下部对应Tel. 3和Tel. 4探测到的产物的激发函数。

发函数之间才存在关联, l_g 表示入射道与出射道擦边角动量的算术平均值^[5]。依据文献[18], 我们计算了 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应中各出射道对应的 l_g , 其数值不超过0.04。也就是说, 复合核统计理论预言, 在质心系中, 当 $|\theta_1 - \theta_2| > 3^\circ$ 时, θ 关联系数 $C(\theta_1, \theta_2)$ 近似等于0。然而, 在表1的实验结果中, 即使两个角度之间的间隔超过 50° , 它们之间仍然存在强烈的 θ 关联。理论家Kun^[19-21]运用量子力学的态叠

加原理提出:耗散反应中形成的中间双核系统可以被看作是一个由两个“量子波包”构成的、处在高激发态的、形变的中间复合体系, 这两个空间局域化的“量子波包”一个沿顺时针方向转动, 一个沿逆时针方向转动, 两个波包在分别转过 180° 后相遇并发生强烈的干涉, 这时, 激发函数之间存在强烈的 θ 关联。Kun的假设解释了表1中 $|\theta_1| + |\theta_2| \approx 180^\circ$ 时 θ 关联系数 $C(\theta_1, \theta_2)$ 具有一个极大值。另外, 当 θ_1

和 θ_2 关于束流方向对称(例如表1中C元素的 -54° 和 54°)时, θ 关联系数 $C(\theta_1, \theta_2) \approx 1$,这是由角分布的 φ 角对称性引起的。

按照复合核统计理论,由于统计涨落的随机性,对同一角度测量到的不同产物的激发函数求和,所得的激发函数之间的关联系数要比不求和时的关联系数小,即求和会削弱激发函数之间的关联^[2, 4]。为了检验实验数据,将同一探测器测量到的不同产物($Z=5, 6, 7, 8, 9$ 和 10)的激发函数相加,计算了求和后的激发函数之间的关联系数,如表3所示。与表1相比,关联强度并没有因为对激发函数的求和而削弱。这说明,耗散反应产物激发函数中所展现的不是随机的统计涨落,而是产物之间的强烈关联。

表3 对各探测器测量到的不同产物的激发函数求和后的 θ 关联系数

| Telescope | Tel. 1 | Tel. 2 | Tel. 3 | Tel. 4 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| Tel. 1 | 1 | | | |
| Tel. 2 | 0.87±0.13 | 1 | | |
| Tel. 3 | 0.81±0.17 | 0.98±0.02 | 1 | |
| Tel. 4 | 0.86±0.14 | 0.99±0.01 | 0.98±0.02 | 1 |

复合核统计理论还预言,当 $Z_1 \neq Z_2$ 时, Z 关联系数 $C(Z_1, Z_2) = 0$ 。表2给出的实验结果显然与理论预言不符。我们计算了各元素的平均 Z 关联系数:

$$\bar{C}(Z) = \frac{1}{6} \sum_{Z'=5}^{Z'=10} C(Z, Z'),$$

其中, $Z=5, 6, 7, 8, 9, 10$,如表4所列。结果显示,对 $Z < 9$ (弹核质量数 $Z=9$)的类弹产物而言,相

表4 不同元素的平均 Z 关联系数 $\bar{C}(Z)$ *

| Z | Tel. | | | | $\bar{\Sigma}$ |
|----|--------|--------|--------|--------|----------------|
| | Tel. 1 | Tel. 2 | Tel. 3 | Tel. 4 | |
| 5 | 0.78 | 0.91 | 0.83 | 0.83 | 0.84 |
| 6 | 0.86 | 0.96 | 0.97 | 0.9 | 0.92 |
| 7 | 0.91 | 0.96 | 0.98 | 0.92 | 0.94 |
| 8 | 0.89 | 0.97 | 0.98 | 0.95 | 0.95 |
| 9 | 0.87 | 0.97 | 0.98 | 0.94 | 0.94 |
| 10 | 0.86 | 0.89 | 0.96 | 0.86 | 0.89 |

* $\bar{\Sigma}$ 表示对同一列的数据求算术平均的结果。

对于弹核转移的核子数越多,中间双核系统的寿命就越长^[22]。寿命越长意味着系统越接近于平衡状态,激发函数之间的关联也就越弱,这与耗散反应的弛豫特征是一致的。同时,对于 $Z < 9$ 和 $Z > 9$ 的类弹产物,由于反应机制的不同(分别为削裂反应和拾取反应),其 Z 关联系数关于 $Z=9$ 并不对称。

5 结论

测量了¹⁹F+²⁷Al耗散反应中类弹产物B, C, N, O, F和Ne的激发函数,入射束流的能量从110.25 MeV到118.75 MeV。激发函数呈现出耗散反应的特征性涨落结构。分析指出,不同激发函数之间存在着长程角度关联,这种长程角度关联并不因为对不同激发函数的求和而被削弱,其与复合核反应产物的激发函数之间的关联有着完全不同的物理本质。分析还指出,不同激发函数之间的电荷数关联与中间双核系统的耗散程度相关。

参考文献(References):

[1] De Rosa A, Inghima G, Russo V, *et al.* Phys Lett, 1985, B160: 239.
 [2] Ericson T. Annals of Physics, 1963, 23: 390.
 [3] Brown-Hanbury R, Twiss R G. Phil Mag, 1954, 45: 663.
 [4] Brink D M, Stephen R O, Tanner N W. Nuclear Physics, 1964, 54: 577.
 [5] Suomijärvi T, Berthier B, Lucas R, *et al.* Phys Rev, 1987, C36: 181.
 [6] Wang Q, Li S L, Lu J, *et al.* Chin Phys Lett, 1993, 10: 656.
 [7] Wang Q, Li S L, Tian W D, *et al.* Chin Phys Lett, 1999, 16: 876.
 [8] Papa M, Amorini F, Cardella G, *et al.* Phys Rev, 2000, C61: 044 614.
 [9] Berceanu I, Duma M, Moisa D, *et al.* Phys Rev, 2006, C74: 024 601.
 [10] Wang Q, Lu J, Xu H, *et al.* Phys Lett, 1996, B388: 462.
 [11] Papa M, Cardella G, Dipietro A, *et al.* Zeitschrift Fur Physik, 1995, A353: 205.
 [12] Wang Qi. Nuclear Physics Review, 1998, 15(2): 74(in Chinese).
 (王 琦. 原子核物理评论, 1998, 15(2): 74.)
 [13] Brink D M, Dietrich K. Zeitschrift fur Physik, 1987, A326: 7.
 [14] Kun S Y, Papa M, Sunko D K. Phys Lett, 1990, B249: 1.
 [15] Kun S Y. Physics Letters, 1991, B257: 247.

- [16] Kun S Y, Norenberg W. *Zeitschrift für Physik*, 1992, A343: 215.
- [17] Richter A. *Nuclear Spectroscopy and Reactions*. In: Cerny J. New York: Academic Press, 1974, Part B, 343.
- [18] Wilcke W W, Birkelund J R, Wollersheim H J, *et al.* *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1980, 25: 389.
- [19] Kun S Y, Vagov A V, Vorov O K. *Phys Rev*, 1999, C59: R585.
- [20] Kun S Y, Vagov A V, Greiner W. *Phys Rev*, 2001, C63: 0146 08.
- [21] Kun S Y, Benet L, Chadderton L T, *et al.* *Phys Rev*, 2003, C67: 011 604.
- [22] Han J L, Wang Q, Dong Y C, *et al.* *Chin Phys Lett*, 2006, 23: 2 706.

Long-range Correlation of Excitation Functions in Dissipative Heavy Ion Collision of $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}^*$

HAN Jian-long^{1, 2}, WANG Qi^{1, #}, BAI Zhen^{1, 2}, DONG Yu-chuan^{1, 2}, LI Song-lin¹, DUAN Li-min¹, XU Hu-shan¹, XU Hua-gen^{1, 2}, CHEN Ruo-fu^{1, 2}, WU He-yu¹, LI Zhi-chang³, LU Xiu-qin³, ZHAO Kui³, ZHOU Ping³, LIU Jian-cheng³, XU Guo-ji³, Sergey Yu Kun^{4, 5}

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;*

3 *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413;*

4 *Centro de Ciencias Fisicas, National University of Mexico (UNAM), Cuernavaca, Mexico;*

5 *Center for Nonlinear Physics, RSPHysSE, Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia*)

Abstract: Excitation functions have been measured for the projectile-like fragments of B, C, N, O, F and Ne in the $^{27}\text{Al}(^{19}\text{F}, x)y$ reactions at incident energies from 110.25 MeV to 118.75 MeV in 250 keV steps. Strong cross section fluctuations in the excitation functions has been observed. The cross-correlation coefficients of the excitation functions for different atomic number Z and for different scattering angle θ_{cm} have been deduced. These coefficients are much larger than the statistical theoretical calculated ones. This indicates that there are strong correlations between different exit channels in the dissipative heavy ion collision of $^{27}\text{Al}(^{19}\text{F}, x)y$.

Key words: dissipative heavy ion collision; excitation function; cross-correlation

* **Received date:** 22 Feb. 2008; **Revised date:** 1 Apr. 2008

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10675149); Funds of Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering (KJCX3-SYW-No1); Major State Basic Research Development Program (2007CB81500)

Corresponding author: Wang Qi, E-mail: wangqi@impcas.ac.cn