

$^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物截面测量中的不重复性*

韩建龙^{1,2} 王琦^{1,1)} 董玉川^{1,2} 李松林¹ 段利敏¹ 吴和宇¹ 徐华根^{1,2}
陈若富^{1,2} 徐瑚珊¹ 白真^{1,2} 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 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, Campus Morelos UNAM, Cuernavaca, Morales, Mexico)

5 (Nonlinear Physics Group and Department of Theoretical Physics,
RSPHysSE, ANU, 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114MeV和118.75MeV的 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物B, C, N, O, F, Ne, Na和Mg的微分截面测量. 条形 ^{27}Al 同位素靶的大小尺寸为10mm×50mm, 平均厚度约67 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. 固定入射束流 ^{19}F 的能量, 通过移动靶位, 先后轰击了靶上20个不同的位置. 实验结果表明, 在弹靶系统、入射能量以及探测系统都相同的多次独立的微分截面测量中, 截面的涨落不呈现高斯型几率分布. 截面测量的这种不重复现象难以用有限计数率的统计性质来解释.

关键词 耗散反应产物 微分截面 几率分布 统计性质

1 引言

重离子耗散反应亦称深部非弹性碰撞, 是介于直接过程和复合核形成之间的一种核反应机制, 确立于20世纪70年代初期. 随着研究工作的深入, 从80年代末期开始的耗散反应产物激发函数截面涨落的研究^[1-11]令人注目, 发现了一些新的实验现象. 其中一个突出的问题是: 尽管耗散反应中所形成的中间双核系统有高的内部激发以及大量末态道的贡献, 耗散产物激发函数中的截面涨落却始终不能被平滑, 即使将反应中各同位素、各元素、各角度耗散产物的截面相加, 激发函数中振荡性的结构始终不能消失, 甚至幅度都不减小. 在寻找末态道巨共振布居的可能性的探索宣告失败^[12, 13]之后, 耗散产物截面涨落结构不可平滑的问题更加令人着迷和费解. 可以肯定, 耗散反应

产物中存在着一种非统计性质的截面涨落. 与耗散产物激发函数中截面涨落不可平滑相关的另一个实验新现象, 就是截面测量中的不重复性问题.

我们完成了两次独立的 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物激发函数的测量^[14, 15]. 测量中, 加速器、束流能量、弹靶系统、探测器、散射室、核电子学等实验条件和相关参数都保持完全相同, 唯一的差别是两次测量中分别使用了两块不同的 ^{93}Nb 同位素靶. 实验结果, 两次独立的激发函数测量得到的截面之差有一个分布, 这个分布不是通常预期的高斯型, 其中大约有20%的分布几率超出了标准偏差的3倍. 按照误差理论中可置信度的分析, 假如两次测量的结果是重复的, 其截面之差的分布应该是高斯型, 99.7%的几率分布应该落在3倍标准偏差之内. 换句话说, 超出标准偏差3倍就意味着两次测量的结果不重复.

2005-03-31 收稿

*国家自然科学基金(10475101, 10175083), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)和科技部重大项目前期研究专项基金(2001CCB01200)资助

1) E-mail: wangqi@impcas.ac.cn

为了进一步验证这种截面的不重复现象,在两个不同靶点的截面测量的基础之上,我们又做了相同条件下20个靶点的截面测量,研究了同一入射能量下20个不同靶点所对应的截面的几率分布.在114MeV和118.75MeV的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的截面测量中,弹靶系统、束流能量以及探测系统都相同,对20个不同靶点独立测量分别得到的微分截面相对于这些截面平均值的偏差的几率分布不符合放射性计数的统计规律.换句话说就是,多次测量得到的微分截面的结果是不重复的,用放射性测量中有限计数率的统计性质难以解释.

2 实验过程

实验是在中国原子能科学研究院的HI-13串列静电加速器国家实验室完成的.截面测量中先后使用了114MeV和118.75MeV两组不同能量的 ^{19}F 束流.在每一组入射能量下,分别轰击 ^{27}Al 同位素靶上20个不同靶点,被轰击靶的平均厚度为 $67\mu\text{g}/\text{cm}^2$.有3套气体电离室($\Delta E-E$)望远镜,电荷分辨 $Z/\Delta Z \approx 30$,分别位于实验室系角度 $\theta_{\text{lab}} = 57^\circ, 31^\circ$ 和 -29° ,用以鉴别反应产物的电荷数 Z .两块面垒型Si半导体作为监测器分别安置在束流两侧的 $\theta_{\text{lab}} = \pm 7.5^\circ$.法拉第筒位于 $\theta_{\text{lab}} = 0^\circ$ 用以收集束流电荷计数.实验中与探测系统相关的各种设施的布局、性能、参数、测试结果等可参阅文献[16,17],本文不再赘述.

实验中所用的 ^{27}Al 同位素条形靶,大小尺寸为 $10\text{mm} \times 50\text{mm}$,安装在Q3D实验终端的散射室内.不破坏真空,靶位能够自由转动或者上下移动.在 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 反应产物截面测量的实验中,对于每一组固定的入射能量114MeV或者118.75MeV,通过上下移动靶位,用炮弹先后轰击了靶上20个不同的位置.在靶子上下移动的过程中,被轰击的靶点的空间几何位置不变,也就是始终保持反应平面不变.实际上,这就相当于独立地测量了相同反应系统在同一入射能量下和同一反应平面内具有不同厚度的20个不同靶子的反应截面.靶位移动的方向垂直于反应平面,移动的步长为2mm.被轰击后靶上遗留的痕迹是一条宽度约1mm的竖的直线.最后,沿着这条竖线,按步长2mm移动,用等效空气厚度法对被轰击的条形靶的厚度又进行了仔细地验证性测量,靶厚分布的测量结果如图1所示.这种靶厚测量方法的精度高,各点靶厚测量的误差均小于8%;重复性好,即对同一靶点进行多次独立的靶厚测量,结果是一致的.关于靶厚测

量的方法、原理及精度等细节的具体描述可参见文献[18,19].

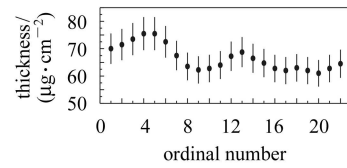


图1 114MeV $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 反应产物截面测量中靶点的厚度分布

3 结果与讨论

测量了入射能量为114MeV和118.75MeV时 ^{19}F 轰击 ^{27}Al 靶上20个不同靶点的耗散反应产物B, C, N, O, F, Ne, Na和Mg在 $\theta_{\text{lab}} = 57^\circ, 31^\circ$ 和 -29° 的微分截面 $d\sigma/d\theta$,分析了在不同靶点的多次独立测量中微分截面相对误差的几率分布.图2给出的是114MeV $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物在 $\theta_{\text{lab}} = 57^\circ$ 的截面随不同靶点的分布图,图中的横轴是不同靶点的测量序号,纵轴是不同靶点测量所得到的相对反应截面.鉴于不同入射能量、不同探测角度、不同耗散产物的结果都类同,最后的物理结论也都一致,这里就不再一一给出.

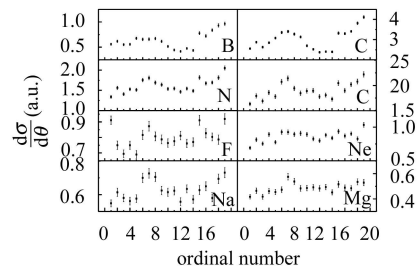


图2 114MeV $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 反应产物在 $\theta_{\text{lab}} = 57^\circ$ 的截面随不同靶点的分布图

3.1 微分截面测量中的误差

截面是核反应中最基本的物理量之一,它描述炮弹与靶核之间发生某种类型反应的概率.具有一定能量的炮弹轰击靶核之后形成的反应产物在某个方向的立体角元 $d\Omega$ 之内的截面 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 被称之为微分截面.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{dN}{IN_S d\Omega}, \quad (1)$$

其中 dN 是探测器在立体角 $d\Omega$ 之内所收集到的出射粒子的计数率; I 是经过靶核的入射粒子的计数率; N_S 是单位面积靶内所含的靶核数.

微分截面可以从理论模型中提取,微分截面也可以通过实验测量而直接得到. $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物微分截面的测量中,加速器束流的能散约40keV,完

全满足单一入射能量的实验要求. 用于粒子鉴别的 (ΔE - E) 探测器系统在整个实验过程中固定不变, 所以, 收集出射粒子的立体角 $d\Omega$ 可视为常数. 假设靶的厚度为 D , 靶核的质量数等于 A , N_A 是阿伏加德罗常数, 那么, 单位面积靶内所含的靶核数 $N_S = DN_A/A$. 我们对每一个靶点的厚度都进行了精确的测量(图1), 就一个靶点的独立的截面测量而言, 靶点的厚度 D 以及单位面积靶内所含的靶核数 N_S 也可以视之为常数. 事实上, 靶点的厚度 D 以及单位面积靶内所含的靶核数 N_S 和探测器的立体角 $d\Omega$ 一样, 其自身当然有测量误差, 但是, 在整个微分截面的测量中, $d\Omega$ 和 N_S 自身的测量误差只会使作为常数的 $d\Omega$ 和 N_S 偏大或者偏小, 从而使得最后得到的绝对截面的数值也偏小或者偏大, 而如果我们给出的是截面的相对值, 这个截面的相对值与常数 $d\Omega$ 和 N_S 就没有任何关系. 由于我们对每一个靶点的厚度都进行了等精度的精确测量, 所以, 在其他条件都相同的不同靶点的微分截面测量中, 靶点的厚度 D 以及单位面积靶内所含的靶核数 N_S 和探测器的立体角 $d\Omega$ 一样, 对微分截面的相对值的测量误差并没有贡献. 因此, 当用法拉第筒所收集的束流电荷计数 I 对实验数据进行归一之后, 根据公式(1), 微分截面测量中的误差就只有出射粒子的计数率 dN 引起的误差. 而放射性计数的随机性决定了有限计数率 dN 引起的统计误差的几率分布应该呈现高斯型.

3.2 多次独立测量中微分截面相对误差的几率分布

假定 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应实验中对应于每个靶点测量所得到的微分截面为 σ_i , 实验中同一个入射能量下测量的所有 20 个靶点的平均截面为 $\langle\sigma_i\rangle$, 那么, 各个截面 σ_i 相对于截面平均值 $\langle\sigma_i\rangle$ 的相对偏差则为

$$\frac{\delta\sigma_i}{\sigma_i} = \frac{\sigma_i - \langle\sigma_i\rangle}{\langle\sigma_i\rangle}, \quad (2)$$

按照放射性测量中计数的统计规律, 出射粒子计数为 N_i 时计数的相对标准误差

$$\frac{\delta N_i}{N_i} = \frac{1}{\sqrt{N_i}}, \quad (3)$$

于是, 其比值

$$\left| \frac{\sigma_i - \langle\sigma_i\rangle}{\langle\sigma_i\rangle} \right| / \frac{1}{\sqrt{N_i}} \quad (4)$$

就是 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物截面测量中相对偏差的几率分布. 如果实验中反应产物确实只是来源于有限的出射粒子的统计计数, 那么, 在统计误差的范围之内, 多次测量的结果应该是重复的, 或者说, 不同靶点测量所得到的截面的几率分布应该是高斯型的.

遵照公式(4), 我们从图2的数据得到了图3, 即

114MeV 束流能量下, 位于 $\theta_{\text{lab}} = 57^\circ$ 的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应的产物 B, C, N, O, F, Ne, Na 和 Mg 对应于 20 个不同靶点测量而得到的截面的几率分布. 显然, 不同靶点截面测量几率分布的实验结果(图3中的虚线)与有限计数率统计误差的理论预期的高斯分布(图3中的实线)并不符合, 实验测量截面分布的宽度比标准的高斯分布要宽得多.

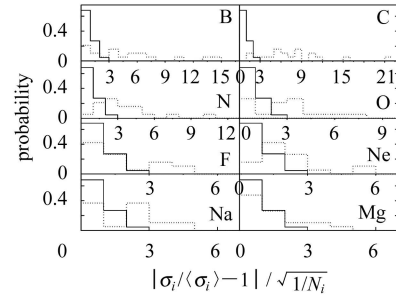


图3 $\theta_{\text{lab}} = 57^\circ$ 时 114MeV $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 反应产物截面相对于平均值标准偏差的几率分布
—理论计算值(高斯分布), - - -实验结果.

此外, 将同一个入射能量、同一探测角度下 8 种耗散产物的截面归一后按照 20 个靶点各自相加, 作出各种产物截面之和的几率分布, 如图4所示, 显示出与图3相同的物理结果. 这样求和的做法既可以减少有限靶点分布带来的误差, 又能够凸出相互关联的、非统计成分的物理结构.

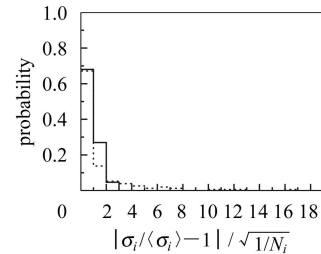


图4 $\theta_{\text{lab}} = 57^\circ$ 时 114MeV $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 反应各产物截面之和相对于平均值标准偏差的几率分布
—理论计算值(高斯分布), - - -实验结果.

3.3 不同归一方法的比较

以上的结果是用束流电荷计数 I 对实验数据进行归一而得到的. 实际上, 在实验的探测系统的安排中, 有两块面垒型 Si 半导体探测器作为监测器分别安置在束流两侧的 $\theta_{\text{lab}} = \pm 7.5^\circ$, 记录弹性散射粒子的计数. 我们也用这两套束流监测器的弹散计数对实验数据进行了归一. 束流监测器归一数据的原理是:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{det.}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{mon.}} \cdot \left(\frac{dN}{d\Omega} \right)_{\text{det.}} / \left(\frac{dN}{d\Omega} \right)_{\text{mon.}}, \quad (5)$$

这里, $(dN/d\Omega)_{\text{det.}}$ 和 $(dN/d\Omega)_{\text{mon.}}$ 分别是在相同靶点的实验测量中粒子探测器和束流监测器所收集到的在单位立体角内的计数; $(d\sigma/d\Omega)_{\text{mon.}}$ 是束流监测器所在角度的卢瑟福散射截面, 用来作为归一量. 这种归一方法的优点是靶厚及束流计数的影响能够完全消除, 但问题出在归一量卢瑟福散射截面的取值上. 一方面, 卢瑟福散射截面的计算值与弹性散射的实验测量值不一定相等, 如果能保证束流监测器的探测角度在整个实验过程中不发生变化, 这种差异仅仅影响到截面的绝对值大小的偏离, 对于相对截面并没有关系; 另一方面, 也是最容易出问题的地方, 就是靶点中心只要有移动或者偏移, 用来归一的弹性散射的散射角就会不同, 而卢瑟福散射截面的值与散射角是 4 次方的关系, 其结果那就相差甚远了. 实际上, 在整个实验的过程中, 束流轰击的靶点范围有一定的分布, 不可能是一个几何点, 甚至实验中也不可能保证靶点中心不产生任何移动. 为此, 我们在束流两侧对称地安排了两套半导体束流监测器, 在获取实验数据的测量过程中, 当这两套束流监测器的计数之比是一个常数时, 就可以认为在整个测量过程中靶点在 θ 方向的位置没有移动, 也只有在这时, 用束流监测器归一的微分截面的相对值才是可用的. 图 5 给出的是两套

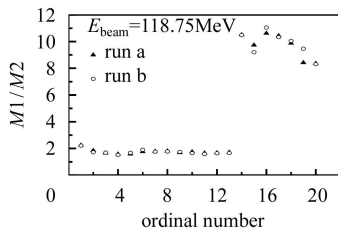


图 5 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物微分截面测量中两套束流监测器计数比值的分布

束流监测器的计数之比, 显然, 对于 118.75 MeV 的入射束流, 前 13 个点基本满足两套束流监测器的计数之比等于常数的条件, 由此得到这 13 个不同靶点测量的截面的几率分布, $\theta_{\text{lab}} = 31^\circ$ 的结果如图 6 所示, 其中

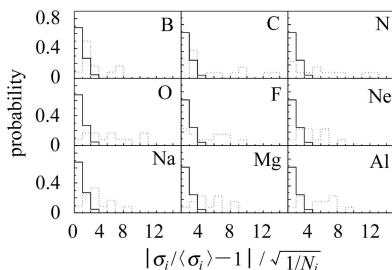


图 6 用束流监测器归一的入射能量为 118.75 MeV 时 $\theta_{\text{lab}} = 31^\circ$ 出射产物的截面相对于平均值标准偏差的几率分布
—理论计算值(高斯分布), - - - 实验结果.

超出 3 倍标准偏差的分布几率也远远超过了高斯分布所预期的 0.3%. 用束流监测器的弹性散射计数进行归一的结果再次表明, $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物微分截面测量中存在截面的不重复性, 截面测量计数中存在非统计成分.

总的来说, 对于 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 的实验结果, 不论入射能量是 114 MeV 或者 118.75 MeV, 不论探测角度是 57° , 31° 或者 -29° , 不论数据归一采用法拉第筒计数还是采用小角区束流监测器的弹散计数, 也不论是对某一个元素的产物或者各种反应产物、以至于各个角度的各种反应产物相加的结果, 都一样能够得到截面不重复和产物计数中存在非统计成分的物理结论.

4 结束语

通过各种监测手段和仔细的数据处理与误差分析, 排除了实验中技术方面可能出现的问题^[14, 15], 在两种情况下都得到了截面不重复的实验结果: (1) 100—108 MeV 的 $^{19}\text{F}+^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物激发函数的两次独立测量中^[14, 15], 束流能量、弹靶系统、探测系统等各种实验设施都保持不变, 只是换了一块靶, 相同能量下两次测量的截面之差的几率分布以及每次激发函数测量中相对于截面平均值的几率分布都表明截面是不重复的, 超出 3 倍标准偏差的分布几率在 20% 左右. (2) 作为补充和加强, 又研究了同一入射能量下 20 个不同靶点所对应的截面的几率分布. 114 MeV 和 118.75 MeV 的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物对于 20 个不同靶点测量所得到的截面的分布几率也不是高斯分布, 超出 3 倍标准偏差的分布几率也远远超过了高斯分布所预期的 0.3%. 对于耗散反应产物中这种截面不重复的现象, 不能用有限计数率的统计误差理论来预期. 或者说, 在耗散反应产物的微分截面测量中, 存在非统计的来源.

作为一种可能的解释, 在对 $^{19}\text{F}+^{93}\text{Nb}$ 实验结果的分析中, 从 Kun 理论^[20] 出发, 对耗散反应截面中非统计的成分, 即截面测量的不重复性进行了解释: 耗散反应所形成的中间双核系统始终处于非平衡状态, 非平衡的双核系统同时经历着衰变、转动和极其缓慢的退相干过程, 不同反应分振幅相位之间的相干造成了 S 矩阵元非对角项之间的关联, 这种存在于数量极其巨大的道与道之间的强烈关联具有对初始条件的极端敏感性和非统计性, 其结果足以产生实验上可观测到的截面差异. 对相关的细节有兴趣的读者可以参阅文献^[15, 20, 21].

参考文献(References)

- 1 de Rosa A, Inghima G, Russo V et al. Phys. Lett., 1985, **B160**: 239—242
- 2 Glaesner A, Dunnweber W, Hering W et al. Phys. Lett., 1986, **B160**: 153—156
- 3 Suomijarvi T, Berthier B, Lucas R et al. Phys. Rev., 1987, **C36**: 181—186
- 4 Pappalardo G. Nucl. Phys., 1988, **A488**: 395c—408c
- 5 Cardella G, Papa M, Pappalardo G et al. Nucl. Phys., 1988, **A482**: 235c—244c
- 6 WANG Qi, LI Song-Lin, LU Jun et al. Chin. Phys. Lett., 1993, **10**: 656—659
- 7 Rizzo F, Cardella G, Rosa A De et al. Z. Phys., 1994, **A349**: 169—175
- 8 WANG Qi, LU Jun, XU Hu-Shan et al. Phys. Lett., 1996, **B388**: 462—467
- 9 Berceanu I, Andronic A, Duma M et al. Phys. Rev., 1998, **C57**: 2359—2369
- 10 Papa M, Amorini F, Cardella G et al. Phys. Rev., 2000, **C61**: 044614 (1—16)
- 11 WANG Qi, TIAN Wen-Dong, LI Song-Lin et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2000, **24**: 1060—1065 (in Chinese)
(王琦, 田文栋, 李松林等. 高能物理与核物理, 2000, **24**: 1060—1065)
- 12 Herrmann N, Boak R, Emling H et al. Phys. Rev. Lett., 1988, **60**: 1630—1633
- 13 Agodi C, Alba R, Anzalone A et al. Z. Phys., 1991, **A340**: 341—342
- 14 WANG Qi, DONG Yu-Chuan, LI Song-Lin et al. Chin. Phys. Lett., 2003, **20**: 2144—2147
- 15 WANG Qi, Kun S Y, TIAN Wen-Dong et al. International Journal of Modern Physics, 2003, **E12**: 377—393
- 16 LI Song-Lin, WANG Qi, DONG Yu-Chuan et al. HEP & NP, 2004, **28**(10): 1090—1093 (in Chinese)
(李松林, 王琦, 董玉川等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(10): 1090—1093)
- 17 DONG Yu-Chuan, WANG Qi, LI Song-Lin et al. HEP & NP, 2005, **29**(2): 147—151 (in Chinese)
(董玉川, 王琦, 李松林等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(2): 147—151)
- 18 XU Guo-Ji, MENG Xiang-Jin, LUO Xing-Hua et al. Atomic Energy Science and Technology, 1991, **25**: 34—39 (in Chinese)
(许国基, 孟祥金, 罗兴华等. 原子能科学技术, 1991, **25**: 34—39)
- 19 Ziegler J F. Helium Stopping Powers and Ranges in all Elements(Vol.4). New York: Pergamon Press, 1977. 45
- 20 Kun S Y. Z. Phys., 1997, **A357**: 255—269; 271—281; 367—375
- 21 Kun S Y. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**: 423—426

Non-reproducibility of the Cross Sections of the Products Induced from Dissipative Reaction of $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ *

HAN Jian-Long^{1,2} WANG Qi^{1,1)} DONG Yu-Chuan^{1,2} LI Song-Lin¹ DUAN Li-Min¹ WU He-Yu¹
 XU Hua-Gen^{1,2} CHEN Ruo-Fu^{1,2} XU Hu-Shan¹ BAI Zhen^{1,2} 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, China)

2 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

4 (Centro de Ciencias Fisicas, Campus Morelos UNAM, Cuernavaca, Morales, Mexico)

5 (Nonlinear Physics Group and Department of Theoretical Physics, RSPPhysSE, ANU, Canberra, ACT 0200, Australia)

Abstract The differential cross sections of the dissipative products B, C, N, O, F, Ne, Na and Mg induced from the reactions of $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ at two incident energies have been measured at the HI-13 tandem accelerator, Beijing. In the case of a fixed beam incident energy 114MeV or 118.75MeV respectively, identical reaction system and the same detection system, 20 target points in steps of 2mm on a 10mm×50mm rectangular Al foil have been bombarded. The experimental results indicate that the probability distribution of the cross sections is much wider than a standard Gaussian distribution. This non-reproducibility of the cross sections can't be interpreted by the statistical property of a finite count rate.

Key words dissipative product, differential cross section, probability distribution, statistical property

Received 31 March 2005

*Supported by NSFC (10475101,10175083), Major State Basic Research Development Program (G2000077400) and National Key Program for Basic Research, Ministry of Science and Technology (2001CCB01200)

1) E-mail: wangqi@impcas.ac.cn