

# $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应截面涨落的角度关联测量\*

胡鹏云 王琦 田文栋 李松林 卢俊

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

F. Amorini<sup>1,3</sup> M. Cabibbo<sup>1,3</sup> G. Cardella<sup>2</sup> P. Figuerè<sup>1</sup> A. Musumarra<sup>1,3</sup>  
A. M. Papa<sup>2</sup> G. Pappalardo<sup>1,3</sup> F. Rizzo<sup>1,3</sup> S. Romano<sup>1</sup> S. Tudisco<sup>1</sup> B. Heusch<sup>4</sup>

1(Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud Catania, Italy)

2(Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Catania, Italy)

3(Dipartimento di Fisica, Università di Catania, Italy)

4(Centre de Recherches Nucleaires, Strasbourg, France)

**摘要** 在 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  ( $E_{\text{lab}} \approx 120\text{MeV}$ )耗散反应激发函数涨落的实验研究中,首次较大的角度范围内获得截面涨落的角度关联系数和角度关联函数. 实验结果表明,角度关联函数的形状呈现明显的非对称性,角度相干宽度至少为 $40^\circ$ ;截面涨落在前后角区表现出明显不同的角度相关性.

**关键词** 重离子耗散反应 截面涨落 角度关联函数 角度相干宽度

## 1 引言

80年代中期, De Rosa<sup>[1]</sup>等首次观测到重离子耗散反应激发函数振荡的新现象,其后相继开展的一系列实验研究<sup>[2-5]</sup>确立了这一现象的普遍性,从而将耗散反应机制的研究从平均观测量扩展到涨落性质的分析,为研究耗散反应中形成的中间双核系统(IDS)的特性及其时空演化过程开辟了一条新的途径. 以往绝大多数实验主要是研究反应截面涨落的能量关联和出射产物(元素或同位素)之间的关联. 目前,人们加深了对能量自关联函数振荡结构的认识<sup>[6]</sup>,相应地也发展了多种方法提取能量相干宽度. 在个别的实验中,同时测量几个角度的激发函数,意外地发现截面涨落的角度相干宽度异常地大. 由于这一新的现象无法用复合核统计涨落理论来解释,因此人们立刻认识到,截面涨落的大角度关联同能量的长程关联以及出射产物之间的强烈关联一样,也是耗散反应区别于

1998-12-01 收稿

\* 国家自然科学基金(19775057)、中国科学院“九五”重大基金(KJ95T-03)及意大利国家南方实验室资助项目

复合核反应中截面涨落的重要特征. 耗散反应截面涨落的角度关联函数有什么规律特点? 角度相干宽度到底有多大, 如何提取? 这些问题引起了人们的极大兴趣. 截面涨落的角度关联研究是目前该领域的热点.

本文报道了 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应激发函数涨落的实验研究, 实验中首次在大角度范围内对截面涨落的角度关联函数进行了测量.

## 2 实验概况及初步结果

本实验在意大利国家南方实验室的串列静电加速器上完成. 束流 $^{27}\text{Al}^{8+}$ 的入射能量从114MeV到123MeV, 能量步长200keV, 流强约50nA. 采用 $38\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚的 $^{27}\text{Al}$ 做靶, 以避免束流在靶中引起大的能量分散. 在实验系较大的角度范围( $10.4^\circ < \theta_{\text{lab}} < 57.4^\circ$ )内, 安排了3套 $\Delta E$ - $E$ 望远镜.  $\Delta E$ 探测器是气体电离室, 充有气压为40mb的 $\text{C}_4\text{H}_{10}$ 气体; 剩余能量 $E$ 沉积在位置灵敏的半导体Si探测器中. 此外, 在 $\theta_{\text{lab}} = 0^\circ$ 方向上装有法拉第筒以收集束流电荷, 在 $\theta_{\text{lab}} = 5.8^\circ$ 装有一个半导体束流监测器. 反应系统的入射能量约为库仑位垒的2倍 $E_{\text{cm}}/V_c \approx 2.2$ , 质心系中擦边角 $\theta_{\text{cm}}$ 约 $30^\circ$ , 擦边角动量 $l_{\text{cm}}$ 约 $35\hbar$ , 探测系统在质心系中角度分辨率约 $4^\circ$ .

系统的电荷分辨率 $Z/\Delta Z \approx 30$ . 从图1可以看出, 望远镜很清楚地分辨了 $Z=4-16$ 的诸元素. 在图2类弹产物Na元素的能谱图中, 准弹反应和耗散反应产物共存, 两者之间有比较明显的界限, 仅对能谱的耗散部分进行积分, 按两体运动学计算取 $-40\text{MeV} \leq Q \leq -10\text{MeV}$ , 按逐个事件对数据从实验室系到质心系进行转换. 由于反应系统为对称性系统, 在质心系中对于 $\theta_{\text{cm}} > 90^\circ$ 的事件都标记为 $180^\circ - \theta_{\text{cm}}$ .

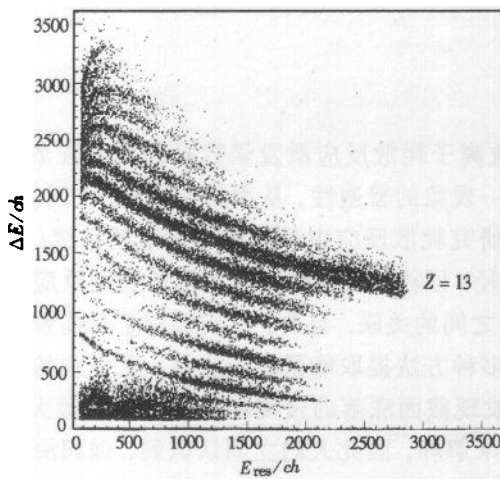


图1  $123\text{MeV } ^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  反应在  $\theta_{\text{lab}} = 30^\circ$  的  $\Delta E$ - $E$  散点图

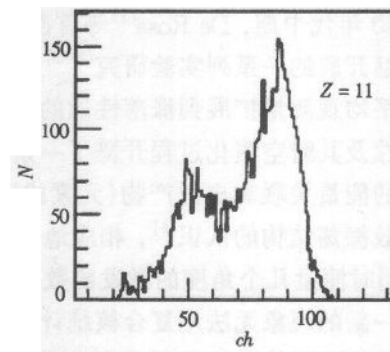


图2 元素  $Z = 11$  的能谱图

本实验以截面涨落的角度关联研究为主要目的, 考虑到耗散反应截面涨落具有很强

的出射道关联的普遍性质,且涨落性质并不明显地依赖于某具体出射道,因此在实验数据分析时,对类 Al 的耗散产物( $11 \leq Z \leq 15$ )截面进行了积分,这样既进一步增加了统计计数,减少了统计误差,又不影响对截面涨落性质的分析.图3为类 Al 产物在质心系中各角度的激发函数.可以看出,尽管对多种产物截面进行积分,但激发函数的涨落仍未被平滑,其涨落幅度远大于统计误差.通过能量自关联分析,激发函数展现出耗散反应所特有的准周期性振荡结构,区别于复合核反应中无规则的 Ericson 涨落<sup>[7]</sup>.

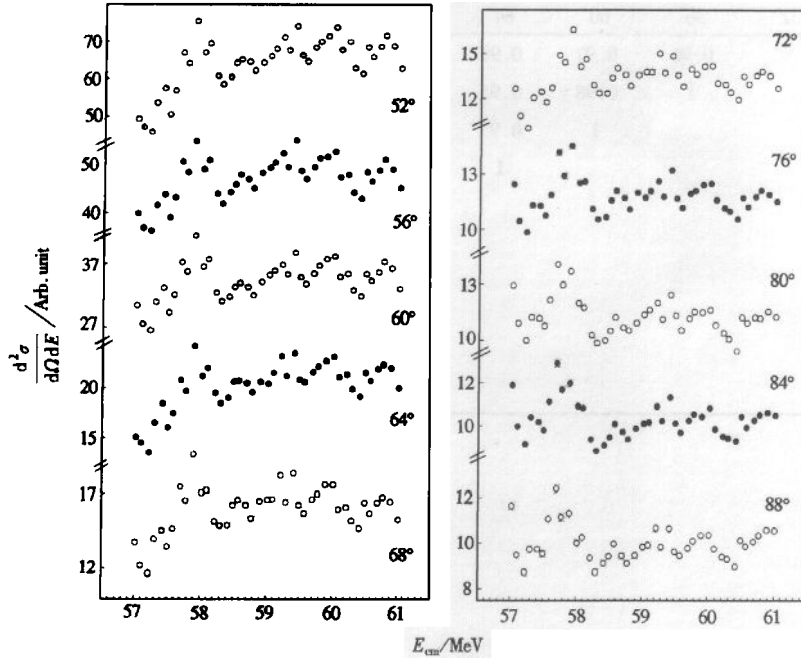


图3  $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应在质心系中不同角度的类 Al 产物的激发函数

### 3 角度关联分析和讨论

根据统计力学对涨落关联的一般性概念,反应截面涨落的角度关联系数可以定义为<sup>[8]</sup>

$$C(\theta, \theta') = \left[ \left( \frac{\sigma(E, \theta)}{\langle \sigma(E, \theta) \rangle} - 1 \right) \left( \frac{\sigma(E, \theta')}{\langle \sigma(E, \theta') \rangle} - 1 \right) \right],$$

以中间角度作参考角,相对归一的角度互关联函数为

$$C_n(\theta, \theta') = \frac{C(\theta, \theta')}{\sqrt{C(\theta, \theta)C(\theta', \theta')}} \quad (2)$$

式(1)中的 $\langle \rangle$ 表示对能量求算术平均. $\bar{\sigma}(E, \theta)$ 代表平均反应截面随能量的变化趋势,它不可能从实验上直接测量到,通常对实验上测量到的激发函数采用移动平均方法来获得<sup>[9]</sup>.鉴于有限的测量能量区间(一般大约 10MeV)及平均反应截面变化与入射能没有明显的依赖关系,因此用最小二乘法线性拟合平均截面曲线也许更为实际合理.

我们用移动平均法和直线拟合法分别计算了  $\bar{\sigma}(E, \theta)$ ，最终得到的角度互关联系数基本上一致，相差在 8% 以内。

表 1 给出了  $\bar{\sigma}(\theta)$  对应于线性拟合法的角互关联系数，其误差主要由有限数据范围误差决定<sup>[8]</sup>，约 20%。很显然，在较大的角度范围内 ( $50^\circ < \theta_{cm} < 90^\circ$ )，角互关联系数一般远大于 0.5。

表 1  $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  耗散反应中类 Al 产物的角互关联系数

$\theta_{cm}$	52°	56°	60°	64°	68°	72°	76°	80°	84°	88°
52°	1	0.96	0.97	0.99	0.97	0.93	0.81	0.58	0.53	0.48
56°		1	0.98	0.95	0.97	0.95	0.88	0.71	0.65	0.58
60°			1	0.95	0.97	0.95	0.88	0.71	0.66	0.60
64°				1	0.97	0.93	0.78	0.55	0.49	0.45
68°					1	0.98	0.89	0.70	0.64	0.59
72°						1	0.93	0.76	0.70	0.66
76°							1	0.92	0.89	0.84
80°								1	0.97	0.94
84°									1	0.96
88°										1

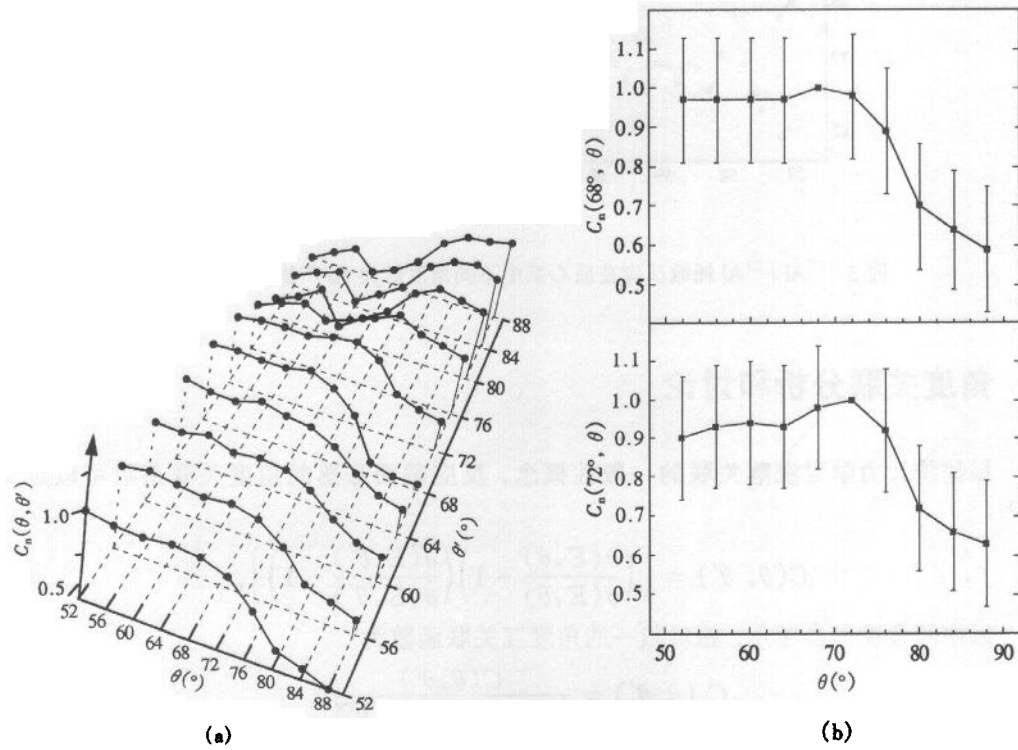


图 4 类 Al 耗散产物截面涨落的角度关联函数曲线

图 4 为截面涨落的角度互关联函数曲线，激发函数的涨落表现出长程的角度关联，

角度相干宽度至少要大于  $40^\circ$ 。有趣的是, 角度关联函数并非为简单的钟罩形, 而是相对于参考角呈现出明显的非对称性。总的来说, 相对于参考角而言, 沿着小角度方向变化缓慢, 而沿着大角度方向减小得较快。

如此大的角度相干宽度, 显然不能用复合核反应涨落理论<sup>[10]</sup>或有关轻系统重离子反应的角度关联函数理论方法<sup>[11]</sup>来解释, 将它们运用于本文所讨论的重离子耗散反应情形下时, 对于前者, D. M. Brink 给出了很小的角度相干宽度  $\theta_c = 1/l_{gr} \approx 2^\circ - 3^\circ$ , 而对于后者, 角度相干宽度也不过  $20^\circ$  左右。

从表 1 还可以看到, 较前角区 ( $\theta_{cm} < 70^\circ$ ) 截面涨落的平均关联系数  $\bar{C}(\theta, \theta')$  高达 0.96, 比后角区 ( $\theta_{cm} > 70^\circ$ ) 有更强的角度关联。值得注意的是, 截面的涨落性质在不同角度区表现出不同的行为, 这种现象在平均截面的角分布、激发函数的平均变化趋势以及能量自关联函数中都有所表现, 并且有其明显的联系(我们将另文系统地论述这一现象)。

截面涨落性质的角度相关性, 反映了 IDS 的宏观转动特性对其非平衡态演化过程造成的影响。Kun S. Yu 将 Pole 型角动量相干函数应用于耗散反应截面涨落研究时<sup>[6]</sup>, 发现有两种相互作用时间即 IDS 的平均寿命  $\tau$  和转动周期  $T$  共同决定了 IDS 的时间演化过程。  $\tau > T$  时将发生多圈转动, 正是由于多圈转动之间的相干造成了能量自关联函数的准周期性振荡结构。角动量相干宽度  $\gamma = T/\tau(2\pi)$  则表征了这种转动相干的大小。根据能级部分重叠模型(POMLM)<sup>[4]</sup>关于重离子耗散反应中存在着快、慢两种反应机制的假设, 截面涨落的性质在前角区主要由快成份决定(对应于  $\gamma \gg 1.0$ ), 而在后角区主要由慢成份决定(对应于  $\gamma < 0.5$ )。POMLM 的这一观点从一个侧面反映了耗散碰撞的半经典性轨道图象: 在前角区即擦边角附近, 耗散产物主要来源于近边碰撞, 反应产物所经历的弛豫过程较短, 这时 IDS 远未达到统计平衡; 在后角区, 产物主要来源于远边碰撞, 反应产物所经历的弛豫过程较长, 这时 IDS 可能已达到局部统计平衡。Kun S. Yu 的统计反应理论<sup>[12]</sup>和 POMLM 都较成功地描述了重离子耗散反应截面涨落的一些主要特征, 如平均反应截面的角分布、能量自关联函数的长程关联振荡结构等。这两个理论模型都预言角度关联函数会呈现出周期性振荡结构。然而, 如图 4 所示, 在本实验结果中并未明显地观测到这种现象。

## 4 结束语

在  $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  耗散碰撞的激发函数测量中, 对截面涨落的角度关联函数进行了专门的测量, 获得了较为完整的、系统的截面涨落角度关联系数和角度关联函数, 发现角度相干宽度至少大于  $40^\circ$ , 角度关联函数具有奇特的非对称性特点。实验结果表明, 截面涨落前后角区表现出明显不同的角度相关性。

尽管目前的理论模型还不能对角度关联函数的形状及其相干宽度给出定量的解释, 但可以确信, 在更大的角度范围内开展包括角度关联在内的耗散反应截面涨落的研究, 将有助于更细致地分析中间双核系统由强烈非平衡态向局部平衡态的演化过程。这方面的实验研究还开展不久, 其普遍的规律特点还认识得很不够, 期待着更多的、更系统的实验数据。

## 参考文献(References)

- 1 De Rosa A et al. Phys. Lett., 1985, **B160**:239
- 2 Suomijärvi T et al. Phys. Rev., 1987, **C36**:181A
- 3 De Rosa A et al. Phys. Rev., 1991, **C44**:747
- 4 Papa M et al. Z. Phys., 1995, **A353**:205
- 5 WANG Qi et al. Phys. Lett., 1996, **B388**:462
- 6 Kun S Yu. Phys. Lett., 1991, **B257**:247
- 7 TIAN WenDong et al. High Energy Phys. and Nuclear Phys. (in Chinese), 1999, **23**:334  
(田文栋等. 高能物理与核物理, 1999, **23**:334)
- 8 Dennis L C et al. Phys. Rev., 1979, **C19**:777
- 9 Pappalardo G. Phys. Lett., 1964, **13**:320
- 10 Brink D M et al. Nucl. Phys., 1964, **54**:577
- 11 Hartmann K M et al. Nucl. Phys., 1982, **A380**:170
- 12 Kun S Yu et al. Phys. Lett., 1990, **B249**:1
- 13 Kun S Yu et al. Z. Phys., 1997, **A359**:137

### Measurement of Angular Cross-Correlation of the Cross Section Fluctuation in Dissipative Collision $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}^*$

HU PengYun WANG Qi TIAN WenDong LI SongLin LU Jun

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

F. Amorini<sup>1,3</sup> M. Cabibbo<sup>1,3</sup> G. Cardella<sup>2</sup> P. Figueri<sup>1</sup> A. Musumarra<sup>1,3</sup>

A. M. Papa<sup>2</sup> G. Pappalardo<sup>1,3</sup> F. Rizzo<sup>1,3</sup> S. Romano<sup>1</sup> S. Tudisco<sup>1</sup> B. Heusch<sup>4</sup>

1(Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud Catania, Italy)

2(Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Catania, Italy)

3(Dipartimento di Fisica, Università di Catania, Italy)

4(Centre de Recherches Nucleaires, Strasbourg, France)

**Abstract** The excitation function was measured from  $\theta_{\text{lab}} = 10.4^\circ$  to  $57.4^\circ$  in dissipative collision  $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  with incident energy ranging from 114 to 123 MeV in step of 200 keV. The Angular-cross Correlation Functions (ACFs) of cross section fluctuation within large angle region were obtained through experiment for the first time. It is found that the angular coherent width is at least  $40^\circ$ . It is interesting that the ACFs is not simple bell shape but shows strong asymmetry. The over-all behavior is that ACF varies more quickly for the backward angles. It is also noticed that the cross section fluctuation in the forward angle region ( $\theta_{\text{cm}} < 70^\circ$ ) shows much stronger angular coherence than in the backward angle region ( $\theta_{\text{cm}} > 70^\circ$ ). This angular dependence may be attributed to the coherent rotation effect of intermediate di-nuclear system.

**Key words** dissipative heavy ion collision, cross section fluctuation, angular crosscorrelation function, angular coherent width

Received 1 December 1998

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (19775057), Major Subject of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03) and the Laboratorio Nazionale desud, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Italy