

# 关联函数在耗散反应激发 函数涨落中的应用\*

田文栋 王琦 李松林 胡鹏云 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 应用关联函数方法,分析耗散反应激发函数中的涨落.通过推导出能量自关联函数、角度互关联函数、反应产物元素之间的互关联函数、反应产物同位素之间的互关联函数,来分析在耗散反应这一由非平衡向平衡演化的系统中,核反应体系演化过程的特点,说明关联函数在研究耗散反应激发函数涨落中的特殊作用.用推导出的函数分析了实验  $4.5\text{MeV/u } ^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  和  $102.5\text{MeV } ^{19}\text{F} + ^{51}\text{V}$  的数据,并且指出了用这种方法可以提取的耗散反应体系的信息.

**关键词** 关联函数 激发函数 涨落

## 1 引言

物理系统的统计描述处理观察量的平均值和这些量在平均值周围的分布.作为围绕平均值的分布,即系统的涨落分布,同平均值一样具有同等重要的作用.在系统的一切状态的平均描述还不足以提供全部所需的信息时,对于系统中存在的涨落的分析,给我们研究系统的状态和演化提供了一条新的途径.

统计方法是研究核物理,描述核反应过程的一个根本出发点和方法,用统计理论描述核反应已经取得了很大的成功.核反应中激发函数的涨落首先研究的是统计平衡状态的复合核<sup>[1,2]</sup>.1985年A. De. Rosa报道了在耗散反应激发函数中也存在涨落<sup>[3]</sup>.从此以后耗散反应激发函数的涨落引起了广大核反应物理工作者的关注<sup>[4-7]</sup>.在研究过程中,一些用来表达随机变量的变化和其相互之间关系的理论被应用到核反应理论中来.本文由关联函数的定义,详细推导了应用于耗散反应的各种关联函数,并通过分析在意大利南方国家实验室所做的  $4.5\text{MeV/u } ^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  耗散反应的实验数据和在中国原子能研究院HI-13静电串列加速器上做的  $102.5\text{MeV } ^{19}\text{F} + ^{51}\text{V}$  的实验<sup>[8,9]</sup>,说明关联函数方法在这一反应机制分析中的作用.

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)以及意大利南方国家实验室资助项目

## 2 关联函数的定义

对于一个存在随机涨落的经典平衡系统,用  $x$  表示涨落依赖的变量,  $A(x)$  表示每一次测量的测量值,其平均值用  $\langle A(x) \rangle$  表示,定义其涨落为  $\delta A(x)$ , 则

$$\delta A(x) = A(x) - \langle A(x) \rangle, \quad (2-1)$$

定义涨落  $\delta A(x)$  的自关联函数为

$$\rho(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta A(x_1) \delta A(x_1 + x) dx_1, \quad (2-2)$$

对于有限的测量点  $A(x)$ , 用求和平均来代替积分, 可得到

$$\rho(x) = \frac{1}{N} \sum_{x_i=x_1}^{x_n} \delta A(x_i) \delta A(x_i + x) = \langle \delta A(x_i) \delta A(x_i + x) \rangle, \quad (2-3)$$

$\rho(x)$  不依赖于测量点  $A(x_i)$ , 而只依赖于测量点间隔  $x = x_i - x_j$  和测量点的数量  $N$ .

进行归一化得到自关联函数为

$$C(x) = \rho(x) / \rho(0). \quad (2-4)$$

如果存在几个随机涨落量都是自变量  $x$  的函数, 如  $A(x)$  和  $B(x)$ , 那么对各个涨落量平均值的涨落分别为  $\delta A(x)$  和  $\delta B(x)$ , 则其互关联函数为

$$\rho(A, B) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta A(x_1) \delta B(x_1) dx_1, \quad (2-5)$$

对于有限的测量点  $A(x)$  和  $B(x)$ , 用求和平均来代替积分, 可得到

$$\rho(A, B) = \frac{1}{N} \sum_{x_i=x_1}^{x_n} \delta A(x_i) \delta B(x_i) = \langle \delta A(x_i) \delta B(x_i) \rangle, \quad (2-6)$$

$\rho(A, B)$  与测量点的位置  $x_i$  无关, 而只与测量点数量  $N$  和随机涨落函数  $A(x)$  和  $B(x)$  有关, 归一化的互关联函数为

$$C(A, B) = \rho(A, B) / [\langle \delta A(x_i) \delta A(x_i) \rangle^{1/2} \langle \delta B(x_i) \delta B(x_i) \rangle^{1/2}], \quad (2-7)$$

非平衡系统和平衡系统对关联函数的定义是相同的.

## 3 耗散反应中的关联函数

在耗散反应系统中, 反应截面与人射能量  $E$ 、出射角度  $\theta$ 、出射粒子的电荷数  $Z$ 、质量数  $A$  都有关, 因此对于出射粒子, 其反应截面为  $E, \theta, Z, A$  的函数, 即  $\sigma(E, \theta, Z, A)$ , 而反应截面的涨落表现为入射能量的函数, 可表示为

$$\delta \sigma(E) = \sigma(E) - \langle \sigma(E) \rangle, \quad (3-1)$$

其中  $\langle \sigma(E) \rangle$  表示在入射能为  $E$  时的反应截面的平均值. 由于反应截面是入射能的函数, 因此该平均值可以有不同的计算方法<sup>[10]</sup>. 在所测的能量区间比较小时, 取其在该区间的算术平均值为反应截面的平均值, 则能量自关联函数为

$$\begin{aligned} \rho(\epsilon) &= \langle \delta\sigma(E)\delta\sigma(E + \epsilon) \rangle = \\ &= \langle (\sigma(E) - \langle \sigma(E) \rangle)(\sigma(E + \epsilon) - \langle \sigma(E + \epsilon) \rangle) \rangle = \\ &= \langle \sigma(E)\sigma(E + \epsilon) \rangle - \langle \sigma(E) \rangle \langle \sigma(E + \epsilon) \rangle. \end{aligned} \quad (3-2)$$

这里计算能量自关联函数时，其它变量都是不变的，即在计算平均值时， $\theta, Z, A$  是相同的。归一化的能量自关联函数为

$$C(\epsilon) = \frac{\rho(\epsilon)}{\rho(0)} = \frac{\langle \sigma(E)\sigma(E + \epsilon) \rangle - \langle \sigma(E) \rangle \langle \sigma(E + \epsilon) \rangle}{\langle \sigma^2(E) \rangle - \langle \sigma(E) \rangle^2}. \quad (3-3)$$

图 1 中(a)为 4.5MeV/u  $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  耗散反应中质心系  $72^0$  类 Al 产物的激发函数，所计算的能量自关联函数(图 1(b))在有限的能量区间内存在准周期性结构，不再是统计平衡状态时的洛伦兹形(图 1(b)虚线所示)，从理论上拟合实验结果<sup>[7]</sup>(图 1(b)实线所示)，可以得到用来描述耗散反应过程中反应体系状态的两个参数： $\Gamma$ (中间双核反应体系的能级宽度)和 $\hbar\omega$ (中间双核反应体系的转动周期)，反映了处于非平衡态的耗散反应过程中的复杂关联。

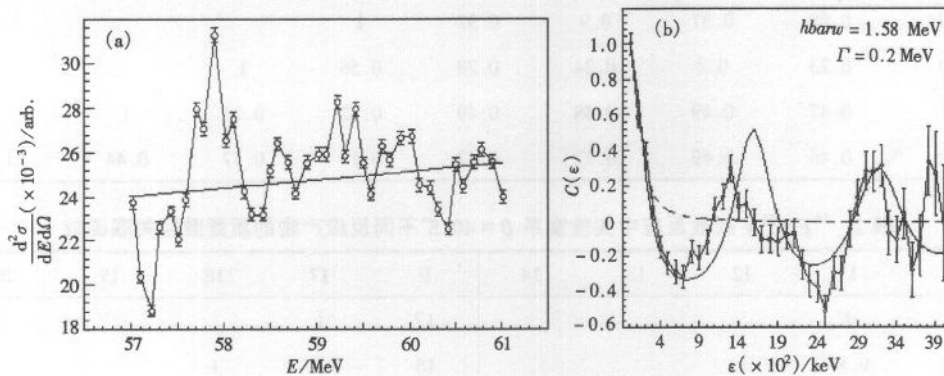


图 1 (a) 4.5MeV/u  $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  耗散反应在质心系  $72^0$  类 Al 产物的激发函数和(b)能量自关联函数  
点为由公式(3-3)计算所得的结果；虚线为洛伦兹函数拟合结果<sup>[8]</sup>；实线为理论公式计算结果。

由式(2-6)和(2-7)可以得到不同角度之间的互关联函数  $\rho(\theta, \theta')$  和  $C(\theta, \theta')$

$$\rho(\theta, \theta') = \langle (\sigma(E, \theta) - \langle \sigma(E, \theta) \rangle)(\sigma(E, \theta') - \langle \sigma(E, \theta') \rangle) \rangle, \quad (3-4)$$

$$C(\theta, \theta') = \frac{\rho(\theta, \theta')}{\langle (\sigma(E, \theta) - \langle \sigma(E, \theta) \rangle)^2 \rangle^{1/2} \langle (\sigma(E, \theta') - \langle \sigma(E, \theta') \rangle)^2 \rangle^{1/2}}. \quad (3-5)$$

由上式计算的 4.5MeV/u  $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  耗散反应中质心系不同角度的互关联函数已在另一篇文章中详细讨论<sup>[10, 11]</sup>。

耗散反应中在一定出射角的不同电荷数的产物之间，根据式(2-7)可以计算它们的电荷数互关联函数  $C(Z, Z')$  或质量数互关联函数  $C(A, A')$

$$C(Z, Z') = \frac{\langle (\sigma(E, Z) - \langle \sigma(E, Z) \rangle)(\sigma(E, Z') - \langle \sigma(E, Z') \rangle) \rangle}{\langle (\sigma(E, Z) - \langle \sigma(E, Z) \rangle)^2 \rangle^{1/2} \langle (\sigma(E, Z') - \langle \sigma(E, Z') \rangle)^2 \rangle^{1/2}} \quad (3-6)$$

$$C(A, A') = \frac{\langle(\sigma(E, A) - \langle\sigma(E, A)\rangle)(\sigma(E, A') - \langle\sigma(E, A')\rangle)\rangle}{\langle(\sigma(E, A) - \langle\sigma(E, A)\rangle)^2\rangle^{1/2}\langle(\sigma(E, A') - \langle\sigma(E, A')\rangle)^2\rangle^{1/2}}, \quad (3-7)$$

这里的 $\langle\sigma(E, Z)\rangle$ 和 $\langle\sigma(E, Z')\rangle$ 、 $\langle\sigma(E, A)\rangle$ 和 $\langle\sigma(E, A')\rangle$ 分别用该能量区间的算术平均值计算得到. 表1和表2分别是由公式(3-6)、(3-7)计算得到的102.5—109.5MeV  $^{19}\text{F} + ^{51}\text{V}$  耗散反应中实验室系  $\theta = 40.5^\circ$  不同反应产物的电荷数互关联函数<sup>[8, 9]</sup>和质量数互关联函数<sup>[12]</sup>

表1  $^{19}\text{F} + ^{51}\text{V}$  耗散反应中实验室系  $\theta = 40.5^\circ$  不同反应产物的电荷数互关联函数

	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Li	1							
Be	0.98	1						
B	0.98	0.98	1					
C	0.98	0.97	0.99	1				
N	0.88	0.87	0.9	0.92	1			
O	0.23	0.2	0.24	0.28	0.56	1		
F	0.47	0.49	0.48	0.49	0.32	0.23	1	
Ne	0.46	0.49	0.47	0.42	0.14	0.57	0.44	1

表2  $^{19}\text{F} + ^{51}\text{V}$  耗散反应中实验室系  $\theta = 40.5^\circ$  不同反应产物的质量数互关联函数

C	11	12	13	14	F	17	18	19	20		
11	1				17	1					
12	0.87	1			18	0.86	1				
13	0.89	0.97	1		19	0.34	0.43	1			
14	0.85	0.82	0.88	1	20	0.76	0.95	0.42	1		
O	15	16	17	18	19	N	13	14	15	16	17
15	1					13	1				
16	0.89	1				14	0.88	1			
17	0.80	0.9	1			15	0.87	0.95	1		
18	0.12	0.09	0.24	1		16	0.58	0.53	0.61	1	
19	0.05	0.08	0.33	0.32	1	17	0.07	0.06	0.13	0.45	1

## 4 总结

应用关联函数方法于耗散反应激发函数涨落的分析中, 给我们研究耗散反应这一由非平衡向平衡演变的系统提供了一个有效的途径, 从本文关于能量自关联函数、角度互关联函数、反应产物电荷数之间的互关联函数、反应产物质量数之间的互关联函数的分

析,可以得到以下的结论:

(1) 该方法中各种关联函数的值都清楚地表示出耗散反应过程是一个非平衡的过程,这与已经得到的关于耗散反应非平衡性的结论是一致的,说明了该方法在研究耗散反应中的有效性.

(2) 关联函数是从耗散反应中激发函数的涨落入手分析,所得出的结论也说明了反应截面的涨落同反应截面的平均值的研究同样重要,同样给我们提供了核反应过程的信息,特别是提供了反应截面的平均值所不能得到的某些信息,打开了研究非平衡系统的新途径.

### 参考文献(References)

- 1 Ericson T. *Ann. Phys.*, 1963, **3**:390
- 2 Ericson T. *Adv. Phys.*, 1960, **9**:425
- 3 Brink D M, Dietrick K. *Z. Phys.*, 1987, **A326**:7
- 4 Rosa A De et al. *Phys. Lett.*, 1985, **160B**:239
- 5 Kun S Yu. *Phys. Lett.*, 1991, **B257**:247
- 6 Pappalardo G. *Nucl. Phys.*, 1988, **A488**:395
- 7 Kun S Yu. *Nucl. Phys.*, 1995, **A583**:275
- 8 WANG Qi, LI SongLin et al. *High Energy and Nuclear Physics (in Chinese)*, 1994, **18**(5):397  
(王琦, 李松林等. *高能物理与核物理*, 1994, **18**(5):397)
- 9 LU Jun, WANG Qi et al. *Chin. Jour. of Nucl. Phys.*, 1996, **18**(2):99
- 10 Berceanu I, Andronic A et al. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:2359
- 11 HU PengYun, WANG Qi, TIAN WenDong et al. *High Energy and Nuclear Physics (in Chinese)*, 1999, **24**(2):119—124  
(胡鹏云, 王琦, 田文栋等. *高能物理与核物理*, 1999, **24**(2):119—124)
- 12 LU Jun. Ph. D Thesis, Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Science (in Chinese), 1996  
(卢俊. 博士论文, 兰州近物所 1996)

## Application of Correlation Function in the Fluctuation of Excitation Function in Dissipative Nuclear Reaction

TIAN WenDong WANG Qi LI SongLin HU PengYun LUO YiXiao

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

**Abstract** The correlation function method is applied to analyze the fluctuation of the excitation function in the dissipative nuclear reaction. By deriving the energy autocorrelation function, angle correlation function, elements correlation function and isotopic element correlation the characters of the nuclear reaction system in the dissipative reaction varying from the equilibrium to the non-equilibrium system are analyzed, and the special role of these method in the study of the dissipative nuclear reactions shown. Experiments of  $4.5\text{MeV/u }^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  and  $102.5\text{MeV }^{19}\text{F} + ^{51}\text{V}$  are analyzed by using these function derived in this articles, and the information in dissipative nuclear system, which can be drawn out from this method, is pointed out.

**Key words** correlation function, excitation function, fluctuation

---

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 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionale del Sud, Catania, Italy