

$^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应中激发函数的测量 与统计性质分析*

田文栋 王琦 李松林 卢俊 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

F. Amorini^{1,3} M. Cabibbo^{1,3} G. Cardella² P. Figuere¹ A. Musumarra^{1,3}
A. M. Papa² G. Pappalardo^{1,3} F. Rizzo^{1,3} S. Romano¹ S. Tudisco¹

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

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

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

B. Heusch

(Centre de Recherches Nucleaires, Strasbourg, France)

摘要 通过测量能量从 114—120MeV、能量步长为 200keV 的重离子耗散反应 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 从 $\theta_{\text{cm}} = 50^\circ - 90^\circ$ 的角分布和激发函数, 在对所有宏观出射道积分的基础上, 分析了重离子耗散反应中激发函数涨落的物理性质。

关键词 重离子耗散反应 激发函数 非平衡统计 涨落

1 引言

在 1985 年人们发现了重离子耗散反应激发函数中的涨落现象, 其后的一系列实验研究已经确定了这一现象的普遍性^[1-9], 也为我们更好地了解重离子耗散反应的精细结构提供了一种不可替代的手段。重离子耗散反应激发函数的涨落有其自身的特点: 尽管反应系统有高的激发能, 出射道的数目也很大, 但是, 激发函数的涨落并不因此而变得平滑, 这与复合核反应中存在的 Ericson 涨落有明显的差别。在对这一新现象的研究过程中, 人们发展了 Ericson 统计理论, 提出了几种新的模型来解释和描述重离子耗散反应激发函数的涨落结构并取得了很大进展^[11-14]。这些理论中的一个共同点是: 中间双核系统的形成与衰变及其角动量的相干是造成重离子耗散反应激发函数中存在涨落的直接原因。

在重离子深部非弹性碰撞过程中, 各种自由度经历了从非平衡向平衡转变的过程, 有的自由度已经达到了平衡, 但许多自由度并没有达到完全平衡。人们在研究重离子耗

1998-03-27 收稿

* 国家自然科学基金(19775057)、中国科学院以及意大利国家南方实验室资助

散反应激发函数涨落时,常采用平衡统计的理论方法,这些理论解释了很多实验现象,但有些实验现象未能得到很好的解释. 本文从实验出发,通过与完全基于平衡统计的复合核理论和图象的比较,来分析重离子耗散反应和复合核中激发函数的涨落的不同,及平衡统计方法在重离子耗散反应中的适用程度.

2 实验和结果

前不久在意大利国家南方实验室的串列静电加速器上完成了 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应的

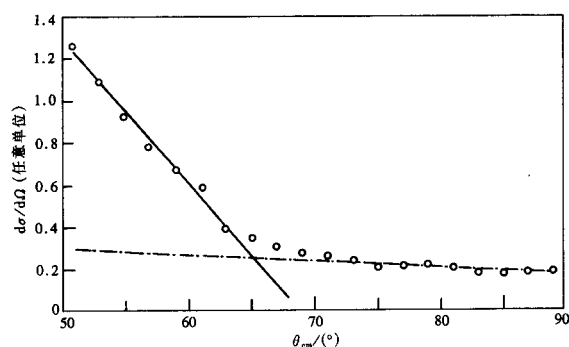


图1 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应在质心系中的角分布

— $\tau_1 = 5.1 \times 10^{-23} \text{s}$, - - $\tau_2 = 6.6 \times 10^{-22} \text{s}$.

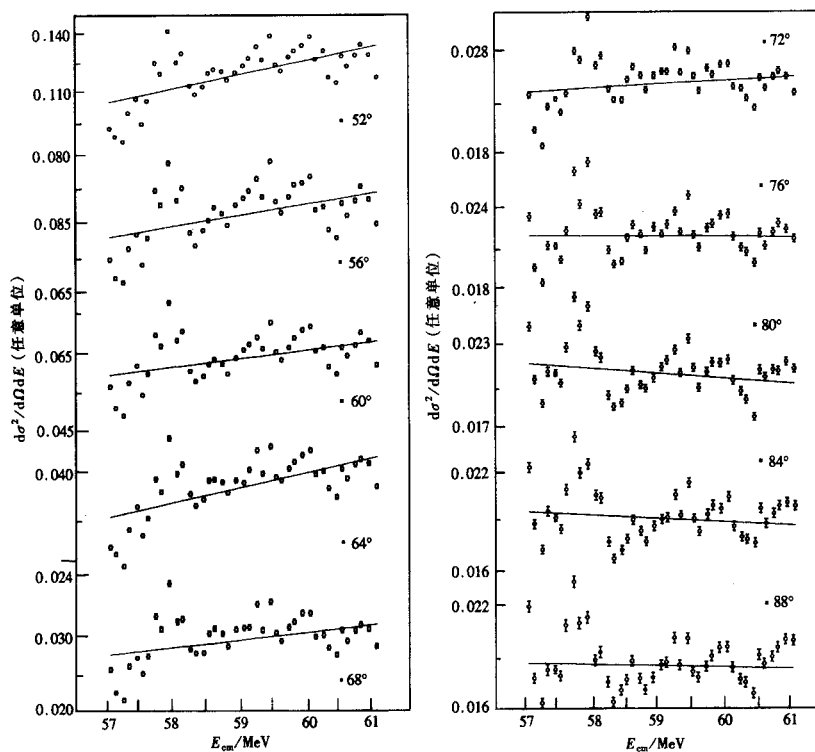


图2 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应在质心系中不同角度的激发函数

——按最小二乘法拟合得到的截面平均值。

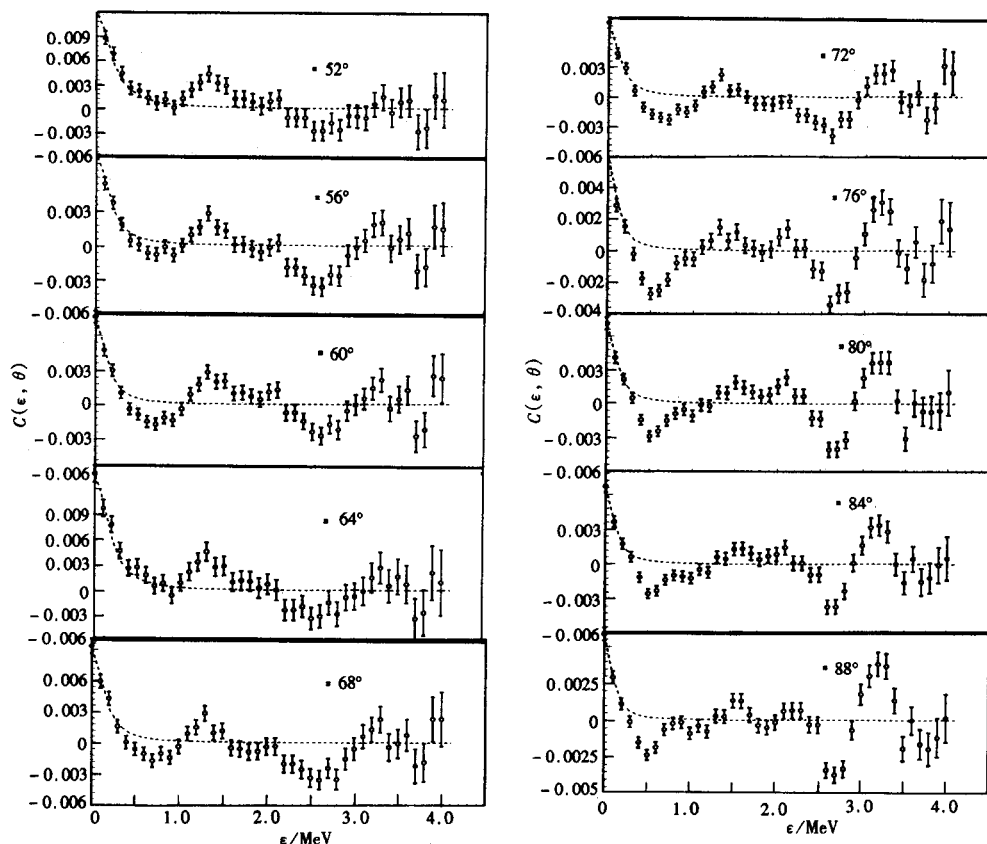


图3 $^{27}\text{Al}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应质心系中不同角度激发函数的能量自关联系数

实验,束流 $^{27}\text{Al}^{8+}$ 的入射能量范围114—120MeV,能量步长为200keV,靶厚为 $38\mu\text{g}/\text{cm}^2$,流强约50nA.

实验的探测器系统安排了3套 $\Delta E-E$ 望远镜, ΔE 探测器是气体电离室,充有气压为40mb的 C_4H_{10} 气体,为了能够测量不同角度的激发函数, E 探测器采用了厚度为1000 μm 的半导体位置灵敏探测器,3套探测器系统覆盖了实验室系从 10.4° — 57.4° 的连续角度范围,在 $\theta_{\text{lab}} = 5.8^\circ$ 处装有一个半导体束流监测器,在 $\theta_{\text{lab}} = 0^\circ$ 处装有法拉第筒以收集束流电荷.

按两体运动学计算而得到 Q 值的范围,仅对所测能区能谱的耗散部分进行积分,得到了耗散反应产物在质心系中的角分布和激发函数.

图1给出了 $^{27}\text{Al}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物质心系中总的角分布,是对 $Z=11-15$ 的耗散反应所有产物的截面积分的结果,在前角区和后角区存在两个不同的斜率,体现了重离子耗散反应非平衡统计的特征.

图2是质心系中不同角度的激发函数,反应截面也是对产物截面积分的结果,激发函数表现出显著的涨落行为.

图3是由能量自关联公式

$$C(\varepsilon, \theta) = \frac{\langle \sigma(E, \theta) \sigma(E + \varepsilon, \theta) \rangle}{\langle \sigma(E, \theta) \rangle \langle \sigma(E + \varepsilon, \theta) \rangle} - 1, \quad (1)$$

对图 2 中不同角度的激发函数计算得到的对应于不同质心系角度激发函数的能量自关联系数.

3 分析和讨论

重离子耗散反应是一个由非平衡向平衡态弛豫的过程, 在这个过程中, 各种自由度都经历着由非平衡向平衡的演化, 由图 1 的角分布可以看出, 在前角区和后角区由两组明显不同的斜率. 前者的形状与直接反应的角分布类似, 后者则接近复合核的 $1/\sin\theta$, 两者共存于同一个反应机制, 是典型的深部非弹性碰撞的角分布. 表明反应过程中存在耗散和阻尼的现象, 反映了双核系统从非平衡态向平衡态发展的特点.

重离子耗散反应激发函数的涨落被认为是分波角动量相干的结果, 在重离子耗散反应中, 激发能比较高, 存在大量的开放微观出射道, 这些分波振幅的相位是相干的, 因此再用统计的方法对相关的矩阵元素进行处理, 得到叠加的相干波而表现出涨落现象. 而对于宏观出射道, 其相位是随机的、不相干的, 如果重离子耗散反应中激发函数的涨落是完全统计性的, 那么对于宏观出射道的叠加, 激发函数应该变得平滑, 涨落应该消失. 为了证明重离子耗散反应中激发函数涨落的统计性, 图 2 是在质心系中不同角度的激发函数, 图中的实线是按最小二乘法拟合得到的截面平均值. 每个角度的激发函数都是对电荷数 $Z=11-15$ 的耗散反应产物的截面积分的结果, 激发函数中的涨落结构没有平滑的迹象. 这与我们在以前的耗散反应实验中对每个元素的不同同位素截面积分所得到的结果是完全一致的^[15]. 这同分析复合核时的情况完全不同, 由于复合核反应中各种自由度都达到了平衡, 其激发函数会由于对出射道积分而变得平滑, 涨落消失. 此差异体现了重离子耗散反应激发函数涨落的非平衡性.

能量自关联函数表示了不同能量间隔的反应截面之间的关联的大小, 它也给我们提供了激发函数涨落性质的信息. 在复合核中, 根据 T. Ericson 理论^[10], 复合核已经达到统计平衡, 因此其能量自关联函数应该呈现出 Lorentzian 型, 即满足公式

$$C(\varepsilon, \theta) = \frac{1}{N_{\text{eff}}} \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + \varepsilon^2}, \quad (2)$$

其中 $N_{\text{eff}} = 1/C(0, \theta)$ 是复合核的有效出射道的道数, Γ 是能量相干宽度, 可以从函数 $C(\varepsilon, \theta)$ 的极大值 $C(0, \theta)$ 的半高宽处提取.

用公式 (2) 对本实验数据进行拟合, 得到的结果如图 3 中虚线所示, 实验中的结果和复合核的 Lorentzian 型能量自关联函数存在着很大差别, 这是由于在复合核计算中其能量自关联函数采用了平衡统计理论. 在重离子耗散反应中, 其各种自由度没有达到完全弛豫, 在计算其激发函数的能量自关联函数时也不应该采用与复合核相同的理论, 而应当采用非平衡的统计理论. 也正是耗散反应的非平衡性质, 使激发函数呈现出长程相关性, 其能量自关联系数呈现出准周期性的振荡行为.

4 结论

重离子耗散反应激发函数的涨落不同于复合核的涨落,复合核的涨落是完全平衡的涨落,可以用平衡统计模型来描述其规律,而重离子耗散反应中的涨落则是非平衡的涨落, $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应激发函数涨落的研究表明:1)角分布不是单纯的 $1/\sin\theta$,表明了系统对入射道的记忆;2)激发函数的涨落结构不因对不同出射道的积分而平滑,揭示了涨落中非平衡成份的存在;3)能量自关联函数的准周期行为表明有能量的长程相关性;4)激发函数的涨落和能量自关联函数的形状都随角度的不同而不同,反映了双核系统的转动所起的重要作用.总之,重离子耗散反应激发函数的涨落不能用平衡统计模型来描述,耗散反应中的非平衡性已经为人们所接受,发展适用于耗散反应的非平衡统计理论是下一步要解决的问题.

参 考 文 献

- 1 De Rosa, Inghima A et al. Phys. Lett., 1985, **B160**:239
- 2 Pappalardo G. Nucl. Phys., 1988, **A488**:395
- 3 Suomijurri et al. Nucl. Phys., 1986, **A456**:186
- 4 De. Rosa et al. Phys. Rev., 1988, **C37**:1042
- 5 Gluesner et al. Nucl. Phys., 1990, **A509**:331
- 6 Rizzo F et al. Z Phys., 1994, **A349**:169
- 7 Papa M et al. Z Phys., 1995, **A353**:205
- 8 Wang Qi, Lu Jun, Li Songlin et al. Phys. Lett., 1996, **B388**:462
- 9 Wang Qi, Lu Jun, Li Songlin et al. Chinese Phys. Lett., 1996, **13**:727
- 10 Ericson T. Ann. Phys., 1963, **23**:390
- 11 Brink D M et al. Z. Phys., 1987, **A326**:7
- 12 Kun S Yu. Phys. Lett., 1991, **B257**:247
- 13 Pappalardo G, Papa M. Proceedings of Workshop on Multistep Direct Reactions. In: Lemmer R H ed. NAC Faure, South Africa 1991. Singapore: World Scientific, 1992. 89
- 14 Wang Qi. Lu Jun et al. Nuclear Science and Techniques, 1997, **8**(2): 74
- 15 Wang Qi. Lu Jun, Li Songlin. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1996, **20**(4):289
(王 琦、卢 俊、李松林等. 高能物理与核物理, 1996, **20**(4):289)

Measurement of Excitation Function and Analysis of Statistical Property in $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ Dissipative Reaction *

Tian Wendong Wang Qi Li Songlin Lu Jun Luo Yixiao

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

F. Amorini^{1,3} M. Cabibbo^{1,3} G. Cardella² P. Figuera¹ A. Musumarra^{1,3}

A. M. Papa² G. Pappalardo^{1,3} F. Rizzo^{1,3} S. Romano¹ S. Tudisco¹

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

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

³ (*Dipartimento di Fisica, Universita di Catania, Italy*)

B. Heusch

(*Centre de Recherches Nucleaires, Strasbourg, France*)

Abstract The angular distribution in the range of $\theta_{\text{cm}} = 50^\circ - 90^\circ$ and excitation function of the reaction products in heavy ion dissipative reaction $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ were measured, in the incident energy region from 114MeV to 120MeV with 200keV step. The statistical property of the fluctuation of the excitation function in heavy ion dissipative reaction was discussed based on the integration of the macro outgoing channels.

Key words heavy ion dissipative reaction, excitation function, nonequilibrium statistics, fluctuation

Received 27 March 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19775057), the Chinese Academy of Sciences and the Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionale del Sud Catania, Italy