

$^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 重离子耗散碰撞中能量 自关联函数的分析*

王琦 李松林 田文栋 卢俊 胡鹏云 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 测量了 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的激发函数,束流 $^{27}\text{Al}^{8+}$ 的入射能量从114MeV到127MeV变化,能量步长为200keV.探测角度覆盖了实验室系 10° — 57° 的连续区域.用不同的理论模型分析了耗散产物的能量自关联函数.结果表明,反应所形成的中间双核系统的阻尼相干转动造成了激发函数中不可平滑的涨落结构,相干转动的阻尼来自量子混沌运动.

关键词 激发函数测量 重离子耗散碰撞 相干转动 量子混沌

1 引言

重离子深部非弹性碰撞(亦称耗散反应)是70年代初发现的一种核反应机制,其物理图像是:两个原子核发生碰撞,形成中间双核系统.在双核系统存活期间,相对运动动能转化为系统的内部激发能,轨道角动量转化为系统的内禀角动量.整个系统还达不到完全的统计平衡时,衰变成类弹碎片和类靶碎片.这里要强调的是,中间双核系统始终处于非平衡状态,反应产物的能量、电荷、质量、角动量、中质比、宇称和自旋等各种物理量无一不表现出随时间而演化的弛豫特征.自80年代末期开始,这一领域又有了引人注目的新进展,即耗散反应产物的激发函数研究^[1-10].

在重离子反应中,可以将激发函数的结构归结为三类:第一类是宽度大约3—5MeV的粗结构,由势散射引起;第二类是宽度 $\leq 0.1\text{MeV}$ 的细结构,对应的是Ericson统计涨落;第三类是宽度在0.5—1MeV左右的中间结构,起源于分立能级的分子共振,这时复合系统的能级宽度 Γ 小于其能级的平均间隙 D .一系列的实验结果表明,耗散反应激发函数的截面涨落具有特征性结构:其宽度与中间结构差不多,但是没有一定的 J^π 与之对应,此时的双核系统处在高激发状态,即 $\Gamma \gg D$ 的能区,其物理根源完全不同于分立能级的分子共振.尤其令人感兴趣的是,截面涨落的结构并不因为系统的激发能高以及出射道的数目非常巨大而平滑,这是传统的核反应统计理论所不能预期的.

2000-06-13 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

混沌运动是自然界普遍存在的现象. 非平衡是存在混沌运动的前提条件, 非线性变化是产生混沌运动的重要根源, 稳定结构是混沌运动的一种典型表现. 而重离子深部非弹性碰撞所形成的中间双核系统一直处于非平衡态, 非线性的耗散贯穿于反应过程的始终, 激发函数的结构又不能平滑. 为了研究重离子耗散碰撞与混沌运动之间的深刻联系, 本文用几种不同的理论近似, 通过分析²⁷Al+²⁷Al 耗散反应产物的能量自关联函数, 讨论了激发函数中截面涨落结构的不可平滑性. 结果表明, 引入量子混沌的概念之后, 这种不平滑结构能得到最佳的拟合与解释, 双核系统随时间演化的物理图像也更加清晰.

2 实验及其结果

中意双方合作在 Catania 意大利国家南方实验室的串列静电加速器上完成了²⁷Al+²⁷Al 的实验研究. 束流²⁷Al¹⁸⁺ 的入射能量从 114MeV 到 127MeV 变化, 能量步长为 200keV;

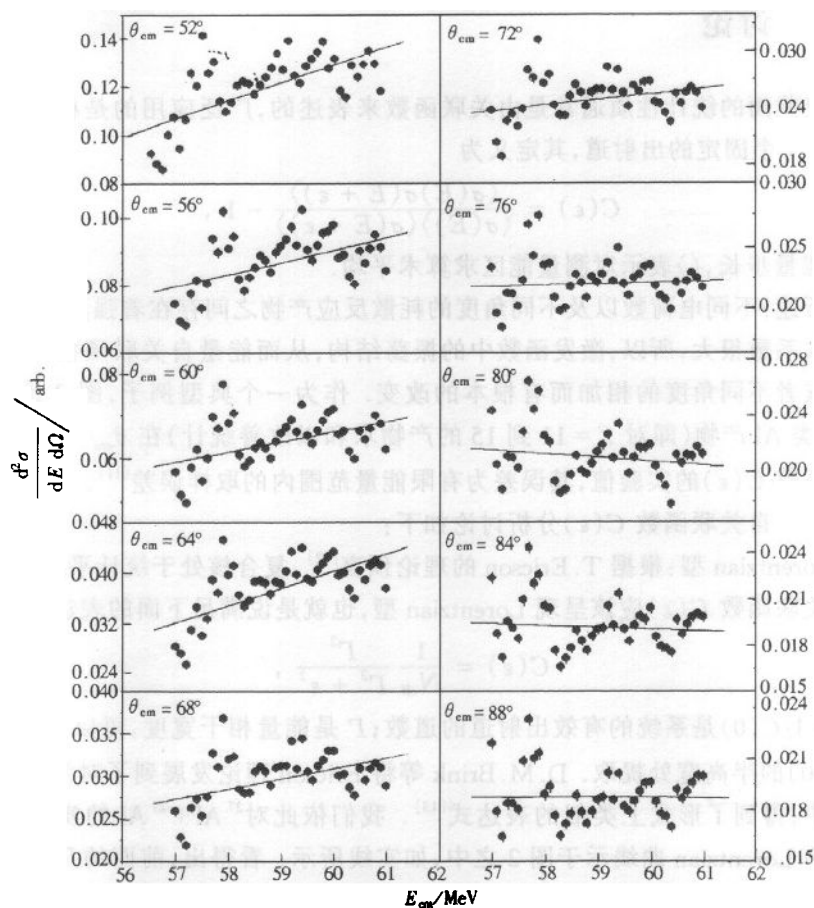


图 1 ²⁷Al+²⁷Al 耗散反应产物的激发函数

——按最小二乘法拟合得到的截面平均值.

薄靶的厚度为 $38\mu\text{g}/\text{cm}^2$; 流强约 50nA . 实验数据按逐个事件获取, 连续测量了 300h , 以保证充足的统计计数.

实验的探测系统由 3 套 ΔE - E 望远镜组成, 用以进行反应产物的电荷数鉴别. ΔE 探测器是气体电离室, 充有气压为 40mb 的 C_4H_{10} 气体; 剩余能量 E 沉积在厚度为 1000μ 的位置灵敏半导体 Si 探测器之中. 在实验室系整个系统的探测范围为 10.4° — 57.4° . 此外, 在 $\theta_{\text{lab}} = 5.8^\circ$ 装有一个半导体束流监测器; 在 $\theta_{\text{lab}} = 0^\circ$ 装有法拉第筒以收集束流电荷.

按两体运动学计算, 取 Q 值的范围为 -10 — -40MeV , 仅对所测能区的能谱的耗散部分进行积分, 逐个事件地对数据进行从实验室系到质心系的转换, 得到的质心系 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物在不同角度的激发函数 (误差棒给出的仅是统计误差) 如图 1 所示 (系统在质心系的角分辨率好于 4°), 呈现出明显的特征性涨落结构. 对不同角度 (这里为质心系 50° — 90° , 间隔 4°) 或者不同元素 (这里是从 $Z = 11$ 到 $Z = 15$) 求和, 激发函数的特征性结构依然存在, 不能被平滑; 不同角度及不同元素之间的互关联系数分别在 0.8 和 0.9 左右.

3 分析与讨论

核反应截面的统计性质通常是由关联函数来表述的, 广泛应用的是相对的能量自关联函数. 对一个固定的出射道, 其定义为

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

这里 ϵ 是能量步长, $\langle \rangle$ 表示对测量能区求算术平均.

如上所述, 不同电荷数以及不同角度的耗散反应产物之间存在着强烈的关联, 它们之间的互关联系数很大, 所以, 激发函数中的振荡结构, 从而能量自关联函数都不会因为不同电荷数或者不同角度的相加而有根本的改变. 作为一个典型例子, 图 2 给出了 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 反应中类 Al 产物 (即对 $Z = 11$ 到 15 的产物求和以改善统计) 在 $\theta_{\text{cm}} = 60^\circ$ 所得到的能量自关联函数 $C(\epsilon)$ 的实验值, 其误差为有限能量范围内的取样误差^[11].

现对能量自关联函数 $C(\epsilon)$ 分析讨论如下:

(1) Lorentzian 型: 根据 T. Ericson 的理论预言^[12], 复合核处于统计平衡状态, 其产物的能量自关联函数 $C(\epsilon)$ 应该呈现 Lorentzian 型, 也就是说满足下面的表达式:

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

其中 $N_{\text{eff}} = 1/C(0)$ 是系统的有效出射道的道数; Γ 是能量相干宽度, 可以从函数 $C(\epsilon)$ 的极大值 $C(0)$ 的半高宽处提取. D. M. Brink 等将 Ericson 理论发展到了对深部非弹性碰撞的分析之中, 得到了形式上类似的表达式^[13]. 我们依此对 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 的实验数据进行拟合而得到的 Lorentzian 曲线示于图 2 之中, 如实线所示. 看得出, 前面的几个实验点完全落在理论曲线上, 从这里依然可以比较合理地提取反应产物的衰变宽度 $\Gamma \approx 150\text{keV}$, 其所对应的复合系统的平均寿命 $\tau \approx 4.1 \times 10^{-21}\text{s}$. 然而, 从图中也明显地看到, 实验得到的能量自关联函数 $C(\epsilon)$ 的形状不再是统计平衡状态中所表现的纯粹的 Lorentzian 型, 而具有明显的准周期性振荡结构.

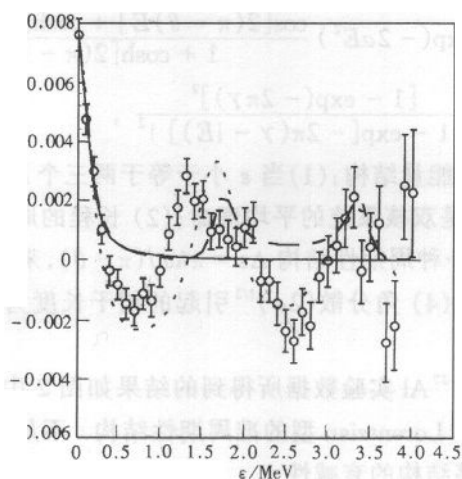


图 2 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应中类 Al 产物的能量自关联函数
 —— Lorentzian 拟合曲线, --- 考虑相干转动的拟合曲线, 考虑量子混沌的拟合曲线.

(2) 相干转动: 重离子耗散碰撞中形成的中间双核系统达不到完全的统计平衡, 意味着不同角动量所对应的 S 矩阵元之间存在关联. 考虑这种关联并对碰撞作平面波近似, 反应截面可以表示为^[14,15]

$$\begin{aligned} \sigma(E, \theta) &= 2\pi \sin\theta |F(E, \theta)|^2, \\ F(E, \theta) &= \sum_l (2l + 1) S_l(E) \exp[i\varphi(l)] P_l(\cos\theta). \end{aligned} \quad (3)$$

取散射振幅为 Regge-pole 型

$$S_l(E) = i [W(l)]^{1/2} \sum_{\mu} \frac{b_{\mu}}{E - [E_{\text{rot}} + E_{\mu}(l)] + i\Gamma/2}, \quad (4)$$

取 l 窗, 平均反应机率 $W(l) = \exp[-(l - L)^2/d^2]$. 其中, $L = (L_{gr} + L_{cr})/2$, L_{gr} 和 L_{cr} 分别是擦边角动量与临界角动量, d 是 l 窗的宽度, E_{rot} 和 $E_{\mu}(l)$ 分别是中间双核系统的转动能与内部激发能. 关键的假设在于 l 窗内不同角动量所对应的分振幅 b_{μ} 的相位是相干的.

对周边碰撞以及随机分布的 b_{μ} , 可得到角动量关联函数

$$\langle S_l(E + \epsilon) S_{l'}^*(E) \rangle = iB [W(l)W(l')]^{1/2} / [E - (l - l') + i\gamma], \quad (5)$$

这里 $B = 2\pi \langle |b_{\mu}|^2 \rangle_{\mu} / \hbar\omega D$, $\gamma = \Gamma/\hbar\omega$, $E = \epsilon/\hbar\omega$.

$\varphi(l)$ 可展开成级数 $\varphi(l) = \varphi(L) + \Phi(L)(l - L) + \frac{1}{2} \Phi(L)(l - L)^2$. 其中, $\Phi(L) = \dot{\varphi}(L)$ 是偏转函数, $\Phi(L)$ 是偏转函数对 l 的导数, 均取 $l = L$.

按照公式(4)和(5), 中间双核系统的能级是转动性的, 在 l 窗内, 一旦能级之间有重叠, 便会产生 pole 型的角动量相干. 相干宽度为 γ , 是衰变总宽度与转动能级间隙的比值, 表征了中间双核系统的演化取决于其平均寿命与转动时间这两者的共同作用. 于是, 能量自关联函数的表达式为

$$C(E, \theta) = \exp(-2aE^2) \frac{\cos[2(\pi - \theta)E] + \cosh[2(\pi - \theta)\gamma]}{1 + \cosh[2(\pi - \theta)\gamma]} \times \frac{[1 - \exp(-2\pi\gamma)]^2}{|1 - \exp[-2\pi(\gamma - iE)]|^2}, \quad (6)$$

其中 $C(E, \theta)$ 包含了 4 种能量结构: (1) 当 ϵ 小于等于两三个 Γ 时, 表现为统计的 Ericson 涨落, $\Gamma = \hbar/\tau$, 这里的 τ 是双核系统的平均寿命; (2) 长程的周期性结构 $\Delta\epsilon = \hbar\omega$, 意味着核的相干转动; (3) 还有一种周期性结构 $\Delta\epsilon = \pi\hbar\omega/(\pi - \theta)$, 来自远边和近边波束的相互作用, 主要表现在小角区; (4) 角分散 $(2a)^{1/2}$ 引起的相干长度为 $\Delta\epsilon = (2a)^{-1/2} \hbar\omega$ 呈指数型单调衰减.

由公式(6)拟合 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 实验数据所得到的结果如图 2 中的点划线所示, 较好地体现了能量自关联函数中非 Lorentzian 型的准周期性结构. 不足之处是不能再现实验点中的负值以及准周期性振荡结构的衰减性.

(3) 量子混沌: 最新的理论发展(有记忆的核反应统计模型)^[16-19] 的主要思想是: 重离子耗散反应所形成的中间双核系统处于远离平衡的状态, 具有非常复杂的运动形态. 具体地讲, 由于对称性的自发破缺, 使双核系统产生了相干转动, 而退相干(decoherence)的过程是非线性的, 是一种量子混沌运动, 用参数宇称与自旋的退相干宽度 β 来表征, 它使相干转动受到了阻尼, 构成了相干转动角速度 $\hbar\omega$ 的虚部, 它还使周期性的结构变得不再规则. 这时, 能量自关联函数的表达式变为

$$C(\epsilon, \theta) = \text{Re}[\exp(2\pi i |\epsilon| / (\hbar\omega - i\beta)) / (1 - \exp(-2\pi(\Gamma - i|\epsilon|) / (\hbar\omega - i\beta)))] \times \frac{(1 - \exp(-2\pi\Gamma/\hbar\omega))^2 (1 - \exp(-4(\pi - \theta)\Gamma/\hbar\omega))}{\sinh(2\pi\Gamma/\hbar\omega) (1 - \exp(-2(\pi - \theta)\Gamma/\hbar\omega))^2}. \quad (7)$$

图 2 中的虚线就是用公式(7)对 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 实验数据的拟合结果, 所取的参数为: $\Gamma = 200\text{keV}$, $\hbar\omega = 1.65\text{MeV}$, $\beta = 130\text{keV}$. 拟合曲线是有结构的, 非完全周期性的(阻尼的), 更好地再现了能量自关联函数中的总体变化趋势.

4 结束语

用有记忆的核反应统计模型分析了 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的激发函数, 再现了能量自关联函数中的总体变化趋势, 是阻尼的相干转动与量子混沌运动的共同作用造成了耗散反应中激发函数的特征性涨落结构的不可平滑. 分析结果表明, 重离子深部非弹性碰撞中所形成的中间双核系统有记忆, 表现为强烈的道-道关联; 系统随时间的演化趋势不是简单的增加无序度, 而是产生比较稳定的局域性结构, 使始终处于远离平衡态的中间双核系统作相干转动; 这种局域性结构随着时间缓慢地弥散, 这是一种量子混沌现象, 它使得相干受到阻尼, 转动不再规则. 概括地说, 双核系统随时间的演化是一个非常复杂的过程, 它可以用 3 个参数所表达的运动的相互作用定量描述, 这 3 个参数是: 能量相干宽度 Γ (对应双核系统的平均寿命), 相干转动的平均角速度 $\hbar\omega$ (反映了 S 矩阵元振幅之间相干所造成的局域化) 以及宇称与自旋的退相干宽度 β (表征了双核系统中的量子混沌运动和转动的阻尼).

参考文献(References)

- 1 De Rosa A, Inghima G, Russo V et al. Phys. Lett., 1985, **B160**:239
- 2 Glaesner A, Dunweber M, Hering W et al. Phys. Lett., 1986, **B169**:153
- 3 Suomijarvi T, Berthier B, Lucas R et al. Phys. Rev., 1987, **C63**:181
- 4 Pappalardo G. Nucl. Phys., 1988, **A488**:395c
- 5 Cardella G, Papa M, Pappalardo G et al. Z. Phys., 1989, **A332**:195
- 6 Papa M, Cardeila G, Di Pietro A et al. Z. Phys., 1995, **A353**:205
- 7 WAND Qi, LI Song-Lin, LU Jun et al. Chin. Phys. Lett., 1993, **10**:656
- 8 Rizzo F, Cardella G, De Rosa A et al. Z. Phys., 1994, **A349**:169
- 9 WAND Qi, LU Jun, XU Hu-Shan et al. Phys. Lett., 1996, **B388**:462
- 10 Berceau I, Andronic A, Duma M et al. Phys. Rev., 1998, **C57**:2359
- 11 Richter A. In: Nuclear Spectroscopy and Reactions, ed. J. Cemy Part B, 1974, 343
- 12 Ericson T. Ann. Phys., 1963, **23**:390
- 13 Brink D M, Dietrick K. Z. Phys., 1987, **A326**:7
- 14 KUN S Y. Phys. Lett., 1991, **B257**:247
- 15 KUN S Y, Weidenmuller H A. In: Proc. Inter. Conf. on Nucl. Reaction Mechanisms, Varena, Italy, June 10, 1991, 259
- 16 KUN S Y. Nucl. Phys., 1995, **A583**:275c
- 17 KUN S Y. Z. Phys., 1997, **A357**:255
- 18 KUN S Y. Z. Phys., 1997, **A357**:271
- 19 KUN S Y. Z. Phys., 1997, **A357**:367

Analysis of the Energy Autocorrelation Functions in Dissipative Heavy Ion Collision of $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}^*$

WANG Qi LI Song-Lin TIAN Wen-Dong LU Jun HU Peng-Yun LUO Yi-Xiao
(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract The excitation functions of the dissipative fragments emitted from the reaction of $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ have been measured in the energy region from 114MeV to 127MeV in steps of 200keV. The detection system covered continuous angles from 10° to 57° in laboratory system. The energy autocorrelation functions of the dissipative fragments have been analyzed by using different approaches, especially using the statistical nuclear reaction model with memory. The results indicate that the intermediate dinuclear system formed in the dissipative process is set in a damped coherent nuclear rotation which causes the nonself-averaging oscillation structure in the excitation functions and originates from a typical quantum chaotic motion.

Key words excitation function, dissipative heavy ion collision, coherent nuclear rotation, quantum chaos

Received 13 June 2000

* Supported by NSFC(19775057), The Chinese Academy of Sciences and the Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionale del Sud, Catania, Italy