

$^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应中间 双核系统的核温度*

王琦 田文栋 李松林 卢俊 胡鹏云 江中和

(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. Figuera¹ A. Musumarra^{1,3}
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 从 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的激发函数中提取能量相干宽度 Γ ,再求出双核系统的核温度 T ,并用相干转动的概念进行拟合与解释.

关键词 耗散反应 截面涨落 核温度 相干转动

1 引言

在耗散反应中,产物的激发函数表现出特征性的涨落结构^[1-6].可以把这种涨落分成两部分,一部分是统计的 Ericson 涨落^[7],具有平衡态的特征,在高激发或者反应道的数目很大时,这种涨落因相互叠加而平滑;另一部分涨落则具有非平衡态的特征^[5],尽管系统处于高激发态,而且反应道的数目也非常大,涨落却依然存在,幅度不减小,结构不消失,到目前为止,这还是一个不解之谜^[8].因此,在低能核物理反应机制研究方面,探讨耗散反应中特征涨落结构的特点及其规律性是一个十分令人感兴趣的课题.特别是针对耗散反应处于非平衡态的特点,理论上引入了角动量相干效应,通过对相干转动的研究,大大加深了人们对耗散反应所形成的中间双核系统的理解与认识.

激发函数的测量把对耗散反应的研究内容从平均性质扩展到了涨落分布,揭示了碰

1998-04-21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

撞系统的统计性质, 提供了一些新的物理信息. 例如, 通过对能量自关联函数的研究可以定出反应产物的能量相干宽度 Γ , 进而确定反应的相互作用时间; 通过时间功率谱可以研究双核系统在时间和空间的演化过程中的 localization 等等.

本文的目的是从 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的能量相干宽度 Γ 来提取中间双核系统的核温度, 并用相干转动的概念对其进行拟合与解释.

2 实验结果

最近在意大利国家南方实验室的串列静电加速器上完成了 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 的实验研究. 束流的人射能量是 114—127 MeV, 能量步长为 200 keV; 靶厚为 $38 \mu\text{g} / \text{cm}^2$; 实验数据按事件逐个获取; 探测系统安排了 3 套 ΔE - E 望远镜. ΔE 探测器是气体电离室, 充有气压为 40 mb 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 $10.4^\circ - 57.4^\circ$, 系统的电荷分辨 $Z / \Delta Z \approx 30$, 位置分辨约为质心系 3° .

按两体运动学计算得到反应 Q 值的范围, 对所测能区的能谱的耗散部分进行积分, 从实验室系到质心系的数据转换按逐个事件进行. 图 1 给出的是在质心系 60° 对 $Z = 11, 12, 13, 14$ 和 15 的耗散反应产物 (这里称之为类 Al 产物) 求和之后的激发函数, 展现出明显的特征涨落结构.

截面的统计性质通常用能量自关联函数表述. 对一个固定的出射道, 其定义为:

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

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

根据对 T. Ericson 理论的重要发展^[9], 可以从函数 $C(\varepsilon)$ 的极大值 $C(0)$ 的半高宽处提取耗散反应中间双核系统的能量相干宽度 Γ . 即当 $\varepsilon \leq (2-3)\Gamma$ 时,

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

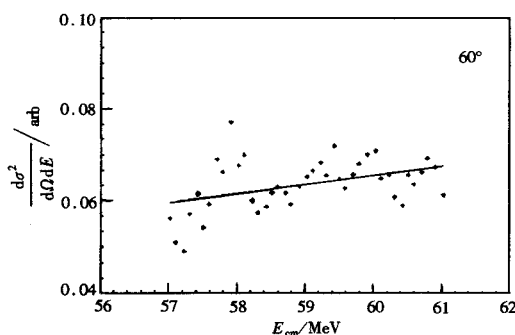


图1 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应类 Al 产物在 $\theta_{\text{cm}} = 60^\circ$ 的激发函数

误差棒表示统计误差, 实线表示按最小二乘法求得的截面平均值.

表1 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应中间双核系统在几个不同角度的核温度

$\theta_{\text{cm}}(^{\circ})$	52	60	72
Γ / keV	190 ± 34	135 ± 24	130 ± 23
$T_{\text{exp}} / \text{MeV}$	1.70	1.81	1.84
$T_{\text{th}} / \text{MeV}$		2.17	
$T_{\text{rot}} / \text{MeV}$	1.71	1.81	1.83

其中 $N_{\text{eff}} = 1 / C(0)$ 是系统的有效出射道的道数. 对 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应, 作为典型事例, 取 $\theta_{\text{cm}} = 52^\circ$ 、 60° 和 72° , 所得的 Γ 值列于表 1 中, 误差为有限能量范围内的取样误差^[10].

3 中间双核系统的核温度

3.1 实验核温度的提取

从衰变的分宽度 Γ , 可以估算激发的中间复合系统的能级密度 $\rho^{[11]}$:

$$\Gamma = \frac{N_{\text{eff}}}{2\pi\rho}, \quad (3)$$

然后, 再依据费米气体模型^[12], 可以求出衰变的中间双核系统的激发能 E^* 及其所对应的核温度 T_{exp} :

$$\rho(E^*) = \frac{6^{1/4}}{12} \frac{g_0}{(g_0 E^*)^{5/4}} \exp \left[2 \left(\frac{\pi^2}{6} g_0 E^* \right)^{1/2} \right], \quad (4)$$

$$T_{\text{exp}}^{-1} = -\frac{5}{4} E^{*-1} + \left(\frac{\pi^2}{6} \frac{g_0}{E^*} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

这里, 近似地取单粒子能级密度 $g_0 \approx A / 25$, 其中的 A 是中间双核系统的质量数. 这样求得的 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应在三个不同出射角度的类 Al 产物的核温度 T_{exp} 的值列于表 1.

3.2 核温度的理论拟合与讨论

在全弛豫条件下, 系统的激发能 E^* 等于质心能 E_{cm} 与反应的基态 Q 值 Q_{gg} 和库仑位垒 V_{coul} 之差:

$$E^* = E_{\text{cm}} - Q_{\text{gg}} - V_{\text{coul}}, \quad (6)$$

于是, 可以估算出中间双核系统所对应的核温度

$$T_{\text{th}} = \left(E^* / \left(\frac{A}{8} \right) \right)^{1/2}. \quad (7)$$

对 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应的类 Al 产物, $T_{\text{th}} = 2.17\text{MeV}$.

计算值与实验结果相比, 有两个问题需要提出讨论: 一是为什么理论值偏高; 二是如何理解实验值与粒子的出射角相关.

(1) 考虑到双核系统的相干转动^[6], 也就是说, 把激发能分成双核系统的转动能和内部激发能两部分, 即 $E^* = E_{\text{rot}} + E_{\text{int}}$, 而转动能

$$E_{\text{rot}} = J(J+1)\hbar^2 / 2I_{\text{rig}}, \quad (8)$$

公式中 I_{rig} 为刚体转动惯量.

以激发能与转动能的差, 即内部激发能 E_{int} 再代入公式(7), 适当调节转动惯量 I_{rig} 的

大小,得到的中间双核系统所对应的核温度可以与实验结果一致.

(2) 耗散反应所形成的中间双核系统处于从非平衡态向平衡态的演化过程之中,其能量相干宽度 Γ 的显著特点之一是与产物的出射角密切相关^[3]. 这里,可以这样来理解,在不同的出射角,双核系统的形变大小不同,总的趋势是随着出射角的增大,形变相应加剧,转动惯量的值也应该有所增加. 为了简单起见,令双核系统的转动惯量 $I = \alpha I_{\text{rig}}$, 将 α 作为可调参数,对 $\theta_{\text{cm}} = 52^\circ, 60^\circ$ 和 72° , 分别取 $\alpha = 1.6, 2.0$ 和 2.1 , 便得到考虑了相干转动之后中间双核系统在不同角度的核温度的理论值 T_{rot} (列于表 1 中), 其结果与实验核温度值 T_{exp} 符合得很好.

4 结束语

激发函数的测量与统计性质的研究提供了确定在重离子耗散碰撞中所形成的中间双核系统的核温度的一种方法. 考虑到在中间双核系统的形成与演化过程中,碰撞的相对运动动能转换成了系统的激发能,而系统的激发能又可以分成相干转动能和内部激发能,从而对提取的核温度给出了比较令人满意的拟合与解释.

参 考 文 献

- 1 De Rosa A et al. Phys. Lett., 1985, **B160**:239—242
- 2 Suomijarvi T et al. Phys. Rev., 1987, **C36**:181—186
- 3 Pappalardo G. Nucl. Phys., 1988, **A488**:395c—408c
- 4 Wang Qi et al. Phys. Lett., 1996, **B388**:462—467
- 5 Glaesher A et al. Nucl. Phys., 1990, **A509**:331—368
- 6 Rizzo F et al. Z. Phys., 1994, **A349**:169—175
- 7 Ericson T. Ann. Phys., 1963, **23**:390—414
- 8 Feshbach H. In: Lemmer R H ed. Proc. Workshop on Multistep Direct Reactions. Singapore: World Scientific, 1992, 223
- 9 Kun S Y. Phys. Lett., 1991, **B257**:247—253
- 10 Richter A. In: Cerny J ed. Nuclear Spectroscopy and Reactions, Part B. New York: Academic, 1974. 343
- 11 Bohr N, Wheeler J. Phys. Rev., 1939, **56**:426—450
- 12 Bohr A, Mottelson B. Nuclear Structure, Benjamin Inc., 1969, **1**:153

Extraction of Nuclear Temperature in $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ Dissipative Collision *

Wang Qi Tian Wendong Li Songlin Lu Jun Hu Pengyun Jiang Zhonghe

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

F. Amorini^{1,3} M. Cabibbo^{1,3} G. Cardella² P. Figure¹ A. Musumarra^{1,3}
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 Energy coherence widths Γ of the dissipative products in the collision $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ are extracted from measurement of the excitation functions. Then, the nuclear temperature T of the intermediate dinuclear system are determined, and discussed by using a concept of coherence rotation.

Key words dissipative reaction, cross section fluctuation, nuclear temperature, coherence rotation

Received 21 April 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