

$^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应中双核系统的转动与形变*

韩建龙^{1,2} 王琦^{1;1)} 董玉川^{1,2} 李松林¹ 段利敏¹ 吴和宇¹ 徐华根^{1,2}
陈若富^{1,2} 徐珊珊¹ 白真^{1,2} 李志常³ 路秀琴³ 赵葵³
周平³ 刘建成³ Sergey Yu Kun^{4,5}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

4 (Centro de Ciencias Fisicas, Campus Morelos UNAM, Cuernavaca, Morales, Mexico)

5 (Nonlinear Physics Group and Department of Theoretical Physics, RSPHysSE, ANU, Canberra, ACT 0200, Australia)

摘要 测量了 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物B, C, N, O, F和Ne的激发函数, 入射束流的能量从110.25MeV到118.75MeV, 能量步长为250keV. 从产物的能量自关联函数中提取了反应中所形成的中间双核系统的转动惯量, 与相粘模型计算的刚体转动惯量相比较, 结果表明形成的双核系统有大的形变.

关键词 激发函数 耗散反应 双核系统 转动惯量 形变

1 引言

重离子耗散反应是介于直接过程和复合核形成之间的一种核反应机制. 在重离子耗散反应中, 形成了一个转动的中间双核系统, 通常用角速度或者转动惯量来描述双核系统的转动.

从实验的角度来看, 在重离子耗散反应中, 便于直接观测的物理量主要有带电粒子产物的电荷数、质量数、能量以及出射角度, 然后构成产物的能谱和角分布, 进行物理问题的分析. 而转动是一个模型依赖型的间接结果, 尽管各种模型都认为转动是重离子耗散反应中所形成的中间双核系统的一个基本运动形态, 但是, 不同模型对于转动机制的理解以及转动过程的描述并不相同, 这就有待于实验的进一步检验以及理论自身的不断完善.

近年来开展的耗散反应产物激发函数的测量与研究中^[1-6], 通过分析反应产物的统计性质, 用能量自关联函数可以得到双核系统的转动惯量, 提供了研究双核系统转动性质的一种新方法. 本文报道 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物激发函数测量的实验结果, 用能量自关

联函数方法提取反应中所形成的中间双核系统的转动惯量, 讨论双核系统的转动与形变之间的关系.

2 实验及其结果

实验是在北京中国原子能科学研究院的HI-13串列静电加速器国家实验室完成的. 入射束流 ^{19}F 的能量从110.25MeV到118.75MeV, 能量变化的步长为250keV; 同位素靶 ^{27}Al 的厚度为 $60\mu\text{g}/\text{cm}^2$; 3套由气体电离室与半导体组成的(ΔE - E)望远镜分别位于实验室系 57° , 31° 和 -29° , 用来鉴别反应产物的电荷数 Z , 测量反应产物的激发函数. 其中, 电离室充以P10气体, 气压为100mbar, 有效长度为6cm, 作为 ΔE 探测器; 产物的剩余能量 E 沉积在Si(Au)面垒型位置灵敏半导体探测器中, 其有效面积为 $8\text{mm} \times 45\text{mm}$, 厚度为 $500\mu\text{m}$. 在 $\theta_{\text{lab}}=0^\circ$ 方向安排有法拉第筒收集束流电荷计数. 在与束流方向对称的两侧 $\theta_{\text{lab}} = \pm 7.5^\circ$, 分别装有一个半导体探测器监测束流方向.

图1、图2和图3是实验中分别在 $\theta_{\text{lab}} = 57^\circ$, 31° 和 -29° 测得的110.25MeV到118.75MeV的 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$

2005 - 09 - 30 收稿

*国家自然科学基金(10475101, 10175083), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)和科技部重大项目前期研究专项基金(2001CCB01200)资助

1) E-mail: wangqi@impcas.ac.cn

耗散反应的类弹产物 B, C, N, O, F 和 Ne 的激发函数.

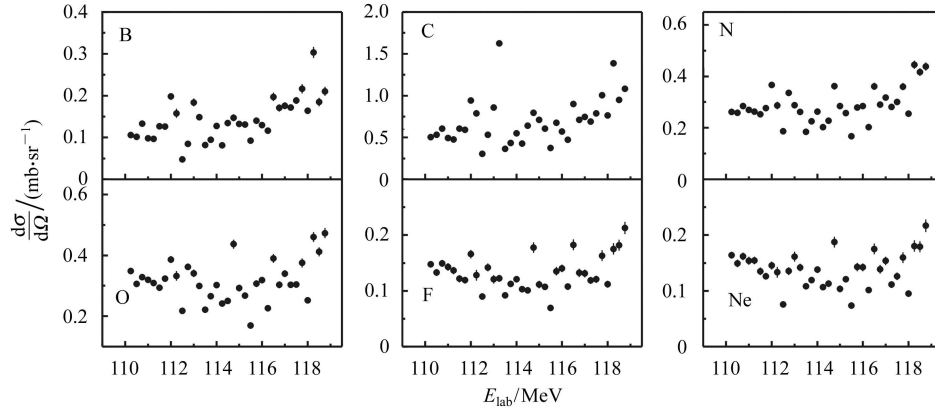


图 1 $\theta_{\text{lab}} = 57^\circ$ 出射的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应类弹产物的激发函数

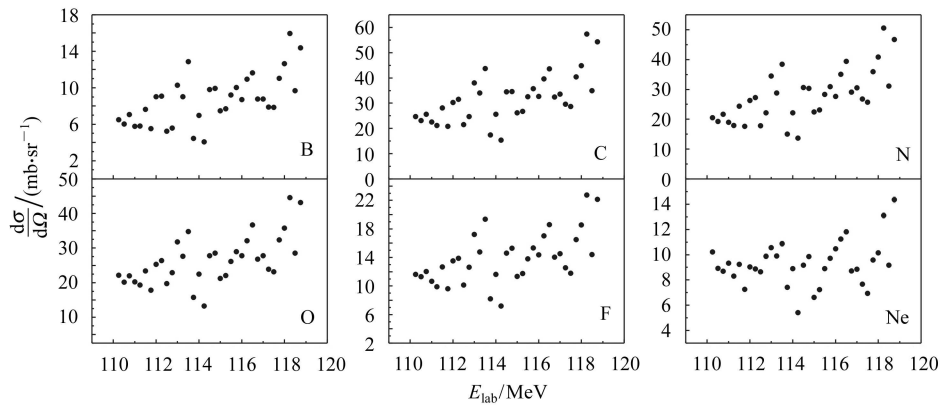


图 2 $\theta_{\text{lab}} = 31^\circ$ 出射的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应类弹产物的激发函数

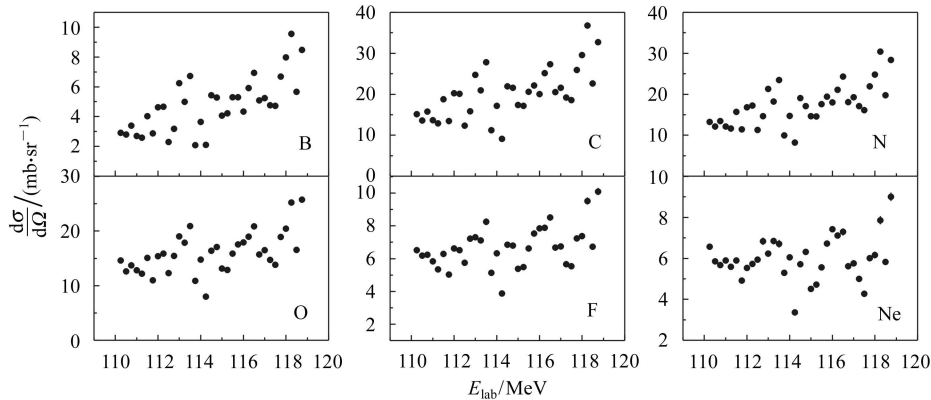


图 3 $\theta_{\text{lab}} = -29^\circ$ 出射的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应类弹产物的激发函数

按照能量自关联函数 $C(\varepsilon)$ 的定义:

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

其中 ε 是测量激发函数的两个能量点之间的能量之差, $\langle \rangle$ 表示对所测量能区反应产物的截面 σ 求算术平均.

以 $\theta_{\text{lab}}=31^\circ$ 为例, 按照表达式(1)作出的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物 B, C, N, O, F 和 Ne 的能量自关联函数如图 4 中方实心点所示.

根据 Ericson 的理论预言^[7], 复合核反应产物的能量自关联函数应该呈现为 Lorentz 型, 满足表达式

$$C(\varepsilon) = C(0) \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + \varepsilon^2}, \quad (2)$$

这里的 $C(0)$ 对应于函数 $C(\varepsilon)$ 的极大值. 从 $C(0)$ 的半高宽处可以提取反应产物的衰变宽度 Γ . 图 4 中的实线就是 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 反应产物的 Lorentz 拟合曲线, 提取的各反应产物的衰变宽度 Γ 的值在图 4 中已经标明.

Ericson理论是研究激发函数涨落的基础,提出于20世纪60年代初期,针对的是处于平衡状态的复合核的衰变.重离子耗散反应机制确立于20世纪70年代之后,耗散反应产物的能谱、角分布、平均寿命、衰变方式等特点都不同于复合核.正如图4所示,耗散反应产物的能量自关联函数也不再符合复合核的Lorentz型曲线,而是存在着一种准周期性的振荡结构.当考虑了耗散反应中所形成的双核系统的转动之后,能量

自关联函数的表达式发展为^[8]:

$$C(\epsilon, \theta) = \exp(-2a\epsilon^2) \times \frac{\cos[2(\pi - \theta)\epsilon] + \cosh[2(\pi - \theta)\gamma]}{1 + \cosh[2(\pi - \theta)\gamma]} \times \frac{[1 - \exp(-2\pi\gamma)]^2}{[1 - \exp[-2\pi(\gamma - i\epsilon)]]^2}, \quad (3)$$

这里的 $\epsilon = \epsilon/\hbar\omega$, $\gamma = \Gamma/\hbar\omega$, $(2a)^{1/2}$ 是反应系统的量子角分散.

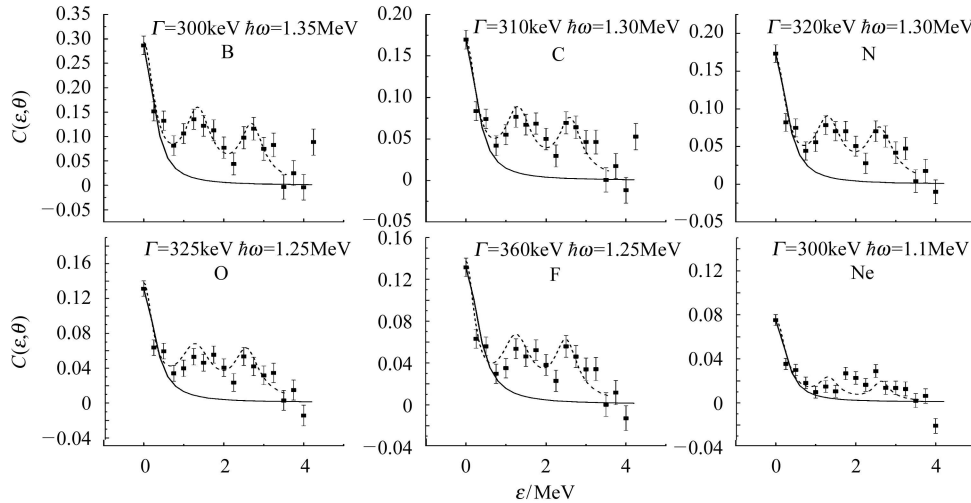


图4 $\theta_{\text{lab}} = +31^\circ$ 出射的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物B, C, N, O, F和Ne的能量自关联函数

■由公式(1)计算得到的实验结果, —由公式(2)得到的理论拟合结果, - - - -由公式(3)得到的理论拟合结果.

用公式(3)拟合 $\theta_{\text{lab}} = 31^\circ$ 的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 的实验结果如图4中的虚线所示,较好地再现了耗散反应产物B, C, N, O, F和Ne的能量自关联函数的形状及振荡结构.这里,公式(3)和公式(2)一样,都能够给出反应产物的衰变宽度 Γ ,而且两个公式给出的结果是一致的.公式(3)的发展在于不但可以给出反应产物的衰变宽度 Γ ,同时还能够从中提取耗散反应产物所对应的双核系统的转动角速度 ω .如图4所标明,在 $\theta_{\text{lab}} = 31^\circ$ 出射的114MeV的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物B, C, N, O, F和Ne所对应的双核系统的转动角速度的值 $\hbar\omega$ 在1.30MeV左右.由双核系统的转动角速度,在一定模型下可以得到系统的转动惯量.在114MeV的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 反应中,擦边角动量 $l_{\text{gr}} = 47\hbar$,临界角动量 $l_{\text{cr}} = 36\hbar$,取耗散反应产物的平均角动量 $l = (l_{\text{cr}} + l_{\text{gr}})/2$,相应的转动惯量值 $J_{\text{exp}} = l/\omega = 14.6 \times 10^{-42}\text{MeV}\cdot\text{s}^2$.

3 讨论

理论计算核反应中所形成的复合系统的转动惯量常用的有滚动模型和粘着模型^[9].对低能重离子碰撞,粘着模型的计算已经成功地拟合了许多实验结果^[10].

粘着模型认为,双核系统是由两个球形核完全粘在一起的一个转动的刚体.这时,整个刚体绕 z 轴的转动惯量 J 等于三项转动惯量 J_1 , J_2 及 J_c 之和, J_1 和 J_2 分别代表每个球形核绕穿过自身球心轴作转动的转动惯量, J_c 是这两个球形核的质量集中在整个转动刚体的球心上并围绕 z 轴转动的转动惯量.即:

$$J = J_1 + J_2 + J_c, \quad (4)$$

$$J = 1.044 \left\{ \frac{2}{5} (A_1^{5/3} + A_2^{5/3}) + [A_1 A_2 / (A_1 + A_2)] \times (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})^2 \right\} r_0^2 \times 10^{-44} \text{MeV}\cdot\text{s}^2, \quad (5)$$

其中 A_1 和 A_2 分别是两个粘着在一起的核的质量数,通常取参数 $r_0 = 1.30\text{fm}$ ^[10].

依据公式(5),在114MeV的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 反应中,以耗散反应产物F为例,其双核系统所对应的系统的转动惯量的理论计算值 $J_{\text{theo}} = 8.95 \times 10^{-42}\text{MeV}\cdot\text{s}^2$.

显然,转动惯量的实验结果 $J_{\text{exp}} = 14.6 \times 10^{-42}\text{MeV}\cdot\text{s}^2$ 明显地大于转动惯量的理论计算值 $J_{\text{theo}} = 8.95 \times 10^{-42}\text{MeV}\cdot\text{s}^2$.为考虑这种差别,可以在理论计算中引进核的形变.最简单的情况是只考虑四极形变,假定形变中核的体积保持不变,把形变原

子核的表面按球谐函数展开, 求其四极形变参数 β . 对于轴对称的椭球有:

$$R_x = R_y = R_0 \left(1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \beta \right), \quad (6)$$

$$R_z = R_0 \left(1 + \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \beta \right), \quad (7)$$

其中 R_0 为不考虑形变时球形刚体的半径, R_z 为仅考虑四极形变后对称的椭球的长轴半径, $R_x = R_y$ 为对称的椭球的短轴半径. 用公式(6)和(7)拟合 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应的实验结果, 同样取球形刚体的半径参数 $r_0 = 1.30\text{fm}$, 对产物F所对应的复合系统, 考虑形变后, 椭球的长轴半径 $R_z = 1.26R_0$, 短轴半径 $R_x = R_y = 0.86R_0$ 时, 四极形变参数 $\beta = 0.43$, 系统转动惯量的理论计算值 $J_{\text{theo}} = 14.4 \times 10^{-42}\text{MeV}\cdot\text{s}^2$, 能够

很好地拟合实验结果.

4 结论

114MeV的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应类弹产物B, C, N, O, F和Ne的能量自关联函数的分析表明, 当把耗散反应中所形成的双核系统看作是两个没有形变的球形核相粘的转动刚体时, 转动惯量的理论计算值明显地小于转动惯量的实验结果; 一旦简单地考虑到核的四极形变, 转动惯量的理论计算值就能够很好地符合实验结果. 对于114MeV的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物来说, 四极形变参数 β 在0.43左右.

实验结果表明, 耗散反应过程中生成的中间复合系统存在核的形变.

参考文献(References)

- 1 De Rosa A, Inghima G, Russo V et al. Phys. Lett., 1985, **B160**: 239—242
- 2 Suomijarvi T, Berthier B, Lucas R et al. Phys. Rev., 1987, **C36**: 181—186
- 3 WANG Qi, LU Jun, XU Hu-Shan et al. Phys. Lett., 1996, **B388**: 462—467
- 4 Papa M, Amorini A, Cardella G et al. Phys. Rev., 2000, **C61**: 044614-1-16
- 5 Kun S Y. Z. Phys., 1997, **A357**: 255—269;271—281;367—375
- 6 DONG Yu-Chuan, WANG Qi, LI Song-Lin et al. HEP & NP, 2005, **29**(2): 147—151 (in Chinese)
(董玉川, 王琦, 李松林等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(2): 147—151)
- 7 Ericson T. Ann. Phys., 1963, **23**: 390—414
- 8 Kun S Y. Phys. Lett., 1991, **B257**: 247—253
- 9 Reiner Bass. Nuclear Reactions with Heavy Ions. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1980, 259
- 10 Abbondanno Ugo. Phys. Rev., 1991, **43**: 1484—1486

Rotation and Deformation of the Dinuclear System Formed in Dissipative Reaction of $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ *

HAN Jian-Long^{1,2} WANG Qi^{1;1)} DONG Yu-Chuan^{1,2} LI Song-Lin¹ DUAN Li-Min¹ WU He-Yu¹
XU Hua-Gen^{1,2} CHEN Ruo-Fu^{1,2} XU Hu-Shan¹ BAI Zhen^{1,2} LI Zhi-Chang³ LU Xiu-Qin³

ZHAO Kui³ ZHOU Ping³ LIU Jian-Cheng³ Sergey Yu Kun^{4,5}

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

2 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

4 (Centro de Ciencias Fisicas, Campus Morelos UNAM, Cuernavaca, Morales, Mexico)

5 (Nonlinear Physics Group and Department of Theoretical Physics, RSPHYSSE, ANU, Canberra, ACT 0200, Australia)

Abstract Excitation functions of the reaction products B, C, N, O, F and Ne emitted from the dissipative reaction of $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ have been measured at incident energies from 110.25MeV to 118.75MeV in steps of 250keV. The moments of inertia of the intermediate dinuclear system formed in the reaction are extracted from the energy autocorrelation functions of the products. Comparing the moment of inertia extracted from the experimental data with the calculated one by using the sticking limit, it indicates that the formed dinuclear system has a large deformation in the reaction process.

Key words excitation function, dissipative reaction, intermediate dinuclear system, moment of inertia, deformation

Received 30 September 2005

*Supported by NSFC (10475101,10175083), Major State Research Development Program (G2000077400) and National Key Program for Basic Research, Ministry of Science and Technology (2001CCB01200)

1) E-mail: wangqi@impcas.ac.cn