

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

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 110.25 MeV 到 118.75 MeV, 能量步长为 250 keV. 用能量自关联函数方法从激发函数中提取了各反应产物的平均衰变宽度, 利用同时考虑反应中所形成的中间双核系统的转动特性和衰变特性而发展了的 Ericson 核反应统计理论, 讨论了 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应中双核系统随时间的演化过程.

关键词 激发函数 耗散反应 双核系统 相干宽度 相干转动

1 引言

重离子深度非弹性碰撞亦称耗散反应, 是介于直接过程和复合核形成之间的一种核反应机制. 其物理图像是: 两核相撞, 相互作用, 形成一个复合的中间双核系统. 碰撞过程中, 相对运动动能转换为系统的内部激发能, 轨道角动量转换为系统的内禀自旋. 这是一个耗散过程, 是系统中的各种物理量, 比如能量、电荷、角动量、同位旋、质量等经历转移、交换和弛豫的过程. 期间, 某些自由度会因为干涉而形成一定的结构. 最后, 当整个系统还达不到完全的统计平衡时, 分裂成类弹碎片和类靶碎片. 中间双核系统随时间而演化的基本运动形态是衰变和转动, 通常用双核系统的角速度($\hbar\omega$)描述其转动过程, 用平均衰变宽度(Γ)描述双核系统的衰变过程.

近 20 多年来开展的耗散反应产物激发函数的测量与研究中^[1-5], 通过反应产物的统计性质, 提供了确定双核系统的平均衰变宽度和转动角速度的一种新方法, 促进了核反应统计理论的发展, 引起了人们的关注.

本文报道 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物激发函数的实验结果, 用能量自关联函数方法提取这些反应产物的平均衰变宽度, 并讨论反应中所形成的中间双核系统的转动特性.

2 实验及其结果

实验是在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 $^{19}\text{F}^{8+}$ 的能量从 110.25 MeV 到 118.75 MeV, 能量变化的步长为 250 keV; 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 100 mb, 有效长度为 6 cm, 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. 整个实验

2005 - 03 - 24 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

中探测系统的安排布局及其所达到的性能指标请参阅文献 [6, 7].

图 1, 2 和 3 是实验中分别在 $\theta_{\text{lab}} = 57^\circ, 31^\circ$ 和 -29° 测得的 110.25 MeV 到 118.75 MeV 的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物 B, C, N, O, F 和 Ne 的激发函数. 能量自关

联函数 $C(\varepsilon)$ 的定义是

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

其中 ε 是测量激发函数两个能量点的能量差, $\langle \rangle$ 表示对所测量能区反应产物的截面(σ)求算术平均.

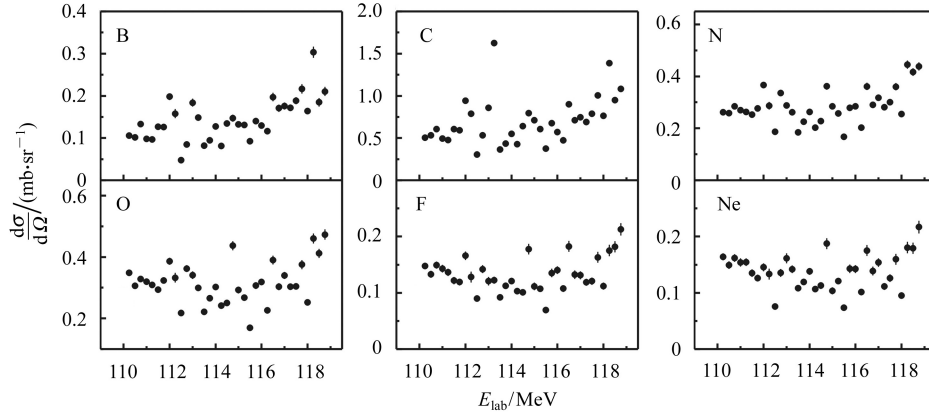


图 1 $\theta_{\text{lab}} = +57^\circ$ 出射的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物($Z = 5-10$)的激发函数

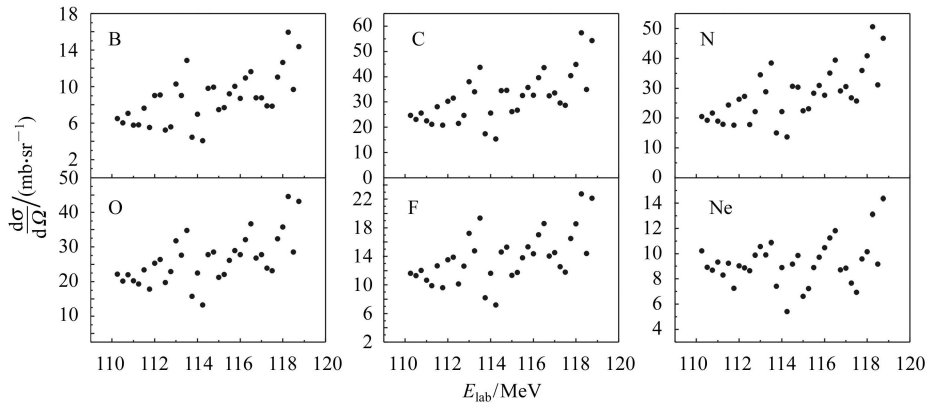


图 2 $\theta_{\text{lab}} = +31^\circ$ 出射的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物($Z = 5-10$)的激发函数

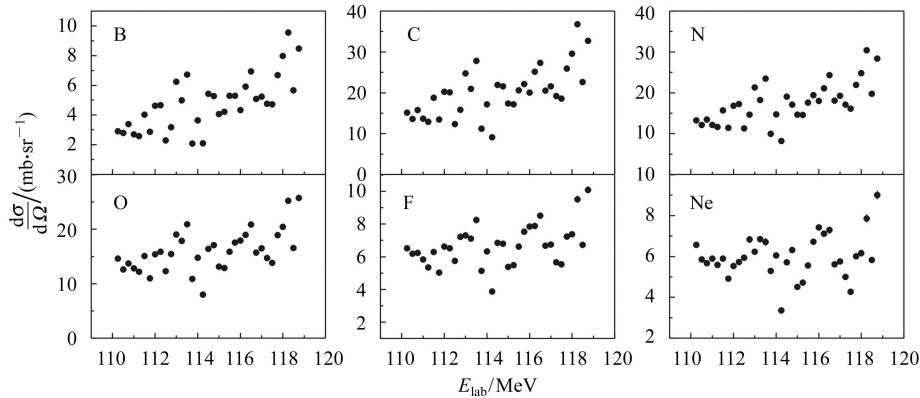


图 3 $\theta_{\text{lab}} = -29^\circ$ 出射的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物($Z = 5-10$)的激发函数

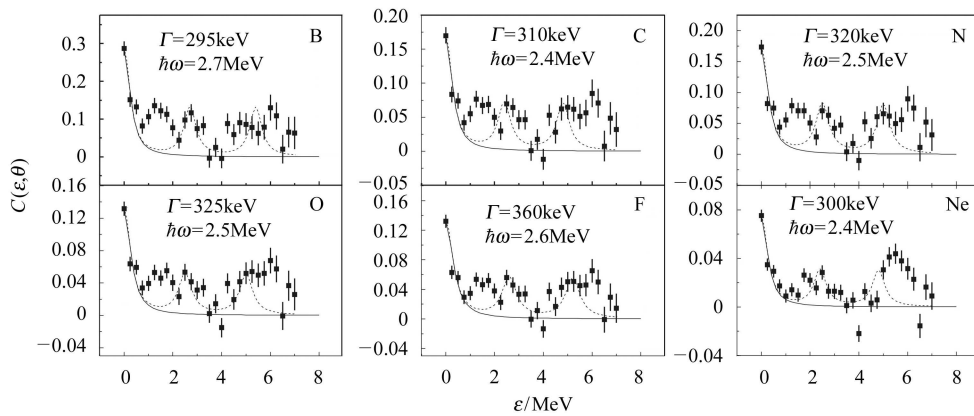


图 4 $\theta_{\text{lab}} = +31^\circ$ 出射的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物 ($Z=5-10$) 的能量自关联函数

■ 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.

按照定义, 做出 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物 B, C, N, O, F 和 Ne 的能量自关联函数, 如图 4 所示.

根据 Ericson 的理论预言^[8], 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

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

这里的 $C(0)$ 对应于函数 $C(\varepsilon)$ 的极大值, 能量相干宽度 Γ 就是产物的衰变宽度, 可以从 $C(0)$ 的半高宽处提取.

表 1 列出了用 Lorentz 曲线拟合的 $\theta_{\text{lab}} = 57^\circ, 31^\circ$ 和 -29° 的各种 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的衰变宽度 Γ 值.

表 1 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的衰变宽度

Z	Γ/keV		
	$\theta_{\text{lab}} = +57^\circ$	$\theta_{\text{lab}} = +31^\circ$	$\theta_{\text{lab}} = -29^\circ$
5	140	295	300
6	150	310	320
7	155	320	330
8	165	325	350
9	180	360	400
10	170	300	360

3 讨论

以产物 F 元素为例, 下面用几种不同的方法来讨论双核系统的转动特性.

1) 在重离子深度非弹性碰撞研究的初期, 为了描述反应中所形成的中间双核系统的转动, 通常都简单地假设双核系统是一个转动的刚体. 如果取刚体的转动惯量 $I_{\text{rig}} = \mu R^2$, 刚体的转动角速度 $\omega_{\text{rig}} = \hbar l_{\text{gr}} / I_{\text{rig}}$, 其中, 系统的折合质量 $\mu = \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2}$. 对于 114 MeV 的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 反应, 系统较轻, 取相互作用半径 $R = 1.36(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) + 0.5$, 擦边角动量

$l_{\text{gr}} = 47\hbar$, 可求得作为刚体的双核系统的转动角速度 $\omega = 2.60 \text{ MeV}/\hbar$.

2) 刚体假设描述了双核系统的转动性质, 但模型过于简化. 它认为双核系统的衰变宽度 Γ 是一个常量, 不随散射角度 θ 而变, 这是不符合实验事实的.

表 1 列出的是从激发函数测量实验提取的不同探测角度 θ_{lab} 的 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的衰变宽度. 显然, 双核系统的衰变过程与转动相关, 可以假定把 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 反应中所形成的双核系统的转动看作是一个匀速转动.

匀速转动的角速度 $\omega = \Delta\theta/\Delta\tau$, 而反应产物的平均寿命 τ 与衰变宽度 Γ 的关系是 $\tau = \hbar/\Gamma$, 所以, $\hbar\omega = \Delta\theta / \left(\frac{1}{\Gamma_1} - \frac{1}{\Gamma_2} \right)$, 于是, 从表 1 给出的 $\Gamma-\theta$ 实验数据容易得到产物 F 所对应的双核系统的转动角速度 $\omega = 2.5 \text{ MeV}/\hbar$.

3) 20 世纪 60 年代初提出的 Ericson 理论^[8] 是研究激发函数涨落的基础, 该理论针对处于平衡状态的复合核, 能给出复合系统的平均衰变宽度 Γ , 但是没有考虑 Γ 与复合系统的转动间的关联. 若在耗散反应产物的能量自关联函数中, 同时考虑了双核系统的转动和衰变, 能量自关联函数的表达式为^[9]

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

其中 $\varepsilon = \varepsilon/\hbar\omega$, $\gamma = \Gamma/\hbar\omega$, $(2a)^{1/2}$ 是反应系统的量子角分散. 以 $\theta_{\text{lab}} = 31^\circ$ 的数据为例, 用这个思想拟合 $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ 的实验结果, 如图 4 中的虚线所示, 较好地同

时给出了耗散反应产物 B, C, N, O, F 和 Ne 的平均衰变宽度 Γ 和相干转动角速度 $\hbar\omega$ 的值.

4 结束语

对重离子深度非弹性碰撞的研究已经有 30 多年的历史, 碰撞中所形成的中间双核系统的转动特性的确立发展了 Ericson 的核反应统计理论. 最初, 中间复合系统被看作是一个简单的转动刚体, 与衰变没有联系; 之后, 根据耗散反应激发函数测量的实验事实, 把

中间复合系统看作是一个平均衰变宽度随其出射角度而均匀变化的转动的衰变系统, 从形式上把转动和衰变联系起来, 但是依然不能指出双核体系转动与其衰变宽度间相关的物理根源; 进而发展到把中间复合系统看作是同时经历衰变和相干转动这样两种作用的一个随时间而演化的双核系统, 并指出“相干转动”实际上是一种周期性的时间-空间的局域性变化^[9], 较好地解释了实验结果, 加深了人们对中间双核系统的转动特性的认识, 加深了人们对重离子耗散反应机制的认识.

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 LI Song-Lin, WANG Qi, DONG Yu-Chuan et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2004, **28**(10): 1090—1093(in Chinese)
(李松林, 王琦, 董玉川等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(10): 1090—1093)
- 7 DONG Yu-Chuan, WANG Qi, LI Song-Lin et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 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)
- 8 Ericson T. Ann. Phys., 1963, **23**: 390—414
- 9 KUN S Y. Phys. Lett., 1991, **B257**: 247—253

Rotation and Decay 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, RSPPhysSE, ANU, Canberra, ACT 0200, Australia)

Abstract Excitation functions of the reaction products B, C, N, O, F and Ne in the dissipative heavy ion collision of $^{19}\text{F}+^{27}\text{Al}$ have been measured at incident energies from 110.25MeV to 118.75MeV in step of 250keV. The energy coherent widths Γ of the products are extracted by using the energy autocorrelation functions. Taking into account the properties of both the rotation and decay in an intermediate dinuclear system formed in the reaction, the Ericson statistical theory in nuclear reaction has been developed and the evolution process of the dinuclear system is discussed.

Key words excitation function, dissipative collision, dinuclear system, coherent width, coherent rotation

Received 24 March 2005

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

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