

$^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应的相互作用时间*

田文栋 王琦 李松林 董玉川 郭忠言
詹文龙 肖国青

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

李志常 路秀琴 赵葵 符长波 刘建成
姜华 胡桂青

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 测量了 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物的激发函数与角分布. 从角分布的斜率提取的该反应系统的平均寿命在对称性较大的入射系统中反映了系统中耗散产物的特征时间; 通过能量自关联函数方法从激发函数提取的反应时间不论在对称的还是非对称的入射系统中都反映了耗散产物的特征时间. 能量自关联函数还可以给出双核系统的转动角速度以及表征转动阻尼的退相干宽度, 更好地描述双核系统随时间的整个演化过程.

关键词 耗散反应 反应时间 角分布 能量自关联函数 阻尼转动

1 引言

重离子耗散反应是介于直接反应过程和复合核形成之间的一种反应机制, 已经得到深入的研究. 这一反应基本上是由两体过程, 是从非平衡态向平衡态过渡的弛豫过程, 反应中形成的双核系统存在着对入射道的记忆, 其产物的角分布在擦边角附近成峰或者在前后角区明显地呈现出两种不同的斜率. 反应中相互作用时间的确定, 一直是人们感兴趣的研究课题. 通常采用的方法是借助一定的理论近似, 从分析反应产物的能谱、角分布、电荷分布等提取反应的特征时间. 用角分布方法确定耗散反应产物的平均寿命直接体现了反应的耗散特性, 可以反映出耗散过程的快慢, 但存在着一定的局限性. 近年来通过对耗散反应激发函数的涨落研究, 用计算激发函数的能量自关联函数可以得到双核系统的反应时间. 本文讨论了由角分布的斜率提取 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物的平均寿命的方法, 描述了分析激发函数的能量自关联函数得到的双核系统随时间的演化过程, 并对这两种确定核反应特征时间的方法进行了比较.

2001-04-02 收稿

* 国家自然科学基金(19775057, 19804012)及国家重点基础研究发展规划(G20000774001)资助

2 实验描述

耗散反应 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 的实验是在中国原子能科学研究所的 HI-13 串列静电加速器上完成的. 实验的目的是测量 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物激发函数的涨落的重复性和角分布. 束流为 $^{19}\text{F}^{8+}$, 入射能量从 98 到 108 MeV, 能量步长为 250 keV, 使用了两块靶子, 靶厚分别为 70 和 71 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. 在两个能量点 $E_{\text{lab}} = 100\text{MeV}$ 和 $E_{\text{lab}} = 105\text{MeV}$ 处测量了反应产物的角分布.

实验中安排了 3 套 ΔE - E 望远镜 (T1, T2, T3), ΔE 探测器是气体电离室, 充有气压约为 103 mb 的 P10 气体, 剩余能量沉积在厚度为 1000 μm 的 E 半导体探测器中, 其中两个 E 探测器为位置灵敏半导体探测器. 在 $\theta_{\text{lab}} = \pm 12.5^\circ$ 装有两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. 在测量角分布的过程中, 通过转动 Q3D 靶室把 T1 和 T2 探测器放置到不同的角度, 来测量耗散反应的角分布.

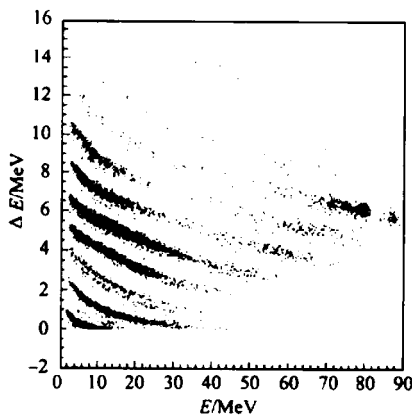


图 1 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应 ΔE - E 散点图
($E_{\text{lab}} = 103\text{MeV}$, $\theta_{\text{lab}} = 53^\circ$)

图 1 是典型的 (ΔE - E) 散点图. 图中, 入射能量 $E_{\text{lab}} = 103\text{MeV}$, 探测角度 $\theta_{\text{lab}} = 53^\circ$, 整个系统的电荷分辨 $Z/\Delta Z \approx 30$, 感兴趣的类弹碎片可以被非常清楚地鉴别.

对反应事件进行逐个获取, 并通过两体反应运动学把实验室系中的反应事件转化到质心系中, 对所测能量点的能谱的耗散部分积分而得到耗散反应产物的角分布和激发函数. 图 2 给出了耗散反应产物 N 的角分布, 具有明显的前角成峰的形状; 图 3 是耗散反应产物 N 在 $\theta_{\text{lab}} = 53^\circ$ 的激发函数, 具有不可平滑的涨落结构. 图中的误差仅为统计误差.

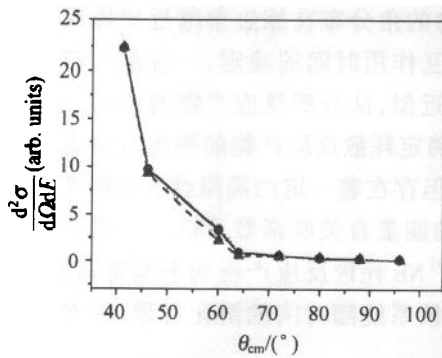


图 2 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物 N 的角分布
—●— 100 MeV, ---▲--- 105 MeV.

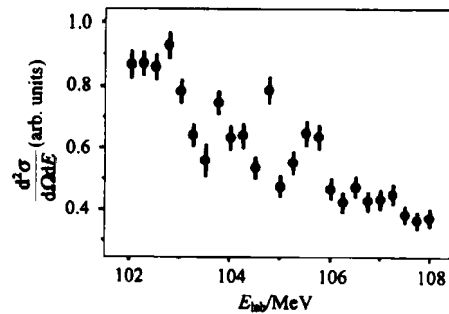


图 3 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物 N 在 $\theta_{\text{lab}} = 53^\circ$ 的激发函数

3 反应的相互作用时间

3.1 从角分布提取双核系统的平均寿命

在耗散反应的经典图像中,寿命为 τ 的双核系统反应产物的角分布可以表达为

$$\langle \sigma(E, \theta) \rangle_E = \text{const} [\exp(-\theta/\omega\tau) + \exp(-(-2\pi - \theta)/\omega\tau)], \quad (1)$$

这里 τ 是衰变的双核系统的平均寿命. 对于前后角区有两组不同斜率的情况,实验数据可以用两个不同寿命 τ_1 和 τ_2 的线性组合拟合得到^[1,2],表示为

$$\langle \sigma(E, \theta) \rangle_E = k_1 \langle \sigma(E, \theta) \rangle_E |_{\tau=\tau_1} + k_2 \langle \sigma(E, \theta) \rangle_E |_{\tau=\tau_2}, \quad (2)$$

调节 k_1 和 k_2 得到最佳拟合.

意大利 Pappalardo 等人在研究耗散反应激发函数涨落的部分能级重叠模型中也提出耗散产物的角分布可以用快慢两种成分来表示^[3-5].

由公式(2)拟合图2中的实验数据,图4给出了入射能是 $E_{\text{lab}} = 100\text{MeV}$ 时的拟合结果,图中虚线和点划线分别表示成分 τ_1 和 τ_2 ,实线是两种成分线性组合的结果. 其中 $k_1 = 21$, $k_2 = 2$, $\hbar\omega = 1.3\text{MeV}$, $\tau_1 = 5.06 \times 10^{-23}\text{s}$, $\tau_2 = 18.3 \times 10^{-23}\text{s}$.

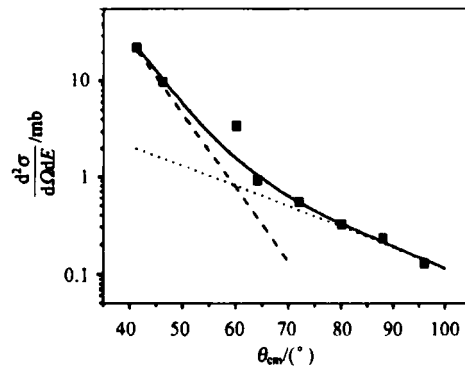


图4 ¹⁹F + ⁹³Nb 耗散反应产物 N 角分布的理论拟合

3.2 激发函数测量与双核系统随时间的演化过程

激发函数测量中涨落的研究,给我们提供了另外一种提取反应时间的方法. 理论分析指出^[6-9],耗散反应中所形成的双核系统一直处于非平衡状态,始终达不到完全的统计平衡;由于对称性的自发破缺而使双核系统产生相干转动,破缺的对称性的恢复趋势又构成对相干转动的阻尼;衰变、转动、阻尼 3 种基本运动形态的复杂相互作用共同贯穿于双核系统随时间演化的整个过程中,描述这个过程需要 3 个时间参量:双核系统的平均衰变宽度 Γ (平均寿命 τ),系统的转动角速度 $\hbar\omega$ 以及表征对相干转动起阻尼作用的系统的宇称和自旋的退相干宽度 β . 通过对耗散反应产物激发函数的测量,分析其能量自关联函数,可以提取出反应中双核系统的 Γ , $\hbar\omega$ 和 β .

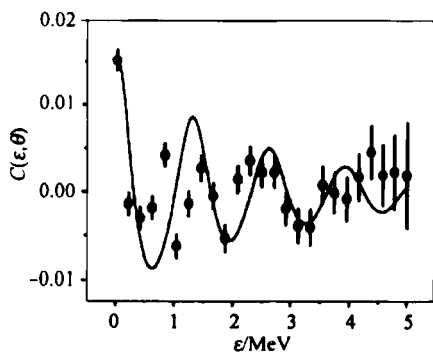


图5 ¹⁹F + ⁹³Nb 耗散反应产物 N 在实验室系 53° 的能量自关联函数及理论拟合结果 (实线)

● 实验结果, — 理论拟合结果.

图5给出了¹⁹F + ⁹³Nb 耗散反应产物 N 在实验室

系 53° 的能量自关联函数, 误差为取样误差^[10]. 理论拟合所用的能量自关联函数 $C(\epsilon, \theta)$ 的表达式为^[7-9]

$$C(\epsilon, \theta) \propto \operatorname{Re} \left[\exp \left[\frac{2\pi i |\epsilon| / (\hbar\omega - i\beta)}{1 - \exp(2\pi(i|\epsilon| - \Gamma) / (\hbar\omega - i\beta))} \right] \right], \quad (3)$$

这里 ϵ 是能量步长, θ 是出射粒子的探测角度, 参数 $\Gamma = 360 \text{keV}$ ($\tau \approx 1.8 \times 10^{-21} \text{s}$), $\hbar\omega = 1.3 \text{MeV}$, $\beta = 100 \text{keV}$.

4 讨论

对比从上面两种方法提取的耗散反应产物的相互作用时间可以看出存在很大的差别. 用角分布的斜率得到的反应系统的平均寿命比用能量自关联函数方法得到的值小一个数量级甚至更大. 为什么会存在这么大的差别呢? 哪一种方法得到的反应时间更可取呢? 表 1 列出了几个实验中用这两种方法提取的耗散产物的反应时间.

表 1 用角分布方法和能量自关联函数方法提取的耗散反应系统的平均寿命

反应系统	角分布方法		能量自关联函数方法
	$\tau_1/10^{-23} \text{s}$	$\tau_2/10^{-23} \text{s}$	$\tau/10^{-23} \text{s}$
$^{19}\text{F} + ^{89}\text{Nb}^{[11]}$	5.06	18.3	180
$^{19}\text{F} + ^{89}\text{Y}^{[1]}$	6	30	330
$^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}^{[4]}$	13	658	658
$^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}^{[12]}$	4.8	156	300

能量自关联函数方法的基础是研究耗散反应激发函数的涨落过程, 通过计算非平衡的耗散产物在不同出射道之间的关联而得到系统的平均寿命, 其结果基本上都在 10^{-21}s 数量级^[1,4,12-19]. 这同经典理论的估算是一致的, 可认为真正反映了耗散产物的反应时间.

耗散反应可以认为是一个多步过程, 其反应产物在相差很大的不同时间出射, 因此角分布应该表达为不同的反应时间的叠加, 可以表示为

$$\langle \sigma(E, \theta) \rangle_E = \sum_n k_n \langle \sigma(E, \theta) \rangle_E |_{\tau = \tau_n}, \quad (4)$$

这个式子表达了从双核系统不同中间阶段衰变的思想, 从非常强的短寿命非平衡态到相对长寿命的平衡态, 而式(2)是对式(4)的简化, 它假定了两种反应成分的 τ 具有比较大的差别^[20], 因此比较适用于相互作用时间比较长、内部自由度变化较大的反应过程, 对相互作用时间比较短、内部自由度变化较小的反应过程, 用角分布的斜率提取的系统的平均寿命不能完全表达该反应过程的特征.

从表 1 中可以看出, 上述的 4 个反应系统, $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$ 和 $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$ 是对称的反应系统, 由能量自关联函数方法计算得到的系统的平均寿命 τ 和角分布方法计算得到的系统的平均寿命 τ_2 基本上是一致的, 都对应于反应时间比较长的产物, 即耗散程度比较大的产物; 而角分布方法计算得到的系统的平均寿命 τ_1 则对应于反应时间比较短的产物, 即耗散程度比较小的产物, 或直接反应的产物. $^{19}\text{F} + ^{89}\text{Y}$ 和 $^{19}\text{F} + ^{89}\text{Nb}$ 是非常不对称的反应系统, 由两种方法提取的系统的平均寿命相差很大, 但角分布方法计算得到的系统的平均寿

命 τ_1 和 τ_2 则相差不大, τ_1 和 τ_2 反映的都是耗散程度比较小的直接反应产物的反应时间,这是因为对 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$,由于反应系统的耗散程度不深,即使在后角区直接反应成分也占了很大的比重,耗散产物的贡献较小,因此由角分布斜率得到的系统的平均寿命主要是反映了直接成分的出射时间;对 $^{19}\text{F} + ^{89}\text{Y}$,反应系统的耗散程度也不深,但由于 $^{19}\text{F} + ^{89}\text{Y}$ 的入射能量高($E_{\text{lab}} \approx 140\text{MeV}$),相对于 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 系统来说耗散程度要大一些,耗散产物的比重增加,而由角分布斜率得到的系统的平均寿命是直接反应产物和耗散产物反应时间的平均,故其 τ_2 比 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 的 τ_2 大.

综上所述,由于耗散反应激发函数中的涨落是耗散产物所特有的,而直接反应没有该现象,因此由能量自关联函数提取的反应时间对应的就是耗散产物的特征时间.由公式(2)拟合角分布得到的反应系统的平均寿命是平均了的两个反应时间,由前角区角分布的斜率得到的系统的平均寿命对应于直接反应产物的反应时间,由后角区角分布的斜率得到的系统的平均寿命对应于直接反应和耗散产物反应时间的平均.对于入射道对称性比较大的反应系统,系统的内部自由度变化较大,相互作用时间比较长,系统可以达到比较大耗散弛豫程度,因此用角分布的斜率提取的系统的平均寿命反映了直接过程和耗散产物的特征时间;在入射道非对称性比较大的反应系统中,系统的内部自由度变化较小,相互作用时间相对较短,系统的耗散弛豫程度比较小,用角分布的斜率来提取系统的平均寿命只能反映出直接过程产物的特征时间.

此外,角分布方法虽然能给出反应系统的平均寿命,但是,其中的双核系统的转动角速度只是作为一个常数参量,根本不能反映双核系统转动中存在阻尼这一重要特性.在能量自关联函数方法中,双核系统是作为一个作阻尼转动的衰变系统,用双核系统的平均衰变宽度 Γ ,系统的转动角速度 $\hbar\omega$ 以及系统的宇称和自旋的退相干宽度 β 3个时间参量来描述双核系统随时间的演化过程.衰变、转动、阻尼3种运动形态的共同作用的描述使耗散反应的物理图像更为清晰而优美,发展了人们对重离子耗散反应机制的理解与认识.

参考文献(References)

- 1 Suomijarvi T, Lucas R, Mermaz M C et al. *Z. Phys.*, 1985, **A321**:531—532
- 2 Mermaz M C, Berthier B, Lucas R et al. *Nucl. Phys.*, 1986, **A456**:186—204
- 3 Pappalardo G. *Nucl. Phys.*, 1988, **A488**:395c—408c
- 4 Papa M, Cardella G, Di Pietro A et al. *Z. Phys.*, 1995, **A353**:205—212
- 5 Papa M, Amorini F, Cardella G et al. *Phys. Rev.*, 2000, **C61**:044614
- 6 Ericson T. *Ann. Phys.*, 1963, **23**:390—414
- 7 KUN S Y. *Z. Phys.*, 1997, **A357**:255—269
- 8 KUN S Y. *Z. Phys.*, 1997, **A357**:271—291
- 9 KUN S Y. *Z. Phys.*, 1997, **A357**:367—375
- 10 Richter A. *Nuclear Spectroscopy and Reactions*. In: ed Cemy J. 1974 Part B, 343
- 11 WANG Qi, TIAN Wen-Dong, LI Song-Lin et al. *HEP & NP*, 2000, **24**(11):1060—1065(in Chinese)
(王琦,田文栋,李松林等.高能物理与核物理,2000,24(11):1060—1065)
- 12 TIAN Wen-Dong. *On the Mechanism of the Energy Structure of the Excitation Functions in the Dissipative Reactions*, Doctor Thesis, Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Science, 2000(in Chinese)
(田文栋.耗散反应激发函数中能量结构现象的机制研究,博士论文,中国科学院近代物理研究所,2000)

- 13 de Rosa A, Inglima G, Russo V et al. *Phys. Lett.*, 1985, **160B**:239—242
- 14 de Rosa A, Inglima G, Romano M et al. *Phys. Rev.*, 1988, **C37**:1042—1047
- 15 Berceanu I, Andronic A, Duma M et al. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:2359—2369
- 16 Cardella G, Papa M, Pappalardo G et al. *Z. Phys.*, 1990, **A336**:387—390
- 17 WANG Qi, LU Jun, XU Hu-Shan et al. *Phys. Lett.*, 1996, **B388**:462—467
- 18 WANG Qi, TIAN Wen-Dong, LI Song-Lin et al. *HEP&NP*, 1999, **23**(1):39—43(in Chinese)
(王琦, 田文栋, 李松林等. 高能物理与核物理, 1999, **23**(1):39—43)
- 19 TIAN Wen-Dong, WANG Qi, LI Song-Lin et al. *HEP&NP*, 2000, **24**(2):113—118(in Chinese)
(田文栋, 王琦, 李松林等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(2):113—118)
- 20 KUN S Y. Theory of Multistep Dissipative Heavy-ion Collisions in the Region of Strongly Overlapping Resonances of Dinucleus: Angular Distributions and Excitation Function Fluctuations. In: Lemmer R H ed. *Proceedings of Workshop on Multistep Direct Reactions*. Singapore: World Scientific, 1992. 114—158

Reaction Time in the $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ Dissipative Collision

TIAN Wen-Dong WANG Qi LI Song-Lin DONG Yu-Chuan GUO Zhong-Yan

ZHAN Wen-Long XIAO Guo-Qing

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

LI Zhi-Chang LU Xiu-Qin ZHAO Kui FU Chang-Bo LIU Jian-Cheng

JIANG Hua HU Gui-Qing

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

Abstract The Angular distribution and excitation function of the dissipative products have been measured in the reaction $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$. The reaction time of the dissipative products is extracted from the angular distribution and compared with that extracted from their energy auto-correlation function. A great difference exists between the reaction times extracted from these two methods. The results obtained from analyzing these two methods in different symmetrical reaction systems show that the reaction time extracted in the more symmetrical system by analyzing the slope of the angular distribution demonstrates the characteristic times of both direct and dissipative products, while the reaction times extracted in the more asymmetrical system only reflects the character of the direct products. But the method of the energy auto-correlation function can give the characteristic time for dissipative products in both symmetrical and asymmetrical system. In addition, the damping rotation feature of the dinuclear system formed in the dissipative reaction can be described by analyzing the energy auto-correlation function.

Key words dissipative collision, reaction time, angular distribution, energy auto-correlation function, damping rotation

Received 2 April 2001

* Supported by NSFC(19775057, 19804012) and Major State Basic Research Development Program (G20000774001)