

$^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物激发函数中截面测量的不重复性*

王琦 田文栋 李松林 江中和 董玉川

(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 完成了 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 重离子耗散碰撞激发函数的两次独立测量. 束流的入射能量为 100—108 MeV, 步长 250 keV. 两次测量的宏观条件几乎完全一样, 惟一的差别是使用了厚度分别为 70 和 71 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的两块 ^{93}Nb 同位素靶. 实验结果表明: (1) 两次测量所得到的耗散反应产物激发函数的涨落具有不可平滑的结构; (2) 这种不平滑的涨落截面有不重复的迹象. 着重从实验的角度对这一结果进行了讨论.

关键词 重离子耗散碰撞 两次测量 截面不重复

1 引言

低能重离子核反应最重要的成果之一是深部非弹性碰撞机制的发现. 在重离子深部非弹性碰撞中, 形成了一个具有高的内部激发的中间双核系统. 双核系统在存活期间内, 达不到完全的统计平衡, 最后衰变成类弹碎片和类靶碎片. 出射碎片的能谱呈钟罩形, 角分布(在质心系)非 90° 对称, 寿命约为 10^{-21} s 量级. 能量、电荷、质量、角动量等各种物理量的弛豫是非平衡的双核系统随时间而演化的主要特征, 这是一个耗散过程, 所以, 重离子深部非弹性碰撞亦称之为耗散反应.

近些年来, 耗散反应激发函数的研究引人注目. 激发函数研究的基础是 Ericson 的核反应统计理论^[1]. Ericson 预言, 核反应中形成的复合系统的截面存在统计性涨落, 其能量自关联函数呈 Lorentzian 型, 从中可以提取系统的平均衰变宽度 Γ . 复合核激发函数测量的实验结果完全证实了 Ericson 理论的正确. 重离子耗散反应则不一样, 其激发函数的重要特征是截面涨落的不可平滑性^[2-12]. 就是说, 尽管重离子耗散反应所形成的中间双核

2001-04-02 收稿

* 国家自然科学基金(19775057, 10175083)和国家重点基础研究发展规划(G2000077401)资助

系统有高的内部激发以及大量末态道的贡献,即使对具有不同电荷数 Z 的产物的激发函数相加或者对不同角度出射的各种产物的激发函数相加,截面的涨落都不减小,涨落的结构都不能被平滑. 这是 Ericson 理论所不能预期的. 同时,由于耗散碰撞中所形成的中间双核系统始终处于非平衡态,系统随时间的演化过程非常复杂,实验得到的能量自关联函数也不再是单纯的 Lorentzian 型,而呈现出衰减的周期性结构^[2, 12]. 值得关注的是,不久前 Strasbourg 的一个实验小组无意中发现,弹靶系统和入射能量都相同的两次耗散反应产物激发函数测量的截面及其涨落的结果不重复! 对于这个不重复的测量结果,普遍觉得可能是(其中至少一个)实验数据有问题. 有趣的是,最近一位理论家语出惊人,他指出^[13]:“在非平衡的耗散碰撞中,截面及其涨落的这种不重复在物理上是可能的!”

Strasbourg 小组关于截面不重复的实验结果,虽然两次测量有相同的弹靶系统和相同的入射能量,但其它条件有所不同:一次实验是在 Strasbourg 完成,另一次在 Canberra 完成,使用的加速器(包括所选用的参数)不同:两次测量鉴别的粒子种类也不同,一次实验鉴别的是出射粒子的电荷数 Z ,另一次实验鉴别的是出射粒子的质量数 A ,结果的可比性差. 为了验证耗散反应中截面及其涨落的不重复到底是实验有问题还是发现了一个新现象,我们最近完成了两次宏观条件相同的 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物激发函数的测量,确实观测到了一些相同能量点在两次测量中的反应截面有不重复的迹象^[14, 15]. 本文将较为详尽地给出实验结果及其讨论.

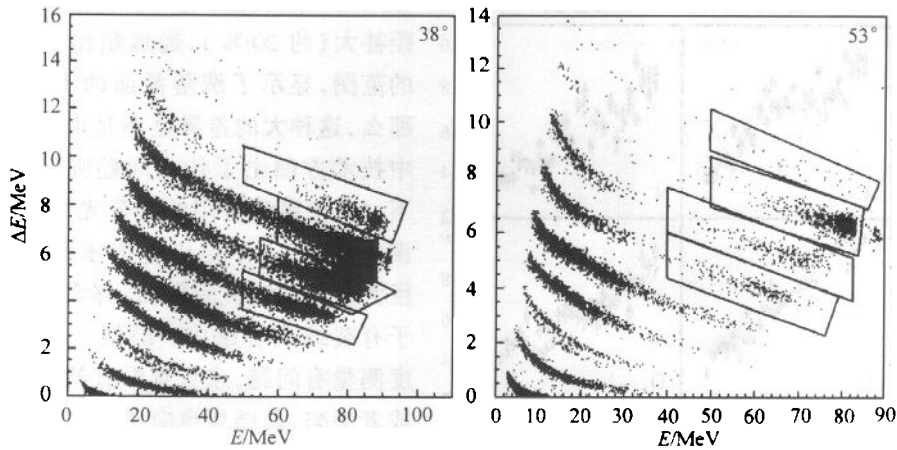
2 实验

实验是在北京中国原子能科学研究所的 HI-13 串列静电加速器上完成的. 入射束流 $^{19}\text{F}^{8+}$ 的能量为 100—108 MeV,步长 250 keV,流强约 80 nA. 用于鉴别反应产物电荷数 Z 的探测系统是 3 套自行研制的 (ΔE - E) 望远镜,分别位于实验室系 38° , 45° 和 53° . ΔE 为气体电离室,充以约 110 mb 的 P10 气体; E 为金硅面垒半导体探测器,其中 38° 和 53° 的两块是 ORTEC 公司生产的 $8 \times 47\text{mm}$ 的位置灵敏半导体;探测系统的电荷分辨好于 30. 在实验室系 $\pm 12^\circ$ 安置有两个半导体探测器以监测束流. 在 0° 安置了法拉第筒收集束流电荷并作数据归一.

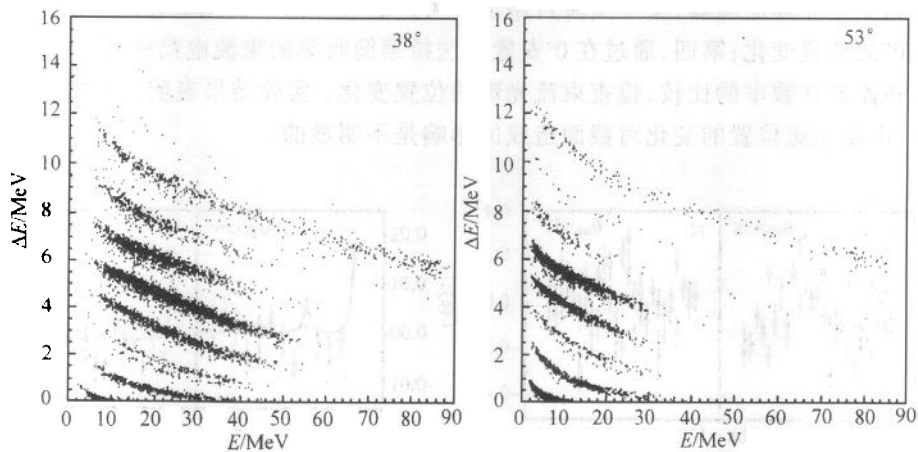
对相同的反应道 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 共进行了两次独立的激发函数测量. 两次测量由同一台加速器 HI-13 提供 $^{19}\text{F}^{8+}$ 束流,束流的入射能量与变化步长、使用的散射室、探测设备的工作状态及探测角度、电子学插件、数据获取系统等装置及其所选用的参数等都保持不变,惟一的差别是靶环境,即两次测量中分别使用了材料相同、厚度相近的两块靶:第一次测量中使用的 ^{93}Nb 同位素靶的厚度为 $(70 \pm 6)\mu\text{g}/\text{cm}^2$,第二次测量中使用的 ^{93}Nb 同位素靶的厚度为 $(71 \pm 6)\mu\text{g}/\text{cm}^2$.

3 结果与讨论

图 1 是实验中入射能量为 100.25 MeV 时 38° 和 53° 的两套望远镜典型的 (ΔE - E) 散点图. 显然,按照电荷数 Z 能够清楚地鉴别 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应中感兴趣的类弹产物.

图1 100.25 MeV $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中典型的 $(\Delta E-E)$ 散点图

为了考察并消除由于靶子上碳沾污造成的影响,在几个入射能量点做了 $^{19}\text{F} + ^{12}\text{C}$ 反应产物的测量. 考虑到便于比较,图2给出的是与图1在相同角度、相同入射能量的 $^{19}\text{F} + ^{12}\text{C}$ 反应的 $(\Delta E-E)$ 散点图. 对照图1和图2,可以看到,与反应运动学的估算相一致. 为了消除靶子上碳沾污的影响以保证数据分析的可靠,我们宁可舍弃那些比较轻的元素 ($Z \leq 6$) 和那些比较重的元素 ($Z \geq 9$), 而仅选择分析 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物中 N 和 O 元素的激发函数及其涨落.

图2 $^{19}\text{F} + ^{12}\text{C}$ 反应产物的 $(\Delta E-E)$ 散点图

整个测量过程中,安置在 45° 的探测器望远镜有一段工作不正常,故仅对 38° 和 53° 出射的 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 反应产物 N 和 O 的耗散部分进行了积分,做出的激发函数如图3所示,激发函数表现出不可平滑的特征性涨落结构. 图中的误差是统计误差. 有意思的是,比较两次实验测量的涨落截面,虽然在大多数相同的入射能量点是重复的,但是也有近 $1/3$ 的

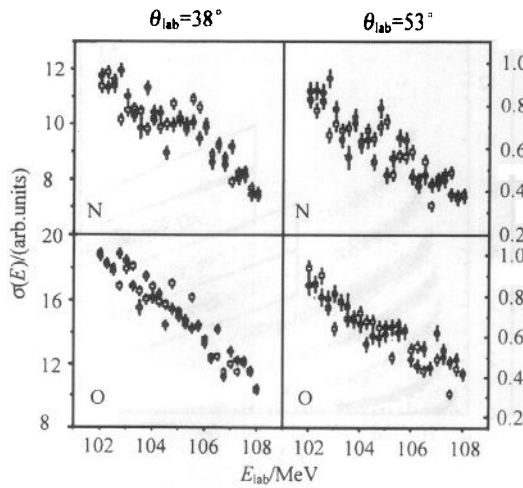


图 3 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物 N 和 O 的激发函数
○靶厚 $71\mu\text{g}/\text{cm}^2$, ●靶厚 $70\mu\text{g}/\text{cm}^2$.

相同的人射能量点,两次测量的结果却差距甚大(约 20%),远远超出了统计误差的范围,显示了涨落截面的不重复迹象.那么,这种大的差异是不是由于实验测量中技术方面出了什么问题呢?现讨论如下:(1)靶厚测量用的是分光光度测定法,误差约 8%,不足以造成截面有 20%的巨大差异;(2)实验前后,都没有检查出靶子有裂缝或者缺陷.即使一块靶子的厚度测量有问题,或者有没有检查出的裂缝或者缺陷,其结果也应该是在先后两次测量结果的比较中表现为一种系统性的偏差.换一句话说,由于靶的厚度或者缺陷而造成的两次截面测量结果的差异应该是其中一次测量的结果,要么系统地偏高,要么系统地偏低,不应该是实验中所

表现的有高有低的情况;(3)考虑到束流光斑的不同位置可能造成的影响,实验中采取了一系列防范措施:第一,在每一个能量点或者每一段(run)测量之前,用电视屏幕监测器监测并校准束流光斑的位置,使其保持在直径 3mm 的相同范围之内;第二,把每一个能量步长点的测量分成几段,增加对束流光斑的位置的监测与校准机会;第三,在实验室系 $\pm 12^\circ$ 安置有两个半导体监测器,整个实验自始至终可以通过对两个监测器计数率的比较,检查束流光斑的位置变化;第四,通过在 0° 安置的法拉第筒收集的束流电荷的计数率与两个半导体监测器的计数率的比较,检查束流光斑的位置变化.实验结果表明,在两次激发函数测量中,束流光斑位置的变化对截面造成的影响是不明显的.

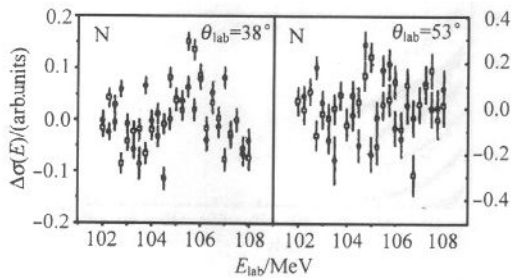


图 4 两次 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 反应激发函数振荡幅度的差

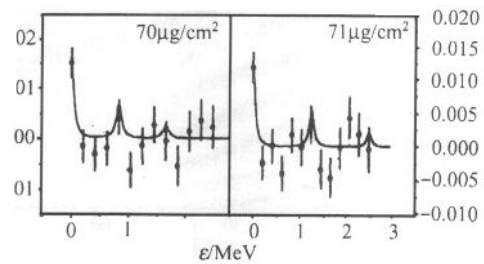


图 5 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应产物 N 在 53° 的能量自关联函数

可以肯定的是,两次实验测量中所显示的截面的不重复迹象也不是随机的统计涨落所造成的.这是因为,第一,激发函数测量中截面涨落具有不可平滑性;第二,如图 4 所示,对两次测量的激发函数归一的结果表明,两者相减之后,激发函数截面涨落的振荡幅

度不但没有平滑的迹象,反而有增大的趋势;第三,对高斯型随机涨落的模拟计算^[16]只能得到平滑的 Lorentzian 型的能量自关联函数,既没有如图 5 中那样大的振荡幅度,更不可能出现如图 5 中那样的周期性结构。

重离子耗散反应激发函数的研究在不断地深入。为了解释或者拟合测量中截面涨落不可平滑的特征性结构,发展了 Ericson 的核反应统计理论,Brink^[17]引入了角动量关联;Pappalardo 等^[18]的部分能级重叠模型强调了转动的重要作用;Kun^[19-24]则集众家之大成,从耗散反应中转动对称性以及反演对称性的自发破缺为出发点,论述了由于缓慢的宇称和自旋的退相干(decoherence)过程,产生了对初始条件极端敏感的量子混沌运动,形成了对转动运动的阻尼(耗散)。Kun 提出,用重离子耗散反应中所形成的双核系统的平均衰变宽度 Γ 、平均转动角速度 $\hbar\omega$ 以及引起转动阻尼的宇称和自旋的退相干宽度 β 这 3 个参数所代表的双核系统的衰变、转动以及转动阻尼等 3 种运动形态的共同作用来定量描述系统随时间的整个演化过程。这一描述物理图像清晰,发展了人们对重离子深部非弹性碰撞机制、特别是双核系统随时间的演化过程的理解与认识。Kun 理论认为:由于复合核处于平衡态,所以它的能量自关联函数是没有什么结构的 Lorentzian 型,能量自关联函数的极大值的半高宽就是系统的平均衰变宽度 Γ ,仅用 Γ 这一个参数便可以表述复合核的时间特征。而重离子耗散反应中所形成的中间双核系统,则由于始终达不到完全的统计平衡,其能量自关联函数呈现出衰减的周期性结构。结构的周期性反映了双核系统的宏观转动,它的衰减趋势表明转动受到了阻尼(耗散过程)。Kun 理论特别预言:自发性的相干,缓慢的退相干以及对初始条件的极端敏感在有限的、高激发的量子系统中即使是诸如靶环境这样的微小差别也足以造成截面及其涨落有可观测的不重复的显著后果!同时,截面及其涨落的不重复并不影响两次宏观条件相同的测量具有相同的关联性质,即应该从相同反应道的两次测量的结果中提取出相同的平均衰变宽度 Γ 、平均转动角速度 $\hbar\omega$ 以及退相干宽度 β 。作为例子,图 5 给出在 53° 从两次 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 反应激发函数的测量结果而得到的能量自关联函数及其理论拟合的比较。

4 结束语

重离子耗散反应激发函数的特征性截面涨落结构已经为一系列的实验所证实,其重要特征是截面涨落的不可平滑性,促进了核反应统计理论的发展。新近又观测到耗散反应激发函数的涨落截面有不重复的迹象。我们在实验中排除了 C 沾污的影响,考虑了束流靶点的移动可能造成的影响,在两次宏观条件相同的 100—108MeV 的 $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ 耗散反应激发函数测量中观测到了截面涨落的不可平滑性,尽管也观测到了一些相同能量点所对应的反应截面差异确实甚大,但是,仅仅凭此还不足以令人信服地完全确认截面测量的不可重复性。在此基础之上,打算下一步实验研究的内容是:仍然用相同的反应系统,固定入射能量(介于 100—108MeV 之间),保持其它所有的实验条件都不变,用材料相同(^{93}Nb)、厚度相近(约 $70\mu\text{g}/\text{cm}^2$)的很多块靶(约 40 块)。测量同一个能量点所对应的截面,分析截面及其涨落的分布,为研究耗散反应激发函数中截面及其涨落的不重复问题而提供新的实验依据。

参考文献 (References)

- 1 Ericson T. *Ann. Phys.*, 1963, **23**:390
- 2 Rosa A De, Inglis G, Russo V et al. *Phys. Lett.*, 1985, **B160**:239
- 3 Giaesner A, Dunweber M, Hering W et al. *Phys. Lett.*, 1986, **B169**:153
- 4 Suomijarvi T, Berthier B, Lucas R et al. *Phys. Rev.*, 1987, **C36**:181
- 5 Pappalardo G. *Nucl. Phys.*, 1988, **A488**:395c
- 6 Cardella G, Papa M, Pappalardo G et al. *Z. Phys.*, 1989, **A332**:195
- 7 Agodi C, Alba R, Anzalone A et al. *Z. Phys.*, 1991, **A340**:341
- 8 Papa M, Cardella G, Pietro A Di et al. *Z. Phys.*, 1995, **A353**:205
- 9 Rizzo F, Cardella G, Rosa A De et al. *Z. Phys.*, 1994, **A349**:169
- 10 WANG Qi, LU Jun, XU Hu-Shan et al. *Phys. Lett.*, 1996, **B388**:462
- 11 Berceanu I et al. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:2359
- 12 Papa M, Amorini F, Cardella G et al. *Phys. Rev.*, 2000, **C61**:044614
- 13 Kun S Y. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**:423
- 14 WANG Qi, TIAN Wen-Dong, LI Song-Lin et al. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2000, **24**:1060(in Chinese)
(王琦,田文栋,李松林等. 高能物理与核物理,2000,**24**:1060)
- 15 WANG Qi, TIAN Wen-Dong, LI Song-Lin et al. *Nuclear Physics Review*, 2001, **18**:72(in Chinese)
(王琦,田文栋,李松林等. 原子核物理评论,2001,**18**:72)
- 16 Kun S Y. *Z. Phys.*, 1997, **A359**:263
- 17 Brink D M, Dietrick K. *Z. Phys.*, 1987, **A326**:7
- 18 Pappalardo G, Papa M. Structure in the Excitation Functions of Dissipative Heavy Ion Collisions. In: Lemmer R H. in Proceedings of the workshop on Multistep Direct Reaction, Singapore: World Scientific, 1992, 89—113
- 19 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. in Proceedings of the workshop on Multistep Direct Reaction, Singapore: World Scientific, 1992, 114—158
- 20 Kun S Y. *Phys. Lett.*, 1991, **B257**:247
- 21 Kun S Y, Papa M, Sunko D K. *Phys. Lett.*, 1990, **B249**:1
- 22 Kun S Y. *Nucl. Phys.*, 1995, **A583**:275c
- 23 Kun S Y, Norenberg W. *Z. Phys.*, 1992, **A343**:215
- 24 Kun S Y. *Z. Phys.*, 1997, **A357**:255; **A357**:271; **A357**:367; **A359**:137; **A359**:145; **A359**:257

Non-reproducibility of the Cross Sections Measured in $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ Dissipative Reactions *

WANG Qi TIAN Wen-Dong LI Song-Lin JIANG Zhong-He DONG Yu-Chuan

(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 Two independent measurements of excitation functions in the dissipative collisions of $^{19}\text{F} + ^{93}\text{Nb}$ have been performed at incident energies from 100 to 108 MeV in steps of 250 keV. The two measurements differed by the thickness of the target foils, $70\mu\text{g}/\text{cm}^2$ and $71\mu\text{g}/\text{cm}^2$, respectively. All the other experimental conditions, the accelerator, the incident energies and steps, the scattering chamber, the detection system, the electronics, the acquisition system and all the parameters selected in the two measurements, were kept to be identical in both experiments. The data indicate non-reproducibility of the non-self-averaging oscillating yields in the two independent measurements. The indication of the non-reproducibility of the cross sections is discussed.

Key words dissipative collision, two independent measurements, non-reproducibility of the cross sections

Received 2 April 2001

* Supported by NSFC (19775057, 10175083) and Major State Basic Research Development Program (G2000077401)