质子滴线核 ^{17}F 在近库仑势垒能区的反应机制研究进展

杨磊¹, 林承键^{1,2*}, 贾会明¹, 马南茹¹, 王东玺¹, 杨峰¹, 温培威¹

1. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;

2. 广西师范大学物理科学与技术学院, 桂林 541004

* 联系人, E-mail: cjlin@ciae.ac.cn

2020-12-29 收稿, 2021-02-02 修回, 2021-02-03 接受, 2021-02-04 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFA0404404)、国家自然科学基金(11635015, U1732145, 11705285, U1867212, 11805280, 11961131012)、财政部稳定基础支持科研项目(WDJC-2019-13)和中核集团领创科研项目(LC192209000701, LC202309000201)资助

摘要 质子滴线核在近库仑势垒能区的反应机制研究是当前核物理领域的热点问题. 本文对国内外开展的 ^{17}F 在近库仑势垒能区的实验研究进行了回顾和总结. 为了深入探索 ^{17}F 的反应机制, 本课题组相继开展了 $^{17}\text{F}+^{12}\text{C}$, ^{89}Y 和 ^{208}Pb 的弹性散射研究以及 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 的全反应道研究. 目前的弹性散射研究表明, 在大范围的靶区内, ^{17}F 的破裂连续态对弹性散射的耦合效应并不显著. 对于破裂反应, 在近垒能区只有 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 体系的细致研究. 研究表明, 去弹破裂是主要的 ^{16}O 产生机制. 而对于熔合反应, 目前只有 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 和 ^{208}Pb 两个体系的实验结果. $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 体系在垒下表现出明显的总熔合截面增强现象. 理论计算表明, 这种增强主要是由 ^{17}F 连续态的耦合效应导致. 而对于 $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$, 其总熔合激发函数与 $^{19}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 基本相同. $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 和 ^{208}Pb 体系熔合激发函数的差异还需要进一步研究.

关键词 质子滴线核 ^{17}F , 近库仑势垒能区, 弹性散射, 破裂反应, 熔合反应

近年来, 随着放射性束流强度和品质的提升以及探测手段的升级, 由弱束缚、具有特殊结构的原子核(奇特核)引起的在库仑势垒能区的核反应机制研究成为当前核物理领域的热点问题^[1]. 相较于紧束缚体系, 弱束缚体系的反应机制更为复杂, 尤其是在库仑势垒能区. 紧束缚体系在库仑势垒能区往往只有少数的反应道开放, 如熔合、非弹和转移反应等. 而对于弱束缚核, 由于结合能较低, 在反应时容易发生破裂. 破裂反应道会对弹散和熔合等反应道产生耦合效应, 从而影响整个体系的反应动力学过程. 破裂对应一个连续的能量分布, 通常理论上采用连续态离散化耦合道(continuum-discretized coupled-channels, CDCC)方法来处理相关问题. 库仑势垒能区是经典机制和量子机制的转换区域, 耦合道效应显著, 反应机制复杂. 比如, 对于熔合反应, 垒上是经典俘获过程主导, 而垒下则是量子

隧穿过程主导, 不同反应道之间的耦合将极大地改变反应进程. 对近库仑势垒能区的核反应机制, 特别是熔合反应的研究, 有助于我们深入理解一些基本的量子问题, 如连续态耦合、相干和退相干机制等.

对于弱束缚核体系, 可能发生3种熔合反应过程: (1) 与紧束缚体系相同的全熔合; (2) 部分破裂子体与靶核的部分熔合反应; (3) 全部破裂子体与靶核的全熔合反应. 其中, 过程(1)和(3)的反应产物相同, 实验上无法区分. 通常, 统称全熔合与部分熔合为总熔合. 目前的理论研究表明, 破裂对于熔合反应截面可能会产生两种截然不同的效应: 一方面, 破裂后的连续态将与低能级的束缚态产生强耦合, 从而增加熔合的概率; 另一方面, 破裂会减少入射粒子的本征通量, 进而使熔合截面降低. 近年来, 通过对中子晕(皮)核体系大量的实验和理论研究, 目前已经初步总结出丰中子区熔合反应

引用格式: 杨磊, 林承键, 贾会明, 等. 质子滴线核 ^{17}F 在近库仑势垒能区的反应机制研究进展. 科学通报, 2021, 66: 3544–3552

Yang L, Lin C J, Jia H M, et al. Progress on reaction mechanisms of the proton drip-line nucleus ^{17}F at energies around the Coulomb barrier (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3544–3552, doi: [10.1360/TB-2020-1673](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1673)

激发函数的系统学规律^[1]: 在垒下区域, 总熔合截面有所增强; 而在垒上区域, 总熔合截面压低. 由于价中子与靶核间没有排斥的库仑相互作用, 因此价中子转移反应是主要的直接反应机制^[2~4], 并且对弹性散射^[5]和熔合反应都表现出较强的耦合效应^[6,7]. 与中子晕(皮)核体系不同, 库仑极化效应可能在丰质子区体系的反应中起到重要作用: 价质子与靶核之间的库仑排斥作用导致丰质子弹核被极化, 弹核核芯起到屏蔽作用, 从而降低质子转移反应发生的概率, 并进而影响弹散、熔合等其他反应过程^[8~10].

对于丰质子核区, 目前只有极少量的实验研究结果, 并且主要集中在 ^8B 和 ^{17}F 两个核. ^8B 作为质子晕核, 其质子分离能只有138 keV. ^{17}F 为质子滴线核, 质子破裂阈为600 keV, 其第一激发态被认为具有质子晕结构. 相比于 ^{17}F , ^8B 结构更为复杂, 其核心 ^7Be 同样为弱束缚核, 且自旋非零. 而 ^{17}F 的结构性质可以用 $^{16}\text{O}+\text{p}$ 的两体模型准确描述; 并且, 目前的实验装置更容易产生高品质的 ^{17}F 次级束流. 因此, ^{17}F 更适合作为研究丰质子体系反应机制的切入点. 本文将对近年来国内外以及本课题组针对 ^{17}F 在近库仑势垒能区开展的实验研究进行回顾和总结.

1 国内外研究进展

1.1 ^{17}F 的弹性散射研究

Mazzocco等人^[11]在近垒能区的两个能点(54.1 ± 1.1)和(58.5 ± 1.0) MeV)测量了 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 的弹性散射, 由于受到探测器阵列能量分辨率和粒子鉴别能力的限制, 未能实现非弹性散射事件和破裂/转移反应产生的 ^{16}O 事件的鉴别. 他们利用光学模型对所得准弹角分布进行了拟合, 抽取了该反应体系的总反应截面. 结果表明, 虽然 ^{17}F 是质子滴线的弱束缚核, 但是其总激发函数与紧束缚体系 $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$ 和 ^{64}Zn 非常接近, 表现出较弱的反应活性. Grineviciute和Descouvemont^[12]利用微观连续态离散化耦合道(microscopic continuum-discretized coupled-channels, MCDCC)方法对 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 的弹性散射进行了计算. 然而, 理论结果并不能很好地重现实验数据, 可能是因为 ^{17}F 在靶中能损较大, 导致的反应能量难以准确估计. Romoli等人^[13]测量了 $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 在90.4 MeV能量下的弹性散射, 结果如图1所示. 利用光学模型拟合实验数据抽取到了该体系的总反应截面, 拟合结果如图1中实线所示. 结果表明, 与 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 体系

图1 (网络版彩色) $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 的弹性散射角分布. 实心圆为实验数据, 实线为光学模型的拟合结果. 结果取自文献^[13]

Figure 1 (Color online) Angular distribution of the elastic scattering of ^{17}F on ^{208}Pb . The solid circles represent the experimental data, and the solid curve is the fitting result by optical model. The results are taken from Ref. ^[13]

相似, $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 的总熔合激发函数与 $^{16,17}\text{O}$ 的相应体系非常接近.

1.2 ^{17}F 的破裂反应研究

Liang等人^[14]在垒上能区(10 MeV/u)对 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 和 ^{208}Pb 的破裂反应进行了较为细致的研究. 探测器阵列对破裂碎片 $^{16}\text{O}-\text{p}$ 的符合探测效率分别为14%~19% ($^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$)和18%~40% ($^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$). Kucuk和Moro^[15]利用CDCC方法对实验结果进行了计算, 结果如图2所示. 结果表明, CDCC能够较好地描述 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 的破裂数据, 并且核力导致的破裂在大于擦边角的区域贡献非常小. 对于 $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 体系, CDCC的计算结果与实验结果存在明显差异, 可能是因为没有考虑 ^{16}O 的核芯激发^[15]. 根据CDCC的计算结果, 核破裂成分在擦边角处成峰, 而库仑破裂在小角度区域是主要成分. 计算结果还表明, 库仑极化效应会抑制破裂反应发生的概率.

1.3 ^{17}F 的熔合反应研究

目前, 只有一个 $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 体系的总熔合反应实验测量^[16]. 实验在美国阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory)进行. 通过对裂变碎片的符合测量, 确定了87~99 MeV能区内的4个反应点的总熔合截面. 为了比较, 对 $^{19}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 体系的熔合-裂变反应同时进行了测量, 结果如图3所示. 可见, ^{17}F 和 ^{19}F 的总熔合激发函数基本相同; 在最低能点处, ^{17}F 的总熔合截面甚至低于 ^{19}F . 该结果表明, ^{17}F 弱束缚的结构性质并不会对熔合反应过

图2 (网络版彩色) $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ (a)和 $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ (b)在能量10 MeV/u下的单举破裂角分布. 实心圆为实验数据, 虚线和点划线分别为只考虑核相互作用和库仑相互作用的CDCC计算结果, 实线为考虑全部相互作用的CDCC计算结果. 结果取自文献[15]

Figure 2 (Color online) Angular distributions of the inclusive breakup of ^{17}F on ^{58}Ni (a) and ^{208}Pb (b) at 10 MeV/u. The solid circles denote the experimental data. The dashed and dotted-dashed curves denote the CDCC results with only the nuclear and Coulomb interaction, respectively. The solid curves are the CDCC results with full couplings. The results are taken from Ref. [15]

程造成可观的影响。

2 中国原子能科学研究院课题组研究进展

当前针对 ^{17}F 的研究结果表明, 丰质子核区的反应机制尤其是破裂动力学和破裂道对融合反应的效应仍是亟待解决的重要问题. 鉴于此, 我们在中国科学院近代物理研究所的RIBLL1终端^[17]以及日本东京大学原子核研究中心的CRIB终端^[18]上分别开展了 $^{17}\text{F}+^{12}\text{C}$ ^[19], ^{89}Y ^[20], ^{208}Pb 的弹性散射研究以及 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ ^[21]的全反应道研究, 以期深入研究质子滴线核 ^{17}F 所诱导的反应机制。

2.1 ^{17}F 的弹性散射研究

虽然弹性散射是最简单的核-核相互作用过程, 但是弹性散射角分布仍能够反映弹核和靶核的核结构以及其他反应道对散射过程的耦合效应, 这对于理解丰质子核的反应机制具有重要意义. 由于弹性散射相对容易测量, 对束流的品质要求不高, 因此我们开展了 ^{17}F 从轻靶到重靶弹性散射的系统性研究。

2.1.1 $^{17}\text{F}+^{12}\text{C}$

实验在CRIB终端上完成^[19]. 初级束为101 MeV ^{16}O , 流强约为300 enA. 次级束 ^{17}F 由 $d(^{16}\text{O}, ^{17}\text{F})$ 反应产生, 其在 ^{12}C 靶(435 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)上的流强和纯度分别为 4×10^5 个/s和90%, 能量为60 MeV. 在 ^{12}C 靶前放置两块平行板雪崩探测器(parallel plate avalanche counter, PPAC), 用于重构 ^{17}F 的径迹. 散射产物由6组 ΔE -E硅望远镜进行鉴别和记录. 每组望远镜由两层硅探测器组

成: 第一层为厚度65 μm 的双面硅条探测器(double-sided silicon strip detector, DSSD), 每面各有16条, 每条宽3 mm, 间距0.1 mm, 有效面积50 mm $\times$ 50 mm; 第二层为同样面积、厚度300 μm 的方形硅探测器. 探测器阵列覆盖的角度范围为 $\theta_{\text{lab}}=5^\circ\sim 80^\circ$, 角度分辨率为 0.6° , 总能量分辨率为1%. 实验得到的 $^{17}\text{F}+^{12}\text{C}$ 的弹性散射角分布与卢瑟福散射的比值如图4所示. 由于厚靶产生的能散较大, 以及探测器能量分辨率的限制, 实验中无法区分激发到 ^{17}F 第一激发态的非弹性散射事件, 因此所得结果为准弹性散射角分布。

为了考察破裂过程的连续态对弹性散射的影响, 我们进行了CDCC计算, 结果如图4中实线所示. 不考虑连续态耦合效应的计算结果用虚线显示在图4中. 结果表明, 连续态对弹性散射的耦合效应并不显著。

2.1.2 $^{17}\text{F}+^{89}\text{Y}$

在中国科学院近代物理研究所的RIBLL1终端上完成了 ^{17}F 与中等质量靶核 ^{89}Y 的弹性散射测量^[20], 以深入研究破裂道对弹性散射的耦合效应. ^{17}F 由 ^{17}O 初级束(能量7.6 MeV/u, 强度1 pA)轰击 H_2 气体靶产生. 实验中, 通过使用铝降能片产生59和50 MeV两种能量的 ^{17}F 次级束, 其在 ^{89}Y 靶(厚度为0.98 mg/ cm^2)上的流强和纯度分别为 3×10^4 个/s和60%. 使用4组硅望远镜探测器对散射产物进行鉴别, 每组望远镜由第一层的65 μm DSSD和第二层的300 μm 四分硅探测器组成. 4组探测器可覆盖的角度范围为 $\theta_{\text{lab}}=15^\circ\sim 115^\circ$. 同时, 在靶前放置两块多丝正比室用于重构 ^{17}F 的束流径迹, 从而得到逐事件的散射角度. 整个探测系统的能量分辨率约为

图 3 (网络版彩色)约化的 ^{17}F (星形)、 ^{19}F (空心圆)+ ^{208}Pb 的总融合反应截面. 虚线为 $^{19}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 体系的融合激发函数. 结果取自文献[16]
Figure 3 (Color online) Reduced fusion cross sections of ^{17}F (stars) and ^{19}F (hallow circles) + ^{208}Pb . The dashed curve denotes the cross sections measured for $^{19}\text{F}+^{208}\text{Pb}$. The results are taken from Ref. [16]

1%, 不足以区分激发到 ^{17}F 第一激发态的非弹性散射事件, 因此所得结果仍为准弹性散射角分布(图5).

CDCC的计算结果如图5中实线所示. 可见, 在低能点(50 MeV), CDCC能够较好地重现实验数据; 在高能点(59 MeV), 理论计算与实验数据存在一定差异. 这可能是由于缺少合适的 $^{16}\text{O}+^{89}\text{Y}$ 的光学势参数. 因此, 在计算中采用邻近的 $^{16}\text{O}+^{90}\text{Zr}$ (48 MeV)[22]体系的光学势作为输入参数. 作为比较, 不考虑连续态耦合效应的单道计算结果也显示在图5中, 如虚线所示. 结果表明, 来自破裂道的耦合效应并不显著, 只是对库仑虹有较弱的压低效应.

2.1.3 $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$

对于重靶区, 我们在RIBLL1终端上完成了 $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 体系的弹性散射测量. 初级束采用8.5 MeV/u的 ^{16}O , 流强约为1 pA. 初级靶为 D_2 气体靶, 压强700 torr. ^{208}Pb 靶厚度为2.0 mg/cm², 靶上 ^{17}F 束流的能量为94.5 MeV, 流强和纯度分别为 5.5×10^4 个/s和55%. 在靶前放置两块PPAC, 以重构 ^{17}F 的径迹. 为了能够鉴别出射道的 ^{17}F 和 ^{16}O 粒子, 我们设计并搭建了一套基于电离室(ionization chamber, IC)的多层望远镜阵列(multi-layer ionization-chamber telescope array, MITA)[23]. 该阵列包括10个独立的探测单元, 每个单元由4层探测器组成, 分别为第一层的IC、第二层的DSSD(厚度为60 μm), 以及第三层和第四层的厚度为300和1000 μm的四分硅探测器(quadrant silicon detector, QSD). 通过IC和DSSD组成的望远镜可实现重离子如 ^{17}F 和 ^{16}O 的鉴

图 4 (网络版彩色) $^{17}\text{F}+^{12}\text{C}$ 的准弹性散射角分布. 实心圆为实验数据, 实线和虚线分别为CDCC考虑和不考虑连续态耦合效应的计算结果. 结果取自文献[19]

Figure 4 (Color online) Angular distributions of the quasi-elastic scattering of ^{17}F on ^{12}C . The solid circles denote the experimental data. The solid and dashed curves are the CDCC calculations with and without the couplings from the continuum states, respectively. The results are taken from Ref. [19]

别; 对于p, d和α等轻粒子, 可以通过3层硅探测器组成的望远镜进行鉴别, 实现轻、重反应产物的同时鉴别. 该阵列覆盖角度为 $\theta_{\text{lab}}=15.2^\circ\sim 164.8^\circ$, 角度间隔为 16° , 角度分辨率好于 1° . 通过蒙特卡罗模拟, 该阵列的空间立体角覆盖约为7.5% 4π .

实验得到的弹性散射角分布如图6所示. 由于探测系统的能量分辨率约为4.0%, 无法区分来自 ^{17}F 第一激发态的非弹性散射事件, 因此所得结果同样为准弹性散射角分布. CDCC以及不考虑连续态耦合效应的单道计算结果以实线和虚线显示在图6中. 结果表明, 来自连续态的耦合效应并不显著.

2.2 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 的全反应道研究

为了深入理解质子滴线核 ^{17}F 所诱导的反应机制, 我们在CRIB上开展了 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 的完全运动学测量[21], 即尽可能记录所有反应产物的完整运动学信息(如能量、位置、时间、动量等), 进而通过运动学重构显示反应过程的各种特征(如不变质量谱, 可识别反应的中间态; 反应时标, 可识别反应的快慢等), 从而实现对各种反应机制的准确鉴别. 在运动学信息完全的情况下, 转移(两体过程)和破裂(三体过程)两种过程比较容易识别. 这是目前已知的进行全反应道研究并探索不同反应道间耦合效应的唯一实验方法.

实验采用6.6 MeV/u ^{16}O 作为初级束, 轰击 D_2 气体

图5 (网络版彩色) 50 MeV(a)和59 MeV(b)能量的 $^{17}\text{F}+^{89}\text{Y}$ 的准弹性散射角分布. 实心圆为实验数据, 实线和虚线分别为CDCC考虑和不考虑连续态耦合效应的计算结果. 结果取自文献[20]

Figure 5 (Color online) Angular distributions of the quasi-elastic scattering of ^{17}F on ^{89}Y at 50 MeV (a) and 59 MeV (b). The circles represent the experimental data. The solid and dashed curves are the CDCC calculations with and without the couplings from the continuum states, respectively. The results are taken from Ref. [20]

图6 (网络版彩色) $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 在94.5 MeV的准弹性散射角分布. 实心圆为实验数据, 实线为CDCC计算结果, 虚线为不考虑耦合道效应的单道计算结果. 结果取自文献[21]

Figure 6 (Color online) Quasi-elastic scattering angular distribution of $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ at 94.5 MeV. The solid circles are the experimental data. The solid and dashed curves are the CDCC calculations with and without the couplings from the continuum states, respectively. The results are taken from Ref. [21]

靶产生 ^{17}F . 次级靶 ^{58}Ni 的厚度为 1.0 mg/cm^2 . 通过改变 D_2 气体靶压强以及使用不同厚度的铝降能片, 共产生4种能量的 ^{17}F 次级束: (43.6 ± 0.7) , (47.5 ± 0.7) , (55.7 ± 0.8) 和 $(63.1 \pm 0.9) \text{ MeV}$. 束流强度和纯度分别达到 $(6 \sim 10) \times 10^5$ 个/s和85%. 反应产物使用MITA阵列进行鉴别和记录. 实验中, 重离子F和O, 以及轻粒子p, d和 α 等能够同时被清楚地鉴别. 借助于MITA的强大粒子鉴别能力, 首次实现了近库仑势垒能区 ^{17}F 轻靶体系反应产物的完全鉴别.

实验得到的准弹性散射角分布、exclusive和inclu-

sive破裂角分布如图7所示. 对于准弹性散射, CDCC以及不考虑连续态耦合的计算结果分别如图7中细实线和细虚线所示. 结果表明, 来自连续态的耦合效应并不显著. 为了抽取总反应截面, 利用考虑第一激发态的耦合道方法对准弹散射角分布进行拟合, 拟合结果如图7中细点划线所示. 对于弹性破裂(elastic breakup, EBU)和去弹破裂(none-elastic breakup, NEB)角分布, 分别利用CDCC和IAV^[24]模型进行计算, 结果如图7中粗点划线和粗虚线所示, 两者之和为总的破裂过程(total breakup, TBU), 对应单举测量, 即inclusive破裂结果. 可见, 理论上的EBU和TBU能够较好地重现实验数据. 并且, 在所测的能量范围内, NEB是主要的破裂过程. 此外, 通过测量熔合蒸发的p和 α , 可以提取总熔合截面, 由此可以得到 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 体系的总反应、exclusive和inclusive破裂, 以及总熔合反应的激发函数. 结果表明, 在垒上区域, 总熔合反应是主要成分, 且总熔合反应截面随能量降低呈指数下降. 在垒下能区, inclusive破裂是主要的反应过程.

$^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 的总反应和总熔合反应激发函数与 $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$ 体系的比较如图8所示. 可见, 在垒上区域, ^{17}F 和 ^{16}O 体系的总反应和总熔合激发函数基本一致. 但是在垒下能区, ^{17}F 所诱导的总反应截面和总熔合反应截面都表现出增强的趋势. 为了理解这一现象, 我们利用CDCC方法计算了 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 体系的总熔合反应截面. 在计算过程中, 通过引入短程的虚部势来得到总熔合截面. 该虚部势采用Woods-Saxon形式, 对于 $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$ 和 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$, 势深度分别为100和50 MeV, 约化半径分别为0.7

图 7 (网络版彩色) $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 在 43.6 MeV(a), 47.5 MeV(b), 55.7 MeV(c) 和 63.1 MeV(d) 能量下的准弹性散射(空心方形)、exclusive(星形)和 inclusive(实心圆)破裂角分布。细实线、虚线和点划线分别为 CDCC 计算结果、不考虑连续态耦合效应的 CDCC 计算结果以及耦合道方法拟合结果。粗点划线和虚线分别为 CDCC 和 IAV 模型的计算结果, 分别对应 EBU 和 NEB。两者之和用粗实线表示, 对应 TBU 过程。结果取自文献 [21]

Figure 7 (Color online) Angular distributions of quasi-elastic scattering (open squares), exclusive (stars) and inclusive (solid circles) breakup reactions of $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ at 43.6 MeV (a), 47.5 MeV (b), 55.7 MeV (c) and 63.1 MeV (d). The thin solid, dashed and dotted-dashed curves represent the CDCC calculations, CDCC calculations without the couplings from the continuum states and coupled channel fitting results. The thick dotted-dashed and dashed curves denote the CDCC and IAV calculation results, which are responsible for the EBU and NEB. The thick solid curve is the sum of EBU and NEB results, i.e., the TBU. The results are taken from Ref. [21]

图 8 (网络版彩色) $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 与 $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$ 的约化总熔合反应截面(a)和总反应截面(b)的比较。(a)中空心和实心星形分别为从熔合蒸发的p和α得到的总熔合反应截面; 空心三角形为取自文献[25]的 $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$ 实验数据; 实线为 CCFULL 对 $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$ 体系的计算结果。(b)中星形为我们得到的 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 体系的总反应截面, 实心菱形为取自文献[16]的实验数据; 空心方形和三角形分别为取自文献[26,27]的 ^{17}O 、 $^{16}\text{O}+^{58}\text{N}$ 的总反应截面实验数据; 实线用于显示 $^{16,17}\text{O}$ 体系的变化趋势。结果取自文献[21]

Figure 8 (Color online) Comparison of reduced total fusion (a) and total reaction (b) cross sections of ^{17}F and $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$. The open and solid stars in (a) are the total fusion cross sections deduced from the fusion-evaporation proton and alpha; the open triangles are the results of $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$ taken from Ref. [25]; the solid curve denotes the CCFULL calculation for $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$. The stars in (b) are the total reaction cross sections of $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ from our work, while the solid diamonds are the experimental data from Ref. [16]; open squares and triangles represent the experimental data for the total reaction cross sections of ^{17}O and $^{16}\text{O}+^{58}\text{N}$ taken from Ref. [26,27]; the solid curve is used to show the trend of $^{16,17}\text{O}$ systems. The results are taken from Ref. [21]

和0.5 fm, 弥散参数为0.1 fm, 以确保该短程势位于库仑势垒内部. $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$ 的实部势参数通过再现该体系的库仑势垒形状^[25]得到; $p+^{58}\text{Ni}$ 的实部势采用KD02系统光学势^[28]. 结果表明, 熔合截面的垒下增强主要是由于连续态的耦合效应, 并且随着能量降低, 这种效应愈发显著.

3 总结与展望

目前针对丰质子核在库仑势垒能区的反应机制研究仍不充分, 实验数据较为匮乏, 未能对其反应机制形成系统学的认识. 有鉴于此, 我们在RIBLL1和CRIB终端上分别开展了质子滴线核 ^{17}F 在轻靶 ^{12}C 、中重靶 ^{89}Y

以及重靶 ^{208}Pb 上的准弹性散射研究. CDCC计算结果表明, 在上述靶区范围内, ^{17}F 的连续态对弹性散射的耦合效应并不显著. 同时, 为了深入理解 ^{17}F 所诱导的反应机制, 在CRIB终端上开展了 $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 的完全运动学测量, 得到了该体系的准弹性散射、exclusive和inclusive破裂角分布以及总熔合反应截面. 结果表明, NEB是主要的 ^{16}O 产生过程. 相比于 $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$, $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ 在垒下能区表现出总反应截面和总熔合反应截面增强的现象. CDCC计算结果表明, 总熔合反应截面的增强主要是由于连续态的耦合效应. 该效应在其他质子滴线核体系, 尤其是质子晕核体系中是否依然存在, 值得进一步研究.

参考文献

- 1 Canto L F, Gomes P R S, Donangelo R, et al. Recent developments in fusion and direct reactions with weakly bound nuclei. *Phys Rep*, 2015, 596: 1–86
- 2 Di Pietro A, Figuera P, Amorini F, et al. Reactions induced by the halo nucleus ^6He at energies around the Coulomb barrier. *Phys Rev C*, 2004, 69: 044613
- 3 Fernández-García J P, Di Pietro A, Figuera P, et al. Breakup mechanisms in the $^6\text{He}+^{64}\text{Zn}$ reaction at near-barrier energies. *Phys Rev C*, 2019, 99: 054605
- 4 Fernández-García J P, Alvarez M A G, Moro A M, et al. Simultaneous analysis of elastic scattering and transfer/breakup channels for the $^6\text{He}+^{208}\text{Pb}$ reaction at energies near the Coulomb barrier. *Phys Lett B*, 2010, 693: 310–315
- 5 Keeley N, Alamanos N, Kemper K W, et al. Elastic scattering and reactions of light exotic beams. *Prog Particle Nucl Phys*, 2009, 63: 396–447
- 6 Raabe R, Sida J L, Charvet J L, et al. No enhancement of fusion probability by the neutron halo of ^6He . *Nature*, 2005, 431: 823–826
- 7 Back B B, Esbensen H, Jiang C L, et al. Recent developments in heavy-ion fusion reactions. *Rev Mod Phys*, 2014, 86: 317–360
- 8 Ito M, Yabana K, Nakatsukasa T, et al. Fusion reaction of halo nuclei: A real-time wave-packet method for three-body tunneling dynamics. *Nucl Phys A*, 2007, 787: 267–274
- 9 Aguilera E F, Martínez-Quiroz E, Lizcano D, et al. Reaction cross sections for ^8B , ^7Be , and $^6\text{Li}+^{58}\text{Ni}$ near the Coulomb barrier: Proton-halo effects. *Phys Rev C*, 2009, 79: 021601
- 10 Aguilera E F, Amador-Valenzuela P, Martínez-Quiroz E, et al. Above-barrier fusion enhancement of proton-halo systems. *Phys Rev C*, 2016, 93: 034613
- 11 Mazzocco M, Signorini C, Pierrousakou D, et al. Reaction dynamics for the system $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ at near-barrier energies. *Phys Rev C*, 2010, 82: 054604
- 12 Grineviciute J, Descouvemont P. Elastic scattering of ^{17}F , ^{17}O , and ^{19}F on a heavy target in a microscopic continuum discretized coupled-channels method. *Phys Rev C*, 2014, 90: 034616
- 13 Romoli M, Vardaci E, di Pietro M, et al. Measurements of ^{17}F scattering by ^{208}Pb with a new type of large solid angle detector array. *Phys Rev C*, 2004, 69: 064614
- 14 Liang J F, Beene J R, Caraley A L, et al. Dynamic polarization in the Coulomb breakup of loosely bound ^{17}F . *Phys Lett B*, 2009, 681: 22–25
- 15 Kucuk Y, Moro A M. Exclusive breakup of ^{17}F on ^{58}Ni and ^{208}Pb within the continuum-discretized coupled-channels method. *Phys Rev C*, 2012, 86: 034601
- 16 Rehm K E, Esbensen H, Jiang C L, et al. Fusion cross sections for the proton drip line nucleus ^{17}F at energies below the Coulomb barrier. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 3341–3344
- 17 Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. The heavy ion cooler-storage-ring project (HIRFL-CSR) at Lanzhou. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2002, 488: 11–25
- 18 Yanagisawa Y, Kubono S, Teranishi T, et al. Low-energy radioisotope beam separator CRIB. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2005, 539: 74–83
- 19 Zhang G L, Zhang C L, Zhang H Q, et al. Quasi-elastic scattering of the proton drip line nucleus ^{17}F on ^{12}C at 60 MeV. *Eur Phys J A*, 2012, 48: 65

- 20 Zhang G L, Zhang G X, Lin C J, et al. Angular distribution of elastic scattering induced by ^{17}F on medium-mass target nuclei at energies near the Coulomb barrier. *Phys Rev C*, 2018, 97: 044618
- 21 Yang L, Lin C J, Yamaguchi H, et al. Insight into the reaction dynamics of proton drip-line nuclear system $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ at near-barrier energies. *Phys Lett B*, 2021, 813: 136045
- 22 Alvarez M A G, Chamon L C, Pereira D, et al. Experimental determination of the ion-ion potential in the $N = 50$ target region: A tool to probe ground-state nuclear densities. *Nucl Phys A*, 1999, 656: 187–208
- 23 Ma N R, Yang L, Lin C J, et al. MITA: A multilayer ionization-chamber telescope array for low-energy reactions with exotic nuclei. *Eur Phys J A*, 2019, 55: 87–97
- 24 Ichimura M, Austern N, Vincent C M. Equivalence of post and prior sum rules for inclusive breakup reactions. *Phys Rev C*, 1985, 32: 431–439
- 25 Keeley N, Lilley J S, Wei J X, et al. Fusion excitation function measurements for the $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$ and $^{16}\text{O}+^{62}\text{Ni}$ systems. *Nucl Phys A*, 1998, 628: 1–16
- 26 Strano E, Torresi D, Mazzocco M, et al. $^{17}\text{O}+^{58}\text{Ni}$ scattering and reaction dynamics around the Coulomb barrier. *Phys Rev C*, 2016, 94: 024622
- 27 Keeley N, Christley J A, Clarke N M, et al. The threshold anomaly in the systems. *Nucl Phys A*, 1995, 582: 314–334
- 28 Koning A J, Delaroche J P. Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV. *Nucl Phys A*, 2003, 713: 231–310

Summary for “质子滴线核 ^{17}F 在近库仑势垒能区的反应机制研究进展”

Progress on reaction mechanisms of the proton drip-line nucleus ^{17}F at energies around the Coulomb barrier

Lei Yang¹, Cheng-Jian Lin^{1,2*}, Hui-Ming Jia¹, Nan-Ru Ma¹, Dong-Xi Wang¹, Feng Yang¹ & Pei-Wei Wen¹¹ Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;² College of Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China* Corresponding author, E-mail: cjlin@ciae.ac.cn

The reaction mechanism of proton drip-line nuclear systems at energies around the Coulomb barrier is one of the most popular topics in the field of nuclear physics. The present status of reactions induced by ^{17}F at energies around the Coulomb barrier is reviewed in this paper. To make a further investigation of the reaction mechanisms of ^{17}F , our group performed the measurements of elastic scattering of $^{17}\text{F}+^{12}\text{C}$, ^{89}Y and ^{208}Pb , as well as the complete kinematics of $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ at energies around the Coulomb barrier. For the elastic scattering, the excitation to the first excited state of ^{17}F cannot be distinguished, hence the results have to be considered as the quasi-elastic scattering. The continuum-discretized coupled-channels (CDCC) calculations were performed to investigate the couplings to the continuum states on the elastic scattering. Both the calculations with and without the couplings to the continuum states can describe the quasi-elastic scattering data properly. The results indicate that, in a wide target-mass range, the couplings to the continuum states of ^{17}F are not significant. For the breakup mechanism, breakup fragments of $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ and ^{208}Pb were measured at energies above the Coulomb barrier. CDCC calculation could reproduce the breakup angular distribution of $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ well. However, it significantly overestimated the results of $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$. The possible reason is that the excitation of the core, ^{16}O , was not taken into account in the calculation. However, the underlying physics needs further study. Within the energy region close to the Coulomb barrier, the breakup reactions of $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ were measured in single and in coincidence. The CDCC and the newly developed three-body model (the IAV model) were adopted to analyze the breakup data. The coincident data could be described well by the CDCC calculations. The sum of CDCC and IAV, which is referred to be as the total breakup, can reproduce properly the angular distributions of ^{16}O . Moreover, the results also indicate that the non-elastic breakup dominates the ^{16}O production. For the fusion measurement, only the results of $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ and ^{208}Pb have been reported so far. The total fusion cross section of $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ was derived by measuring the fusion-evaporated protons and alphas. Compared with $^{16}\text{O}+^{58}\text{Ni}$, an obvious enhancement was observed at the energy below the Coulomb barrier. CDCC calculation indicates that such an enhancement is mainly due to the couplings to the continuum states. While for $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$, the total fusion cross section was deduced by measuring the fusion-fission fragments in coincidence. The fusion excitation function of $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ is almost identical with the stable system $^{19}\text{F}+^{208}\text{Pb}$, indicating that the weakly bound nature of ^{17}F does not play an important role in the fusion of $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$. The underlying physics of the difference between $^{17}\text{F}+^{58}\text{Ni}$ and ^{208}Pb strongly deserves a further investigation. Furthermore, to establish the systematics of the reaction dynamics of ^{17}F , reaction measurements of ^{17}F on a range of targets at energies around and below the Coulomb barrier will be valuable. The results of ^{17}F further indicate that the complete kinematics measurement could be the only promising approach to understand the reaction mechanisms of weakly bound nuclear systems comprehensively and provide the convincing data to promote the development of nuclear reaction theory.

proton drip-line nucleus ^{17}F , energies around the Coulomb barrier, elastic scattering, breakup reaction, fusion reaction

doi: [10.1360/TB-2020-1673](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1673)