

近垒能区质子滴线核 ${}^7\text{Be}$ 反应机制的研究现状及实验进展

常昶¹, 杨磊^{1*}, 林承键^{1,2*}, 马南茹¹, 贾会明¹, 温培威¹, 杨峰¹, 骆天鹏¹, 尹诚¹, 黄志杰¹, 段海瑞¹, 祝颂娴¹

1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413

2. 广西师范大学物理科学与技术学院, 广西核物理与核技术重点实验室, 桂林 541004

* 联系人, E-mail: yang_lei@ciae.ac.cn; cjlin@ciae.ac.cn

2024-09-06 收稿, 2024-12-11 修回, 2024-12-12 接受, 2024-12-13 网络版发表

国家重点研发计划(2022YFA1602302, 2023YFA1606402)、国家自然科学基金(12235020, U2167204, 12175313, 12175314)和稳定支持基础科研计划资助

摘要 近30年来, 弱束缚核的结构性质和反应机制一直是原子核物理研究的热点之一. 近垒能区 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^{11}\text{Be}$ 等丰中子弱束缚核的库仑虹抑制比较明显, 已有一定的系统学规律, 但是对于近垒能区丰质子弱束缚核的实验数据非常缺乏, 且实验结论不一致. 本文聚焦质子滴线核 ${}^7\text{Be}$, 在弹性散射方面, 总结了 ${}^7\text{Be}+{}^7\text{Li}$ 、 ${}^9\text{Be}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{27}\text{Al}$ 、 ${}^{58}\text{Ni}$ 和 ${}^{208}\text{Pb}$ 体系的实验结果. 对于熔合反应, 使用普适熔合函数将不同体系约化比较, 发现在近垒及垒下能区存在截面增强的趋势. 对于破裂反应, 目前符合测量 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 的实验很少, 相关测量结果显示出关联事件极少的特征. 我们使用大立体角覆盖的硅探测器阵列, 在中国科学院近代物理研究所RIBLL1上分别开展了 ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 和 ${}^{209}\text{Bi}$ 靶的实验, 发现两个系统的准弹性散射角分布的库仑虹抑制都不明显, 且 ${}^7\text{Be}$ 的破裂连续态对准弹性散射影响很小, 实验补充了 ${}^7\text{Be}$ 与中重核的反应数据.

关键词 近垒能区, 弱束缚核, 放射性核束, 弹性散射, 熔合反应, 破裂反应

奇特核, 一般指弱束缚的、具有奇特结构(如集团结构、晕/皮结构等)的原子核, 包括大部分的不稳定核以及弱束缚的稳定核 ${}^6,7\text{Li}$ 和 ${}^9\text{Be}$. 我们知道, 稳定原子核每核子平均结合能约8 MeV. 一般地, 结合能小于5 MeV的原子核可以认为是弱束缚核. 当原子核离开稳定线时, 结合能变小, 核内的核子可能自发地形成集团结构, 或者形成松散的晕结构. 可以说, 弱束缚是产生这些奇特结构的首要条件. 在近库仑势垒能区, 核反应的过程与核结构(包括初态、中间态及末态)密切相关. 对于奇特核而言更是如此, 会表现出一些奇特核特有的反应机制, 如破裂、连续态强耦合、

晕/皮或集团的结构效应等, 这极大地改变了反应进程.

${}^7\text{Be}$ 是位于质子滴线上的放射性核, 半衰期为53.2 d, α 分离能为1.586 MeV. ${}^8\text{B}$ 被认为具有质子晕结构, 其质子分离能只有0.138 MeV, 极易破裂成 ${}^7\text{Be}+\text{p}$ ^[1]. 弱束缚核 ${}^7\text{Be}$ 作为 ${}^8\text{B}$ 的核芯, 理解 ${}^7\text{Be}$ 的动力学行为也会帮助理解 ${}^8\text{B}$ 相关的反应机制. 从实验角度来看, ${}^7\text{Be}$ 直接破裂的产物 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 都是带电粒子, 很容易被探测到. 因此, ${}^7\text{Be}$ 是研究近垒能区奇特核反应机制的理想对象. 到目前为止, ${}^7\text{Be}$ 的实验测量相对较少, 其反应机制仍不清楚. 本文简要回顾了 ${}^7\text{Be}$ 反应体系在近垒能区的实验结果, 并介绍了中国原子能科学研究院核反

引用格式: 常昶, 杨磊, 林承键, 等. 近垒能区质子滴线核 ${}^7\text{Be}$ 反应机制的研究现状及实验进展. 科学通报, 2025, 70: 3251–3261

Chang C, Yang L, Lin C, et al. Current research status and experimental progress on the reaction mechanism of proton drip-line nucleus ${}^7\text{Be}$ in the near-barrier energy region (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 3251–3261, doi: 10.1360/TB-2024-0956

应研究组开展的相关研究工作。

1 ^7Be 反应机制的研究现状

1.1 ^7Be 弹性散射研究现状

弹性散射是核碰撞的一个基本过程, 主要发生在两核密度无交叠或者少量交叠的区域. 虽然弹性散射过程比较简单, 但它是研究核-核相互作用以及原子核的基本性质, 如核物质的分布(尺寸、表面弥散等)的基本实验方法. 同时, 通过测量弹性散射微分截面, 可以提取总反应截面, 这对于揭示弱束缚核反应机制至关重要. 此外, 通过测量弹性散射角分布, 还可以进一步研究其他反应过程, 如非弹、破裂、转移等, 对弹性散射的耦合效应. 但是, 由于探测器能量分辨率不足、次级束能散较大等问题的限制, 人们对弱束缚核弹性散射截面的测量往往难以排除其他反应道的贡献, 这样的数据被称为准弹性散射截面. 在广义上, 准弹性散射包括了弹性散射、非弹性散射、少数核子转移等接近弹性散射的周边反应过程. 由于放射性束流强度比稳定束低2~4个量级, 甚至更多, 因此必须使用覆盖大角度范围的探测器测量不同角度, 同时对探测器的能量和位置分辨的要求也更高. 本节总结了目前已发表的 ^7Be 与从轻核 ^7Li 、 ^9Be 、 ^{12}C 到中重核 ^{58}Ni 再到重核 ^{208}Pb 的弹性散射研究现状.

在 $^7\text{Be}+^7\text{Li}$ 体系的研究中, Barua等人^[2,3]利用新德里核科学中心的放射性离子束装置IUAC^[4]进行了质心系能量为9.87和8.87 MeV的准弹性散射测量(包括 ^7Be 的0.429 MeV激发态和 ^7Li 的0.477 MeV激发态). 实验通过 $^1\text{H}(^7\text{Li}, ^7\text{Be})\text{n}$ 反应产生 ^7Be , ^7Be 束流强度为 10^4 pps, 纯度为99%. ^7Li 靶通过在 $10\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳衬上蒸发纯度为99.9%的 ^7Li 制备, 通过测量 α 粒子的能损测得靶厚为 $628\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 束流在靶中的能损导致能量有 ± 0.5 MeV的涨落. 实验采用了一种紧凑高效的 ΔE - E 望远镜探测器系统, 覆盖了 $20^\circ\sim 36^\circ$ 和 $54^\circ\sim 70^\circ$ 的角度范围. 在两种能量的背角处, 弹性散射的角分布比直接弹性过程的截面更高, 可能是由于电荷交换和直接弹性过程的共同作用. 使用考虑了弹性散射和电荷交换的Cotanch和Robson自旋依赖势^[5], 可以很好地描述实验数据.

Verma等人^[6,7]在IUAC测量了 $E_{\text{lab}}=17$ 、19和21 MeV下 $^7\text{Be}+^9\text{Be}$ 体系的弹性散射角分布. 次级束 ^7Be 的产生和探测器设置与 $^7\text{Be}+^7\text{Li}$ 实验类似, 测量的角度范围为 $24^\circ\sim 57^\circ$. 利用文献^[8]中的耦合道反应模型

(coupled-reaction-channels, CRC)对 $^7\text{Be}+^9\text{Be}$ 体系和 $^7\text{Li}+^9\text{Be}$ 体系的准弹性散射角分布进行了分析. 在CRC计算中包括了非弹性激发和相关的转移反应道, 在所有能量下都能较好地描述实验数据. 同时, 弹性散射数据也使用了光学模型进行分析, 发现这两个系统可以用非常相似的能量依赖光学势很好地描述.

Notre Dame大学^[9]和São Paulo大学^[10]的课题组同时测量了 $^7\text{Be}+^{12}\text{C}$ 体系在入射能量 $E_{\text{lab}}=18.8$ MeV时的弹性散射角分布. 两个实验分别在TwinSol装置^[11]和RI-BRAS装置^[12]完成, 且实验条件非常相似, ^7Be 次级束都是通过 $^6\text{Li}^{3+}$ 初级束轰击 ^3He 气体靶产生. 气体靶后的法拉第筒测得的 ^7Be 束流强度为 10^5 pps. 两个实验都是使用 ΔE - E 硅探测器望远镜, 分别覆盖了实验室系 $15^\circ\sim 60^\circ$ 以及 15° , 20° , 25° , 30° 和 35° 的范围. 这两个实验数据互为补充, 结果一致. 图1(a)中研究人员使用Woods-Saxon势和São Paulo double-folding势(SPP)进行光学模型分析, 发现这两种势都能够很好地描述弹性散射角分布. 为了研究其他反应道对弹性散射的影响, 还进行了连续态离散耦合道(continuum-discretized coupled-channel, CDCC)计算, 结果表明无论是否考虑连续态耦合, 都能够很好地描述实验数据, 说明连续态耦合对弹性散射的贡献较小, 破裂效应在该体系的相互作用中并不显著. Kundalia等人^[13]报道了在 $E_{\text{lab}}=35$ MeV时 $^7\text{Be}+^{12}\text{C}$ 体系的准弹性散射角分布. 实验在欧洲核子研究中心的HIE-ISOLDE放射性核束装置^[14]上进行, 使用 ΔE - E 硅探测器望远镜, 可以覆盖 $8^\circ\sim 25^\circ$ 和 $127^\circ\sim 165^\circ$ 的范围. 图1(b)为研究人员使用Woods-Saxon势的光学模型对实验数据进行了拟合, 发现整体上拟合较好, 但在 75° 左右和 100° 之后存在偏差. 为了进一步研究弹散数据并估算破裂效应对弹性散射的影响, 研究人员使用了密度依赖的有效M3Y势, 发现拟合结果在大角度下更好地描述了实验数据. 此外, 研究人员还进行了CDCC计算, 计算结果显示 ^7Be 的破裂截面占总截面的9.12%.

$^7\text{Be}+^{27}\text{Al}$ 体系的实验最早于2006年在新德里IUAC上完成^[16]. 实验中, 通过 $^1\text{H}(^7\text{Li}, ^7\text{Be})\text{n}$ 反应产生了 $E_{\text{lab}}=17$ 、19和21 MeV的 $^7\text{Be}^{4+}$ 束流, 束流纯度为99%, 能量展宽为 ± 0.5 MeV. 实验使用气体电离室作为 ΔE 探测器, 第二层使用二维位置灵敏探测器, 最终探测器的角度覆盖范围为 $\theta_{\text{c.m.}}=12^\circ\sim 43^\circ$. 实验测量了准弹性散射(包括 ^7Be 的第一激发态0.429 MeV和 ^{27}Al 的第一激发态0.840 MeV)和单质子转移反应. 对准弹性散射数据进

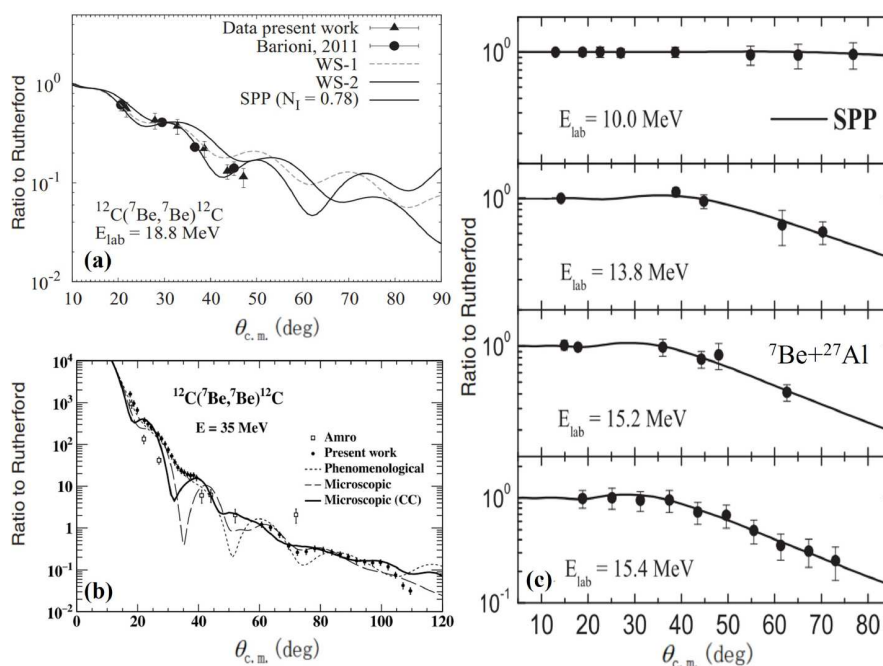


图1 ${}^7\text{Be}+{}^{12}\text{C}$ 体系在18.8 MeV(a)^[9]和35 MeV(b)^[13]的准弹性散射角分布, 以及 ${}^7\text{Be}+{}^{27}\text{Al}$ 体系在10.0、13.8、15.2和15.4 MeV的准弹性散射角分布(c)^[15]

Figure 1 The quasi-elastic scattering angular distributions of the ${}^7\text{Be}+{}^{12}\text{C}$ system at 18.8 MeV (a)^[9] and 35 MeV (b)^[13], and the quasi-elastic scattering angular distributions of the ${}^7\text{Be}+{}^{27}\text{Al}$ system at 10.0, 13.8, 15.2 and 15.4 MeV (c)^[15]

行了光学模型分析, 并通过光学模型计算得到了总反应截面, 再减去单质子转移截面后得到了熔合截面, 发现这些能点的熔合截面与耦合道计算得到的结果一致. 2014年, Morcelle等人^[15]分别在São Paulo大学的RIBRAS装置和Notre Dame大学的TwinSol装置上进行了实验. 在RIBRAS使用了 $E_{\text{lab}}=12.3$ 和 17.2 MeV的 ${}^7\text{Be}$ 次级束, 而在TwinSol的10 MV Tandem中进行了 $E_{\text{lab}}=15.9$ 和 19.7 MeV的测量. 两次实验都通过 ${}^3\text{He}({}^6\text{Li}, {}^7\text{Be})$ 单质子转移反应产生次级束 ${}^7\text{Be}$, 实验使用了 ${}^{27}\text{Al}$ 靶和 ${}^{197}\text{Au}$ 靶, 因为在实验能量范围内, ${}^7\text{Be}$ 与金靶的散射为纯卢瑟福散射, 可以用来归一. 实验使用 ΔE - E 硅探测器望远镜来探测散射的带电粒子. 相互作用势的能量依赖性分析通过两种不同的方法进行: 第一种使用双折叠圣保罗势, 第二种使用Woods-Saxon势. 数据拟合过程仅使用两个自由参数, 即实部和虚部的归一化系数, 拟合结果见图1(c). 从这两种方法来看, 相互作用势是与能量无关的. 然而, 由于使用了厚靶以及数据没有覆盖足够大的角度范围, 能量依赖性分析的结论存在较大的不确定性.

Aguilera等人^[17]在美国圣母大学的TwinSol装置上测量了 ${}^7\text{Be}+{}^{58}\text{Ni}$ 体系的准弹性散射角分布, ${}^7\text{Be}$ 的入射

能量分别为15.1、17.1、18.5、19.9和21.4 MeV. 实验中, ${}^7\text{Be}$ 次级束是通过 ${}^1\text{H}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})\text{n}$ 反应产生的, 次级束的流强为 7.3×10^4 pps, 能量展宽为1.11 MeV, 实验所用 ${}^{58}\text{Ni}$ 靶的厚度为 0.924 mg/cm² (最低能点使用的是 0.98 mg/cm²). 基于弹性散射数据, 他们研究了光学势的能量依赖性. 由于实验结果的误差较大, 无法明确判断 ${}^7\text{Be}+{}^{58}\text{Ni}$ 体系中是否存在反常阈异常(abnormal threshold anomaly, ATA). 然而, 结合相应的熔合数据分析后, 得出的结论是该体系实际上表现出的是更为常见的阈异常(threshold anomaly, TA)^[18]. 之后, Mazzocco等人^[19]测量了 ${}^7\text{Be}+{}^{58}\text{Ni}$ 反应在 $E_{\text{lab}}=22$ MeV时的弹性散射角分布. 该实验的 ${}^7\text{Be}$ 次级束是由意大利国家核研究院的EXOTIC装置^[20]产生的. EXOTIC装置自2004年起开始运行, 已经提供了 ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^8\text{Li}$ 、 ${}^8\text{B}$ 、 ${}^{15}\text{O}$ 和 ${}^{17}\text{F}$ 的次级束, 能量在2~6 MeV/u之间, 强度在 10^3 pps(${}^8\text{B}$)~ 3×10^5 pps(${}^7\text{Be}$ 、 ${}^8\text{Li}$ 和 ${}^{17}\text{F}$)之间. 实验通过3个 ΔE - E 望远镜鉴别反应产物. 该阵列现在是GLORIA探测器阵列^[20]的一部分. 实验中, 同样使用 ${}^1\text{H}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})\text{n}$ 反应产生 ${}^7\text{Be}$ 次级束, 次级束流强为 2×10^5 pps, 纯度为99%, ${}^{58}\text{Ni}$ 靶厚度为 0.924 mg/cm². 他们使用FRESKO^[21]程序进行光学模型计算, 其中势参数来自Cook的全局 ${}^7\text{Li}$ 参

数化^[22], 同时与Aguilera等人^[17]测量的数据比较, 图2(a)黑线为计算结果. 测试计算表明, 靶核1.454 MeV的激发态对准弹性散射的贡献可以完全忽略, 而弹核0.429 MeV的激发态只在大于80°时会有贡献, 并且准弹散和弹散的差异与实验的误差相当. 故而没有对参数进行调整, 可以看到实验数据和计算之间的一致性非常好, 光学模型计算的总反应截面为585 mb. Mazzocco等人^[19]还进行了CDCC计算, 计算所采用的 $^3\text{He}+^4\text{He}$ 集团模型与文献^[23]中的相似. 在这个框架内, 需要考虑靶与单个碎片之间以及两个碎片之间的光学势. $^4\text{He}-^{58}\text{Ni}$ 之间的相互作用是通过Woods-Saxon势拟合文献中12 MeV的 $^4\text{He}+^{58}\text{Ni}$ 弹性散射数据得到的^[24], 对于 $^3\text{He}-^{58}\text{Ni}$ 的相互作用, 来自文献^[25]. $^3\text{He}+^4\text{He}$ 集团之间的内部相互作用取自文献^[23]. 在没有使用自由参数的情况下, 计算结果也能够很好地描述实验数据.

Mazzocco等人^[26]测量了 $^7\text{Be}+^{208}\text{Pb}$ 体系在 $E_{\text{lab}}=37.4$ 、40.5和42.2 MeV下的弹性散射, 该实验同样在EXOTIC装置完成. ^7Be 同样使用 $^1\text{H}(^7\text{Li}, ^7\text{Be})\text{n}$ 反应产生. 40.5±0.4 MeV能点的低温氢气靶温度为90 K, 气压

为1 bar, 37.4±0.5 MeV通过在第一个PPAC后面加入12.5 μm厚的铝降能片来实现. 最后, 再将气体靶室升温至室温并保持相同的气压下得到42.2±0.4 MeV的 ^7Be 次级束. 次级束流强度在中等能量下为 $(2\sim3)\times 10^5$ pps, 在最低和最高能量下分别为约 10^5 pps和 $(7\sim8)\times 10^4$ pps, 所有能量下的束流纯度都约为99%. 实验使用 ^7Be 束流轰击自支撑的 ^{208}Pb 靶(厚度为1 mg/cm², 丰度为99.57%). 探测器的角覆盖范围如下: 52°~85°、95°~128°和134°~171°. 数据首先使用FRESCO程序进行光学模型拟合, 在拟合过程中, 将数据视为纯弹性散射. 计算发现, Cook提出的全局 ^6Li 参数比 ^7Li 参数更好地描述了 ^7Be 数据, 结果表明, 仅通过调整实部和虚部的势垒高度就足以在每个能量下获得对数据的良好描述, 见图2(b). $^7\text{Be}+^{208}\text{Pb}$ 的CDCC计算基于 $^3\text{He}+^4\text{He}$ 集团模型, 除了考虑束缚的1/2⁻第一激发态($E_{\text{ex}}=0.429$ MeV), 阈上还包括两个 $L=3\hbar$ 共振态(7/2⁻, $E_{\text{ex}}=4.57$ MeV和5/2⁻, $E_{\text{ex}}=6.73$ MeV)以及 $L=0\sim 4\hbar$ 的非共振连续态. CDCC计算在不调整参数的情况下很好地描述了42.2和40.5 MeV能量下的散射数据, 而对37.4 MeV的数据, 则需要调整 $^3\text{He}+^{208}\text{Pb}$ 的光学势. 通过测试不同的 ^3He

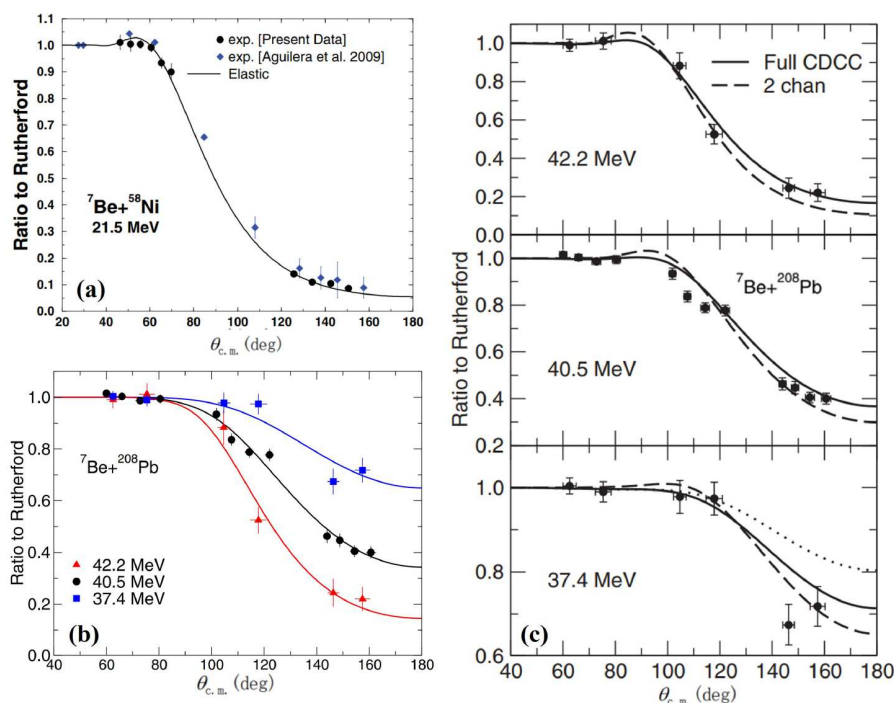


图2 (网络版彩色)(a) $^7\text{Be}+^{58}\text{Ni}$ 体系的准弹性散射角分布^[19]; (b) $^7\text{Be}+^{208}\text{Pb}$ 体系在37.4、40.5和42.2 MeV的准弹性散射角分布和光学模型计算^[26]; (c) $^7\text{Be}+^{208}\text{Pb}$ 体系相同能点的CDCC全耦合道计算(实线)与只包含基态和第一激发态的计算(虚线)^[26]

Figure 2 (Color online) (a) Quasi-elastic scattering angular distribution for the $^7\text{Be}+^{58}\text{Ni}$ system^[19]; (b) quasi-elastic scattering angular distributions and optical model calculations for the $^7\text{Be}+^{208}\text{Pb}$ system at 37.4, 40.5, and 42.2 MeV^[26]; (c) full CDCC calculations (solid lines) and two-channel case (dashed lines) for the $^7\text{Be}+^{208}\text{Pb}$ system at the same energies^[26]

和 $^4\text{He}+^{208}\text{Pb}$ 光学势,发现选择适当的 $^3\text{He}+^{208}\text{Pb}$ 势(即对应 ^7Be 束流能量的3/7)对准确描述散射数据至关重要.图2(c)中还展示了3个能点的CDCC计算(实线)以及只包含 ^7Be 基态和第一激发态的计算(虚线),可以看到两个计算存在细微差异,说明破裂连续态耦合对弹性散射存在影响.通过CDCC计算, Keeley等人^[27]在相似质心能量下对比了 $^7\text{Li}+^{208}\text{Pb}$ 和 $^7\text{Be}+^{208}\text{Pb}$ 体系.结果表明, $^7\text{Be}+^{208}\text{Pb}$ 体系的弹性散射角分布与 $^7\text{Li}+^{208}\text{Pb}$ 不同,但与 $^6\text{Li}+^{208}\text{Pb}$ 的弹性散射角分布相似.作者认为, ^7Be 更类似于 ^6Li ,而不是其镜像核 ^7Li ,这种现象可能归因于 ^7Be 更低的破裂阈值.

总体而言,目前关于质子滴线核 ^7Be 的实验数据较少,现有数据表明其光学势并未表现出反常阈异常,而是符合常见的阈异常.光学模型除 $^7\text{Be}+^7\text{Li}$ 的轻体系在背角散射中受到明显的电荷交换影响外,其他体系均可通过光学模型很好地描述.对于 $^7\text{Be}+^{58}\text{Ni}$ 和 $^7\text{Be}+^{208}\text{Pb}$ 体系,研究结果有所不同:在 ^{58}Ni 体系中,全局 ^7Li 光学势参数能够很好地描述反应,而在重靶 ^{208}Pb 中, ^6Li 的全局光学势参数适用性更强,目前还没有统一的解释.此外, ^7Be 的准弹性散射未显示出显著的库仑虹抑制,CDCC计算也表明 ^7Be 的破裂连续态耦合对弹性散射的影响不明显.

1.2 ^7Be 的熔合研究现状

近几十年,近垒能区的熔合截面已被广泛研究^[28].研究表明,耦合道效应极大地影响了近垒能区熔合截面,尤其垒下熔合截面增强明显.与一维势垒隧穿的预测相比,可能产生数量级的垒下熔合增强.转移耦合也可能增强垒下熔合截面,而且转移的中间态可能作为核熔合的一个门槛态.在关于这个问题的大多数工作中,需要对不同系统的熔合截面进行比较.由于反应系统的属性,如原子核质量和电荷等,会影响它们的库仑势垒,因此需要对数据进行约化后比较.同时随着弱束缚核研究的兴起,这些弱束缚核的破裂阈值不同,往往会影响熔合截面和总反应截面,约化的方法也非常重要.系统开展约化方法的研究可以为核反应模型的发展提供重要的参考和验证,促进模型的精细化和更加广泛的适用性,以及可以预测不同反应道的产额、能谱等性质,为实验研究提供指导,设计新的核反应实验,进一步验证和推广理论模型. Canto等人^[29]引入了一种新的约化方法,根据Wong对熔合截面的近似得到:

$$\sigma_F^W = R_B^2 \frac{\hbar\omega}{2E} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{2\pi(E - V_B)}{\hbar\omega} \right) \right], \quad (1)$$

其中, R_B 、 V_B 、和 $\hbar\omega$ 分别为势垒半径、高度和曲率.为了获得与体系无关的量,采用以下变换:

$$x = \frac{E - V_B}{\hbar\omega}, \quad (2)$$

$$F(x) = \sigma_F \left[\frac{2E}{\hbar\omega R_B^2} \right], \quad (3)$$

得到的 $F(x)$ 表达式为

$$F(x) = \ln[1 + \exp(2\pi x)], \quad (4)$$

约化的能量用 x 表示, $F(x)$ 被命名为普适熔合函数(universal fusion function, UFF).

目前已有 ^7Be 与不同质量靶核的熔合截面的测量结果,包括较轻的 ^{27}Al ^[16]、中等质量的 ^{58}Ni ^[30]和更重的 ^{238}U ^[31].在 ^{27}Al 靶的实验中,总反应截面是从准弹性散射中推导出来的,并减去了测得的单质子剥离截面从而得到熔合截面.因此,得到的截面与总熔合(total fusion, TF)截面对应.当入射能量 E_{lab} 分别为17、19和21 MeV时,测得的熔合截面分别为 635 ± 76 、 858 ± 94 和 922 ± 92 mb.与相同靶核的镜像核 ^7Li 的熔合数据相比,结果显示了相似的趋势.

在 ^{58}Ni 靶的实验中,通过测量蒸发质子,推导出了总熔合截面.在质心能量 $E_{\text{c.m.}}$ =13.9、15.0、16.6、17.4、17.9和19.0 MeV下,测得的熔合截面分别为 26 ± 3 、 61 ± 7 、 165 ± 32 、 246 ± 78 、 292 ± 46 和 395 ± 116 mb.实验结果显示,即使在能量高于库仑势垒的情况下,熔合截面仍然高于UFF的预测值.

在 ^{238}U 靶的实验中,测量了熔合裂变过程.使用40个硅探测器包围铀靶,并通过探测产物在反方向飞行的符合事件来确定裂变特征.该实验还探测到了与裂变同时发射的轻带电粒子,通过与其反符合得到完全熔合(complete fusion, CF),进而得出完全熔合截面 σ_{CF} .

3个体系的约化总熔合截面如图3所示,同时包括 ^{238}U 的CF数据用来对比.该图显示出3个系统的总熔合截面(σ_{TF})(^{238}U 为裂变截面 σ_{fis})具有良好的一致性,在势垒下的增强因子相当显著(约为2.5),并且在略高于势垒的能量下也存在增强的迹象.例如,当 $x=0.35$ 时,对应的因子约为1.5,这分别对应于 $^7\text{Be}+^{58}\text{Ni}$ ($^7\text{Be}+^{238}\text{U}$)体系的势垒上方1.1 MeV(1.8 MeV).这表明近垒及垒下增强的主要机制可能与 ^7Be 弹核有关,而与靶核无关.近垒和垒下能区的熔合截面增强可能是因为转移或者

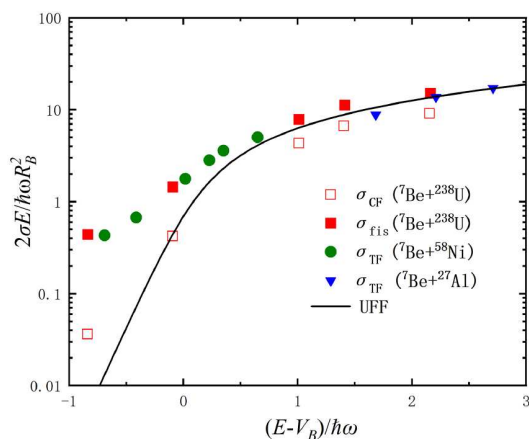


图3 (网络版彩色) ${}^7\text{Be}+({}^{27}\text{Al}, {}^{58}\text{Ni}, {}^{208}\text{Pb}, {}^{238}\text{U})$ 的约化总融合截面, 同时将 ${}^7\text{Be}+{}^{238}\text{U}$ 的完全融合截面用来比较, 图中实线为UFF

Figure 3 (Color online) Reduced total fusion cross sections for ${}^7\text{Be}+({}^{27}\text{Al}, {}^{58}\text{Ni}, {}^{208}\text{Pb}, {}^{238}\text{U})$. In the case of the ${}^{238}\text{U}$ target, respective CF data are also shown. The solid curve is the UFF

破裂反应道的耦合效应所导致, 其深层的物理原因还需要进一步研究。

1.3 ${}^7\text{Be}$ 的破裂研究现状

破裂反应是弱束缚核的特有机制, 当弱束缚核破裂之后会对弹性散射、转移反应和融合反应等反应道产生影响, 而破裂碎片也会与靶核融合和转移等产生新的反应道, 同时各种反应道可能还会相互影响, 研究起来非常复杂。核子破裂反应还涉及连续态的贡献, 当核子破裂后, 可以认为是一个开放量子系统, 连续态的耦合也非常重要。因此, 为了深入研究破裂反应, 更需要明确的破裂碎片关联来重构破裂过程, 进而深入理解 ${}^7\text{Be}$ 的破裂反应动力学。

在文献[19]的 ${}^7\text{Be}+{}^{58}\text{Ni}$ 实验中, 并没有观察到 ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ 的关联事件, 表明破裂截面较低。文献给出了破裂过程的截面上限, 并且通过 CDCC 计算, 在 $E_{\text{lab}}=21.5$ MeV 时估算出破裂截面为 $\sigma_{\text{bu}}=10.8$ mb。计算表明, 破裂过程对实验中直接产生的 ${}^3\text{He}$ (${}^4\text{He}$) 的产额贡献分别为 31%(24%), 这些数据是在扣除融合蒸发 α 后得出的。后者是通过使用 PACE2 拟合在后角测量的 ${}^4\text{He}$ 角分布得到的, 在该范围内的 ${}^4\text{He}$ 主要来源于融合蒸发。而 1n 拾取(1n 剥离)对测得的 ${}^4\text{He}$ 的贡献分别为 27%(22%)。其余约 26% 的 ${}^4\text{He}$ 集中在 $50^\circ\sim 70^\circ$, 被归因于 ${}^3\text{He}$ 的蒸发过程。

在文献[31]中, 对 ${}^7\text{Be}$ 与 ${}^{238}\text{U}$ 在 $E_{\text{c.m.}}=54.4$ 、50.5、48.4、42.7 和 38.8 MeV 的反应进行了测量, 重点关注融合裂变事件。观察到的轻带电粒子与裂变事件同时发

生, 排除了大多数破裂事件, 因为裂变过程需要将大量能量传递给靶核。然而, 与 ${}^7\text{Be}+{}^{58}\text{Ni}$ 实验的结论类似, 文献认为最有可能的 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 是由集团转移引起的。在文献[32]的 ${}^7\text{Be}+{}^{12}\text{C}$ 实验中, 通过 ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ 的符合来考察 ${}^7\text{Be}$ 的破裂过程。实验观察到的 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 符合事件很少, 也并未对破裂截面给出上限估计。在 ${}^{12}\text{C}({}^7\text{Be}, {}^3\text{He})$ 反应中观察到了强烈的选择性, 有显著的 α 转移与 ${}^{12}\text{C}$ 结合填充到 ${}^{16}\text{O}$ 激发态。这些特征表明, 直接的 α 转移是导致观察到的 ${}^3\text{He}$ 产额的主要机制, 这与前述 ${}^7\text{Be}+{}^{58}\text{Ni}$ 实验的结论一致。目前 ${}^7\text{Be}$ 符合测量的实验数据极少, 现有的数据显示出 ${}^7\text{Be}$ 破裂截面较低, ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 大多是由集团转移引起。

2 ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$, ${}^{209}\text{Bi}$ 实验研究

目前仍然缺少 ${}^7\text{Be}$ 与中重质量靶核的反应数据, 同时这种体系的库仑相互作用和核相互作用都起着重要作用, 方便我们研究两者之间的相干效应。中国原子能科学研究院核反应研究组开展了 ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 和 ${}^{209}\text{Bi}$ 实验研究。两次实验都是在中国科学院近代物理研究所的放射性离子束流线(RIBLL1)[33-35]上完成的。RIBLL1 是产生中能重离子放射性束流(RIB)的装置和高精度放射性核束物理的实验谱仪, RIBLL1 的立体角接收度 >6.5 msr, 动量接收度达 10%。实验使用 ${}^7\text{Li}^{3+}$ 的初级束, 通过 ${}^1\text{H}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})\text{n}$ 反应($Q=-1.64$ MeV)产生 ${}^7\text{Be}$ 次级束。氢气靶长 80 mm, 前后有窗为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的 Havar 膜, 气压为 800×10^2 Pa, 液氮制冷, 温度约为 80 K。两个厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 的塑料闪烁体(C_9H_{10})分别安装在 RIBLL1 的 T_1 和 T_2 靶室, 用来测量粒子的飞行时间(time of flight, TOF)。

2.1 实验设置

${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 实验初级束 ${}^7\text{Li}^{3+}$ 的能量为 60.2 MeV, 流强为 150~280 pA。经过 RIBLL1 的纯化和传输, 次级束进而轰击 $2.78\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 厚的自支撑同位素靶, 丰度为 98%, 靶中心能量为 48.05 MeV。次级束流强为 1×10^5 pps, 纯度约为 90%, 主要污染物为初级束 ${}^7\text{Li}$ 。阵列利用由 9 组硅望远镜组成的大立体角探测器阵列测量反应产物, 见图 4(a)。阵列可分为前角和后角两部分: 前角有四组望远镜, 每组望远镜包括 3 层硅探测器: 第一层和第二层是单面硅条探测器(single-sided silicon strip detector, SSSD), 厚度分别为 20 和 $300\ \mu\text{m}$, 然后是厚度为 $1500\ \mu\text{m}$ 的四分硅探测器(quadrant silicon detector, QSD); 后角 4 组望远镜有着不同的结构: 第一层是

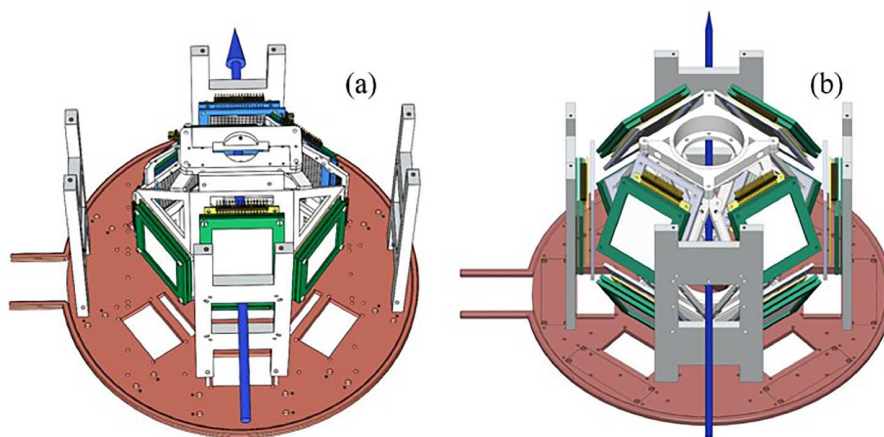


图4 (网络版彩色)(a) ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 实验阵列设计图; (b) ${}^7\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}$ 实验阵列设计图. 图中蓝色线为束流线

Figure 4 (Color online) Experimental array design for ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ (a) and ${}^7\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}$ (b), with blue lines indicating the beam line

40 μm 双面硅条探测器(double-sided silicon strip detector, DSSD), 其次是两层厚的QSD, 厚度分别为300和1500 μm . SSSD和DSSD上每根硅条的宽度为3 mm, 间隙是0.1 mm, 灵敏探测面积是48 mm $\times$ 48 mm, QSD的灵敏面积为50 mm $\times$ 50 mm. 该阵列可以覆盖 $0^\circ\sim 21.2^\circ$, $29.8^\circ\sim 68.8^\circ$ 和 $101.7^\circ\sim 164.2^\circ$, 立体角覆盖为36% 4π .

${}^7\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}$ 实验初级束 ${}^7\text{Li}^{3+}$ 的能量为56.9 MeV, 流强为200(± 30) pnA. 经过RIBLL1的纯化和传输, 次级束进而轰击0.977 mg/cm 2 厚的自支撑Bi靶, 靶中心能量为50.5 MeV, 次级束纯度约为90%. 实验同时设置了65 μm 厚的Al降能片以达到42.0 MeV能点. 阵列与上一个设置不同, 有10组硅望远镜, 如图4(b). 阵列可分为前角、中间和后角三部分, 阵列立体角覆盖30.6% 4π . 前角有4组望远镜, 可以覆盖 $25^\circ\sim 70^\circ$, 每组望远镜包括3层硅探测器, 从前到后分别为: DSSD(40 μm)+QSD(300 μm)+QSD(1500 μm); 中间有左右两组不同的望远镜, 左边为SSSD(20 μm)+SSSD(300 μm)+QSD(1500 μm), 右边为DSSD(40 μm)+QSD(300 μm)+QSD(1500 μm), 可以覆盖 $77.2^\circ\sim 103^\circ$. 后角4组望远镜覆盖 $108^\circ\sim 154^\circ$, 其中3组望远镜组成与前角一致, 另外一组为SSSD(20 μm)+SSSD(300 μm)+QSD(1500 μm)的结构.

实验前置放大器采用本组自研高性能电荷灵敏前置放大器^[36], 与探测器密切配合, 处于真空靶室中, 以降低电子学噪声. 本套探测系统具有模块化、设计紧凑、几何效率高的优点. 数据获取系统的触发条件是所有硅探测器的或逻辑(${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 实验在 0° 处的硅探测器的触发做了100分除, 避免计数率太高使得获取堵

死). 望远镜总能量分辨约为3.1%, 不足以分辨 ${}^7\text{Be}$ 的第一激发态($E_{\text{ex}}=0.429$ MeV, $J^\pi=1/2^-$). 因此, 得到的弹性散射结果被认为是准弹性散射.

2.2 结果分析

光学模型(optical model, OM)是核反应理论中最基础的理论模型, 主要用来描述核反应的独立粒子阶段, 这个阶段也是所有核反应都要经历的阶段. 光学模型认为核碰撞过程可以描述为在弹靶系统组成的平均场中的运动, 平均的核势场可以用一个复数的有效势来表示:

$$U_{\text{N}}(r) = V(r) + iW(r), \quad (5)$$

其中, $V(r)$ 表示透射或者反射, 虚部 $W(r)$ 表示吸收, 这个过程与光在介质中的传播类似. 基于OM, 我们用FRESKO程序^[21]对实验角分布做了拟合. FRESKO是一个耦合道计算程序, 基于直接核反应理论框架, 求解被认为在反应中起重要作用的原子核某种组分以及它们的相互作用势的薛定谔方程. 光学模型拟合可以很好地描述实验数据, 拟合结果见图5虚线. 对比发现两个体系的表面核力和库仑力相互干涉导致的库仑虹抑制不明显, 拟合参数见表1, 其中 V_0 、 W_0 分别为实部、虚部深度, r_0 和 a_0 分别为作用势的半径和弥散参数.

连续态离散耦合道(CDCC)方法是研究弱束缚核诱发核反应机制的强有力工具, 这些弱束缚核反应受到破裂效应的显著影响. ${}^7\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}$ 体系在CDCC计算时, 对于 ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ 基态的分波设置, 我们根据理论和文献^[37]将其设定为 $n=2$, $l=1$, 束缚能为1.58 MeV. 在考虑连续态时, 对于bin的划分, 我们考虑了分波 l 的取值为

表 1 光学模型拟合参数

Table 1 Optical model fitting parameter

体系	$V_0(\text{MeV})$	$r_{0V}(\text{fm})$	$a_V(\text{fm})$	$W_0(\text{MeV})$	$r_{0W}(\text{fm})$	$a_W(\text{MeV})$
${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}(48.5\text{ MeV})$	39.57	1.14	0.77	49.00	1.06	0.83
${}^7\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}(42.0\text{ MeV})$	34.32	1.21	0.62	28.21	1.24	0.7
${}^7\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}(50.5\text{ MeV})$	19.16	1.21	0.62	40.32	1.24	0.7

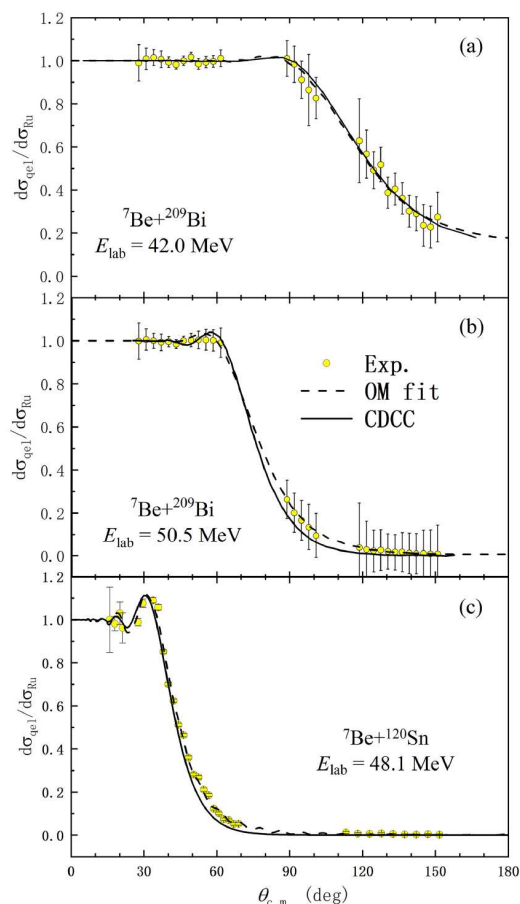


图 5 (网络版彩色) ${}^7\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}$ 体系在 42.0 MeV(a) 和 50.5 MeV(b) 能量下的准弹性散射角分布, 以及 ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 体系在 48.05 MeV 能量下的准弹性散射角分布(c), 图中实线为 CDCC 计算, 虚线为光学模型拟合, 实验结果用黄色点表示

Figure 5 (Color online) Quasi-elastic scattering angle distributions of the ${}^7\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}$ system at 42.0 MeV(a) and 50.5 MeV(b) energies. (c) Quasi-elastic scattering angle distributions of the ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ system at the 48.05 MeV energy. In the figure, the solid lines represent the CDCC calculation, the dashed lines represent the optical model fit, and the experimental results are indicated by yellow points

0~4, 能量范围为 0.001~18.001 MeV, bin 的能量间隔为 4 MeV. ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 体系的 CDCC 计算中, ${}^7\text{Be}={}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ 的相互作用选自文献[25], 核力的中心项与自旋轨道耦合项均为高斯形式, 束缚态计算的参数为 $V=83.78\text{ MeV}$, $V_{\text{so}}=1.003\text{ MeV}$, $\alpha=0.15747\text{ fm}^{-2}$, 库仑力半径为 $R_C=3.095\text{ fm}$. s 波($l=0$)的连续态使用的中心势深度参数 $V=66.10\text{ MeV}$, 根据文献[38]中的说明, 该深度也可以用于分波 $l=2, 4$ 的连续态. 计算时, 连续态上界取 10 MeV, 考虑 $l=0\sim 4$ 的连续态. 计算结果见图 5 实线, CDCC 可以较好地描述实验数据, 说明了 ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ 集团结构的有效性. 在前角区, 库仑虹抑制不明显, 说明 ${}^7\text{Be}$ 的破裂道耦合效应较弱. 在后角区, CDCC 计算与实验值存在差异, 这也在之前的研究中出现过, 可能是非弹性过程和多步过程等因素的影响, 还需要进一步研究.

3 总结与展望

对于弱束缚核 ${}^7\text{Be}$, 在近垒能区准弹性散射的连续态耦合效应较弱, 对总反应截面的贡献很小, 这可能是由于丰质子核反应需要跨过库仑势垒, 同时丰质子核可能会被靶核的库仑场极化. 使用 ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ 集团结构的 CDCC 计算大多可以很好地描述实验数据, 这也一定程度说明该结构的有效性. 对于融合反应, 近垒及垒下都有一定程度的增强, 可能是因为转移或者多种反应道的耦合, 还需要考虑额外的机制. 对于破裂反应而言, 需要符合测量才能敲定, 但这样的测量也是目前急需补充的. 目前较少的实验数据显示 ${}^7\text{Be}$ 的破裂事件较少, 大多数的 ${}^3\text{He}$ 来自 α 转移. 在我们的 ${}^7\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}$ 实验中, 看到了一些 ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ 关联事件, 数据还在进一步分析处理中, 可以帮助我们进一步理解 ${}^7\text{Be}$ 破裂过程以及其对其他反应道的影响.

参考文献

- Yang L, Lin C J, Yamaguchi H, et al. Breakup of the proton halo nucleus ${}^8\text{B}$ near barrier energies. *Nat Commun*, 2022, 13: 7193
- Barua S, Das J J, Jhingan A, et al. Study of elastic scattering of mirror nuclei ${}^7\text{Be}+{}^7\text{Li}$. *Nucl Phys A*, 2004, 746: 467–470
- Barua S, Das J J, Jhingan A, et al. Investigation of scattering between mirror nuclei ${}^7\text{Be}$ and ${}^7\text{Li}$. *Phys Rev C*, 2005, 72: 044602

- 4 Das J J, Sugathan P, Madhavan N, et al. Development of a radioactive ion beam facility using 15 UD tandem accelerator at NSC. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 1998, 24: 1371–1375
- 5 Cotanch S, Robson D. DWBA with charge exchange and isospin. *Nucl Phys A*, 1973, 209: 301–322
- 6 Verma S, Das J J, Jhingan A, et al. Measurements of elastic scattering for ^7Be , $^7\text{Li}+^9\text{Be}$ systems and fusion cross sections for $^7\text{Li}+^9\text{Be}$ system. *Eur Phys J Spec Top*, 2007, 150: 75–78
- 7 Verma S, Das J J, Jhingan A, et al. Interaction of loosely bound radioactive ^7Be and stable ^7Li with ^9Be . *Eur Phys J A*, 2010, 44: 385–392
- 8 Rudchik A T, Kemper K W, Romanyshyn V O, et al. Comparison of ^7Li , $^7\text{Be}+^9\text{Be}$ elastic scattering in the coupled-reaction-channels approach. *Eur Phys J A*, 2009, 41: 31–37
- 9 Zamora J C, Guimarães V, Barioni A, et al. $^{7,9,10}\text{Be}$ elastic scattering and total reaction cross sections on a ^{12}C target. *Phys Rev C*, 2011, 84: 034611
- 10 Barioni A, Zamora J C, Guimarães V, et al. Elastic scattering and total reaction cross sections for the ^8B , ^7Be , and $^6\text{Li}+^{12}\text{C}$ systems. *Phys Rev C*, 2011, 84: 014603
- 11 Becchetti F D, Lee M Y, O'Donnell T W, et al. The TwinSol low-energy radioactive nuclear beam apparatus: Status and recent results. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment*, 2003, 505: 377–380
- 12 Lichtenthäler R, Lepine-Szily A, Guimaraes V, et al. Radioactive ion beams in Brazil (RIBRAS). In: The 4th International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses: Refereed and Selected Contributions. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. 733–736
- 13 Kundalia K, Gupta D, Ali S M, et al. Study of elastic and inelastic scattering of $^7\text{Be}+^{12}\text{C}$ at 35 MeV. *Phys Lett B*, 2022, 833: 137294
- 14 Catherall R, Andreazza W, Breitenfeldt M, et al. The ISOLDE facility. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2017, 44: 094002
- 15 Morcelle V, Lichtenthäler R, Linares R, et al. Elastic scattering and total reaction cross section for the $^7\text{Be}+^{27}\text{Al}$ system at near-barrier energies. *Phys Rev C*, 2014, 89: 044611
- 16 Kalita K, Verma S, Singh R, et al. Elastic scattering and fusion cross sections for ^7Be , $^7\text{Li}+^{27}\text{Al}$ systems. *Phys Rev C*, 2006, 73: 024609
- 17 Aguilera E F, Martinez-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
- 18 Gómez Camacho A, Aguilera E F, Martínez Quiroz E, et al. The Threshold Anomaly of weakly bound projectiles from recent elastic scattering measurements around the Coulomb barrier. *Nucl Phys A*, 2010, 833: 156–171
- 19 Mazzocco M, Torresi D, Pierrousakou D, et al. Direct and compound-nucleus reaction mechanisms in the $^7\text{Be}+^{58}\text{Ni}$ system at near-barrier energies. *Phys Rev C*, 2015, 92: 024615
- 20 Farinon F, Glodariu T, Mazzocco M, et al. Commissioning of the EXOTIC beam line. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2008, 266: 4097–4102
- 21 Shin S W, Porras P, Yegneswara V, et al. Fresco: Modular composable security services for software-defined networks. In: 20th Annual Network & Distributed System Security Symposium. NDSS, 2013
- 22 Cook J. Global optical-model potentials for the elastic scattering of $^6,7\text{Li}$ projectiles. *Nucl Phys A*, 1982, 388: 153–172
- 23 Lee L L, Schiffer J P. Studies of elastic scattering of protons, deuterons, and alpha particles from isotopes of Cu, Ni, and Fe. *Phys Rev*, 1964, 134: B765–B772
- 24 Fick D, Brown R E, Gruebler W, et al. Elastic scattering of polarized tritons from ^{12}C , ^{15}V , and ^{58}Ni at 9 and 11 MeV. *Phys Rev C*, 1984, 29: 324–327
- 25 Buck B, Merchant A C. Cluster model of $A=7$ nuclei revisited, and the astrophysical S factors for $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ and $^3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ at zero energy. *J Phys G-Nucl Phys*, 1988, 14: L211–L216
- 26 Mazzocco M, Keeley N, Boiano A, et al. Elastic scattering for the ^8B and $^7\text{Be}+^{208}\text{Pb}$ systems at near-Coulomb barrier energies. *Phys Rev C*, 2019, 100: 024602
- 27 Keeley N, Kemper K W, Rusek K. ^7Be versus ^7Li : The influence of breakup threshold on the dynamic polarization potential. *Phys Rev C*, 2002, 66: 044605
- 28 Canto L F, Gomes P R S, Lubian J, et al. Dynamic effects of breakup on fusion reactions of weakly bound nuclei. *Nucl Phys A*, 2009, 821: 51–71
- 29 Canto L F, Gomes P R S, Lubian J, et al. Disentangling static and dynamic effects of low breakup threshold in fusion reactions. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2008, 36: 015109
- 30 Martinez-Quiroz E, Aguilera E F, Lizcano D, et al. Near- and sub-barrier fusion of the $^7\text{Be}+^{58}\text{Ni}$ system. *Phys Rev C*, 2014, 90: 014616
- 31 Raabe R, Angulo C, Charvet J L, et al. Fusion and direct reactions around the barrier for the systems $^{7,9}\text{Be}$, $^7\text{Li}+^{238}\text{U}$. *Phys Rev C*, 2006, 74: 044606
- 32 Amro H, Becchetti F D, Chen Y, et al. ^7Be -induced α -transfer reaction on ^{12}C . *Eur Phys J Spec Top*, 2007, 150: 1–4
- 33 Zhan W, Guo Z, Liu G, et al. Radioactive ion beam line in Lanzhou. *Sci China Ser A-Math*, 1999, 42: 528–536
- 34 Yang Y, Yang G, Wang K, et al. Progress on elastic scattering and breakup of radioactive nuclei based on the HIRFL-RIBLL1 (in Chinese). *Chin*

- [Sci Bull](#), 2022, 67: 2727–2735 [杨彦云, 杨过, 王康, 等. 基于HIRFL-RIBLL1装置的放射性核弹性散射和破裂反应研究进展. 科学通报, 2022, 67: 2727–2735]
- 35 Lin C J, Xu X X, Sun L J, et al. Progress on decays of extremely proton-rich nuclei based on the HIRFL-RIBLL1 facility (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 3527–3536 [林承键, 徐新星, 孙立杰, 等. 基于HIRFL-RIBLL1装置开展的极丰质子核衰变研究进展. 科学通报, 2021, 66: 3527–3536]
- 36 Wang D X, Lin C J, Yang L, et al. Compact 16-channel integrated charge-sensitive preamplifier module for silicon strip detectors. [NUCL SCI TECH](#), 2020, 31: 48
- 37 Palli K, Pakou A, Moro A M, et al. Quasielastic scattering of $^7\text{Be} + ^{\text{nat}}\text{Zr}$ at sub- and near-barrier energies. [Phys Rev C](#), 2023, 107: 064613
- 38 Avrigeanu V, Avrigeanu M, Măniulescu C. Further explorations of the α -particle optical model potential at low energies for the mass range $A \approx 45$ –209. [Phys Rev C](#), 2014, 90: 044612

Summary for “近垒能区质子滴线核 ^7Be 反应机制的研究现状及实验进展”

Current research status and experimental progress on the reaction mechanism of proton drip-line nucleus ^7Be in the near-barrier energy region

Chang Chang¹, Lei Yang^{1*}, Chengjian Lin^{1,2*}, Nanru Ma¹, Huiming Jia¹, Peiwei Wen¹, Feng Yang¹, Tianpeng Luo¹, Cheng Yin¹, Zhijie Huang¹, Hairui Duan¹ & Songxian Zhu¹

¹ China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

² College of Physics and Technology & Guangxi Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China

* Corresponding authors, E-mail: yang_lei@ciae.ac.cn; cjlin@ciae.ac.cn

In the past three decades, the structural properties and reaction mechanisms of weakly bound nuclei have been one of the hot topics in nuclear physics research. Experimental data on neutron-rich weakly bound nuclei near the barrier energy region, such as ^6He and ^{11}Be , have shown significant Coulomb suppression effects, and the total fusion cross sections have exhibited certain systematic regularities consistent with the trend of universal fusion functions. However, there is a lack of experimental data on proton-rich weakly bound nuclei near the barrier energy region, leading to inconsistent experimental conclusions. For example, the $^8\text{B}+^{28}\text{Si}$ system shows an enhanced trend at the barrier, while the $^8\text{B}+^{58}\text{Ni}$ system exhibits a suppression trend at the barrier, and the $^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ system shows a normal trend, demonstrating different reaction characteristics.

This review focuses on the proton drip-line nucleus ^7Be , and summarizes the experimental results of the $^7\text{Be}+^7\text{Li}$, ^9Be , ^{12}C , ^{27}Al , ^{58}Ni , and ^{208}Pb systems from the perspective of elastic scattering. Currently, there are no abnormal threshold anomalies in the optical potential of ^7Be , and no strong Coulomb suppression effects have been observed. In terms of fusion reactions, comparing different systems using universal fusion functions shows good consistency at the barrier, but there is a trend of enhanced cross sections in the near-barrier and sub-barrier energy regions, indicating that the enhancement mechanism in the near-barrier and sub-barrier regions may be related to the ^7Be projectile nucleus, rather than the target nucleus. For breakup reactions, there is a lack of relevant experimental data, and existing measurements show few correlated events and low breakup cross sections, with direct α transfer considered as the main mechanism leading to the observed ^3He yield. Currently, there is still a lack of reaction data for ^7Be with medium-heavy target nuclei, where both Coulomb interaction and nuclear interaction play important roles, allowing for the study of coherent effects between the two.

We conducted experiments with two sets of large solid-angle silicon detector arrays at the RIBLL1 facility of the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, studying the interactions of ^7Be projectile nuclei with ^{120}Sn and ^{209}Bi target nuclei. The experimental results showed that the Coulomb suppression effects in the angular distributions of quasi-elastic scattering for both systems were not significant, and the coupling of ^7Be breakup continuum states had little impact on quasi-elastic scattering. The continuum discretized coupled-channels (CDCC) method could effectively describe the experimental data, validating the effectiveness of the $^4\text{He}+^3\text{He}$ structure. These experimental results provide a comprehensive dataset for the reactions of ^7Be with medium-heavy target nuclei.

energy near the Coulomb barrier, weakly bound nucleus, radioactive nuclear beam, elastic scattering, fusion reactions, breakup reactions

doi: [10.1360/TB-2024-0956](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0956)