



用于核天体物理实验的活性靶时间投影室

张志超 张宁涛 鲁辰桂 蒲天磊 张金龙 陈涵 段利敏 高丙水 李阔昂 李宇田 千奕 茹龙辉
唐晓东 王新雨 徐晓栋 赵红赟 蔡紫葳 姬彬斐 李奇特 许金艳 林炜平

Active Target Time Projection Chamber (TPC) for Nuclear Astrophysics Experiments

ZHANG Zhichao, ZHANG Ningtao, LU Chengui, PU Tianlei, ZHANG Jinlong, CHEN Han, DUAN Limin, GAO Binshui, LI Kuoang, LI Yutian, QIAN Yi, RU Longhui, TANG Xiaodong, WANG Xinyu, XU Xiaodong, ZHAO Hongyun, CAI Ziwei, JI Binfei, LI Qite, XU Jinyan, LIN Weiping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC47>

引用格式:

张志超, 张宁涛, 鲁辰桂, 蒲天磊, 张金龙, 陈涵, 段利敏, 高丙水, 李阔昂, 李宇田, 千奕, 茹龙辉, 唐晓东, 王新雨, 徐晓栋, 赵红赟, 蔡紫葳, 姬彬斐, 李奇特, 许金艳, 林炜平. 用于核天体物理实验的活性靶时间投影室[J]. 原子核物理评论, 2020, 37(3):636–642. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC47

ZHANG Zhichao, ZHANG Ningtao, LU Chengui, PU Tianlei, ZHANG Jinlong, CHEN Han, DUAN Limin, GAO Binshui, LI Kuoang, LI Yutian, QIAN Yi, RU Longhui, TANG Xiaodong, WANG Xinyu, XU Xiaodong, ZHAO Hongyun, CAI Ziwei, JI Binfei, LI Qite, XU Jinyan, LIN Weiping. Active Target Time Projection Chamber (TPC) for Nuclear Astrophysics Experiments[J]. Nuclear Physics Review, 2020, 37(3):636–642. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC47

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

活性靶技术熔合截面测量极限研究

A Study of the Energy Limit for Measuring Fusion Cross Sections with the Active Target Technique

原子核物理评论. 2018, 35(2): 119–126 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.119>

$^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$ 熔合截面测量中统计模型引入的系统误差研究(英文)

Study of the Systematic Errors Introduced by the Statistical Model in the Measurement of $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$ Fusion Reaction

原子核物理评论. 2019, 36(3): 289–293 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.289>

基于GEM工艺的裂变时间投影室中裂变碎片的讨论

Discussion on Fission Fragments in Fission Time Projection Chamber Based on GEM Detector

原子核物理评论. 2019, 36(2): 197–203 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.197>

张量力在 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 熔合动力学中的效应(英文)

Skymre Tensor Force in $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ Fusion Dynamics

原子核物理评论. 2017, 34(1): 41–45 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.01.041>

弱束缚原子核引起的熔合反应机制研究

Study of Fusion Reaction Mechanism Induced by Weakly Bound Nuclei

原子核物理评论. 2020, 37(2): 119–135 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019060>

兰州320kV高压平台低能核天体物理实验研究进展(英文)

Progress of Low-energy Nuclear Astrophysics Studies Based on the 320 kV Platform at Lanzhou

原子核物理评论. 2017, 34(3): 403–408 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.403>

文章编号: 1007-4627(2020)03-0636-07

用于核天体物理实验的活性靶时间投影室

张志超^{1,2}, 张宁涛^{1,†}, 鲁辰桂¹, 蒲天磊^{1,2}, 张金龙¹, 陈 涵^{1,2}, 段利敏¹, 高丙水¹, 李阔昂¹,
李宇田^{1,2}, 千 奕¹, 茹龙辉^{1,2}, 唐晓东¹, 王新雨^{1,2}, 徐晓栋¹, 赵红赟¹, 蔡紫葳³,
姬彬斐³, 李奇特³, 许金艳³, 林炜平⁴

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京大学物理学院, 核科学与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

4. 四川大学原子核科学技术研究所, 成都 610064)

摘要: 发生在中子星壳层内的丰中子熔合反应对中子星演化以及 X 射线超级爆等现象均会产生影响。受限于放射性束流强度和反应机制的复杂性, 实验数据极其缺乏, 难以有效约束理论模型。基于活性靶技术的时间投影室 (Time Projection Chamber, TPC) 将工作气体作为反应靶, 具备近 4π 立体角接受度和三维径迹重建能力, 能够实现对反应事件的全记录, 显著提高了探测效率, 大幅降低了熔合反应截面测量对束流强度的要求。我们研制了 240 路信号读出的 TPC, 并使用放射性束流 ^{16}N 对探测器进行了测试, 探索了该实验方法的可行性和有效性。为了得到更加精确的反应产物径迹, 对反应事件做出更好的筛选, 进一步发展了 1 024 路信号读出 TPC, 并开展了 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 库仑位垒附近熔合反应截面测量实验, 初步实验结果与已有实验数据符合较好。

关键词: 熔合反应; 活性靶; 时间投影室

中图分类号: O572.21+1

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC47

1 引言

宇宙中的元素核合成过程主要分为大爆炸原初核合成、恒星平稳燃烧、爆发性核燃烧三个演化阶段, 其中涉及到了大量的核反应, 这些核反应对天体和宇宙演化起着非常重要的作用, 同时也是宇宙中核素产生的主要来源。迄今为止, 在天体物理能区, 对于带电粒子参与的核反应数据, 大多是通过较高能区实验数据外推或直接用理论模型计算得到的。特别是不稳定核引起的关键天体核反应, 其实验数据极其缺乏, 而放射性核束品质的提高和探测技术的发展, 为天体核反应的研究提供了新机遇。

天体物理计算显示, 在中子星壳层内丰中子核素 (例如 ^{24}C 、 ^{24}O 、 ^{28}Ne 等) 引起的熔合反应对中子星温度的演化和 X 射线超级爆等现象都会产生直接影响^[1-3]。截至目前, 丰中子熔合实验数据十分缺乏, 与此同时, 复杂的反应机制导致理论计算很难对相关反应截面做出可靠的描述和约束^[4], 从而无法给出准确的天体物理能

区反应率。为了确定该类反应对中子星壳层温度的影响, 亟需对其进行直接测量研究。

受限于放射性束流强度 (几十到 10^5 pps, particles per second) 和探测技术, 按照传统的实验方法, 只能通过改变束流能量逐点扫描测量激发函数, 效率很低; 同时由于丰中子熔合反应在库仑位垒以下截面一般在 mb 量级以下, 因此在这样的实验条件下难以得到有效的实验数据。美国印第安纳大学的研究团队首次在库仑位垒附近开展了 $^{20}\text{O}+^{12}\text{C}$ 熔合反应截面测量^[5], 但是只探测了带电粒子出射道, 其总熔合截面依赖于 evap-OR 统计模型^[6] 计算, 存在较大的系统误差, 难以对理论模型作出有效约束。美国阿贡国家实验室的研究团队首次使用活性靶技术进行了熔合反应实验研究^[7], 他们通过多重采样电离室 (Multi-Sampling Ionization Chamber, MUSIC) 开展了 $^{10,12-15}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应截面测量实验, 得到了库仑位垒以上部分能区的熔合截面。但是 MUSIC 只能给出粒子在阳极板平面的径迹投影信息, 无法在低能区域对弹性散射事件和熔合反应事件做出很

收稿日期: 2020-01-13; 修改日期: 2020-04-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFA0400501); 国家自然科学基金资助项目 (U1632142, 11605266, 11675238)

作者简介: 张志超 (1992-), 男, 甘肃天水人, 在读博士, 从事核天体物理研究; E-mail: zhangzc@impcas.ac.cn

† 通信作者: 张宁涛, E-mail: zhangningtao@impcas.ac.cn.

好的鉴别, 很难实现较低能区熔合截面的准确测量。因此, 发展应用新型的探测技术进行相关实验的测量工作是极其重要的。

基于活性靶技术的时间投影室 (Time Projection Chamber, TPC) 在近些年得到了发展, 探测器内部气体既作为工作媒介, 又作为反应靶, 具有近乎 4π 的立体角覆盖, 可以对核反应事件进行全记录, 显著提高了探测效率, 从而实现反应总截面的精确测量。其工作原理如图1所示, 当具有一定能量的粒子入射到 TPC 内, 不断损失能量, 一旦有反应发生, 轻带电粒子和反冲核的三维径迹会被准确地记录下来, 反应点也会随之确定; 另外, 可以在 TPC 周围加入硅阵列等辅助探测出射的轻带电粒子, 从而得到粒子的种类、能量、角分布等重要信息。近几年来, 我们团队发展了活性靶 TPC, 并将熔合反应测量列为首要实验目标。本文将围绕活性靶 TPC, 讨论其在熔合截面测量中的应用和初步的实验结果。

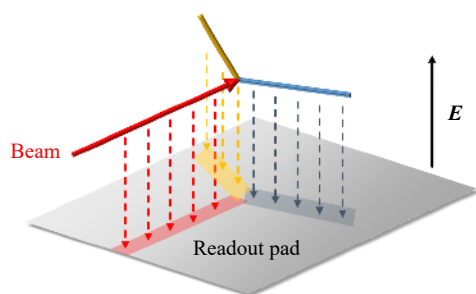


图1 (在线彩图) 活性靶时间投影室原理图

2 探测器架构

2.1 TPC 结构

TPC 主要由漂移场笼、微结构探测器、阳极读出板三个部分组成, 构造如图2所示。漂移场笼为探测器内部提供一个匀强电场区, 电离产生的电子在电场作用下向阳极方向漂移, 经由微结构探测器雪崩放大, 最后在阳极读出板上感应出相应的信号。阳极读出板上电荷沉积位置给出了粒子径迹投影的二维信息, 电子漂移时间给出了粒子径迹在漂移方向的信息, 结合二者就可以重建出完整的三维径迹。

我们研制了 240 路信号读出的 TPC 原型机。漂移场笼由双面覆铜的印刷电路板 (PCB) 搭建而成, 形成了 $242\text{ mm}(L) \times 145\text{ mm}(W) \times 100\text{ mm}(H)$ 的漂移空间。另外, 在场笼底部 (见图2) 加入了一层丝网, 用来减小漂移电场底端的畸变。我们使用中国科学院大学研制的厚气体电子倍增器 (THick Gas Electrons Multiplier, THGEM)^[8] 作为微结构探测器, 尺寸为 $210\text{ mm} \times 110\text{ mm}$, 厚度和孔径均为 $200\text{ }\mu\text{m}$, 孔间距为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 。双层 THGEM 的结构可以让 TPC 具备更高的电荷增益能力, 并且有效抑制正离子反馈。阳极读出板灵敏区面积为 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 分割为 240 个 (10×24) 矩形读出单元。

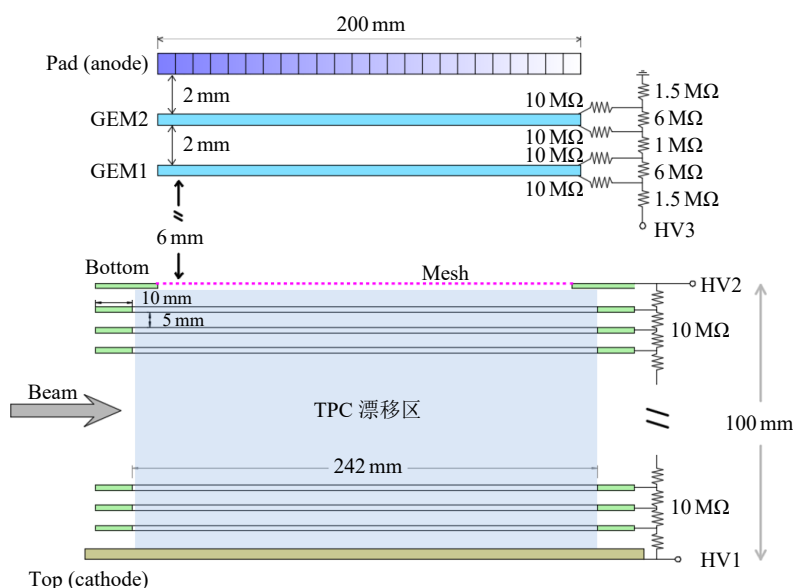


图2 (在线彩图) 时间投影室结构示意图

TPC 安装采用倒挂的方式, 其中阳极板位于最上方, 阴极板位于最下方。HV1、HV2、HV3 分别为场笼顶部 (阴极)、场笼底部、GEM 供电。漂移场笼由条形 PCB 组建, PCB 条宽 10 mm、条间距 5 mm, 通过电阻串实现均匀压降; 丝网用来减小场笼底部电场畸变; HV3 为双层 GEM 分压电路提供工作电压, 并在 GEM2 底部引出一路信号。

如图2所示, 整个探测器有三个负高压输入端, 分别给场笼顶部(阴极)、场笼底部以及GEM供电。搭建场笼的PCB是条状结构, 条宽为10mm, 条间距为5mm, 通过10M Ω 电阻互相串联。通过对场笼顶部电压HV1和底部电压HV2进行联调, 设置探测器工作所需要的漂移电场场强, 调节不同气压下满足需求的电子漂移速度。一般设置场笼底部与GEM之间电场强度大于漂移区场强, 以提高电子传输效率。在GEM2下表面引出信号, 用来监测TPC工作状态, 并为数据获取系统提供触发信号。

根据实验目标的要求, TPC通常工作在低气压下的异丁烷($i\text{-C}_4\text{H}_{10}$)、氩甲烷(P10)等气体中, 探测器靶室气体与束线管道真空之间通过Mylar膜或Kapton膜分隔。TPC具备三维径迹重建能力, 可以很好地对入射粒子进行径迹追踪, 并判断出发生核反应的位置、粒子能量等信息, 从而对入射窗带来的反应本底和靶室中残余放射性等天然本底进行有效的压制。另一方面, 为了提高工作气体的纯净度, 我们使用流气系统让探测器工作在稳定的气压下, 以减小残余气体杂质对实验数据的影响。

2.2 数据获取系统

我们采用了专门为TPC设计开发的GET(General Electronics for TPC)作为数据处理和采集系统[9]。该系统包含了前级放大、快滤波成形、全波形采样等功能, 具有通道密度大、集成度高、较宽的动态响应范围等特点, 适用于较低计数率($< 1\,000\text{ Hz}$)的多路信号读出($\sim 30\,000$ 路)的探测器系统。GET系统主要由AGET(ASIC for GET)芯片、AsAd(ASIC and ADC)前端板、CoBo(Concentration Board)插件等几个核心部件组成。每块AGET芯片可处理64路信号, 每个AsAd板上搭载4块AGET芯片; 探测器信号端通过保护板与AsAd前端板连接, 完成数字化后传输至CoBo模块; 每块CoBo可连接4块AsAd板, 经由 μ -TCA机箱将数据传入数据处理平台。

GET系统也具备很好的操作性, 除了一些整体参数的设置外, 每一路信号电子学参数均可进行独立设置, 保证了整套获取系统的灵活性。GET系统使用波形采样的方式存储数据, 每一路点火信号对应一个完整的类高斯波形, 通过对波形的分析, 我们可以得到相应的能量沉积信息和电子漂移时间信息。目前, 已有很多核物理实验室采用GET电子学作为TPC的信号处理和采集系统, 例如法国GANIL的ACTAR TPC[10], 美国NSCL-MSU的AT-TPC[11], 日本RIKEN的S π RIT TPC[12]等。

3 束流实验测试

为了验证活性靶时间投影室进行放射性束流实验的可行性和有效性, 我们在前期开展了一些熔合反应截面测试实验($^{16}\text{N}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$), 主要通过对熔合蒸发剩余核的测量, 得出相应的熔合反应截面。

3.1 $^{16}\text{N}+^{12}\text{C}$

2018年, 兰州放射性束流线(RIBLL1)首次利用液氮冷却气体靶产生了低能放射性束流。在调束期间, 我们使用240路信号读出TPC开展了简单的活性靶测试实验, 实验设置如图3所示。加速器提供的主束是8MeV/u的 ^{15}N , 和氩气靶反应产生 ^{16}N 次级束, 经由RIBLL1束线, 将84MeV的 $^{16}\text{N}^{7+}$ 传输至实验终端, 穿过13 μm 厚的Kapton膜, 最后注入到TPC靶室内, TPC工作气体为异丁烷。在TPC前, 束流方向上放置一块多丝正比室(MWPC), 通过MWPC、飞行时间(TOF)探测器以及GEM读出信号组成的逻辑电路, 为GET系统提供触发信号。实验中漂移电场强度设置为43V/cm, 工作气体气压设置为 10^4 Pa , 此时电子漂移速度为1.4cm/ μs (通过Magboltz[13]模拟计算得到)。

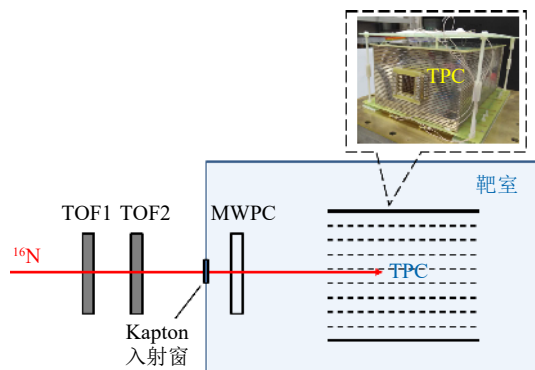


图3 (在线彩图) $^{16}\text{N}+^{12}\text{C}$ 熔合反应实验设置图
本次实验使用240路信号读出TPC, TOF1(10 μm 厚)和TOF2(25 μm 厚)为RIBLL1束线探测器, 间距为17m; MWPC置于靶室内部; Kapton膜厚度为13 μm , 作为TPC靶室入射窗。

束流粒子入射到TPC内部, 随入射深度的增加连续损失能量, 单位长度里损失的能量逐渐增加, 当有核反应发生时, 粒子的能损曲线就会发生变化。因此通过监测粒子沿束流方向的能量损失, 即可初步判断是否有核反应发生。图4展示了发生在探测器内的一个典型的核反应事件, 图(a)、(b)分别是该事件在信号读出板的点火分布以及沿束流入射方向的能损变化。

在熔合反应截面测量中, 常常伴随着弹性散射的发生, 通过总能损曲线的变化可以将反应事件筛选出来,

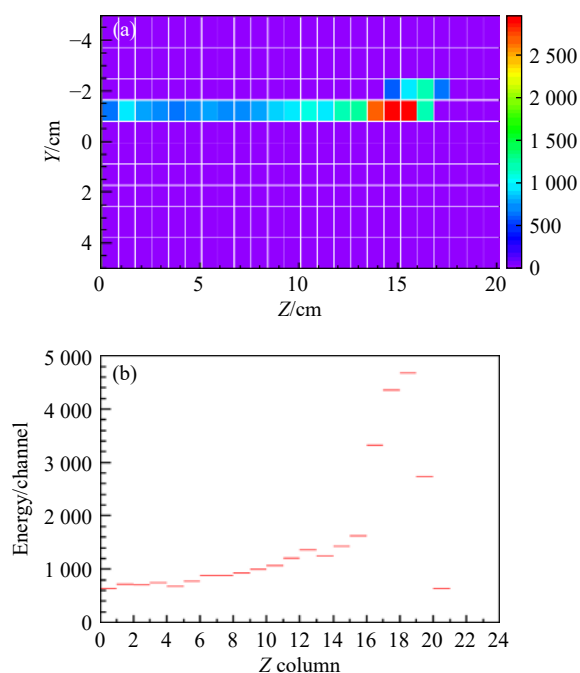
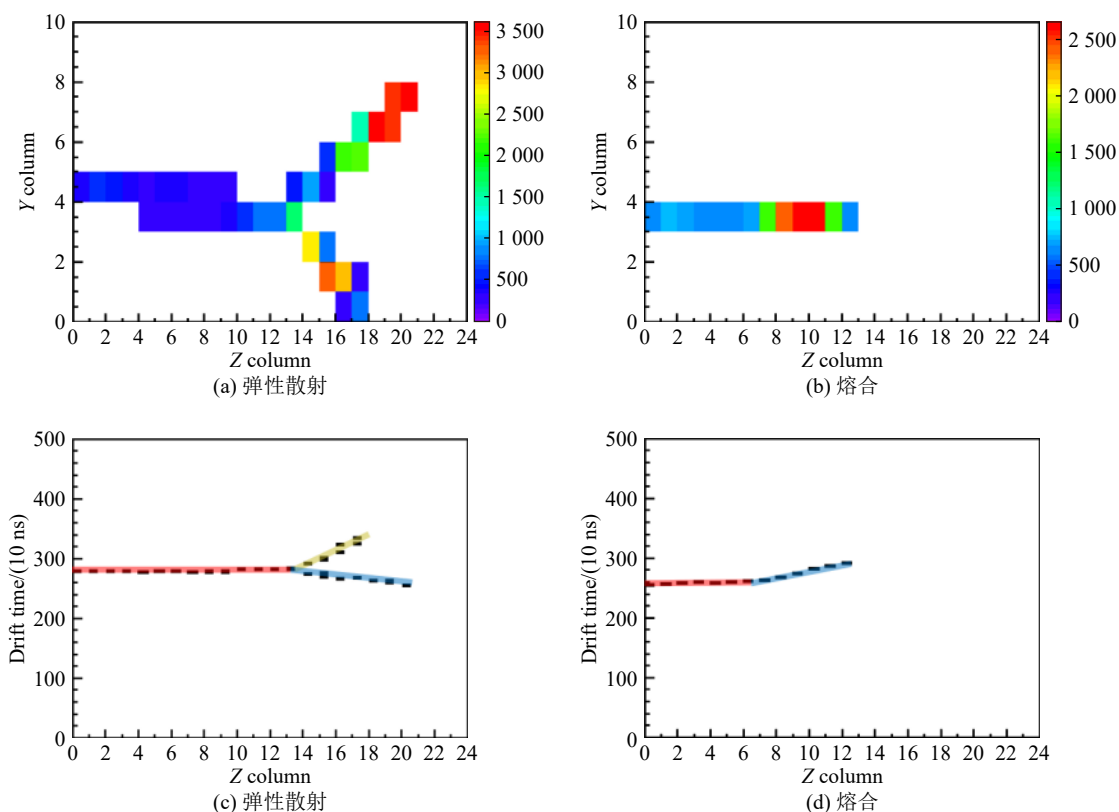


图4 (在线彩图)典型的核反应事件

(a) 为该事件在信号读出板上的点火分布, 横纵轴表示信号读出板实际尺寸, 小格表示信号读出单元, 不同颜色表示相应读出单元上的能量损失值; (b) 为该事件沿束流入射方向的总能损变化, 横轴为信号读出板长边(Z方向)条目数。

并确定发生反应的位置。对于弹性散射, 入射粒子在发生反应后能量降低, 单位长度的能量损失变大, 同时反冲靶核粒子也会不断损失能量, 因此沿束流入射方向总能损会有明显的上升; 对于熔合反应, 反应产物的能量和A、Z值均发生了较大的变化, 同样导致了总能损的明显增大, 如图4(b)所示。此类总能损曲线出现明显上升的事件, 即可判定为熔合反应或弹性散射, 而总能损曲线的突变点(即相应信号读出块的中心位置)给出了反应点的位置。通过入射粒子在气体中的射程, 可以确定出入射粒子在TPC不同位置发生反应时的能量。

如何准确地将熔合事件与弹性散射事件区分出来, 对熔合反应截面的确定是非常重要的。然而, 仅从能损曲线变化上很难对二者进行有效的分辨。我们根据两类反应不同的特点, 结合TPC给出的粒子信息, 可以对反应类型做出鉴别。对于 $^{16}\text{N}+^{12}\text{C}$ 这类近对称反应体系, 弹性散射的出射粒子之间一般具有较大夹角, 粒子射程较长, 在读出平面上可以被较明显地识别出来, 如图5(a)所示; 熔合反应剩余核集中在前角区, 能损很大, 如图5(b)所示, 而蒸发的轻粒子即使被捕捉到, 能损也很小。但是存在一些弹性散射事件, 在读出平面上点火位置分布与熔合反应事件相似, TPC可以通过

图5 (在线彩图) $^{16}\text{N}+^{12}\text{C}$ 反应中典型的弹性散射事件和熔合反应事件

(a)、(b) 分别为弹性散射事件和熔合反应事件在阳极读出板上的着火点分布, 不同颜色表示相应读出单元上的能损; (c)、(d) 为二者沿束流入射方向的漂移时间径迹, 其中红线表示入射束流, 蓝线和黄线表示反应产物。

反应产物不同的漂移时间对其进行准确的辨识,如图 5(c)、(d) 所示,减小了反应事件的误判率。有关于筛选方法的具体细节见文献 [14]。

本次实验的主要探测对象是熔合反应剩余核,通过对熔合事件的筛选,即可直接得到相应能量下的熔合反应产额,进而得到对应的反应截面。图 6 给出了本次实验的测量结果,其中黑色线为通过 PACE4^[15] 计算得到的理论线。由于束流时间有限,每个反应能量点只有少量几个熔合反应事件发生,统计不足导致了实验数据点存在很大的统计误差,但是可以看到总体上符合理论趋势线。本次实验也对利用活性靶时间投影室进行熔合反应测量方法的可行性和有效性做出了探索,在实验技术和数据分析方法方面为后续研究工作打下了基础。

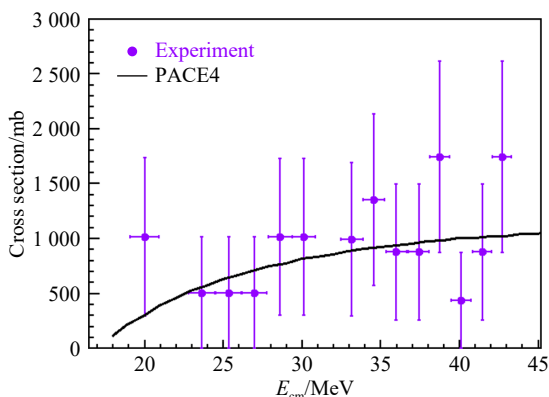


图 6 (在线彩图) $^{16}\text{N}+^{12}\text{C}$ 熔合激发函数

纵轴表示熔合反应截面,误差是统计误差。横轴表示反应点的质心系能量,系统误差主要来自三个方面:入射窗引起的能散、入射粒子在反应点之前经过一段气体带来的能散以及反应点位置本身的不确定性。其中前两个因素对总能散的贡献较小($< 5\%$);最后一个因素与信号读出块尺寸相关,对总能散影响最大,在 $E_{\text{cm}} = 20 \text{ MeV}$ 时带来的能量不确定性约为 1 MeV。

3.2 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$

为了更加精确地重建整个反应的三维径迹,对反应事件做出更加有效的筛选,我们进一步研制了 1024 路信号读出 TPC,并开展了 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应测量实验。该探测器整体结构与上述 240 路信号读出 TPC 相同,信号读出板在灵敏面积不变的情况下 ($200\text{mm} \times 100\text{mm}$),分割为 1024 个 (32×32) 矩形读出单元。

本次实验在兰州重离子加速器研究装置 (HIRFL) 上进行。扇聚焦回旋加速器 (SFC) 产生流强约 200 enA、总能量为 58.9 MeV 的 $^{12}\text{C}^{4+}$ 束流。为了模拟强度较弱的放射性束流,将主束直接轰击金靶,通过散射方法将束流强度降至 3000 pps 以下,实验设置如图 7 所示。散射之后的 ^{12}C 束流经 10 μm 厚的 Mylar 膜 (直径 10 mm) 入射到 TPC 靶室内部,和探测器靶室内的异丁烷气体发

生反应。在 TPC 后端安置一块方硅探测器,束流穿透气体最后会完全沉积在硅探测器上。因为束流会产生大量的数据,通过硅探测器可以有效地反符合掉未发生反应的束流事件,极大地减小了数据的存储量,同时方硅探测器也可以反过来刻度束流能量等信息。我们通过调节 Al 降能片 (31 μm) 和 TPC 工作气压,对该反应库仑位垒附近不同能区的熔合截面进行了测量,如表 1 所列。

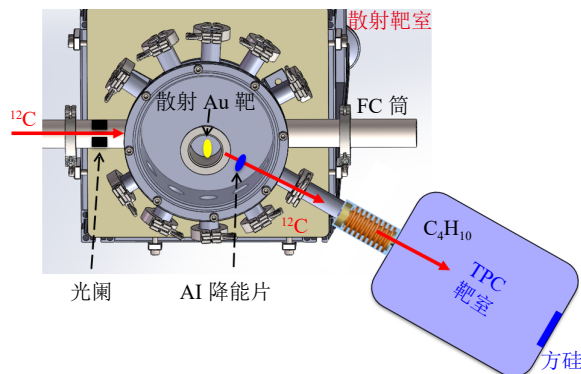


图 7 (在线彩图) $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应实验设置图

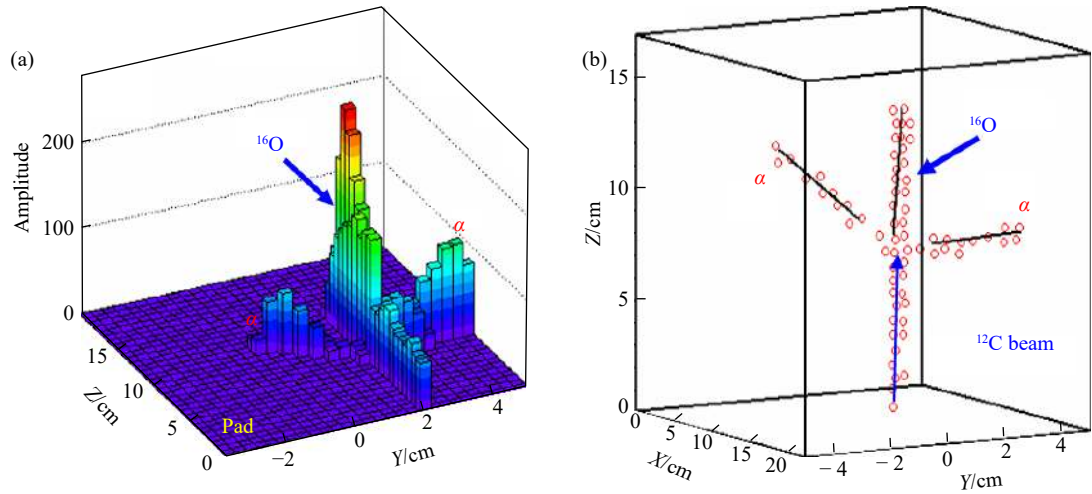
本次实验使用 1024 路信号读出 TPC, 58.9 MeV 的 ^{12}C 束流经 Au 靶散射后,穿过 Mylar 膜 (厚度 10 μm , 直径 10 mm) 进入 TPC 靶室,靶室内部充异丁烷气体; Au 靶与 TPC 靶室之间为 Al 降能片,厚度为 31 μm ;在 TPC 后端放置一块方硅探测器,用于测量束流粒子经过气体的剩余能量,并为触发系统提供反符合信号。

表 1 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 不同能区测量条件

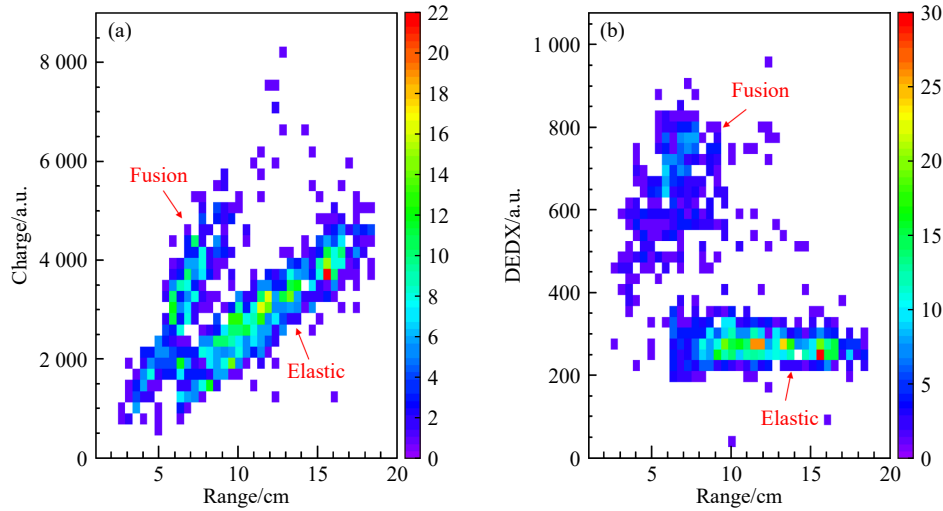
Al降能片	TPC气压/Pa	测量能区 E_{cm} /MeV
使用	5 000	9.1 ~ 14.5
不使用	10 600	15.7 ~ 22.5

同样地,使用 3.1 节所讲述的反应筛选方法和反应类型鉴别方法,可以初步地将熔合反应事件筛选出来。图 8 是一个双 α 出射道熔合反应事件,可以看到反应产物被准确地挑选出来,整个反应事件的三维径迹也得到了很好的重建。

为了尽量排除弹性散射事件对熔合反应截面的干扰,需要对两种反应进行更加精确的筛选。图 9(a) 是反应产物总电荷沉积和相应射程的填充谱,所有反应事件呈两条带状分布。通过熔合反应剩余核高能损短射程、弹性散射反应产物较低能损长射程的特点,可以判断出二者对应的带状位置。对于短射程低能损部分,两类反应事件不能被很好地区分,将纵轴改为布拉格能损曲线最高点附近的单位长度能损,如图 9(b) 所示,熔合反应和弹性散射事件得到了更好的区分。通过对熔合反应事件的筛选,熔合反应截面也随之确定。本次实验的部分结果如图 10 所示,该结果与已有的实验数据^[16] 符合较好。

图 8 (在线彩图) $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 融合事件

(a) 为该事件在信号读出平面的投影，峰的高度代表相应的能损；(b) 为通过点云算法 (PCL) 重建出的三维径迹。该事件是移除 Al 降能片后的测量结果，反应点质心系能量为 18.3 MeV。

图 9 (在线彩图) $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应事件鉴别

每个数据点代表一个反应事件；(a) 为反应粒子在 TPC 中的射程与电荷沉积 (正比于能量损失) 的关系；(b) 为反应粒子在 TPC 中的射程与其在布拉格能损曲线最高点附近单位长度能损的关系。

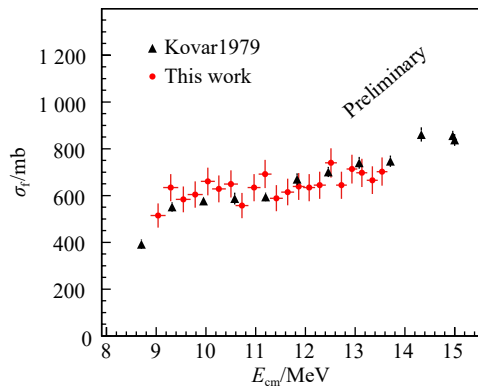


图 10 (在线彩图) $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 融合激发函数初步结果
纵轴表示融合反应截面，横轴表示反应点的质心系能量，误差为统计误差。Kovar 等人的测量结果来自参考文献 [16]。

4 结论

基于活性靶技术的 TPC 集工作气体和反应靶于一身，具有极高的探测效率，可以在不改变束流能量的情况下，一次性测量很宽能区的融合反应截面，有效克服了不稳定核素束流强度低的限制，能够实现该类反应更低截面的测量工作。我们研制了 240 路信号读出的活性靶 TPC，并进行了 $^{16}\text{N}+^{12}\text{C}$ 放射性束流实验的测试，通过 TPC 提供的粒子三维信息，能够在有限的束流时间内对反应事件进行筛选，探索了利用活性靶 TPC 进行融合反应测量的可行性和有效性，为后续工作奠定了基础。为了更加精确地重建反应事件的三维径迹，有效筛选出融合反应事件，我们进一步提高了信号读出路数，

完成了 1024 路信号读出 TPC 的研制, 并开展了 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 库仑位垒能区的熔合反应截面测量实验, 在 $^{16}\text{N}+^{12}\text{C}$ 实验处理方法基础上, 根据反应粒子在探测器内的射程和能量损失, 实现了更准确的反应事件鉴别, 初步的实验结果与已有实验数据符合较好。

在下一步工作中, 我们将使用 1024 路时间投影室开展 $^{19}\text{O}+^{12}\text{C}$ 和 $^{19}\text{F}+^{12}\text{C}$ 熔合反应截面测量, 通过更多系统性的测量研究, 约束丰中子熔合反应对中子星壳层演化模型的影响。

参考文献:

- [1] HOROWITZ C J, DUSSAN H, BERRY D K. *Phys Rev C*, 2008, 77: 045807.
- [2] BEARD M, AFANASJEV A V, CHAMON L C, et al. *Atomic Data Nucl Data Tables*, 2010, 96: 541.
- [3] YAKOVLEV D G, BEARD M, GASQUES L R, et al. *Phys Rev C*, 2010, 82: 044609.
- [4] UMAR A S, OBERACKER V E, HOROWITZ C J. *Phys Rev C*, 2012, 85: 055801.
- [5] RUDOLPH M J, GOSSER Z Q, BOWN K, et al. *Phys Rev C*, 2012, 85: 024605.
- [6] NICOLIS N G, BEENE J R. 1993, unpublished.
- [7] CARNELLI P F F, ALMARAZ-CALDERON, REHM K E, et al. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 192701.
- [8] LIU Q, LIU H Q, CHEN S, et al. *Journal of Instrum*, 2013, 8: C11008.
- [9] POLLACCO E C, GRINYER G F, ABU-NIMEH F, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2018, 887: 81.
- [10] ROGER T, PANCIN J, GRINYER G F, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2018, 895: 126.
- [11] MITTING W, BECEIRO-NOVO S, FRITSCH A, et al. *Nucl Instr Meth A*, 2015, 784: 494.
- [12] SHANE R, MCINTOSH A B, ISOBE T, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2015, 784: 513.
- [13] BIAGI S F. *Nucl Instr Meth A*, 1999, 421: 234.
- [14] JI L C, ZHANG N T, LIN W P, et al. *Nuclear Physics Review*, 2018, 35(2): 119. (in Chinese)
(季炼程, 张宁涛, 林炜平, 等. 原子核物理评论, 2018, 35(2): 119.)
- [15] GAVRON A. *Phys Rev C*, 1980, 21: 230.
- [16] KOVAR D G, GEESAMAN D F, BRAID T H, et al. *Phys Rev C*, 1979, 20: 1305.

Active Target Time Projection Chamber (TPC) for Nuclear Astrophysics Experiments

ZHANG Zhichao^{1,2}, ZHANG Ningtao^{1,†}, LU Chengui¹, PU Tianlei^{1,2}, ZHANG Jinlong¹, CHEN Han^{1,2}, DUAN Limin¹, GAO Binshui¹, LI Kuoang¹, LI Yutian^{1,2}, QIAN Yi¹, RU Longhui^{1,2}, TANG Xiaodong¹, WANG Xinyu^{1,2}, XU Xiaodong¹, ZHAO Hongyun¹, CAI Ziwei³, JI Binfei³, LI Qite³, XU Jinyan³, LIN Weiping⁴

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;

4. Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The fusion reaction of neutron-rich nuclei occurring in the neutron star crust is considered to be the important heating process in neutron stars and X-ray super burst. Limited by the intensity of radioactive beams and the complexity of reaction mechanism, experimental data so far are rare and can not constrain relevant theoretical model effectively. The time projection chamber (TPC) based on the active target technique works with the detection gas as the target, which can record all the tracks including the incident particle and charged particles from the reaction occurring in the detection gas. TPC has approximately 4π solid angle acceptance and 3D track reconstruction capabilities, which can significantly improve detection efficiency, making TPC a powerful device to measure the low cross sections of fusion reactions. A 240-channels active target TPC has been developed. The test experiment of $^{16}\text{N}+^{12}\text{C}$ fusion measurement was carried out and validated the feasibility of measuring the fusion reaction cross section by active target TPC. In order to obtain more accurate reaction tracks to identify fusion events, a 1024-channels TPC was constructed and then commissioned by measuring the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion reaction cross section at energies around coulomb barrier. The preliminary result is in good agreement with the existing experimental data.

Key words: fusion reaction; active target; TPC

Received date: 13 Jan. 2020; Revised date: 23 Apr. 2020

Foundation item: National Key Research and Development Program of China(2016YFA0400501); National Natural Science Foundation of China(U1632142, 11605266, 11675238)

† Corresponding author: ZHANG Ningtao, E-mail: zhangningtao@impcas.ac.cn.