

中子诱发带电粒子出射核反应实验研究进展

张国辉

北京大学物理学院, 重离子物理研究所, 核物理与核技术全国重点实验室, 北京 100871

E-mail: guohuizhang@pku.edu.cn

2025-08-31 收稿, 2025-10-25 修回, 2025-10-28 接受, 2025-10-29 网络版发表

国家自然科学基金(12475299)资助

摘要 三十多年以来, 本团队基于北京大学4.5 MV静电加速器中子源、杜布纳联合核子研究所EG-5静电加速器中子源、北京HI-13串列加速器中子源以及中国散裂中子源反角白光中子源, 对中子诱发一系列轻核、中重核和重核的轻带电粒子出射核反应进行了实验研究, 并进行了理论分析. 近年来, 实验研究从中子诱发轻带电粒子出射核反应拓展到了重核的裂变反应. 在这些实验研究中, 采用了包括屏栅电离室、轻带电粒子探测器阵列、金刚石探测器、多用途时间投影室等在内的带电粒子探测器. 本文对中子诱发带电粒子出射核反应(包括中子诱发轻带电粒子核反应以及裂变反应)相关研究的发展脉络进行了梳理, 对亮点工作进行了介绍, 对未来的发展做了展望.

关键词 中子, (n, cp)反应, (n, lcp)反应, (n, f)反应, 截面, 微分截面

核能释放的主要途径是原子核的裂变与聚变. 在裂变与聚变过程中都会涉及中子与原子核的相互作用(即发生中子核反应). 中子不带电, 容易诱发各类核反应. 核反应的实验测量水平, 是一个国家科技实力的重要体现. 以裂变反应堆为例, 其内部发生的中子核反应大体可以分成四类: 裂变反应(n, f)、散射(又分为弹性散射(n, n)和非弹性散射(n, n'))、辐射俘获反应(n, γ), 以及轻带电粒子出射核反应(n, lcp). 其中, 裂变反应(n, f)与轻带电粒子出射核反应(n, lcp)合在一起, 称为带电粒子出射核反应(n, cp). 对这类核反应开展系统而准确的实验研究, 对于先进核能系统的研发、反应堆设计与控制、中子标准截面的完善、中子剂量与材料辐射损伤的确定、癌症治疗、核天体物理与元素起源研究^[1]、核结构理论的检验与发展等领域都具有重要的应用价值. 本文对本团队与杜布纳联合核子研究所等单位长期以来合作开展的中子诱发带电粒子出射核反应实验研究进行综述.

多年来, 本团队不断完善实验设备, 改进研究方法, 提高测量精度, 扩大国内外合作范围, 拓展可测量的中子能区. 迄今, 本团队负责测量和参与完成的68个核反应、128套核反应数据被收录到国际核反应实验数据库EXFOR中. 在该库中, 本团队所在实验室的代码为“CPRBJG”, 其中“CPR”表示“中国”, “BJG”表示“北京大学”.

开展中子诱发带电粒子出射核反应实验研究, 需要具备三个方面的实验条件: 中子源、待测样品和粒子探测器. 除此之外, 还要具备实验数据获取设备以及数据储存与分析等硬件和软件. 表1列出了本团队多年以来实验研究工作概况, 包括中子源、合作单位、所测量的核反应种类、带电粒子探测器和样品材料等. 其中, 中子源包括热中子源、单能和准单能快中子源、白光中子源三类, 涉及的中子能区从热中子到几十MeV; 所测量的核反应可以分为两体核反应与多体核反应; 带电粒子探测器分为气体探测器、半导体探测

引用格式: 张国辉. 中子诱发带电粒子出射核反应实验研究进展. 科学通报, 2026, 71: 916–926

Zhang G. Progress of experimental research on neutron-induced charged-particle emission nuclear reactions (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 916–926, doi: [10.1360/CSB-2025-5457](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5457)

表 1 本团队实验研究概况

Table 1 Sketch of the experimental research in our group

实验要素	内容
中子源	4.5 MV加速器、EG-5加速器、西安脉冲堆、HI-13串列、SSDH-2串列、高压倍加器、反角白光中子源
单位	北京大学、杜布纳联合核子研究所、西北核技术研究院、中国原子能科学研究院、中国科学院高能物理研究所、中国散裂中子源
核反应	(n, α)、(n, p)、(n, d)、(n, f)、(n, t2α)、(n, n3α)、三体裂变
探测器	屏栅电离室、轻带电粒子探测阵列、金刚石探测器、铯锂钷闪烁体、多用途时间投影室
样品材料	天然单质材料、化合物材料、同位素材料、薄膜材料、气体

器、闪烁体探测器等。

经历了30多年的发展历程，从开始的手工记录到全自动记录，从NIM机箱与插件到全数字化，从单纯的实验测量到实验测量、理论分析、模拟计算有机结合，从开始发表文章时只有几位作者到最近的上百位作者；从轻核的两体核反应实验测量拓展到轻核三体核反应、四体核反应实验测量；从北京大学4.5 MV静电加速器中子源拓展到中国原子能科学研究院HI-13串列加速器中子源，进而又从单能中子源拓展到中国散裂中子源反角白光中子源，从固体样品实验测量拓展到气体样品，从轻带电粒子出射核反应实验拓展到裂变核反应实验，又从两体裂变拓展到三体裂变；从采用屏栅电离室作主探测器拓展到采用轻带电粒子探测器阵列，进而拓展到采用时间投影室。以下进行具体介绍。

1 北京大学4.5 MV静电加速器作为实验研究的基础与长期积累

北京大学4.5 MV静电加速器，作为国内开展核数据测量能区配套的单能中子源之一，为我们开展实验研究提供了基本条件，是团队开展实验工作的根据地。北京大学4.5 MV静电加速器，是由陈佳洱院士主持建造的单级静电加速器，于1994年通过专家鉴定，配备有宽敞的中子大厅，适合开展中子核反应实验测量。从20世纪90年代开始，北京大学与杜布纳联合核子研究所开始进行中子核反应机制合作实验研究并持续至今。双方优势互补。我方具备性能良好的加速器中子源、中子大厅以及数据获取系统，对方提供了带电粒子探测器—屏栅电离室和相应的技术以及同位素样品或样品材料等。

长期以来，基于北京大学4.5 MV静电加速器中子源和屏栅电离室探测器，我们不断改进实验方法^[2-5]、完善测量设备、降低本底干扰、提高测量精度、积累实验经验，对中子诱发一系列轻核、中重核和重核的

轻带电粒子出射核反应截面和微分截面等进行了实验测量，结合理论分析，得到了可靠的研究结果。此处，以点带面，针对轻核、中重核、重核，分别介绍一项具有特色的研究工作。更多的成果可参考综述文章^[6]。

2000年发表的论文^[7]，标志着我们的研究工作开始得到国际同行的认可。论文的内容是关于轻核⁶Li(n, t)⁴He造氘反应微分截面与截面的实验测量。该反应截面从热能区到1 MeV已经成为国际标准截面，但在MeV能区因截面降低、实验数据不足且误差大，不同的评价库数据结果分歧较大。针对轻核反应很强的动力学效应，我们采用了高低不同的工作气压进行实验测量的方案。结合后来的实验测量^[8-10]，得到了比较系统的实验结果。

2011年，发表了重核¹⁴⁹Sm(n, α)反应的实验测量与理论分析结果^[11]。我们采取了大面积薄样品和厚样品^[12]相结合的方案，基于北京大学4.5 MV加速器中子源，准确地得到了反应截面随中子能量快速变化的趋势，测出了小到50 μb的核反应截面，实验结果填补了该反应在MeV能区的实验数据空白。进一步对我们的实验结果及他人实验结果进行理论分析，得到了从热能区到20 MeV能区完整的激发函数曲线，澄清了不同评价数据库之间的数据分歧。

2020年，关于MeV能区中重核^{58,60,61}Ni(n, α)反应截面实验研究的论文在国内期刊*Chin Phys C*发表^[13]。镍是重要的反应堆结构材料。准确的^{58,60,61}Ni(n, α)反应截面对于定量评价快堆、聚变堆、ADS等核装置结构材料的辐照损伤有应用价值。本工作采用了新的屏栅电离室和新的中子通量测量方法，在测量源中子能谱、扣除低能中子干扰的同时，还对样品内待测同位素以外其他同位素事件的干扰进行了定量扣除。除此之外，还根据实验测量到的激发函数趋势，采用退卷积方法有效降低了中子能量的不确定度。采用这些新的措施，有效地提高了截面数据的测量精度。

2 从北京大学4.5 MV静电加速器中子源拓展到北京HI-13串列加速器中子源

从2015年开始,我们将实验测量从北京大学4.5 MV加速器拓展到了北京HI-13串列加速器,在中俄合作基础上进一步与中国原子能科学研究院阮锡超研究员团队合作,重点开展了8~13 MeV中子能区的实验研究。

在8~13 MeV能区,国际上长期缺乏单能中子源,因此该能区的实验测量数据匮乏。依托北京HI-13串列加速器,利用 $^2\text{H}(\text{d}, \text{n})^3\text{He}$ 反应可以获得该能区的中子。然而,由于三体破裂反应 $^2\text{H}(\text{d}, \text{np})$ 开道会产生低能中子,形成对主中子的干扰,并且随着入射氘离子能量的提高,低能中子的份额会不断增加以至于超过主中子。所以严格说来,该能区的中子不是单能中子而是准单能中子。为了在该能区开展 (n, α) 反应截面测量,就需要首先确定中子能谱,进而根据低能中子的份额定量扣除其造成的干扰事件,得到与主中子相对应的待测事件,最终得到反应截面。为此配置了EJ-309液闪探测器,完善了利用反冲质子解谱测量中子能谱的方法^[14,15],为在该能区开展实验奠定了基础。

基于北京HI-13串列加速器氘气体靶中子源和屏栅电离室探测器,对多种铁、镍、铜、锌金属同位素核的 (n, α) 反应截面进行了系统的实验测量。铁、镍、铜、锌等是重要的核装置结构材料,准确测量这些同位素核的 (n, α) 反应截面,一方面,对确定核装置结构材料的辐照损伤有应用价值;另一方面,可以从理论上揭示核反应机制随入射中子能量的变化规律。

首先,对 $^{54,56}\text{Fe}(\text{n}, \alpha)$ 反应截面进行了实验测量,得到了可靠的结果^[16]。接着,对 $^{58,60,61}\text{Ni}(\text{n}, \alpha)$ 、 $^{63}\text{Cu}(\text{n}, \alpha)$ 以及 $^{64,66,67}\text{Zn}(\text{n}, \alpha)$ 反应截面进行了实验测量^[17,18]。对于 $^{63}\text{Cu}(\text{n}, \alpha)$ 反应,在用屏栅电离室探测器进行直接测量的同时,还用活化法进行了测量,得到了一致的实验结果。实验结果与理论计算分析表明, $^{54,56}\text{Fe}(\text{n}, \alpha)$ 、 $^{58,60,61}\text{Ni}(\text{n}, \alpha)$ 和 $^{64,66,67}\text{Zn}(\text{n}, \alpha)$ 等多个反应的激发函数,在8~13 MeV附近能区普遍存在着“肩”形结构,如图1(a)~(c)所示。然而, $^{63}\text{Cu}(\text{n}, \alpha)$ 反应的激发函数在该能区却没有“肩”形结构,如图1(d)所示,其反应截面在较宽的中子能量范围内几乎随中子能量的提高而线性上升^[18]。上述两类核反应激发函数形状具有明显的差异。值得指出的是,在美国最新评价数据库ENDF-B/VIII.0中, $^{63}\text{Cu}(\text{n}, \alpha)$ 反应的激发函数具有明显的“肩”形结构,

而在上一版的ENDF-B/VII.1库中则没有该结构,分别如图1(d)中的虚线和点划线所示。我们的工作表明,目前美国ENDF-B/VIII.0评价库中 $^{63}\text{Cu}(\text{n}, \alpha)$ 反应的激发函数的形状是有问题的,而其之前ENDF-B/VII.1库中的结果是基本合理的。

3 从单能和准单能中子源拓展到白光中子源

中国散裂中子源采用1.6 GeV的质子束打钨靶的方式产生散裂中子,是中国第一个脉冲式散裂中子源,其脉冲重复频率为25 Hz,设计束流功率为100 kW。与其主体设施相配套建立的反角白光中子源,建有两个中子实验大厅,中子能量范围从0.3 eV~300 MeV,配备了先进的多路数字化数据采集系统,适合进行核反应数据测量、中子照相、探测器刻度、中子辐照效应研究等。中国散裂中子源反角白光中子源于2018年投入运行。

3.1 $^6\text{Li}(\text{n}, \text{t})^4\text{He}$ 和 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反应

作为中国散裂中子源反角白光中子源首批物理实验之一,2018年本团队与中国科学院高能物理研究所等单位合作,基于反角白光中子源和轻带电粒子探测器阵列(Light-charged Particle Detector Array, LPDA)的初级版本(15个硅探测器),对 $^6\text{Li}(\text{n}, \text{t})^4\text{He}$ 和 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反应进行了实验测量。两个实验在反角白光中子源实验厅1先后连续进行,采用双束团模式,当时的质子打靶功率为20 kW,束流时间分别约为200和350 h。在实验之前,对实验结果进行了充分的模拟计算,预测了实验谱,优化了实验条件,研制了直径为50 mm的大面积双 ^6LiF 样品和双 ^{10}B 样品。这两个核反应的实验测量意义重大,前者是最重要的造氚反应,后者在硼中子俘获治癌和反应堆控制过程中有重要应用。

对实验数据进行了处理,获得了系统性研究成果:对于 $^6\text{Li}(\text{n}, \text{t})^4\text{He}$ 反应,在1 eV~3 MeV能区的80个中子能点得到了15个角度的微分截面,并且通过积分得到了反应截面,中子能量跨越了6个多数量级^[19]。对于 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反应,在1 eV~2.0 MeV 67个中子能点得到了15个角度的微分截面;此外,对于 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha_0)^7\text{Li}$ 和 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha_1)^7\text{Li}$ 分反应道,在1 eV~1.0 MeV 59个中子能点得到了15个角度的微分截面。进而对上述微分截面进行积分,得到了相应能区的反应截面。利用清华大学陈振鹏教授开发的RAC程序对实验结果进行了R-矩阵理论分

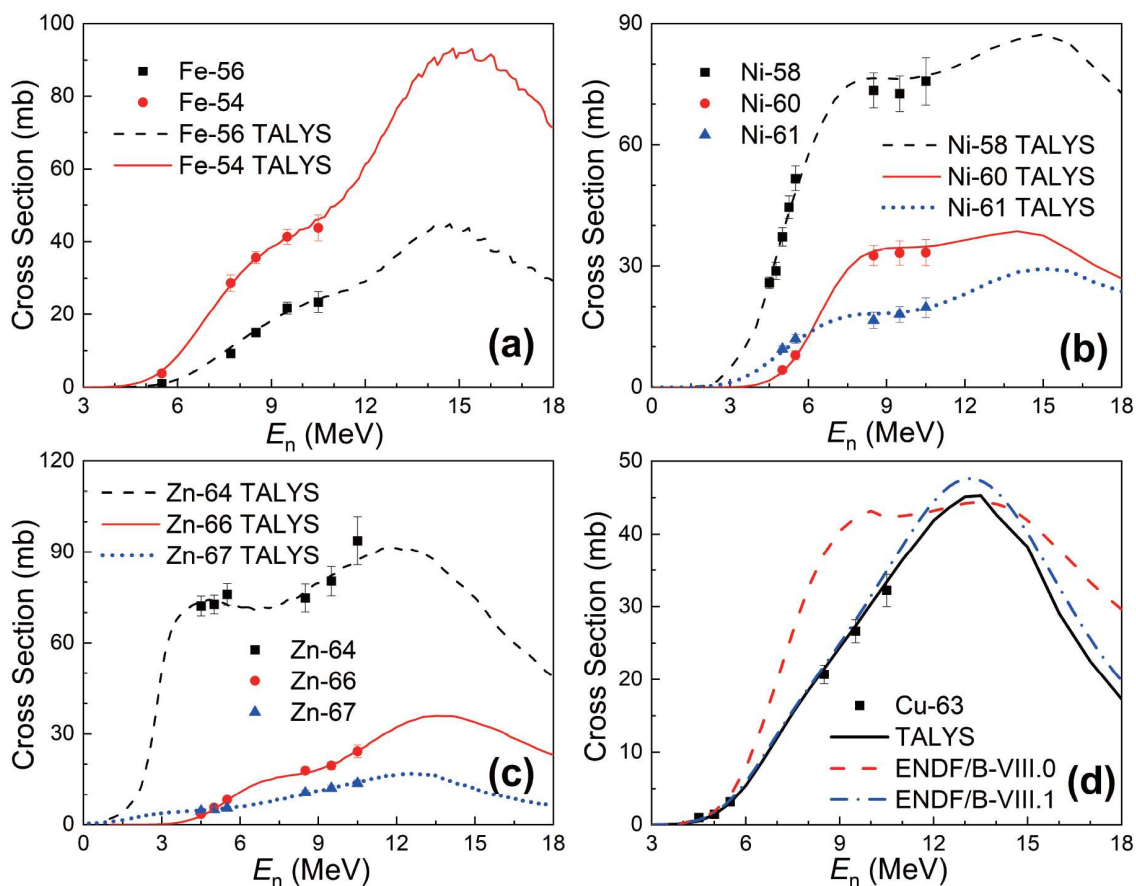


图1 $^{54,56}\text{Fe}(n, \alpha)$ 反应截面(a)、 $^{58,60,61}\text{Ni}(n, \alpha)$ 反应截面(b)、 $^{64,66,67}\text{Zn}(n, \alpha)$ 反应截面(c)和 $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)$ 反应截面(d)的实验测量结果与TALYS程序计算结果比较

Figure 1 Measurement cross sections for the $^{54,56}\text{Fe}(n, \alpha)$ reaction (a), $^{58,60,61}\text{Ni}(n, \alpha)$ reaction (b), $^{64,66,67}\text{Zn}(n, \alpha)$ reaction (c), and $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)$ reaction (d) compared with those from TALYS code calculations

析。两个核反应的实验测量与分析结果相继发表在国内期刊*Chin Phys C*上^[19,20]。美国标准数据委员会专家Allan Carlson来信索要我们的最新数据。我们的 $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ 实验结果被美国Los Alamos实验室专家评价为“数量最全、精度最高”的实验结果。

$^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ 和 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应从热中子到1 MeV能区的反应截面已成为国际标准截面。我们的实验结果对于改进国际标准截面的评价具有重要作用。通过与国际专家进行交流,我们对这两个核反应的实验数据进一步进行了处理:得到了这两个反应截面的比值(包括 $^{10}\text{B}(n, \alpha)/^6\text{Li}(n, t)$ 、 $^{10}\text{B}(n, \alpha_0)/^6\text{Li}(n, t)$ 和 $^{10}\text{B}(n, \alpha_1)/^6\text{Li}(n, t)$ 截面比)随中子能量变化的函数,相关数据在2023年发表^[21]。该数据对于改进国际标准核反应数据评价具有重要价值。由于对这两个核反应进行实验测量时采用的实验条件(包括探测器和中子源)都相同,因此通过求比值可以有效降低结果的系统误差(消除中子源能谱

不确定性带来的误差)。进一步对两个反应的截面比的实验数据误差进行分析发现,这两个反应截面比的误差主要由 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应截面误差决定,也就是说,首批实验中, $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ 反应的实验结果更加准确,而 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应的结果误差相对较大,有必要重新对其进行实验测量。

2024年,我们制作了新的 ^{10}B 样品,基于中国散裂中子源反角白光中子源(质子打靶功率已升至170 kW),采用最新版的LPDA探测器阵列对 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应重新进行了实验测量。近期已完成实验数据分析,和首批实验结果相比,新的实验结果的统计精度得到了改善,中子的能区范围有所拓展。

3.2 n-p散射、n-d散射与 $^{12}\text{C}(n, xd)$ 反应

在首批物理实验中,基于中国散裂中子源反角白光中子源和LPDA初级版本,我们通过 $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ 和

$^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反应, 对氚(t)和 α 粒子进行了实验测量. 接下来, 我们希望对质子(p)和氘(d)进行测量. 在开展模拟计算、优化实验条件的基础上, 采用了有粒子分辨功能的LPDA改进版本(10套Si+CsI组成的 $\Delta E-E$ 探测器阵列), 对n-p散射和n-d散射先后完成了实验测量.

n-p散射实验采用厚度 9.476 mg/cm^2 的聚乙烯样品(CH_2)_n和 8.82 mg/cm^2 的碳样品分别测量事件和本底, 中国散裂中子源质子打靶功率为50 kW, 总束流时间210 h. 通过在6.14~52.48 MeV入射中子能区23个能点对反冲质子的测量, 得到了质心系中 $70^\circ\sim 160^\circ$ 范围内共10个角度出射中子的相对微分截面, 在较宽的中子能区得到了系统的实验结果. 其中在6.52~9.09、10.57~12.43和18.05~20.05 MeV三个中子区间是国际上首次得到微分截面实验结果^[22].

作为n-p散射实验的副产品, 通过对n-p散射碳样品本底事件的分析, 我们还得到了 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{xd})$ 反应的测量结果: 在实验室系 $15.1^\circ\sim 55.0^\circ$ 9个角度25~52.5 MeV中子能区6个能点, 得到了中子轰击 ^{12}C 产生氚的微分截面^[23], 这是国际上第一次基于白光中子源对 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{xd})$ 反应开展实验测量.

n-d散射实验采用厚度 3.04 mg/cm^2 的氘化聚乙烯膜(CD_2)_n测量氘事件, 采用厚度 8.82 mg/cm^2 的碳膜测量本底, 中国散裂中子源质子打靶功率为80 kW, 测量事件与本底的束流时间分别为164和44 h, 各分成6轮开展实验. 本工作得到了13.6~52.5 MeV能区12个能点n-d散射的相对微分截面, 并开展了理论分析, 是国际上第一次基于白光中子源在30~52.5 MeV能区对n-d散射微分截面进行实验测量^[24].

最近, 我们与杜布纳联合核子研究所Yury Glebov课题组合作, 在中国散裂中子源反角白光中子源上开展 $^{35}\text{Cl}(\text{n}, \text{p})$ 反应实验测量. 采用了两种粒子探测器——屏栅电离室和掺铈铯锂钇氯闪烁体 $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$ (CLYC), 对同一个核反应进行实验测量, 以期对结果进行对比. 项目获批了408 h的束流时间, 目前该实验已经完成了一半, 2025年11月将继续进行.

4 从轻带电粒子出射核反应拓展到裂变反应

裂变反应截面是贯穿反应堆工程、核安全、燃料循环、计量标准乃至国家关键技术链条的核心数据. 把裂变截面误差从百分之几降低到百分之一及以下, 是当代核反应数据测量的首要目标之一.

钍是重要的核能材料. 世界上的钍矿藏约是铀矿的3倍, 我国的钍资源丰富. 天然存在的钍仅有 ^{232}Th 一种同位素(丰度100%). ^{232}Th 原子核在中子作用下既可以发生裂变反应释放核能, 又可以通过钍-铀循环过程转变成易裂变核 ^{233}U . 因此, 中子诱发 ^{232}Th 裂变(即 $^{232}\text{Th}(\text{n}, \text{f})$)核反应是钍-铀循环过程最重要的核反应之一. 准确而系统的 $^{232}\text{Th}(\text{n}, \text{f})$ 裂变反应数据(产额、能量分布、角分布, 尤其是反应截面), 对于新一代核能系统的设计与研发是至关重要的. 然而, 目前 $^{232}\text{Th}(\text{n}, \text{f})$ 裂变反应截面实验数据不足、精度不够、分歧大, 远未达到工程设计所必需的精度要求. 调研发现, 采用不同种类中子源测量的裂变截面结果之间存在明显差异: 和采用单能中子源相比, 采用白光源测量得到的 $^{232}\text{Th}(\text{n}, \text{f})$ 截面系统地偏低, 在2~5 MeV和7~10 MeV能区, 这种差别分别高达10%和7%左右. 相比较而言, 经过多年的实验与理论研究, $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应截面已经成为中子核反应国际标准, 在1.4~20 MeV中子能量范围内截面的不确定度已降到0.5%~1%.

采用屏栅电离室探测器和背对背 $^{238}\text{U}_2\text{O}_3/^{232}\text{Th}(\text{OH})_4$ 样品, 基于北京大学4.5 MV静电加速器和中国原子能科学研究院HI-13串列加速器中子源, 在MeV能区和十几个MeV能区, 以 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 裂变反应截面为标准, 系统性测量了 $^{232}\text{Th}(\text{n}, \text{f})$ 反应截面. 用小立体角法通过测量 α 放射性确定了待测样品中的 ^{232}Th 核数. 采取了三项措施: 测量过程中对调屏栅电离室的前向与后向、用EJ-309液闪探测器解谱法测量中子能谱从而扣除低能中子造成的干扰、裂变事件探测效率的蒙卡模拟修正, 得到了比较准确的实验结果. 进而采用TALYS以及UNF程序, 对实验结果进行了理论分析. 我们在单能源和准单能源上的实验结果与已有的白光源测量结果一致, 从而证明了前人的单能源测量结果系统性偏高, 澄清了国际上不同中子源实验测量结果之间的分歧^[25], 对于改进数据评价具有重要作用.

为了有效提高反应截面的测量精度, 最近几年, 我们使用时间投影室探测器对裂变反应截面开展了测量研究. 内容见第8节.

5 从两体裂变拓展到三体裂变

三体裂变现象是钱三强与何泽慧夫妇在1946年发现的. 三体裂变, 包括自发三体裂变以及诱发三体裂变. 所谓三体裂变, 指的是在重核裂变为两个中等质量的原子核的同时, 还伴随着另外一个轻带电粒子的释放

的过程. 实验表明, 三体裂变中放出的轻带电粒子可能是 α 粒子、氦核、质子、氘核、 ^7Li 核等. 其中, 放出 α 粒子的概率最大(称为“长程 α 粒子”), 其次是氦核; 它们分别占两体裂变份额的千分之几与万分之几. 对三体裂变过程中产生的轻带电粒子开展实验测量, 确定其质量、电荷、产额、能量分布和角分布等物理量, 有助于进一步理解裂变过程.

采用屏栅电离室直接对三体裂变进行实验测量, 虽然从原理上可行, 但实际上其所能承受的工作气体压强以及所加的电压都难以达到实验要求. 此外, 在测量三体裂变轻带电粒子时, 还会伴随强烈的 α 衰变事件以及两体裂变事件干扰. 鉴于三体裂变产生的长程 α 粒子以及氦核的能量相对较高, 我们采用屏栅电离室做粒子探测器并且在样品表面附近挡一层铝膜的方法, 结合模拟计算使得裂变碎片以及绝大多数 α 衰变事件被铝膜阻挡, 从而使得长程 α 粒子以及氦的实验测量成为可能. 这种方法与常规的 ΔE - E 测量方法相比, 测量效率尤其是探测立体角大幅度提高, 有效地节省了测量时间. 与此同时, 挡铝膜也有其后果: 它割裂了待测长程 α 粒子以及氦核与裂变碎片之间的关联, 损失了重要的信息.

建立了相应的实验测量方法, 用屏栅电离室的阳极脉冲上升时间-阳极幅度二维谱鉴定与甄别待测事件, 得到了 ^{252}Cf 自发三体裂变长程 α 粒子以及氦相对于两体裂变的份额, 并采取实验测量与模拟计算相结合的方法, 确定了长程 α 粒子以及氦的出射能谱, 得到了比较准确的实验结果, 实验结果与文献中已有结果符合较好, 证明了我们所建立的实验测量方法与数据分析方法的可靠性^[26].

基于西北核技术研究院西安脉冲反应堆热中子孔道, 采用本团队建立的实验方法, 对热中子诱发 ^{235}U 三体裂变核反应产生的长程 α 粒子和氦相对于两体裂变的份额以及这两种粒子的能谱进行了实验测量, 与已有的实验结果进行了比较. 在此基础上, 基于中国原子能科学研究院强流高压倍加器氦-氘中子源, 在3.2 MeV中子能点, 对快中子诱发 ^{235}U 三体裂变核反应产生的长程 α 粒子相对于两体裂变的份额以及长程 α 粒子的能谱进行了实验测量, 目前正在进行实验数据分析.

将来, 会探索利用双端多用途时间投影室对三体裂变事件进行实验测量, 通过径迹重建技术实现两体裂变与三体裂变的同时测量, 并实现三体裂变中两个裂变碎片与第三个轻带电粒子的同时测量.

6 从两体核反应拓展到三体与四体核反应

6.1 $^{10}\text{B}(\text{n}, \text{t}\alpha)$ 三体核反应

中子诱发三体核反应 $^{10}\text{B}(\text{n}, \text{t}\alpha)$ 是重要的造氚核反应, 其反应产物是氚和两个 α 粒子. 该反应截面的实验测量难度较大. 已有的测量方法包括氚收集法、核乳胶法以及屏栅电离室法. 已有测量结果误差均较大, 采用不同实验方法得到的测量结果之间有很大差异. 为了实现对三个出射带电粒子的符合测量, 研制了实验所需要的大面积薄铝衬 ^{10}B 样品. 分别采用Am-Be中子源和北京大学4.5 MV加速器中子源, 利用石蜡慢化获得热中子, 在双屏栅电离室阴极背对背放置待测 ^{10}B 样品和 ^6Li 核数已知的标准 ^6LiF 样品(热中子诱发的 $^{10}\text{B}(\text{n}_{\text{th}}, \alpha)$ 反应截面和 $^6\text{Li}(\text{n}_{\text{th}}, \text{t})$ 反应截面均为国际标准截面), 测量得到了待测 ^{10}B 样品中的 ^{10}B 核数, 且采用两种中子源测量得到的结果在误差范围内一致.

基于脉冲数据采集卡和LABVIEW软件建立了全数字化数据采集系统, 实现了双屏栅电离室阳极-栅极以及前向-后向事件的双重符合功能, 有效降低了噪声与干扰信号. 基于北京大学4.5 MV静电加速器中子源, 在4.0、4.5、5.0 MeV三个能点, 对 $^{10}\text{B}(\text{n}, \text{t}\alpha)$ 反应截面进行了测量. 通过将理论分析与实验测量得到的阳极脉冲幅度-栅极脉冲幅度二维谱进行比较, 确定了待测事件数目和探测效率, 得到了可靠的 $^{10}\text{B}(\text{n}, \text{t}\alpha)$ 反应截面结果, 与此同时还得到了 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 两体核反应截面. 我们的实验结果表明, 前人实验中氚收集法和核乳胶法的测量结果都是可靠的, 而以往用屏栅电离室测量的结果系统性偏低. 本工作相关的理论分析和实验测量结果同时发表在*Phys Rev C*期刊上^[27,28].

进一步的分析与模拟计算表明, 上述实验测量及数据分析方法还有进一步优化的可能: 如果将原来的分别记录屏栅电离室前向、后向栅极脉冲波形与阳极脉冲符合波形, 改为记录阴极与前向、后向阳极符合脉冲波形, 可以得到更高的阴极脉冲信号幅度, 有利于三体与两体核反应事件的甄别. 采用新的思路, 对原来的实验数据重新进行了分析(阴极信号幅度根据电量守恒由栅极和阳极脉冲幅度获得), 得到了精度更高的截面结果^[29].

迄今我们只在3个能点用固体薄衬样品测量得到了 $^{10}\text{B}(\text{n}, \text{t}\alpha)$ 三体造氚核反应截面, 实验结果的误差较大. 今后将增加束流时间, 在MeV能区更多的能点开展实验测量, 并将尝试采用气体样品进行实验测量, 从而

提高数据精度,并争取对中间反应过程进行分析.采用时间投影室可以对该反应产生的三个带电粒子径迹进行重建,有利于甄别待测事件,是我们今后的研究目标之一.

6.2 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}3\alpha)$ 四体核反应

碳在自然界中广泛存在, ^{12}C 在天然碳中丰度高达98.89%.当中子能量超过几个MeV之后, $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}3\alpha)$ 四体核反应成为中子诱发 ^{12}C 最重要的反应道之一.该反应的逆反应,是天体演化过程中重元素合成的重要过程.已有的 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}3\alpha)$ 反应截面实验结果误差普遍较大,不同的实验与评价结果之间差异高达200%.对该反应截面进行测量,获得准确的实验结果,一方面对于完善轻核反应理论、认识多体核反应过程具有重要理论意义,另一方面在核技术应用尤其是在中子的探测中具有重要应用价值.利用金刚石探测器活性靶方法(即金刚石既作为粒子探测器又作为碳样品),基于中国原子能科学研究院HI-13串列加速器中子源和强流高压倍加器中子源,在9.5~14.7 MeV中子能区,对 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}3\alpha)$ 四体核反应截面进行了实验测量.通过实验测量与模拟计算相结合的方法确定了待测核反应事件数和探测效率,得到了可靠的实验结果^[30].

在对 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}3\alpha)$ 四体核反应截面进行测量的同时,还得到了 $^{12}\text{C}(\text{n}, \alpha)$ 两体核反应截面.后者已有的实验测量结果较多、误差较小.我们测量得到的 $^{12}\text{C}(\text{n}, \alpha)$ 反应截面与已有实验结果符合很好,说明了我们的实验测量方法和数据处理方法是可靠的.在实验测量基础上,采用R-矩阵计算程序RAC对相关核反应进行了分析,得到了系统的理论计算结果.这是国际上首次利用金刚石探测器测量得到 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}3\alpha)$ 四体核反应截面,我们的实验结果是迄今所有实验结果中精度最高的,有效地澄清了不同的实验与评价数据之间高达200%的差异^[30].进一步采用该方法,在更宽的中子能区对 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}3\alpha)$ 和 $^{12}\text{C}(\text{n}, \alpha)$ 反应进行了系统的实验测量.采用时间投影室可以对该四体核反应产生的三个 α 粒子径迹进行重建,能够有效地甄别待测事件,是我们今后的另一个研究目标.

7 从固体样品拓展到气体样品

和固体样品相比,采用气体样品开展中子核反应实验测量,样品核数能够增加两个数量级以上,从而可以有效节省束流时间.此外,某些样品如惰性气体,难

以做成固体样品.因此,将实验研究从固体样品拓展到气体样品具有重要的意义.本团队完善了气体样品实验测量方法,通过采取两方面的措施有效地解决了前人气体样品实验中壁效应强、中子注量和待测核数不准确等问题.首先,设计制作了适用于MeV能区气体样品实验的中子准直器,并采用快中子照相实验对其准直性能进行了测试与验证;其次,编制程序,建立了气体样品实验模拟系统,根据模拟预测结果可以优化实验测量条件,并获得准确的粒子探测效率,将模拟得到的中子注量空间分布和实验测量结果进行比较,更加准确地得到了气体样品的平均中子注量^[31].

基于北京大学4.5 MV静电加速器和中国原子能科学研究院HI-13串列加速器中子源,利用气体样品对 $^{14}\text{N}(\text{n}, \alpha)^{11}\text{B}$ 反应进行了实验测量.在4.5~11.5 MeV中子能区24个能点得到了 $^{14}\text{N}(\text{n}, \alpha_{0,1})^{11}\text{B}$ 反应的截面,进而进行了R-矩阵分析.我们的工作不仅澄清了已有实验和评价结果的分歧,也在国际上首次发现了 $^{14}\text{N}(\text{n}, \alpha_{0,1})^{11}\text{B}$ 反应的激发函数在10~11 MeV可能存在共振结构.此外,还研制了三聚氰胺($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$)固体样品,利用成熟的固体样品实验方法,在3个能点对 $^{14}\text{N}(\text{n}, \alpha_{0,1})^{11}\text{B}$ 反应截面开展了实验测量.气体样品与固体样品的测量结果在误差范围内一致,证明了我们建立的气体样品实验方法的可靠性^[32].

利用本团队建立的气体样品实验测量方法,在MeV到十几MeV中子能区,继续对 ^{16}O 、 ^{19}F 、 ^{20}Ne 、 $^{36}\text{Ar}(\text{n}, \alpha)$ 等反应截面完成了实验测量.其中,MeV能区 ^{19}F 、 ^{20}Ne 、 $^{36}\text{Ar}(\text{n}, \alpha)$ 反应的实验测量于2024年在杜布纳联合核子研究所EG-5静电加速器上完成.

通过对实验数据进行分析,目前已经得到 $^{16}\text{O}(\text{n}, \alpha_0)$ 反应截面数据.该反应的激发函数在MeV能区具有较密集的共振结构,实验测量难度大.经合组织核能机构(OECD/NEA)按照高低不同的优先等级发布了核数据需求清单;其中,对 $^{16}\text{O}(\text{n}, \alpha)$ 反应截面的需求最为强烈,在30个高优先级核反应中位列第一.除了得到截面之外,我们在国际上首次提出采用气体样品PHD (pulse height defect)效应测量 (n, α) 反应 α 粒子微分截面的方法,在关键能点得到了 $^{16}\text{O}(\text{n}, \alpha_0)$ 反应对角度的微分截面,填补了该能区微分截面实验数据空白.

气体样品 ^{19}F 、 ^{20}Ne 、 $^{36}\text{Ar}(\text{n}, \alpha)$ 反应的实验数据,目前正在处理之中.此外,我们已经研制了实验所需的 WO_3 固体样品并且购买了厚度合适的聚偏二氟乙烯($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$)薄膜固体样品.接下来,将开展固体样品

$^{16}\text{O}(\text{n}, \alpha)$ 和 $^{19}\text{F}(\text{n}, \alpha)$ 反应的实验测量,从而与气体样品实验结果进行对比.相关模拟计算和实验计划已完成.

8 从屏栅电离室探测器拓展到时间投影室探测器

和屏栅电离室相比,时间投影室具有带电粒子径迹重建功能,有效地提高了空间分辨和粒子种类鉴别能力,但其结构复杂,并需要配备相应的数据获取系统和数据分析软件.本团队所采用的多用途时间投影室(multi-purpose time projection chamber, MTPC)探测器由中国散裂中子源反角白光团队与中国科学技术大学联合设计加工,采用Micromegas结构实现阳极信号放大,阳极读出单元总数为1519.配合软件的开发,可实现粒子径迹重建、粒子种类鉴别、确定探测效率等功能.原则上讲,时间投影室的功能要比屏栅电离室强大得多;然而,在具体应用中会面临许多实际问题.本团队在国内首先将MTPC探测器用于裂变核反应的实验测量,建立与完善了基于时间投影室探测器的裂变反应截面测量方法,采用MTPC初级版本,在对探测器性能完成一系列测试的基础上,基于北京大学4.5 MV静电加速器单能中子源,在MeV能区5个能点对 $^{232}\text{Th}(\text{n}, \text{f})$ 反应截面开展了实验测量.通过径迹重建,对 ^{232}Th 样品的 α 衰变事件以及待测裂变事件实现了有效区分,得到了较高精度的 $^{232}\text{Th}(\text{n}, \text{f})$ 反应截面.这是国际上首次采用时间投影室测量得到 $^{232}\text{Th}(\text{n}, \text{f})$ 反应截面结果,获得国际认可,也是国内首次采用时间投影室测量得到裂变核反应截面^[33,34].

在上述单能中子源工作基础上,采用MTPC探测器和中国散裂中子源反角白光中子源开展了 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应截面测量.完善测量方法,在0.5 eV~10 keV能区得到了可靠的 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应截面结果;成功将基于MTPC探测器的裂变反应截面测量由单能中子源拓展到白光中子源.这是国内基于白光中子源与时间投影室探测器首次测量得到裂变核反应截面,为今后实现更高精度的裂变反应截面测量奠定了基础.此外,结合我们在单能源以及白光源上的裂变截面实验测量经验,对国际上的裂变截面实验测量方法进行了系统的调研与分析,指出了进一步降低裂变截面实验误差、提高测量精度所应采取的关键措施^[35].

9 总结与展望

本文综述了本团队30多年来开展中子诱发带电粒

子出射核反应实验研究的脉络,回顾了研究工作的发展历程,重点介绍了几个方面的重要进展和代表性工作.我们的实验结果被录入国际核反应实验数据库EXFOR中,我们的实验数据已经成为人类知识海洋中的水滴;我们感到非常荣幸,因为汇入大海的水滴不会干涸.

科学研究是一个不断开拓、不断超越、不断创新的过程.现代科学研究需要团队合作,需要充分交流.实验家要与理论家合作、接受理论家的指导,要与国内外同行合作、交流.此外,老中青科研工作者要紧密结合,取长补短、发挥优势.我们要永远抱着开放的心态不断进取.

大力发展核能已成为我们的国家战略.截至2024年4月,我国在运、在建和核准建设的核电机组共有102台,首次跃居世界第一.核废料的处理仍然面临安全、经济、社会三方面的挑战.随着我国经济的不断发展,能源与环境问题将会越来越突出.聚变核能的研发已经成为国际热点.氘-氚聚变过程中会放出14 MeV的中子.聚变能的利用面临大量实际问题需要解决(包括氚的生产、抗辐射材料的研发,以及14 MeV中子能量的利用等).中子诱发带电粒子出射核反应实验研究将在新型核能的开发过程中扮演越来越重要的角色.

从经济发展和国家需求层面,从学科的发展角度,从国际交流的不断广泛和深入、实验条件的逐步改善、青年队伍的壮大等方面可以推断,我国的中子核反应实验测量事业前景光明.

今后的工作重点,在于不断完善实验条件,进一步提高测量精度、扩展测量能区、增加所能测量的核反应种类,对关键核反应要不断优化实验条件,进行长期、多次实验测量.此外,要从稳定同位素样品拓展到放射性同位素样品.目前中国散裂中子源反角白光中子源常规采用的是双束团脉冲模式,因此面临双束团解谱问题.应该解决束团压缩问题并争取采用单束团模式开展重要的实验测量.要重视开展核反应机制分析、同位素效应分析、集团结构分析,从核数据实验测量拓展到核物理分析,揭示核反应机制随中子能量变化的规律,认识核结构与核反应之间的内在联系.此外,应该充分发挥人工智能在核反应实验研究过程中的作用,包括数据采集、实时分析、设备运行、模拟计算、事件判选等.中子核反应实验与理论研究使命重大.相信经过几代人的长期坚持和不懈努力,我国一定能够从核能大国成为核能强国.

致谢 感谢国家自然科学基金委员会、中国核数据中心、科学技术部、核物理与核技术全国重点实验室等长期以来给予的经费支持. 感谢杜布纳联合核子研究所弗兰克中子物理实验室、中国原子能科学研究院、清华大学、中国科学院高能物理研究所、中国科学技术大学等单位的合作者. 中国工程物理研究院材料研究所李永明老师阅读了全文并提出了修改建议, 在此致谢! 谨以此文纪念作者的老师和同事唐国有教授和陈金象教授.

参考文献

- Cheng H, Pang X, Sun B H. The origin of low-abundance neutron-deficient stable isotopes and the relevant cross section measurements (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 3088–3098 [程浩, 庞萱, 孙保华. 低丰度缺中子稳定原子核的起源及核反应截面研究进展. *科学通报*, 2024, 69: 3088–3098]
- Liu J, Jiang H, Cui Z, et al. Simultaneous measurement of energy spectrum and fluence of neutrons using a diamond detector. *Sci Rep*, 2022, 12: 12022
- Liu J, Jiang H, Cui Z, et al. Improved method to measure the electron drift velocity using the Frisch-grid ionization chamber. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2021, 1004: 165363
- Liu J, Jiang H, Cui Z, et al. Research on the electron attachment of oxygen using a Frisch-grid ionization chamber. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2021, 1013: 165669
- Liu J, Jiang H, Cui Z, et al. The impacts of the ballistic deficit and electron attachment on the pulse shapes of the Frisch-grid ionization chamber. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2021, 1014: 165751
- Zhang G H. Progress of experimental researches on neutron induced light charged-particle emission nuclear reactions (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2020, 50: 052005 [张国辉. 中子诱发轻带电粒子出射核反应实验研究进展. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50: 052005]
- Zhang G, Tang G, Chen J, et al. Differential cross-section measurement for the ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ reaction at 3.67 and 4.42 MeV. *Nucl Sci Eng*, 2000, 134: 312–316
- Zhang G, Tang G, Chen J, et al. Measurement of differential cross sections of the ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ reaction at 1.85 and 2.67 MeV. *Nucl Sci Eng*, 2003, 143: 86–89
- Zhang G H, Chen J X, Tang G Y, et al. Measurement of the differential cross sections and cross sections of the ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ reaction in the 1–2 MeV energy range (in Chinese). *Nucl Tech*, 2006, 29: 655–659 [张国辉, 陈金象, 唐国有, 等. 1~2 MeV能区 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反应微分截面与截面的实验测量, *核技术*, 2006, 29: 655–659]
- Zhang G, Chen J, Tang G, et al. Measurement of differential and angle-integrated cross sections of the ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ reaction in the MeV neutron energy range. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2006, 566: 615–621
- Zhang G, Gledenov Y M, Khuukhenkhue G, et al. ${}^{149}\text{Sm}(n,\alpha){}^{146}\text{Nd}$ cross sections in the MeV region. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 252502
- Gledenov Y M, Zhang G, Khuukhenkhue G, et al. Cross-section measurement and analysis for the ${}^{149}\text{Sm}(n,\alpha){}^{146}\text{Nd}$ reaction at 6.0 MeV. *Phys Rev C*, 2010, 82: 014601
- Jiang H, Cui Z, Hu Y, et al. Cross-section measurements for ${}^{58,60,61}\text{Ni}(n,\alpha){}^{55,57,58}\text{Fe}$ reactions in the 4.50–5.50 MeV neutron energy region. *Chin Phys C*, 2020, 44: 114102
- Bai H, Wang Z, Zhang L, et al. Calibration of an EJ309 liquid scintillator using an AmBe neutron source. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2017, 863: 47–54
- Bai H, Wang Z, Zhang L, et al. Simulation of the neutron response matrix of an EJ309 liquid scintillator. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2018, 886: 109–118
- Bai H, Jiang H, Lu Y, et al. ${}^{56,54}\text{Fe}(n,\alpha){}^{53,51}\text{Cr}$ cross sections in the MeV region. *Phys Rev C*, 2019, 99: 024619
- Jiang H, Cui Z, Hu Y, et al. Cross-section measurements for the ${}^{58,60,61}\text{Ni}(n,\alpha){}^{55,57,58}\text{Fe}$ reactions at 8.50, 9.50 and 10.50 MeV neutron energies. *Chin Phys C*, 2022, 46: 024001
- Liu J, Cui Z, Hu Y, et al. ${}^{63}\text{Cu}(n,\alpha){}^{60}\text{Co}$ cross sections in the MeV region. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2023, 50: 045106
- Bai H, Fan R, Jiang H, et al. Measurement of the differential cross sections and angle-integrated cross sections of the ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ reaction from 1.0 eV to 3.0 MeV at the CSNS Back-n white neutron source. *Chin Phys C*, 2020, 44: 014003
- Jiang H, Jiang W, Bai H, et al. Measurements of differential and angle-integrated cross sections for the ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ reaction in the neutron energy range from 1.0 eV to 2.5 MeV. *Chin Phys C*, 2019, 43: 124002
- Liu J, Bai H, Jiang H, et al. Ratios of the cross sections for the ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ reaction to the ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ reaction. *Eur Phys J A*, 2023, 59: 106
- Jiang H, Jiang W, Cui Z, et al. Measurement of the relative differential cross sections of the ${}^1\text{H}(n,el)$ reaction in the neutron energy range from 6 MeV to 52 MeV. *Eur Phys J A*, 2021, 57: 6
- Cui Z, Jiang H, Sun K, et al. Measurement of differential cross sections of neutron-induced deuteron production reactions on carbon from 25 to 52

- MeV. *Chin Phys C*, 2021, 45: 064001
- 24 Cui Z, Jiang H, Jiang W, et al. Measurement of relative differential cross sections of the neutron-deuteron elastic scattering for neutron energy from 13 to 52 MeV. *Eur Phys J A*, 2021, 57: 310
 - 25 Gledenov Y M, Cui Z, Liu J, et al. Cross section of the $^{232}\text{Th}(n,f)$ reaction in the MeV neutron energy region. *Eur Phys J A*, 2022, 58: 86
 - 26 Wu Z, Hu Y, Liu J, et al. A method to determine the absolute yields of the long-range alpha particles and the tritons in ternary fission using a twin-gridded ionization chamber. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2026, 1082: 171091
 - 27 Wang Z, Bai H, Zhang L, et al. Cross section measurement for the $^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ three-body reaction at 4.0, 4.5, and 5.0 MeV. I. Prediction of the experimental spectrum. *Phys Rev C*, 2017, 96: 044620
 - 28 Wang Z, Bai H, Zhang L, et al. Cross section measurement for the $^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ three-body reaction at 4.0, 4.5, and 5.0 MeV. II. Experimental setup and results. *Phys Rev C*, 2017, 96: 044621
 - 29 Bai H, Wang Z, Jiang H, et al. Cross sections of the $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ two-body and $^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ three-body reactions at 4.0, 4.5, and 5.0 MeV. *Eur Phys J A*, 2019, 55: 219
 - 30 Liu J, Cui Z, Hu Y, et al. $^{12}\text{C}(n,n+3\alpha)$ and $^{12}\text{C}(n,\alpha_0)^9\text{Be}$ cross sections in the MeV neutron energy region. *Phys Lett B*, 2023, 842: 137985
 - 31 Hu Y W, Jiang H Y, Cui Z Q, et al. Simulation method for measurement of the cross-section of the $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ reaction using a gridded ionization chamber. *Nucl Sci Tech*, 2021, 32: 78
 - 32 Hu Y, Gledenov Y M, Cui Z, et al. Cross section measurement for the $^{14}\text{N}(n,\alpha_{0,1})^{11}\text{B}$ reactions in the 4.5–11.5 MeV neutron energy region. *Eur Phys J A*, 2024, 60: 51
 - 33 Bai H, Yi H, Sun Y, et al. Measurement of cross section for the $^{232}\text{Th}(n,f)$ reaction using a time projection chamber. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2024, 1058: 168912
 - 34 Bai H, Yi H, Sun Y, et al. Cross section measurement for the $^{232}\text{Th}(n,f)$ reaction in the 4.50–5.40 MeV region using a time projection chamber. *Chin Phys C*, 2024, 48: 104001
 - 35 Bai H, Zhang G. Measurement methods of the cross sections for neutron-induced fissions. *Radiat Detect Technol Methods*, 2025, 9: 575–591

Summary for “中子诱发带电粒子出射核反应实验研究进展”

Progress of experimental research on neutron-induced charged-particle emission nuclear reactions

Guohui Zhang

State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Institute of Heavy Ion Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China
E-mail: guohuizhang@pku.edu.cn

Nuclear fission and fusion are the primary means for nuclear energy release. In both processes, the interaction between neutrons and atomic nuclei—that is, neutron-induced nuclear reactions—is involved. Neutrons, being electrically neutral, can easily induce various types of nuclear reactions. The level of experimental measurement capabilities for nuclear reactions serves as an important reflection of a country’s scientific and technological strength. Peking University and the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) in Dubna have signed a protocol on “Carrying out Joint Studies on the Mechanism of Interaction of Neutrons with Nuclei and on the Properties of Highly Excited Nuclear States”, which has been renewed multiple times and remains in effect at present. For over three decades, experimental and theoretical studies have been performed on neutron-induced light charged particle emission nuclear reactions (n, lcp) in a range of light, medium-mass, and heavy nuclei. These investigations were carried out using neutron sources including the 4.5 MV van de Graaff accelerator at Peking University, the EG-5 van de Graaff accelerator at JINR, the Beijing HI-13 tandem accelerator neutron source, and the China Spallation Neutron Source Back-n white neutron source (CSNS Back-n), etc. In recent years, the experimental research has expanded from neutron-induced light charged particle emission reactions (n, lcp) to fission reactions (n, f) of heavy nuclei. The charged particle detectors employed include the grid ionization chamber (GIC), light charged particle detector array (LPDA), diamond detector, and multi-purpose time projection chamber (MTPC). Over the years, our team has continuously upgraded experimental facilities, refined research methodologies, improved measurement accuracy, expanded domestic and international collaborations, and extended neutron energy ranges for measurements. Up to now, 68 nuclear reactions and 128 sets of nuclear reaction data measured or contributed to by our team have been included in the international experimental nuclear reaction database, EXFOR. In this database, our laboratory is assigned the code “CPRBJG” where “CPR” stands for “China” and “BJG” represents “Peking University”. More than 150 papers were published in domestic and international academic journals. Through Sino-Russian collaboration, we have supervised over 20 master’s and doctoral students in obtaining their degrees. Dr Yury Gledenov, an expert of the Frank Laboratory of Neutron Physics at the Joint Institute for Nuclear Research, who has collaborated with our team for over 30 years and visited China 26 times for joint experimental research, was awarded the 2023 Chinese Government Friendship Award. This paper reviews the developmental trajectory of the joint research related to neutron-induced charged particle emission reactions (n, cp), encompassing both neutron-induced light charged particle nuclear reactions (n, lcp) and fission reactions (n, f), highlights key achievements, and provides an outlook on future developments.

neutron, (n, cp) reaction, (n, lcp) reaction, (n, f) reaction, cross section, differential cross section

doi: [10.1360/CSB-2025-5457](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5457)