中子诱发轻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, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871

*E-mail: guohuizhang@pku.edu.cn

收稿日期: 2019-07-04; 接受日期: 2019-07-31; 网络出版日期: 2019-10-23

摘要 本文介绍了中子诱发轻带电粒子出射核反应(n,lcp)研究的科学意义、研究方法和实验难点, 对国际与国内的相关研究情况进行了比较全面的综述. 对国际上基于n_TOF, LANSCE, ORELA和GELINA等中子源所进行的有关实验研究工作进行了系统的介绍, 对国内的实验研究进行了全面介绍, 对北京大学团队多年来基于4.5 MV静电加速器以及近年来基于北京HI-13串列加速器、中国散裂中子源反角白光中子源CSNS Back-n等中子源上所开展的实验研究工作进行了重点介绍. 最后对国内今后在该研究方向的发展做了展望.

关键词 中子, 轻带电粒子, 核反应, 实验测量

PACS: 25.40.-h, 28.20.-v, 29.25.Dz

1 引言

在裂变与聚变核反应过程中都会涉及中子, 包括中子诱发核反应以及中子的放出(放出的中子还会引起核反应). 中子核反应在核能的释放过程中居于核心地位. 中子核反应数据(包括各种核反应截面、角分布、微分截面、双微分截面和共振参数等)在核能开发、核技术应用、核物理研究中具有非常重要的作用. 比如, 国际上重要的模拟计算软件如MCNP, GEANT4, FLUKA等, 都以准确而全面的核反应数据库为基础, 模拟结果的可靠性以核反应数据的准确性为前提. 中子不带电, 容易引起核反应. 能够引起核反应的中子的能量范围跨越了十几个数量级, 从冷中子(10^{-4} eV)直到超高能中子(GeV). 中子核反应种类繁

多, 简单分为裂变反应(n,f)、辐射俘获反应(n, γ)、散射(弹性散射(n,n)与非弹性散射(n,n')), 出射轻带电粒子核反应(n,lcp)等.

其中, 裂变反应过程释放出裂变核能, 目前核电站的能源都是基于裂变核反应. 辐射俘获反应过程放出 γ 射线并与核燃料的循环(如铀-钚循环和钍-铀循环)相联系; 通过核燃料循环, 分别将可裂变核素 ^{238}U 与 ^{232}Th 转变成易裂变核素 ^{239}Pu 和 ^{233}U , 使自然界中的裂变资源得到充分的利用. 中子在与物质的散射过程(包括弹性散射与非弹性散射)中实现慢化, 伴随非弹性散射还会放出 γ 射线. 中子诱发轻带电粒子出射核反应, 简称为(n,lcp)反应(其中的lcp是light charged particle的缩写, 包括p, d, t, ^3He , α 粒子等), 有的文献也称其为(n,x)反应或(n,cp)反应, 在该反应过程中, 中子与原子核反应, 产

引用格式: 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 H. Progress of experimental researches on neutron induced light charged-particle emission nuclear reactions (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 052005, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0226

生轻带电粒子. 本文将对国内外(n,lcp)反应的研究情况进行综述.

1.1 (n,lcp)反应研究的科学意义

(n,lcp)反应研究的意义, 可以从如下4方面来阐述.

首先, 中子核反应标准截面的完善和中子探测与防护的需要. 由于中子不带电, 难以对其进行直接测量. 中子与原子核发生核反应, 能产生带电粒子(或 γ 射线), 一般通过探测中子核反应产生的带电粒子(或 γ 射线), 实现间接测量中子的目的, 例如 $^1\text{H}(\text{n,p})\text{n}$, $^6\text{Li}(\text{n,t})^4\text{He}$, $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$, $^3\text{He}(\text{n,p})^3\text{H}$ 就属于这类核反应. 另外, 核工程中为了实现对中子的防护与屏蔽, 也必须依靠这类核反应, 使中子的能量有效降低, 进而转化成带电粒子加以屏蔽. 通过人们的长期努力(包括实验测量、理论分析、数据评价等), 上述核反应的截面, 在一定能区已经成为国际标准截面, 为中子通量和中子能谱的测量奠定了基础. 应当指出, 人们对于这些标准核反应的研究从未停止过, 所有的核反应截面标准都向着更高的精度、更宽的能区处在不断发展之中. 总之, 对(n,lcp)反应的研究可以促进中子核反应标准截面的完善与发展.

其次, 核工程应用、电子学安全以及核医学发展的需求. 中子与原子核发生(n,lcp)反应产生带电粒子, 如(n,p)与(n, α)反应分别会产生质子与 α 粒子. 带电粒子在结构材料(如铁、镍)中运动会使材料产生辐射损伤, 同时这些粒子在材料中不断积累, 会形成氢和氦等, 使材料发生肿胀、脆化和变形, 严重影响其机械性能. 所以开展(n,lcp)反应研究, 对于聚变堆、ADS、高能加速器等核设施的设计与防护具有重要的实用价值. 比如 $^{56}\text{Fe}(\text{n},\alpha)^{53}\text{Cr}$ 反应截面, 在核工程上是非常重要的, 然而目前的实验结果不足且误差较大. 又比如, 压水堆一回路内有大量的水, 中子与水中的氧发生反应 $^{16}\text{O}(\text{n,p})^{16}\text{N}$, 产生放射性的 ^{16}N , 其 β^- 衰变半衰期仅7.13 s, 并且伴随放出 γ 射线, 成为一回路的重要放射性来源. 再比如, 在新一代快中子反应堆中, 常用钠钾合金做冷却剂, $^{39}\text{K}(\text{n,p})^{39}\text{Ar}$ 反应产生的 ^{39}Ar 半衰期为269年, 成为反应堆冷却剂放射性物质的主要来源; 同时冷却剂中产生的氦气又威胁反应堆的安全运行与维护. 因此根据核反应截面信息, 可以准确预测反应堆内的放射性来源与强度. 随着电子设备的集成度不断提高, 大气环境中的高能中子诱发的单粒子效应越来越引起

人们的重视. 这类现象主要是由于高能中子与半导体内的硼、硅等元素发生(n,p), (n, α)等核反应, 次级带电粒子沉积能量造成的. 因此, 准确测量中子与半导体材料所发生(n,p)和(n, α)反应截面, 对于电子学设备的设计与安全防护有重要意义. 此外, (n,lcp)反应在核医学中也有应用, 比如热中子引起的 $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ 反应、共振中子引起的 $^{33}\text{S}(\text{n},\alpha)^{30}\text{Si}$ 反应等可用于癌症的治疗.

第三, 核天体物理研究的需要. (n,lcp)反应在大爆炸核合成过程中发挥了重要作用, 这方面的研究对于探索宇宙内元素的起源、理解同位素的丰度等都有重要意义. 比如, $^7\text{Be}(\text{n,p})$, (n, α)反应截面的准确测量, 对澄清核天体物理中的锂丰度异常问题有重要作用; 再比如, $^{25}\text{Mg}(\text{n},\alpha)^{22}\text{Ne}$ 反应的产物均为惰性气体, 精确测量该反应的截面, 可以得到更准确的恒星演化模型, 而该反应的逆反应 $^{22}\text{Ne}(\alpha,\text{n})^{25}\text{Mg}$ 又是天体物理中最重要的中子源反应之一.

第四, 完善核反应理论的需要. 要获得准确的核反应数据, 必须依靠实验测量和理论分析的紧密结合. 但是, 实验的开展要受到各种实验条件的限制; 实际的测量工作只能针对个别核开展, 并且只能在特定能区获得具体的核反应数据; 此外, 可靠的结果还需要重复测量与多家实验验证等. 而核反应理论分析则不受实验条件的限制, 而且通过理论计算可以得到系统的结果(比如激发函数与角分布的形状). 然而, 目前的核反应模型理论, 需要确定具体的模型参数(如光学模型参数、能级密度参数等). 采用不同的模型参数, 得到的结果能有数量级的差别; 只有通过实验结果的比较, 才能准确确定模型参数. 所以, 核反应实验研究对于推动核反应理论的完善是至关重要的. 具体到(n,lcp)反应, 该类研究可以揭示中子核反应机制, 分析核反应同位素效应, 促进人们认识核反应过程的基本规律.

1.2 (n,lcp)反应的研究方法

与一般核反应的研究方法一样, (n,lcp)反应的研究方法包括: 实验测量、理论分析、模拟计算. 三种方法各有侧重, 互相补充, 缺一不可. 理论分析可以得到截面与微分截面随入射中子能量或粒子出射角度等变化的整体趋势和系统结果, 但在数值上可能与准确值相差较多, 甚至差很多倍. 实验测量可以得到比较准确的结果, 但受测量条件和反应截面大小、本底干扰等因素的限制, 因此只能对关键核素在重要的能区

进行测量. 由于带电粒子从样品中出射总会有能损和自吸收, 而且所有探测器都具有一定的阈值, 总会有一部分带电粒子不能被探测到, 所以探测效率不可能做到100%, 探测效率的计算一般采用模拟计算方法. 此外, 为了了解实验本底干扰情况、估计所需的束流时间, 在实验之前就要对测量谱进行模拟计算与预测.

1.3 (n,lcp)反应的实验测量难点

本文重点讨论(n,lcp)反应的实验研究进展. 由于实验测量困难, 有关(n,lcp)反应的测量数据普遍缺乏. 实验测量的难点集中表现在3方面. 首先, 与辐射俘获以及散射反应等相比, (n,lcp)反应截面一般都很小, 因此不容易得到足够的计数, 往往需要很长的测量时间. 其次, 与裂变反应相比, (n,lcp)反应能较低, 因此不容易对出射粒子进行测量. 而且样品衬底、杂质、探测器结构材料等都会发生(n,lcp)反应, 导致待测反应一般都伴有较强的干扰本底, 需要采用专门的方法甄别待测事件, 还要对本底进行实验测量, 并加以扣除. 第三, 由于带电粒子在样品中的射程很短, 带电粒子从样品中出射时总会有能损和自吸收, 因此实验所用样品的厚度受到限制, 或者放射性样品核数有限; 即使采用最先进的中子源, 待测事件的计数率都很低, 实验结果的统计误差较大. 由于这些测量的难点, 使得(n,lcp)反应截面实验数据普遍缺乏.

2 国际上开展(n,lcp)反应实验研究情况

中子核反应实验离不开必要的设备条件, 包括中子源、实验样品、粒子探测器、电子学与数据获取系统等. 此外还需要进行数据存储、分析与处理, 以及理论分析、模拟计算等, 需要相应的硬件和软件. 上述实验条件中, 中子源是最基本的, 也是最重要的条件.

中子源种类繁多. 按照产生中子方式划分, 可以将其分为同位素中子源、反应堆中子源和加速器中子源. 按照年代的发展, 又可分为第一代、第二代和第三代中子源. 第一代中子源包括同位素中子源和常规的加速器中子源; 第二代中子源以电子加速器白光中子源为代表, 包括高通量反应堆中子源; 第三代中子源以散裂中子源为代表.

同位素中子源是人们最早使用的一类中子源, 目

前还在发挥作用. 最近仍然有基于这类中子源的新的实验结果发表. 比如, 2017年Kirsch等人^[1]采用带²⁵²Cf中子源的裂变室、用含⁶Li的闪烁体做样品兼做探测器, 测量了从245 keV–10 MeV的⁶Li(n,t)⁴He反应截面.

反应堆中子源, 典型的是法国Grenoble的ILL, 它是世界上最强的反应堆中子源, 可以提供热中子束与冷中子束. 依托该中子源, 开展了热中子诱发的³⁵Cl(n,p) (1994), ⁵⁰V(n,p) (1994), ¹⁷O(n,α) (1995), ³⁶Cl(n,p)和(n,α) (1996), ⁴¹Ca(n,p)和(n,α) (1998), ³⁷Ar(n,p)和(n,α) (1999, 2001), ¹⁴N(n,p) (2000), ²⁶Al(n,p) (n,α_i) (2001)等一系列带电粒子出射核反应截面测量^[2–4]. 采用极化的冷中子束, 分别在2011和2017年, 得到了⁶Li(n,t)⁴He反应中的t粒子和¹⁰B(n,α)⁷Li*→⁷Li+γ反应中的γ射线及α粒子的所谓P-odd asymmetry实验结果^[5,6].

目前, 大多数中子核反应实验都是在加速器中子源上完成的. 以下主要介绍基于加速器中子源的(n,lcp)反应实验研究工作. 加速器中子源又分为单能中子源和白光中子源两大类, 通过不同的核反应产生中子, 分别进行介绍.

2.1 CERN n_TOF白光中子源

CERN的n_TOF中子源通过20 GeV的高能质子束轰击铅靶, 发生散裂反应产生连续能谱的白光中子, 平均每个质子产生近300个中子^[7]. n_TOF合作团队由近40个合作单位、约120人组成. 近期他们在(n,lcp)核反应研究方面取得了重要进展. 2016和2018年接连在*Physical Review Letters*上发表了两篇有关⁷Be(n,α)和⁷Be(n,p)反应截面实验与天体物理分析的文章^[8,9], 代表了国际中子核数据测量的最高水平.

以下对n_TOF团队近期完成的4个实验进行比较详细的介绍, 以期提供借鉴.

(1) ⁷Be(n,α)⁴He反应^[8,10]

该反应的特点之一是样品核⁷Be具有极强的γ放射性(比活度高达13 GBq/μg), 特点之二是同时出射两个能量较高的α粒子(总能量16.6 MeV). 准确的⁷Be(n,α)⁴He反应截面可以对天体物理中著名的锂丰度异常问题提供可能的解释. 由于反应截面很小, 此前仅有1963年的反应堆热中子实验结果, 50多年来没有新的实验工作. 2014年7月建成的n_TOF第二中子实验区EAR2, 为该实验的进行奠定了基础. 第二实验区距离散裂靶仅20 m(明显近于第一实验区EAR1的185 m),

有效提高了中子注量率.

采用不同方法制作了两个 ^7Be 样品(活度分别约为18 GBq), 样品直径3 cm, 通过测量放射性活度确定 ^7Be 核数. 制靶过程在瑞士的PSI完成, 所有的制靶操作均在热室中进行.

采用Si半导体探测器测量核反应产生的两个 α 粒子. 通过二者符合的方法甄别有效事件、降低本底. 4片灵敏区面积均为3 cm $\times$ 3 cm、厚度140 μm 的Si半导体与两个 ^7Be 样品, 组成两个Si- ^7Be -Si探测单元(每两个探测器之间夹一个样品). 对探测效率进行了模拟计算. 为了尽量增大探测立体角, Si半导体探测器放在中子束内. 因受中子与 ^7Be 样品发出的 γ 射线照射会产生辐射损伤, 实验过程中对探测器的漏电流进行监测并不断调整其偏压. 整个实验在束测量时间长达50 d.

用 $^6\text{Li}(\text{n}, \text{t})^4\text{He}$ 反应对测量系统进行能量刻度并作为截面标准. 从热能点到10 keV, 得到了 $^7\text{Be}(\text{n}, \alpha)^4\text{He}$ 反应截面. 实验结果与分析表明, 该反应截面足够小, 对于宇宙大爆炸过程中锂丰度异常的贡献可以忽略. 今后为了将所测能量提升到更高的能区, 需要采用更快的电子学系统.

(2) $^7\text{Be}(\text{n}, \text{p})^7\text{Li}$ 反应^[9,11]

该反应截面的测量同样可为解决锂丰度问题提供思路. 已有的两家直接测量数据之间存在很大分歧(平均相差30%), 并且与通过逆反应 $^7\text{Li}(\text{p}, \text{n})^7\text{Be}$ 测量得到的结果不一致, 因此有必要开展新的、更准确的测量.

实验的难点在于, 一方面样品具有强放射性, 会形成很强的本底干扰; 另一方面因反应 Q 值较小(1.64 MeV), 待测质子的能量很低(1.44 MeV), 不容易测量. 为了降低杂质材料引起的本底干扰, 需要采用高纯度的 ^7Be 样品, 这一点与 $^7\text{Be}(\text{n}, \alpha)^4\text{He}$ 测量是不同的.

采用离子注入法, 将 ^7Be 样品做到20 μm 的铝衬底上. 通过成像方法, 测得样品核数在本底片上近似呈高斯分布(半高宽为5 mm). 数据处理时考虑了样品的不均匀性引入的修正. 正式实验的 ^7Be 样品放射性活度为1.03 GBq.

探测器采用条形Si半导体, 组成灵敏面积为5 cm $\times$ 5 cm的 ΔE -E望远镜系统. ΔE 和E探测器均由16条长5 cm、宽3 mm的Si半导体组成, 厚度分别为20 μm 和300 μm . 通过 ΔE 和E两个单元的符合进一步降低本底. 由于反应截面较大, 探测器放在了中子束流之外, 从另一方面有效降低了本底. 样品平面与中子束流成45°

角, 探测器的法线与中子束流方向成90°角, 样品中心到探测器中心约5 cm. 利用蒙特卡罗方法计算了带电粒子探测效率. 用数据采集卡记录脉冲波形.

实验在n_TOF第二中子实验区EAR2(距离散裂靶20 m)进行, 用 $^6\text{Li}(\text{n}, \text{t})^4\text{He}$ 反应对测量系统进行能量刻度并做截面标准. 对空样品(不含 ^7Be)也安排了实验测量, 对本底特别是 $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})$ 反应本底进行了扣除(本底材料中含 ^{14}N). 从热能到325 keV能区得到了反应截面实验结果. 结果表明, $^7\text{Be}(\text{n}, \text{p})^7\text{Li}$ 反应对宇宙大爆炸中锂丰度异常的贡献同样可以忽略.

(3) $^{33}\text{S}(\text{n}, \alpha)^{30}\text{Si}$ 反应^[12]

^{33}S 是稳定同位素, 在天然硫中丰度0.75%. 该反应的研究一方面在核医学领域具有潜在应用价值(共振中子治癌), 另一方面对核天体物理的研究(^{36}S 的产生)有意义. 该反应的 Q 值为3.5 MeV且在keV能区存在共振. 比如在中子能量13.45 keV是第一个也是最强的共振峰. 已有实验数据之间存在很大分歧.

在CERN n_TOF第一实验区EAR1完成实验. 长达185 m的中子飞行距离, 保证了足够高的中子能量分辨率, 便于在共振能区进行截面测量. 中子束流直径8.0 cm, 配合足够大的样品, 以提高计数率.

硫样品制作面临两方面的困难. 首先, 硫质地松软, 在室温下就会升华; 其次, 硫与物质之间作用微弱, 不易形成稳定的结合. 通过将 ^{33}S 粉末热蒸发到覆铜的Kapton膜上, 形成稳定的化合物, 制作了直径为8.0 cm的6个 ^{33}S 样品. 利用RBS方法准确测量了样品中的 ^{33}S 原子数. 几次的对照测量表明, ^{33}S 原子在长达几年的时间里都没有损失^[13].

以 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 为样品材料, 采用磁控溅射法还制作了1个 ^{10}B 样品, 用扫描电子显微镜测量了样品厚度. 实验以 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反应作为截面标准. 采用了9个Micromegas探测器(工作气体为一个大气压的88%Ar+10%CF₄+2%iC₄H₁₀). 除了6个 ^{33}S 样品、1个 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 样品以外, 还有2个空样品(无 ^{33}S 样品的覆铜Kapton膜), 用于测量本底. 6个 ^{33}S 样品和2个空样品均以背对背的方式放置在探测器内.

在10–300 keV能区测得了 $^{33}\text{S}(\text{n}, \alpha)^{30}\text{Si}$ 反应截面. 通过R-矩阵分析, 得到了11个共振峰的 α 道宽度与强度. 下一步将进行更低能区(从热能到10 keV)的实验测量.

(4) $^{59}\text{Ni}(\text{n}, \alpha)^{56}\text{Fe}$ 反应^[14]

^{59}Ni 是放射性同位素, 半衰期 7.6×10^4 年, 衰变方式

为轨道电子俘获. $^{59}\text{Ni}(\text{n},\alpha)^{56}\text{Fe}$ 反应产物是稳定的 ^{56}Fe , 反应能 $Q=6.196\text{ MeV}$. 从核物理角度讲, 该反应与核天体物理的 s-过程密切相关; 从核技术角度, 该反应涉及不锈钢材料的脆化: 不锈钢中有 ^{58}Ni , 通过两步核反应 $^{58}\text{Ni}(\text{n},\gamma)^{59}\text{Ni}(\text{n},\alpha)^{56}\text{Fe}$ 产生氦, 影响不锈钢材料的机械性能, 发生肿胀、脆化和变形等.

Harvey 等人 1975 年在 ORELA 曾对该反应进行过测量. 1999 年 Koehler 和 Gledenov 在 ORELA 对该反应重新进行了测量, 但并未发表结果. 评价库与实验结果之间存在分歧.

2012 年在 CERN n_TOF 第一实验区 EAR1 进行了实验. 采用与上两次测量相同的样品; ^{59}Ni 样品直径为 15 mm, 采用电镀法做到 Pt 片上, 并涂有一层 LiF. 以 $^6\text{Li}(\text{n},\text{t})^4\text{He}$ 反应截面为标准, 用相对测量法对 $^{59}\text{Ni}(\text{n},\alpha)^{56}\text{Fe}$ 反应截面进行了测量.

采用 3×3 排列的 9 个 sCVD 金刚石探测器作为带电粒子探测器, 每个探测器的面积为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ ^[15]. sCVD 探测器的最大特点在于其耐辐照性, 所以可以长时间放在中子束流内. 样品到探测器的距离为 1 mm.

实验所用束流时间为 4 周. 除了事件测量外, 采用 Pt 箔还进行了本底测量, 之后又测量了金刚石探测器在中子束内的本底, 以及无束流情况下 ^{59}Ni 的放射性本底, 分别进行了扣除.

通过数据拟合分别得到 $^6\text{Li}(\text{n},\text{t})^4\text{He}$ 反应产生的氦事件峰计数和 $^{59}\text{Ni}(\text{n},\alpha)^{56}\text{Fe}$ 反应产生的 α 事件峰计数, 获得了 203 eV 的共振峰附近的截面数据, 并与已有测量及评价结果进行了比较.

回顾上面在 n_TOF 上完成的 4 个实验, 可以发现有 3 个特点. 一是所用的实验样品大多数都是放射性的; 二是针对不同的核反应, 采用了不同的带电粒子探测器, 包括 Si 半导体、条形 Si 半导体望远镜系统、Me-cromegas 探测器以及 sCVD 阵列等; 三是由于待测事件的计数率很低, 每个实验都用了很长的测量时间(以月为单位).

2.2 美国的 LANSCE 中子源

美国 Los Alamos 国家实验室的 LANSCE 中子源也是散裂中子源, 与 CERN n_TOF 不同的是其质子能量较低, 为 800 MeV, 有 3 个不同厚度的靶, 靶材料为钨, 采用不同脉冲结构的质子束, 约有 20 条中子束线. 中子

能区从热能到几百 MeV.

基于 LANSCE 中子源, 研制了专门用来测量 (n,lcp) 反应的带电粒子探测器系统 NZ, 后来升级为 LENZ, 由 4 个 ΔE -E 探测器单元组成望远镜探测系统. 其中 ΔE 探测器使用气体探测器, E 探测器用 Si 探测器. 用该探测系统对 $^{59}\text{Co}(\text{n},\text{p})$, (n, α), $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$, $^6\text{Li}(\text{n},\text{t})^4\text{He}$ 等核反应开展了实验测量^[16-19].

为了测量 $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$ 反应截面, 制作了 Ta_2O_5 固体 ^{16}O 样品^[18]. ^{16}O 的丰度在天然氧中高达 99.76%, 水、氧化物、混凝土、生物体、反应堆的慢化剂和冷却剂中都含有大量氧. $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$ 反应截面数据非常重要, 然而不同的实验以及几家评价结果之间有很大的分歧. 该截面的测量被列入国际实验计划 CIELO 中. 其逆反应是天体物理中最重要的中子源反应之一 $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$. $^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)^{13}\text{C}$ 反应的特点之一是其反应能为负值 ($Q=-2.21\text{ MeV}$), 测量要求探测器有较高的信噪比、较低的探测阈; 另外一个特点是在 MeV 能区有许多共振峰, 且其反应截面较小, 测量需要有足够高的能量分辨率、足够多的样品量、尽量高的探测效率.

除了与 LENZ 探测系统有关的工作以外, 20 世纪 90 年代 Koehler 等人采用 LANSCE 中子源和电离室探测器以及 Si 探测器等, 对与核天体物理有关的 (n,lcp) 反应进行了实验测量与理论分析^[20], 包括 $^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})$ (1989), $^{17}\text{O}(\text{n},\alpha)$ (1991), $^{36}\text{Cl}(\text{n},\text{p})$ (1993), $^{26}\text{Al}(\text{n},\text{p})$, (n, α) (1997) 反应等^[21-24].

2.3 ORELA 与 GELINA

ORELA 与 GELINA 都是基于强流中能电子加速器的白光中子源, 属于第二代中子源, 分别位于美国的 ORNL 国家实验室和比利时 Geel 的欧盟联合实验室 JRC/IRMM. 电子束的能量分别为 180 和 100 MeV, 分别轰击 Ta 和 U 靶发生韧致辐射产生 γ 射线, 再通过 (γ,n) 和 (γ,f) 反应产生中子. 100 MeV 的电子打到重金属靶上平均每个电子产生约 0.05 个中子^[7]. 在这两个中子源上开展的中子核反应截面测量, 其中与 (n,lcp) 反应有关的主要是共振能区核天体物理方面的工作^[20], 比如 $^{147}\text{Sm}(\text{n},\alpha)$ (2000, 2004), $^{95}\text{Mo}(\text{n},\alpha)$ (2003), $^{17}\text{O}(\text{n},\alpha)$ (2002), $^{26}\text{Al}(\text{n},\alpha)$ (2007), $^{36}\text{Cl}(\text{n},\text{p})$, (n, α) (2007), $^{35}\text{Cl}(\text{n},\text{p})$ (1994), $^{37}\text{Ar}(\text{n},\text{p})$, (n, α), $^{39}\text{Ar}(\text{n},\alpha)$ (2001) 等反应截面测量与分析^[2,3,25-30].

以上介绍的国外研究工作都是基于白光中子源.

另外, 还有一些利用静电加速器单能中子源开展的工作. 例如, 比利时IRMM的Giorginis和Hambach团队^[31-34]、俄罗斯IPPE的Khryachkov团队^[35-37]、日本东北大学Baba团队^[38-40], 基于各单位的静电加速器单能中子源, 采用屏栅电离室等探测器, 对重要的轻核、气体核以及结构材料核的(n,lcp)反应进行了实验测量. 德国KIT的Käeppler团队^[41,42]还基于静电加速器⁷Li(p,n)反应, 开展了与天体物理相关的麦克斯韦谱中子反应截面的测量工作.

总结以上内容可以发现, 国际上对(n,lcp)反应的实验研究有以下3个特点. 首先, 对(n,lcp)反应的研究还是比较零散的, 不像对辐射俘获、裂变、全截面实验那样已经有了系统的研究成果, 这从另一个角度反映出(n,lcp)实验研究难度较大, 也给我们提供了发展机遇. 其次, 针对具体的核反应, 采用了多种不同类型的探测器, 测量方法多种多样. 第三, 实验样品有的是稳定同位素, 但不断朝着放射性同位素方向发展, 而且近期本领域的实验研究发展迅速^[8,9].

3 国内开展(n,lcp)核反应实验研究情况

国内主要采用两种方法开展(n,lcp)核反应实验研究: 活化法和直接测量法. 活化法通过测量余核的次级放射性来得到中子核反应截面. 优点是: 第一, 样品位置可以非常靠近中子源, 从而充分利用中子流强, 得到准确的测量结果; 第二, 采用天然样品可以在一次实验中测量多种核反应截面而不需要使用同位素样品, 设备相对简单. 而且活化法可以测量各种核反应截面, 不限于(n,lcp)反应. 不足之处是只能测量核反应截面, 不能得到粒子角分布、微分截面等信息, 并且要求核反应产物核具有适当的半衰期. 而直接测量法则与活化法互补, 利用粒子探测器直接测量核反应产生的轻带电粒子, 不要求余核具有放射性, 而且可以同时得到截面、角分布、微分截面等; 但需要高纯度的同位素样品, 实验设备比较复杂, 与活化法相比测量结果误差较大.

兰州大学孔祥忠、河西学院罗均华等, 基于固体T-Ti靶d-T中子源, 利用活化法在14 MeV能区附近对多种元素(包括Se, Sr, Ru, Ag, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Lu, Ta)的同位素的(n,p), (n, α)等带电粒子出射核反应截面进行了长期的实验研究, 获得了可

靠的实验结果, 在国际国内期刊上发表了一系列文章^[43-48].

下面将重点介绍北京大学多年来有关(n,lcp)反应实验研究情况. 北京大学与位于俄罗斯Dubna的联合核子研究所(JINR)长期合作, 用直接测量法对(n,lcp)反应开展了研究. 20多年来, 基于北京大学4.5 MV静电加速器对多种同位素的(n, α)反应进行了实验测量与理论分析, 得到了可靠的结果, 在国际与国内期刊上发表了一系列研究成果. 近几年, 又将实验测量扩展到了北京IH-13串列加速器, 以及中国散裂中子源反角白光中子平台(CSNS Back-n), 与中国原子能科学研究院、中国科学院高能物理研究所等单位建立了合作关系. 基于不同的加速器中子源, 实验研究经历了3个不同的发展阶段, 取得了可喜的成果.

3.1 基于北京大学4.5 MV静电加速器中子源(1-8 MeV能区)

北京大学4.5 MV静电加速器是在陈佳洱院士领导下我国自行设计建造的国内第一台能量超过4 MV的直流、脉冲两用单级静电加速器, 1994年通过专家测试鉴定. 配有宽敞的、低本底中子实验大厅(20 m×20 m×8 m), 适合进行中子核反应数据测量. 采用固体LiF靶、T-Ti靶、Be靶和氦气体靶装置, 利用加速器加速质子、 α 粒子或氦离子, 通过⁷Li(p,n)⁷Be, ³H(p,n)³He, ⁹Be(α ,n)¹²C, ²H(d,n)³He等核反应, 获得了20 keV-7.7 MeV能区的准单能中子.

多年来, 不断完善实验条件, 改进测量方法, 加强模拟计算与理论分析. 在探测器方面, 对电子在工作气体中的漂移速率^[49,50]和屏栅电离室的非屏蔽因子等进行了实验测量, 发现了带电粒子探测中的“靶坑效应”, 并进行了定量的模拟计算和实验验证^[51]. 改进了中子通量测量与监测方法^[52]. 完善与升级数据获取系统, 逐步提高样品制作工艺水平; 采用不同的电离室工作气体(氩气、氦气、氙气), 不断降低实验本底, 拓展测量范围, 提高测量精度.

基于4.5 MV静电加速器中子源, 与JINR开展了长期合作. 对一系列轻核、中重核、重核的(n, α)反应进行了实验测量, 结合模拟计算与理论分析, 得到了系统、准确的结果. 其中, ⁶⁷Zn, ⁵⁷Fe, ¹⁴⁷Sm, ¹⁴⁹Sm(n, α)反应截面结果, 填补了MeV能区的实验数据空白. 到2018年, 本团队测量的31个反应道的63套核反应数据, 被国

际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)收录入国际核反应实验数据库(EXFOR)中, 其中大多数是(n,lcp)反应实验结果. 该库中北京大学实验室的代码为“CPRBJG”. 以下按照轻核、中重核、重核的顺序分别介绍.

(1) 轻核

轻核方面, 使用薄壁高压屏栅电离室(如图1所示)作为带电粒子探测器, 进行了 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 与 ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ 反应的微分截面与截面的实验测量. 这两个核反应, 前者是重要的造氚反应, 后者在核能开发、反应堆控制、癌症治疗中有重要应用, 两个核反应都被用于中子的探测、防护与吸收. 在1 MeV以下, 两者都已经成为国际标准核反应截面, 然而在MeV能区, 由于反应截面减小、本底干扰增强等原因, 实验测量结果少、误差大, 不同的实验之间分歧大, 导致不同的评价数据库结果差别很大.

轻核反应的运动学效应很强, 在大角度出射的粒子的能量明显降低. 我们在测量 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反应时, 使屏栅电离室充高低不同的工作气压, 采用分别测量前向t和前向 α 相结合的实验方案, 有效避免了很强的热中子事件的干扰, 得到了比较系统而准确的结果, 在MeV能区7个能点得到了粒子出射的微分截面, 并通过积分得到了反应截面^[53-56]. 实验结果在美国ENDF/B数据库从第VI, VII.0, VII.1版的再版过程中发挥了重要作用, 依据我们在MeV能区测量的 ${}^6\text{Li}(n,$

$t){}^4\text{He}$ 反应截面数据, ENDF/B评价库进行了更新. 在 ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ 反应实验过程中, 提出了用前后不对称屏栅电离室进行测量的实验方案, 有效提高了后向 α 粒子的角分辨能力. 在研究过程中, 证实了轻核反应中存在的“Leaking Effect”, 得到了定量的Leaking截面^[57]. 用相对测量法对样品中的 ${}^{10}\text{B}$ 原子数进行了测量与确认^[58].

我们近期对轻核的实验研究从两体核反应拓展到了三体反应, 开展了 ${}^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ 三体造氚反应截面实验测量, 取得了重要进展. 轻核三体核反应实验测量难度很大. 为了实现对三个出射粒子的符合测量, 研制了实验所需要的大面积薄衬 ${}^{10}\text{B}$ 样品(如图2所示^[59]). 分别采用AmBe中子源和加速器d-D中子源, 对其中的 ${}^{10}\text{B}$ 核数进行了反复对照测量. 完善了数据获取系统, 对各路脉冲波形进行记录, 实现了全数字化采集. 在理论分析的基础上, 采用屏栅电离室前向-后向符合方法分辨待测事件, 在3个能点, 得到了 ${}^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ 三体造氚反应截面, 同时还得到了 ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ 两体核反应截面. 虽然三体反应实验误差仍然较大, 但实验结果已证明, 以往实验中氚收集法和核乳胶法的测量结果是可靠的, 以往的屏栅电离室方法测量结果系统地偏低. 理论分析与模拟预测以及实验测量与数据分析工作, 同时发表在*Physical Review C*上^[59,60]. 接下来, 我们将依托北京大学4.5 MV静电加速器, 改进实验方案在MeV能区对 ${}^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ 三体造氚核反应进行实验测量: 将原来的分别记录电离室前后向栅极与阳极脉冲波形, 改为记录阴极与前后向阳极波形. 模拟计算与初步测试表明, 这样可以得到更高的阴极脉冲幅度, 有利于

图 1 (网络版彩图)带样品转换器的屏栅电离室

Figure 1 (Color online) The gridded ionization chamber with the sample changer.

图 2 (网络版彩图)测量 ${}^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ 反应所用的薄衬 ${}^{10}\text{B}$ 样品^[59]

Figure 2 (Color online) The thin-backing ${}^{10}\text{B}$ sample used for the ${}^{10}\text{B}(n,t2\alpha)$ reaction measurement^[59].

三体核反应事件的甄别, 提高测量精度, 期望获得系统的实验结果, 并对中间反应道过程进行分析.

(2) 中重核

中重核方面, 对多种与反应堆结构材料辐射损伤有关的 (n, α) 反应微分截面或截面进行了实验测量与理论分析, 包括 ^{25}Mg , ^{35}Cl , ^{39}K , ^{40}Ca , $^{54,56,57}\text{Fe}$, ^{58}Ni , ^{63}Cu , $^{64,67}\text{Zn}$ (n, α) 反应等^[61–68]. 在MeV能区, 中重核的 (n, α) 反应截面随中子能量的提高而快速增大, 通过实验可以对这种变化给出准确的描述. 比如, 铁是最常用的结构材料, ^{56}Fe 在铁元素中丰度高达91.8%. 准确的 ^{56}Fe $(n, \alpha)^{53}\text{Cr}$ 反应截面是工程上必需的. 然而由于余核 ^{53}Cr 是稳定的, 不能用活化法进行测量, 因此非常缺乏实验数据. 为了有效节省昂贵的同位素样品材料, 改进了滚压法制靶工艺, 得到了面积大、均匀性好的样品(图3是实验所用的 ^{56}Fe 样品照片^[64]), 得到了可以重复的实验结果. 研究成果一方面对于核工程具有实用价值, 另一方面对于核反应模型理论的完善、核反应机制的研究有重要作用. 下一步, 将依托北京大学4.5 MV静电加速器, 对 $^{58,60,61}\text{Ni}(n, \alpha)^{55,57,58}\text{Fe}$ 反应截面开展系统的实验测量, 目前同位素样品已准备就绪, 模拟计算与实验计划已经完成.

(3) 重核

重核方面, 采用特制的大体积双屏栅电离室(图4)和大面积($\phi=110\text{ mm}$)背对背双样品, 在MeV能区对 ^{95}Mo , ^{143}Nd , $^{147,149}\text{Sm}$ 等核的 (n, α) 反应截面以及前后向截面比进行了实验测量与理论分析^[69–73]. 其中 ^{149}Sm $(n, \alpha)^{146}\text{Nd}$ 反应实验结果发表在*Physical Review Letters*上^[73]. ^{149}Sm 是长寿命原生放射性核素, 又是高产额的

图4 (网络版彩图)大体积屏栅电离室

Figure 4 (Color online) The large gridded ionization chamber with big samples.

裂变产物核, 因反应产物核 ^{146}Nd 是稳定的, 所以不能用活化法测量. 该反应在MeV能区截面很小, 并且随中子能量快速变化, 没有实验数据, 造成不同评价库截面数据相差几十倍. 我们的工作填补了MeV能区该反应的实验数据空白, 准确测出了小到 $50\text{ }\mu\text{b}$ 的核反应截面, 通过实验测量与理论分析相结合, 得到了从热能到20 MeV能区完整的激发函数, 澄清了已有数据之间的巨大分歧. 接下来, 我们将在 (n, lcp) 反应测量基础上, 将实验拓展到 $^{232}\text{Th}(n, f)$ 裂变截面测量. $^{232}\text{Th}(n, f)$ 是钍-铀循环过程中最重要的核反应之一, 已有的实验结果不确定度较大. 而且根据调研, 已有实验测量中, 采用单能中子源和采用白光中子源测量得到的截面之间存在着系统的差异. 目前已制成实验所需的 $^{232}\text{Th}(\text{OH})_4$ 样品, 如图5所示. 已用小立体角法对其中的 ^{232}Th 核数进

图3 (网络版彩图) ^{56}Fe 样品^[64]

Figure 3 (Color online) Samples of the ^{56}Fe [64].

图5 (网络版彩图) $^{232}\text{Th}(\text{OH})_4$ 样品

Figure 5 (Color online) The $^{232}\text{Th}(\text{OH})_4$ sample.

行了实验测量. 下一步, 将依托北京大学4.5 MV静电加速器中子源和原子能院HI-13串列加速器中子源, 分别在1–8 MeV能区和8–12 MeV能区对 $^{232}\text{Th}(n,f)$ 裂变截面进行实验测量, 希望结合理论分析得到系统的实验结果.

3.2 基于北京HI-13串列加速器(8–12 MeV能区)

图6是 ^{56}Fe 和 ^{54}Fe 的 (n,α) 反应截面随中子能量的变化情况^[74]. 图中标注“Wang”的实验点和“Present”实验点中8 MeV以下的实验点是在北京大学4.5 MV静电加速器中子源上测量的结果; “Present”实验点中8–12 MeV之间的实验数据是在北京HI-13串列加速器中子源上测量的结果. 由图6可见, 在MeV能区随着中子能量提高截面增加. 然而, 依托北京大学4.5 MV静电加速器, 只能得到8 MeV以下的实验结果.

8–12 MeV能区国际上缺乏单能中子源. 依托北京HI-13串列加速器, 通过氦气体靶 $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ 反应可以获得该能区的中子. 然而会因为三体破裂反应而产生低能中子干扰, 而且随着入射氦离子能量的提高, 低能中子不断增强甚至会超过主中子. 为了测量该能区的 (n,α) 反应截面, 就需要测出中子能谱, 从而定量扣除低能中子所产生的干扰事件, 得到主中子对应的轻带电粒子事件. 为此配置了液闪探测器, 对探测器进行了刻度^[75], 完善了通过反冲质子解谱测量中子能谱的方法^[76], 并改进了中子通量监测与归一的方法. 将实验测量由1–8 MeV能区, 拓展到8–12 MeV能区. 基于北京HI-13串列加速器, 利用氦气体靶, 在8–12 MeV能

区对 $^{54,56}\text{Fe}(n,\alpha)^{51,53}\text{Cr}$ 反应截面进行了测量, 并在5.5 MeV进行了重复测量, 得到了可靠的结果. 发现并初步确认这两个核反应的截面在8–12 MeV能区都存在着“肩”形结构并对其成因进行了分析^[74].

接下来, 拟基于北京HI-13串列加速器, 在8–12 MeV能区对 $^{58,60,61}\text{Ni}(n,\alpha)^{55,57,58}\text{Fe}$ 反应截面以及 $^{232}\text{Th}(n,f)$ 裂变截面开展系统的实验测量.

3.3 基于CSNS Back-n (1 eV–100 MeV能区)

中国散裂中子源CSNS采用能量为1.6 GeV的质子束打钨靶, 通过散裂反应产生中子. 脉冲重复频率25 Hz, 设计束流功率100 kW. CSNS已经在2018年初开始运行, 其反角白光中子平台(Back-n)设有两个实验厅(ES#1和ES#2), 到质子靶的距离分别约为55和80 m. 通过一个中子开关、两个准直器来调节中子束斑和中子通量大小. 中子能区宽、通量高. CSNS配备了先进的多路数字化数据采集系统^[77], 非常适合于开展各类中子核反应数据测量^[78].

作为Back-n上的首批物理实验之一, 2018年5–6月北京大学与中国科学院高能物理研究所等单位采用合作研制的轻带电粒子探测系统LPDA (Light-charged Particle Detector Array), 完成了 $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$ 反应的实验测量, 束流时间为196 h, 散裂靶的功率为20 kW. 实验所用的 ^6LiF 样品如图7所示, 图中的样品架上有4个靶位, 最下方是蒸镀在不锈钢衬底片上的 ^6LiF 双样品, 中间两个靶位是不锈钢本底片, 最上面是刻度探测系统所用的 α 源. 本阶段的LPDA探测系统包括15套硅探测

图 6 (网络版彩图) $^{56}\text{Fe}(n,\alpha)^{53}\text{Cr}$ 和 $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$ 反应截面^[74]. (a) $^{56}\text{Fe}(n,\alpha)^{53}\text{Cr}$; (b) $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$.
Figure 6 (Color online) Cross sections of the $^{56}\text{Fe}(n,\alpha)^{53}\text{Cr}$ and $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$ reaction ^[74]. (a) $^{56}\text{Fe}(n,\alpha)^{53}\text{Cr}$; (b) $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$.

图 7 (网络版彩图) 首批实验 ${}^6\text{Li}(\text{n}, \text{t}){}^4\text{H}$ 反应测量所用 ${}^6\text{LiF}$ 样品

Figure 7 (Color online) ${}^6\text{LiF}$ samples used for the ${}^6\text{Li}(\text{n}, \text{t}){}^4\text{He}$ reaction measurement.

器、1套屏栅电离室探测器和3套 ΔE -E探测器, 内部结构如图8所示^[79]. 公用电子学系统采用全波形记录方式, 整个实验中各路探测器记录的波形数据量达到7 TB. 目前已完成数据分析与处理工作, 在1 eV–3 MeV能区80个能点, 得到了系统的氚粒子的微分截面, 并通过对微分截面积分得到了反应截面. 与R矩阵理论分析结果相比符合得较好. 这是迄今国际上最系统、最全面的 ${}^6\text{Li}(\text{n}, \text{t}){}^4\text{He}$ 反应实验结果.

图 8 (网络版彩图) LPDA探测器系统内部结构

Figure 8 (Color online) The structure of the LPDA detector system.

在2018年7–9月我们又完成了 ${}^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha){}^7\text{Li}$ 反应实验测量, 束流时间357 h, 目前正在进行数据分析并且已经得到了很好的初步结果.

2019年上半年, 基于CSNS Back-n和改进后的LPDA探测系统(ΔE -E探测阵列), 我们拟进行n-p散射微分截面实验测量, 模拟计算与实验计划已经完成, 实验所需的高纯度聚乙烯和碳样品材料已经置备. 200 h的束流时间已经获得用户委员会批准. 目前散裂中子源的打靶束流功率已经升到50 kW.

4 展望

在核能开发、核物理基础研究与核天体物理发展以及核技术应用需求的大背景下, 近年来加速器中子源领域呈现出快速发展势头. 除了已有设备的完善与升级之外, 国际上还在不断建设各类新的装置, 比如法国的NFS、德国的FRANZ等. 此外, 各类小型加速器中子源也在持续设计、建造与运行之中. 在这种情况下, 中子核反应的实验研究面临着前所未有的大好形势. 本文的最后一部分将重点对国内本研究方向的发展进行展望.

4.1 中子源条件

中国散裂中子源CSNS在建设及调试运行的速度和质量方面均达到了国际同类设备的最高水平. 高质量地按期完成设备建设, 调试运行阶段的打靶束流功率在不到一年的时间内就达到了设计指标的50% (50 kW), 并有希望在近期达到设计指标, 而且运行效

率和束流稳定性也在短时间内达到了很高的水平. CSNS也在积极争取早日启动升级工程, 以将加速器束流功率提高到500 kW. 尽管CSNS最初的目标是面向基于中子散射技术的物质结构研究, 而与其共生的反角区Back-n平台能够提供从1 eV到上百MeV宽能区的强流中子, 相同飞行距离的中子注量率在国际上是最高的, 为开展核反应数据测量提供了非常优越的实验条件.

4.2 理论与模拟研究

CSNS Back-n作为最先进的第三代中子源,具备了在非常宽的中子能区特别是共振能区开展中子核反应数据实验研究的条件, 老一代核科技工作者梦寐以求的愿望得以实现. 新的机遇意味着新的挑战. 共振能区的工作需要得到足够的重视, 在这方面我们缺乏经验. 在开展实验研究的同时, 要着重提高相应的理论分析水平和计算能力. 以相应的理论为指导, 全面掌握共振能区的数据分析方法, 掌握与开发相应的计算程序. 尤其要掌握有关的数据处理方法, 通过对实验数据进行多次散射、多普勒展宽、自屏蔽效应、能量分辨函数等一系列修正, 得到正确的反应截面与共振参数, 获得高质量的实验成果, 从而使我国在共振能区核数据测量方面的落后和缺失局面得到彻底改变.

与理论分析同样重要的是模拟计算. 随着计算机技术的不断发展, 模拟计算在实验研究中的重要性越来越得到体现. 物理学(包括核科学)发展到今天, 早已没有纯粹的实验测量了. 实验测量面临的具体情况纷繁复杂, 而模拟计算可以对各种因素逐一进行研究并给出尽量确定的结果. 具体到中子核反应实验中, 模拟计算的作用表现在预测实验事件谱、预测各种干扰本底、计划实验测量所需的束流时间、计算探测器对粒子的探测效率、对实验结果进行各种必要的修正等. 应当强调, 中子实验的束流时间是非常宝贵的, 一定要在实验之前根据所能掌握的各种信息完成详尽的模拟计算, 对实验中应出现的各种现象, 包括预期事件谱、计数率等做出尽量准确的预测, 实验过程中要对重要的测量事件谱进行实时显示, 并随时与预测谱进行比较, 从而确认实验是否处于正常的进行状态.

4.3 实验样品制备

在具备了先进的中子源设备以后, 研制必需的实验样品就显得非常重要了, 样品研制的质量决定了研

究工作的水平, 这方面将成为国际同行竞争的重点. 在稳定同位素样品研制方面, 我们多年来通过与国外合作或通过购买获得同位素样品材料, 不断探索新的样品制作方法, 提高样品制作水平. 目前, 我们的稳定同位素样品研制水平处于国际先进行列. 然而, 在放射性同位素样品的制备方面, 我国还非常落后, 在强放射性样品的制备方面几乎是空白. 在放射性样品方面要合理规划, 协调国内有关放射性同位素生产与使用单位, 安排有关的合作事项, 建立热室与远程操作系统等必要的设施, 成立相应的制靶机构, 重视与培养制靶人才. 对放射性工作人员进行定期培训, 督促单位与个人通过申请与考核获得放射性资质, 与国外有关机构建立合作关系, 商议与签定样品共享协议等.

4.4 探测系统与研究方法

带电粒子探测系统方面, 主要的探测器指标是探测立体角大、粒子甄别能力强、探测器能量与时间特性好、本底干扰低、颗粒度高、探测下阈足够低等. 由于(n,lcp)反应截面小、实验样品薄、干扰反应强, 上述指标中的立体角大、下阈低、本底干扰低三方面的要求是最为关键的. 由于三者很难兼顾, 一般需要根据具体的待测核反应综合三方面的要求, 选择适当的探测器类型. 具体的探测器种类较多, 包括(条形)Si探测器、电离室、 ΔE -E探测器阵列、sCVD金刚石阵列、Micromegas、TPC探测器等. 不同的探测器各有自己的特点, 其中TPC理论上具有非常优越的性能. 已经有人尝试将TPC用于中子诱发裂变反应截面的测量, 但用于(n,lcp)实验测量的TPC目前仍然处于研发阶段, 希望在不久的将来能有突破.

中子核数据的实验研究涉及多方面的工作. 实验测量、模拟计算、理论分析三方面需要密切配合、缺一不可, 三方面都有必要开展广泛的国内以及国际合作, 集中优势力量. 国际同行依托大型设备形成了广泛合作的传统, 有许多经验值得我们借鉴. 此外, 还应大力提倡与加强老中青科技工作者之间的交流与合作, 从而发挥各自的优势、取长补短.

本文综述了中子诱发轻带电粒子出射核反应(n,lcp)的科学意义、研究方法和实验难点, 对国际与国内基于不同中子源开展的相关研究工作进行了介绍, 并对国内今后的发展做了展望. 总之, 在中子诱发轻带电粒子实验研究方面, 20多年来我们做了一些工

作. 基于传统的中子源, 做出了一系列研究成果, 并且在中国散裂中子源反角白光中子源CSNS Back-n上完成了几个重要实验. 中子核反应的实验研究意义重大, 在今后不太长的时期内有望获得长足的发展. CSNS

Back-n的建成与升级, 为中子核反应数据的实验研究提供了前所未有的优越条件, 通过国内与国外广泛的科研合作, 经过大家坚持不懈的共同努力, 完全可以做出领先于世界的先进研究成果.

致谢 感谢中国核数据中心陈永静研究员对作者撰写本文的热情鼓励. 中国科学院高能物理研究所唐靖宇研究员对全文提出了有益的修改建议, 特此致谢.

参考文献

- 1 Kirsch L E, Devlin M, Mosby S M, et al. A new measurement of the ${}^6\text{Li}(n,\alpha)t$ cross section at MeV energies using a ${}^{252}\text{Cf}$ fission chamber and ${}^6\text{Li}$ scintillators. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2017, 874: 57–65, arXiv: [1709.03204](#)
- 2 Druyts S, Wagemans C, Geltenbort P. Determination of the ${}^{35}\text{Cl}(n,p){}^{35}\text{S}$ reaction cross section and its astrophysical implications. *Nucl Phys A*, 1994, 573: 291–305
- 3 Goeminne G, Wagemans C, Wagemans J, et al. Investigation of the ${}^{37}\text{Ar}(n,p){}^{37}\text{Cl}$, ${}^{37}\text{Ar}(n,\alpha){}^{34}\text{S}$ and ${}^{39}\text{Ar}(n,\alpha){}^{36}\text{S}$ reactions at various stellar temperatures. *Nucl Phys A*, 2001, 688: 233–236
- 4 Wagemans J, Wagemans C, Goeminne G, et al. Investigation of the thermal ${}^{26}\text{Al}(n,p){}^{26}\text{Mg}$ and ${}^{26}\text{Al}(n,\alpha){}^{23}\text{Na}$ reactions. *Nucl Phys A*, 2001, 696: 31–44
- 5 Gledenov Y M, Nesvizhevsky V V, Sedyshev P V, et al. First observation of P-odd asymmetry of α -particle emission in the ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ nuclear reaction. *Phys Lett B*, 2017, 769: 111–116
- 6 Vesna V A, Gledenov Y M, Nesvizhevsky V V, et al. Parity-violating asymmetry in the reactions ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ and ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}^* \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$. *Hyperfine Interact*, 2011, 201: 31–36
- 7 Colonna N, Günsing F, Käppeler F. Neutron physics with accelerators. *Prog Particle Nucl Phys*, 2018, 101: 177–203
- 8 Barbagallo M, Musumarra A, Cosentino L, et al. ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ reaction and the cosmological lithium problem: Measurement of the cross section in a wide energy range at n_TOF at CERN. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 152701, arXiv: [1606.09420](#)
- 9 Damone L, Barbagallo M, Mastromarco M, et al. ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ reaction and the cosmological lithium problem: Measurement of the cross section in a wide energy range at n_TOF at CERN. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 042701, arXiv: [1803.05701](#)
- 10 Cosentino L, Musumarra A, Barbagallo M, et al. Experimental setup and procedure for the measurement of the ${}^7\text{Be}(n,\alpha)\alpha$ reaction at n_TOF. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2016, 830: 197–205, arXiv: [1604.00181](#)
- 11 Barbagallo M, Andrzejewski J, Mastromarco M, et al. Experimental setup and procedure for the measurement of the ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ reaction at n_TOF. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2018, 887: 27–33, arXiv: [1708.01178](#)
- 12 Praena J, Sabaté-Gilarte M, Porras I, et al. Measurement and resonance analysis of the ${}^{33}\text{S}(n,\alpha){}^{30}\text{Si}$ cross section at the CERN n_TOF facility in the energy region from 10 to 300 keV. *Phys Rev C*, 2018, 97: 064603
- 13 Praena J, Ferrer F J, Vollenberg W, et al. Preparation and characterization of ${}^{33}\text{S}$ samples for ${}^{33}\text{S}(n,\alpha){}^{30}\text{Si}$ cross-section measurements at the n_TOF facility at CERN. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2018, 890: 142–147
- 14 Weiß C, Guerrero C, Griesmayer E, et al. The (n,α) reaction in the s-process branching point ${}^{59}\text{Ni}$. *Nucl Data Sheets*, 2014, 120: 208–210
- 15 Weiß C, Griesmayer E, Guerrero C, et al. A new CVD diamond mosaic-detector for (n,α) cross-section measurements at the n_TOF experiment at CERN. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2013, 732: 190–194, arXiv: [1312.1649](#)
- 16 Grimes S M, Briant C E, Goeckner F C, et al. The ${}^{59}\text{Co}(n,\alpha)$ reaction from 5 to 50 MeV. *Nucl Sci Eng*, 1996, 124: 271–279
- 17 Kunieda S, Haight R C, Kawano T, et al. Measurement and model analysis of (n,α) cross sections for Cr, Fe, ${}^{59}\text{Co}$, and ${}^{58,60}\text{Ni}$ from threshold energy to 150 MeV. *Phys Rev C*, 2012, 85: 054602
- 18 Lee H Y, Mosby S, Haight R C, et al. ${}^{16}\text{O}(n,\alpha)$ cross section investigation using LENZ instrument at LANSCE. *EPJ Web Conf*, 2016, 122: 05004
- 19 Devlin M, Taddeucci T N, Hale G M, et al. ${}^6\text{Li}(n,t)\alpha$ angular distribution measurements for $0.2 < E_n < 10$ MeV at LANSCE/WNR. In: International

- Conference on Nuclear Data for Science and Technology. Nice, 2007. 327
- 20 Reifarh R, Lederer C, Käppeler F. Neutron reactions in astrophysics. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2014, 41: 053101, arXiv: 1403.5670
- 21 Koehler P E, O'Brien H A. $^{14}\text{N}(\text{n,p})\text{C}$ cross section from 61 meV to 34.6 keV and its astrophysical implications. *Phys Rev C*, 1989, 39: 1655–1657
- 22 Koehler P E, Graff S M. $^{17}\text{O}(\text{n},\alpha)^{14}\text{C}$ cross section from 25 meV to approximately 1 MeV. *Phys Rev C*, 1991, 44: 2788–2793
- 23 Koehler P E, Graff S M, O'Brien H A, et al. $^{36}\text{Cl}(\text{n,p})^{36}\text{S}$ cross section from 25 meV to 800 keV and the nucleosynthesis of the rare isotope ^{36}S . *Phys Rev C*, 1993, 47: 2107–2112
- 24 Koehler P E, Kavanagh R W, Vogelaar R B, et al. $^{26}\text{Al}(\text{n,p}_1)$ and (n,α_0) cross sections from thermal energy to 70 keV and the nucleosynthesis of ^{26}Al . *Phys Rev C*, 1997, 56: 1138–1143
- 25 Gledenov Y M, Koehler P E, Andrzejewski J, et al. $^{147}\text{Sm}(\text{n},\alpha)$ cross section measurements from 3 eV to 500 keV: Implications for explosive nucleosynthesis reaction rates. *Phys Rev C*, 2000, 62: 042801
- 26 Koehler P E, Gledenov Y M, Rauscher T, et al. Resonance analysis of $^{147}\text{Sm}(\text{n},\alpha)$ cross sections: Comparison to optical model calculations and indications of nonstatistical effects. *Phys Rev C*, 2004, 69: 015803
- 27 Rapp W, Koehler P E, Käppeler F, et al. $^{95}\text{Mo}(\text{n},\alpha)$ cross section from 1 eV to 500 keV: A test of the α +nucleus optical potential used in calculating reaction rates for explosive nucleosynthesis. *Phys Rev C*, 2003, 68: 015802
- 28 de Smet L, Wagemans C, Wagemans J, et al. Experimental determination of the $^{26}\text{Al}(\text{n},\alpha)^{23}\text{Na}$ reaction cross section and calculation of the Maxwellian averaged cross section at stellar temperatures. *Phys Rev C*, 2004, 76: 045804
- 29 Wagemans J, Wagemans C, Goeminne G, et al. The $^{17}\text{O}(\text{n},\alpha)^{14}\text{C}$ reaction from subthermal up to approximately 350 keV neutron energy. *Phys Rev C*, 2002, 65: 034614
- 30 de Smet L, Wagemans C, Goeminne G, et al. Experimental determination of the $^{36}\text{Cl}(\text{n,p})^{36}\text{S}$ and $^{36}\text{Cl}(\text{n},\alpha)^{33}\text{P}$ reaction cross sections and the consequences on the origin of ^{36}S . *Phys Rev C*, 2007, 75: 034617
- 31 Bencardino R, Bevilacqua R, Giorginis G, et al. Kinematics of the $^6\text{Li}(\text{n,t})^4\text{He}$ reaction and experimental scenarios for cross-section measurement. *Nucl Sci Eng*, 2014, 177: 68–76
- 32 Bevilacqua R, Hamsch F J, Bencardino R, et al. ^{10}B and ^6Li nuclear data measurements for incident neutron energies up to 3 MeV. *Nucl Data Sheets*, 2014, 119: 104–106
- 33 Giorginis G, Khryachkov V. The cross-section of the $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ reaction measured in the MeV energy range. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2006, 562: 737–740
- 34 Giorginis G, Khriatchkov V. The effect of particle leaking and its implications for measurements of the (n,α) reaction on light elements by using ionisation chambers. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2005, 538: 550–558
- 35 Khromyleva T, Bondarenko I, Gurbich A, et al. Investigation of (n,α) reaction cross sections for a number of structural material isotopes. *Nucl Sci Eng*, 2018, 191: 282–290
- 36 Khryachkov V A, Bondarenko I P, Kuzminov B D, et al. Measurement of the cross section for the reaction $^{20}\text{Ne}(\text{n},\alpha)^{17}\text{O}$ in the neutron-energy between 4 and 7 MeV. *Phys Atom Nuclei*, 2012, 75: 404–410
- 37 Khryachkov V A, Kuz'minov B D, Dunaev M V, et al. Measurement of the cross sections of the reactions $^{14}\text{N}(\text{n},\alpha)^{11}\text{B}$ and $^{14}\text{N}(\text{n,t})^{12}\text{C}$ at neutron energies 5.45–7.2 MeV. *At Energy*, 2006, 101: 760–765
- 38 Ito N, Baba M, Matsuyama S, et al. Large solid angle spectrometer for the measurements of differential $(\text{n},\text{charged-particle})$ cross sections. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 1994, 337: 474–485
- 39 Sanami T, Baba M, Kawano T, et al. High resolution measurements of double differential (n,α) cross sections of ^{58}Ni and ^{nat}Ni between 4.2 and 6.5 MeV neutrons. *J Nucl Sci Tech*, 1998, 35: 851–856
- 40 Kawano T, Sanami T, Baba M, et al. Analysis of $^{58}\text{Ni}(\text{n},\alpha)$ reaction cross sections with the Hauser-Feshbach statistical theory and the Bayesian parameter estimation method. *J Nucl Sci Tech*, 1999, 36: 256–264
- 41 Schatz H, Jaag S, Linker G, et al. Stellar cross sections for $^{33}\text{S}(\text{n},\alpha)^{30}\text{Si}$, $^{36}\text{Cl}(\text{n,p})^{36}\text{S}$, and $^{36}\text{Cl}(\text{n},\alpha)^{33}\text{P}$ and the origin of ^{36}S . *Phys Rev C*, 1995, 51: 379–391
- 42 Brehm K, Becker H W, Rolfs C, et al. The cross section of $^{14}\text{N}(\text{n,p})^{14}\text{C}$ at stellar energies and its role as a neutron poison for S-process nucleosynthesis. *Z Physik A-Atomic Nuclei*, 1988, 330: 167–172
- 43 Zhang Y B, Zhao L Y, Kong X Z, et al. Cross-sections for $(\text{n},2\text{n})$ and (n,p) reactions on neodymium isotopes and $^{160}\text{Gd}(\text{n},\alpha)^{157}\text{Sm}$ at neutron

- energy between 13.5 and 14.7 MeV. *Ann Nucl Energy*, 2013, 53: 99–103
- 44 Luo J, Tuo F, Kong X. Measurements of activation cross sections for $^{175}\text{Lu}(n,\alpha)^{172}\text{Tm}$, $^{176}\text{Lu}(n,\alpha)^{173}\text{Tm}$ and $^{175}\text{Lu}(n,p)^{175}\text{m+gYb}$ reactions induced by neutrons around 14 MeV. *Ann Nucl Energy*, 2011, 38: 1693–1697
- 45 Luo J, Tuo F, Kong X. Activation cross sections for reactions induced by 14 MeV neutrons on natural tantalum. *Phys Rev C*, 2009, 79: 057603
- 46 Luo J, He L. Activation cross section and isomeric cross-section ratio for the $^{151}\text{Eu}(n,\alpha)^{148\text{m,g}}\text{Pm}$ process from threshold up to 20 MeV. *J Radioanal Nucl Chem*, 2017, 311: 349–354
- 47 Luo J, Wu C, Jiang L, et al. Cross sections for d- ^3H neutron interactions with samarium isotopes. *Radiochim Acta*, 2016, 104: 523–530
- 48 Luo J, Feng Z, An L, et al. Determination of the cross section for (n,p) reaction with producing short-lived nuclei on the $^{162,163}\text{Dy}$ isotopes at 13.5 and 14.8 MeV. *Radiat Phys Chem*, 2016, 123: 109–114
- 49 Bai H, Wang Z, Zhang L, et al. A method for measuring the electron drift velocity in working gas using a Frisch-grid ionization chamber. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2016, 840: 36–41
- 50 Zhang J, Zhang G, Chen J. Measurement of electron-drift velocity in Ar+CH₄ mixtures using double-grid method. *Chin Phys Lett*, 2009, 26: 112901
- 51 Bai H, Wang Z, Zhang L, et al. Study of the wall effect of the sample position well of the Frisch-grid ionization chamber. *Appl Radiat Isotopes*, 2017, 125: 34–41
- 52 Zhang G, Liu X, Gao Z, et al. Analysis and comparison of monoenergetic fast neutron fluence determination using ^{238}U samples at different positions with respect to the neutron source. *Appl Radiat Isotopes*, 2012, 70: 888–892
- 53 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 Meth Phys Res Sect A*, 2006, 566: 615–621
- 54 Zhang G, Cao R, Chen J, et al. Differential and angle-integrated cross-section measurement for the $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$ reaction at $E_n=1.05, 1.54$, and 2.25 MeV. *Nucl Sci Eng*, 2006, 153: 41–45
- 55 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
- 56 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
- 57 Zhang G H, Liu X, Liu J M, et al. Measurement of cross sections for the $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaction at 4.0 and 5.0 MeV using an asymmetrical twin gridded ionization chamber. *Chin Phys Lett*, 2011, 28: 082801
- 58 Zhang G, Liu J, Xue Z, et al. Measurement of ^{10}B content in thin-film ^{10}B samples. *Appl Radiat Isotopes*, 2011, 69: 858–861
- 59 Wang Z, Bai H, Zhang L, et al. Cross section measurement for the $^{10}\text{B}(n,t\alpha)$ three-body reaction at 4.0, 4.5, and 5.0 MeV. II. Experimental setup and results. *Phys Rev C*, 2017, 96: 044621
- 60 Wang Z, Bai H, Zhang L, et al. Cross section measurement for the $^{10}\text{B}(n,t\alpha)$ three-body reaction at 4.0, 4.5, and 5.0 MeV. I. Prediction of the experimental spectrum. *Phys Rev C*, 2017, 96: 044620
- 61 Gledenov Y M, Sedysheva M V, Khuukhenkhue G, et al. Measurement of the cross sections of the $^{25}\text{Ma}(n,\alpha)^{22}\text{Ne}$ reaction in the 4–6 MeV region. *Phys Rev C*, 2018, 98: 034605
- 62 Zhang X, Chen Z, Chen Y, et al. Dispersion relations for (n,n), (n,p) and (n, α) reactions on ^{39}K and ^{40}Ca . *Phys Rev C*, 2000, 61: 054607
- 63 Han J, Liu J, Liu X, et al. Differential and angle-integrated cross sections for the $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)^{37}\text{Ar}$ reaction from 4.0 to 6.5 MeV. *Eur Phys J A*, 2015, 51: 12
- 64 Wang Z, Fan X, Zhang L, et al. Cross sections of the $^{56}\text{Fe}(n,\alpha)^{53}\text{Cr}$ and $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$ reactions in the MeV region. *Phys Rev C*, 2015, 92: 044601
- 65 Gledenov Y M, Sedysheva M V, Stolupin V A, et al. Cross sections of the $^{57}\text{Fe}(n,\alpha)^{54}\text{Cr}$ and $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ reactions in the MeV region. *Phys Rev C*, 2014, 89: 064607
- 66 Zhang G, Zhang J, Cao R, et al. Measurement of differential cross section for the $^{64}\text{Zn}(n,\alpha)^{61}\text{Ni}$ reaction at 2.54, 4.00, and 5.50 MeV. *Nucl Sci Eng*, 2008, 160: 123–128
- 67 Zhang G, Gledenov Y M, Khuukhenkhue G, et al. Cross sections of the $^{67}\text{Zn}(n,\alpha)^{64}\text{Ni}$ reaction at 4.0, 5.0, and 6.0 MeV. *Phys Rev C*, 2010, 82: 054619
- 68 Zhang G, Wu H, Zhang J, et al. Cross-section measurement for the $^{67}\text{Zn}(n,\alpha)^{64}\text{Ni}$ reaction at 6.0 MeV. *Eur Phys J A*, 2010, 43: 1–4
- 69 Zhang G, Wu H, Zhang J, et al. Cross section measurement for the $^{95}\text{Mo}(n,\alpha)^{92}\text{Zr}$ reaction at 4.0, 5.0 and 6.0 MeV. *Appl Radiat Isotopes*, 2010,

68: 180–183

- 70 Gledenov Y M, Sedysheva M V, Stolupin V A, et al. Cross sections of the $^{143}\text{Nd}(n,\alpha)^{140}\text{Ce}$ and $^{147}\text{Sm}(n,\alpha)^{144}\text{Nd}$ reactions in the MeV neutron energy region. *Phys Rev C*, 2009, 80: 044602
- 71 Zhang G, Zhang J, Guo L, et al. Measurement of cross sections for the $^{147}\text{Sm}(n,\alpha)^{144}\text{Nd}$ reaction at 5.0 and 6.0 MeV. *Appl Radiat Isotopes*, 2009, 67: 46–49
- 72 Gledenov Y M, Zhang G, Khuukhenkhuu 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
- 73 Zhang G, Gledenov Y M, Khuukhenkhuu G, et al. $^{149}\text{Sm}(n,\alpha)^{146}\text{Nd}$ cross sections in the MeV region. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 252502
- 74 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
- 75 Bai H, Wang Z, Zhang L, et al. Simulation of the neutron response matrix of an EJ309 liquid scintillator. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2018, 886: 109–118
- 76 Bai H, Wang Z, Zhang L, et al. Calibration of an EJ309 liquid scintillator using an AmBe neutron source. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2017, 863: 47–54
- 77 Wang Q, Cao P, Qi X, et al. General-purpose readout electronics for white neutron source at China Spallation Neutron Source. *Rev Sci Instrum*, 2018, 89: 013511
- 78 An Q, Bai H Y, Bao J, et al. Back-n white neutron facility for nuclear data measurements at CSNS. *J Inst*, 2017, 12: P07022
- 79 Yi H, Zhao Y, Jiang W, et al. Triton identification in the $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$ reaction measurement with the grid ionization chamber at CSNS Back-n white neutron source. *J Inst*, 2019, 14: P02011

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

ZHANG GuoHui^{*}

State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Institute of Heavy Ion Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

Progress of experimental researches on neutron induced light charged-particle emission (n,lcp) reactions, as well as the scientific significance, research methods and measurement difficulties, are comprehensively summarized. International investigations based on the n_TOF, LANSCE, ORELA and GELINA neutron sources are systematically introduced. Domestic investigations are presented entirely. The investigations performed by the Peking University group based on the 4.5 MV Van de Graaff accelerator for years are presented extensively, and recent developments based on Beijing HI-13 tandem accelerator and CSNS Back-n neutron sources are also introduced. Future domestic developments in this area are prospected.

neutron, light charged-particle, nuclear reaction, measurement

PACS: 25.40.-h, 28.20.-v, 29.25.Dz

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0226](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0226)