

激光中子源:原理、进展与展望

余同普^{1*}, 李超智¹, 谢琛¹, 麻旭^{1,2}, 陈志东^{1,3}, 张文昱¹, 李欣焱¹, 冯凯源¹,
胡理想¹, 邹德滨¹, 邵福球¹

(1. 国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073; 2. 湘潭大学材料科学与工程学院, 湖南湘潭 411105;
3. 南华大学核科学技术学院, 湖南衡阳 421001)

摘要:高亮度、短脉冲、紧凑型中子源——激光中子源,有望在材料无损检测、中子成像、中子共振谱学和核天体物理等多个领域得到重要应用,使其成为传统中子源不可或缺的重要补充。从激光中子源的产生途径出发,简要介绍了各种产生机制的基本原理,通过回顾激光中子源的发展脉络和最新研究进展,指出其在基础研究和实际应用中的巨大潜力。系统介绍了激光中子源特征参数的诊断方法及其基本原理,特别是国内外近年来在激光中子源产额、能量、脉宽和源尺寸诊断方面的最新研究进展。在此基础上,指出激光中子源的发展可能面临的技术挑战,并展望了其未来发展方向。

关键词:激光中子源;超短超强激光;激光等离子体;中子诊断;中子应用

中图分类号: O539; O571.42; O571.53; TL632+.1 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-2486(2026)03-385-26

Laser-driven neutron sources: principles, progress and prospects

YU Tongpu^{1*}, LI Chaozhi¹, XIE Chen¹, MA Xu^{1,2}, CHEN Zhidong^{1,3}, ZHANG Wenyu¹, LI Xinyan¹, FENG Kaiyuan¹,
HU Lixiang¹, ZOU Debin¹, SHAO Fuqiu¹

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

3. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: A novel neutron source with high brightness, short pulse, and compact-size—LDNS (laser-driven neutron source) offers considerable promise for a wide range of applications, including non-destructive material testing, neutron imaging, neutron resonance spectroscopy, and nuclear astrophysics, positioning it as a vital supplement to conventional neutron sources. Beginning with an overview of the production methods for LDNS, the fundamental principles were outlined behind various production mechanisms. By reviewing the historical development and recent progress of LDNS, the substantial potential of it for both fundamental research and practical applications was highlighted. Diagnostic techniques and its principles for characterizing key parameters of LDNS were systematically introduced, with special emphasis on recent advances at home and abroad in measuring neutron yield, energy, pulse duration, and source size. Basing on above, this review proceeds to identify technical challenges in the development of LDNS and concludes with a perspective on future research directions.

Keywords: laser-driven neutron source; ultra-short ultra-intense laser; laser plasma; neutron diagnosis; neutron application

1932年,英国物理学家詹姆斯·查德威克(James Chadwick)在实验中首次发现了中子,标志着原子结构理论的重要进展。中子凭借其独特的电中性、强穿透性和同位素特异性,已成为探索物质微观结构和动力学性质不可替代的理想探针,并且广泛地应用于材料科学、化学、生物工程、生命科

学、能源技术、核物理及天体物理研究中。传统上,高通量的中子束主要由核反应堆或大型散裂中子源产生,譬如,中国散裂中子源^[1-2](China spallation neutron source, CSNS)、美国洛斯阿拉莫斯中子科学中心^[3-4](Los Alamos Neutron Science Center)和英国卢瑟福阿普尔顿实验室的散裂源^[5]

收稿日期:2025-12-29

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(12375244);湖南省自然科学基金重点资助项目(2025JJ30002);湖南省自然科学基金青年C类资助项目(2026JJ60111);湖南省研究生科研创新资助项目(XJJC2025005)

*第一作者:余同普(1982—),男,安徽岳西人,教授,博士,博士生导师,E-mail:tongpu@nudt.edu.cn

引用格式:余同普,李超智,谢琛,等.激光中子源:原理、进展与展望[J].国防科技大学学报,2026,48(3):385-410.

Citation: YU T P, LI C Z, XIE C, et al. Laser-driven neutron sources: principles, progress and prospects [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(3): 385-410.

(ISIS spallation neutron source)。然而,这类大型设施尺度巨大、建设与运维成本高、机时调度刚性强,难以支撑当前科研与工业领域对现场测量、快速筛查和极端短寿命核素的原位测量等现场化或可移动式中子检测方案的迫切需求。除此之外,基于核裂变或散裂反应的传统中子源正面临严峻挑战。据 Zakalek 等的综述^[6],全球多数研究堆(如法国 Institut Laue-Langevin、德国 Forschungsreaktor München II)建于 20 世纪五六十年代,现已接近或超过设计寿命,欧洲已有 10 余座反应堆永久停运,导致用户机时严重萎缩。散裂源(如美国 Spallation Neutron Source、日本 Japan Proton Accelerator Research Complex、在建的欧洲 European Spallation Source)虽凭借 GeV 质子束可获得比反应堆高数十倍的峰值通量,但此类 MW 级设施建设费用高达数十亿欧元,屏蔽与冷却系统极为复杂,全球仅少数国家有能力运行。总的来说,传统中子源适合开展高精度、长时间积累型实验,但存在建设与运维成本高、机时调度刚性强等局限性,加上旧反应堆退役,新装置建设周期长、运行难度大,正面临用户机时供不应求的问题。因此,发展新型中子源已成为迫切需求。

近年来,随着超短超强激光技术的迅猛发展,一种新型的紧凑中子源悄然兴起,即激光中子源。其核心思想在于利用高功率激光脉冲与物质(靶材)相互作用,超强激光场可瞬间离化靶材形成等离子体状态。等离子体中的电子和离子通过非线性物理过程被加速到相对论速度,从而获得极高能量。这些高能带电粒子会诱发核反应(如聚变过程或光核反应)生成中子。这一全新的中子源产生方法展现了传统中子源无法比拟的优势,譬如,极高的峰值通量(可达 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)、极短的脉宽(几十至几百 ps 级)、高方向性(前侧向比高)、微焦点(百 $\mu\text{m} \sim \text{mm}$ 级)以及可移动部署的能力,这些优势使其成为传统中子源在高峰值通量、短脉宽、紧凑化等应用场景下的重要补充^[7-8]。

从中子源综合特性来看,传统反应堆和散裂中子源在平均通量、运行稳定性、束流持续时间以及用户平台成熟度等方面仍具有显著优势;相比之下,激光中子源目前在绝对平均产额和重复频率上尚难以与大型装置竞争,但其在峰值通量、脉冲宽度、源尺寸、方向性以及装置紧凑化方面表现突出。换言之,传统中子源更擅长提供“高稳定、可持续”的中子束,而激光中子源则更适合实现“超短时、高峰值、局域化”的中子辐照。二者在不同

实验需求上可形成互补,这也正是激光中子源近年来受到广泛关注的重要原因。

本文将系统梳理激光中子源的关键技术、最新研究进展和潜在应用领域。首先阐明激光中子源的产生途径和基本原理,譬如,束靶中子源、光核中子源、团簇中子源和内爆中子源的物理机制;进而回顾激光中子源关键品质参数的诊断技术,特别是中子的产额、能量、脉宽、角分布和中子源尺寸等。在此基础上,详细探讨激光中子源在中子共振谱学、成像、核天体物理及核医学等多个前沿交叉学科领域的应用潜力,并指出其未来发展所面临的技术挑战和可能发展趋势。

1 超强超短激光与物质相互作用

1.1 超强超短激光脉冲

激光中子源的核心驱动器是超强超短激光脉冲,这种激光脉冲在时间上具有 fs (10^{-15} s) 至 ps (10^{-12} s) 量级,在空间上经聚焦后可达到极高的功率密度 ($I \geq 10^{18} \text{ W}/\text{cm}^2$)。随着啁啾脉冲放大(chirped pulse amplification, CPA)与光参量啁啾脉冲放大(optical parametric chirped pulse amplification, OPCPA)技术的出现,当前实验室已经可以产生拍瓦(10^{15} W ,简称 PW)乃至 10 PW 的激光输出^[9-10],这为研究人员在实验室产生高能带电粒子束从而诱发后续核反应提供了全新机遇。

当激光功率密度大于等于 $10^{18} \text{ W}/\text{cm}^2$ 时,其对应的电场强度 E 达到约 $2.7 \times 10^{12} \text{ V}/\text{m}$,该场强与氢原子内层电子所受的库仑力相当,使得电离后的自由电子在单个光周期(即 fs 时间尺度)内即可被加速至接近光速。在激光等离子体领域,一般认为,当电子在一个约化的激光波长($\lambda = \lambda/2\pi$, λ 为激光波长)内被激光电场所做的功大于等于电子的静止能量时所对应的激光称为相对论激光,即 $eE \cdot \lambda/2\pi \geq m_e c^2$ 。其中, E 为激光电场振幅, e 是单位电荷, m_e 是电子质量, c 是真空中光速。为此,可得到一个描述激光强度的关键物理量,即激光的无量纲振荡强度:

$$a_0 = \frac{eE}{m_e c \omega} \quad (1)$$

式中, ω 为激光频率。 a_0 直接衡量一个电子相对于激光波动的振荡动能。当 $a_0 < 1$ 时激光可以认为是非相对论的;当 $a_0 \geq 1$ 时,激光振荡电场足够强,使得电子做相对论振荡,此时光的振荡能量接近或超过电子静止能量。激光强度也就是功率密度与 a_0 的关系为:

$$\{I\}_{\text{W/cm}^2} = \{1.37 \times 10^{18}\}_{\text{W} \cdot \mu\text{m/cm}^2} \times \left(\frac{a_0}{\{\lambda\}_{\mu\text{m}}} \right)^2 \quad (2)$$

对于 $I = 10^{22} \text{ W/cm}^2$ 的激光脉冲,其对应 $a_0 \approx 85$,而对于中国上海张江正在建造的极端光物理线站(station of extreme light)这样的超强激光,其目标强度将达到 10^{24} W/cm^2 ,此时对应 $a_0 \approx 850$ 。如此高强度的激光脉冲与物质相互作用会产生极端粒子加速、海量光子辐射、稠密正负电子对产生等强场量子电动力学效应^[11],同时也为高通量、宽能谱、窄带宽中子源的产生提供了基础。

除上述表征强度的参数外,时间对比度(temporal contrast)和重复频率(repetition rate)也是评价超强超短激光脉冲品质的核心参数。时间对比度定义为主脉冲峰值强度与脉冲基底(pedestal)或次峰(subpeaks)强度的比值。在实际激光系统中,主脉冲前的前驱光束主要包括 ns 量级的放大自发辐射基底、由光谱调制引起的皮秒脉冲基底,以及由光学元件反射或散射产生的预脉冲。对于超高强度的激光,若对比度不足,强度超过 10^{10} W/cm^2 的前驱成分会在主脉冲到达前提前电离固体靶材,从而破坏靶材的初始物理状态。因此,现代装置常引入交叉偏振波产生、光参量放大或等离子体镜等脉冲净化技术,将对比度提升至 10^{10} 以上。此外,为满足高通量实验需求,超强激光正逐步突破单发次限制,向 1 Hz 乃至 kHz 量级的高重复频率运行演进。这些脉冲特性的持续优化,为后续稳定驱动带电粒子加速及产生高产额激光中子源提供了坚实的物理基础。

1.2 强激光驱动带电粒子加速

当一束超强激光与靶材相互作用时,超强激光的光场首先会将物质迅速加热、电离,从而在瞬间形成由自由电子和离子组成的等离子体(物质的第四态)。这些带电粒子束通过强激光等离子体相互作用产生的自生场或者光压会直接加速到相对论能量,并产生强辐射。在激光与等离子体相互作用过程中,离子加速机制主要包括:①靶背法线鞘场加速^[12](target normal sheath acceleration, TNSA),即超热电子穿透固体薄膜靶,在靶背表面建立强鞘层电场,高效地加速质子或氦离子。②辐射压加速^[13-16](radiation pressure acceleration, RPA),即激光入射到超薄靶,通过光压将电子推出,离子被电荷分离场加速,离子和电子作为“等离子体飞镜”与激光脉冲共同运动,光压推着电子和离子一起加速。③相对论透明加速^[17-18](break-

out afterburner, BOA),即当激光强度极高时,靶在超热电子作用下迅速“变薄”,达到“相对论透明”,使激光能量更深地耦合到等离子体中,产生能量更高、电荷量更大的离子束。④库仑爆炸^[19](coulomb explosion),即强激光照射纳米团簇等微结构靶,导致团簇内粒子因强烈电离而发生爆炸性的加速。⑤无碰撞冲击波加速^[20-22](collisionless shock acceleration, CSA),即激光入射到固体靶表面,固体靶中的电子在激光辐射压的作用下形成电子压缩层,同时与离子分离产生电荷分离场;电荷分离场在激光辐射压的作用下向等离子体内部移动,当马赫数(电荷分离场的运动速度与离子声速的比值)大于 1.6 时,形成静电激波,对离子进行加速。

此外,激光电子加速也是强激光应用研究的重要课题,且获得了巨大进展^[23-27]。其加速机制主要分为两大类:①激光尾波场加速(laser wakefield acceleration, LWFA),即超短脉冲在低密度气体等离子体传播,通过激发强等离子体波来加速电子,产生准单能电子束。②激光直接加速(direct laser acceleration, DLA),即激光脉冲与密度接近或超过临界密度的等离子体相互作用,电子在激光横向电场和自生磁场的共同作用下被直接加速。

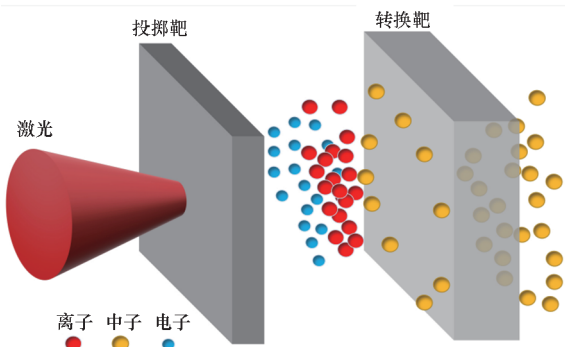
对各类电子与离子加速机制的研究,其核心目的在于获取高能量、大电荷量且能谱可调的高品质带电粒子束,这从根本上决定了后续激光中子源的品质参数。具体而言,对于束靶中子源,离子的截止能量直接主导了其在转换靶内慢化过程中的有效穿透深度。离子的能量越高,其在靶内的核反应截面积分越大,单个离子的核反应概率随之显著提升,从而大幅提高中子总产额。而对于光核中子源,高能电子产生的次级 γ 射线能谱若能更有效地覆盖原子核的巨偶极共振区,将显著提高光核反应的激发效率,进而提升中子产量。同时,激光加速电子束极低的发散角特性,也赋予了激光中子源超小源尺寸与高瞬态亮度的独特优势。此外,激光等离子体相互作用能够提供高于传统加速器 2~4 个量级的加速梯度,使得带电粒子在 μm 至 mm 尺度内即可获得极高能量。这种极高的能量转换效率与加速能力,不仅能够实现中子源装置的台面化与微型化,还使其具备了高通量与高时空分辨的特性,因此激光中子源正逐步成为传统大型中子源的重要补充。下面将系统阐述激光中子源不同产生方法的基本原理与最新研究进展,并重点探讨中子源关键特征参数的诊

断技术及可能的应用场景。

2 激光中子源

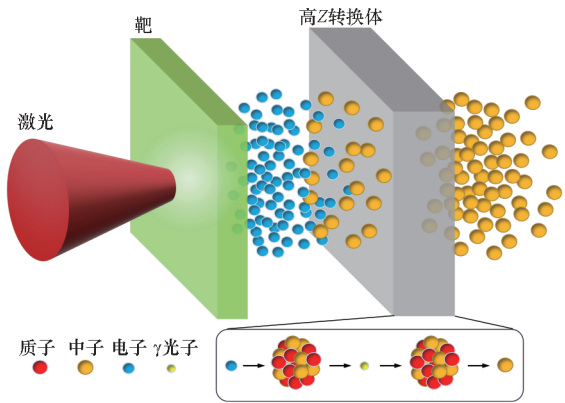
2.1 束靶中子源

在激光中子源的多种产生途径(如图 1 所示)中,束靶中子源,即“投手与捕手”(pitcher-catcher)驱动模式,被认为是最具潜力的技术路线之一,如图 1(a)所示。该方案利用激光与投掷靶(“投手”)相互作用产生高能离子束,随后离子束轰击中子转换靶(“捕手”),通过(p, n)、(d, n)等核反应产生中子^[7, 28]。



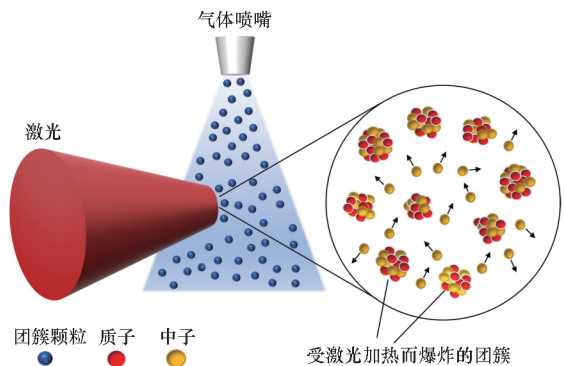
(a) 束靶中子源

(a) Beam-target neutron source



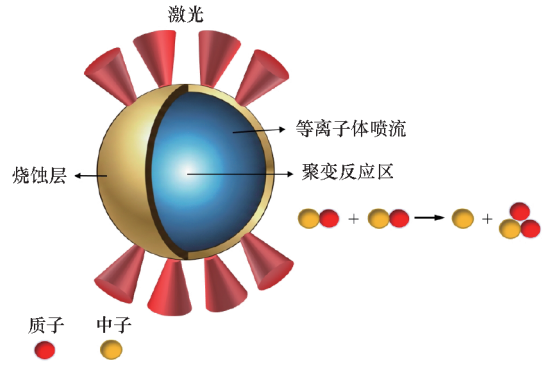
(b) 光核中子源

(b) Photonuclear neutron source



(c) 团簇中子源

(c) Clusters neutron source



(d) 内爆中子源

(d) Implosion neutron source

图 1 激光中子源的产生途径

Fig. 1 Production methods of laser-driven neutron sources

2.1.1 束靶中子源基本原理

束靶中子源可以根据离子源的演变过程概括为三个阶段:第一阶段是超短超强激光作用于固体投掷靶,在靶后建立强静电鞘场,并在不同条件下通过 TNSA、BOA 或 CSA 等离子加速机制把质子/氦离子加速到数 MeV 乃至数十 MeV。第二阶段是束流运输,被加速的高能离子束在真空中传播至转换靶的过程中会发生能量展宽与空间发散,尺度一般在 mm 到 cm 量级;离子束的能谱形状与角分布在这一阶段被重新塑形,直接限制了转换靶内核反应的有效能区,也决定了中子束能够做到多高的前向性。第三阶段是中子产生,离子束进入含轻核或中等核的转换靶,在靶内通过 (p, n)、(d, n)、(d, xn) 等核反应产生中子。

束靶方案的一个重要特点是,把“离子加速”和“中子产生”两个物理过程独立开来,前者由投掷靶主导,后者由转换靶主导。这样的“分离式”构型带来诸多好处:一方面可以围绕投掷靶去优化激光耦合与离子发射品质(能量、电量、稳定性与束斑发散);另一方面又可以根据已获得的离子能谱特性(例如能量上限、能散与角分布)设计转换靶的材料与几何厚度,使中子产额与束品质(前向性、能谱结构)可以在同一框架内协同优化。

投掷靶是激光能量吸收与离子加速的核心载体,其要求并不只是能产生离子,更关键的是高吸收与可重复性的发射行为^[8]。目前常用的投掷靶类型有固体薄膜靶(如碳氘薄膜^[29]、碳氢薄膜^[30]和金属箔靶^[31]等),以及近临界密度等离子体靶(电子数密度约为 10^{21} cm^{-3})^[32]。在固体薄膜靶中,碳氘薄膜的氘含量高且物化性质稳定,是激光等离子体实验里最常用的固体氦离子源之

一;碳氢薄膜制备简单,成本较低,很容易获得高电量质子束;金属箔靶(如 Cu、Al、Au 等)则因为良好的导电性与电子输运特性,在高强度条件下更适合追求高能离子输出。近临界密度靶通常借助纳秒激光或皮秒预脉冲对纳米结构进行烧蚀与预电离,以调控等离子体密度分布并增强激光吸收,从而提高整体的耦合效率。针对氦离子加速常受表面质子污染抑制这一问题,有研究提出在主脉冲到来前通过重水挥发或喷射,在靶背短时间内形成 μm 级厚度的重水层;该方法可将加速离子中氦离子占比提高至约 99%,并使激光能量到氦离子能量的转换效率达到约 9%,从而显著减弱传统固体靶表面质子污染对氦离子加速的不利影响^[33-34]。

转换靶的主要功能是将高能离子束转化为中子,因此需要具备较大的核反应截面和良好的物理化学稳定性。常用转换靶材料多为轻元素,比如 Be 靶^[18, 35-36](利用 $^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$ 反应), LiF 靶^[30-31, 37](利用 $^7\text{Li}(d, xn)$ 反应), D_2O 冰层靶^[38](提供纯净的氘源)。通过针对性地选取转换靶材料、核反应通道及优化几何结构(如图 2 所示),中子产额往往可以获得明显提升。一个比较有代表性的方案是“铍夹层 + 钨反射层”组合结构:将多片铍盘与铜箔、放射染色胶片交替堆叠,既延长离子在靶内的有效作用路径,也便于在实验中同步获取离子能谱信息;随后将该铍夹层整体装配在壁厚约 1 cm 的钨圆柱体内,利用钨对快中子的散射以及相关(n, xn)过程,使一部分原本会逸出的中子在几何约束下被“折返”并向前向聚集,从而提高前向通量。与单层铍靶相比,这种夹层化设计在一定程度上减少了中子散射造成的无效损失,因而有利于提升总产额^[36]。

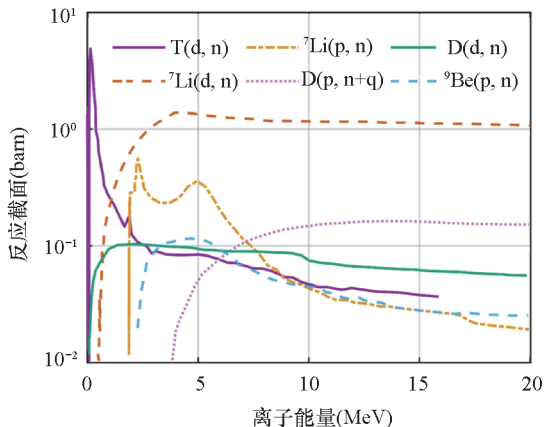


图 2 不同核反应通道的截面数据^[7, 31, 39-41]

Fig. 2 Cross-section data of different nuclear reaction channels^[7, 31, 39-41]

2.1.2 束靶中子源中子产额

高产额、小发散角和高重频是束靶中子源实现实际应用的关键。其中,中子产额决定了可用中子通量的水平,是束靶中子源走向高通量和工程化应用的关键参数。为显著提升束靶中子源的中子产额,研究人员近年来聚焦核反应截面、入射离子能量与电量、激光和靶参数等多个方面,开展了深入细致的理论和实验研究,极大地推进了束靶中子源的发展。

2010 年,美国 Davis 等^[42]通过理论模拟系统揭示了 $^7\text{Li}(d, xn)$ 反应在提升中子产额方面的巨大潜力。他们研究发现,当入射氦离子能量 E 超过 4 MeV 时,该反应的截面显著高于 $\text{D}(d, n)$ 与 $^7\text{Li}(p, n)$ 反应,对应的前向中子产额 Y 随 E 呈幂律快速增长,定标关系可近似表示为 $dY/d\Omega \propto E^{2.7-3.2}$ (Ω 为立体角)。当 $E = 50$ MeV 时,单个离子产生中子的效率(可达到 0.1)比 $\text{D}(d, n)$ 反应提升约 2 个数量级。

基于这一结果,国内外快速开展了基于 $^7\text{Li}(d, xn)$ 反应的实验研究。2011 年,英国 Higginson 等^[43]利用功率密度为 $10^{19} \sim 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 的超强激光辐照碳氦薄膜,通过 TNSA 机制产生氦离子,轰击 LiF 靶,在前向上获得了约 $8 \times 10^8 \text{ n/sr}$ 的中子产额,在实验上验证了 $^7\text{Li}(d, xn)$ 反应在获取高产额中子方面的优越性。2016 年,英国 Kar 等^[44]在相似激光功率密度条件下,采用类似的碳氦薄膜 + 锂转换靶构型,实现了约 10^9 n/sr 的前向中子产额,证明了在现有 PW 级激光条件下,基于高能氦离子与锂靶反应的束靶中子源方案能够稳定获得 10^9 n/sr 量级的前向中子产额。

为了突破传统 TNSA 技术在离子能谱和电量方面的限制,人们也积极引入了新型离子加速机制以实现中子产额量级上的提升。2013 年,美国 Roth 等^[18]在洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Trident 激光装置(激光强度 $5 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$)上通过 BOA 机制,将投掷靶中的氦离子高效地加速至约 170 MeV 并轰击 Be 靶,获得了 10^{10} n/sr 的前向中子产额,比同装置下 TNSA 方案提升了约 20 倍,展示了利用 BOA 实现高能量、高电量氦离子束以推动中子产额跨越式提升的可行性。

在中子产额优化方面,国内学者在理论与实验结合研究方面也形成了独具特色的研究路线。近年来,国防科技大学研究团队通过数值模拟研究发现,利用靶前微结构^[45]、丝阵靶等复合靶结构^[46],可以显著增强 TNSA 加速场强度(如图 3 所示),提高氦离子束截止能量与总电量,从而通

过⁷Li(d, xn)反应显著提升了束靶中子源的产额。国防科技大学联合中国工程物理研究院激光聚变研究中心和北京大学,依托星光Ⅲ实验装置,采用纳秒激光烧蚀碳纳米管泡沫(carbon nanotube foams)和碳氘双层靶产生近临界密度等离子体,显著增强了皮秒激光与靶的耦合强度,最终获得了 2.3×10^9 n/sr的中子产额;同年,国防科技大学联合中国工程物理研究院激光聚变研究中心和中国科学院上海光学精密机械研究所,在SILEX-II激光装置上采用1 PW、25 fs激光入射丝阵靶,并以LiD作为转换靶,在合适的阵列周期条件下获得了 $(1.05 \pm 0.35) \times 10^8$ n/J的中子产额^[47],如图4中五角星号所示。2021年,中国工程物理研究院激光聚变研究中心崔波等^[48]在星光Ⅲ装置上开展了系统性的实验研究,对比了LiD与LiF转换靶的中子产额,发现LiD转换靶可使中子产额提升2~3倍,最终获得了 5.2×10^8 n/sr的前向中子产额,该结果已接近国际同类TNSA束靶中子源的最高水平,并在实验上验证了多反应通道对中子产额提升的有效性。随着人工智能技术的发展,2025年复旦大学核物理与离子束应用教育部重点实验室Wang等^[49]提出了将智能优化算法与粒子模拟程序结合的靶结构优化方案,其模拟结果表明,经优化后的复合靶在相同激光条件下可获得比平面靶高3个数量级的中子产额。

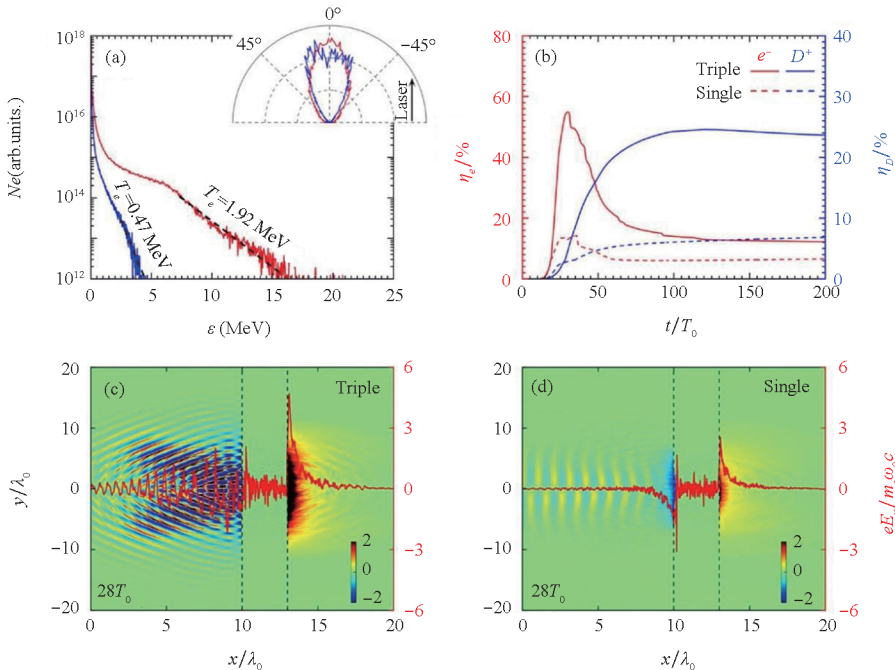
除优化靶设计以外,CSA也被引入束靶中子

源的研究中。2023年,北京大学Yao等^[22]联合中国工程物理研究院激光聚变研究中心在星光Ⅲ装置上基于CSA加速获得2~6 MeV的氘离子束,轰击LiF靶获得了 6.6×10^7 n/sr的中子产额,比相同条件下的TNSA方案提升了约1个数量级。他们开展的模拟结果表明,当激光功率密度继续提升至 10^{21} W/cm²时,CSA方案有望实现 5×10^{10} n/sr级别的极高中子产额,这为下一代高通量束靶中子源研究提供了新的发展方向。这些研究工作标志着我国在束靶中子源产额优化方面已跻身国际前列。

2.1.3 束靶中子源发散角

发散角是衡量束靶中子源品质的重要参数。过大的发散角会降低靶前有效通量,增加准直与屏蔽系统的复杂度,放大背景散射对成像与诊断的干扰。相较于传统反应堆与散裂源在 4π 立体角内近似各向同性的角分布,束靶中子源若能产生小发散角、良好前向性的中子束,将在亮度、信噪比与剂量利用效率等方面展现出独特优势^[65]。因此,优化中子发散角、增强前向性是提升束靶中子源品质以走向实用化的必经之路。

2010年,美国Davis等^[42]的工作不仅指出了⁷Li(d, xn)反应在提升产额方面的巨大潜力,也从理论上预言了其在向前方向上极强的角分布集中效应,模拟结果表明,15~17 MeV的单能氘离子束在⁷Li(d, xn)反应中可实现前侧向比接近



注:(a)为 $t = 28T_0$ 时电子能谱,插图为1 MeV以上前向电子角分布;(b)为激光到电子和 D^+ 离子的能量转换效率;(c)和(d)分别为三束和单束激光情形下的归一化纵向电场 E_x ,红线为 $y = 0$ 轴线上的 E_x 。

图3 微结构靶的模拟结果^[45]

Fig.3 Simulation results for the microstructured target^[45]

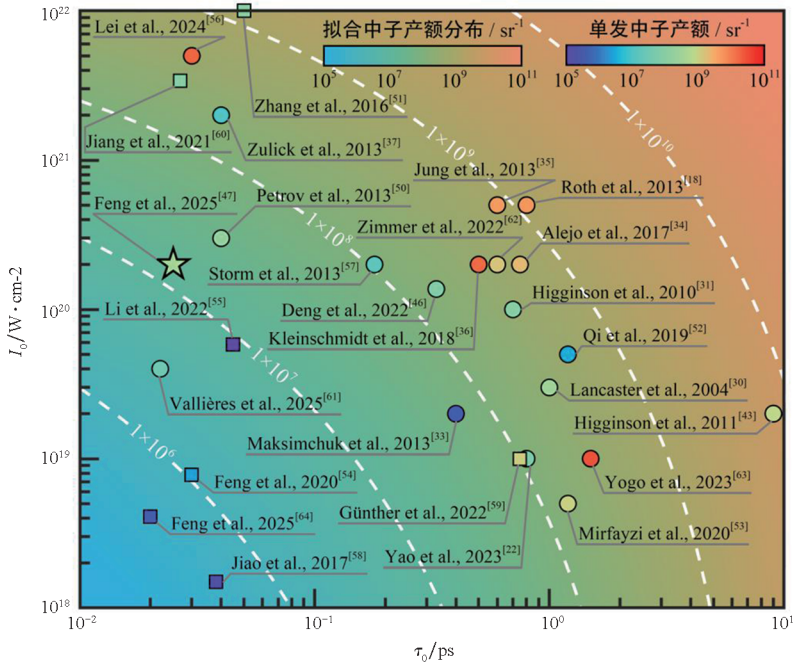


图4 国内外激光束靶中子源实验和模拟获得的中子产额^[18, 22, 30-31, 33-37, 43, 46-47, 50-64]

Fig. 4 Neutron yields obtained from laser-driven pitcher-catcher neutron sources experiments and simulation worldwide^[18, 22, 30-31, 33-37, 43, 46-47, 50-64]

20,而当氦离子能量提升至30 MeV时,中子主要在约1 sr的极小立体角内出射,这为通过优化离子能谱以同时兼顾中子源高产额和良好的前向性提供了理论依据。随后,2016年英国Kar等^[44]在碳氦初级靶与碳氦转换靶构型下测量了D(p, n+p)和D(d, n)反应产生的中子角分布,结果显示总角分布的半高全宽(full width at half maximum, FWHM)约为70°,前侧向比为5~7。通过进一步对角分布来源进行分析,发现在靶前等离子体产生的热核中子和低能氦离子诱发的中子都呈近似各向同性,这是限制整体前向性的主要因素;相比之下,高能氦离子在转换靶内通过(d, xn)反应产生的中子则表现为明显前向聚束,其角分布增强趋势与理论预期一致。实验验证方面,2017年英国Alejo等^[34]利用D₂O冰层靶产生了前向性极强的中子束,中子主要在70°左右FWHM锥内沿离子束前向发射。2018年,德国Kleinschmidt等^[36]在PW级重离子实验高能激光器(petawatt high-energy laser for heavy-ion experiments, PHELIX)装置上,使用47 keV碳氦薄膜和Be靶也测量到强烈的前向中子分布,在激光前向(0°)处达到约 1.42×10^{10} n/sr。

基于逆反应动力学效应的定向中子源研究^[66]吸引了国内外学者的广泛关注,逐渐成为优化中子束发散角的重要途径之一。在重离子轰击轻靶的逆反应动力学研究中,由于角度因子 $\gamma > 1$,产生的中子天然被聚焦在极小的前向立体角

内,具备“自带定向”的特点。基于这一思路,中国工程物理研究院激光聚变研究中心崔波等在SILEX-II激光装置上开展了¹H(⁷Li, xn)基于逆反应动力学效应的定向中子束实验研究^[7],他们首先采用PW飞秒激光加速锂离子并轰击富氢靶,获得了增益系数约为10、FWHM仅为40°的高定向性中子束,发散角明显优于前述70°FWHM的典型TNSA束靶中子源,从而证明了逆反应动力学在中子发散角控制方面的突出优势,也标志着我国在定向中子源研究方面已取得明显进展。

2.1.4 束靶重频中子源

高重复频率运行是束靶中子源走向应用的必要条件,其核心矛盾是单发峰值通量高,但重复频率不如传统中子源,使得平均通量较低,从而难以满足连续辐照的应用需求^[67]。现有激光中子源在单发条件下可实现 $10^{18} \sim 10^{19}$ n/(cm²·s)的峰值通量,但其重复频率通常低于 10^{-3} Hz,导致平均通量仅为 $10^5 \sim 10^6$ n/(cm²·s),与散裂源和反应堆相比有明显差距^[7]。因此,发展高重频束靶中子源,旨在保持单发性能的同时提高打靶频率,使平均通量进入可用区间,并据此支撑材料辐照、无损检测等应用场景。

围绕这一目标,首先推进的是靶材系统的工程化改造。典型做法包括可自动更换的薄膜靶轮(可在1 Hz条件下完成数百发次运行),以及面向更高频率需求的液体靶方案,例如厚度低于200 nm的液体薄膜,为10 Hz乃至更高重频运行

提供了路径^[68]。实验上已取得显著进展,2024年匈牙利 Osvay 等^[68]在 1 Hz 条件下使用氧化聚乙烯薄膜靶加速氦离子,并通过 $D(d, n)^3\text{He}$ 聚变反应,实现了平均每发 $1\,142 \pm 59$ 个中子的稳定输出,中子能量主要集中在 1.5 ~ 4 MeV 范围。同年法国 Lelièvre 等^[69]在 0.5 Hz 重频下采用 3.2 J、22 fs 激光脉冲轰击钽靶产生质子束,并在 LiF 转换靶中通过 $^7\text{Li}(p, n)$ 反应获得单发约 5×10^5 个中子的产额,能谱覆盖 0.1 ~ 2 MeV。

目前,高重频束靶中子源已开始向 kHz 量级的超高重频方向延伸。以极端光基础设施阿秒光脉冲源(extreme light infrastructure-attosecond light pulse source, ELI-ALPS)的少周期高重频系统为例,相关研究正以实现 10^{10} n/s 量级中子源为目标推进靶与束流方案。在靶材上,已发展出液体射流靶(thick jet configurations),并在实验上实现了超过 0.6 MeV 的质子截止能量,同时在 15 min 时间尺度内给出了优于 4% 的稳定性指标^[68]。这些结果表明,一旦高重频激光与可持续供靶(液体射流/液体薄膜等)真正实现匹配,束靶中子源的平均通量有望实现数量级提升,从而在部分应用中成为与传统中子源的重要补充。

2.2 光核中子源

光核中子源是指利用高能光子(如 γ 射线)与原子核发生光核反应(如 (γ, n) 反应)产生的中子源。随着超短脉冲激光技术的迅猛发展,激光驱动的高能电子束成为产生高强度 γ 射线的重要途径,进而通过光核反应可实现高品质短脉宽中子源的产生。

2.2.1 光核中子源基本原理

光核中子源的产生过程主要分为三个步骤,即高能电子加速、 γ 光子产生和光核反应,如图 1(b)所示。整个过程通常由一台强激光脉冲驱动,通过精心设计的靶结构,实现从激光能量到中子产生的有效转换。

光核中子源的第一步是高能电子加速,这是整个过程的能量起点,其核心是利用强激光与等离子体之间的非线性相互作用,将电子加速到数十乃至数百 MeV 的能量。前面提到,激光驱动电子加速主要分为 LWFA 和 DLA 两种加速机制,前者通常有利于获得单能性好、能量高、低发散角的电子束,且由于使用气体靶,可实现高重频运行(kHz 量级)^[54, 58];后者通常得到的是发散角大^[59]但电量高(可达数十 nC),且能量分布接近麦克斯韦谱分布的电子束。

高能电子束产生后,通过轰击高原子序数

(即高 Z) 转换体可获得 γ 射线。当高能电子在转换体的原子核库仑场中发生偏转和减速时,会通过轫致辐射过程损失动能,发射出能量连续分布的 γ 光子。转换体的材料(如钨、钽、铅、金等)和几何参数(厚度、形状等)对 γ 光子的能谱、产额和角分布有决定性影响。较厚的转换体可提高光子产额,但多次库仑散射会导致光子束发散;而较薄的转换体有助于获得方向性更好的准直光子束,但转换效率较低。优化设计(如采用球形、锥形转换体)可在 γ 光子产额和方向性之间取得平衡^[70-71]。

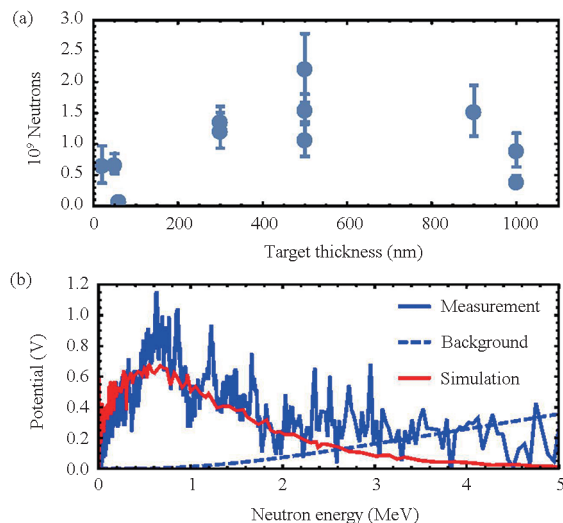
在第三步,通过轫致辐射过程产生的高能 γ 光子会与转换体自身或其他的中子产生体材料中的原子核发生相互作用,激发核反应。其中,最主要的物理过程是巨偶极共振光核反应,即 γ 光子被原子核吸收,使核体系激发,随后通过发射一个或多个中子退激,例如 (γ, n) 或 $(\gamma, 2n)$ 反应。中子的能谱通常呈现麦克斯韦分布,平均能量在几百 keV 到几个 MeV 之间,角分布接近各向同性^[72]。值得注意的是,为了提高中子产额或优化中子特性(如能量、脉宽等),有时人们会将 γ 光子的产生体(高 Z 转换体)与中子产生体(具有较低光核反应阈值的材料,如铍、氘,或特定同位素)分开设计,构成复合靶^[73],进而提高中子源品质特性。

2.2.2 光核中子源的转换效率

提升单发中子产额与转换效率以满足基础与应用研究对高通量中子源的需求,是推动光核中子源发展的核心目标。

早在 1997 年,美国约翰斯·霍普金斯大学的 Shkolnikov 等^[73]通过理论与模拟研究预测,利用亚 TW 级飞秒激光与包含低 Z 烧蚀层、高 Z 转换层及中子产生层的复合靶结构相互作用,可通过级联过程产生中子束流;该工作为后续实验的开展指明了方向。2014 年,美国得克萨斯大学奥斯汀分校的 Pomerantz 等^[72]利用大型 PW 激光装置(能量 90 J,脉宽 150 fs (FWHM),焦斑约 $10\ \mu\text{m}$)驱动产生的超热电子束轰击厚铜靶,获得了产额高达 1.2×10^9 n/shot 的中子束,如图 5 所示,同时中子脉宽小于 50 ps,峰值通量超过 10^{18} n/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)。这一成果激发了通过多种物理途径进一步提升中子产额的研究。其中,利用大型激光装置与近临界密度等离子体相互作用,产生大电荷量、高能电子束是一条重要路径。例如,2022 年,德国亥姆霍兹重离子研究中心的 Günther 等^[59]利用强度 10^{19} W/ cm^2 、脉宽 750 fs

的 PHELIX 激光与 300 ~ 400 μm 厚的聚合物泡沫靶相互作用,通过激光共振加速获得了电荷量为 50 ~ 100 nC 的超热电子,并通过光核反应实现了产额高达 1.4×10^{10} n/shot 的中子产生,同时激光到 γ 光子的能量转换效率高达 1.4%,这一成果展示了在中等激光强度下实现高效率光核中子源的潜力。



注:(a)为每束激光产生的中子总数与靶材厚度的关系;
(b)为通过飞行时间法测量得到的中子能谱。

图5 光核中子源参数^[72]

Fig. 5 Parameters of photonuclear neutron source^[72]

同一时期,国内研究团队在提升光核中子源产额与能量转换效率方面也开展了富有成效的工作。2016年,中国工程物理研究院激光聚变研究中心的张高维等^[51]结合辐射流体力学-质点网格 (particle-in-cell, PIC) -蒙特卡罗模拟,系统研究了PW级激光(强度 10^{22} W/cm²,波长 1 μm ,脉宽 30 fs)与固体靶的作用,通过优化中子转换体设计,在理论上获得了激光到中子产额转换率约 1.2×10^8 n/J 的光核中子,为高产额中子源的靶型设计提供了重要的理论依据。2019年,中国工程物理研究院激光聚变研究中心齐伟等^[70]在研究中进一步指出,对于超热电子驱动的光核中子源,钨是最佳转换体材料之一,并从理论上阐释了通过靶设计调控中子角分布的可能性。2021年,国防科技大学 Jiang 等^[60]提出了一种创新型微结构靶设计方案,利用强度 3.4×10^{21} W/cm²、能量 6.2 J 的飞秒激光脉冲轰击铜丝阵列,以大幅提升高能电子产额。模拟结果显示,该方案驱动钨转换体可产生高达 1.2×10^9 n/shot 的中子产额,对应的激光到中子产额转换率约 1.9×10^8 n/J,这一指标达到了当时国际理论研究工作的先进水平。2023年,上海交通大学 Feng 等^[74]利用百 TW 级

激光系统(强度 5.8×10^{19} W/cm²,脉宽 45 fs)与高密度氮气射流作用,获得了电荷量约 20 nC、发散角仅约 6° 的高品质电子束,通过驱动钨与铜转换体获得了峰值激发率高达 1.12×10^{15} n/ps 的中子束,相较于传统加速器高出约 4 个数量级。

2.2.3 光核中子源的源尺寸与脉宽

随着光核中子源产额的不断提升与转换效率的提高,光核中子源的研究前沿也开始转向中子源尺寸与脉宽等参量的精密调控,以适应不同的应用场景和具体需求。2022年,上海交通大学 Li 等^[55]通过调控激光尾波场加速过程,获得了低发散角电子束,并结合薄转换体,成功将中子源的横向尺寸压缩至约 500 μm ,如图 6 所示,同时保持 ps 级(约 36 ps)脉冲宽度,为微观尺度上的中子共振成像等应用创造了条件。2024年,上海交通大学 Wang 等^[75]基于高重频 TW 级激光(100 Hz),利用优化后的电子束(最大能量约 25 MeV,单发次电荷量约 2.5 nC)引发光核反应,获得了产额为 7×10^5 n/shot、脉冲宽度仅 50 ps 的高重频中子束;结合单中子计数技术,利用这种超短中子脉冲实现的快中子吸收谱学的能谱分辨比传统中子源高出 1 个数量级。

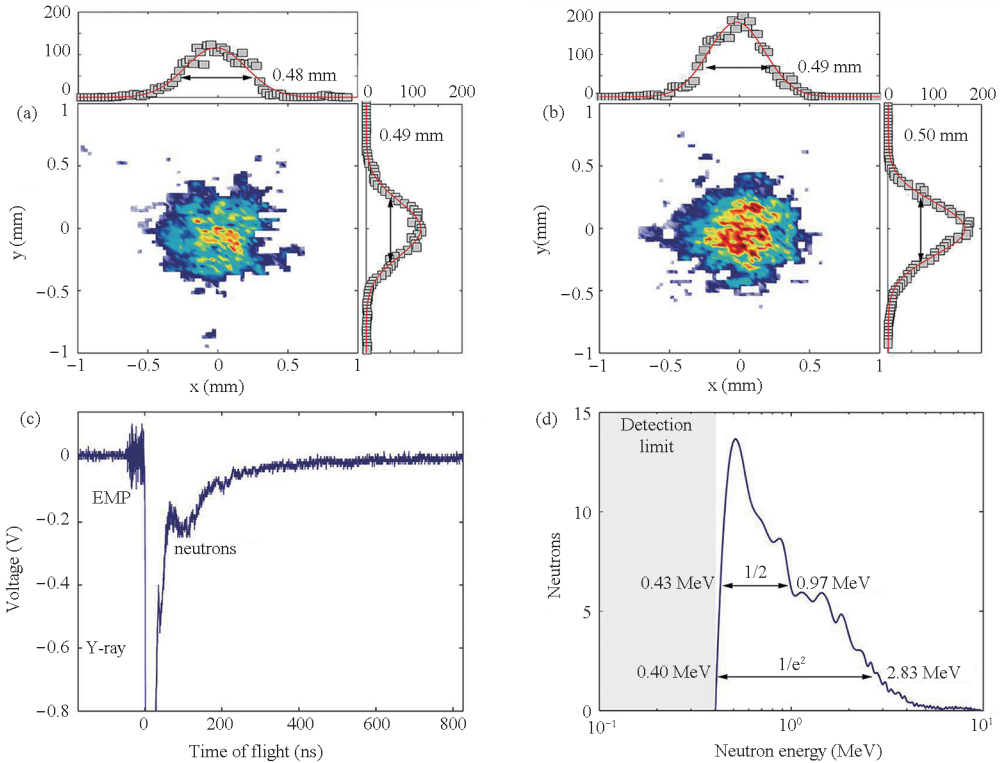
总体来说,光核中子源研究从单纯追求高中子产额和高转换效率,到深入研究激光与靶材的设计对中子源品质参数的影响,以实现源参数的精密调控,这不仅标志着光核中子源技术的日益成熟,也为实验研究和未来应用打下了良好基础。

2.3 团簇中子源

强激光与团簇及微结构靶相互作用时表现出的高能量耦合效率、非热平衡离子加速和局域化能量沉积等特性,使得团簇中子源成为近年来激光中子源研究中最具潜力的发展方向之一,其基本思想是利用团簇在强场作用下形成的高能离子群引发 D-D 聚变反应,产生 2.45 MeV 的中子,从而产生以非热动力学为特征的紧凑型中子源。

2.3.1 团簇中子源的基本原理

团簇中子源的物理过程可概括为三个阶段:团簇电离、库仑爆炸和高能离子碰撞聚变,如图 1(c)所示。强激光入射到 nm 尺度团簇,团簇在亚 ps 时间尺度内经历近全体积电离,电子迅速获得能量并逃逸,留下高电荷态的离子球体;离子在库仑排斥力的驱动下爆炸性地向外加速,其能量可达到 MeV;高能氦离子在爆炸过程中发生团簇间碰撞,或与背景气体中的氦原子作用,引发 D-D 聚变反应从而产生 2.45 MeV 中子。



注:(a)为转换体正面的正电子分布;(b)为转换体背面的正电子分布;(c)为中子飞行时间谱;(d)为中子能谱。

图 6 优化后的中子源尺寸^[55]

Fig. 6 Optimized results of neutron source size^[55]

团簇靶由 nm 尺度的原子团簇构成,在整体平均密度保持在气体水平的同时,单个团簇的局部密度可达固体量级,使激光能量能够在亚 μm 体积内集中沉积。与传统固体靶的趋肤层吸收机制相比,团簇体系的能量耦合更加接近“体加热”模式,具有更高的能量沉积速率与单位体积能量密度^[76-77]。在强场驱动条件下,团簇经历近乎瞬时的全体积电离,高能电子在亚光周期内逃逸,留下高电荷态的离子球体并引发库仑爆炸。该爆炸过程不仅生成高能离子,还形成一类极端非平衡等离子体,其离子能谱呈现典型的非热尾部,是激发 D-D 聚变反应的关键物理因素。中子产额随激光强度呈指数式增长,反映了团簇尺寸、有效体积、丝状等离子体形成等多重因素的协同作用,这种协同作用使团簇体系呈现强烈的非线性动力学行为。

2.3.2 团簇中子源的最新进展

早在 1999 年, Ditmire 等^[77]通过实验首次证实,利用 35 fs、120 mJ 的强激光脉冲辐照平均直径为 5 nm 的氘团簇气体,可以产生单发产额约 10⁴ 的聚变中子。随后在 2000 年, Zweiback 等^[77]利用高分辨率中子飞行时间 (neutron time-of-flight, nTOF) 谱仪,进一步探测到该聚变中子能谱集中在 2.45 MeV,并测得其脉冲宽度短至约

500 ps。模拟分析指出,由于团簇电离爆炸仅在亚 ps 尺度完成,这种超短中子脉冲特性主要受限于高能离子穿出激光焦斑(等离子体细丝)的逃逸时间。随后,该团队于 2002 年^[78]开展了详尽的定标实验,揭示了中子产额随入射激光能量呈现约 E^{2.2} 的强非线性增长规律,并发现产额随团簇尺寸的增大先升高后降低,在平均尺寸约 5.5 nm 时达到峰值。研究进一步证实,激光脉冲在穿越团簇气体时的能量耗散 (energy depletion) 是限制其在更高密度区域获得更高产额的根本物理瓶颈。

针对这一能量耗散瓶颈, Li 等^[79]于 2009 年提出了一种修正的库仑爆炸模型。该模型不仅考虑了团簇尺寸的对数正态分布特性,还系统引入了激光能量在等离子体细丝内传播时的空间衰减规律。研究明确指出,团簇中子源的总产额实际上由两部分组成:一是等离子体细丝内部高能离子相互碰撞引发的“团簇间聚变”;二是逃逸出细丝的高能离子轰击周围冷背景气体引发的“束靶聚变”。数值模拟进一步定量揭示了参数间的制约关系:若团簇尺寸过大,会导致激光能量在气体浅表层被迅速耗尽;若尺寸过小,单团簇爆炸产生的离子动能则无法达到高截面能区。因此,只有当激光能量、焦斑参数与团簇尺寸达到最优的物

理匹配条件时,才能最大程度地延长高能等离子体细丝的有效长度,有效缓解激光传播过程中的能量耗散,从而实现中子产额与能量转换效率的最大化。

除了优化激光与靶材参数的匹配,为了进一步突破氘核团簇的产额极限,研究人员将目光转向了异核团簇。2010年, Nam 等^[80]利用具有高分子极化率的氘代甲烷(CD_4)团簇开展了实验。研究表明,由于碳原子的存在, CD_4 团簇在激光电离阶段能够吸收更多能量,并在局部形成更深的初始库仑势阱。更为关键的是,异核团簇在发生库仑爆炸时存在显著的“运动学追赶效应(over-running effect)”,即较轻的氘离子能被同团簇中高电荷态、大质量的碳离子进一步推斥加速,从而获得比纯氘团簇中更高的初始动能。实验证实,利用28 fs、620 mJ(峰值功率约22 TW)的飞秒激光辐照下,氘离子的平均能量被显著提升至24 keV,最高能量可达100 keV,最终实现了 2×10^5 n/shot的高聚变中子产额。

尽管团簇中子源在产生超短脉冲和近点状辐射方面具有优势,但其单发中子产额的提升仍面临显著的物理局限:一是强烈的激光能量耗散限制了其有效穿透深度,导致相互作用体积有限;二是气体射流的宏观平均密度远低于固体,直接制约了单发产额的上限;三是天然团簇尺寸与空间分布的随机性,导致不同激光发次间的中子产额存在明显波动。然而,作为一种气态靶,团簇具备传统固体靶难以企及的无碎片与可连续刷新的绝对优势。未来,团簇中子源的发展重心将从“追求单发高产额”转向“获取高平均通量”。结合kHz高重频激光技术,研究人员正致力于开发高密度的低温液态射流或纳米颗粒靶,以突破气体密度瓶颈;同时辅以三维PIC模拟进行激光-靶参数的精准优化。凭借高重频连续运行的能力,团簇中子源未来有望在台面化、高通量超快中子诊断等领域发挥重要作用。

2.4 内爆中子源

内爆中子源以其高亮度、准单能及源特性高度可控等优势,成为产生高产额中子源的核心技术之一。不同于团簇靶依赖微观热点的随机物理特性,内爆机制的核心在于通过几何收敛将激光能量向心压缩,在极小体积内构建高温、高压的聚变中心,从而引发D-D或D-T聚变反应。

2.4.1 内爆中子源的主要原理

内爆中子源物理过程的核心在于激光驱动下的等离子体流体几何收敛。当高能量激光束辐照

靶壳表面时,表面材料瞬间发生消融并产生向外高速喷射的烧蚀流,根据动量守恒,由此产生的巨幅反冲压力驱动壳层向内压缩。在此过程中,各向汇聚的壳层动能在ps至ns尺度内通过碰撞高效转化为热内能,在燃料中心区域形成温度达数千keV、密度数十至数百倍于固体密度的热斑。随着热斑内等离子体温度与密度的急剧攀升,聚变反应速率急剧增加,从而在热点维持时间内形成高通量的准单能中子脉冲。

针对不同的能量加载与耦合效率需求,该过程衍生出两种主流的技术路径。球形收敛方案强调激光驱动的高度对称性,利用长脉冲激光维持持续且均匀的压缩,通过极高的向心收缩比获取稳定的高参数热斑。与之相对,磁化激光内爆(magnetized liner inertial fusion, MagLIF)则引入了多物理场耦合机制,通过外部轴向强磁场抑制电子热传导损失,并辅以短脉冲激光预热来改善燃料的初始热动力学状态。这种机制的物理优势在于,可以在热斑较低的径向收缩比下达到聚变点火阈值。在显著降低对驱动器能量要求的同时,大幅提升了整体能量耦合效率与中子产额。

2.4.2 内爆中子源的最新进展

内爆激光中子源的研究,最早聚焦于等离子体通过球形收敛能否形成高温高密度的聚变中心。早在1986年,日本大阪大学激光工程研究所Yamanaka和Nakai^[81]首次在实验上获得兆亿级热核中子,为后续内爆中子源研究奠定了实验基础。2000年,中国工程物理研究院激光聚变研究中心Peng等^[82]在SG-II装置上开展了爆轰式与烧蚀式两类内爆实验,前者获得了约 4×10^9 n/shot中子,后者获得了约 6×10^8 n/shot中子,还通过数值模拟方法研究了靶和激光参数对中子产额的影响。

由于实验能力的提升,研究逐渐转向热点品质与稳定性的系统优化。2022年,中国工程物理研究院激光聚变研究中心Yan等^[78]利用SG-II升级装置和100 kJ激光装置开展了球形收敛等离子体聚变(spherically convergent plasma fusion, SCPF)的研究工作。在2.1~100.5 kJ的长脉冲直接驱动条件下,他们得到了 $7.3 \times 10^8 \sim 1.0 \times 10^{11}$ n/shot范围内的中子产额,其中产额随激光功率的增大和激光脉冲宽度的增加而增大。同时他们还指出,与惯性约束聚变的激光驱动内爆相比,SCPF受流体不稳定性及驱动非对称性的影响更小,但低聚变区域密度使其聚变燃烧效率偏低。这项工作为后续的脉冲整形与靶优化,从而进一

步提升中子产额提供了关键依据。近年来,多物理场耦合机制成为提升内爆性能的重要突破口。2023年,美国罗切斯特大学激光能量学实验室 Peebles 等^[84]在 OMEGA 激光系统开展了 MagLIF 的系统性研究。实验结果表明,相较于未磁化方案,磁化和预热相结合使中子产额提升了约 470%,提升幅度远高于仅采用其中一种措施,这显示出磁化-预热路径在提升中子产额方面的突出潜力。

总的来说,内爆中子源的发展正从“单点性能提升”转向“多物理场协同优化”。外加磁场与激光预热的联合应用已在实验上展现出显著的增益效果。靶结构设计是提高热点稳定性与能量约束效率的关键,其目标在于抑制 Rayleigh-Taylor 等界面不稳定性并延长热点维持时间。多物理场耦合机制为提升其中子产额提供了一条新途径。

3 激光中子源的诊断技术及最新进展

激光中子源的关键参数主要包括中子能谱、产额、角分布、源尺寸以及脉宽等,这些参数表征了激光中子源在能量、空间与时间等多个维度的品质特性。对这些参数进行精确测量,是量化激光中子源品质、优化产生方案以及推动实际应用的基础。近年来,人们针对不同中子源参数发展出了各具特色的诊断方法,本节将按参数类型逐一进行介绍。

3.1 中子能谱

nTOF 法是测量激光中子源能谱最为典型和通用的方法,其技术原理成熟、测量结果可靠,被广泛应用于白光谱、准单能谱等各类能谱测量工作中。该方法的核心逻辑建立在中子能量与飞行时间的严格映射关系之上,通过精确记录中子从靶点到探测器的飞行时间分布,结合探测器能量响应校准、几何探测效率修正及本底信号扣除等关键环节,即可实现中子能谱及对应产额的高精度反演。

图 7 展示了液体闪烁体 nTOF 探测器记录到的典型信号。入射的 X/γ 射线通过康普顿散射在闪烁体内沉积能量,产生一个极陡的前沿脉冲,它虽提供了确定时间零点的基准,但也常因幅度过大而引入短时饱和或基线漂移。随后,在更晚的时间窗内出现的宽峰来自快中子在液闪中的弹性散射,主要通过反冲产生质子并激发闪烁光。因此中子信号通常相对更“宽”,它与 γ 峰之间的时间间隔为飞行时间差。

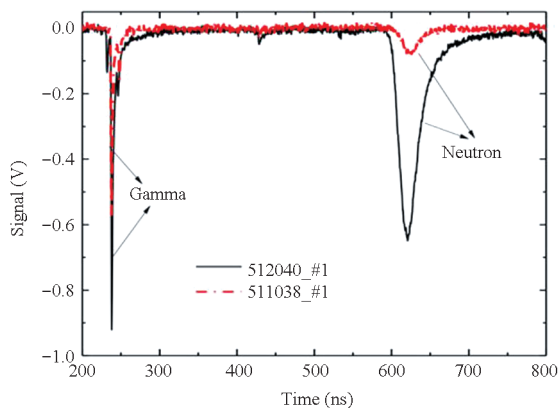


图 7 液体闪烁体获取的典型信号^[85]

Fig. 7 Typical signals obtained by liquid scintillator detector^[85]

激光中子源通常产生宽能区连续谱(也可称为白光谱),有时会在较宽的能量范围内叠加若干结构成分,例如由热核反应或蒸发过程产生的中子、高能快中子尾部,以及在某些条件下出现的准单能峰。这种白光谱的形成主要是由于源的能量展宽(驱动离子或光子的能谱分布)和反应过程的复杂性(多体或多步核反应动力学)。与气泡探测器和活化法相比,nTOF 法的优势在于其具备时间分辨能力:它能在单次激光脉冲实验中,通过记录中子到达探测器的精确时间,利用不同能量中子飞行速度的差异,在时间轴上实现自然的能量色散。这使得 nTOF 法成为诊断中子能谱结构不可或缺的方法。中子飞行时间 t_n 与中子能量 E_n 之间的关系为:

$$t_n = \frac{72.3L}{\sqrt{E_n}} \quad (3)$$

其中: L 是中子的飞行距离,单位为 m; t_n 与 E_n 的单位分别是 ns 和 MeV^[85]。

实验中,nTOF 波形呈现典型的三段结构:初始的强 γ 信号易导致探测器饱和,紧随其后的是由飞行距离和能量决定的中子信号的时间窗,最后是来源于闪烁体余辉和室内散射中子的长尾背景。单纯增加铅屏蔽来抑制 γ 信号存在局限,因为铅对中能中子^[86](如 2.45 MeV)有明显的散射和衰减作用。因此,工程上更常采用门控技术,比如门控微通道板光电倍增管,结合几何屏蔽的方法,在 γ 信号到来期间关闭增益以保护探测器,从而提取中子信号。但在更强的 X/γ 背景或更高增益需求下,门控窗口与动态范围容易到达系统极限;同时,闪烁体的余辉会在门控结束后留下长尾本底,掩盖弱中子信号。因此实际系统设计通常需要选用余辉成分更弱、衰减更快的闪烁体

(例如氧富集液体闪烁体),以保证中子能谱信号能被稳定、清晰地分辨出来^[85]。

2024年,法国强激光应用实验室(laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, LULI) Lelièvre等^[87]指出X射线在nTOF测量中具有双重作用:既可用于确定时间零点,又往往构成最主要的本底来源,因此对X射线的有效屏蔽是保证高能端测量可信度的关键。此外,探测器自身的时间响应会使单能中子在时间域表现为展宽信号;如果谱反演时不把系统响应函数纳入并进行反卷积,这类仪器展宽就可能被错误地当作能谱的低能尾部增强,从而引入系统性偏差。总的来说,为实现高动态范围与高精度要求下的nTOF测量,需同时考虑背景抑制、时间零点准确定位以及基于响应函数的能谱反演三个方面的设计优化,才能获得高精度的中子能谱。

3.2 中子产额与角分布

在实验过程中,中子产额及其角分布信息通常会被同步测量。通过测量单位立体角内的中子产额($dY/d\Omega$)可以对中子产额参数进行表征,而中子角分布实质上是产额随空间角度的变化,总产额可通过对角分布数据进行全空间积分得到。

目前,主流的测量设备主要包括nTOF谱仪、气泡探测器和活化箔等。下面重点介绍气泡探测器与活化箔等主流测量技术。

3.2.1 气泡探测器

气泡探测器操作简便、抗干扰能力强、可重复利用,已成为测量激光中子源产额与角分布的典型诊断设备^[7, 22, 61, 87-90]。气泡探测器内装有掺杂过热液滴的固体凝胶,当中子进入其中后,会通过弹性碰撞产生反冲质子,反冲质子在凝胶中会将过热液滴汽化,形成肉眼可见的气泡。气泡的数量与中子产额呈线性关系。因此,通过统计气泡数量,可以得到中子产额。计数完成后,可以通过对气泡探测器进行加压来清除气泡,实现重复利用。典型加压时间约为30 min,当气泡存在时间超过24 h,需要2 h的加压时间才可以完全清除气泡^[90]。

气泡探测器在出厂时会利用Am-Be中子源进行标定,标定系数会标注于探测器管壁上,实验结束后,根据中子产额的不同,气泡探测器内会出现不同数量的气泡,探测器所在位置单位立体角内的中子产额 $dY/d\Omega$ 由式(4)给出^[36, 88, 91]:

$$\frac{dY}{d\Omega} = \frac{nr^2}{sk} \quad (4)$$

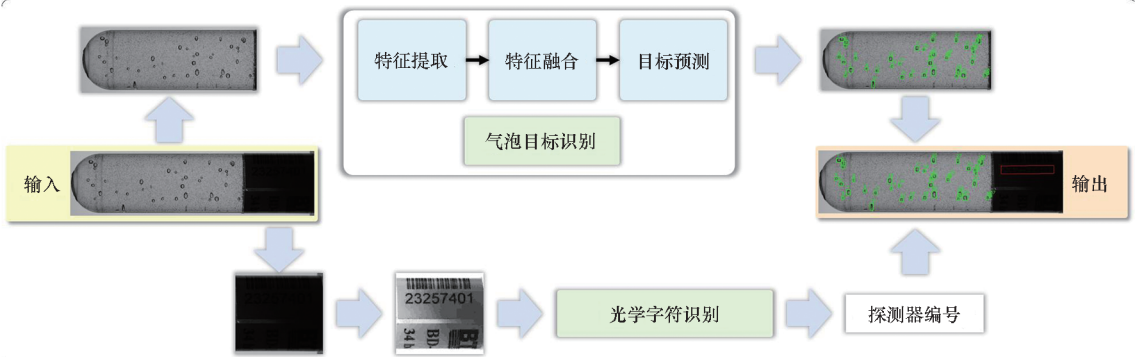
其中: n 为探测器内气泡的数目; r 为气泡探测器

与中子源的距离; k 为刻度系数,表示每毫雷姆的中子辐射剂量在探测器内所产生气泡的数量; s 为灵敏度,代表刻度系数为1 bubble/mrem的气泡探测器测量得到1个气泡数目所对应的中子注量(单位:个/ cm^2),气泡探测器的灵敏度随着中子能量的变化会有所不同。2013年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的Jung等^[35]给出了气泡探测器灵敏度随中子能量变化的曲线,气泡探测器在宽能谱范围内有很好的响应,特别地,在1~30 MeV的中子能量范围内,气泡探测器的灵敏度曲线较为平坦,通常可取值为 $s = 3 \times 10^{-5}$ 进行计算,这恰好覆盖了典型激光中子源的能谱范围^[48, 61]。

此外,气泡探测器还能测量中子能谱。通过将不同灵敏度范围的气泡探测器组成气泡谱仪,在每个灵敏度范围均可以计算出相应的中子产额,进而可以得到中子能谱曲线。2024年,法国LULI的Lelièvre等^[87]利用6个气泡探测器,覆盖10 keV至20 MeV的灵敏度范围,并成功获得了相应的能谱曲线。

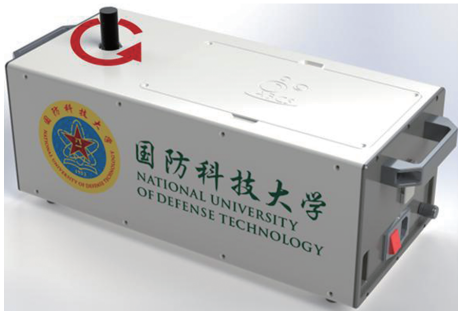
尽管气泡探测器的实验操作和产额计算过程相对简单,但在数据处理阶段,实现对气泡的快速、准确且具备数据可追溯性的计数,是实验中的主要挑战。目前,在激光中子源实验中,气泡计数主要依赖人工目视方法。经验丰富的实验人员在气泡数量约为50个时,能够实现较为准确的计数^[90]。然而,当气泡数量进一步增加,或处于探测器出厂时标定的100~150个气泡数量范围内时,人工目视计数所引入的主观误差及速度限制会显著影响测量结果的准确性和实验操作的便捷性。气泡探测器生产厂家虽售有对应的气泡探测器自动计数仪,但在计数精度(针对多气泡数目下的遮挡处理)和数据处理自动化程度(针对编号的自动读取以及数据关联)方面仍有待提升。

为了应对上述挑战,国防科技大学研究团队开发了一种基于卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的气泡识别与处理方案^[92-94],如图8所示。图8(a)展示了气泡探测器数据处理算法流程图,CNN目标检测模型负责识别并定位探测器内的每一个气泡(使用边界框标注),同时光学字符识别(optical character recognition, OCR)模块读取探测器的唯一编号,两者结合可以将气泡计数结果与探测器编号自动关联,提供直观的可视化结果以供数据校验与追溯。气泡探测器的数据处理结果如图8(c)所示。



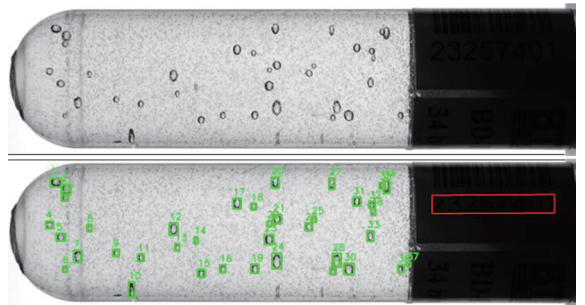
(a) 数据处理算法流程图

(a) Flowchart of data processing algorithm



(b) AI 读数仪示意图

(b) Diagram of the AI reader



(c) 数据处理结果对比

(c) Comparison of data processing results

图 8 气泡探测器 AI 读数仪算法结构、硬件装置与数据处理结果

Fig. 8 Algorithm structure, hardware device and data processing results of bubble detector AI reader

3.2.2 活化箔

与需要供电和线缆连接的有源探测器不同,活化箔是一种无源的积分型探测器。它具有极强的环境适应性,且对被测场的扰动极小。活化箔在强本底 γ 环境下不受信号堆积和死时间的影响,可放置在电子学探测器无法工作的极端位置(如紧贴靶室内部),这使其成为复杂电磁环境下的可靠测量手段之一。不同的活化箔具有不同的反应阈值和灵敏度范围,若所选反应道过少或截面数据不准,会导致解谱结果因信息量不足而产生较大偏差。因此,人们需选用高纯金属箔并布放成阵列,利用其在 10^{-7} eV ~ 10^2 MeV 范围的能量响应差异进行互补^[95]。另外,活化箔的种类和尺寸也需根据实际通量水平和谱仪探测效率进行专门选取和设计^[96]。

活化法的核心思想是,将难以直接在线区分的中子能谱分布映射为可离线精确测量的放射性活度信息,利用反应率与中子通量的卷积关系反演得到能谱信息^[97]。它通过以下几个主要过程实现上述思想:①选取活化箔需要考虑能量响应范围和所用探测器的核反应是否具有相应的截面

能量曲线,同时保证活化箔的平均截面较大、反应产物半衰期适中,活化后的特征能量可相互区分且便于测量等因素;②将选取的活化箔按照顺序依次放置在靶附近,经一段时间中子照射后取出。在离线低本底环境下,利用高纯锗谱仪对活化箔进行绝对活度测量,将衰变光子计数率溯源至活化核数目;③把每块活化箔测得的“饱和活度”写成对各能群中子通量的加权求和(权重由相应反应截面给出),即可得到一组线性方程。再把截面数据本身的不确定性及其相关性用“截面协方差矩阵”纳入误差传播,通过贝叶斯-马尔可夫链蒙特卡罗(Bayes-Markov chain Monte Carlo, Bayes-MCMC)或期望最大化(expectation-maximization, EM)迭代方法求解^[98],得到每个能群的中子通量密度;最后对各能群通量做能区积分,并结合实验几何与探测面积/体积换算,即可得到总中子产额。

3.3 中子源尺寸

激光中子源的尺寸是其核心参数之一,直接决定了基于激光中子源的中子成像系统的极限空间分辨率。由于中子穿透性强,刀边法与编码孔

成像法成为中子源尺寸测量的主要方式^[99-103]。同时,为了获得特定能段中子的源尺寸,还需结合飞行时间法对成像记录设备进行时间门控,以选择特定能谱范围内的中子进行成像测量。

刀边法和编码孔成像法基于不同的几何投影与图像重建原理。其中,刀边法原理简单,在中子源与中子成像系统之间放置刀边,通过记录刀边的投影信息,可以得到边缘扩散函数,对其微分后结合成像系统的放大倍率可以得到中子源的尺寸信息。刀边法实验设置简单,计算快捷,但只能反映中子源沿刀边垂直方向的一维分布,对源分布的对称性敏感。

编码孔成像法能够实现中子源尺寸的二维测量。考虑到中子的强穿透性与编码孔的加工难度,编码孔通常为钨等重金属物质制成的圆孔^[101, 103-104]。编码孔的作用是实现入射中子的调制,当中子束通过编码孔后,会在探测器上形成模糊的图像,该图像是中子源的真实二维分布与编码孔的点扩散函数卷积后的结果,通过反卷积算法可以重建出中子源的二维尺寸与空间分布信息^[104]。相比于刀边法,编码孔成像能提供全面的源尺寸信息,但对解码算法的要求更高。

2016年,美国光谱科学公司的Guler等^[103]对束靶中子源的源尺寸进行了测量。他们分别采用刀边法和半影孔编码成像法在不同的发次中测量了转换体处中子源尺寸的大小,如图9所示。其中,刀边法针对2.5~15 MeV能段中子测得的源尺寸FWHM为1.2 mm,而编码成像法针对更宽的2.5~35 MeV能段测得的FWHM为0.57 mm。这一差异也表明了源尺寸测量的复杂性,更高能量的中子可能来源于靶中更局域的相互作用区

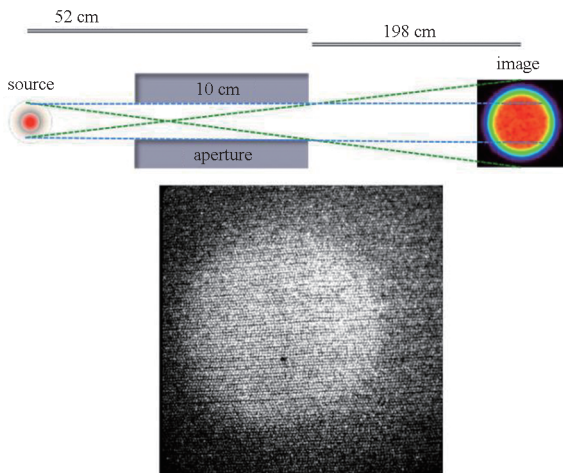


图9 半影孔成像实验安排示意图与实验结果^[103]

Fig.9 Setup for the source imaging with penumbral aperture and the experimental results^[103]

域。该工作首次确定束靶中子源的尺寸在mm尺度,为后续中子源测量与优化提供了参考。

3.4 中子脉宽

激光中子源的短脉宽(几十至百ps)^[72, 77]使其在应用中可获得远高于传统中子源的能量分辨。然而,不同于其他特征参数,激光中子源脉宽尚未在实验中直接测量^[7],目前仍缺乏专门的诊断方法和有效的技术手段。

激光中子源的短脉宽对测量所用探测器的时间分辨率提出了极高要求。在时间分辨率方面,条纹相机尤为突出,可达到几ps甚至百fs^[105]。条纹相机的基本思想是通过线性扫描将待探测的超快时间信息转换为相对容易探测的空间信息,然后根据空间信息和线性扫描信号之间的关系反推出时间信息。它通过以下几个主要过程实现上述思想:①光电阴极将入射的光脉冲转换为具有相同时间信息的光电子脉冲;②光电子脉冲经过加速电极和聚焦电极加速、聚焦后进入扫描板;③扫描板之间具有线性时变的电场,不同时刻进入的光电子会因受到不同强度的电场力而发生不同大小的空间偏移,最终光电子脉冲在荧光屏上形成图像。根据扫描板所加的线性时变电场和测量到的图像宽度,可反推出入射光脉冲的时间宽度。由于无法直接探测中子,用条纹相机测量中子脉宽时要先通过闪烁体将中子脉冲转换为光脉冲。此时,闪烁体的材料选取和尺寸设计变得尤为重要。譬如,闪烁体的衰减时间过大会导致其产生的光脉冲宽度显著大于中子脉宽,从而影响最终测量结果的准确性;较薄的闪烁体虽然有利于短脉冲测量,但产生的荧光也相对较弱,需根据中子脉宽和条纹相机对光强的要求设计合适尺寸的闪烁体。

除了上述“闪烁体+条纹相机”方案,快响应的半导体探测器也是一条可能途径。低增益雪崩探测器(low-gain avalanche detector, LGAD)是高能物理实验的“四维”探测器中用于提供时间信息的传感器^[106]。它具有快响应特性的特点,时间分辨率可小于35ps^[107-108],且掺入碳元素可提高其抗辐照性^[109]。LGAD是以硅作为探测介质的半导体探测器,在pn结下通过高浓度掺杂,当器件耗尽时获得强电场;入射射线产生的载流子在强电场区域引起雪崩效应并向两端电极快速漂移,从而形成信号并实现低增益放大。LGAD的良好时间分辨率源于较薄基体所带来的更短的信号上升时间和从低增益中所获得的更好的信噪

比。LGAD 虽然对中子的探测效率不高,但可通过使用中子转换层来提高中子的探测效率。LGAD 还可以做成多通道阵列式,多个独立通道使其能在单发次实验中获得多个信号,通过统计各通道信号的时间分布,有望得到中子脉宽。

如上所述,目前已具备有望用于测量激光中子源脉宽的高时间分辨探测器,但要在实验上实现脉宽测量仍面临诸多困难,比如激光中子源的宽能谱特性要求探测器靠近中子源以避免脉宽展宽,此时将面临 γ 本底对中子信号的影响。这需要在已有探测器的基础上,根据激光中子源的特性设计整体诊断系统,同时开发相应的数据处理方法,才有望实现脉宽的实验测量。

4 激光中子源的应用

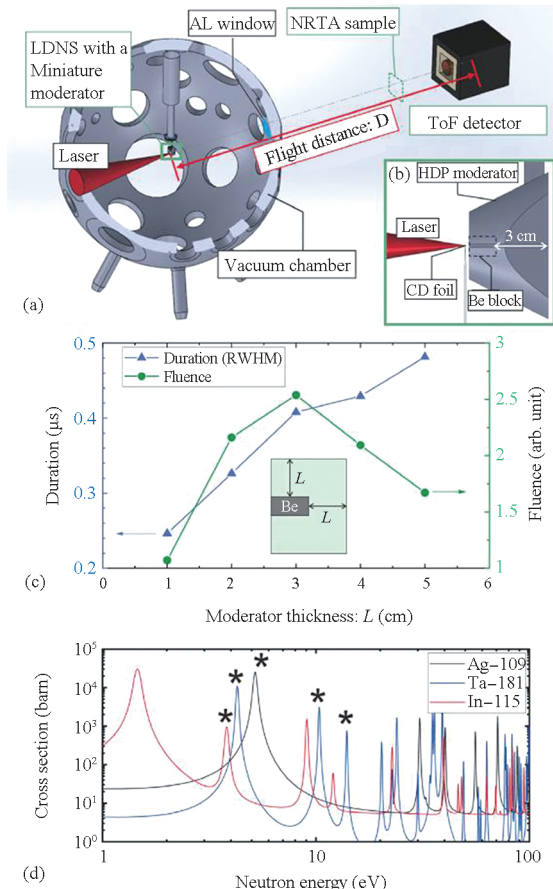
4.1 中子共振谱学

中子共振谱学是以核素在 eV ~ keV 能区的窄共振截面结构作为“核指纹”,通过 TOF 高精度测定共振能量、宽度与强度,以此实现核能级结构和中子反应机制的精细解析,在核数据测量、核天体物理建模、先进堆型设计与核安保等方面都有重要应用^[31, 110]。

传统加速器驱动的散裂中子源(如 CSNS)凭借其产生的宽能区、高亮度和稳定的束流,可在热中子到快中子全能区开展系统性的共振截面测量,以支撑经评定的核数据文件(evaluated nuclear data file, ENDF)、中国评价核数据库(Chinese evaluated nuclear data library)等评价库的标定与更新。中子共振谱学作为获取高精度核反应截面和共振参数的主要手段,近年来 CSNS 借助 Back-n 反角白光中子束线和专用 γ 探测装置,已构建起一套实验与数据分析体系,凭借这套体系已获得一系列研究结果^[110-112]。从总体上看,基于传统散裂中子源的中子共振谱学,其中子能区覆盖范围可从亚 eV 到数百 MeV,中子通量稳定且亮度高(Back-n 束流的中子通量可达 10^7 n/(cm² · s)),eV ~ keV 区能量分辨率通常可保持在 0.5% ~ 1.0%,而且可实现复杂本底条件下的参数提取^[110, 112],但其局限性在于装置尺度巨大、建设与运维成本高、机时调度刚性强,难以支撑现场测量、快速筛查和极端短寿命核素的原位测量。

凭借 ps 级短脉宽和紧凑的飞行路径,激光中子源可获得优异的时间分辨能力和高峰值亮度,适合开展 eV ~ keV 能区的单发或少发次测量和极端条件下核材料的快速检测。上述特点使得激光中子源可在中子共振谱学上与散裂中子源形成互

补。2022 年,德国重离子研究中心 Zimmer 等^[62]利用 PHELIX 装置产生的平均能量(103 ± 9)J、脉宽 600 fs 的激光加速质子或氦离子,通过核反应((p, n)或(d, n)过程)产生中子,这些中子经过慢化和准直后照射 2.7 mm 的钨样品,实现了¹⁸²W、¹⁸³W、¹⁸⁶W 和¹⁸¹Ta 的中子共振识别,验证了激光中子源用于中子共振谱学的可行性。2023 年,日本大阪大学 Yogo 等^[63]用 LFEX(laser for first ignition experiment)装置产生的 $10^{18} \sim 10^{19}$ W/cm²激光轰击碳汽薄膜来加速离子,并与 Be 靶发生核反应产生中子,如图 10 所示。慢化后的中子分别照射由 Ag/Ta/In 多层样品和更厚的单层 Ta 样品,均测到了样品核素的共振结构,(5.9 ± 0.05) eV 处的能量分辨率达 2.3%。不同于 Zimmer 等^[62]的多发次累加,这项工作实现了中子共振谱学的单发测量。在此基础上,2024 年日本原子能机构 Koizumi 等^[113]不仅从能谱中获得了样品的共振结构,而且利用核共振拟合程序



注:(a) 为 NRTA 束线示意图;(b) 为激光中子源的微型慢化体;(c) 为 10 eV 中子的脉宽和通量与慢化体尺寸关系的模拟结果;(d) 为¹¹⁵In、¹⁸¹Ta、¹⁰⁹Ag 的中子俘获截面。

图 10 基于激光中子源的 NRTA 束线示意图^[63]
Fig. 10 Diagram of NRTA beamline based on laser neutron source^[63]

REFIT 分析能谱得到了 ^{109}Ag 和 ^{115}In 的面密度,实现了基于激光中子源的面密度分析。

上述工作虽利用激光中子源实现了中子共振谱学的测量,但均是基于大型高功率高能激光装置,这不仅难以发挥激光中子源在紧凑性和灵活性上的优势,实际测量时还必须面临装置产生的强 γ 辐射带来的干扰。为解决这一问题,2025年,上海交通大学 Feng 等^[64]基于桌面 TW 级飞秒激光驱动电子加速(激光脉冲频率 2 Hz,最高可达 100 Hz),通过 (γ, n) 反应和慢化后获得超热中子束,在累积约 10 万发次(总中子源强约 10^7 n/s)的条件下,实现了 In/Ag 样品的中子共振谱分析,成功分辨出 ^{115}In 和 ^{109}Ag 的共振吸收峰,5 eV 处的时间分辨率达 0.8 μs ,能量分辨率优于 3% (飞行距离 1.72 m)。这项工作为可移动式紧凑型激光中子源的发展打下了基础,也为核材料在特殊环境下的无损检测提供了一条实时、低成本的全新技术路径。

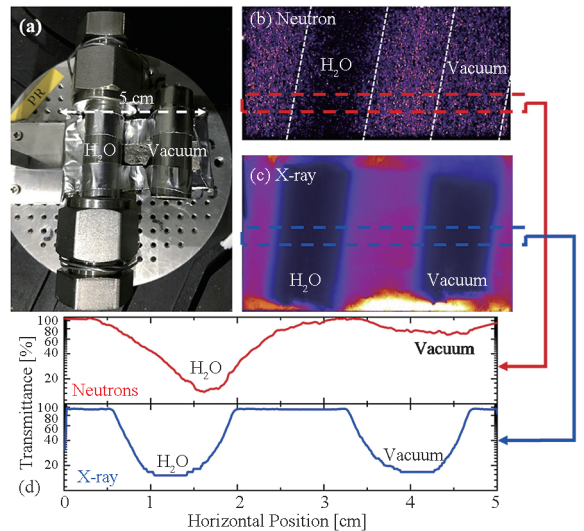
总的来说,相对于散裂中子源,激光中子源在中子共振谱学研究方面具有以下特点:①几何结构紧凑,便于移动与现场部署;②脉宽短,TOF 起点明确,eV ~ keV 区能量分辨在短飞行路径上具有天然优势;③脉冲重复频率可灵活调节,多模态辐射场(中子 + X/ γ + 带电粒子)支撑共振谱学与其他诊断的联合应用。潜在应用场景包括高精度核数据测量、嬗变靶件在线监测和现场核材料快速检测等。然而,目前激光中子源实用化面临的关键问题是束流的稳定性和持续性有待提升。

4.2 中子成像

中子成像是利用不同核素中子吸收截面的差异,通过探测器测量中子透射图像,以实现材料识别与器件成像的无损检测技术。中子的电中性和强穿透性,以及同位素之间中子共振结构的差异性,使得中子成像不仅能提供几何/缺陷信息,还具备同位素分辨能力,可用于大型构件残余应力与缺陷评估、燃料与电极中活性组分的空间分析、文物成分识别等^[114]。

散裂中子源和反应堆中子源凭借高稳定通量与成熟的成像探测器,已建立了空间分辨优于百 μm 、视场达数 cm 的高精度中子成像体系;CSNS 围绕 Back-n 反角白光中子束线已形成面向中子成像的一整套方法并开展了相关工作^[114]。从总体上看,基于散裂源的中子成像具备视野大、空间分辨高与定量精度好等优势,适合对复杂和大型对象进行高置信度三维成像。

激光中子源凭借装置紧凑和脉冲亮度高的特性,有望在现场测量、快速检测和瞬态过程成像方面作为散裂中子源成像的重要补充;其可行性已在不同实验研究中得到验证。2022 年,日本大阪大学 Wei 等^[115]利用 LFEX 激光(约 10^{19} W/cm^2 、1.5 ps)加速质子和氘离子,通过 $^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$ 和 $^9\text{Be}(p, n)^9\text{B}$ 产生快中子并对其进行慢化。利用慢化后的中子和激光作用产生的 X 射线对两根不锈钢管(一根装有水,另一根为空腔)进行成像,结果如图 11 所示,中子通过镉板记录,X 射线则通过成像板记录。在单次实验中,通过中子成像实现了不锈钢管道内的水(氢密度 0.11 g/cm^3)与空腔管的区分,测得充水管道的热中子透射率为 $15\% \pm 3\%$;X 射线因对低原子序数元素不敏感,未能区分两支不锈钢管。模拟结果表明,该方法可用于测量氢基础设施中高压氢气的氢密度,且高压氢用不锈钢中的掺杂元素对检测无明显影响。这项工作验证了激光中子源在氢能源系统现场检测中的应用潜力。同年,德国重离子研究中心 Zimmer 等^[62]在 PHELIX 激光装置上不仅开展了中子共振谱学实验,还利用热中子完成了 Cd 和 In 等样品的中子成像。另外,他们利用铝箔包裹的 Cd 和 In 来模仿未知样品,演示了基于



注:(a)为不锈钢管道射线照相样品的图片,其中一根管道充满水(H_2O),另一根保持真空室内的空置状态;(b)为测量得到的中子照相图像;(c)为 X 射线图像;(d)为根据图像(b)和(c)得到的沿水平方向的中子(红色)与 X 射线(蓝色)透射率曲线。

图 11 注水不锈钢管与真空不锈钢管的中子/X 射线双模态成像对比及透射率分析^[115]

Fig. 11 Dual-modality neutron and X-ray imaging comparison and transmittance analysis of water-filled versus evacuated stainless-steel pipes^[115]

能量选通的简化版中子共振成像,在适当的能量范围内成功分辨出了这两种原子密度相近但共振结构截然不同的材料。这项工作基于激光中子源,在单个实验平台上展示了中子共振谱学、热中子成像和中子共振成像三种分析技术,凸显了激光中子源在无损检测方面具备的巨大潜力。

在验证了激光中子源在中子成像方面的潜力后,研究人员试图对其进行进一步挖掘和提升。基于中子能谱可调的特点,2022年,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室 Williams 等^[116]提出通过激光中子源实现了双能快中子成像,以进一步增加成像可获取的样品信息。他们通过理论模拟,得到在两种激光条件(Case A: 7.4×10^{18} W/cm², 100 J, 350 fs; Case B: 5.2×10^{18} W/cm², 200 J, 1 000 fs)下,前向 1 sr 立体角内产额分别为 5.4×10^5 和 2.4×10^6 的中子束(平均能量分别为 1.9 MeV 和 2.3 MeV);中子能谱通过 Geant4 模拟得到。利用上述中子束和射线追踪代码 HADES,生成了由 Pb/Sn 合金(高 Z 材料)、高密度聚乙烯(低 Z 材料)和铝构成的测试样品的双能中子图像。由双能中子图像简单的线性组合(如 Case B \times 1.22 - Case A)可单独得到高 Z 或低 Z 材料的图像;若利用层析重建算法,可识别出样品各部件的材料。

此外,考虑到激光中子源目前的平均中子通量与散裂中子源仍有一定差距,成像系统的性能提升对提高激光中子源单次或少发次的成像效果至关重要。2020年,日本大阪大学 Mizutani 等^[117]在 LFEX 上通过束靶方案获得宽能谱快中子,配合自主研发的雪崩图像增强面板(增益非均匀性为 5%,脉冲响应 50 ns FWHM,动态范围 100)与大面积蜂窝状液体闪烁体(30 cm \times 30 cm),在低中子注量(约 10^4 n/cm²)的实验条件下,对 5 cm 铅板后的水瓶实现了单发次的快中子成像,验证了所使用的成像系统在低中子通量条件下仍具备单发次快速成像的能力。

总的来说,相对于散裂中子源,基于激光中子源的中子成像的优势在于整体实验系统相对紧凑,可实现车载部署,适用于现场快速检测;另外,激光中子源的短脉宽特性有利于实现高时间分辨率成像。不过,目前激光中子源的单发和平均中子通量仍较低,导致对低丰度核素和厚大样品的成像噪声偏高,需依赖多发次累积计数,严重限制了检测速度、灵敏度与分辨率。为匹配激光中子源的短脉宽和低通量,需定制开发 ns 级门控、高增益探测器(如微通道板、雪崩面板),这类探测器成本高

昂、工艺复杂,且性能(如均匀性)仍需优化。

4.3 核天体物理

宇宙中重元素的起源一直是一个尚未解决的重大科学问题。慢中子俘获过程(s 过程)和快中子俘获过程(r 过程)都是天体环境中重要的核合成(nucleosynthesis)路径,比铁重的元素至少有一半以上是通过后者产生的^[118]。基于加速器或反应堆虽然可以开展核天体物理相关实验研究^[119-120],但也存在其局限性,比如 r 过程只有在高中子通量条件下($> 10^{20}$ n/(cm² · s))才能发生,传统中子源难以满足该条件,加速器或反应堆中子源又无法产生天体物理条件下的等离子体环境。相对而言,激光中子源有望为解决核天体物理的上述困境提供一条可行的途径。

2019年,罗马尼亚霍里亚·胡卢贝伊国家物理与核工程研究所 Chen 等^[121]的研究中指出,未来的 PW 激光装置可用于核天体物理的核合成研究。借助 PW 激光产生几百 MeV 到几 GeV 质子束,通过诱发散裂反应有望获得高峰值通量($10^{22} \sim 5 \times 10^{24}$ n/(cm² · s))和高平均通量($10^{11} \sim 5 \times 10^{13}$ n/(cm² · s))的短脉冲中子源,利用该中子源可在实验室实现多中子俘获。他们的计算结果表明,若以稳定核素⁹⁶Zr 为辐照对象,当中子峰值通量达 10^{24} n/(cm² · s)时,可实现连续多个中子俘获(r 过程),从而得到 6 种同位素⁹⁷⁻¹⁰²Zr。此外,PW 激光装置的辅助激光(auxiliary laser)可产生天体物理条件下的高能量密度等离子体,用于研究该环境下的 s 过程。2021年,德国马克斯·普朗克核物理研究所 Hill 和 Wu^[122]综合考虑了原子序数在 3 ~ 100 范围内的 90 余种元素,在理论上计算了用平均能量为 50 keV ~ 10 MeV 的激光中子源照射由上述元素构成的样品所产生的丰中子同位素产量。结果显示,若激光中子源的产额能达到 10^{12} n/pulse,可实现双中子俘获;在 10^{12} n/pulse、重复频率 1 Hz、辐照 10^4 个脉冲的条件下,最多可实现连续 4 个中子俘获。

为定量研究激光中子源在实验室产生丰中子同位素的可行性,2024年,法国 LULI 的 Horný 等^[123]在上述两项研究的基础上对计算做了改进,考虑了中子的空间和能量分布对计算结果的影响,获得了更准确的模型。研究指出,为使(A + 2)同位素(即连续俘获两个中子)的产量最大化,中子的产生与俘获应发生在同一个靶内;¹⁹⁷Au符合上述要求。最终计算结果表明,中子源产生的中子若直接与¹⁹⁷Au 反应,实验上可获得的

^{199}Au (^{197}Au 的 $(A+2)$ 同位素) 产量远低于可测量值; 不过, 若利用目前已实现的中子慢化技术, 在高重频 (至少 100 Hz) PW 激光的条件下, 有望获得可测量的 $(A+2)$ 同位素。

总之, 高值通量的特点使得激光中子源有望用于传统中子源难以企及的核天体物理研究, 同时, 超短超强激光技术可产生天体物理条件下的高能量密度等离子体环境, 这为在实验室创造相应的核天体物理条件提供了可能。不过, 目前激光中子源的品质参数距离实现真实核天体物理的实验研究仍有一定距离, 如何获得持续且稳定的高产额中子输出是激光中子源必须解决的问题。

4.4 核医学

核医学主要通过核辐射来开展肿瘤治疗和医疗影像诊断。作为一种精确的放射性治疗技术, 中子俘获疗法 (neutron capture therapy, NCT) 的基本原理是先将富含中子俘获核素的药物送至患者体内, 使其聚集在肿瘤细胞, 通过中子诱发核反应产生的高线性能量传递粒子来杀死肿瘤细胞; 具体方法包括硼中子俘获疗法 (boron neutron

capture therapy, BNCT)、锂中子俘获疗法 (lithium neutron capture therapy, LiNCT) 等^[124]。中子源技术在发展和推广 NCT 中起到关键作用。BNCT 的推广, 以及个性化、例行性治疗的实现正是因为可以用适合在人员密集场所运行的加速器取代核反应堆^[125]。高中子通量、结构紧凑和低造价是 NCT 中子源的发展方向^[126]。激光中子源的特点符合上述要求, 宽能谱特性不仅使其可产生 NCT 所需的超热中子或热中子, 还具备一定的可扩展性, 而基于重频 PW 激光技术的激光中子源有望获得比加速器中子源更高的中子通量, 这有利于缩短治疗时间。这些都意味着激光中子源有可能作为 NCT 中子源的重要候选。

2024 年, 北京大学 Morris 等^[127] 提出了一个基于激光中子源的 LiNCT 新方案, 如图 12 所示, 该方案通过激光加速产生的质子束轰击含 ^7Li 的靶, 得到的快中子超过 10^9 n/pulse, 若慢化效率 $> 1.5\%$, 预计可获得约 10^8 n/pulse 的热中子。基于激光中子源的 LiNCT 方案为提高放射性治疗的精确度提供了可能途径。

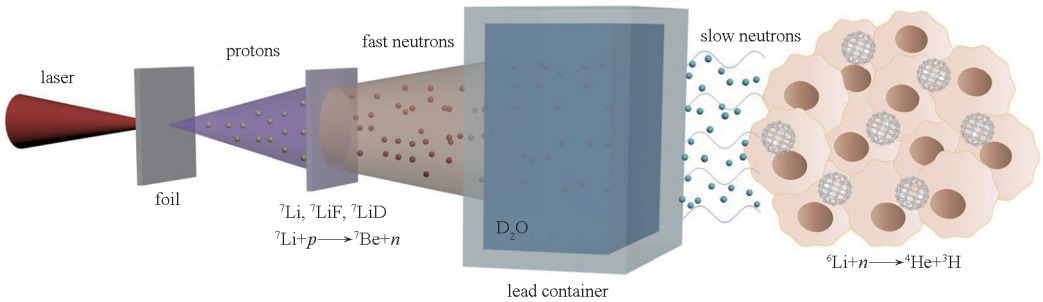


图 12 基于激光中子源的 LiNCT 示意图^[127]

Fig. 12 LiNCT basing on laser-driven neutron source^[127]

医用放射性同位素是核医学的基石, 用于医疗影像诊断或放射性治疗。目前, 医用放射性同位素主要产自核反应堆和加速器。核医学的发展使得医用放射性同位素需求量不断增大, 这促使了结构紧凑、安全、成本低的医用放射性同位素生产技术的发展。因激光器结构紧凑、安全, 且造价低于核反应堆和加速器, 激光中子源有望用于医用放射性同位素的生产; 在医院内部生产医用放射性同位素, 不仅有利于丰富生产途径、提高产量, 还可减少远距离运输造成的同位素损耗, 尤其是短半衰期的同位素。2023 年, 日本大阪大学激光工程研究所 Mori 等^[128] 以产生可用于癌症治疗的 ^{67}Cu 为例, 研究了激光中子源在医院内部生产医用放射性同位素的可行性。他们在实验中使用激光中子源产生的快中子辐照自然丰度的 Zn 靶,

引发核反应 $^{67}\text{Zn}(n, p)^{67}\text{Cu}$ 与 $^{68}\text{Zn}(n, np)^{67}\text{Cu}$ 产生 ^{67}Cu , 通过活化法测量其活度。基于上述实验结果, 他们模拟计算了用重频激光中子源辐照高丰度 ^{67}Zn 靶后 ^{67}Cu 的产量。结果显示, 10 Hz 的激光中子源持续照射 10 000 s 后, ^{67}Cu 的活度可达 270 MBq。这个结果证实了利用激光中子源在医院实现医用放射性同位素生产的可能性。类似地, 在 2025 年, 波兰等离子体物理与激光微聚变研究所 (institute of plasma physics and laser microfusion, IPPLM) Batani 等^[129] 基于实验研究了激光形成的质子或 α 粒子用于医用放射性同位素生产的可行性, 以加速器的束流强度为参考, 对生产放射性同位素所需的激光驱动粒子源参数做了估算, 并提出了未来的研究计划。

总的来说, 核医学的发展促使研究人员发展

出结构紧凑、运行安全、造价低的新型中子源,以满足在医院实行放射性治疗、生产医用放射性同位素等实际需求。相较于传统加速器和反应堆,激光中子源因其原理简单和激光器的紧凑性与相对较低的造价等优势,更容易在人员密集场所(包括医院)运行和普及。不过,若想投入实际应用,激光中子源必须要达到稳定持续运行的水平;同时,还需要发展慢化和准直技术,以满足不同应用场景对中子能谱、源尺寸等参数的具体要求。

4.5 其他应用

对于航天器和卫星的电子学系统,大气层环境的中子辐射不仅会导致其性能下降,甚至还会引发运行故障;最常见的一种中子辐照效应是单粒子翻转(single event upsets, SEU)效应,需要在使用前对电子学系统进行相关的测试。由于自然环境下的测试耗时巨大,传统的加速器散裂中子源的能谱与现实大气环境的中子能谱相差较大且不易调整。2025年,北京大学 Wu 等^[130]提出以激光加速粒子诱发放裂反应产生的中子源作为辐射源来测试大气中子辐射对电子学系统的影响。该方案可通过改变激光和靶参数来调节中子能谱,以获得不同条件(如不同海拔、不同纬度等)下的大气中子能谱。PIC 和蒙特卡罗模拟结果验证了上述方案。此外,模拟结果显示,在 10^{22} W/cm²的 PW 激光条件下所获得的 1.73×10^8 n/cm²单发中子注量等价于大气层环境下 3.7 年的累积量;利用 G4SEE,估算出型号为 HM628128 的静态随机存取存储器平均每次打靶会发生 10 次 SEU。这项研究说明激光中子源有望用于电子器件的辐照效应研究。

激光中子源未来可能用于核裂变能领域。作为一种有望解决乏燃料安全处理处置问题的技术手段,加速器驱动次临界系统(accelerator driven sub-critical systems, ADS)主要由加速器、散裂靶和次临界反应堆这三个部分组成,加速器产生的高能束流入射到散裂靶诱发核反应,核反应产生的中子驱动次临界反应堆运行^[131]。2025年,欧洲极端光线基础设施(extreme light infrastructure, ELI) Canova 等^[67]提出通过激光中子源来提供 ADS 运行所需的中子;相较于依靠传统加速器,激光驱动的加速器驱动次临界系统(Laser-driven accelerator driven sub-critical systems, LDADS)占有空间更小,建设费用更低,可靠性和安全性上也更优。他们评估了激光中子源目前可达到的参数指标,探索了它们用于驱动次临界反应堆的前景,对 LDADS 的各部件做了技术风险分析,最终肯定

了 LDADS 在核裂变能领域的潜力。

5 总结与展望

综上所述,激光中子源因其高峰值通量、超短脉宽、宽能谱、微焦点和结构紧凑等特点,在中子共振谱学、中子成像、核医学、核天体物理乃至核裂变能领域均表现出巨大的应用前景,成为传统中子源不可或缺的重要补充。不过,要想实现实际应用,激光中子源仍面临诸多挑战。

虽然中子产额相比早期有显著提升,也实现了实验上的单发次原理性验证,但在现有产额下所获得的中子通量仍偏低,这导致单发次实验结果的信噪比不高。为此,激光中子源的品质需进一步提高。譬如,通过优化靶结构来提升能量转换效率,以此提高带电粒子的产额与能量;优化加速方案,进一步提高中子源的前向性。除了单发次的中子束品质,提高重复频率对平均中子通量的提升也至关重要。实现稳定且持续的高重频运行,可将激光中子源的单发次高峰值通量转化为高平均通量。高重频激光系统和与之相匹配的靶材系统是高重频运行的两大关键要素。激光系统的参数影响着中子源的品质,而在系统设计上这些参数互相制约,譬如,脉冲能量的提高会降低可实现的重复频率,同时增大激光系统的尺寸,需要根据中子源的用途选择合适的激光系统。另外,为应对不同场景对中子能谱的需求,激光系统的参数要灵活可调,甚至要做到在重频运行时相邻发次之间的切换。除了激光系统,靶材也需要满足高重频运行的要求;在保证单发次中子束品质的前提下,发展出可长期运行且打靶残留物少的靶材系统是需要解决的问题。

激光中子源品质的提升对其所使用的诊断技术也提出了更高的要求。一方面,现有诊断技术的发展,需要在中子脉宽这种尚未实现直接测量的参数上取得技术上的突破,以此获得更全面的中子束信息。另一方面,随着高重频激光中子源技术的发展,其对中子源核心参数的实时在线诊断能力提出了明确需求,这要求诊断技术能够实时监测并反馈中子源的各项参数。受限于自身的探测机理与工作模式,基于气泡探测器与活化箔的中子产额诊断方法难以满足高重频工况下的实时测量需求。此外,活化法还受限于中子活化产物的时间衰减特性,在重频中子源长时间运行的产额测量场景中存在测量精度不足的缺陷。基于中子飞行时间谱仪的测量方案是实现中子产额实时测量的有效途径,但仍面临多探测器数据的同

步采集、高速实时处理等技术挑战。

不同领域应用场景之间的差异,对激光中子源的品质提出了不同要求。对于中子共振谱学和中子成像而言,为实现样品的现场测量和快速检测,整套激光中子源系统需要实现车载部署;另外,若能实现靶材、慢化和准直系统的快速更换,便可充分发挥激光中子源能谱宽且可调的特点,使得一套车载式激光中子源能同时满足多种应用场景。不过,车载式激光中子源将面临质量小、体积小和可移动等限制条件下的核辐射屏蔽问题;源自身的混合辐射场特性(包括中子和 γ 射线等)也会使问题复杂化。传统中子屏蔽材料(比如水、聚合物等)、传统 γ 射线屏蔽(比如铅、钨等)与综合屏蔽材料(比如屏蔽混凝土、铅硼聚乙烯等)均无法满足上述要求。它们存在诸如难以同时满足中子和 γ 射线屏蔽要求,材料结构性能与轻量、小型和可移动需求之间的兼容性问题。在对于灵活性和紧凑性要求相对较低的领域(如核天体物理、核医学、核能源领域),因激光中子源系统可建在固定地点或楼层内,此时的重点往往是如何尽可能地提高中子源的参数和持续运行时长,以满足应用的需求。对于核天体物理实验与医用放射性同位素生产而言,为提高同位素的产量以满足实验或应用的需求,需要追求高平均通量和一定时长的持续运行;而对于中子俘获疗法,平均中子通量不宜过高,针对治疗的具体需求优化中子源参数(如减少 γ 辐射剂量和中子的发散角)是其考虑的重点。至于能源领域,为确保稳定且持续的能源输出,激光系统和靶材系统能否长时间持续运行,是激光中子源能否在该领域应用的关键。激光系统的指向稳定性是影响激光中子源参数稳定性的关键因素,环境温度波动与机械振动均会引发激光指向的漂移,在光路中引入激光自准直系统是保障激光长时运行瞄准精度的有效途径。此外,激光长时运行带来的光学元器件热累积,也对光学元件镀膜与基底材料的抗热损伤阈值提出了更高要求。

总之,激光中子源凭借其自身特点,有望在不同领域作为传统加速器/反应堆中子源的重要补充。不过,在实用化过程中,激光中子源仍面临提升中子源品质、实现传统加速器/反应堆那样的稳定持续运行等诸多挑战。随着重频激光和靶材料等相关技术的不断发展,激光中子源所面临的问题和挑战将在不久的将来得到解决。

本文从激光中子源的产生途径出发,首先简要介绍了各种产生机制的基本原理、发展脉络和

最新研究进展,然后系统介绍了激光中子源特征参数的诊断方法,特别是中子产额、能量、脉宽和源尺寸的诊断,最后指出了激光驱动中子源应用前景和未来发展所面临的技术挑战。展望未来,推动激光与靶材技术的协同突破,实现稳定、高产额的持续输出,特别是重频技术的发展,将是激光中子源走向实用化的关键。

参考文献(References)

- [1] CHEN H S, WANG X L. China's first pulsed neutron source[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(7): 689–691.
- [2] TANG J Y, AN Q, BAI J B, et al. Back-n white neutron source at CSNS and its applications[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2021, 32(1): 11.
- [3] LISOWSKI P W, SCHOENBERG K F. The Los Alamos Neutron Science Center [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2006, 562(2): 910–914.
- [4] NOWICKI S F, WENDER S A, MOCKO M. The Los Alamos Neutron Science Center spallation neutron sources [J]. *Physics Procedia*, 2017, 90: 374–380.
- [5] THOMASON J W G. The ISIS spallation neutron and muon source: the first thirty-three years [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 917: 61–67.
- [6] ZAKALEK P, GUTBERLET T, BRÜCKEL T. Neutron sources for large scale user facilities: the potential of high current accelerator-driven neutron sources [J]. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2025, 142: 104163.
- [7] 齐伟, 贺书凯, 崔波, 等. 超短脉冲激光驱动束靶中子源产生及应用研究进展(特邀) [J]. *中国激光*, 2024, 51(1): 0101004.
QI W, HE S K, CUI B, et al. Research progress of beam-target neutron source and applications driven by ultra-short pulse lasers (invited) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(1): 0101004. (in Chinese)
- [8] ZIMMER M, RÖSCH T F, SCHEUREN S, et al. Assessing the potential of upcoming laser-driven neutron sources and their practical applications for industry and society [J]. *The European Physical Journal Plus*, 2024, 139: 1107.
- [9] DANSON C N, HAEFNER C, BROMAGE J, et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e54.
- [10] LI Y T, CHEN L M, CHEN M, et al. High-intensity lasers and research activities in China [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2025, 13: e12.
- [11] YU T P, LIU K, ZHAO J, et al. Bright X/ γ -ray emission and lepton pair production by strong laser fields: a review [J]. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2024, 8: 24.
- [12] MORA P. Plasma expansion into a vacuum [J]. *Physical*

- Review Letters, 2003, 90(18): 185002.
- [13] MACCHI A, CATTANI F, LISEYKINA T V, et al. Laser acceleration of ion bunches at the front surface of overdense plasmas[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(16): 165003.
- [14] ZHANG X M, SHEN B F, LI X M, et al. Efficient GeV ion generation by ultraintense circularly polarized laser pulse[J]. Physics of Plasmas, 2007, 14(12): 123108.
- [15] HENIG A, STEINKE S, SCHNÜRER M, et al. Radiation-pressure acceleration of ion beams driven by circularly polarized laser pulses[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(24): 245003.
- [16] YU T P, PUKHOV A, SHVETS G, et al. Stable laser-driven proton beam acceleration from a two-ion-species ultrathin foil[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(6): 065002.
- [17] YIN L, ALBRIGHT B J, HEGELICH B M, et al. Monoenergetic and GeV ion acceleration from the laser breakout afterburner using ultrathin targets[J]. Physics of Plasmas, 2007, 14(5): 056706.
- [18] ROTH M, JUNG D, FALK K, et al. Bright laser-driven neutron source based on the relativistic transparency of solids[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(4): 044802.
- [19] NISHIHARA K, AMITANI H, MURAKAMI M, et al. High energy ions generated by laser driven Coulomb explosion of cluster[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001, 464(1/2/3): 98–102.
- [20] SILVA L O, MARTI M, DAVIES J R, et al. Proton shock acceleration in laser-plasma interactions[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(1): 015002.
- [21] FIUZA F, STOCKEM A, BOELLA E, et al. Laser-driven shock acceleration of monoenergetic ion beams[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(21): 215001.
- [22] YAO Y L, HE S K, LEI Z, et al. High-flux neutron generator based on laser-driven collisionless shock acceleration[J]. Physical Review Letters, 2023, 131(2): 025101.
- [23] MANGLES S P D, MURPHY C D, NAJMUDIN Z, et al. Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions[J]. Nature, 2004, 431(7008): 535–538.
- [24] GEDDES C G R, TOTH C, VAN TILBORG J, et al. High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding[J]. Nature, 2004, 431(7008): 538–541.
- [25] FAURE J, GLINEC Y, PUKHOV A, et al. A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams[J]. Nature, 2004, 431(7008): 541–544.
- [26] ANICULAESEI C, HA T, YOFFE S, et al. The acceleration of a high-charge electron bunch to 10 GeV in a 10-cm nanoparticle-assisted wakefield accelerator[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2024, 9(1): 014001.
- [27] EMMA C, MAJERNIK N, SWANSON K K, et al. Experimental generation of extreme electron beams for advanced accelerator applications[J]. Physical Review Letters, 2025, 134(8): 085001.
- [28] ROTH M, JUNG D, FALK K, et al. A bright neutron source driven by relativistic transparency of solids[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 688: 012094.
- [29] MIRFAYZI S R, GRYAZNEVICH M, LONSDALE O, et al. Recent developments on plasma based neutron sources from microscopic innovations to meter-scale applications[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2025, 64: 010002.
- [30] LANCASTER K L, KARSCH S, HABARA H, et al. Characterization of ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ neutron yields from laser produced ion beams for fast neutron radiography[J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(7): 3404–3408.
- [31] HIGGINSON D P, MCNANEY J M, SWIFT D C, et al. Laser generated neutron source for neutron resonance spectroscopy[J]. Physics of Plasmas, 2010, 17(10): 100701.
- [32] WU Z B, YAO Y L, SHEN X F, et al. High-flux neutron source from deuterons accelerated by subpicosecond laser-driven collisionless shock in gas cell targets[J]. New Journal of Physics, 2025, 27(6): 064301.
- [33] MAKSIMCHUK A, RAYMOND A, YU F, et al. Dominant deuteron acceleration with a high-intensity laser for isotope production and neutron generation[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(19): 191117.
- [34] ALEJO A, KRYGIER A G, AHMED H, et al. High flux, beamed neutron sources employing deuteron-rich ion beams from D₂O-ice layered targets[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2017, 59: 064004.
- [35] JUNG D, FALK K, GULER N, et al. Characterization of a novel, short pulse laser-driven neutron source[J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(5): 056706.
- [36] KLEINSCHMIDT A, BAGNOUD V, DEPERT O, et al. Intense, directed neutron beams from a laser-driven neutron source at PHELIX[J]. Physics of Plasmas, 2018, 25(5): 053101.
- [37] ZULICK C, DOLLAR F, CHVYKOV V, et al. Energetic neutron beams generated from femtosecond laser plasma interactions[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(12): 124101.
- [38] ARIKAWA Y, MORACE A, ABE Y, et al. Demonstration of efficient relativistic electron acceleration by surface plasmonics with sequential target processing using high repetition lasers[J]. Physical Review Research, 2023, 5: 013062.
- [39] OTUKA N, DUPONT E, SEMKOVA V, et al. Towards a more complete and accurate experimental nuclear reaction data library (EXFOR): international collaboration between nuclear reaction data centres (NRDC)[J]. Nuclear Data Sheets, 2014, 120: 272–276.
- [40] ZERKIN V V, PRITYCHENKO B. The experimental nuclear reaction data (EXFOR): extended computer database and Web retrieval system[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 888: 31–43.
- [41] Brookhaven National Laboratory. Evaluated nuclear data file

- (ENDF)[EB/OL]. (2024-08-30)[2025-12-10]. <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>.
- [42] DAVIS J, PETROV G M, PETROVA T, et al. Neutron production from ${}^7\text{Li}(d, xn)$ nuclear fusion reactions driven by high-intensity laser-target interactions [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2010, 52: 045015.
- [43] HIGGINSON D P, MCNANEY J M, SWIFT D C, et al. Production of neutrons up to 18 MeV in high-intensity, short-pulse laser matter interactions[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18(10): 100703.
- [44] KAR S, GREEN A, AHMED H, et al. Beamed neutron emission driven by laser accelerated light ions [J]. *New Journal of Physics*, 2016, 18: 053002.
- [45] JIANG X R, SHAO F Q, ZOU D B, et al. Energetic deuterium-ion beams and neutron source driven by multiple-laser interaction with pitcher-catcher target [J]. *Nuclear Fusion*, 2020, 60: 076019.
- [46] DENG H X, SHA R, HU L X, et al. Pulsed neutron source from interaction of relativistic laser pulse with micro-structure assisted pitcher-catcher target [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2022, 64: 085004.
- [47] FENG K Y, ZOU D B, CUI B, et al. Efficient generation of neutrons based on ultrashort laser-driven direct acceleration in microwire-array targets [EB/OL]. (2026-04-26)[2026-05-10]. <https://arxiv.org/abs/2604.23913>.
- [48] 崔波, 张智猛, 戴曾海, 等. 基于多反应通道的高产额激光中子源实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(9): 094004.
- CUI B, ZHANG Z M, DAI Z H, et al. Experimental study of high yield neutron source based on multi reaction channels[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(9): 094004. (in Chinese)
- [49] WANG Y J, ZHAO K, LI Y X, et al. Artificial intelligence-assisted target design for high-intensity laser-driven neutron sources[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2025, 7(11): 2401102.
- [50] PETROV G M, HIGGINSON D P, DAVIS J, et al. Generation of energetic (> 15 MeV) neutron beams from proton-and deuteron-driven nuclear reactions using short pulse lasers[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2013, 55(10): 105009.
- [51] 张高维, 矫金龙, 齐伟, 等. 拍瓦激光与铜靶作用产生光核中子的数值模拟研究[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(10): 102002.
- ZHANG G W, JIAO J L, QI W, et al. Numerical simulation study of photonuclear neutron generation by PW laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(10): 102002. (in Chinese)
- [52] QI W, ZHANG X H, ZHANG B, et al. Enhanced photoneutron production by intense picoseconds laser interacting with gas-solid hybrid targets [J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(4): 043103.
- [53] MIRFAYZI S R, YOGO A, LAN Z, et al. Proof-of-principle experiment for laser-driven cold neutron source[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 20157.
- [54] FENG J, FU C B, LI Y F, et al. High-efficiency neutron source generation from photonuclear reactions driven by laser plasma accelerator[J]. *High Energy Density Physics*, 2020, 36: 100753.
- [55] LI Y J, FENG J, WANG W Z, et al. Micro-size picosecond-duration fast neutron source driven by a laser-plasma wakefield electron accelerator [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10: e33.
- [56] LEI Z Y, MA H H, ZHANG X B, et al. Compact ultrafast neutron sources via bulk acceleration of deuteron ions in an optical trap[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2024, 9: 057202.
- [57] STORM M, JIANG S, WERTEPNY D, et al. Fast neutron production from lithium converters and laser driven protons[J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(5): 053106.
- [58] JIAO X J, SHAW J M, WANG T, et al. A tabletop, ultrashort pulse photoneutron source driven by electrons from laser wakefield acceleration [J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2017, 2: 296-302.
- [59] GÜNTHER M M, ROSMEJ O N, TAVANA P, et al. Forward-looking insights in laser-generated ultra-intense γ -ray and neutron sources for nuclear application and science[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 170.
- [60] JIANG X R, ZOU D B, ZHAO Z J, et al. Microstructure-assisted laser-driven photonuclear pulsed neutron source[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(3): 034032.
- [61] VALLIÈRES S, FILLION-GOURDEAU F, FOURMAUX S, et al. High average-flux laser-driven neutron source [J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 11498.
- [62] ZIMMER M, SCHEUREN S, KLEINSCHMIDT A, et al. Demonstration of non-destructive and isotope-sensitive material analysis using a short-pulsed laser-driven epi-thermal neutron source[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1173.
- [63] YOGO A, LAN Z, ARIKAWA Y, et al. Laser-driven neutron generation realizing single-shot resonance spectroscopy [J]. *Physical Review X*, 2023, 13: 011011.
- [64] FENG J, REN J, XU H, et al. Proof-of-principle demonstration of epithermal neutron resonance spectroscopy utilizing a compact laser-driven electron accelerator [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2025, 122(40): e2518397122.
- [65] 席晓峰, 郭冰, 符长波, 等. 高功率激光驱动核反应研究进展与展望[J]. *原子能科学技术*, 2023, 57(5): 865-887.
- XI X F, GUO B, FU C B, et al. Nuclear reactions driven by high-power laser: current status and prospects [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2023, 57(5): 865-887. (in Chinese)
- [66] PAWAR S A, DEVAN R S, PATIL D S, et al. Hydrothermal growth of photoelectrochemically active titanium dioxide cauliflower-like nanostructures [J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 117: 470-479.
- [67] CANOVA F, COHEN I, GIZZI L A, et al. High-power laser drivers and fast neutron sources towards green energy applications[J]. *High Power Laser Science and Engineering*,

- 2025, 13: e79.
- [68] OSVAY K, STUHL L, VARMAZYAR P, et al. Towards a 10^{10} n/s neutron source with kHz repetition rate, few-cycle laser pulses[J]. *The European Physical Journal Plus*, 2024, 139: 574.
- [69] LELIÈVRE R, CATRIX E, VALLIÈRES S, et al. High repetition-rate 0.5 Hz broadband neutron source driven by the Advanced Laser Light Source[J]. *Physics of Plasmas*, 2024, 31: 093106.
- [70] 齐伟, 贺书凯, 闫永宏, 等. 超短脉冲激光与固体靶作用产生光核中子的数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0901007.
 QI W, HE S K, YAN Y H, et al. Numerical simulation of photoneutron generation in ultra-intense short laser-solid interactions[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0901007. (in Chinese)
- [71] SCHEUREN S, JÄGER T, KOHL J, et al. Scaling of laboratory neutron sources based on laser wakefield-accelerated electrons using Monte Carlo simulations[J]. *The European Physical Journal Plus*, 2024, 139: 726.
- [72] POMERANTZ I, MCCARY E, MEADOWS A R, et al. Ultrashort pulsed neutron source [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(18): 184801.
- [73] SHKOLNIKOV P L, KAPLAN A E, PUKHOV A, et al. Positron and Gamma-photon production and nuclear reactions in cascade processes initiated by a sub-terawatt femtosecond laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(24): 3471 – 3473.
- [74] FENG J, LI Y J, TAN J H, et al. Laser plasma-accelerated ultra-intense electron beam for efficiently exciting nuclear isomers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(12): 2300514.
- [75] WANG W Z, FENG J, ZHANG X P, et al. Prospect of ultrahigh-resolution fast neutron absorption spectroscopy based on a laser plasma electron accelerator[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2024, 12: e11.
- [76] DITMIRE T, ZWEIBACK J, YANOVSKY V P, et al. Nuclear fusion from explosions of femtosecond laser-heated deuterium clusters[J]. *Nature*, 1999, 398: 489 – 492.
- [77] ZWEIBACK J, COWAN T E, SMITH R A, et al. Characterization of fusion burn time in exploding deuterium cluster plasmas [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(17): 3640 – 3643.
- [78] ZWEIBACK J, COWAN T E, HARTLEY J H, et al. Detailed study of nuclear fusion from femtosecond laser-driven explosions of deuterium clusters [J]. *Physics of Plasmas*, 2002, 9(7): 3108 – 3120.
- [79] LI H Y, LIU J S, NI G Q, et al. Parameter optimization for fusion neutron yield from deuterium cluster explosion driven by intense femtosecond laser pulses[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(4): 043204.
- [80] NAM S, HAN J, RHEE Y J, et al. Dependence of the neutron yield from CD₄ clusters irradiated with an intense femtosecond laser on the deuterium-ion's energy distribution[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2010, 56(1): 295 – 299.
- [81] YAMANAKA C, NAKAI S. Thermonuclear neutron yield of 10^{12} achieved with Gekko XII green laser[J]. *Nature*, 1986, 319: 757 – 759.
- [82] PENG H S, ZHENG Z J, ZHANG B H, et al. Direct-drive implosion experiments on the SG-II laser facility[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2000, 19(1): 81 – 85.
- [83] YAN J, REN G L, CHEN Z J, et al. The investigation of spherically convergent plasma fusion as a high-flux neutron source with a long-pulsed laser driving[J]. *Nuclear Fusion*, 2022, 62: 106030.
- [84] PEEBLES J L, DAVIES J R, BARNAK D H, et al. Demonstration of neutron-yield enhancement by laser preheating and magnetization of laser-driven cylindrical implosions[J]. *Physics of Plasmas*, 2023, 30(8): 082703.
- [85] CUI B, FANG Z H, DAI Z H, et al. Nuclear diagnosis of the fuel areal density for direct-drive deuterium fuel implosion at the Shenguang-II Upgrade laser facility [J]. *Laser and Particle Beams*, 2018, 36(4): 494 – 501.
- [86] STOECKL C, CRUZ M, GLEBOV V Y, et al. A gated liquid-scintillator-based neutron detector for fast-ignitor experiments and down-scattered neutron measurements [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10D302.
- [87] LELIÈVRE R, YAO W, WALTENSPIEL T, et al. A comprehensive characterization of the neutron fields produced by the Apollon petawatt laser [J]. *The European Physical Journal Plus*, 2024, 139: 1035.
- [88] 赵磊, 徐妙华, 张翌航, 等. 利用气泡探测器测量激光快中子[J]. *物理学报*, 2018, 67(22): 222101.
 ZHAO L, XU M H, ZHANG Y H, et al. Laser fast neutron measured by bubble detector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(22): 222101. (in Chinese)
- [89] FAVALLI A, HENZLOVA D C, CROFT S, et al. Demonstration of active neutron interrogation of special nuclear materials using a high-intensity short-pulse-laser-driven neutron source[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 724.
- [90] Anon. Bubble technology industries[EB/OL]. (2024 – 08 – 30)[2025 – 12 – 10]. <https://bubbletech.ca/>.
- [91] 齐伟. 激光诱导的光核中子和等离子体对撞聚变中子产生研究[D]. 北京:中国工程物理研究院, 2019.
 QI W. Study on laser-induced photoneuclear neutrons and plasma collision fusion neutron generation [D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2019. (in Chinese)
- [92] 李欣焱, 邹德滨, 余同普. 中子气泡探测器计数装置: CN202521133406.7[P]. 2025 – 07 – 11.
 LI X Y, ZOU D B, YU T P. Neutron bubble detector counting device: CN202521133406.7[P]. 2025 – 07 – 11. (in Chinese)
- [93] 李欣焱, 邹德滨, 余同普. 一种中子气泡探测器计数方法、系统、介质及程序产品: CN202511972793.8 [P]. 2025 – 12 – 25.
 LI X Y, ZOU D B, YU T P. A neutron bubble detector counting method, system, medium and program product: CN202511972793.8[P]. 2025 – 12 – 25. (in Chinese)
- [94] LI X Y, ZOU D B, DENG Y Q, et al. Automated neutron

- dosimetry with bubble detectors using CNN-based object detection [EB/OL]. [2026 - 03 - 10]. https://0004.backblazeb2.com/file/chinaxiv/english_pdfs/chinaxiv_202602.00205.pdf.
- [95] KUATBEK M, PIERSON B D, LYONS S M, et al. Characterization of the fast-neutron irradiator and the fast-flux tube irradiation fixtures at the Pennsylvania state breazeale reactor [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, 413: 112505.
- [96] SATHIAN D, BAKSHI A K, KANNAN U, et al. Foil activation technique; a tool for the evaluation of photo-neutron dose in radiotherapy [J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2023, 199(7): 603 - 614.
- [97] MOLINA F, AGUILERA P, ROMERO-BARRIENTOS J, et al. Energy distribution of the neutron flux measurements at the Chilean reactor RECH-1 using multi-foil neutron activation and the expectation maximization unfolding algorithm [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2017, 129: 28 - 34.
- [98] CHIESA D, NASTASI M, CAZZANIGA C, et al. Measurement of the neutron flux at spallation sources using multi-foil activation [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 902: 14 - 24.
- [99] GULER N, VOLEGOV P, DANLY C R, et al. Simultaneous usage of pinhole and penumbral apertures for imaging small scale neutron sources from inertial confinement fusion experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10D316.
- [100] MERRILL F E, BOWER D, BUCKLES R, et al. The neutron imaging diagnostic at NIF [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10D317.
- [101] GULER N, ARAGONEZ R J, ARCHULETA T N, et al. First downscattered neutron images from inertial confinement fusion experiments at the national ignition facility [J]. *EPJ Web of Conferences*, 2013, 59: 13018.
- [102] VOLEGOV P, DANLY C R, FITTINGHOFF D N, et al. Neutron source reconstruction from pinhole imaging at national ignition facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(2): 023508.
- [103] GULER N, VOLEGOV P, FAVALLI A, et al. Neutron imaging with the short-pulse laser driven neutron source at the Trident laser facility [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(15): 154901.
- [104] WANG D M, HU H S, ZHANG F N, et al. Source reconstruction for neutron coded-aperture imaging: a sparse method [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88: 083502.
- [105] 田进寿. 条纹及分幅相机技术发展概述 [J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(11): 112003.
TIAN J S. Introduction to development of streak and framing cameras [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(11): 112003. (in Chinese)
- [106] GIACOMINI G. LGAD-based silicon sensors for 4D detectors [J]. *Sensors*, 2023, 23(4): 2132.
- [107] ZHAO M, JIA X W, WU K W, et al. Low gain avalanche detectors with good time resolution developed by IHEP and IME for ATLAS HGTD project [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, 1033: 166604.
- [108] GE J J, LI C H, ZHANG D, et al. An ultra-fast low-noise preamplifier for low gain avalanche detectors [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, 1040: 167222.
- [109] LI C H, YANG X, GE J J, et al. Performance of LGAD sensors with carbon enriched gain layer produced by USTC [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, 1039: 167008.
- [110] LI X X, LIU L X, JIANG W, et al. Measurements of the ^{107}Ag neutron capture cross sections with pulse height weighting technique at the CSNS Back-n facility [J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(3): 038204.
- [111] 张奇玮, 栾广源, 任杰, 等. 基于 CSNS 反角白光中子源的中子俘获反应截面测量技术研究 [J]. *物理学报*, 2021, 70(22): 222801.
ZHANG Q W, LUAN G Y, REN J, et al. Cross section measurement of neutron capture reaction based on back-streaming white neutron source at China spallation neutron source [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(22): 222801. (in Chinese)
- [112] 罗昊天, 张奇玮, 栾广源, 等. 基于白光中子源的 ^{197}Au 中子辐射俘获截面测量及共振参数分析 [J]. *物理学报*, 2024, 73(7): 072801.
LUO H T, ZHANG Q W, LUAN G Y, et al. Neutron capture reaction cross-section data processing and resonance parameter analysis of ^{197}Au based on white light neutron source [J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 73(7): 072801. (in Chinese)
- [113] KOIZUMI M, ITO F, LEE J, et al. Demonstration of shape analysis of neutron resonance transmission spectrum measured with a laser-driven neutron source [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 21916.
- [114] TANG S D, CHEN Y H, TANG J Y, et al. Nondestructive technique for identifying nuclides using neutron resonance transmission analysis at CSNS Back-n [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2024, 35: 17.
- [115] WEI T Y, YOGO A, HAYAKAWA T, et al. Non-destructive inspection of water or high-pressure hydrogen gas in metal pipes by the flash of neutrons and X rays generated by laser [J]. *AIP Advances*, 2022, 12: 045220.
- [116] WILLIAMS G J, AUFDERHEIDE M, CHAMPLEY K M, et al. Dual-energy fast neutron imaging using tunable short-pulse laser-driven sources [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93: 093514.
- [117] MIZUTANI R, ABE Y, ARIKAWA Y, et al. The avalanche image intensifier panel for fast neutron radiography by using laser-driven neutron sources [J]. *High Energy Density Physics*, 2020, 36: 100833.

- [118] 何建军, 周小红, 张玉虎. 核天体物理实验研究[J]. 物理, 2013, 42(7): 484 - 495.
HE J J, ZHOU X H, ZHANG Y H. Experimental studies of nuclear astrophysics[J]. Physics, 2013, 42(7): 484 - 495. (in Chinese)
- [119] 李家英豪, 李云居, 李志宏, 等. 基于 HI-13 串列加速器的核天体物理研究[J]. 核技术, 2023, 46(8): 080002.
LI J Y H, LI Y J, LI Z H, et al. Nuclear astrophysics research based on HI-13 tandem accelerator[J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(8): 080002. (in Chinese)
- [120] LIU W P, GUO B, AN Z, et al. Recent progress in nuclear astrophysics research and its astrophysical implications at the China institute of atomic energy[J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, 35: 217.
- [121] CHEN S N, NEGOITA F, SPOHR K, et al. Extreme brightness laser-based neutron pulses as a pathway for investigating nucleosynthesis in the laboratory[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2019, 4: 054402.
- [122] HILL P, WU Y B. Exploring laser-driven neutron sources for neutron capture cascades and the production of neutron-rich isotopes[J]. Physical Review C, 2021, 103: 014602.
- [123] HORNÝ V, CHEN S N, DAVOINE X, et al. Quantitative feasibility study of sequential neutron captures using intense lasers[J]. Physical Review C, 2024, 109(2): 025802.
- [124] WU F, SUN P H, GUO X X, et al. Nanocarrier-driven neutron capture therapy: strategies and perspectives[J]. Acta Biomaterialia, 2025, 203: 78 - 93.
- [125] 傅世年, 梁天骄, 陈和生. BNCT 中子源的研发现状与展望[J]. 科学通报, 2022, 67(14): 1471 - 1478.
FU S N, LIANG T J, CHEN H S. Status and outlook; research and development on the neutron source for BNCT[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(14): 1471 - 1478. (in Chinese)
- [126] DONYA H, ALZAHIRANI N M, ABDULSALAM A, et al. Boron neutron capture therapy: a promising radiation treatment modality [J]. Radiation and Environmental Biophysics, 2025, 64: 339 - 353.
- [127] MORRIS A A, LV J F, LU Y R. Advancing lithium neutron capture therapy: ⁶Li-loaded nanoparticles and laser-driven neutron sources [J]. Applied Physics Letters, 2024, 124: 043701.
- [128] MORI T, YOGO A, ARIKAWA Y, et al. Feasibility study of laser-driven neutron sources for pharmaceutical applications [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 11: e20.
- [129] BATANI K L, RODRIGUES M R D, BONASERA A, et al. Generation of radioisotopes for medical applications using high-repetition, high-intensity lasers[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2025, 13: e11.
- [130] WU Z B, YAO Y L, SHEN X F, et al. Study of the atmospheric neutron radiation effects using compact laser-driven spallation neutron source [J]. Physical Review Research, 2025, 7: 013071.
- [131] 于锐, 顾龙, 姚存峰, 等. 加速器驱动次临界系统用嬗变核燃料研究进展分析[J]. 材料导报, 2024, 38(7): 5 - 15.
YU R, GU L, YAO C F, et al. Advances in research on transmutation fuel for accelerator driven subcritical system[J]. Materials Reports, 2024, 38(7): 5 - 15. (in Chinese)