

# 超短脉冲激光驱动束靶中子源产生及应用研究进展 (特邀)

齐伟, 贺书凯, 崔波, 张智猛, 洪伟, 赵宗清, 谷渝秋\*, 周维民\*\*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理全国重点实验室, 四川 绵阳 621900

**摘要** 短脉冲强激光驱动中子源具有微焦点、短脉宽、高注量率的特点, 在创新研究和应用方面显示出独特潜力, 得到了广泛关注。简要回顾了激光中子源的发展历史和现状, 特别是超短脉冲激光驱动束靶中子源的最新研究进展。首先, 介绍了激光中子源束流品质提升方面的研究工作。其中, 产额提升是激光中子源研究以及实现相关应用的首要问题。当前的研究主要通过反应通道选择、离子加速优化等技术途径来实现激光中子源产额的提升。除了产额提升之外, 人们还格外关注激光中子源的方向性提升, 提出了削裂反应、逆反应动力学等新方案。其次, 介绍了激光中子源参数的诊断方法与现状。通过对激光中子源能谱、角分布、脉宽和源尺寸等参数的精密表征, 人们对激光中子源的特性有了更全面的了解, 这有力支撑了其应用。最后, 回顾了激光中子源目前已开展的应用演示实验。激光中子源适用于部分与传统中子源类似的应用场景, 同时基于激光中子源超短脉冲、超高通量等新特性有望拓展出新的独特应用。

**关键词** 激光光学; 激光离子加速; 激光中子源; 超短脉冲激光

**中图分类号** O539 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL231292

## 1 引言

中子具有强穿透能力, 很容易与原子核发生核反应, 是研究原子核结构的理想探针, 其研究“对于裂变的发现与研究、核反应理论的建立与发展, 起过重要的作用。”<sup>[1]</sup>经过近百年的发展, 中子的研究和应用取得了巨大的成就, 人们对中子源的需求也日益增加。全世界范围内建设了大量不同类型和规模的中子源, 其被广泛应用于核科学、能源、材料和生物等相关领域<sup>[2-3]</sup>, 不仅极大地推动了基础科学技术的发展与进步, 还为工农业生产创造了巨大的经济价值。

随着中子科学技术的飞速发展, 一些特定的研究领域对中子源脉宽和中子注量率这类指标提出了极高的要求。例如, 在可同时对材料种类进行鉴别和对面密度进行测量的快中子共振照相技术<sup>[4-6]</sup>中, 为了基于飞行时间法在 3 MeV 中子吸收峰处对碳和氮元素进行分辨, 中子脉宽须低于百皮秒。聚变材料中子学研究<sup>[7-8]</sup>要求中子注量率超过  $10^{15} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , 而在宇宙重元素起源关键反应的快速中子俘获研究中<sup>[9-11]</sup>, 需要中子注量率超过  $10^{20} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。目前的中子源难以满足相应的要求, 迫切需要发展新型的超高注量率中子源。

随着啁啾脉冲激光放大技术的迅速发展, 超短超

强激光可以在皮秒甚至飞秒量级的时间尺度和微米量级的空间尺度内将带电粒子能量增加到上百 MeV<sup>[12-15]</sup>, 这成为一种产生中子源的新方式。特别是进入 21 世纪以后, 世界上兴建了多套大功率超短脉冲激光装置, 超短脉冲激光驱动的中子源研究进入高速发展期。2013 年, 研究者在美国劳伦斯利弗莫尔实验室的 Trident 激光装置上, 通过氙离子加速在激光传播方向上获得了  $1.2 \times 10^{10} / \text{sr}$  中子产额, 并开展了世界上首次激光快中子照相演示实验<sup>[16]</sup>。基于超短超强激光的新型中子源由于其短脉宽(几十 ps 至百 ps)<sup>[17-18]</sup>和微焦点的特性<sup>[19]</sup>, 具有高注量率 $[10^{18} \sim 10^{21} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ <sup>[20-22]</sup>和极佳的时间分辨<sup>[23]</sup>, 有望成为同位素、加速器和反应堆等传统中子源的有力补充, 进一步拓展中子的应用场景。

目前超短脉冲激光驱动中子源的实现途径主要有三种。一种是利用激光辐照含氘团簇或微结构靶诱发聚变核反应产生准单能中子<sup>[17, 24-28]</sup>, 第二种是利用激光加速电子, 通过光核反应产生白光中子<sup>[18, 29-33]</sup>。这两种方式的优势在于可在台面化激光器上开展研究且易于实现高重复频率打靶, 但是由于转换效率和反应截面较低, 中子产生效率一般低于  $10^6 / (\text{sr} \cdot \text{J})$ , 且中子角分布为各向同性, 前向中子的利用率很低。第三种是利

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-11-22; 录用日期: 2023-12-07; 网络首发日期: 2023-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(U2241281, 12105271)、北京大学研究类开放课题(NPT2020KFY01)

通信作者: \*yqgu@caep.cn; \*\*zhouwm@caep.cn

用激光辐照初级靶加速高能离子,并轰击下游的铍、锂等转换体靶,即投手-接球手(pitcher-catcher)方式或称束靶方式,通过离子诱发的核反应产生中子。由于离子核反应截面较高且产生的中子具有前冲性,这种方式可以产生中子产额超过  $10^{10}$  /sr<sup>[16]</sup>的前向中子,是目前最有希望实现高产额及满足应用需求的短脉冲激光中子源技术途径。

本文对目前超短脉冲激光驱动束靶中子源(以下简称激光中子源)的研究进展进行了介绍,从早期的质子及氘离子核反应产生高产额中子源,到重离子核反应产生定向中子源,梳理了激光中子源的发展脉络和研究逻辑,并对未来的研究方向和应用场景进行了展望。

## 2 高产额激光中子源研究

产额是限制中子源应用的最关键因素之一。由于大多数时候激光中子源是各向异性发射,故前向单位立体角中子产额是激光中子源研究最重要的参数指标。一直以来,随着离子加速能量的不断提升,研究人员在反应通道、加速离子种类等方面提出了多种方案,前向中子产额持续提升,目前已达到  $10^{10}$  /sr,可开展多种应用实验。

### 2.1 激光中子源的早期研究历史

1994年,Fews等<sup>[34]</sup>在研究快点火能量沉积过程中发现,功率密度为  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>的短脉冲激光与平面靶作用产生了能量为数 MeV 的离子。在这以后出现了大量关于短脉冲激光离子加速的研究。1998年,Norreys等<sup>[35]</sup>利用 VUCLAN 激光装置和氘化塑料靶相互作用,利用加速产生的氘离子诱发 D(d,n)束靶反应(D表示氘原子核,d表示入射氘离子,n表示出射中子),得到了  $7 \times 10^7$  /sr的中子产额,并且通过对比分析发现,与以往的实验不同,中子主要来自于束靶反应而非热核反应,这开启了激光中子源的研究。谷渝秋<sup>[36]</sup>研究了皮秒激光与含氘靶的相互作用,获得了  $2 \times 10^4$  的总中子产额。

### 2.2 高产额激光中子源的核反应通道选取

超强激光束靶中子的产生主要包含两个过程:初级离子在激光场中的加速过程,以及加速后的离子束在转换体中的输运过程和最后核反应过程。加速离子种类和转换体种类决定了产生中子的核反应通道,而不同通道的核反应截面、阈值能量差异很大,产生中子的效率也相差很大。图 1 展示了国际原子能机构评价核数据库(ENDF)<sup>[37]</sup>、实验核反应数据库(EXFOR)<sup>[38]</sup>和文献[39]中不同核反应通道的中子产生截面,<sup>7</sup>Li(p,n)(Li表示Li原子核,p表示入射质子,n表示出射中子)和D(d,n)反应的峰值截面相差十几倍。由于早期的中子产生实验主要是基于激光惯性约束聚变研究,故加速氘离子以诱发D(d,n)反应是早期主要的激光中子源产生方式<sup>[40-41]</sup>。随着激光离子加速研究的深

入,特别是靶背鞘场加速(TNSA)机制<sup>[42]</sup>的提出,作为质量最轻的离子,氢离子加速的研究进展飞速<sup>[12,43-44]</sup>。当质子截止能量大于 1.5 MeV 时,<sup>7</sup>Li(p,n)反应截面比D(d,n)截面大6倍,因此研究人员在这个阶段主要研究如何利用高能质子来有效提升束靶中子产额。Lancaster等<sup>[45]</sup>于2004年利用超强激光(峰值功率密度  $> 3 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>)驱动加速质子,利用<sup>7</sup>Li(p,n)反应获得了  $3 \times 10^8$  /sr的中子产额。

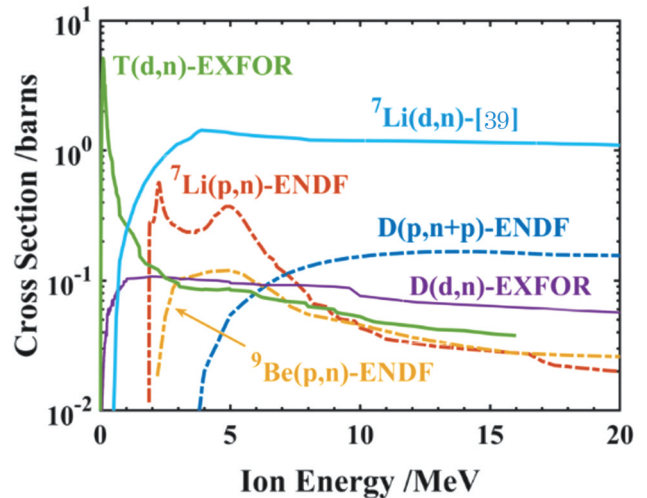


图 1 产生中子的不同核反应通道截面的对比<sup>[37-39]</sup>  
Fig. 1 Comparison of cross sections of different nuclear reaction channels that produce neutrons<sup>[37-39]</sup>

2010年,Davis等<sup>[46]</sup>通过采用基于先进理论模型和大量实验验证的最新数据(FZK评价数据库),模拟发现对于4 MeV以上的氘离子,<sup>7</sup>Li(d,xn)(xn表示出射多个中子)的反应截面比D(d,n)和<sup>7</sup>Li(p,n)更大,而对于特别高能(20~100 MeV)的氘离子,可以产生具有高前向产额的中子束。前向中子产额与氘离子能量满足  $dY/d\Omega \propto E^{2.7-3.2}$  (Y为产额, $\Omega$ 为立体角,E为入射氘离子能量)的定标率关系,且当氘离子能量为50 MeV时,单个离子的中子产生效率可以达到0.1,比D(d,n)反应高2个量级<sup>[47-48]</sup>。

Davis等的理论工作提出了一种更为高效的中子源产生方式,为后续的激光束靶中子源研究指明了方向。在此基础上,Higginson等<sup>[39]</sup>和Kar等<sup>[49]</sup>利用超强短脉冲激光(功率密度为  $10^{19} \sim 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>)辐照碳氘靶,基于TNSA机制加速氘离子,分别获得了  $8 \times 10^8$  /sr和  $10^9$  /sr的中子源,验证了<sup>7</sup>Li(d,xn)反应产生中子的优越性。2023年,Yogo等<sup>[50]</sup>通过改变激光能量,在实验中发现,当激光功率密度(I)为  $3 \times 10^{18} \sim 3 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>时,<sup>7</sup>Li(p,n)和<sup>7</sup>Li(d,xn)混合反应的前向中子产额满足  $dY/d\Omega \propto I^4$  的定标率。这个阶段的研究还包括采用三束聚焦增强TNSA<sup>[51]</sup>、多脉冲皮秒激光<sup>[52]</sup>、双层靶<sup>[53]</sup>或氘含量更高的CD<sub>4</sub>靶<sup>[54]</sup>等进一步提

升离子电量与截止能量,从而基于  ${}^7\text{Li}(d, xn)$  反应或者  ${}^7\text{Li}(p, n)$  与  ${}^7\text{Li}(d, xn)$  混合反应实现了激光中子源产额的持续提升,在多个实验室中实现了约  $10^{10}/\text{sr}$  的中子产额,成为目前激光中子源研究的主要方式。崔波<sup>[55]</sup>于 2023 年在星光 III 装置上利用优化的氘代聚乙烯薄膜靶和含锂转换体,实现了  $2 \times 10^9/\text{sr}$  的前向中子产额,这是目前国内最高的激光中子源产额,如图 2 所示。

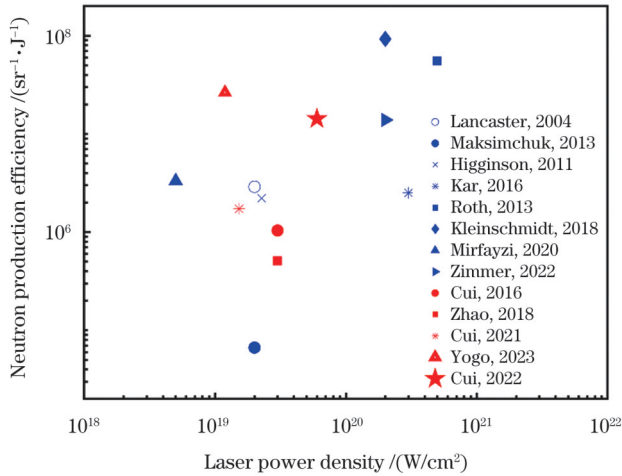


图 2 不同激光功率密度条件下的中子源实验结果

Fig. 2 Experimental results of neutron sources under different laser power densities

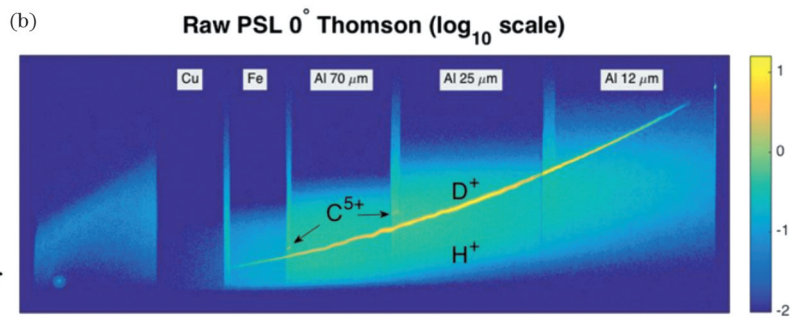
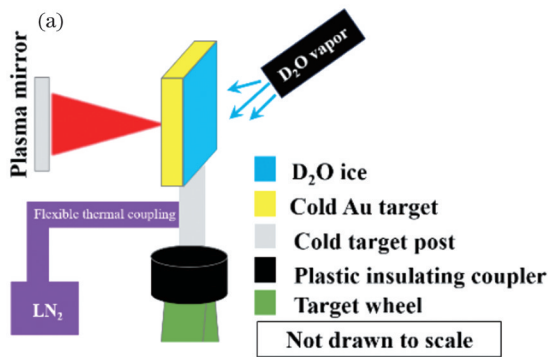


图 3 基于重水冰靶的高产额中子源<sup>[63]</sup>。(a)方案示意图;(b)喷射重水后的离子信号增强的图像

Fig. 3 High yield neutron source employing  $\text{D}_2\text{O}$  ice target<sup>[63]</sup>. (a) Schematic of plan; (b) image of improved ion signal after spraying  $\text{D}_2\text{O}$

提升氘离子加速效率的另一个思路是采用比 TNSA 更先进的激光离子加速机制。随着激光技术的发展,高度相对论 ( $I > 10^{20} \text{ W/cm}^2$ )、超高对比度 ( $> 10^{-10}$ ) 的激光已经成为可能。在相对论自透明条件下, Roth 等<sup>[65]</sup>在美国劳伦斯利弗莫尔实验室的 Trident 激光装置上,基于靶破烧蚀加速 (BOA) 机制,获得了高效的氘离子加速 (截止能量约为 170 MeV),产生了当时最高的激光中子源产额 ( $\sim 10^{10}/\text{sr}$ ),且该产额纪录保持多年。此外,利用无碰撞冲击波加速 (CSA) 氘离子也是一种有望获得高产额中子源的方案<sup>[66]</sup>。2023 年北京大学与激光聚变研究中心

### 2.3 高产额激光中子源的离子加速优化

当  ${}^7\text{Li}(d, xn)$  反应被提出后,为了获得高产额激光中子源,需要实现高效加速氘离子。除了从驱动器和束靶耦合的角度出发外,研究人员也从氘离子加速机制的角度探索新的实验方法,目前研究思路主要有两种。一种是在现有 TNSA 机制的框架下高效加速氘离子。在最稳定的 TNSA 机制中,由于质子具有最大的荷质比,来自于表面吸附层的质子总是得到最优先的加速。为了提升氘离子的加速效果和中子的产额,需要尽量减少吸附层中质子的影响,包括对靶进行通电加热<sup>[56-57]</sup>或者用另一束激光直接清除吸附层<sup>[58-59]</sup>。目前在相关实验中已实现了对质子加速的抑制以及对其他重离子加速的增强,但还未用于氘离子研究。另一种巧妙的方法是在打靶前通过重水的挥发或喷射重水,在靶背面快速地 (1 s 内) 形成一层微米厚的重水层,并在沾污层重新形成之前完成氘离子的加速。该方法首先由 Hou 等<sup>[60]</sup>于 2011 年提出,并由 Morrison<sup>[61]</sup>、Maksimchuk<sup>[62]</sup>和 Krygier 等<sup>[63]</sup>陆续进行优化,加速的离子中的氘离子数量占比提升至 99%,激光能量到氘离子能量的转换效率达到 4.3%,结果如图 3 所示。2017 年 Alejo 等<sup>[64]</sup>首次利用该方式开展了束靶中子实验,以碳氘圆柱作为转换体,获得的  $\text{D}(d, n)$  中子产额达到  $2 \times 10^9/\text{sr}$ ,中子截止能量达到 40 MeV。

联合团队在星光 III 装置上开展了首次基于 CSA 机制的激光中子源实验,产额达到  $6.6 \times 10^7/\text{sr}$ ,比相同激光条件下基于 TNSA 机制获得的中子产额高一个量级<sup>[67]</sup>,结果如图 4 所示。自洽的模拟表明,当激光功率密度达到  $10^{21} \text{ W/cm}^2$  时,该方式使中子产额有望达到  $5 \times 10^{10}/\text{sr}$ 。BOA 和 CSA 这两种加速机制的优势不仅体现在更高的离子加速效率,还有加速的整体性。相比于 TNSA 机制,这两种机制的加速主要发生在靶内,受到靶背沾污层的影响较少,因此无需去除沾污层也可以实现对氘离子的高效加速。

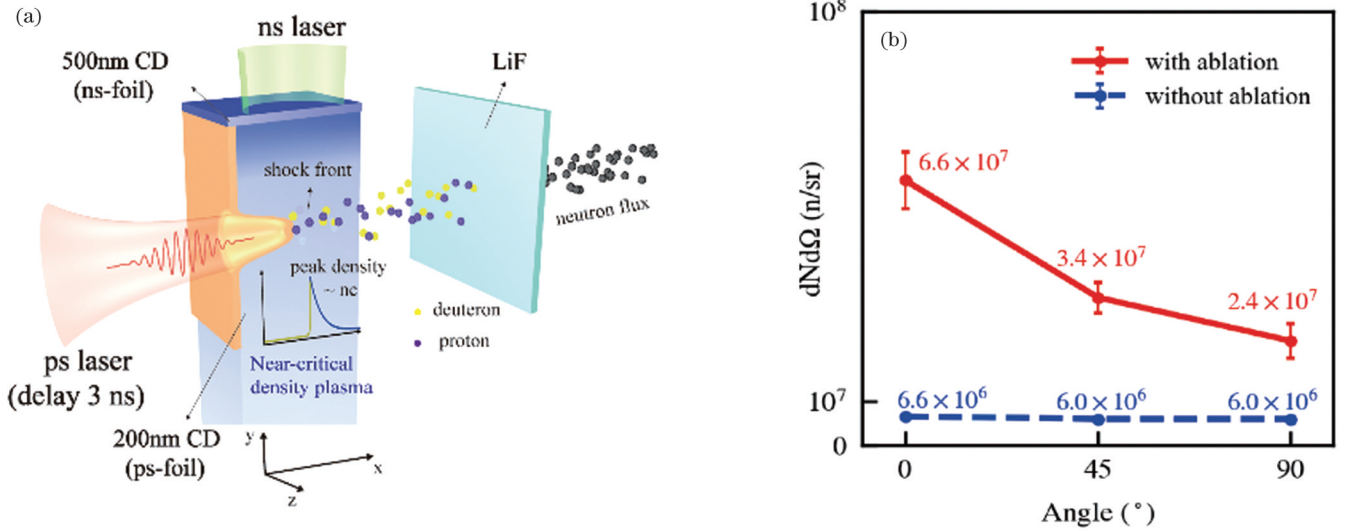


图 4 基于 CSA 机制获得高产额中子源<sup>[67]</sup>。(a)实验示意图;(b)有/无纳秒烧蚀激光时的中子角分布

Fig. 4 High yield neutron source generation based on CSA mechanism<sup>[67]</sup>. (a) Experimental diagram; (b) neutron angular distribution with/without nanosecond ablation laser

### 3 高前向性激光中子源研究

中子源的角分布决定了中子的利用效率,前向性好的中子源不仅更容易实现应用所需要的中子通量,而且有利于降低背景散射中子的强度。用来衡量中子前向性的参数一般包括中子角分布的半峰全宽(FWHM)、前向(0°)与侧向(90°)的单位立体角中子产额比值( $\epsilon$ )、中子出射角( $\delta\Omega$ ,总中子产额与前向单位立体角中子产额的比值)。其中,前两者在实验上容易测量,而后者则主要在理论研究中使用。

#### 3.1 基于轻离子核反应的中子方向性优化

激光中子源早期采用D(p, n)与D(d, n)反应产生中子,其中子角分布近似呈各向同性,必须通过大幅增加质子能量来提升中子前向性。Kar等<sup>[49]</sup>与Alejo等<sup>[64]</sup>分别于2016和2017年测量了碳氘初级靶与碳氘转换体靶构型下的D(p, n+p)(n+p表示出射中子和质子)与D(d, n)中子总角分布,其FWHM均为70°, $\epsilon$ 为5~7。分析认为,影响中子各向同性的重要因素来自初级靶的靶前,包括等离子体中的热核中子和低能氦离子产生的近乎各向同性发射的中子。因此为了提升中子源前向性,Kleinschmidt等<sup>[68]</sup>于2018年通过采用更薄的初级靶及更高对比度的激光,将质子截止能量提升到60 MeV,进一步增大了靶后加速质子的中子份额,前向中子产额也得到了提升,<sup>9</sup>Be(p, n)与<sup>9</sup>Be(d, n)(Be为铍)中子的总FWHM降低到50°。

氦离子由一个质子和一个中子组成,核子间的束缚较弱(束缚能 $E_b=2.24$  MeV),这使得高能(>20 MeV)氦离子与锂靶等发生(d, xn)反应时能通过削裂反应产生大量的前向中子。削裂反应是指入射粒子打到靶

核边上,其中一个或几个核子被靶核俘获,其余部分继续飞行前进<sup>[1]</sup>。对于高能氦离子,其通过削裂反应产生的中子天然具有极强的前向性。Davis等<sup>[46]</sup>的模拟也表明<sup>7</sup>Li(d, xn)反应比D(d, n)反应具有更好的前向性,如图5所示,15~17 MeV的单能氦离子通过<sup>7</sup>Li(d, xn)反应产生的中子 $\epsilon$ 可以接近20,而30 MeV的单能氦离子的中子出射角 $\delta\Omega$ 仅为1 sr。

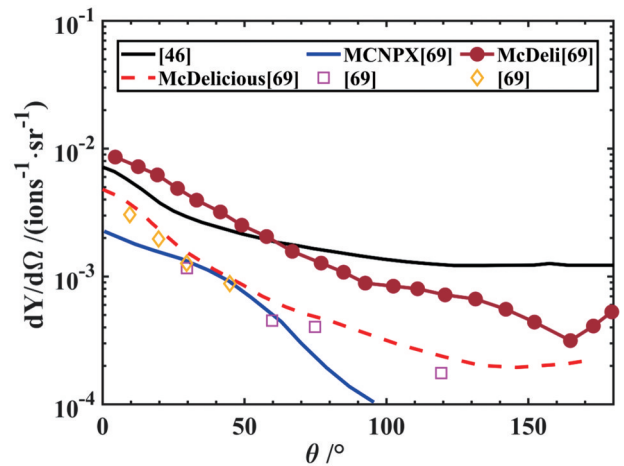


图 5 氦离子能量为 15~17 MeV 时 <sup>7</sup>Li(d, xn) 中子单位立体角的产额<sup>[46,69]</sup>

Fig. 5 Angular distribution of neutron yield from <sup>7</sup>Li(d, xn) reaction when deuteron ion energy of 15~17 MeV<sup>[46,69]</sup>

#### 3.2 基于重离子核反应的中子方向性优化

通过<sup>7</sup>Li(d, xn)反应产生高前向性中子源的前提条件是将氦离子能量增加到数十 MeV,但目前实验上较难实现。因此,研究人员也在探索其他途径以获得具有更好前冲性的中子源,这包括基于逆运动学效应的定向中子源。当入射离子的质量数大于靶核质量数时,出射中子角度因子( $\gamma$ )>1,发生聚

焦效应,所有中子被约束在前向很小的锥角内发射,获得天然准直的定向中子束。产生定向中子束需要满足三个条件:1) 吸热反应;2) 入射粒子比靶核重;3) 入射离子的能量大于反应阈值能量。相比传统的各向同性中子源,该中子源的中子通量增大 25~100 倍,目标区域的中子通量大大提高。同时它可以减少实验大厅快中子和热中子的散射背景,降低垂直中子束出射方向的探测器屏蔽要求,使得在非中子出射方向布置灵敏探测器测量弱目标信号成为可能<sup>[70]</sup>。

1979 年,卢希庭<sup>[71]</sup>首次提出通过锂离子轰击氢靶产生高通量定向快中子束的理论设想。Dave 等<sup>[72]</sup>首次在加速器上开展了基于  $^1\text{H}(^7\text{Li}, \text{xn})$  ( $\text{H}$  表示氢原子核,  $^7\text{Li}$  表示入射的  $^7\text{Li}$  离子) 反应的实验,中子束集中在半张角为  $9^\circ$  的圆锥内。Hasegawa 等<sup>[73]</sup>在回旋加速器上通过更高阈值的  $^1\text{H}(^{13}\text{C}, \text{n})$  ( $^{13}\text{C}$  表示入射的  $^{13}\text{C}$  离子) 反应产生了  $10^6/\text{s}$  的准直中子束。

随着激光重离子加速研究的快速发展,研究人员探索采用 BOA/RPA 等先进加速机制发展激光驱动的定向中子源。相比其他粒子,  $^1\text{H}(^7\text{Li}, \text{xn})$  反应阈值能量最低 (13.1 MeV),且在阈值能量附近  $0^\circ$  方向具有极高的中子产额比,故在目前的激光条件下加速锂离子与氢反应产生定向中子束的方案最佳。在理论方面, Liu 等<sup>[74]</sup>基于粒子模拟+蒙卡的方式研究了激光驱动  $^1\text{H}(^7\text{Li}, \text{xn})$  定向中子源的产生过程,通过优化激光加速的锂离子,获得了 FWHM 仅为  $30^\circ$  的准直中子束。在实验方面,崔波<sup>[55]</sup>首次利用 SILEX-II 激光装置开展了  $^1\text{H}(^7\text{Li}, \text{xn})$  定向中子束的演示实验,利用拍瓦飞秒激光辐照超薄靶加速得到的锂离子与富氢靶的反应,产生了具有明显前冲性的中子束,  $\epsilon$  达到 10, FWHM 仅为  $40^\circ$ ,结果如图 6 所示,其中 BD 为气泡探测器, LSD 为液体闪烁体探测器,  $\text{BF}_3$  为三氟化硼探测器。实验结果证明了定向中子束在中子发散角方面的独特优势。

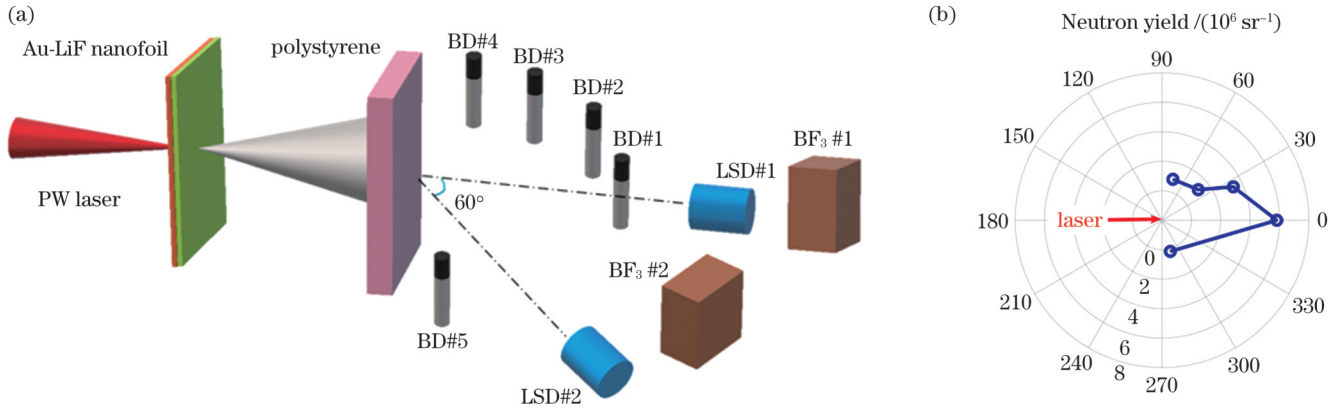


图 6 SILEX-II 装置上开展的激光驱动定向中子源实验。(a) 实验示意图; (b) 角分布结果

Fig. 6 Laser-driven directional neutron source experiment on SILEX-II device. (a) Experimental diagram; (b) angular distribution result

## 4 激光中子源特征参数及诊断研究

### 4.1 中子产额及角分布

前向单位立体角内的中子产额  $dY/d\Omega$  是最重要的激光中子源参数之一。实验上常用的探测器包括中子飞行时间谱仪 (nToF)<sup>[75]</sup>、气泡中子探测器<sup>[76-77]</sup> 和 CR39 固体核径迹探测器<sup>[78-80]</sup>。前者主要用来测量中子能谱,通过能谱积分获得中子产额。后面两种探测器主要用于测量 1~30 MeV 能段的中子产额,当用于能谱测量时能量分辨率较差,约为数 MeV。此外,利用  $(n, n')$  ( $n$  表示入射中子,  $n'$  表示散射中子)、 $(n, 2n)$  ( $2n$  表示出射 2 个中子) 等中子活化反应测量特定能段的中子产额也是一种常用方法<sup>[81-82]</sup>。由于该方法中的反应截面 (数百 mb 至数 b,  $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$ ) 高,当 8~20 MeV 能段的中子产额达到  $5 \times 10^8/\text{sr}$  时,该方法的测量误差为 9.3%,仅为 TOF 方法误差 (19.7%) 的一半<sup>[81]</sup>。

气泡中子探测器和 CR39 体积小,常常放置在靶室内或紧贴靶室外壁,并通过布置多个探测器获得不同方向的中子角分布信息。但是在气泡中子探测器的使用中,需要特别注意对高能电子进行屏蔽,避免其通过  $\beta$  簇射在探测器中产生气泡而造成前向中子产额虚高。如 3.1 节所述,2016 年 Kar 等<sup>[49]</sup>首次利用数十个 CR39 详细测量了  $\text{D}(p, n + p)$  与  $\text{D}(d, n)$  中子的角分布,总 FWHM 为  $70^\circ$ ,与 Alejo 等<sup>[64]</sup>的测量结果一致,但比 Kleinschmidt 等<sup>[68]</sup>的结果 (FWHM 为  $50^\circ$ ) 差。

### 4.2 中子能谱

在理论上,单能离子入射到薄靶中发生核反应时,在特定方向角出射的中子能谱为单能或双峰结构<sup>[2]</sup>。但考虑到激光加速离子的连续谱结构以及转换体厚度,激光中子源能谱为白光中子谱。这种白光中子谱在快中子共振照相、中子核反应截面测量等领域中有非常重要的应用,而其能谱结构就是最

为关键的因素。考虑到超短脉冲激光打靶会产生极强的  $\gamma$  射线,其在探测器上引起的干扰信号强度比中子信号强 2~3 个量级,目前比较有效的中子能谱测量方式是采用中子飞行时间谱仪。利用飞行时间法在时间上将  $\gamma$  信号与中子信号分开,并采用门控屏蔽强  $\gamma$  的干扰。为了获得较高的能量分辨率,中子飞行时间谱仪一般放置在距离靶室数米远处,并采用猝灭时间较短的液体闪烁体作为探测器

来获得更好的时间分辨<sup>[75]</sup>。图 7 是激光聚变研究中心团队在星光 III 激光装置上利用飞行时间谱仪测量得到的中子信号与能谱。实验中产生的中子能谱为类麦克斯韦连续谱,截止能量约为 14 MeV。中子能谱也可用于计算中子产额,但由于靶场环境中的散射中子主要集中在 1 MeV 以下且对探测器的信号影响较大,计算中子产额时一般仅考虑 1 MeV 以上部分。

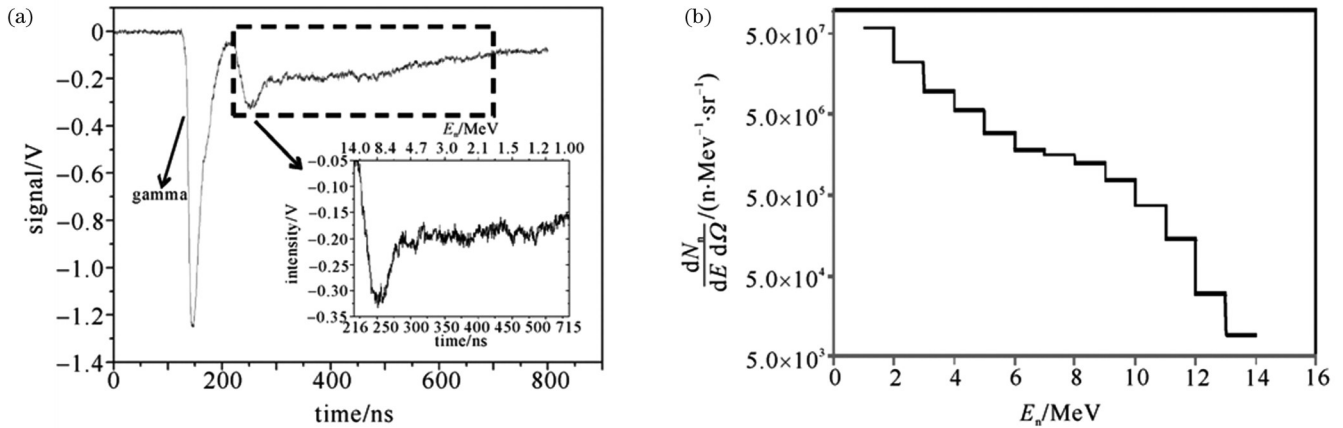


图 7 激光驱动束靶中子源能谱测量<sup>[75]</sup>。(a)飞行时间谱;(b)反解后的能谱

Fig. 7 Energy spectrum measurement of beam-target neutron source driven by laser<sup>[75]</sup>. (a) Flight time spectrum; (b) resolved energy spectrum

### 4.3 中子脉宽

蒙卡模拟结果表明,虽然激光中子源的驱动激光为飞秒或皮秒量级的超短脉冲激光,但是由于离子和中子的能谱均为白光连续谱,其运输和飞行的展宽使得中子源脉宽通常为数 ns~数十 ns<sup>[18,83-84]</sup>。通过结合白光中子能谱的特性,激光中子源适用于基于飞行时间法获得与中子能量相关的材料学信息,比如快中子共振照相等。利用超短的脉宽能获得极高的能量分辨率,提升材料探测的精度。但如此短的脉宽已经接近甚至远低于常用闪烁体探测器的响应时间极限,因此目前尚未有实验直接测量得到激光中子源的脉宽。2019 年, Tanaka 等<sup>[83]</sup>利用蒙卡模拟程序研究了皮秒激光加速的质子与氦离子在钨转换体中的运输与中子产生,发现转换体表面处 1.4 keV~14 MeV 的单能中子脉宽为 30.0~0.3 ns。通过分析闪烁体的脉冲波形,认为 p-三联苯这类有机闪烁体的衰减时间 (5.2 ns) 能够满足测量 keV~MeV 能区激光中子源脉宽的要求。

此外,研究人员也在探索进一步降低中子脉宽的方法。2015 年 Higginson 等<sup>[85]</sup>在实验中利用纳秒激光辐照圆筒靶产生的强磁场聚焦入射质子束,使得中子源脉宽降低了一个量级。通过蒙卡模拟中子产生过程,他们发现不聚焦质子时,在距离初级靶 0.5 m 处中子脉宽约为 30 ns,而聚焦后中子脉宽仅为 3 ns。脉宽降低一个量级的最主要原因,是聚焦

磁场持续时间仅为 ns 量级,因此高能质子可以被有效聚焦并辐照在转换体上,而低能质子到达圆筒时磁场已经大幅减弱,因此大部分低能质子迅速发散而未能辐照在转换体上,从而有效提升了辐照在转换体上的质子单能性并降低了中子脉宽。实验结果表明,辐照在转换体上的质子总电量虽然有所减少,但中子产额仅降低 30%,因此是一种有效降低中子脉宽的方法。

### 4.4 中子源尺寸

源尺寸的大小关系到中子源的实际应用。在中子照相实验中,降低源尺寸可以提高中子束准直比,进而提高中子照相的分辨率。激光中子源的尺寸取决于初级离子源的尺寸和发散角、初级离子源的飞行距离、转化体的厚度等因素。其中,激光加速的离子源虚拟源尺寸只有数微米左右,但是由于初级离子源高达数十度的发散角,激光中子源尺寸通常为毫米量级。Guler 等<sup>[19]</sup>于 2016 年对 Trident 激光器产生的中子源的源尺寸进行了测量。中子成像小组分别利用刀边法和半影成像法对中子源的尺寸进行了测量,结果如图 8 所示。刀边法给出的中子源的尺寸约为 2.5 mm,半影成像得到的中子源的尺寸约为 2 mm。为了获得更小的源尺寸,约束初级离子发散角是最重要的手段,而用于降低中子脉宽的磁场聚焦方法对于降低中子源尺寸也许会有显著的效果。

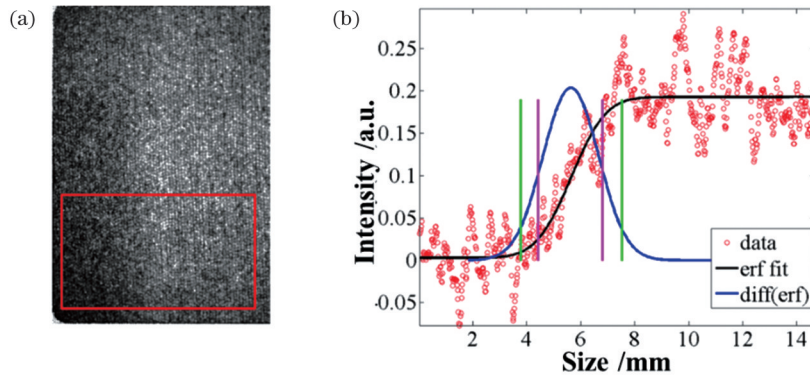


图 8 刀边法测量激光驱动中子源尺寸的实验结果<sup>[19]</sup>。(a)原始图像;(b)强度曲线及拟合结果

Fig. 8 Experimental result of laser-driven neutron source size measurement with knife-edge method<sup>[19]</sup>. (a) Raw image; (b) intensity curve and fitting result

## 5 激光中子源的应用研究

激光中子源的特性是脉宽短、注量率高,适用于快中子共振照相、超快过程诊断等。但是,由于目前的中子产额较低,而且激光中子源的主要成分为 MeV 量级的快中子,探测技术尚不成熟,现阶段研究者主要在快中子照相、快中子慢化及热/超热中子共振吸收等传统中子源应用场景下开展了演示实验,但也从理论和模拟方面讨论了快中子共振照相、快中子俘获等方面的应用潜力。

### 5.1 快中子直接应用:中子照相、活化分析及快速中子俘获

中子的质量吸收系数随原子质量数的变化很不规则,在氢、硼等轻元素和镉、钷等中重元素中,中子的吸收系数较大,但在铅、铋等重元素中,中子的吸收系数却很小。因此,中子照相可以区分物体中轻元素和重元素的分布,是重要的无损检测手段。激光中子源的主要成分为 MeV 量级的快中子,由于能量高、穿透性

强,能够探测大型物体如集装箱等。而且因为源尺寸小、准直比高,不需要使用准直孔,有利于减少屏蔽、发展小型化可移动照相装置。

快中子照相的关键在于高分辨、高探测效率的中子成像屏。Fernández Juan 等<sup>[86]</sup>在 Trident 激光器上开展了激光快中子源单发照相的演示实验,通过改进成像屏性能,利用  $10^{10}/\text{sr}$  的激光快中子源在距离靶点 2 m 处成功获得了多种材料、不同厚度客体的清晰图像(图 9)。2020 年, Mizutani 等<sup>[87]</sup>通过研发的高发光效率成像屏,利用仅  $10^9/\text{sr}$  的快中子成功对 3 m 远处的矿泉水进行了快中子照相演示。2022 年, Williams 等<sup>[88]</sup>开展了解析与模拟研究,利用激光中子源能量可调的优势开展了双能快中子照相及电子计算机断层扫描(CT)重建。中子能量的改变来自激光能量、脉宽等参数的改变,双能照相的优势在于可以利用算法从两幅图像中分离出样品中的低原子序数和高原子序数材料。在高平均功率激光可望实现的重复频率下,甚至可以完成三维快中子 CT 扫描与重建。

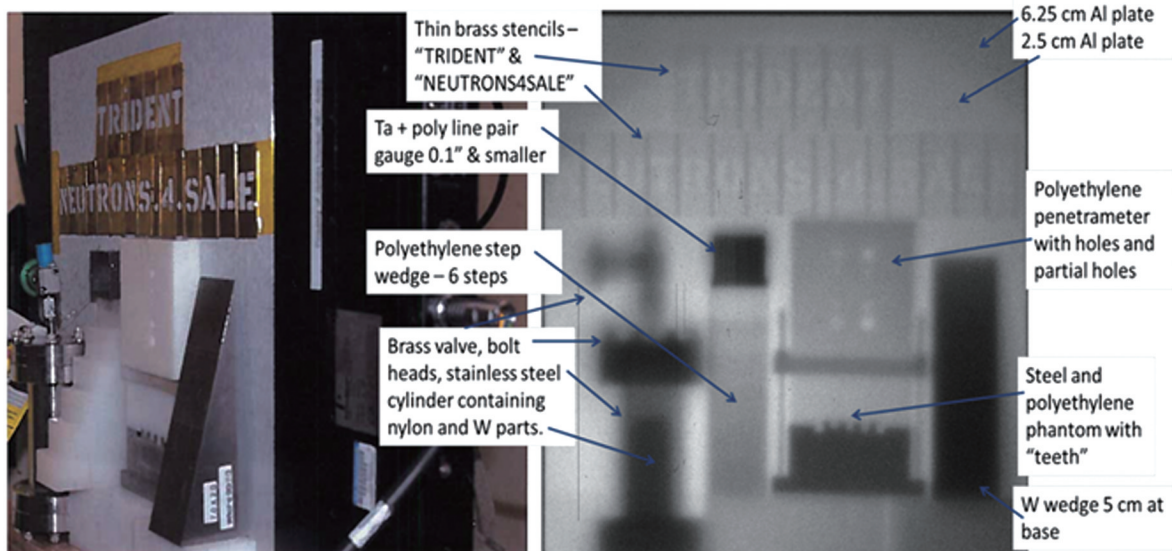


图 9 Trident 装置上厚客体的激光快中子照相结果<sup>[86]</sup>

Fig. 9 Radiography of thick objects with laser-driven fast neutron source at Trident<sup>[86]</sup>

另一方面,激光快中子源的超短脉宽特性在核素识别和快中子共振照相(FNRR)方面具有很强的优势。2022年,Abe等<sup>[89]</sup>在 $10^{10}$ /sr的中子产额下在线测量了激光快中子活化分析(FNAA)的瞬发 $\gamma$ 谱,如图10所示。利用该方法得到的样品中的硼含量与真实值偏差仅为5%,并且后续分析表明,如果重复频率可以达到10 Hz,通过2 min辐照即可实现对 $^{12}\text{C}$ 、 $^{14}\text{N}$ 和 $^{16}\text{O}$ 元素含量1%的测量精度,可以用于爆炸物的无损检测。2023年,Mirani等<sup>[53]</sup>通过解析模型与蒙卡模拟发现,以常见D-T中子发生器在样品处通量达到 $10^4/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 为标准,要实现快中子活化分析,需要在激光功率密度为 $10^{20}\text{ W/cm}^2$ 时实现10 Hz的重复频率;而要实现FNRR,则需要 $5\times 10^{20}\text{ W/cm}^2$ 的激光功率密度及5 Hz的重复频率,同时可以实现化合物中的元素质量浓度的测量,且测量偏差优于10%。

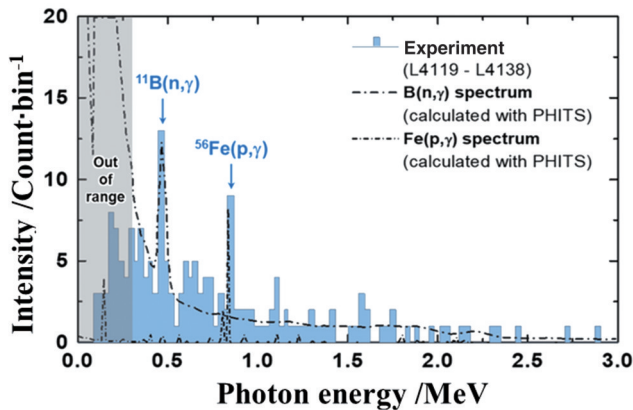


图10 激光快中子活化分析的瞬发 $\gamma$ 谱<sup>[89]</sup>

Fig. 10 Prompt  $\gamma$  spectrum of laser driven FNAA<sup>[89]</sup>

此外,研究人员也探索了激光中子源在核天体物理等领域中的潜在应用价值。Chen等<sup>[22]</sup>和Hill等<sup>[90]</sup>先后通过求解中子输运方程,研究了利用激光中子源实现快中子俘获的可行性。Chen等<sup>[22]</sup>提出利用激光加速的高能(1 GeV)质子诱发散裂反应,产生的快中子通量高达 $10^{24}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ,达到超新星爆发时的参数范围,并通过辐照锆样品可实现最多6个中子的连续俘获。而Hill等<sup>[90]</sup>选取电荷数为3~100的95种元素,以各自长半衰期同位素中质量数最大的核素为种子核进行激光中子源辐照,发现在单发产额达到 $10^{12}$ 的条件下可以实现双中子俘获。如果在1 Hz重复频率下打靶 $10^4$ 发,甚至可以实现最多4个中子的连续俘获,从而使得利用激光驱动短脉冲、高通量中子源开展丰中子核素合成研究成为可能。

## 5.2 快中子慢化:超热中子、热中子及冷中子产生与应用

由于快中子吸收截面一般较低,目前传统中子源的应用中使用最多的是0.5 eV~100.0 keV的超热中子和25.0 meV~0.5 eV的热中子。为了拓展激光中子

源的应用范围,最近几年研究人员在获得约 $10^{10}$ /sr的高产额激光中子源基础上,开始研究优化慢化体设计以获得更高慢化效率的热中子和超热中子。Zimmer等<sup>[84]</sup>从2020年开始在慢化体前端采用带翼设计,使得超热中子通量提升了72%,热中子通量提升了46%。同时,通过将中子产额从 $2.3\times 10^9$ 提升至 $1.6\times 10^{10}$ ,基于能谱测量的热中子信噪比从16提升到30,超热中子信噪比从6提升到16<sup>[91]</sup>。虽然慢化会显著增加激光中子源脉宽,但蒙卡模拟结果表明,慢化后1 eV的超热中子脉宽约为2  $\mu\text{s}$ ,显著小于加速器中子源高于100  $\mu\text{s}$ 的脉宽。而另一个比较有意思的工作,是2020年Mirfayzi等<sup>[92]</sup>采用冷冻固体氢慢化体,首次将激光中子源慢化到0.8 meV的冷中子能区。在未来高重复频率10 PW激光装置上,有望利用这种冷中子源开展中子散射实验,甚至通过进一步慢化可以产生超冷中子并用于天体研究。

慢化后的热中子和超热中子主要用于共振测谱和照相。Zimmer等<sup>[91]</sup>利用激光中子源慢化产生的超热中子,通过中子共振测谱(NRS)技术识别出了钨样品中的多种同位素及质量分数仅为1.23%的钽元素,并对已知宏观截面的材料样品进行了厚度测量,精度优于20%。该团队还利用 $10^9$ /sr的中子源演示了简化的中子共振成像(NRI)技术,利用热中子飞行时间的差异在空间上分辨了镉和铟。Yogo等<sup>[50]</sup>也观察到了 $^{181}\text{Ta}$ 、 $^{109}\text{Ag}$ 等核素的共振吸收峰,如图11所示。当中子产额从 $2\times 10^{10}$ /sr提升到 $10^{11}$ /sr时,5 eV处的能量分辨率有望从2.3%提升至0.23%,不仅优于加速器中子源的能量分辨(1%),而且可以通过共振吸收峰展宽测量材料温度。与此同时,通过采用镉板中子活化与成像板在线X射线成像的方法,该团队还实现了热中子-X射线的单发混合照相,通过对比二者图像差异,有效分辨了客体中含有的镍、镉和硼三种材料<sup>[52]</sup>。

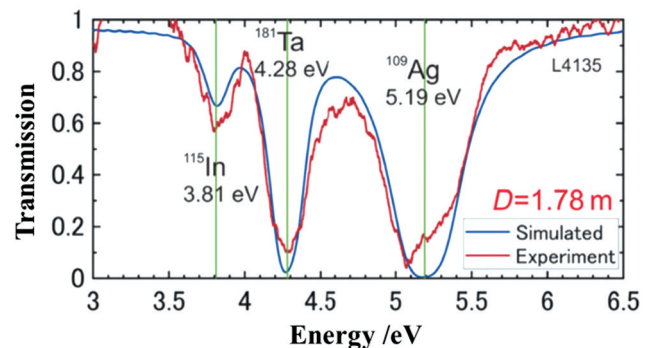


图11 不同能量下中子吸收谱对比<sup>[50]</sup>

Fig. 11 Comparison of neutron absorption spectra at different energies<sup>[50]</sup>

## 6 总结与展望

简要回顾了强激光驱动中子源研究的发展历史



与现状。早期的激光中子源概念主要来自于热核反应。但是,随着啁啾脉冲放大激光技术的发展,相对论强激光驱动的高能离子束所诱发的束靶中子源因其在核反应截面、前冲性等方面的优势,成为当前最有希望实现高产额及满足应用需求的短脉冲激光中子源技术途径。首先回顾了激光束靶中子源产额提升的技术途径,其主要取决于核反应通道和离子加速效率。在核反应通道选取方面,相比氘氘、质子锂等反应,氘锂核反应具有更高的核反应截面,因此得到广泛关注。在确定核反应通道之后,中子产额的提升主要依赖于氘离子加速效率的优化。多种新方案被提出,如通过靶加热、激光清洗和喷射重水等方式去除沾污层,或者采用靶破烧蚀加速和无碰撞冲击波加速等先进加速机制,提升了氘离子的加速能量和转换效率,最终实现 $>10^{10}$ /sr的高产额激光中子源。除了产额之外,中子定向性也是决定中子应用场景的关键参数。人们提出裂变反应、逆运动学效应等新方案来产生定向的中子源。目前已开展的原理性验证实验采用逆运动学效应,获得了具有明显前冲性、FWHM为 $40^\circ$ 的中子角分布,相比氘锂或氘氘方式降低了近一半,有望更好地满足相关应用需求。除了优化激光中子源品质外,激光中子源参数的精确表征也是应用中亟待解决的关键环节。在这方面,我们介绍了激光中子源产额、角分布、能谱和源尺寸的实验诊断方法,给出了脉宽的分析方法,指出其白光能谱和超短的脉宽特性适用于基于 TOF 方法的快中子共振分析。最后回顾了激光中子源的应用现状。当前的激光中子源的应用演示主要集中在快中子照相、快中子慢化以及热中子共振吸收等比较传统的应用场景。不过,激光中子源的超高注量率和短脉冲特性也使其在快中子共振成像、快中子俘获等方面具有潜在的应用价值。

激光中子源研究领域引起了人们的极大兴趣,在创新研究和应用方面显示出的独特潜力。但是,受限于现有的激光中子源产额,当前的大部分激光中子源应用演示还未能完全脱离传统中子源的应用场景,例如快中子照相、快中子慢化等。对于这类应用场景,激光中子源在束流参数方面(主要是中子通量)相比于传统的加速器中子源没有明显的优势。不过,随着高重复频率、高功率激光技术的发展,大功率激光驱动器同样有望实现台面化甚至车载化,从而用于建设紧凑型、可移动的高通量激光中子源装置。相比于传统的加速器中子源和反应堆中子源,小型化的激光中子源在经济性以及灵活性方面可以取得优势,以应对更为复杂的应用场景。对于这些传统应用,如何在高重复频率条件下实现稳定的中子源产生以获得与传统方式可比拟的中子源通量是亟待解决的关键技术问题。除了上述传统应用场景之外,激光中子源在快中子俘获、温稠密物质状态诊断和聚变材料学研究等应用方面同样具

有很大的潜力。这是因为相比于传统中子源,激光中子源在超短脉冲宽度、超高注量率等方面具有不可替代的独特优势,极有可能成为能够满足这些新应用需求的主要技术途径。相比于传统加速器,激光器在产生粒子源多样化方面也具有一定优势,能够更加灵活地满足多应用场景的需求。例如,激光器可以同时产生电子、离子、 $\gamma$ 射线以及中子等多种辐射源,通过混合辐射场的独特效应能够孕育出新的应用,比如 X 射线与中子混合照相。此外,对于专业研究辐射源与物质相互作用的实验室而言,一台成本相对较低且可同时满足多种实验需求的激光辐射源装置也同样具有独特的吸引力。总体而言,激光中子源作为一种新型中子源,其具备的源尺寸小、脉宽短以及峰值注量率高等特点使得其与传统中子源有所不同,能够进一步拓展中子源的应用范围,是传统中子源的一种有力补充。因此,通过采用更稳定、高效的中子产生方式以及更精确的中子源参数表征技术,激光中子源有望在科学和工业领域中获得广泛应用并开拓出更具特色的应用场景。

## 参 考 文 献

- [1] 卢希庭. 原子核物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000.  
Lu X T. Nuclear physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000.
- [2] 陈达, 贾文宝. 应用中子物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
Chen D, Jia W B. Applied neutron physics[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [3] 丁大钊, 叶春堂. 中子物理学-原理、方法与应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.  
Ding D Z, Ye C T. Neutron physics-principles, methods, and applications[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [4] Zou Y B, Tang G Y, Xu J G, et al. Experimental study of fast neutron resonance radiography[J]. Atomic Energy Science & Technology, 2008, 42: 17-20.
- [5] Vartsky D, Mor I, Goldberg M B, et al. Novel detectors for fast-neutron resonance radiography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 623(1): 603-605.
- [6] 王捷. 氘氘快中子照相系统的准直与成像关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.  
Wang J. Study on the key technologies of collimation and imaging of deuterium-tritium fast neutron radiography system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [7] Perkins L J, Logan B G, Rosen M D, et al. The investigation of high intensity laser driven micro neutron sources for fusion materials research at high fluence[J]. Nuclear Fusion, 2000, 40(1): 1-19.
- [8] 王淦昌. 利用大能量大功率的光激射器产生中子的建议[J]. 中国激光, 1987, 14(11): 641-645.  
Wang G C. Suggestion of neutron generation with powerful lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 1987, 14(11): 641-645.
- [9] 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.
- [10] Wallerstein G, Iben I, Parker P, et al. Synthesis of the elements in stars: forty years of progress[J]. Reviews of Modern Physics, 1997, 69(4): 995-1084.
- [11] Thielemann F K, Arcones A, Käppeli R, et al. What are the

- astrophysical sites for the r-process and the production of heavy elements? [J]. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2011, 66(2): 346-353.
- [12] Tajima T, Dawson J M. Laser electron accelerator[J]. *Physical Review Letters*, 1979, 43(4): 267-270.
- [13] Modena A, Najmudin Z, Dangor A E, et al. Electron acceleration from the breaking of relativistic plasma waves[J]. *Nature*, 1995, 377(6550): 606-608.
- [14] Malka V, Fritzier S, Lefebvre E, et al. Electron acceleration by a wake field forced by an intense ultrashort laser pulse[J]. *Science*, 2002, 298(5598): 1596-1600.
- [15] Esarey E, Schroeder C B, Leemans W P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(3): 1229-1285.
- [16] Roth M, Jung D, Falk K, et al. A tabletop neutron source[J]. *Nature*, 2013, 494(7435): 9.
- [17] 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.
- [18] Pomerantz I, McCary E, Meadows A, et al. Ultrashort pulsed neutron source[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(18): 184801.
- [19] 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.
- [20] Arikawa Y, Utsugi M, Alessio M, et al. High-intensity neutron generation via laser-driven photonuclear reaction[J]. *Plasma and Fusion Research*, 2015, 10: 2404003.
- [21] Alvarez J, Fernández-Tobias J, Mima K, et al. Laser driven neutron sources: characteristics, applications and prospects[J]. *Physics Procedia*, 2014, 60: 29-38.
- [22] 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(5): 054402.
- [23] Pomerantz I, McCary E, Meadows A R, et al. Laser generation of ultra-short neutron bursts from high atomic number converters[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9514: 95140Q.
- [24] Ditmire T, Zweiback J, Yanovsky V P, et al. Nuclear fusion from explosions of femtosecond laser-heated deuterium clusters[J]. *Nature*, 1999, 398(6727): 489-492.
- [25] Curtis A, Calvi C, Tinsley J, et al. Micro-scale fusion in dense relativistic nanowire array plasmas[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1077.
- [26] Zhang Y H, Wang W M, Li Y T, et al. Effects of internal target structures on laser-driven neutron production[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59(7): 076032.
- [27] Xi X F, Lü C, Ma W J, et al. Deuterium - deuterium fusion in nanowire plasma driven with a nanosecond high-energy laser[J]. *Frontiers in Physics*, 2023, 11: 1212293.
- [28] Yang Y L, Lv C, Sun W, et al. Neutron generation enhanced by a femtosecond laser irradiating on multi-channel target[J]. *Frontiers in Physics*, 2023, 11: 1189755.
- [29] Galy J, Maučec M, Hamilton D J, et al. Bremsstrahlung production with high-intensity laser matter interactions and applications[J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(2): 23.
- [30] Qi W, Zhang X H, Zhang B, et al. Enhanced photoneutron production by intense picosecond laser interacting with gas-solid hybrid targets[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(4): 043103.
- [31] Feng J E, 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.
- [32] Günther M M, Rosmej O N, Tavana P, et al. Forward-looking insights in laser-generated ultra-intense  $\gamma$ -ray and neutron sources for nuclear application and science[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 170.
- [33] 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.
- [34] Fews A P, Norreys P A, Beg F N, et al. Plasma ion emission from high intensity picosecond laser pulse interactions with solid targets[J]. *Physical Review Letters*, 1994, 73(13): 1801-1804.
- [35] Norreys P A, Fews A P, Beg F N, et al. Neutron production from picosecond laser irradiation of deuterated targets at intensities of  $10^{19} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1998, 40(2): 175-182.
- [36] 谷渝秋. 超热电子输运及相关现象研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004.
- Gu Y Q. Research on superthermal electron transport and related phenomena[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2004.
- [37] 评价核数据库 (ENDF) [EB/OL]. [2023-10-06]. <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>.
- Evaluated Nuclear Data File (ENDF) [EB/OL]. [2023-10-06]. <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>.
- [38] 实验核反应数据库 (EXFOR) [EB/OL]. [2023-11-24]. <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>.
- Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR) [EB/OL]. [2023-11-24]. <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>.
- [39] 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.
- [40] Disdier L, Garçonnet J P, Malka G, et al. Fast neutron emission from a high-energy ion beam produced by a high-intensity subpicosecond laser pulse[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(7): 1454-1457.
- [41] Izumi N, Sentoku Y, Habara H, et al. Observation of neutron spectrum produced by fast deuterons via ultraintense laser plasma interactions[J]. *Physical Review E*, 2002, 65(3): 036413.
- [42] Wilks S C, Langdon A B, Cowan T E, et al. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(2): 542-549.
- [43] Daido H, Nishiuchi M, Pirozhkov A S. Review of laser-driven ion sources and their applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2012, 75(5): 056401.
- [44] Wan Y, Andriyash I, Lu W, et al. Effects of the transverse instability and wave breaking on the laser-driven thin foil acceleration[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(10): 104801.
- [45] 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.
- [46] 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(4): 045015.
- [47] Davis J, Petrov G M. Angular distribution of neutrons from high-intensity laser-target interactions[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2008, 50(6): 065016.
- [48] Petrov G M, Davis J. Neutron production from interactions of high-intensity ultrashort pulse laser with a planar deuterated polyethylene target[J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(7): 073109.
- [49] Kar S, Green A, Ahmed H, et al. Beamed neutron emission driven by laser accelerated light ions[J]. *New Journal of Physics*, 2016, 18(5): 053002.
- [50] Yogo A, Lan Z, Arikawa Y, et al. Laser-driven neutron generation realizing single-shot resonance spectroscopy[J]. *Physical Review X*, 2023, 13(1): 011011.
- [51] 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(7): 076019.
- [52] Lan Z C, Yogo A. Exploring nuclear photonics with a laser driven neutron source[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2022,

- 64(2): 024001.
- [53] Mirani F, Maffini A, Passoni M. Laser-driven neutron generation with near-critical targets and application to materials characterization[J]. *Physical Review Applied*, 2023, 19(4): 044020.
- [54] Albright B J, Yin L, Favalli A. Improved yield and control of spectra from high-intensity laser-generated neutron beams[J]. *Laser and Particle Beams*, 2018, 36(1): 15-21.
- [55] 崔波. 超强激光驱动束靶中子源及其在特种材料检测中的应用研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2023.
- Cui B. Research on the application of ultra strong laser driven beam target neutron source in special material detection[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2023.
- [56] Zepf M, Clark E L, Beg F N, et al. Proton acceleration from high-intensity laser interactions with thin foil targets[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(6): 064801.
- [57] Hegelich B M, Albright B J, Cobble J, et al. Laser acceleration of quasi-monoenergetic MeV ion beams[J]. *Nature*, 2006, 439(7075): 441-444.
- [58] Schwoerer H, Pfoth S, Jäckel O, et al. Laser-plasma acceleration of quasi-monoenergetic protons from microstructured targets[J]. *Nature*, 2006, 439(7075): 445-448.
- [59] Pfoth S M, Jäckel O, Sachtleben A, et al. Spectral shaping of laser generated proton beams[J]. *New Journal of Physics*, 2008, 10(3): 033034.
- [60] Hou B X, Nees J A, He Z H, et al. Laser-ion acceleration through controlled surface contamination[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18(4): 040702.
- [61] Morrison J T, Storm M, Chowdhury E, et al. Selective deuteron production using target normal sheath acceleration[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19(3): 030707.
- [62] 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.
- [63] Krygier A G, Morrison J T, Kar S, et al. Selective deuterium ion acceleration using the Vulcan petawatt laser[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(5): 053102.
- [64] Alejo A, Krygier A G, Ahmed H, et al. High flux, beamed neutron sources employing deuteron-rich ion beams from D<sub>2</sub>O-ice layered targets[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2017, 59(6): 064004.
- [65] 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.
- [66] Huang C K, Broughton D P, Palaniyappan S, et al. High-yield and high-angular-fluence neutron generation from deuterons accelerated by laser-driven collisionless shock[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(2): 024102.
- [67] Yao Y, He S, Lei Z, et al. High-flux neutron generator based on laser-driven collisionless shock acceleration[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(2): 025101.
- [68] Kleinschmidt A, Bagnoud V, Deppert O, et al. Intense, directed neutron beams from a laser-driven neutron source at PHELIX[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25(5): 053101.
- [69] Fischer U, Avrigeanu M, Pereslavtsev P, et al. Evaluation and validation of d-Li cross section data for the IFMIF neutron source term simulation[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 367/368/369/370: 1531-1536.
- [70] Lebois M, Wilson J N, Halipré P, et al. Development of a kinematically focused neutron source with the  $p(^7\text{Li}, n)^7\text{Be}$  inverse reaction[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, 735: 145-151.
- [71] 卢希庭. 利用  $^4\text{He}(^{13}\text{C}, n)^{16}\text{O}$  和  $^1\text{H}(^7\text{Li}, n)^7\text{Be}$  反应作中子源的建议[J]. *原子能科学技术*, 1979, 13(2): 220-222.
- Lu X T. Suggestions on using  $^4\text{He}(^{13}\text{C}, n)^{16}\text{O}$  and  $^1\text{H}(^7\text{Li}, n)^7\text{Be}$  reactions as neutron sources[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1979, 13(2): 220-222.
- [72] Dave J H, Gould C R, Wender S A, et al. The  $^1\text{H}(^7\text{Li}, n)^7\text{Be}$  reaction as an intense MeV neutron source[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1982, 200(2/3): 285-290.
- [73] Hasegawa K, Kotajima K, Kitamura M, et al. Production of focused neutron beam using heavy ion reaction[J]. *CYRIC Annual Report*, 1986, 1986: 103-110.
- [74] Liu P, Liang T Y, Wu D, et al. Laser-driven collimated neutron sources based on kinematic focusing[J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18(4): 044004.
- [75] 崔波, 贺书凯, 刘红杰, 等. 液体闪烁体探测器测量皮秒激光脉冲中子源能谱[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(12): 124005.
- Cui B, He S K, Liu H J, et al. Neutron spectrum measurement for picosecond laser pulse neutron source experiment with liquid scintillator detector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(12): 124005.
- [76] Bubble Technology Industries[EB/OL]. [2023-09-08]. <http://www.bubbletech.ca>.
- [77] 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.
- [78] Ilić R, Durrani S A. Solid state nuclear track detectors[M] // L'Annunziata M F. *Handbook of radioactivity analysis*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2003: 179-237.
- [79] 王兴功, 骆亿生, 张红, 等. CR-39 固体核径迹探测器用于中子测量化学蚀刻参数的优化[J]. *核技术*, 2005, 28(4): 319-323.
- Wang X G, Luo Y S, Zhang H, et al. Optimum condition of chemical etching of CR-39 solid state nuclear track detector for neutron measurement[J]. *Nuclear Techniques*, 2005, 28(4): 319-323.
- [80] Durrani S A. Nuclear tracks today: strengths, weaknesses, challenges[J]. *Radiation Measurements*, 2008, 43: S26-S33.
- [81] Mori T, Yogo A, Hayakawa T, et al. Direct evaluation of high neutron density environment using  $(n, 2n)$  reaction induced by laser-driven neutron source[J]. *Physical Review C*, 2021, 104: 015808.
- [82] 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): 123-129.
- 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): 123-129.
- [83] Tanaka H, Kurosawa S, Yamaji A, et al. Evaluation of neutron pulse width in laser-driven neutron source using organic scintillator [C] // 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), October 26 - November 2, 2019, Manchester, UK. New York: IEEE Press, 2020.
- [84] Zimmer M, Scheuren S, Kleinschmidt A, et al. Development of a setup for material identification based on laser-driven neutron resonance spectroscopy[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2020, 231: 01006.
- [85] Higginson D, Vassura L, Gugiu M, et al. Temporal narrowing of neutrons produced by high-intensity short-pulse lasers[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(5): 054802.
- [86] Fernández Juan C, Cort Gautier D, Chengkung H, et al. Laser-plasmas in the relativistic-transparency regime: science and applications[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(5): 056702.
- [87] 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.
- [88] Williams G J, Auferheide 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(9): 093514.
- [89] Abe Y, Nakao A, Arikawa Y, et al. Predictive capability of material screening by fast neutron activation analysis using laser-driven neutron sources[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(9): 093523.
- [90] 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(1): 014602.
- [91] 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.
- [92] 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.

## Research Progress of Beam-target Neutron Source and Applications Driven by Ultra-short Pulse Lasers (Invited)

Qi Wei, He Shukai, Cui Bo, Zhang Zhimeng, Hong Wei, Zhao Zongqing,  
Gu Yuqiu\*, Zhou Weiming\*\*

*National Key Laboratory of Plasma Physics, Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*

### Abstract

**Significance** With the rapid advancement of laser technology, the laser intensity reaches approximately  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>, and charged particles can be accelerated to hundreds of MeV or even several GeV. These energetic particles can trigger nuclear reactions and generate neutrons. Compared with traditional neutron sources, such as reactors, spallation neutrons, and radioactive neutron sources, laser-driven neutron sources (LDNS) have interesting features, such as short duration, which is approximately tens or hundreds of ps, and ultrahigh flux, which is  $10^{18}$ – $10^{21}$ /(cm<sup>2</sup>·s). Moreover, the neutron energy is easy to adjust by manipulating the laser accelerating process. Therefore, studies on LDNS have attracted considerable interest and have shown unique potential for innovative investigations and applications in the past two decades, particularly after the significant progress achieved by Roth *et al.* in 2013. LDNS is expected to be a powerful alternative to traditional neutron sources and may play an essential role in specific applications, such as the fast neutron resonance radiography and rapid neutron capture. This study briefly reviews the historical development and status of laser-driven neutron sources. Significant attention is given to the recent progress in beam-target neutron sources.

**Progress** First, this study reviews the technical approaches to increase the yield of laser-driven neutron sources, which mainly include nuclear reaction channels and ion acceleration efficiency. Compared with deuterium-deuterium and proton-lithium reactions, deuterium-lithium nuclear reactions result in larger nuclear reaction cross-sections and, thus, have received special attention in this field. After determining the nuclear reaction channel, the improvement of the neutron yield mainly depends on the optimization of the deuterium acceleration efficiency. Various new schemes for eliminating the contamination layer within the target normal sheath acceleration (TNSA) acceleration process, such as target heating, laser cleaning, and heavy water spraying, have been established. The use of advanced acceleration mechanisms, such as break-out afterburner and collisionless shock acceleration, has also been proposed to increase the cut-off energy and charge of deuterium ions, and the neutron yield eventually reaches as high as  $10^{10}$  /sr (Fig. 2). In addition to yield, neutron directionality is also a critical parameter that influences neutron application. New schemes such as the stripping of D-Li reaction and reverse kinematic effects of heavy ions have also been proposed to generate directional neutron sources. By applying the inverse kinematic effect, the proof-of-principle experiments conducted thus far have achieved a neutron angular distribution with a significant forward impulse and full width at half maximum (FWHM) of 40° (Fig. 6), which is nearly half lower than those of the D-D and D-Li reactions. In addition to optimizing the quality of the laser neutron source, the accurate characterization of laser neutron source parameters is also an integral process of the neutron application. This study introduces the experimental diagnostic methods of laser neutron source yield, angular distribution, energy spectrum, and source size. The analysis method of the pulse width is also explained. The wide range of energy spectrum and ultrashort pulse-width characteristics are suitable for fast-neutron resonance analysis applications based on the time-of-flight method. Finally, this study reviews the application status of laser neutron sources. Current applications mainly focus on traditional application scenarios, such as fast neutron photography, fast neutron moderation, and thermal neutron resonance absorption. However, the high flux and short pulse of laser-driven neutron sources also make them valuable in fast-neutron resonance imaging and rapid neutron capture.

**Conclusions and Prospects** Research on laser neutron sources has aroused significant interest and demonstrates unique potential in terms of innovative research and application prospects. However, because of the limited yield, most of the current application experiments mainly focus on the application scenarios of the traditional neutron source, in which the LDNS does not have unique advantages in terms of neutron fluence. However, with the development of high repetition rate and high average-power laser technology, miniaturized laser neutron sources can gain advantages in terms of economy and flexibility to cope with more complex applications. In addition, because of the nonsubstitutable unique advantages of the short pulse width and high flux rate of LDNS, it

also has potentials for new applications, such as fast neutron capture, diagnosis of the state of warm dense matter, and fusion material research. Finally, lasers have advantages in generating various particle sources, which can flexibly satisfy the needs of multiple application scenarios. For example, lasers can simultaneously generate multiple radiation sources, such as electrons, ions,  $\gamma$ -rays, and neutrons. The unique effects of combining radiation fields can lead to new applications, such as radiography implemented with thermal neutrons and X-rays. Overall, laser-driven neutron sources are expected to be widely used in scientific and industrial fields and can expand more distinctive application scenarios by adopting more stable and efficient neutron generation methods and more accurate neutron-source parameter characterization techniques.

**Key words** laser optics; laser ion acceleration; laser driven neutron source; ultra-short pulse laser