

# 强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

## 郑州大学超短超强激光平台建设及研究进展

万阳 李传可 彭波 宋怀航 鲁巍 Malka Victor

### Ultrafast and ultraintense laser facility at Zhengzhou University: Recent progress

Wan Yang, Li Chuanke, Peng Bo, Song Huaihang, Lu Wei, Malka Victor

#### 引用本文:

万阳, 李传可, 彭波, 宋怀航, 鲁巍, Malka Victor. 郑州大学超短超强激光平台建设及研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2026, 38: 031006. doi: 10.11884/HPLPB202638.250412

Wan Yang, Li Chuanke, Peng Bo, Song Huaihang, Lu Wei, Malka Victor. Ultrafast and ultraintense laser facility at Zhengzhou University: Recent progress[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2026, 38: 031006. doi: 10.11884/HPLPB202638.250412

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202638.250412>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 激光等离子体尾波加速器的发展和展望

Development and prospect of laser plasma wakefield accelerator

*强激光与粒子束*. 2020, 32: 092001-1-092001-11 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200174>

#### 非线性啁啾频率对势阱产生正负电子对的增强

Enhancement of nonlinear chirped frequency on electron-positron pair production in the potential well

*强激光与粒子束*. 2023, 35: 012003-1-012003-10 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.220066>

#### 强场下真空中粒子对产生的研究进展

Progress of pair production from vacuum in strong laser fields

*强激光与粒子束*. 2023, 35: 012002-1-012002-23 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.220145>

#### 基于激光等离子体加速的自由电子激光研究新进展

Research progress of free electron laser based on laser plasma acceleration

*强激光与粒子束*. 2022, 34: 104009-1-104009-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.220090>

#### 填充预等离子体通道靶激光电子加速研究

Laser electron acceleration in pre-plasma-filled channel targets

*强激光与粒子束*. 2022, 34: 112001-1-112001-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.220067>

#### 拍瓦飞秒激光与近临界密度等离子体相互作用的电子加速及betatron辐射产生数值模拟

Numerical study of electron acceleration and betatron radiation based on interaction of petawatt femtosecond laser with near-critical-density plasma

*强激光与粒子束*. 2025, 37: 091002-1-091002-9 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.250033>



·超短超强激光装置·综述·

## 郑州大学超短超强激光平台建设及研究进展\*

万 阳<sup>1</sup>, 李传可<sup>1</sup>, 彭 波<sup>1</sup>, 宋怀航<sup>1</sup>, 鲁 巍<sup>2</sup>, Malka Victor<sup>3</sup>

(1. 郑州大学 物理学院, 中原之光实验室, 郑州 450001; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049;  
3. 魏茨曼科学研究所 物理复杂系统系, 以色列 雷霍沃特 7610001)

**摘 要:** 超短超强激光的出现与迅猛发展, 为人类创造了前所未有的极端物理条件和全新实验手段, 极大深化和拓展了人类对客观世界规律的认识, 显著推动了基础与前沿交叉学科以及战略高技术领域的创新发展。基于超短超强激光与等离子体相互作用的粒子加速技术作为新一代加速器与射线源技术, 可将传统加速器装置规模缩小百倍, 极大提升了高端加速器与射线源在工业、国防、医疗及科研等领域的适用性, 在大型关键装备精细探伤、超低剂量超高精度肿瘤诊断、新型低损伤放疗技术、桌面型超快光源等诸多方向展现出广阔的应用前景。本文介绍的郑州大学超短超强激光平台, 正是基于该技术建设的新一代先进激光加速器研究与应用装置。此外, 本文还系统综述了郑州大学近年来在强场物理与先进加速研究方面取得的重要进展。

**关键词:** 超短超强激光; 中原之光; 激光等离子体尾波场加速; 超高能电子放疗; 真空正负电子对产生  
**中图分类号:** O53 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202638.250412

## Ultrafast and ultraintense laser facility at Zhengzhou University: Recent progress

Wan Yang<sup>1</sup>, Li Chuanke<sup>1</sup>, Peng Bo<sup>1</sup>, Song Huaihang<sup>1</sup>, Lu Wei<sup>2</sup>, Malka Victor<sup>3</sup>

(1. Laboratory of Zhongyuan Light, School of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;  
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Department of Complex Systems of Physics, Weizmann Institute of Science, Rehovot 7610001, Israel)

**Abstract:** The emergence and rapid advancement of ultrafast and ultraintense lasers have created unprecedented extreme physical conditions and novel experimental methods, significantly deepening and expanding our understanding of the laws governing the objective world. These developments have greatly promoted innovation in basic and frontier interdisciplinary fields as well as strategic high technology areas. Particle acceleration using the interaction of ultrafast and ultraintense lasers with plasmas is regarded as a next-generation technology for accelerators and radiation sources. It offers the potential to shrink the footprint of conventional accelerator facilities by two orders of magnitude. This dramatic reduction in size greatly expands the applicability of accelerator and radiation source technologies in industry, national defense, medicine, and scientific research, enabling transformative possibilities such as precision nondestructive testing of critical components, ultralow dose and high precision tumor diagnostics, novel low damage radiotherapy methods, and tabletop ultrafast light sources. The ultrafast and ultraintense laser platform at Zhengzhou University introduced in this paper is precisely such a next-generation facility dedicated to advanced laser accelerator research and applications. In addition, this article provides a systematic review of the significant progress achieved by Zhengzhou University in recent years in strong-field physics and advanced accelerator science.

**Key words:** ultrafast and ultraintense laser, Zhongyuan Light, laser-driven plasma wakefield acceleration, very high energy electron radiotherapy, electron-positron pair creation from vacuum

超短超强激光兼具超快时间分辨能力与超高峰值功率等特性, 能够在实验室中创造出超快时间尺度、超强场强、极高温与超高压等极端物理条件, 已成为拓展人类基础科学认知边界的重要研究工具<sup>[1-3]</sup>。啁啾脉冲放大

\* 收稿日期: 2025-11-19; 修订日期: 2025-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12447120, 12574380); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB0530000); 河南省自然科学基金项目 (252300421300)

联系方式: 万 阳, yangwan23@zzu.edu.cn;

李传可, chuankeli@zzu.edu.cn.

技术(Chirped Pulse Amplification, CPA)由杰哈·莫罗和唐娜·斯特里克兰提出<sup>[4]</sup>,作为一项突破高峰值功率激光发展瓶颈的关键技术,持续推动着超短超强激光的发展。目前,实验室所能实现的最高激光功率密度已超过  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>,为强场物理的前沿探索提供了重要条件<sup>[5]</sup>。在此量级的激光作用下,任何与之相互作用的物质均会在极短时间内转变为等离子体。基于这一特性,超短超强激光在激光等离子体加速、激光聚变、激光核物理、实验室天体物理、材料科学及核医学等学科领域中展现出重要作用,并逐渐成为推动前沿基础科学研究的关键技术之一。鉴于其重大科学和应用价值,杰哈·莫罗和唐娜·斯特里克兰凭借共同发明 CPA 技术荣获 2018 年诺贝尔物理学奖<sup>[6]</sup>。

世界多国包括美国、欧洲、日本等发达地区均在超短超强激光领域投入大量资源,展开激烈竞争。过去二十年间,全球陆续建成多台具备超高峰值功率的激光装置,其单个脉冲的瞬时功率可轻易超越全球电网的平均总功率,标志着该技术能力的重大飞跃。其中具有里程碑意义的项目是于 2006 年由来自 10 个欧洲国家和地区的 30 所科研机构共同向欧盟提议的“极端光设施”(Extreme Light Infrastructure, ELI)计划<sup>[7]</sup>。该计划包括四大研究装置:位于捷克布拉格的 ELI 束线装置(ELI-Beamlines Facility)、匈牙利赛格德的 ELI 阿秒装置(ELI-ALPS Facility)、罗马尼亚默古雷莱的 ELI 核物理装置(ELI-NP Facility),以及尚未确定选址的 ELI 超强场装置(ELI-UHF Facility)。与此同时,俄罗斯、英国、法国、美国、德国及我国也正在积极推进 10 PW 至 100 PW 量级的超强超短激光装置建设,代表性装置包括英国卢瑟福实验室的中央激光装置(Central Laser Facility, CLF)<sup>[8]</sup>,法国的阿波罗(Apollon)激光装置<sup>[9]</sup>,俄罗斯的艾瓦中心极端光学研究(eXawatt Center for Extreme Light Studies, XCELS)计划<sup>[10]</sup>,美国光参量放大束线(Optical Parametric Amplifier Line, OPAL)计划<sup>[11]</sup>,我国的上海超强超短激光实验装置(Shanghai Superintense Ultrafast Laser Facility, SULF)<sup>[12]</sup>和极端光物理线站(Station of Extreme Light, SEL)<sup>[13-14]</sup>等。

随着超短超强激光技术的快速发展,激光等离子体尾波加速已逐渐成长作为一种具有颠覆性潜力的新型加速器技术<sup>[15]</sup>。该概念最早由田岛俊树和约翰·道森于 1979 年提出<sup>[16]</sup>,其基本原理是利用超短超强激光与等离子体相互作用激发产生的等离子体尾波场,实现对电子的超高梯度加速。由于该技术所具有的加速梯度可达 100 GV/m,比传统射频加速器高出三个数量级,能够显著缩小加速器装置的规模并降低造价,因此对未来对撞机与高端光源的发展具有革命性意义。激光尾波加速器领域经过几十年的蓬勃发展,已在全球范围内引发广泛研究。美国劳伦斯伯克利国家实验室、美国加州大学洛杉矶分校、法国应用光学实验室、德国马克斯·普朗克学会、德国电子同步加速器研究所、德国亥姆霍兹德累斯顿罗森多夫研究中心、意大利国家核物理研究所、韩国光州先进光子学研究所等众多知名机构均在此方向深入探索。国内多家单位也在此领域取得重要进展,包括清华大学、北京大学、上海交通大学、郑州大学、中国科学院物理研究所、上海光学精密机械研究所以及中国工程物理研究院等,共同推动着激光尾波加速技术的前沿发展。

激光尾波加速器技术历经二十年的快速发展,目前已进入关键的历史转型阶段。相较于早期探索期,该技术在物理机制探索与辐射源应用演示方面已取得一系列重要突破,具备了向基础研究、医疗及工业等领域推广应用的初步条件<sup>[17-18]</sup>。例如,利用电子束在激光尾波场中的横向 Betatron 振荡,可产生覆盖紫外至 X 射线波段的 Betatron 辐射<sup>[19-22]</sup>;而将激光尾波加速所获高能电子束与超强激光相互作用,通过逆康普顿散射过程,则可产生高亮度  $\gamma$  射线<sup>[23-25]</sup>。这些辐射产生机制已在实验中得到充分验证,结合具备工业级可靠性的激光系统,为构建能谱范围涵盖 X 射线至  $\gamma$  射线的新型超快高亮度辐射光源奠定了坚实的技术基础。

另一方面,激光尾波加速器技术仍处于快速发展阶段,国际竞争日趋激烈,亟需建设基于工业级高可靠性激光系统的新一代激光加速器技术研究平台。该技术的中长期关键目标,是实现紧凑型自由电子激光<sup>[26-29]</sup>与高能粒子对撞机<sup>[30]</sup>的建成与应用。这两类科学装置对加速器性能与束流品质提出了极为严苛的要求,并需保证系统长期稳定运行。具体而言,紧凑型自由电子激光要求电子束同时具备高能量(GeV 量级)、高流强(kA 量级)、超低能散(约 0.1%)和低发射度( $< 1$  mm·mrad)等特性;而未来高能对撞机则要求束流在能量( $\sim 100$  GeV 至 TeV)、能散(0.1%)、电荷量(nC 级)及发射度( $< 1$  mm·mrad)等多个参数上协同优化,并同时满足高重复频率和高加速效率的要求。为应对上述挑战,激光尾波加速器技术需在加速器物理、超短超强激光技术、激光等离子体相互作用以及高性能数值模拟等多个关键领域协同推进与持续创新。国际上对此高度重视,美国能源部于 2016 年发布《先进加速器发展战略报告》<sup>[31]</sup>,欧洲核子研究中心(CERN)在 2020 年更新《粒子物理战略报告》<sup>[32]</sup>,欧盟更于 2021 年推出首个面向应用的等离子体加速器设施 EuPRAXIA 的概念设计报告<sup>[33]</sup>,均明确指出激光尾波加速器领域面临以下三方面重大科学与技术挑战,包括:(1)亟须发展具备工业级可靠性的超短超强激光系统,以作为激光尾波加速器的稳定驱动源;(2)在高可靠性驱动系统的基础上,亟须对加速器束流品质及其稳定性进行系统性优化,并显著提升加

速器系统的工程化水平;(3)为满足未来高能对撞机在超高能量与高束流品质等方面的极端要求,必须攻克多级独立激光尾波加速器的高效级联关键技术,并解决在加速全程中维持极高束流品质所面临的一系列重大技术挑战。

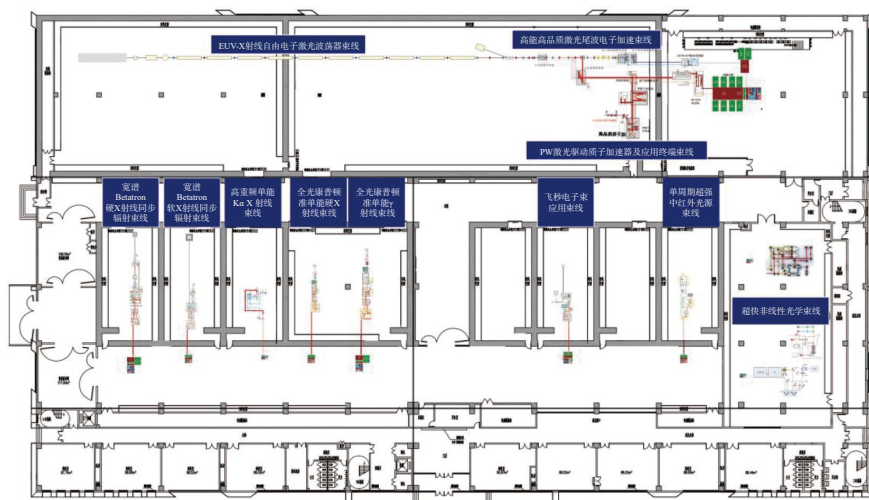
基于上述发展趋势与战略需求,2020年,河南省政府与清华大学签署了深化战略合作协议,明确“清华大学支持河南省建设超短超强激光平台”。河南省自2021年起连续将超短超强激光平台建设纳入政府工作报告;2021年的河南省政府工作报告提出“加快超短超强激光平台建设”,2022年的河南省政府工作报告进一步明确“开工建设中原之光等大科学装置”。至2023年,由清华大学与郑州大学共同设计的河南省首个大科学装置——郑州大学超短超强激光平台(简称“中原之光”)正式开工建设。该平台旨在采用我国自主研发的新型紧凑式高稳定性超短脉冲高功率激光技术,构建面向多学科研究应用的激光等离子体加速器,为各领域终端用户提供先进的实验与研究条件。

## 1 郑州大学超短超强激光平台

郑州大学超短超强激光平台是以全国产化超短超强激光器技术为核心,建设的新一代兼具前沿科学研究与应用孵化功能的多学科用户平台。该装置包括先进激光加速器技术研究平台与全谱超快光源两大系统,共11条独立束线,总投资8.7亿元,位于河南省荥阳市广武镇,占地75亩。在科学研究方面,中原之光面向未来对撞机与相干光源等重大应用需求,聚焦于加速器新原理探索、高品质束流注入、束流相空间动力学演化及先进束流诊断方法等关键科学问题,开展系统深入的研究。在应用支撑方面,该平台能够产生覆盖高能电子束、离子束、中子束以及红外至 $\gamma$ 射线超宽波段的超快高亮度射线源,具备结构紧凑、多源同步等优势,将成为国际上首个专门服务于多学科终端用户的激光驱动平台。中原之光在参数空间与应用领域方面,与现有同步辐射光源形成有效互补,共同拓展极端条件物质科学研究的能力边界。图1(a)展示了郑州大学超短超强激光平台的效果,从北到南依次是束



(a) layout



(b) beam-line

Fig. 1 Layout and beam-line of Zhongyuan Light

图1 中原之光效果图和中原之光束线图

线实验楼、动力中心、办公楼;其中 11 条独立束线(见图 1(b))均位于束线实验楼。

与传统光源相比,新一代桌面型光源“中原之光”在功能、成本与布局灵活性方面均展现出显著优势。该装置基于超强激光驱动的等离子体尾波场全光加速结构,所产生的电子束具备以下典型特征:脉冲宽度为飞秒量级,横向尺度为微米量级,且电子束与激光束之间天然同步,同步精度可达飞秒水平。通过对束流参数的适当调控,该装置可进一步产生 Betatron 辐射,辐射频率覆盖紫外至 X 射线波段,并具备实现微米级超高分辨率相衬成像的能力。此外,利用电子束与激光束之间的汤姆逊散射,还可产生峰值亮度比传统同能区射线源高出五个数量级的高亮度  $\gamma$  射线,单脉冲  $\gamma$  光子数可达  $10^7$  量级。上述特性使“中原之光”成为一种结构紧凑、功能强大的桌面型加速与辐射平台,非常适用于激光-电子束泵浦探测实验、飞秒级超快电子衍射研究,以及未来自由电子激光技术的前期探索与开发。

中原之光的核心结构包括多条独立束线,其关键组成部分为一套重复频率 1 Hz、峰值功率达 PW 量级的超短超强激光系统及相应的激光加速研究系统,旨在实现高能量、高品质电子束的加速与研究。该系统集成两条分别由工业级重复频率激光器驱动的电子加速束线,如图 2 所示。第一条为主加速器束线,由 1 PW 工业级重复频率激光系统驱动,配备了完整的电子加速模块、纵向相空间调控单元、横向相空间匹配段、束流传输段、基于电子束探针的尾场诊断系统以及高精度电子束参数测量装置。该束线主要用于开展数 GeV 能段的激光尾波电子加速研究,重点探索束流品质优化与加速效率提升等关键物理问题。第二条为注入级加速束线,采用 200 TW 工业级重复频率激光系统驱动,同样配备完整的束流加速、传输与诊断设备,专注于 200~500 MeV 能段的激光尾波加速物理研究。除可独立运行外,两条束线还可通过一条直线束流耦合传输线实现串联耦合,以支持高品质、高效率的级联外注入加速研究。该耦合传输线经过优化设计,可将注入级束线输出的电子束精确匹配并传输至主加速器束线,有效抑制传输过程中的束流品质退化,并具备对束流纵向相空间进行调控的能力。在级联运行模式下,注入级束线将产生能量为 200~500 MeV、能散为 0.5%~1.0% 的高品质稳定电子束;经耦合传输线注入主加速器束线后,电子束将继续加速,最终输出能量在 0.5~2 GeV 范围内可调、能散低于 0.5% 的高品质稳定电子束,并实现对其纵向相空间的精确操控。作为国际领先的激光尾波加速前沿探索平台,高能高品质电子加速束线装置将为未来激光尾波加速器技术在先进光源和高能对撞机领域的突破性发展提供重要支撑。

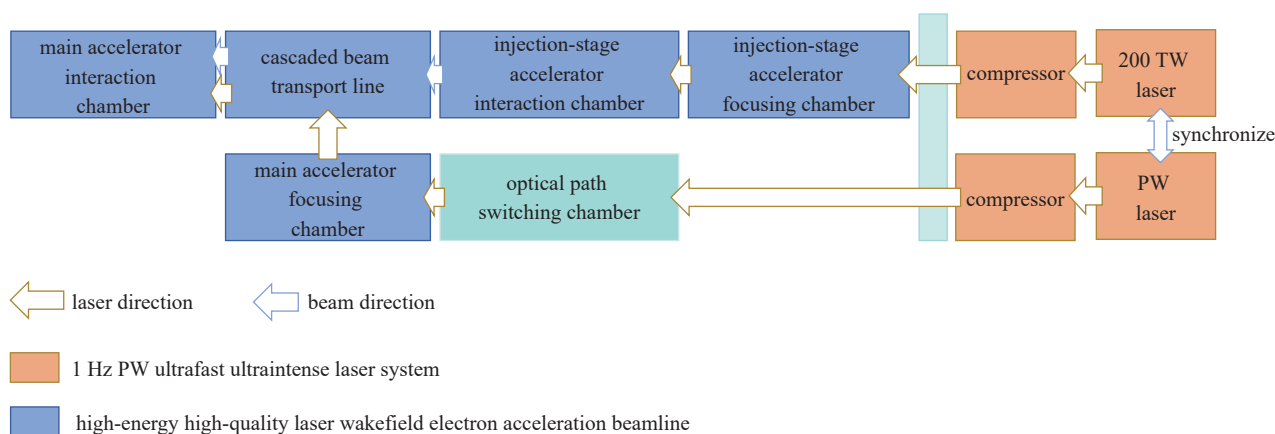


Fig. 2 Layout of repetition rate 1 Hz PW ultrashort and ultraintense laser and laser acceleration system

图 2 重频 1 Hz PW 超短超强激光及激光加速研究系统整体布局图

## 2 郑州大学研究进展

遵循郑州大学超短超强激光平台“边建设、边运行”的发展理念,依托该平台同步组建了强场物理与先进加速研究团队。团队与清华大学、中国科学院高能物理研究所、中国科学院上海应用物理研究所,以及以色列魏茨曼科学研究所等国内外领先的激光等离子体加速研究团队建立了紧密的合作伙伴关系。在激光质子加速、激光电子加速、强场量子电动力学等重点方向积极展开研究,并在飞秒相对论电子显微成像、飞秒激光塑形技术等前沿诊断与调控技术上取得突破,相关成果已引起国内外同行的广泛关注。

### 2.1 基于飞秒激光塑形技术的近临界密度质子加速

当前,激光离子加速中广泛采用的固体靶方案存在诸多限制,例如质子束能量较低、重复频率低、易引入污染、靶材制备工艺复杂,且对激光参数极为敏感。相比之下,基于近临界密度气体靶的激光离子加速技术有望克

服上述瓶颈,因而受到国内外学界的广泛关注。实现高效离子加速的关键在于构造具有百微米尺度尺寸及数微米陡峭边界的气体靶结构,然而这类靶材的制备在实验上极具挑战。针对该问题,我们联合以色列魏茨曼科学研究所提出了一种基于飞秒激光精密调控的新型气体靶构建方案<sup>[34]</sup>。该方案利用一束垂直传播的加热激光(能量为数十毫焦,脉宽约 100 fs),通过精确控制光场电离过程,实现对气体靶纵向与横向密度分布的主动调控,如图 3 所示。通过设计加热激光的空间强度分布,可在气体环境中形成局域化的薄层近临界密度等离子体靶。其核心原理在于:在压缩靶区中心附近气体的同时,促使入口区域气体膨胀,从而使主激光束能够安全通过低密度区并最终作用于被压缩的高密度区域。实验结果表明,该技术可在相对论强度激光与气体靶相互作用中实现近临界密度状态。进一步采用约 1.5 J 的泵浦激光,在国际上首次获得了最高能量达 5 MeV 的准单能质子束,从而验证了团队于 2019 年所提出的气体靶加速理论模型<sup>[35]</sup>。更重要的是,通过连续 200 发实验测试,进一步证明了飞秒激光整形方案具备良好的鲁棒性,如图 4 所示。该研究为基于激光气体靶相互作用的离子加速提供了一条切实可行的技术路径,对实现高重频、高效率、低污染的离子加速及相关应用具有重要价值。

## 2.2 利用飞秒相对论电子显微成像技术记录激光尾波场演化全过程

激光尾波场结构的细微变化直接影响被加速电子束的品质,进而制约其下游应用,因此发展针对尾波场及其加速电子束的在线诊断手段十分必要。然而,受限于其微米级空间尺度和近光速时间演化特征,实验测量面临严峻挑战。为解决这一难题,我们联合以色列魏茨曼科学研究所采用飞秒相对论电子显微成像(Femtosecond ultraRelativistic Electron Microscopy, FREM)对尾波场演化过程进行高时空分辨成像<sup>[36]</sup>。该技术利用激光尾波加速产生的高能飞秒电子束作为探针,使其横向穿过待测尾波场结构,经场偏转后在下游形成清晰的尾波场图像。借助飞秒相对论电子显微成像技术,研究团队在国际上首次实现了对激光尾波场全周期演化动态的实时观测,涵盖了激光自聚焦、尾波场非线性增长、电子注入以及激光驱动尾波场向束流驱动尾波场转换等关键物理过程。图 5(a)展示了基于实验喷嘴设计、通过计算流体动力学模拟得到的纵向等离子体密度分布,其中  $z=0$  对应气体射流中心, $z$  轴正方向为激光传播方向。图 5(b)中,飞秒相对论电子显微成像的图像清晰揭示了尾波场演化的三个阶段:第一阶段为电子注入前的激光尾波场加速阶段(B1~B5)。当高强度短激光脉冲与气体靶上升密度梯度相互作用时,初始等离子体波开始形成(B1、B2);随着激光进入均匀等离子体区(B3),尾波场结构发生显著演化,横向波长减小,振幅与曲率增大,标志着非线性尾波场动力学的开始;在后续传播过程中(B4、B5),持续的自聚焦效应进一步增强了尾场强度。第二阶段包含电子注入过程及其对尾波场的影响(B6、B7)。当尾波场振幅超过临界阈值时,氮原子内壳层电子被捕获并加速(B6);同时,观测到尾波场周期自尾部向头部逐渐增大,证实电子注入始于气体靶后端的密度下降沿(B7)。第三阶段为束流驱动尾波场加速阶段(B8~B10)。随着激光在密度下降沿中传播并减弱,尾波场激发机制由激光驱动转为束流驱动(B8)。实验显示,电子束团在继续传播过程中横向逐渐扩展(B9、B10),并呈现出周期性明暗条纹,其横向尺寸随电子束演化而扩展,符合准线性束流驱动等离子体波动的典型特征。这充分说明了飞秒相对论电子显微成像技术在等离子体尾场精细测量方面巨大的应用价值,对于深入理解激光尾波加速关键物理机制以及实时提升束流品质具有重要意义。

## 2.3 基于激光加速器的超高能电子放疗原型机研发

超高能电子(Very High Energy Electrons, VHEE, 能量范围为 50~300 MeV)因其相较于传统高能 X 射线具备更优

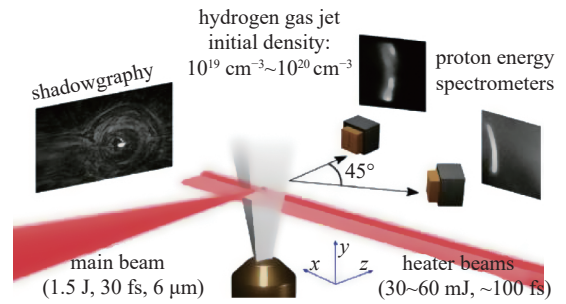


Fig. 3 Experimental setup

图 3 实验装置图

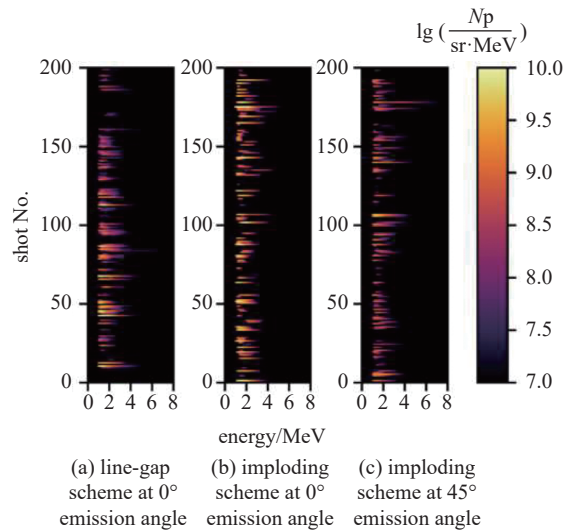


Fig. 4 Consecutive proton results for 200 shots for the two setups

图 4 两种方案下 200 次连续发次的质子实验结果

越的剂量沉积特性、相对于质子/重离子束更简便灵活的调控能力,以及能够实现高瞬态剂量率等优势,近年来受到国际放疗领域的广泛关注。激光尾波电子加速器(Laser Wakefield Accelerator, LWFA)凭借其极高的加速梯度,仅需在毫米级的相互作用距离和数平方米的占地面积内即可产生百 MeV 量级的电子束,使得基于激光加速的超高能电子放疗系统在设备规模上可与传统光子放疗装置相媲美,从而显著降低了空间需求与建设成本。我们联合中科院高能所、清华大学等团队成功研制出基于激光尾波加速技术的超高能电子放疗原型装置(简称“激光电子刀”)<sup>[37]</sup>,其结构如图 6 所示。该原型装置具有以下突出特点:(1)结构紧凑,整体占地面积小于 5 m<sup>2</sup>,易于集成至现有医疗环境;(2)运行稳定,具备连续一个月可靠运行能力,支持长达 10 h 不间断工作;(3)剂量控制精准,可实现预设的均匀剂量分布,束流指向抖动控制在亚毫米级别。

随后,我们利用该原型装置对小鼠移植肿瘤模型进行了照射实验。在向肿瘤区域精准递送 5.8 Gy±0.2 Gy 的剂量后,所有受照射小鼠均显示出明显的肿瘤生长抑制效果(图 7)。与郑州大学第一附属医院的瓦里安 Edge 商用 X 射线放疗设备在等效剂量下的实验结果相比,激光电子刀所实现的疗效相当,充分验证了基于激光加速的超高能电子束用于肿瘤治疗的可行性。未来,我们将进一步深入研究激光电子刀相关的生物物理机制,推进系统工程的实用化发展。具体方向包括引入机器学习算法以优化束流控制、发展新型诊断方法以提升束流品质,并拓展多角度照射能力,从而更好地发挥该技术在深部肿瘤治疗中的优势,同时降低对健康组织的辐射损伤。

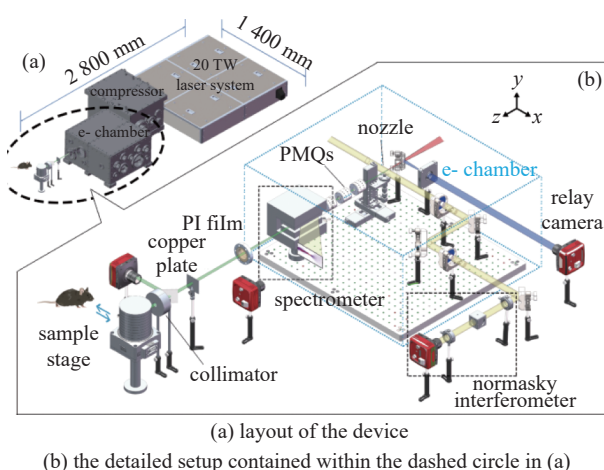


Fig. 6 The LWFA-based VHEE therapy prototype

图 6 基于激光加速器的超高能电子放疗原型机

## 2.4 激光诱导真空衰变的非对称多光子跃迁机制

随着超短超强激光强度的不断提高,光与物质的相互作用逐渐进入强场量子电动力学(Quantum Electrodynamics,

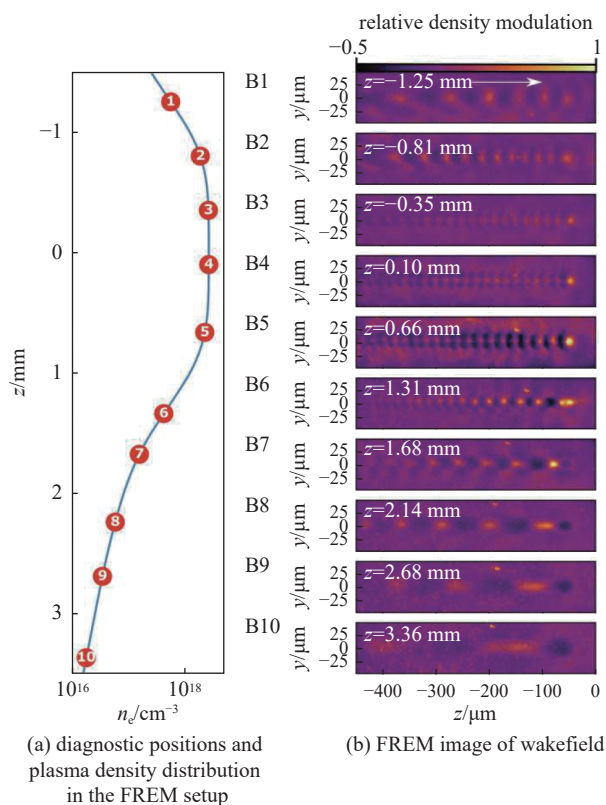
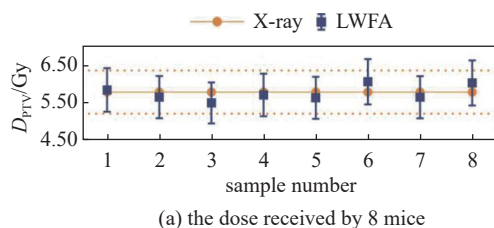
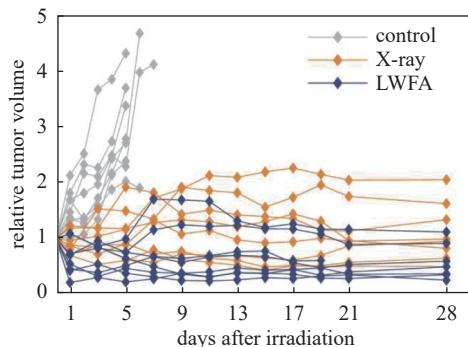


Fig. 5 The evolution of plasma wakefield

图 5 等离子体尾场的演化过程



(a) the dose received by 8 mice



(b) the changes in tumor volume for three groups of mice

Fig. 7 Tumor control in the irradiated mice

图 7 受照射小鼠的肿瘤控制情况

QED)的范畴。在此背景下, 超强激光诱导真空衰变产生正负电子对的现象引起了广泛研究关注。多光子跃迁机制在该过程中扮演关键角色, 然而其具体跃迁路径与通道特性尚未得到充分揭示。为此, 我们联合中国矿业大学(北京)基于计算量子场论方法, 研究了时空非均匀电场中通过多光子跃迁机制产生正负电子对的过程<sup>[38]</sup>。研究揭示了两种截然不同的粒子对产生通道: 对称通道与非对称通道, 如图 8 所示。我们通过将描述激光诱导多光子电子对产生的场论模型映射至量子力学含时微扰理论框架, 推导出了能够描述真空衰变中非对称跃迁行为的半解析解, 证明了非对称通道的出现源于强激光场固有的空间不均匀性。研究还进一步证实, 若忽略场的空间非均匀性, 将导致跃迁振幅计算偏差, 并影响对正负电子对产生通道的正确识别。

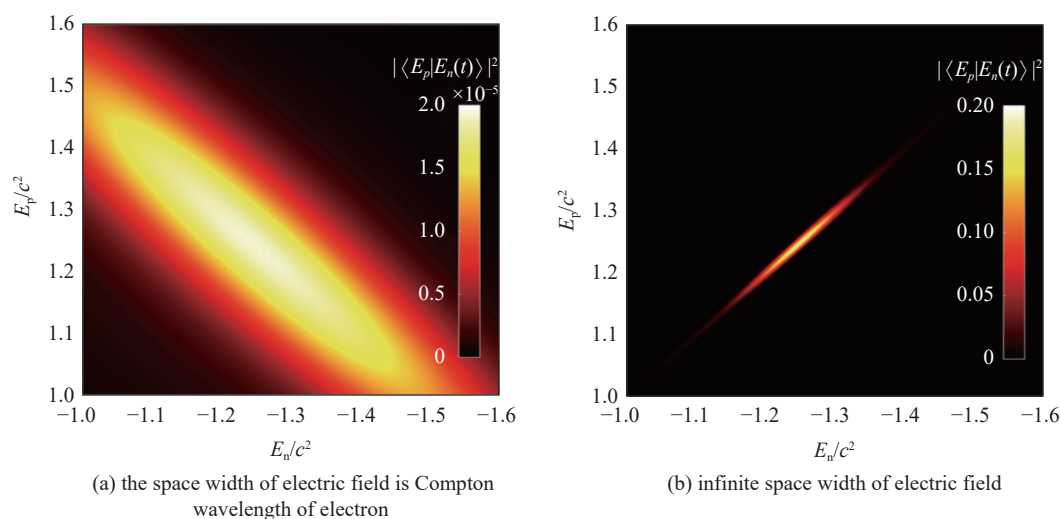


Fig. 8 The transition probability for electron of negative state

图 8 负能态电子的跃迁几率

### 3 结 论

随着激光加速器应用研究的快速发展和日趋成熟, 建设能够服务多学科用户的激光平台已成为重要发展趋势。当前, 基于超强激光的全光射线源技术在全球范围内受到广泛重视, 多个国际科研机构正积极筹建相关大科学装置并推动其实际应用。在此背景下, 郑州大学超短超强激光平台应运而生。该平台采用新一代超短超强激光技术, 在显著降低成本的同时大幅提升了系统可靠性。建成后, 将成为国内领先的基于超强激光的驱动超快光源用户装置, 为科学前沿探索、国家与区域重大战略需求以及产业关键技术攻关提供重要支撑。平台定位为一个跨学科、综合性、多功能的科研与技术创新基地, 致力于推动重大基础科学突破与核心关键技术研发。

此外, 郑州大学强场物理与先进加速团队联合国内外知名科研团队在激光等离子体物理与新型粒子加速研究中取得了一系列重要进展: 通过飞秒激光塑形技术实现对气体密度的精确调控, 建立了高重复频率、高效率的激光质子加速方案; 利用飞秒相对论电子显微镜首次实现了对激光尾波场全周期演化动态的高时空分辨成像; 成功研制基于激光尾波加速技术的超高能电子放疗原型装置, 并在小鼠模型中验证了其显著的肿瘤生长抑制效果; 将描述真空衰变的量子场论模型拓展至含时微扰理论体系, 揭示了非对称多光子跃迁通道的物理起源。

#### 参考文献:

- [1] Perry M D, Mourou G. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers[J]. *Science*, 1994, 264(5161): 917-924.
- [2] 李儒新, 冷雨欣, 徐至展. 超强超短激光及其应用新进展[J]. *物理*, 2015, 44(8): 509-517. (Li Ruxin, Leng Yuxin, Xu Zhizhan. Progress in superintense ultrafast lasers and their applications[J]. *Physics*, 2015, 44(8): 509-517)
- [3] Kiriya H, Mori M, Pirozhkov A S, et al. High-contrast, high-intensity petawatt-class laser and applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21: 1601118.
- [4] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [5] Yoon J W, Kim Y G, Choi I W, et al. Realization of laser intensity over  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>[J]. *Optica*, 2021, 8(5): 630-635.
- [6] Botner O, Ingelman G, Irbäck A, et al. The Nobel committee for physics[Z]. *The Nobel Prize in Physics 2018: Popular Science Background*, 2018: 1-7.
- [7] Mourou G A, Korn G, Sandner W, et al. ELI white book: science and technology with ultra-intense lasers[R]. Berlin: THOSS Media GmbH, 2011.
- [8] Hernandez-Gomez C. Overview of the central laser facility (CLF)[R]. Didcot: CLF, 2016-2017: 6-8.
- [9] Papadopoulos D N, Zou J P, Le Blanc C, et al. The Apollon 10 PW laser: experimental and theoretical investigation of the temporal characteristics[J]. *High*

- [Power Laser Science and Engineering](#), 2016, 4: e34.
- [10] Khazanov E, Shaykin A, Kostyukov I, et al. eXawatt center for extreme light studies[J]. [High Power Laser Science and Engineering](#), 2023, 11: e78.
- [11] Bromage J, Bahk S W, Bedzyk M, et al. MTW-OPAL: a technology development platform for ultra-intense optical parametric chirped-pulse amplification systems[J]. [High Power Laser Science and Engineering](#), 2021, 9: e63.
- [12] 上海超强超短激光实验装置研制进展——专访中国科学院上海光学精密机械研究所李儒新院士[J]. [强激光与粒子束](#), 2020, 32: 011002. (Development progress of Shanghai superintense ultrafast lasers facility[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2020, 32: 011002)
- [13] Li Hongyang, Liu Keyang, Wang Xinliang, et al. Timing fluctuation correction for the front end of a 100-PW laser[J]. [High Power Laser Science and Engineering](#), 2023, 11: e52.
- [14] 彭宇杰, 许毅, 於亮红, 等. 上海超强超短激光实验装置研制进展[J]. [中国激光](#), 2024, 51: 1101002. (Peng Yujie, Xu Yi, Yu Lianghong, et al. Review on development of shanghai super-intense ultra-fast laser facility[J]. [Chinese Journal of Lasers](#), 2024, 51: 1101002)
- [15] 陈民, 刘峰, 李博原, 等. 激光等离子体尾波加速器的发展和展望[J]. [强激光与粒子束](#), 2020, 32: 092001. (Chen Min, Liu Feng, Li Boyuan, et al. Development and prospect of laser plasma wakefield accelerator[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2020, 32: 092001)
- [16] Tajima T, Dawson J M. Laser electron accelerator[J]. [Physical Review Letters](#), 1979, 43(4): 267-270.
- [17] 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.
- [18] Malka V, Faure J, Gauduel Y, et al. Principles and applications of compact laser-plasma accelerators[J]. [Nature Physics](#), 2008, 4(6): 447-453.
- [19] Rousse A, Ta Phuoc K, Shah R, et al. Production of a keV X-ray beam from synchrotron radiation in relativistic laser-plasma interaction[J]. [Physical Review Letters](#), 2004, 93: 135005.
- [20] Kneip S, McGuey C, Martins J L, et al. Bright spatially coherent synchrotron X-rays from a table-top source[J]. [Nature Physics](#), 2010, 6(12): 980-983.
- [21] Corde S, Ta Phuoc K, Lambert G, et al. Femtosecond x rays from laser-plasma accelerators[J]. [Reviews of Modern Physics](#), 2013, 85(1): 1-48.
- [22] 谢波, 张晓辉, 李天月, 等. 拍瓦飞秒激光与近临界密度等离子体相互作用的电子加速及 betatron 辐射产生数值模拟[J]. [强激光与粒子束](#), 2025, 37: 091002. (Xie Bo, Zhang Xiaohui, Li Tianyue, et al. Numerical study of electron acceleration and betatron radiation based on interaction of petawatt femtosecond laser with near-critical-density plasma[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2025, 37: 091002)
- [23] Ta Phuoc K, Corde S, Thauray C, et al. All-optical Compton gamma-ray source[J]. [Nature Photonics](#), 2012, 6(5): 308-311.
- [24] Liu Cheng, Golovin G, Chen Shouyuan, et al. Generation of 9 MeV  $\gamma$ -rays by all-laser-driven Compton scattering with second-harmonic laser light[J]. [Optics Letters](#), 2014, 39(14): 4132-4135.
- [25] 杜应超, 陈寒, 张鸿泽, 等. 紧凑型单能伽马射线源[J]. [强激光与粒子束](#), 2022, 34: 104010. (Du Yingchao, Chen Han, Zhang Hongze, et al. A very compact inverse Compton scattering gamma-ray source[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2022, 34: 104010)
- [26] Nakajima K. Towards a table-top free-electron laser[J]. [Nature Physics](#), 2008, 4(2): 92-93.
- [27] Wang Wentao, Feng Ke, Ke Lintong, et al. Free-electron lasing at 27 nanometres based on a laser wakefield accelerator[J]. [Nature](#), 2021, 595(7868): 516-520.
- [28] Pompili R, Alesini D, Anania M P, et al. Free-electron lasing with compact beam-driven plasma wakefield accelerator[J]. [Nature](#), 2022, 605(7911): 659-662.
- [29] Labat M, Cabadağ J C, Ghaith A, et al. Seeded free-electron laser driven by a compact laser plasma accelerator[J]. [Nature Photonics](#), 2023, 17(2): 150-156.
- [30] Schroeder C B, Esarey E, Geddes C G R, et al. Physics considerations for laser-plasma linear colliders[J]. [Physical Review Accelerators and Beams](#), 2010, 13: 101301.
- [31] USDOE Office of Science. Advanced accelerator development strategy report: DOE advanced accelerator concepts research roadmap workshop[R]. USDOE Office of Science, 2016.
- [32] European Strategy Group. 2020 Update of the European strategy for particle physics[R]. Geneva: CERN Council, 2020.
- [33] Assmann R W, Weikum M K, Akhter T, et al. EuPRAXIA conceptual design report[J]. [The European Physical Journal Special Topics](#), 2020, 229(24): 3675-4284.
- [34] Seemann O, Wan Yang, Tata S, et al. Laser proton acceleration from a near-critical imploding gas target[J]. [Physical Review Letters](#), 2024, 133: 025001.
- [35] Wan Y, Andriyash I A, Hua J F, et al. Two-stage laser acceleration of high quality protons using a tailored density plasma[J]. [Physical Review Accelerators and Beams](#), 2019, 22: 021301.
- [36] Wan Yang, Tata S, Seemann O, et al. Real-time visualization of the laser-plasma wakefield dynamics[J]. [Science Advances](#), 2024, 10: ead3595.
- [37] Guo Zhiyuan, Liu Shuang, Zhou Bing, et al. Preclinical tumor control with a laser-accelerated high-energy electron radiotherapy prototype[J]. [Nature Communications](#), 2025, 16: 1895.
- [38] Li C K, Zhou X X, Chen Q, et al. Transition signatures for electron-positron pair creation in space-time inhomogeneous electric field[J]. arXiv preprint arXiv:2408.09402: 2024.