

超短超强激光驱动新型粒子加速器： 机遇和挑战*

2018-11-13收到

† email: zmsheng@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20181201

盛政明^{1,2,†} 陈民¹ 翁苏明¹ 远晓辉¹ 陈黎明³ 张杰^{1,3}

(1 上海交通大学物理与天文学院 激光等离子体教育部重点实验室 上海 200240)

(2 李政道研究所 上海 200240)

(3 中国科学院物理研究所 北京 100190)

Novel particle accelerators driven by ultrashort and ultraintense lasers: opportunities and challenges

SHENG Zheng-Ming^{1,2,†} CHEN Min¹ WENG Su-Ming¹ YUAN Xiao-Hui¹CHEN Li-Ming³ ZHANG Jie^{1,3}

(1 Laboratory for Laser Plasmas (MoE), School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2 Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai 200240, China)

(3 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 2018年诺贝尔物理学奖授予了因发明“光学镊子”和“啁啾激光脉冲放大”两项重大技术的3位科学家。其中啁啾激光脉冲放大技术使得人们在实验室获得了前所未有的超短超强激光脉冲。文章简要介绍了由超短超强激光开拓的新兴科学前沿，特别是这种强激光技术推动下的新型粒子加速器研究的发展、机遇和挑战。

关键词 啁啾激光脉冲放大技术，超短超强激光脉冲，新型粒子加速器，激光尾波加速，激光加速离子，诺贝尔物理学奖

Abstract The 2018 Nobel Prize in Physics was awarded to Arthur Ashkin for his invention of optical tweezers, and to Gérard Mourou and Donna Strickland for their invention of chirped pulse amplification for optical pulses. The latter technique has enabled us to generate intense ultrashort laser pulses with unprecedented peak powers. We present a brief overview of the new scientific frontiers carved out with such lasers. In particular, the development, opportunities and challenges associated with novel types of particle accelerators driven by intense ultrafast lasers will be discussed.

Keywords chirped pulse amplification, intense ultrashort laser pulses, novel particle accelerators, laser wake field acceleration, laser driven ion acceleration, Nobel Prize in Physics

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CBA01500)和国家自然科学基金(批准号: 11721091)资助项目

1 啁啾脉冲放大技术及其催生的超强激光竞赛

2018年诺贝尔物理学奖授予了美国科学家亚瑟·阿斯金(Arthur Ashkin)、法国科学家杰哈·莫罗(Gérard Mourou)和加拿大科学家唐娜·斯特里克兰(Donna Strickland),以表彰他们在激光物理研究领域作出的开创性贡献(图1)。其中阿斯金的贡献是发明了一种“光学镊子”,作为一种全新的操控工具可以在不损伤生物系统的条件下移动细胞、细菌等微生物,因而对微生物系统的研究产生了革命性的影响。而莫罗和斯特里克兰则发明了一种产生“高强度、超短时间光脉冲”的方法,即啁啾激光脉冲放大技术(简称CPA技术)^[1]。CPA技术为基础科学和应用科学研究开拓了一片全新的领域,它能够让激光以极高的精确度在各种材料上进行切割、钻洞等操作,因而在工业和医疗等方面具有广泛的应用。在基础科学领域,CPA技术的应用则是更加广泛而深入,开拓了超快非线性光谱、阿秒科学、新型粒子加速器、高能密度科学、新型激光核聚变,乃至实验室天体物理学等诸多新研究领域和新研究前沿^[2, 3]。

激光强度表征的是单位面积上辐照的激光功率,而激光功率等于激光能量除以激光脉冲宽度。在CPA技术发明以前,各种产生超短脉冲的技术已经出现,但是由于受激光放大介质强度破



图1 2018年诺贝尔物理学奖获得者: Arthur Ashkin(左), Gérard Mourou(中), Donna Strickland(右)

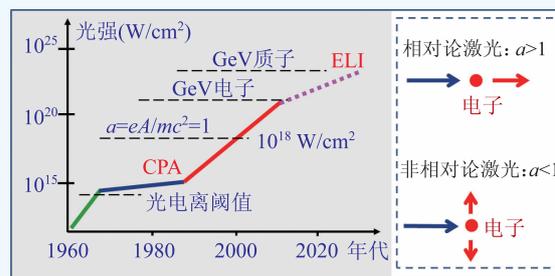


图2 实验室获得激光强度随年代变化示意图(左上),随着莫罗和斯特里克兰发明的CPA技术的出现使得人们能够将激光强度推进到所谓的相对论激光强度(约 10^{18} W/cm²)。当激光强度从非相对论提高到相对论条件时,电子在光场中的运动从主要是横向振荡变成纵向运动主导(右上)

坏阈值的限制,超短脉冲激光没有办法得到充分的放大。莫罗和斯特里克兰在1985年发明的CPA技术,巧妙地利用了短脉冲激光具有很宽频谱的特点。在CPA技术中,可先利用一对光栅将短脉冲激光在时间上展宽数万倍,然后将其通过晶体等放大介质进行能量放大至晶体破坏阈值的上限,接着在真空中通过另一对光栅将能量放大后的展宽激光脉冲在时间上压缩至原来的超短脉冲宽度,从而大幅度提高了超短激光脉冲的强度。从该技术发明至今,人们已经将激光脉冲的强度和功率极限提高了7—8个数量级,由此将激光与物质相互作用研究推进到之前难以想象的相对论强激光物理新领域(图2)。目前采用CPA放大技术的激光器已经可以产生脉宽短至数飞秒(1 fs= 10^{-15} s)、峰值功率高到数拍瓦(1 PW= 10^{15} W)的激光脉冲。但对于更高功率的激光装置,人们还在拓展CPA技术的能力极限,并发展其他新技术,譬如光参量放大(OPCPA)技术^[4]和准参量放大技术(QPCPA)^[5]。

早在2003年,《科学》杂志报道了美国、英国、日本等多个强激光实验室进行的一场建设拍瓦级高功率激光器的比赛^[6]。不到10年间,不仅有十多个实验室建成拍瓦量级激光^[7],另有多家激光公司可以提供商品化的拍瓦级激光器。但就像世界T500最快计算机的排名竞赛一样,人们对激光高功率的追求竞赛一直没有终止。2005年起,莫罗回到他的母校巴黎综合理工学院,推

动在欧盟建设10—100 PW的超强激光计划,即极端光基础设施(Extreme Light Infrastructure, ELI)^[8]。该计划分两步走,分阶段建设10 PW级和100 PW级超强激光设施。在莫罗等人的努力下,欧盟于2012年启动了ELI极端光场激光设施建设,在捷克、罗马尼亚、匈牙利建设用于不同科学目标的10 PW量级的超强激光实验装置,分别称为ELI-Beamlines装置、ELI-NP装置、ELI-ALPS装置,总投资规模超过8.5亿欧元,预计在2019年后逐步开始运行。目标是在最高的激光强度下和最短的时间尺度里研究光与物质相互作用。除了ELI设施外,法国也在建设10 PW(150 J/15 fs)强激光实验装置Apollo。美国和俄罗斯同行也提出100 PW量级强激光装置设计,但目前还没有进入实施。

在亚洲各国中,中日韩印四国在强激光装置建设及其应用研究的发展也非常迅速。其中日本大阪大学2015年建成了当时峰值功率最高的2 PW激光装置LFEX,日本关西光子科学研究所(KPSI)建成有重复频率的近拍瓦激光装置。韩国基础科学研究所(IBS)的相对论激光科学中心2013年建成了双束拍瓦激光系统,目前正计划将其中一束升级至4 PW。印度主要采用商用的高功率激光系统开展相关应用研究。中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院物理研究所、中国工程物理研究院激光聚变中心多年前已建成了拍瓦级激光系统。其中中国科学院上海光学精密机械研究所在2017年报道产生了超过5 PW激光^[9],近期10 PW激光装置(SULF)即将投入使用。作为上海自由电子激光线站的一部分,2018年启动了100 PW激光装置(SEL)建设,有望在国际上建成第一台百拍瓦级超高功率激光装置。

另一方面,峰值功率在几十太瓦(1 TW=10¹² W)量级的激光系统已经可以开展很多极端端

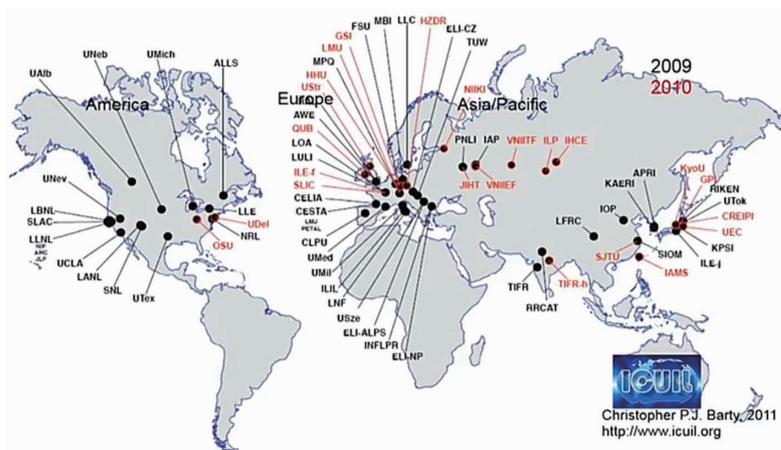


图3 全球强激光实验室分布(引自 <https://www.icuil.org/>。图为2011年统计结果,后续建设的强激光实验室,如北京大学、清华大学最近建造的实验室尚未包括)



图4 上海交通大学200 TW激光系统以及激光等离子体加速实验靶场

强条件下的非线性科学问题研究。这类激光系统所需实验空间在100 m²之内,这是中小型规模的大学实验室可以负担得起的实验室系统。正因如此,目前世界上除了一些国家级实验室之外,还有几十个中等规模的实验室均建有这种激光装置(图3)。上海交通大学、北京大学、清华大学等单位则建有峰值功率在200 TW级的强激光实验室。典型的200 TW级的激光系统和实验靶场如图4所示。

2 超强激光催生的新兴交叉学科

目前世界上不计其数的实验室利用峰值功率在太瓦以下的飞秒强激光开展各类基础和应用研究。当激光峰值功率达到10 TW以上,其聚焦强度可以接近或者达到10¹⁸ W/cm²,即所谓的相对论阈值强度。在该激光强度下,一般物质都会被高价电离,形成等离子体。其中的自由电子在激光

场中的横向振荡速度接近真空中光速，同时激光场的磁场分量大到足以引起极高的沿着激光传输方向的前向加速，由此激光与物质的相互作用被推进到了相对论光学这个全新的区域^[2, 10]。目前这类激光器催生的研究方向包括：新型粒子加速器、超快阿秒科学、光核物理、非线性量子电动力学效应、新型激光核聚变、高能量密度物理及实验室天体物理等。莫罗教授发起了2年一次的超强激光系列会议(ICUIL)，除包括超强激光技术外，讨论主题涵盖上述各个方向。其中2008年第3届会议由上海交通大学承办，在中国召开。目前全球有数十个实验室开展了相对论激光场强下的超短超强激光脉冲与物质相互作用的基础科学和应用科学研究。

新型粒子加速器是利用强激光与不同密度的靶(如气体靶、固体靶、团簇靶等)相互作用，在等离子体中激发极强的纵向场，产生不同的加速结构来提速包括电子和离子的带电粒子。相应的加速梯度比传统加速器高出3—4个数量级，这为加速器的小型化提供了可能。目前国际上包括美国、欧洲等都有相应的专门系列会议(LPAA、AAC、EAAC)。有关这方面的研究，在下文将做进一步介绍。

利用激光脉冲的超强和超短的特点，通过激光与固体或气体靶作用，可以产生脉宽在阿秒量级的超短电子束，由此也为产生阿秒脉冲提供了可能。需要指出的是，莫罗教授的理念之一是为了产生更强激光需要将激光脉冲做得更短(频率更高)。欧盟ELI-ALPS装置目标是产生更短更强的光脉冲。目前该领域国际上也有专门的系列会议(Attosecond Physics)。

所谓光核物理就是利用超强激光来驱动核过程。虽然目前的激光强度还不足以直接驱动核反应，但其与物质作用过程中可以产生大量的高能粒子和伽马射线，以促发各种核反应过程，开展包括医用同位素产生、强流中子源、医学和工业应用核成像、核天体物理等方面的研究。目前该主题有2年一次的国际会议(Nuclear Photonics)。

当激光的峰值功率达到10 PW量级时，其聚

焦强度可以达到 10^{23} W/cm²，由此在激光与等离子体作用中产生若干全新的非线性过程。其中包括辐射阻尼效应、高能伽马光子产生、光子—光子诱导正负电子对产生等非线性QED效应。比较容易产生上述非线性QED效应的情形是高能电子束与高强度激光发生相向碰撞作用，或者两个高强度激光在等离子体中发生相向碰撞。但这个激光强度还不足以在真空中直接产生非线性QED效应。产生真空QED效应，需要把激光强度再提高5个数量级^[11]。

在新型超短超强激光产生不久，人们就设想将这种激光应用于激光核聚变。其中一个著名的新型激光聚变概念，即快点火(Fast ignition)激光核聚变由美国利弗莫尔国家实验室的Tabak等人在1994年提出来。该方案将激光聚变分成两个过程来实施，首先采用传统激光聚变方式，用多路高能长脉冲激光将聚变靶进行对称压缩，然后利用高强度短脉冲与预压缩的聚变靶作用，产生大量超热电子对预压缩的氘氚靶加热直至点火。后来日本和英国的学者将该快点火方案进行改进，采用一种锥形靶来引导并以实验验证，取得了较好的效果。目前人们还在探讨其他新的快点火聚变方式。与此相关的是更为基础的高能量密度物理及实验室天体物理。所谓高能量密度物理主要研究能量密度超过 10^{11} J/m³，或者压强超过一百万大气压的物质系统。这种高能量密度物质状态广泛存在于天体环境，现在这种高能量密度物质的状态已经可以由新型超短超强激光来产生。利用强激光产生高能量密度物质状态，为研究天体物理现象提供了独特的条件^[12]。有关激光聚变、高能量密度物理和实验室天体物理的研究有大型的系列国际会议(IFSA)，也有中小型的系列国际研讨会议(ICHD、ICHEDP、HEDLA、HPLSE、ICMRE等)。

3 超强激光驱动新型粒子加速器

3.1 激光尾波加速

粒子加速和辐射研究始终推动着人类科学的

进步,迄今为止超过一半的诺贝尔物理学奖与粒子加速及其应用相关。加速器的核心参数之一是被加速粒子的能量,它正比于加速场强和加速距离的乘积。由于传统加速器的场强局限(通常小于MV/cm),粒子能量越大,加速器规模也必然越大。譬如,欧洲核子中心的14 TeV的强子加速器,其周长已达27 km。为了实现更高能加速或者实现加速器小型化,亟需发展新型加速技术,从单一提升加速距离的角度转变到大幅提高加速电场强度。

粒子加速器主要包括电子加速器和离子加速器两种。对于电子加速器而言,激光尾波加速是当今最有前途的激光加速新机制之一。它利用超短超强激光在等离子体中共振激发出大幅的纵向尾波场来加速电子。整个过程类似于人在船尾波中做冲浪运动(图5)。激光尾波场的最大特点是超高的加速场强,由于加速介质为已经被击穿的等离子体,不受传统加速器结构击穿阈值的限制,其加速梯度可以超过传统加速器1000倍以上,使得实现加速器小型化成为可能。与此同时,该加速机制有潜力使得产生的电子束具有更高的亮度、更短的脉宽、更高的能量。因此目前这种加速机制已经得到包括美国、欧洲传统加速器实验室在内的70多个实验室的广泛重视和大量投入。激光尾波加速的原理最早由美国加州大学Tajima和Dawson于1979年提出^[13],其发展历经多个阶段。初期由于缺少短脉宽的强激光,无法在等离子体中实现大振幅激光尾波共振激发。直到1985年CPA激光技术发明后,将激光强度提高了6个数量级以上,使得单脉冲共振激发大幅尾波成为可能,极大地推动了激光尾波加速的研究。1995年人们在实验上首次实现了大幅尾波激发,观测到超高的加速场强^[14]。2004年,美英法的3个研究小组同时报道了准单能电子束产生,被*Nature*作为封面文章以“Dream beam(梦之束)”发表,成为该领域的一个重要里程碑^[15]。由此,激光尾波加速从概念提出进入快速发展期。目前世界上多个实验室均可以通过单级激光等离子体加速在厘

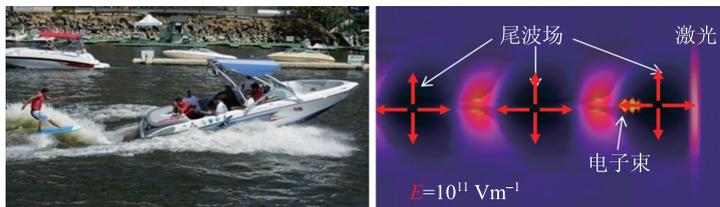


图5 冲浪运动与激光等离子体尾波加速的对比。右图是短脉冲激光在等离子体中激发的激光尾场结构示意图,其中纵向加速场强可达 10^{11} V/m

米尺度的加速距离内产生能量超过1 GeV的准单能电子束。但为了使得这些电子束能够获得广泛应用,激光尾波加速仍然面临诸多巨大挑战,主要包括:面向电子束成像、辐射源应用等研究需要大幅提升电子加速稳定性及解决如何产生高品质电子束,如何基于激光尾波加速产生高亮度辐射的问题;面对高能对撞机研究,需要解决如何实现正电子加速,如何实现多光束驱动的尾波加速级联,如何提高重复频率以获得高的平均流强等问题。

为了解决诸多挑战性难题,激光尾波加速自2004年以来在全世界范围内得到了广泛的关注和迅猛的发展。我国也正是在这段时间内,在上海交通大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院物理研究所、清华大学、中国工程物理研究院激光聚变中心等单位开展了相关研究,并取得了多项重要成果,在世界上占有了一席之地。下面简单介绍最近15年以上各方面的国际主要研究进展及中国科学家的贡献。

为了获得高品质的电子加速,必须解决高质量的电子注入问题。由于激光尾波尺度小且存在加速和减速两个不同的相位区域,使得受控地将电子精确注入到只有10 μm 大小的以近光速运动的加速结构中极其困难。2004年人们虽然观测到准单能电子束的产生,但该产生机制是基于尾波破裂产生的电子自注入,这个高度非线性过程不是完全可控的。基于理论和数值模拟研究,人们提出了一系列方案来实现稳定可控的电子注入,主要包括对撞光场注入、密度梯度注入、原子高价离子注入,以及外注入等,由此提高加速稳定性及提升加速电子束在能散和发射度方面的品

质^[16]。这些方案,近年来都得到了实验验证及进一步改进。

为了获得紧凑型高品质高强度的尾场加速辐射源,人们不但利用尾波纵向的强大电场来加速电子,也利用尾波横向的强大电场或激光场来对电子实施横向波荡,取代数十米尺寸的传统磁波荡器来激发X射线辐射,由此使系统更加简单和紧凑。特别是,由于激光加速产生的超快X射线脉宽可以短至飞秒或者更低,因此它能够提供更短的时间分辨,对物质的瞬态结构和超快动力学研究具有重大意义。莫罗在发明CPA技术过后,也将一部分研究兴趣投向了这方面。他与上海交通大学和中国科学院物理研究所陈黎明曾有过长期的合作关系,并共同发表了多篇研究论文。目前辐射机制主要有尾场中的Betatron辐射和电子束激光束非线性Thomson散射两种,前者在软X射线至硬X射线辐射频段被广泛采用,后者在MeV甚至几十MeV伽马光子产生方面越来越受到重视^[17]。

在面向未来对撞机的高能电子束产生方面,人们主要是利用等离子体通道导引技术,大幅提升单级电子加速能量,以及通过级联技术实现多个激光驱动的尾波对电子进行串联加速。在单级加速方面,现有的理论和模拟均表明,在均衡加速梯度以及激光电子束能量转换效率两方面后,利用拍瓦激光在密度为 10^{17}cm^{-3} 的等离子体中,将电子单级加速到10 GeV是最合适的选择。2018年在美国AAC会议上,劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)的Leemans等人报道他们已经实现了单级7.8 GeV电子加速。在级联加速方面,2016年LBNL实验室首次实现了利用等离子体镜和等离子体透镜分别实现对第二束激光的导引和第一级加速电子束的聚焦传输,实现了3.5%的电子从第一级耦合到第二级,并进一步获得百MeV能量提升,这被视为激光尾波加速的又一里程碑^[18]。欧盟正在实施一个激光等离子体加速器用户装置设计项目EuPRAXIA^[19],拟从2020年起开始建设一个5 GeV的激光等离子体加速用户装置。

在以上诸多研究中,中国科学家也做出了重

要的贡献。虽然电子注入方式目前已经有很多种,但就实现难易程度和加速稳定性及品质控制方面来看,目前密度梯度注入和离化注入得到了更多的关注。其中,离化注入机制最早由陈民等在2006年提出^[20],在2007—2010年间被国际同行广泛实验验证^[21]。近年来上海交通大学团队、上海光学精密机械研究所团队、清华大学团队及国际同行,又提出了多种改进方案,如单激光注入—加速分级方案、双色激光离化注入、电子束激光耦合方案等,进一步将离化注入机制进行优化,极大地降低了电子束的绝对能散和发射度。上海交通大学和中国科学院物理研究所联合实验团队首次获得了离化注入的准单能电子束,并基于这些方案已经获得能量达到1.2 GeV的准单能电子束,理论上可以在GeV左右的电子加速中实现单个峰能散低于0.5%^[22, 23]。上海光学精密机械研究所又提出了通过密度调制,实现加速段的电子束相空间压缩,进一步降低电子束能散^[24];清华大学团队提出了离化电子相空间演化理论,厘清了电子束发射度增长机制^[25]。在多级加速方面,上海交通大学团队提出了一种全新的基于弯曲等离子体通道的多级激光尾波场级联方案^[26]。在该方案中电子束始终在直行等离子体通道中传输,同时利用曲率渐变的弯曲等离子体通道将第二束激光从直行通道外平稳地引导到直行通道中心,这样舍弃了复杂的等离子体镜和等离子体透镜,使得级联结构简单很多。大规模数值研究表明,该方案可以实现100%的级联耦合效率,并且将级联间距从数十厘米量级缩短到无缝级联^[27]。除此之外,中国工程物理研究院八所和北京大学、中国科学院物理研究所等单位也在电子加速品质和单级加速能量两方面开展了理论和实验研究,譬如利用特殊毛细管结构,延长尾波加速的失相长度,提升单级最大加速能量;利用等离子体真空边界层结构来实现高品质电子注入等。

中国科学院物理研究所和上海交通大学团队提出了“波荡注入”机制,克服了电子加速中电荷量和电子能量、电子品质和波荡幅度等之间存在着相互制约的内秉矛盾,使电子获得了更高的

能量、更大的电荷量和波荡振幅，由此极大地提高了Betatron辐射的单发光子产额，峰值亮度达 10^{23} phs/s/mm²/mrad²/(0.1% BW)量级^[28]。团队进一步利用离化注入机制，使电子从气体原子电离后在激光尾波场中部很快注入并实现加速，该电子束同时在激光场中获得大的Betatron振荡幅度，由此极大提高了X射线产额和光子能量。利用这种简单方法，在不到100 TW的装置上实验获得目前最高的X射线光子产额 8×10^8 /发，能段在110 keV至1 MeV区间的光子 10^8 /发，成为获得稳定、简单、高效地激发高能X射线辐射的新途径^[29]。该团队还深入研究了以团簇和固体靶为介质通过强激光产生的超快飞秒X射线^[30]。以上这些系列工作为国家重大项目的立项和拓展研究提供了有力支撑。例如已经作为国家重大科技基础设施建设项目“综合极端条件实验设施”的重要平台——超快X射线动力学研究装置投入建设^[31]。建成后将超越加拿大、德国等超快X射线研究平台相应指标。

3.2 激光驱动离子加速

除了电子加速，激光驱动离子加速也是激光加速领域的热点研究课题。激光离子加速的一个重要驱动是产生可用于癌症治疗等医学应用的离子束。为此一般需要获得超过200 MeV的质子或者超过100 MeV/u的离子。与激光驱动电子加速的研究中尾场加速方案占据明显的主导地位相比，激光驱动离子加速的研究中目前还没有哪种加速机制取得主导优势。在激光驱动的离子加速中，物理更加的复杂和丰富；在不同的激光和靶参数区间存在着截然不同的加速机制，甚至在很多情况下多种加速机制可以互相共存、相互竞争。由于离子质量超过电子质量一千多倍，激光要把离子直接加速到相对论速度所需的强度要比电子加速中所需的强度高出6个数量级，这是目前激光技术还无法实现的。

在这种情况下，一般先利用强激光与固体靶或者其他高密度靶作用产生大量的高能电子，再

利用高能电子与背景等离子体之间的静电分离场来加速离子，如图6所示。譬如，人们发现强激光与固体靶作用可以在靶前表面产生大量向靶内传输的高能电子，当这些高能电子穿过固体靶后可以在固体靶后表面产生峰值强度达到 10^{12} V/m的超强鞘层场。该鞘层场可以瞬间电离靶后表面的原子，并将产生的离子加速到MeV以上能量。这就是通常所说的靶后鞘层加速(TNSA)机制^[32]。因为该机制对激光和靶的条件要求相对比较宽松，所以是目前实验上被研究最多的，也是最稳定的一种高能离子产生机制。2000年美国利弗莫尔国家实验室的Snively等人利用拍瓦超强激光打在微米厚度的金属薄膜靶上，通过TNSA机制在靶背法线方向得到最高能量为58 MeV的质子束^[33]。随着人们对TNSA的认识逐渐深入以及激光器的能量、功率以及对比度的逐渐提高，TNSA最大截止能量记录被不断刷新。2016年，德国GSI的Wagner等人通过控制靶厚度将加速质子截止能量提升至85 MeV^[34]。然而TNSA机制所产生的离子束能谱普遍呈现出指数下降谱的特征，而在离子癌症治疗等应用中所需要的离子束必须是单能或者准单能的。为了降低TNSA机制中的离子束的能散，人们采用不同的靶设计，譬如通过双层靶、等离子体聚焦镜技术等获得了准单能的

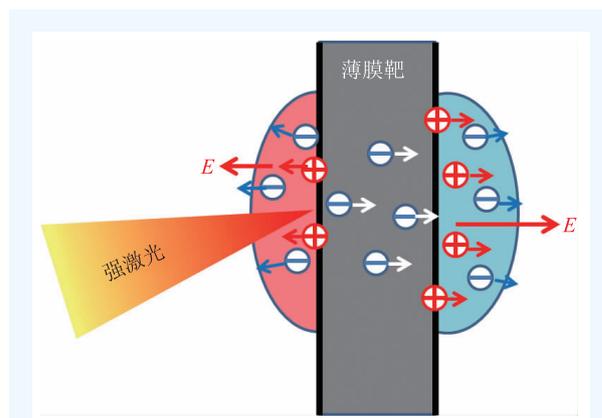


图6 强激光与薄膜靶作用中表面鞘层加速离子的机制示意图。激光作用产生大量超热电子之后在靶表面建立极强的鞘层场，该鞘层场可以加速靶表面的离子。当激光强度足够强和薄膜靶足够薄时，该鞘层场可以以一定速度运动，导致辐射压加速机制

离子束^[35]。

虽然TNSA机制总体上比较稳定,但其加速效率还是太低,获得的离子束能谱也不理想,因此人们在寻求其他新的离子加速机制。其中一种新机制为无碰撞冲击波加速。它是由大量高能电子在固体靶内传输时所激发的一种具有双层结构的静电冲击波,其传播速度由高能电子的温度和离子质量决定,最高可达数倍离子声速(马赫数 $M>1$)^[36]。近年来在利用强激光驱动无碰撞冲击波加速离子方面也取得了一系列实验研究进展。例如英国和美国的研究组在利用高功率CO₂激光与气体靶相互作用的实验中,观测到了冲击波产生的低能散的最高能量达到20 MeV的质子束^[37]。上海光学精密机械研究所利用强激光与膨胀的超薄靶相互作用,实验观测到了峰值能量9 MeV、能散30%的无碰撞冲击波加速质子束^[38]。上海交通大学团队利用200 TW激光装置,实验观测到同时包含无碰撞冲击波加速和TNSA加速的混合加速质子束^[39]。尽管如此,由于无碰撞冲击波的传播速度仍然远低于激光的速度,因此该机制在提高加速离子的能量上具有很大的局限;同时激光能量依然通过热电子为媒介传递给离子,所以在加速效率上也很难再大幅度提高。

随着激光聚焦强度的不断提高以及纳米厚度靶制备技术的不断进步,人们发现了以辐射压为主导的新型激光驱动离子加速机制^[40]。该机制中,在高强度激光脉冲的有质动力作用下固体靶中的电子可被整体推动着向前运动,从而可激发出更强的静电分离场用于加速离子。因为该机制中采用了同步前进的高能电子为媒介将激光能量传递给离子,所以它有望实现极为高效率的离子加速并产生准单能的离子束。在这种加速机制的物理研究上,中国科学院上海光学精密机械研究所和北京大学的学者做出了重要贡献,其中上海光学精密机械研究所团队通过数值模拟发现,利用相对论圆偏振激光与薄膜靶作用可以产生GeV准单能质子^[41],北京大学和上海交通大学团队分别提出了准单能辐射压离子加速所要求的激光和薄膜靶的纵向和横向参数匹配条件,即实现稳相

加速机制的条件^[42, 43]。在后续的研究中,北京大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、上海交通大学、国防科技大学、清华大学、中国工程物理研究院等团队开展了更多深入的实验和理论工作。北京大学颜学庆等与德国学者合作,首先在2009年开展了辐射压驱动离子加速实验研究,利用聚焦强度为 5×10^{19} W/cm²、超高对比度(10^{11})的圆偏振激光垂直入射到类金刚石碳薄膜靶上,在最优靶厚5.3 nm的情况下观察到碳离子C⁶⁺的单能峰结构^[44]。除了纳米超薄靶中的稳相模式辐射压加速机制,当高强度的圆偏振激光脉冲与具有一定厚度的固体靶相互作用时还可发生钻孔模式(hole-boring)的辐射压加速。当激光脉冲足够长时,基于钻孔模式的辐射压加速机制可将整个固体靶中的离子逐层地加速到较高能量,最终产生高通量的高能离子束^[45];所产生的高通量高能离子束可用于惯性约束核聚变中对预压缩燃料靶实现快点火。不论哪种模式的辐射压加速机制,为了提供稳定的有质动力产生同步前进的高能电子,通常都需要采用圆偏振激光脉冲。通常情况下,可以很容易地利用四分之一波片将激光器中输出的线偏振激光脉冲转换成圆偏振激光脉冲。然而对于高效稳定的辐射压加速所需要的10 PW级的超高功率激光脉冲,波片的口径需要达到米量级以避免光学损伤,这对于传统的光学器件加工技术仍是极大的挑战。最近,上海交通大学团队基于他们发现的强磁化等离子体中的极端法拉第效应,提出了等离子体偏振器的概念,可利用厘米尺寸的强磁化等离子体产生10 PW级的圆偏振激光脉冲^[46]。

除了恰当地减低靶的厚度,最近研究还发现可以通过恰当地降低固体靶密度来增加离子加速的效率。当靶的密度控制在所谓近临界密度时,由于相对论自透明效应,高强度激光可直接传输进入靶内,此时激光可实现对等离子体更加高效的“体加热”,在极短时间内产生大量的高能电子,实现介于无碰撞冲击波加速和辐射压加速之间的混合加速机制。同时在这种情况下,并不需要采用实验上更难以获取的圆偏振激光。基于这

类机制,目前国际上报道的质子最高能量已接近100 MeV,碳离子能量超过500 MeV^[47]。不过高能质子或者离子的能谱并没有明显的单能峰。

目前针对激光驱动离子束应用,需要解决的挑战包括:如何通过激光加速获得足够数量的高能离子,实现包括离子能量、加速效率的同步提升;如何实现高品质的离子束,包括能谱、发射度、稳定性控制;是否有可能通过激光加速获得10 GeV以上高能质子束等等。这方面的研究需要高功率激光技术、制靶技术、理论和数值模拟三方面的密切配合。需要指出的是,北京大学颜学庆团队将激光加速技术与传统加速器技术结合,针对激光产生的高能质子束通常具有散角大、能散大和流强高的特点,建成了激光加速离子束传输线系统,实现了离子束的收集、选能、束流传输控制,为开拓应用奠定了基础。上海光学精密机械研究所团队提出了一系列基于TNSA或辐射压加速机制的级联离子加速方案^[48]。上海交通大学和北京大学团队提出了基于辐射压加速和尾波场加速的混合离子加速方案^[49],并且对级联离子加速中的离子束品质控制进行了系统的理论研究^[50]。利用这些级联加速方案或混合加速方案有望突破离子束最终能量受单级加速效率不足的禁锢。

参考文献

- [1] Strickland D, Mourou G. *Opt. Commun.*, 1985, 56: 219
- [2] Mourou G, Tajima T, Bulanov S V. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, 78: 309
- [3] Drake R P, Norreys P. *New J. Phys.*, 2014, 16: 065007
- [4] Dubietis A, Jonušauskas G, Piskarskas A. *Opt. Commun.*, 1992, 88: 437
- [5] Ma J *et al.* *Optica*, 2015, 2: 1006
- [6] Service R F. *Science*, 2003, 301: 154
- [7] Danson C, Hiller D, Hopps N *et al.* *High Power Laser Sci. Eng.*, 2015, 3: 1
- [8] Extreme Light Infrastructure: <https://eli-laser.eu/>
- [9] Gan Z *et al.* *Optics Express*, 2017, 25: 5169
- [10] 盛政明等. 光物理研究前沿系列: 强场激光物理研究前沿. 上海: 上海交通大学出版社, 2015
- [11] Di Piazza A *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2012, 84: 1177

4 展望

由于CPA技术的发明和发展,人们在实验室可以产生前所未有的超强激光场,由此产生了超强电场和磁场、超高压强、超快X和伽马射线等,开拓了一系列全新的交叉学科,包括激光等离子体加速、激光核物理、高能量密度科学等。目前强激光技术的发展,一方面有望使得强激光系统变得更加稳定和可靠,且重复频率更高,为基础科学、工业、医疗等广泛应用奠定基础;另一方面,人们有望在实验室获得具有更高峰值功率和聚焦强度的激光系统,这将为开拓新的科学前沿提供可能。过去十多年在该领域的持续投入和人才培养,使得我国在该领域的研究水平已处于国际前列,并在超高功率激光装置建设、若干核心物理和技术研究上取得了一些原创性成果,引起了国际学术界的广泛瞩目。在超强激光技术应用的核心研究方向——强激光驱动等离子体加速和辐射,由于其极其广阔的应用前景,一直是该领域研究的焦点。通过物理实验、理论和数值模拟、制靶技术、高功率激光技术几方面的结合以及国内外学术界的通力合作,人们有望在不久的将来实现从激光加速到激光加速器的跨越,以造福人类。

- [12] Atzeni S, Meyer-ter-Vehn J. *The Physics of Inertial Fusion: Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter.* Oxford: Oxford University Press, 2004
- [13] Tajima T, Dawson J M. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, 43: 267
- [14] Nakajima K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74: 4428
- [15] Mangles S P D *et al.* *Nature*, 2004, 431: 535; Geddes C G R *et al.* *Nature*, 2004, 431: 538; Faure J *et al.* *Nature*, 2004, 431: 541
- [16] Esarey E *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2009, 81: 1229
- [17] Corde S *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2013, 85: 1
- [18] Steinke S *et al.* *Nature*, 2016, 530: 190
- [19] EuPRAXIA: <http://www.eupraxia-project.eu/>; Walker P A *et al.* *J. Phys. Conf. Ser.*, 2017, 874: 012029
- [20] Chen M *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2006, 99: 056109
- [21] Oz E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 98: 084801; Pak A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104: 025003

- [22] Mirzaie M *et al.* *Sci. Rep.*, 2015, 5: 14659
- [23] Zeng M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 114: 084801
- [24] Wang W T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117: 124801
- [25] Xu X L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112: 035003
- [26] Luo J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 120: 154801
- [27] Nakajima K. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 21
- [28] Yan W C *et al.* *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2014, 111: 5825
- [29] Huang K *et al.* *Sci. Rep.*, 2016, 6: 27633
- [30] Chen L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100: 045004; *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104: 215004
- [31] Chen L *et al.* *Chin. Phys. B*, 2018, 27: 074101
- [32] Wilks S *et al.* *Phys. Plasmas*, 2001, 8: 542
- [33] Snively R A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85: 2945
- [34] Wagner F *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116: 205002
- [35] Schwoerer H *et al.* *Nature*, 2006, 439: 445; Hegelich B M *et al.* *Nature*, 2006, 439: 441; Toncian T *et al.* *Science*, 2006, 312: 410
- [36] Denavit J. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 69: 3052; Silva L O *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92: 015002
- [37] Palmer C A J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106: 014801; Berger D *et al.* *Nat. Phys.*, 2012, 8: 95
- [38] Zhang H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 119: 164801
- [39] Fang Y *et al.* *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2016, 58: 045025
- [40] Esirkepov T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92: 175003
- [41] Zhang X *et al.* *Phys. Plasmas*, 2007, 14: 073101
- [42] Yan X Q *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100: 135003
- [43] Chen M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 103: 024801
- [44] Henig A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 103: 245003
- [45] Weng S M *et al.* *Sci. Rep.*, 2016, 6: 22150
- [46] Weng S M *et al.* *Optica*, 2017, 4: 1086
- [47] Kim I J *et al.* *Phys. Plasmas*, 2016, 23: 070701; Higginson A *et al.* *Nat. Commun.*, 2018, 9: 724
- [48] Wang W P *et al.* *Phys. Plasmas*, 2013, 20: 113107; Pei Z K *et al.* *Phys. Plasmas*, 2015, 22: 073113
- [49] Yu L L *et al.* *New J. Phys.*, 2010, 12: 045021; Zheng F L *et al.* *Phys. Plasmas*, 2012, 19: 023111; Liu M *et al.* *Phys. Plasmas*, 2018, 25: 063103
- [50] Wang H C *et al.* *Phys. Plasmas*, 2017, 24: 093117; Wang H C *et al.* *Phys. Plasmas*, 2018, 25: 083116

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕
—〈物理〉四十年集萃》

部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠《岁月留痕—〈物理〉四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏。

希望读者们爱上《物理》！

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址：北京市中关村南三街8号中科院物理所，100190

收款人姓名：《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行：农行北京科学院南路支行

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑

户名：中国科学院物理研究所

帐号：112 501 010 400 056 99

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话：010-82649470；82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

