

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

激光等离子体尾波加速器的发展和展望

陈民 刘峰 李博原 翁苏明 陈黎明 盛政明 张杰

Development and prospect of laser plasma wakefield accelerator

Chen Min, Liu Feng, Li Boyuan, Weng Suming, Chen Liming, Sheng Zhengming, Zhang Jie

引用本文:

陈民, 刘峰, 李博原, 翁苏明, 陈黎明, 盛政明, 张杰. 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. doi: 10.11884/HPLPB202032.200174

Chen Min, Liu Feng, Li Boyuan, Weng Suming, Chen Liming, Sheng Zhengming, Zhang Jie. Development and prospect of laser plasma wakefield accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 092001. doi: 10.11884/HPLPB202032.200174

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200174>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

神光 II 升级装置激光加速质子照相初步实验研究

Proton radiography of indirect-driven implosion by high-intensity laser generated protons on SG II-U laser facility
强激光与粒子束. 2017, 29: 092001 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.170126>

激光离子加速研究与应用展望

Laser-driven ion acceleration: development and potential applications
强激光与粒子束. 2020, 32: 092002-1-092002-17 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200090>

基于等离子体紫外辐射的强激光自动寻焦系统

A focus automatic positioning system of high-power laser beam based on plasma ultraviolet radiation
强激光与粒子束. 2019, 31: 091006 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.190252>

不同实验条件对激光诱导等离子体的影响机理研究

Study on mechanism of effect of different experimental conditions on laser-induced plasma
强激光与粒子束. 2020, 32: 061003-1-061003-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.190455>

激光等离子体诊断用Wolter型X射线显微镜的设计

Optical design of Wolter X-ray microscope for laser plasma diagnostics
强激光与粒子束. 2018, 30: 062002 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201830.170440>

等离子体光学研究现状与发展前景

Plasma optics technologies: State of the art and future perspective
强激光与粒子束. 2020, 32: 011008-1-011008-11 <https://doi.org/10.11884/hplpb202032.190466>



·惯性约束聚变物理与技术·

激光等离子体尾波加速器的发展和展望^{*}

陈 民^{1,2}, 刘 峰^{1,2}, 李博原^{1,2}, 翁苏明^{1,2}, 陈黎明^{1,2}, 盛政明^{1,2}, 张 杰^{1,2}

(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. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 超强激光在气体等离子体中传输时可以激发出大振幅的电子等离子体尾波。激光等离子体尾波加速器是利用该尾波对带电粒子(特别是电子和正电子)进行加速的一种新型装置。由于其加速梯度相较于现有的常规加速器可以提升 1000 倍, 为建造超紧凑型的加速器和辐射源奠定了基础, 也为将来建造基于等离子体的超高能正负电子对撞机和自由电子激光装置提供了可能。对该新型加速器的原理、特点、发展历程, 尤其是近十年来的主要进展和未来发展趋势及面临的主要挑战进行简要梳理和介绍。

关键词: 激光等离子体; 激光加速; 激光等离子体尾波; 超紧凑型加速器; 新型辐射源

中图分类号: O539

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.200174

Development and prospect of laser plasma wakefield accelerator

Chen Min^{1,2}, Liu Feng^{1,2}, Li Boyuan^{1,2}, Weng Suming^{1,2}, Chen Liming^{1,2}, Sheng Zhengming^{1,2}, Zhang Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory for Laser Plasmas (MoE) and School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Collaborative Innovation Center of IFSA, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An ultra-short ultra-intense laser can excite high-amplitude electron plasma waves or so called laser wakefields when it propagates in under-dense gas plasma. A laser wakefield accelerator makes use of such waves to accelerate charged particles (especially electrons and positrons). These plasma waves can sustain longitudinal acceleration fields over three orders of magnitude higher than conventional radio frequency accelerators. This new type of laser-driven plasma-based accelerator opens the way for compact particle accelerators and radiation sources. It also has the potential to be applied for the construction of future ultra-high energy TeV electron-positron colliders and free electron lasers. In this paper, the principle, characteristics and development history of this new accelerator, especially the main progress in the past ten years, the future development trend and the main challenges will be briefly reviewed and introduced.

Key words: laser plasma; laser acceleration; laser wakefield; ultracompact accelerator; novel radiation source

激光等离子体尾波加速是近四十年来随着超短超强激光脉冲技术、等离子体物理和加速器物理与技术的发展而迅速成长起来的一个新型交叉研究方向, 它是利用超强激光在气体等离子体中激发出大幅等离子体尾波对带电粒子进行加速的一种新型机制, 其加速梯度相较于现有的常规射频腔加速器可以提升 1000 倍, 达到 GV/cm, 为建造桌面式超紧凑型的加速器和辐射源奠定了基础, 也为将来建造基于等离子体的自由电子激光装置和超高能正负电子对撞机提供了可能^[1-2]。自 1979 年由 Tajima 和 Dawson 提出该加速器概念以来^[3], 经过几代人的努力, 激光等离子体尾波加速已经从加速原理突破、加速品质提升、加速能量提高, 到向基础科学、医疗、工业等各领域的应用不断拓展^[4]。本文将对激光等离子体尾波加速的原理及其经历的数个发展阶段、当前的主要应用及将来的发展趋势和面临的主要挑战, 作一简要梳理和介绍, 以期让读者对本领域的发展脉络、主要内容和挑战, 及发展前景有一个整体了解。

1 激光等离子体尾波加速的原理、关键问题及主要应用

粒子加速器是利用电磁力加速带电粒子, 使其能量提升的一种装置, 迄今已有 100 年的发展历史, 为人们了解

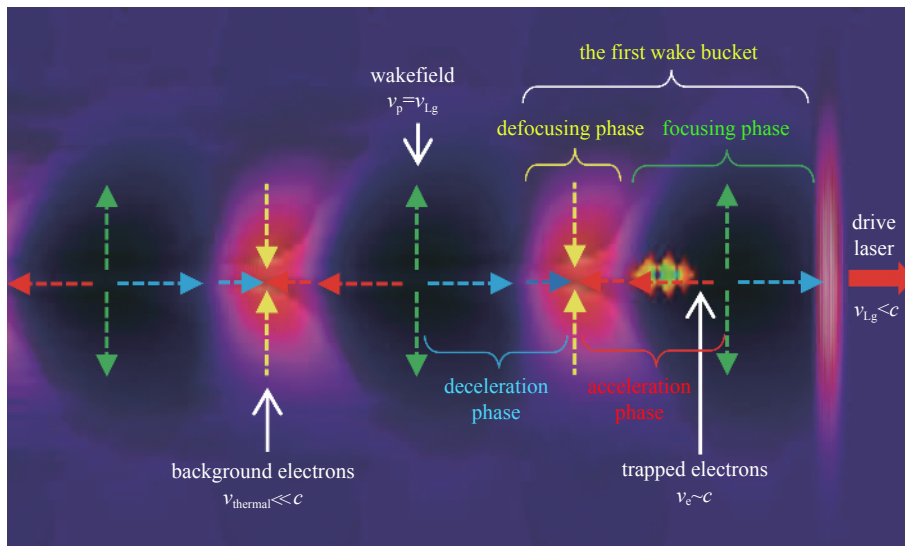
^{*} 收稿日期: 2020-05-18; 修订日期: 2020-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(11991070, 11721091, 11774227)

作者简介: 陈 民(1979—), 男, 博士, 教授, 从事激光等离子体物理研究; minchen@sjtu.edu.cn。

自然界的奥秘(包括原子核和基本粒子的结构、辐射源及其衍生科学的新发现),开发和利用核能,促进和推动工、农、医等行业的发展,以至提升国防军事能力等提供了强有力的工具^[5]。加速器中粒子能量的增值来源于电磁能,其大小等于加速电场的强度与加速距离的乘积。在现今广泛使用的射频腔加速器中,由于受到加速结构本身可以承载的电场强度破坏阈值的限制,加速腔中的电场强度通常小于 100 MV/m。为了增加被加速粒子的能量,只能提升加速距离,因而加速器的尺寸和规模不断增加。位于欧洲核子中心的发现希格斯粒子的强子对撞机,其加速器和对撞机部分的周长长达 27 km,是人类迄今正在运行的最大加速器。为了进一步探索基本粒子的结构,以及对基本物理理论进行验证,未来加速器的能量和规模需要进一步增加。可以预见,这种单纯依靠增加加速距离来增加加速能量的方式,迟早将突破人类所能承受的物质和财力极限。突破该极限的一种可能方案是寻找新的可以承受超强电场的介质来构建新的加速结构。人们很早就知道等离子体作为已经离化的物质,不受通常材料在强电场下会击穿的限制,能够承载足够高的场强。然而,要在粒子自由运动的等离子体中激发出合适稳定的结构来加速带电粒子确是极其困难的。1979 年,美国加州大学洛杉矶分校的 Tajima 和 Dawson 通过计算机模拟和理论分析,提出利用功率密度为 10^{18} W/cm² 的激光脉冲在密度为 10^{18} cm⁻³ 的等离子体中可以激发出加速梯度高达 GV/cm 的等离子体波,可用于加速带电粒子,由此开始了激光等离子体尾波加速的研究^[3,6]。目前国际上有数十个实验室正在开展这项研究,其中包括一些著名的传统加速器实验室:如欧洲核子中心(CERN)、德国 DESY、英国 Daresbury 实验室、日本 RIKEN、美国 LBNL 和 BNL 等。随着激光尾波加速从加速机制探索逐步向应用开发转变,越来越多的大学研究组也参与到该领域的研究中,例如美国密西根大学、内布拉斯加林肯大学、马里兰大学,日本大阪大学,法国巴黎综合理工,英国帝国理工,等等。

激光等离子体尾波加速原理及其主要特征可以用图 1 形象地表示。当一束强激光脉冲(典型的脉宽 25 fs,功率密度 10^{18} W/cm²)在低于其临界密度(对于波长为 1 μ m 的激光,临界密度为 10^{21} cm⁻³)的等离子体中传输时,由于激光脉冲的超短脉宽特点,激光对带电粒子会产生有质动力,等离子体中的背景电子在激光穿过的瞬间在有质动力的推动下会偏离原来的平衡位置。此时,由于离子质量较大,在激光穿过的短时间内基本处于静止状态,从而与偏离平衡位置的电子形成静电分离场。当激光穿过该区域后,电子会在静电力的作用下回到平衡位置,由于此时电子已具有一定的速度,会在平衡位置做振荡运动,最终在激光脉冲的尾部形成周期性振荡的等离子体密度波(如图 1 所示),且该波的相速度(v_p)与驱动激光的群速度(v_{Lg})相当,略低于真空中的光速(c)。当等离子体中存在如此电荷分布以及随之而来的电流分布时,将产生类似于图 1 中箭头所示的电场分布,其中的纵向电场对电子而言存在加速区和减速区,其中的横向电场,连同电流产生的磁场(图中未标出)将对电子形成横向聚焦和散焦区。这样在一个完整的尾波结构中,存在四分之一的区域对电子而言既是纵向加速,也是横向聚焦的。可见,从场的空间



The background color represents the distribution of plasma electrons with red ones showing the highest density and black ones showing the lowest density.

The dashed arrows show the directions of the longitudinal and transverse electric fields.

Fig. 1 Schematic of laser plasma wakefield acceleration

图 1 激光等离子体尾波加速原理示意图

分布来看,通过与等离子体作用,激光的横向电磁场被转换成了具有纵向加速场和横向聚焦场的尾场结构;电磁场随激光波长的空间快速变化,被延展到了随等离子体尾波波长的空间缓慢变化。由线性理论可知,激光等离子体尾波场的大小与背景等离子体的密度有粗略的依赖关系, $E_z[\text{V/cm}] \sim (n_e[\text{cm}^{-3}])^{1/2}$, 对于通常使用的气体等离子体 ($n_e \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 其尾场强度可达 10^9 V/cm 。这样在尾波中就形成了一个以近光速向前传播,具有纵向加速、横向聚焦场的理想加速结构。与传统射频腔加速器不同,该加速结构本身和其内部的加速场都是向前传播的。如果有一部分电子初始速度超过了尾波的相速度(如图1中第一个尾波加速聚焦区中的电子),那么它们将有可能长时间处在同一个尾波周期中获得持续向前的加速,直到由于其速度大于尾波相速度,造成其在尾波中从加速相前移至减速相,此时电子获得的能量将是加速区的电场强度与电子在实验室参考系中前向运动的距离(L_{acce})的乘积。由于尾波的相速度($v_p = v_{\text{Lg}} \sim c$)本身也是接近光速的,所以电子实际运动的距离($L_{\text{acce}} \lambda_p c / (c - v_{\text{Lg}})$),通常数 mm 至数 cm 量级)会远大于尾波周期的尺度(λ_p , 通常数十 μm 量级),从而电子可获得非常大的加速能量。

由上可知,激光尾波加速中存在着如下几个关键性的问题。一是如何产生合适的等离子体结构,确保驱动激光稳定地在其中传输远超过其自然散焦的长度(即瑞利长度);二是如何选择合适的驱动激光,在等离子体中激发出强的等离子体尾波;三是如何使得电子从本底电子中脱颖而出,获得足够的初始能量,精准注入到加速相,并被尾波成功捕获和持续加速;四是如何尽可能高效率地将驱动激光的能量转换给电子。这些问题构成了过去四十年激光等离子体尾波加速领域的主要研究内容。

由于激光等离子体尾波超微的加速结构,其加速出的电子具有以下特征:电子的脉宽极短,通常只有 fs 量级;电子的横向尺寸极小,通常只有 $0.1 \mu\text{m}$ 到 μm 量级;电子束与激光束天然同步,同步精度可达 fs 量级;此外通过合适的调节,电子束在尾场中除了纵向加速,还有横向振荡,可形成 Betatron 辐射,其辐射频率从紫外到 X 射线波段;利用电子束与激光束的汤姆逊散射还可产生伽马射线。这些特征使得激光尾波加速极具潜力成为桌面型的紧凑型加速器和辐射源,适合于激光-电子束泵浦探测和飞秒电子束的超快电子衍射^[7]。如果电子束品质进一步提升,能量进一步增大,极有可能成为未来自由电子激光和 TeV 正负电子对撞机加速器部分的候选技术^[8-10]。基于以上这些诱人的前景,过去四十年来激光等离子体尾波加速研究在世界范围内得到了广泛的发展,2004 年以后其发展更是迅猛。

2 激光等离子体尾波加速机制的发展

激光等离子体尾波加速概念的提出源于 1979 年,其研究依赖于超短超强激光脉冲技术、激光等离子体物理实验、尾波激发和电子加速理论、多维度多模型程序开发和基于高性能计算机的数值模拟研究,以及激光尾波加速的应用研究五方面的共同发展。在这四十年间这五个方面都随着各自领域相关技术的发展而得到了快速发展,综合起来看整个激光等离子体尾波加速大致经历了三个较为明显的发展阶段,其研究方法也同步获得了快速发展,下面分别予以简要介绍。

2.1 激光等离子体尾波加速发展的三个阶段

2.1.1 大幅激光等离子体尾波场激发

激光等离子体尾波加速研究的早期,由于超短超强激光脉冲技术还不够成熟,商业化的数十至数百 TW 的飞秒激光器还没有出现,人们更关心的是如何利用低光强(归一化光强 $a = eE/m\omega c < 0.1$)的激光脉冲产生大幅度的等离子体尾波。在那个阶段人们着重讨论如何利用长脉冲激光或弱的短脉冲激发出大幅等离子体尾波。这一时期出现了多种尾场激发方法,如激光拍频波加速、脉冲列尾波场加速、自调制激光尾场加速、互调制激光尾波场加速和单束激光的线性尾波场加速,等等。这方面的综述文献已有很多,我们不再一一列举,有兴趣的读者可以参考综述文献^[1, 6]。同一时期的实验研究着重于强尾波加速场的激发,如 1995 年, Nakajima 等人成功利用脉宽为 1 ps, 波长为 $1.052 \mu\text{m}$, 功率为 3 TW 的激光脉冲在密度为 $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的等离子体中实现了自调制激光尾场激发,电场加速梯度达到 30 GV/m ^[11]。这一时期的研究使得激光尾场的大加速梯度被人们确认,为接下来利用激光尾场加速电子束奠定了基础。

2.1.2 激光尾波场加速大能量电子验证

随着啁啾脉冲放大技术的发展和超短超强激光脉冲的出现,利用单束脉宽在数十 fs 以内,强度达到相对论光强(10^{18} W/cm^2)的飞秒激光可以很容易地在等离子体中激发出强的尾场,这使得同时期的激光尾场加速无论在理论还是实验研究方面都得到了快速发展。该阶段一个典型的研究成果可以参考由 Malka 领导的法国和英国国际

合作组于 2002 年在《Science》上发表的一篇实验成果^[12]。他们利用脉宽为 30 fs, 功率为 30 TW, 波长为 820 nm 的激光脉冲在密度为 $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的等离子体中激发出了超强尾波, 并且通过尾波波破自注入的方法实验获得了有效温度达到 18 MeV (130 MeV 以下能量的电子谱呈指数下降型, 如图 2(a) 所示), 最高能量超过 200 MeV, 总电量超过 5 nC 的电子束。与此前长脉冲激光驱动的自调制尾波加速不同, 他们将这类超短超强激光脉冲激发的尾波加速叫受迫尾波加速。该类尾波加速的典型特征是透射激光谱表现出谱的整体红移, 缺少通常长脉冲激光自调制尾场实验中透射谱上存在的以等离子体频率为间隔的多个散射峰。这一时期的研究让人们真正观察到了利用激光尾波场加速高能电子束的能力。此后, 国际上参与激光尾波加速研究的小组越来越多。但当时电子束的品质, 尤其是指数下降型的超宽能谱限制了其广泛的应用。

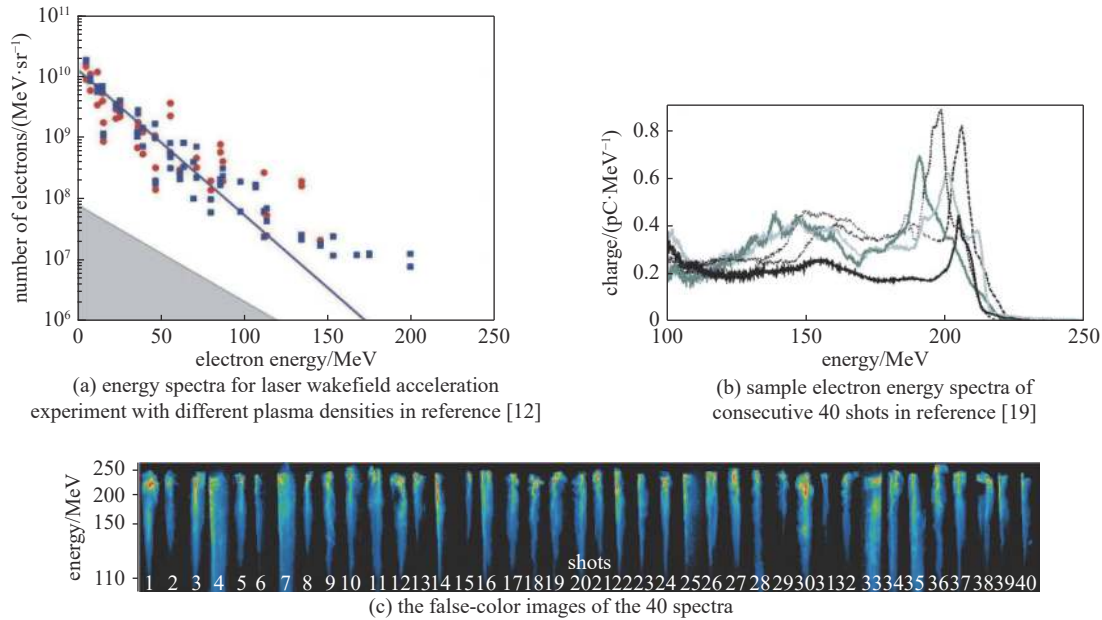


Fig. 2 Energy spectra

图 2 电子能谱

2.1.3 激光尾波场加速电子束的品质和能量提升

在解决了尾场激发和电子自注入获得持续加速之后, 激光尾波加速进入了电子束品质、加速稳定性和加速能量提升的攻关期。在这一时期, 早期为增强尾波加速电子束品质而提出的各种激光导引、非线性尾场激发、电子注入理论被进一步优化改进, 实验研究迅速跟进, 实验的新观察也反过来促进了理论研究。同时, 大规模数值模拟研究得到了迅速发展。实验、理论和模拟三方面深入融合, 交互促进, 激光尾波加速在世界范围内蓬勃发展。电子束的能谱从准单能到能散小于 1%; 归一化发射度降至 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$; 电子束的稳定性也获得大幅提升。这一时期的里程碑的成果包括 2004 年在同一期《Nature》上分别由英国、美国和法国领衔的小组独立发表的三篇文章, 他们报道了利用激光尾场加速分别获得了中心能量约 70 MeV (3% 能散), 86 MeV (2% 能散), 170 MeV (24% 能散) 的准单能电子束。《Nature》当期的封面以“梦之束 (Dream Beam)”为题对这三篇论文予以了亮点报道^[13-15]。这三个工作由于各自在电子自注入、激光导引以及非线性尾波下的电子加速方面取得突破, 使得准单能电子加速得以实现, 大大增强了人们对激光尾波加速这项技术走向应用的信心。

此后, 为了增强激光尾波加速电子束品质和稳定性, 有关电子注入的理论和实验研究不断涌现。其中法国巴黎综合理工大学 LOA 研究组 2006 年在《Nature》上发表的实验工作可以作为典型代表^[16]。他们在实验中首次验证了早期理论上提出的对撞光脉冲电子注入方案^[17]。通过改变两束光的碰撞位置, 他们还成功实现了激光尾波场加速电子束中心能量的灵活调节。这一工作使得人们对尾场加速的可调谐性信心大增。在电子束能量提升方面, 这一时期人们着重于提升激光峰值功率, 增加尾场强度, 以增大加速能量; 或解决激光的稳定导引, 尽可能地延长加速距离, 增大最大加速能量。典型工作可以参见 2006 年美国劳伦斯伯克利国家实验室 Leemans 小组发表在《Nature Physics》上的工作, 他们选择了后一种方案: 利用长度为 3.3 cm、中心密度为 $4.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的放电毛细管成功导引了 40 TW 的激光, 获得了 1 GeV 的准单能电子加速^[18]。在加速稳定性的实验研究方面, 2008 年德国

Osterhoff 等人报道了他们利用功率为 20 TW、脉宽为 42 fs 的激光脉冲与长度为 15 mm、直径为 250 μm 的柱形气体盒子作用,在等离子体密度约 $7.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时获得了稳定的电子加速,发次间电子束的 RMS 能量稳定性优于 2.5%(如图 2(b,c) 所示),指向稳定性优于 1.4 mrad,电荷稳定性优于 16%。电子能谱典型的中心能量约 200 MeV,电子束发散角 $(2.1 \pm 0.5) \text{ mrad}$,电量 $(22 \pm 5) \text{ pC}$ ^[19]。这些工作为激光尾波场加速迈向初步的应用奠定了坚实的基础。这一阶段是激光尾波加速机制本身和电子束品质提升的快速发展期,激光尾波加速逐渐趋于成熟。同时,以尾场 Betatron 辐射源和基于磁波荡器的同步辐射源为代表的初步应用也渐渐兴起^[7,20]。

2.2 激光等离子体尾波加速研究方法的发展

以上大致是按照时间脉络对激光尾波加速本身的发展给予了阶段性的分类,从研究方法来看,在其发展的各个阶段,理论、模拟和实验三方面互相配合,互相促进。这其中解析理论研究主要是在激光传输,线性和一维非线性尾波激发,以及电子加速动力学和辐射理论方面发挥了引导性作用,尤其是在激光尾波加速研究的早期作用非常大。随着计算机群(包括基于 GPU 和英特尔众核技术的新型多核高性能计算机)和基于消息传递的高性能并行计算技术的发展,以及激光等离子体相互作用模拟程序的快速发展,数值模拟研究在激光等离子体尾波加速研究中的重要性越来越显著。在诸多等离子体模拟方法中,基于粒子云模型的动力学模拟方法——粒子模拟(Particle-in-Cell)^[21],及其各种演化模型(如脉冲包络近似、柱对称的 RZ 程序、洛伦兹变换参考系程序等等^[22-24]) 在激光等离子体尾波场加速方面发挥的作用最大。除了 1979 年 Tajima 用当时的计算机和粒子模拟做了尾场激发的一维数值模拟验证外,2002 年, Pukhov 通过三维粒子模拟程序发现了非线性激光等离子体尾波的空泡结构^[25],以及该条件下激光自引导,电子注入自截止,可以获得准单能电子加速的现象。随后这方面的实验和理论研究迅速开展,自引导的非线性空泡尾波加速及定标率研究也得以迅速建立和发展^[26-28]。在电子束注入方面,碰撞光脉冲注入^[17]、离化注入^[29]、尾场空泡自演化注入^[30]、以及冷光注入^[31]等多种注入机制,也都通过计算机模拟得到了细致深入的研究,对实验工作起到了很好的引导和促进作用。

实验方面除了以上介绍的各阶段针对电子加速机制本身的进展外,针对激光尾场结构的成像诊断,以及针对电子束各种参数(如能散、发射度、电量)的精确诊断也获得了快速发展。由于激光尾波是微米量级尺寸且以近光速运动的等离子体结构,对其进行成像是极其困难的。幸运的是,这些年来人们已经发展了多种激光尾场结构的探测方法,如基于超短脉冲的光学频域全息、超快激光阴影成像和超快电子束成像等,实验发现尾波结构与数值模拟结构非常类似,对尾波的真实特性也有了进一步的认识。另一方面,由于尾波加速电子束的超高流强、超短脉宽和超微横向结构等特征,对其性质,尤其在尾场加速过程中的性质探测,也是非常困难的。很多传统电子加速器上的电子诊断方法在激光尾波加速领域不能直接借用。近些年来人们发展了多种非破坏性电子束性质测量方法,如利用电子束在尾场中的 Betatron 辐射谱来反演电子束特征参数(如横向发射度),如图 3 所示。这方面的最新进展可以参考 Downer 等人撰写的综述文献^[32]。

3 激光等离子体尾波加速的应用发展

激光等离子体尾波加速自身的快速发展,特别是随着电子束品质的不断提升,尾波加速向应用的推进速度越来越快。同时,不同的应用需求又反过来促进对激光尾波加速新机制的探索。整体看,激光等离子体尾波加速的应用研究还处于发展的初期,还有待进一步的开拓。这里我们仅就其中的一些典型应用做简要介绍。这些应用可以分为以下两类。

3.1 利用尾波加速电子束开展的相关应用研究

这类应用研究包括基于电子束在尾场中横向运动的 Betatron 辐射源及其应用,基于电子束与外加磁或光波荡器作用的同步辐射源和汤姆逊散射源,基于电子束的超快电子衍射成像。这方面的部分进展可参考 Corde 等人的综述文献^[7],这里我们简要介绍一些典型的应用实例。2009 年,德国马普量子光学所的 Fuchs 等人利用 1.5 cm 长的尾波加速器与 30 cm 长的波荡器耦合产生了波长为 9 nm 和 18 nm 的辐射,光源谱亮度为 $1.3 \times 10^{17} \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mrad}^{-2} \cdot \text{mm}^{-2}$ (0.1%BW)^[33]。2010 年,英国帝国理工学院的 Kneip 等人利用电子束在尾波场中的 Betatron 辐射产生了中心能量在 10 keV,亮度高达 $10^{22} \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mrad}^{-2} \cdot \text{mm}^{-2}$ (0.1%BW) 的 X 射线源^[34]。2011 年,英国斯特拉斯格莱德大学的 Jaroszynski 小组利用激光尾波场加速出的 700 MeV 的电子束与驱动激光的后沿作用,在光子能量 1~7 MeV 范围内产生了 10^7 个伽玛光子;利用该伽玛射线源,他们对直径仅为 25 μm 的细丝进行相衬成像,获得了非常清晰的图像^[35]。2012 年,法美两国科学家利用等离子体镜技术方案,通过等离子镜对主激光的反射,成功地实现了激光尾波

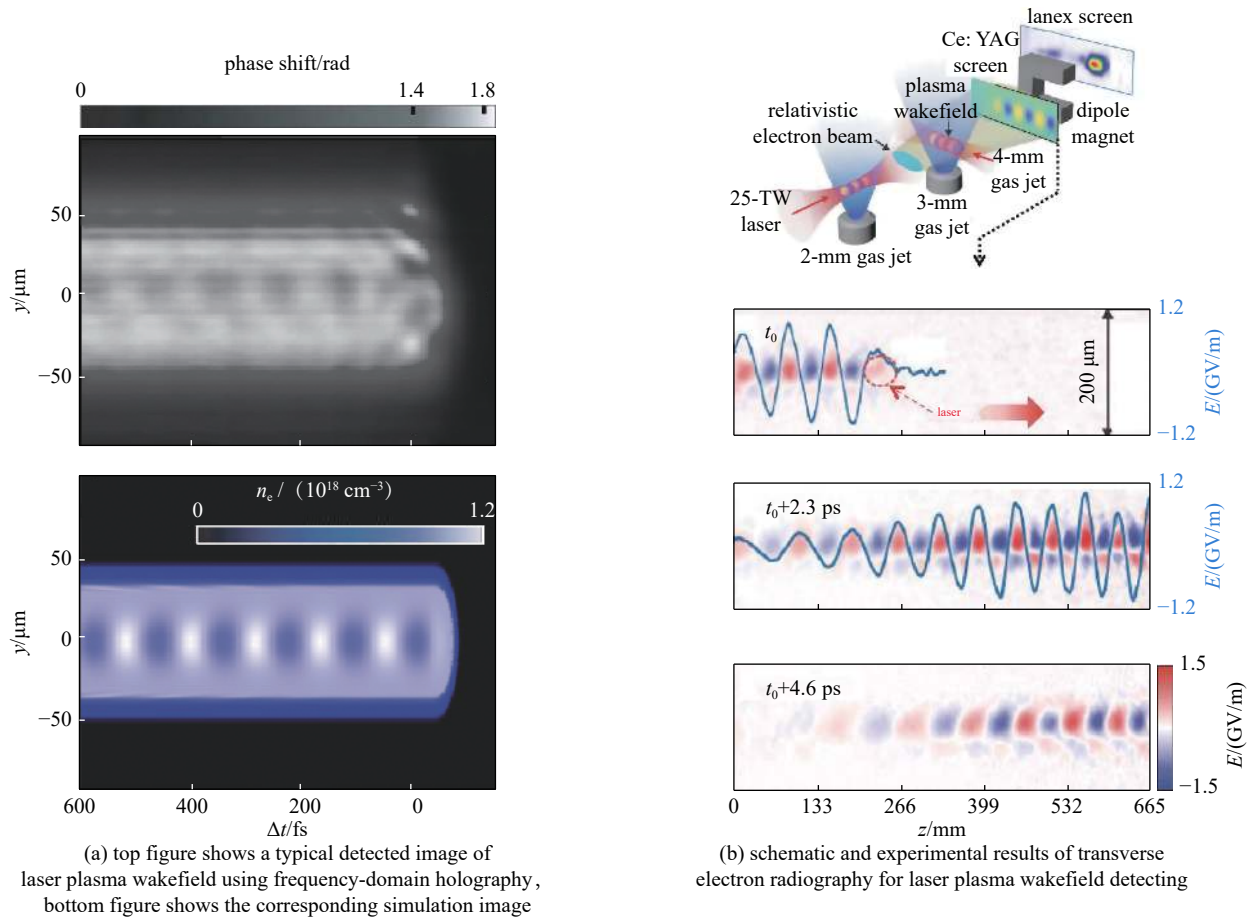


Fig. 3 Detected image of laser plasma wakefield (Figures are from reference [32] and Matlis N H, et al. Nat Phys, 2006, 2: 749 and Zhang C, et al. Phys Rev Lett, 2017, 119: 064801 and Zhang C, et al. Plasma Phys Controlled Fusion, 2018, 60: 044013)

图3 激光等离子体尾波的成像探测

场加速出的几十 MeV 的电子束与被反射驱动激光的逆康普顿散射, 得到了能量高至几百 keV 的辐射源^[36]。2013 年, 美国内布拉斯加林肯大学(UNL)的 Umstadter 研究组利用两个 100 TW 级的激光装置实现了激光尾波加速电子束与激光束的逆康普顿散射, 产生了中心能量在 1 MeV、最高能量 4 MeV、光子数超过 10^7 个的伽玛光辐射^[37]; 2016 年, 他们与上海交通大学陈民等人合作, 通过尾场加速电子束与另一束激光作用, 首次实现高达 500 阶的高阶非线性汤姆逊散射, 散射光子能量达到 20 MeV^[38]。利用激光尾波加速的辐射源可以实现对静态物体、动态冲击波成像和基于泵浦探测技术的飞秒 X 射线衍射^[39-41], 由于其超微源结构和较高的瞬态光子流强, 可以实现微 CT 成像, 应用于活体胚胎的研究, 将传统辐射源需要数分钟的成像时间缩减为单发成像, 大大减少了由于活体胚胎的运动造成的图像模糊^[42]。这些研究向人们展示了利用激光尾波加速技术与受控波荡器结合可以产生可实用的高频辐射源, 更多的研究可以参考综述性文献 [20]。基于激光尾波加速及辐射源的巨大潜力, 2017 年 1 月, 日本理化研究所的科学家 Yabashi 和 Tanaka 在《Nature Photonics》上发表展望性文章《下一个十年的 X 射线科学》, 将基于激光尾波加速的台面型辐射源列为与高重频 X 射线自由电子激光(XFEL)、衍射极限同步辐射光源(DLSR)相并列的潜在发展方向之一^[43]。

此外, 在超快电子衍射的泵浦探测应用方面, 由于尾场加速电子束与泵浦激光束在 fs 时间尺度内天然的同步特性, 电子束与激光束的抖动延迟远低于基于传统射频加速器的超快电子衍射技术(数十 fs 量级), 基于尾场加速电子束的超快电子衍射的时间分辨本领有望得到大幅增强。近些年来, 这方面的研究已初露端倪, 譬如 2017 年法国 Faure 研究组在《Nature Photonics》上报道的他们利用 kHz 重频激光驱动尾场加速获得 5 MeV 准单能电子加速, 将来有望开展晶体的衍射成像^[44]。值得一提的是, 该项研究使得利用高重频少周期激光驱动尾场加速低能电子束的研究快速发展起来, 少周期激光驱动的尾场加速由于其载波包络相位效应不可忽略, 尾场激发和电子加速都存在新的特征, 为本领域的发展提供了新的研究热点。

3.2 利用尾波结构本身开展的相关应用研究

这类研究包括基于尾波光子的中红外辐射源研究, 基于激光与等离子体波拉曼散射的光调制器, 以及基于等离子体尾波模式转换的 THz 辐射源等。很早以前人们就发现在激光等离子体尾波中每个波结构的后半部分是等离子体密度下降沿, 既可以对电子进行加速, 也可以对光子进行加速(频率上转换); 在前半部分的密度上升沿则对电子进行减速, 也可以对光子进行减速(频率下转换)。前一过程实际上即对应着等离子体波的激发, 即将电子束或驱动光的能量转换给等离子体波, 相应的就是电子束和激光束驱动的尾波激发。对于超短脉冲驱动的尾波而言, 表现在透射光的光谱上就是前面所述的频谱红移。近年来这一机制被重新重视起来, 如清华大学的鲁巍研究组采用特殊的纵向密度设计, 使得该红移机制得以快速高效发生, 实现激光频率向中红外波段的快速高效转换^[45]。上海交通大学的盛政明研究组又将这一机制加以推广, 大幅提升其效率并应用到涡旋中红外脉冲的辐射产生^[46-47]。虽然利用激光尾波也可以实现光子的频率上转换, 但由于转换频率范围提高的不多, 这部分研究较少。另一方面, 正如前文所述在激光尾波加速研究的早期, 人们利用长脉冲皮秒激光激发尾场时, 发现在透射谱中存在多个频率间隔为等离子体频率的散射峰结构, 它们来源于激光束与等离子体波的拉曼散射。为了有效利用这一现象, 2014 年上海交通大学研究组於陆勒等人提出了利用短脉冲激光驱动尾波来调制后续长脉冲激光实现宽带辐射的机制, 该机制有望获得带宽超过 100% 的长脉冲激光, 应用于长脉冲激光驱动的惯性约束聚变研究中^[48]。此外, 虽然激光尾波场中主要成分是纵向静电场, 且其波长与等离子体波长一样, 在一定的条件下, 该场有望通过模式转换的机制, 转换成电磁辐射, 实现以等离子体频率辐射的横向电磁波。2004 年盛政明等人提出了利用具有密度上升沿的等离子体实现该转换机制, 在通常激光条件下, 转换的电磁波频率位于太赫兹波段, 使得利用激光尾场实现高强度太赫兹辐射源成为可能, 该机制于 2016 年由廖国前等人实验证实^[49-50]。

4 我国激光等离子体尾波加速发展的情况

我国的激光等离子体尾波加速研究相较于欧美起步较晚, 笔者能够查到的第一篇国内研究论文是 1991 年 2 月由国防科技大学常文蔚等人发表于《物理学报》上的论文^[51]。虽然在激光尾波加速研究的第一阶段国内起步较晚, 但在第二阶段, 尤其是近年来在多个国家重大项目(如科技部 973 项目, 重大仪器专项, 基金委重大、重点项目)的支持下, 理论和实验方面都取得了快速的发展。国内多家单位, 如中国科学院上海光机所、中国科学院物理所、中国工程物理研究院、北京大学、清华大学、北京师范大学、国防科技大学、上海交通大学等, 都在激光尾波加速的研究上有重要的贡献(一些代表性的实验装置如图 4 所示)。值得一提的是, 2007 年陈黎明、谷渝秋、华剑飞等人利用中物院 SILEX-I 激光装置, 在国内首次开展了百太瓦激光的自导引和尾场加速研究, 获得了准单能的 70 MeV 的电子加速^[52]; 近年来中国科学院上海光学精密机械研究所刘建胜、李儒新等人在极低能散电子束加速方面取得了世界一流的成果^[53-54]; 上海交通大学陈民、盛政明等人在利用离化注入产生稳定、高品质电子束及利用尾波场产生阿秒电流片辐射方面有系列的研究成果^[55-57]; 在尾波场加速品质提升及诊断方面, 清华大学鲁巍等人也取得了丰硕的成果, 尤其是最近他们利用电子束做探针对尾波场电磁场结构进行了高精度诊断^[58]; 在尾波电子束 Betatron 运动产生 X 射线辐射方面, 中科院物理所与上海交通大学合作取得了较高质量本征同步的 X 射线辐射源和电子源^[59]; 国内其他单位也都各自在实验或是理论方面围绕尾波加速及其应用做出了很好的成果, 使我国在此领域的研究在世界上逐步占据一席之地^[4]。这一切都为我们进一步深入开展此类研究及将来的广泛应用奠定了基础。

5 激光等离子体尾波加速未来发展趋势和主要挑战

当前激光尾波加速已经可以产生较为稳定的较高品质的准单能电子束, 可以满足一般应用。这些应用研究将成为本领域下一阶段研究的重点, 尤其是以桌面型 X 射线辐射应用、泵浦探测应用以及飞秒 X 射线衍射应用, 这些将是对现有加速技术和辐射源的有益补充, 大大降低造价。除此之外, 激光尾波加速将向更高能量、更高品质方面迈进, 有可能使其应用能力达到甚至超过现有传统加速器应用的极限, 如在硬 X 射线自由电子激光、未来 TeV 高能对撞机加速器方面的应用。然而要实现这些应用, 激光尾波加速还有很长的路要走, 下面我们列出若干科学上还存在的重大挑战。

5.1 极化正、负电子和其他粒子的激光尾波场加速

激光尾波加速要作为正负电子对撞机应用, 首先必须解决的就是正电子的产生和加速问题。当前正电子的产生主要有两种方式: 一是利用电子束与靶相互作用, 通过 Bethe-Heitler 过程或 Trident 过程, 产生正负电子对; 二是通过电子束与强激光作用产生的伽马光子与激光场作用, 通过 Breit-Wheeler 过程, 产生正负电子对。然而当利用



Fig. 4 Laser and target systems for laser wakefield acceleration studies

图 4 用于激光尾波加速研究的实验装置

激光尾波场加速正电子时,正电子产生方式的选择除了要考虑产生效率外,还要考虑正电子对尾场的注入效率。这就使得传统加速器中正电子的注入方式是否可以移植到激光尾波正电子加速器中成为一个必须仔细考虑的问题。除此之外,如何实现尾波中正电子的稳定加速,也是本领域面临的挑战。这主要是因为以电子和离子为背景下的激光尾波处在非线性阶段时,尾场结构的前半部分虽对正电子是纵向加速相,但确是横向散焦的,这样的尾场结构无法对正电子进行长期稳定加速;即便利用线性尾场结构(理论上有四分之一相位区间对正电子既加速又聚焦)来加速正电子,如前所述如何成功将其注入到加速聚焦相,也极具挑战。另外,在高能物理研究中,往往需要参与作用粒子束的自旋具有一定的取向。激光尾波加速中如何使得这些粒子束极化,并且在加速阶段保持极化,都还没有得到清晰地认知。近年来,国际上有个别小组已开始从事这方面的研究,例如葡萄牙学者 Vieira 提出了利用涡旋光脉冲产生特殊结构尾场来加速和聚焦正电子^[60],马克斯普朗克核物理研究所提出利用超强激光产生和加速极化正电子研究^[61],上海光机所研究组还研究了考虑极化电子在尾场中的自旋进动后如何在电子束通过的横截面上选择合适的屏蔽结构,选择极化具有特定取向的电子束^[62]。这些研究让人们看到了利用激光尾波加速极化正负电子的曙光,然而诸多挑战还未触及,还有大量的基础问题亟待解决。

利用激光等离子体尾波场加速其它带电粒子,比如离子、质子和缪子理论上也是可能的。只要这些质量稍大的粒子的初始注入能量足够大,就有可能被尾场捕获,获得持续加速。近年来有部分研究组开展了理论研究^[63],但实验工作还未见报道。这些研究方向能否成功,走向最终应用,还取决于能否解决其发展过程中的诸多挑战。例如,不同于电子加速,注入电子可以来源于背景等离子体,缪子加速必须采用外注入,而缪子又会衰变,所以高效快速注入和加速是必须解决的。尾场加速离子,除了与正电子尾场加速相似,存在注入和聚焦难的问题外,还有一个就是如何预加速离子至相对论能量,并且要压缩这些离子束使其脉冲长度要尽可能短于激光尾波的长度,才能实现高效注入。

5.2 面向高能物理应用的激光尾波场级联加速

虽然当前激光等离子体尾波加速电子束的最高能量已达到 8 GeV,这一能量已超过世界上绝大多数的电子加速器的能量^[64],然而离高能对撞机的应用还相距甚远。如前所述,由于存在电子束的失相问题,为了提高单级激光尾波加速的电子束最大能量,需要降低等离子体的密度,然而密度降低会使得尾场加速梯度变小,使激光尾波加速的优势降低。在现有拍瓦激光条件下,理论研究表明,单束激光驱动的单级尾波加速的最优等离子体密度在

10^{17} cm^{-3} , 相应的单级尾场加速的最高电子加速能量约为 10 GeV。如果要想获得更高的能量, 达到数十 GeV, 甚至 TeV 的加速能量, 利用多束激光驱动尾场进行级联加速是必经之路。当前国际上已经开始了相关的理论和实验研究。2016 年, 美国劳伦斯伯克利国家实验室, 在《Nature》上报道双束激光尾波电子级联加速的初步成果^[65]。在该实验中他们通过等离子体镜和等离子体透镜分别实现了对第二束激光和第一级电子束的导引, 成功观察到了第一级加速器到第二级加速器的级联加速和 100 MeV 级的能量提升, 但级联效率只有 3.5% 左右, 还不太理想。尽管无论从稳定性、级联效率和能量提升方面与实际应用还有较大距离, 但该实验第一次验证了多光束尾波级联加速的可行性, 因此在国际上引起了广泛关注。2018 年, 上海交通大学陈民等人提出了基于弯曲毛细管引导激光的新型级联加速方案^[66]。该方案利用弯曲等离子体通道引导激光进入第二级加速结构, 同时利用直等离子通道传输电子, 因而可以大大缩短级间耦合距离并大幅提升耦合效率(理论模拟表明耦合效率可以接近 100%)。日本 Nakajima 教授在《Light: Science & Applications》上以“无缝级联”的名称对该方案予以了介绍^[67], 同时意大利有关研究团队也已经开始探索弯曲毛细管导引的实验实现^[68]。

此外, 激光等离子体尾波加速与传统加速器之间的耦合, 以便发挥各自的优势, 也是激光等离子体尾波加速研究的主要问题之一。2015 年, 清华大学提出了利用纵向等离子体结构实现高效率高品质匹配级联的理论方案^[69]。该方案针对几种典型的级联模式(传统加速器到尾波加速、尾波加速器到传统加速器、尾波加速器之间等), 通过特殊设计的纵向等离子体结构实现近理想的高效率($\sim 100\%$)高品质的电子束匹配级联, 成为美国 FACET 等大型装置未来的研究重点。

5.3 面向高品质、多模式的激光尾波场辐射源应用

激光等离子体尾波加速辐射源由于有着宽频段、高流强、微点源, 以及与驱动激光天然同步的特征, 其应用研究应该发挥这些优势, 未来有可能需要朝着两个方面努力, 一是继续在高品质、多频段辐射源方面努力, 二是这些辐射源的特性挖掘和应用拓展。前者包括基于尾波加速的自由电子激光装置的研发, 需要对电子束品质和加速稳定性进一步提升, 需要针对尾场加速电子束的特征设计新的辐射模式, 如基于横向梯度磁波荡器的辐射或对电子束进行相控间操控, 进一步降低切片能散; 还包括对新型同步辐射等离子体波荡器的研制, 和具有特殊模式的光波荡器的汤姆逊散射研究, 需要加强不同辐射频段输出光在偏振、频率和横向模式方面的可调谐性, 如实现红外涡旋光辐射^[47]、偏振可调谐的 X 光辐射^[70-71] 等等。后者包括拓展尾波辐射源在高能量密度物质结构、生物、材料、医疗等方面的应用, 开展基于驱动激光和尾波辐射光或电子束之间的泵浦探测等方面的研究。这些应用研究需要更大范围的交叉合作, 对激光尾波加速的品质、稳定性和重复频率都会提出新的更高的要求, 这又会反过来促进激光等离子体尾波加速的发展。

6 结 论

激光等离子体尾波加速经过四十年的发展, 已经在紧凑型高能电子加速和辐射源应用方面展现出了巨大的潜力和优势, 在超快 X 射线成像方面的应用已经开始。未来, 它在科学研究方面将朝着更尖端的应用需求(如自由电子激光和高能对撞机)迈进, 在实用技术开发方面需要在进一步提升束品质和重复频率的同时, 大幅拓展现有电子束和辐射源的应用范围, 一些应用已经可以开展初步的产品样机研制, 走出实验室, 向科研及产业方面做应用推广^[72]。有理由相信, 随着超短超强激光技术、物理实验和诊断方法, 以及高性能计算机软硬件的进一步发展, 更加成熟、稳定、高效的激光等离子体尾波加速器将得以实现, 为相关的前沿科学发展和产业应用带来新的变革。

参考文献:

- [1] Esarey E, Schroeder C B, Leemans W P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators[J]. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 1229-1285.
- [2] 陈民, 盛政明, 马燕云, 等. 台面型电子加速器——激光尾波场加速器[J]. *物理*, 2006, 35: 1016-1027. (Chen Min, Sheng Zhengming, Ma Yanyun, et al. A tabletop accelerator—The laser wakefield accelerator[J]. *Physics*, 2006, 35: 1016-1027)
- [3] Tajima T, Dawson J M. Laser Electron Accelerator[J]. *Phys Rev Lett*, 1979, 43: 267-270.
- [4] 盛政明, 陈民, 翁苏明, 等. 超短超强激光驱动新型粒子加速器: 机遇和挑战[J]. *物理*, 2018, 47(12): 753-762. (Sheng Zhenming, Chen Min, Weng Suming, et al. Novel particle accelerators driven by ultrashort and ultraintense lasers: opportunities and challenges[J]. *Physics*, 2018, 47(12): 753-762)
- [5] 陈思富, 黄子平, 石金水. 带电粒子加速器的基本类型及其技术实现[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 045101. (Chen Sifu, Huang Ziping, Shi Jinshui. Basic types and technological implementation of charged particle accelerators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 045101)
- [6] Esarey E, Sprangle P, Krall J, et al. Overview of plasma-based accelerator concepts[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1996, 24: 252-288.
- [7] Corde S, Phuoc K T, Lambert G, et al. Femtosecond X rays from laser-plasma accelerators[J]. *Rev Mod Phys*, 2013, 85: 1-48.

- [8] Leemans W, Esarey E. Laser-driven plasma-wave electron accelerators[J]. *Phys Today*, 2009, 62: 44.
- [9] Schroeder C B, Esarey E, Geddes C G R, et al. Physics considerations for laser-plasma linear colliders[J]. *Phys Rev ST-Acce Beams*, 2010, 13: 101301.
- [10] Maier A R, Meseck A, Reiche S, et al. Demonstration scheme for a laser-plasma-driven free-electron laser[J]. *Phys Rev X*, 2012, 2: 031019.
- [11] Nakajima K, Fisher D, Kawakubo T, et al. Observation of ultrahigh gradient electron acceleration by a self-modulated intense short laser pulse[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 4428-4431.
- [12] Malka V, Fritzler S, Lefebvre E, et al. Electron Acceleration by a wake field forced by an intense ultrashort laser pulse[J]. *Science*, 2002, 298: 1596-1600.
- [13] 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: 535-538.
- [14] Geddes C G R, Toth C, van Tilburg J, et al. High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding[J]. *Nature*, 2004, 431: 538-541.
- [15] Faure J, Glinec Y, Pukhov A, et al. A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams[J]. *Nature*, 2004, 431: 541-544.
- [16] Faure J, Rechatin C, Norlin A, et al. Controlled injection and acceleration of electrons in plasma wakefields by colliding laser pulses[J]. *Nature*, 2006, 444: 737-739.
- [17] Esarey E, Hubbard R F, Leemans W P, et al. Electron injection into plasma wake fields by colliding laser pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 79: 2682.
- [18] Leemans W P, Nagler B, Gonsalves A J, et al. GeV electron beams from a centimeter-scale accelerator[J]. *Nat Phys*, 2006, 2: 696-699.
- [19] Osterhoff J, Popp A, Major Z, et al. Generation of stable, low-divergence electron beams by laser-wakefield acceleration in a steady-state-flow gas cell[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 085002.
- [20] Albert F, Thomas A G R. Applications of laser wakefield accelerator-based light sources[J]. *Plasma Phys Contro Fusion*, 2016, 58: 103001.
- [21] Dawson J M. Particle simulation of plasmas[J]. *Rev Mod Phys*, 1983, 55: 403.
- [22] Vay J L, Almgren A, Bell J, et al. Warp-X: A new exascale computing platform for beam-plasma simulations[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A*, 2018, 909: 476.
- [23] Fonseca R A, Silva L O, Tsung F S, et al. OSIRIS: A three-dimensional, fully relativistic particle in cell code for modeling plasma based accelerators[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2002, 2331: 342-251.
- [24] Yu P, Xu X, Decyk V K, et al. Modeling of laser wakefield acceleration in Lorentz boosted frame using EM-PIC code with spectral solver[J]. *J Comput Phys*, 2014, 266: 124-138.
- [25] Pukhov A, Meyer-ter-Vehn J. Laser wake field acceleration: The highly non-linear broken-wave regime[J]. *Appl Phys B*, 2002, 74: 355-361.
- [26] Gordienko S, Pukhov A. Scaling for ultrarelativistic laser plasmas and quasimonoenergetic electrons[J]. *Phys Plasmas*, 2005, 12: 043109.
- [27] Lu W, Huang C, Zhou M, et al. Nonlinear theory for relativistic plasma wakefields in the blowout regime[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 165002.
- [28] Lu W, Tzoufras M, Joshi C, et al. Generating multi-GeV electron bunches using single stage laser wakefield acceleration in a 3D nonlinear regime[J]. *Phys Rev ST-Acce Beams*, 2007, 10: 061301.
- [29] Chen M, Sheng Z M, Ma Y Y, et al. Electron injection and trapping in a laser wakefield by field ionization to high-charge states of gases[J]. *J Appl Phys*, 2006, 99: 056109.
- [30] Kalmykov S, Yi S A, Khudik V, et al. Electron self-injection and trapping into an evolving plasma bubble[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 135004.
- [31] Davoine X, Lefebvre E, Rechatin C, et al. Cold optical injection producing monoenergetic, multi-GeV electron bunches[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 065001.
- [32] Downer M C, Zgadzaj R, Debus A, et al. Diagnostics for plasma-based electron accelerators[J]. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 035002.
- [33] Fuchs M, Weingartner R, Popp A, et al. Laser-driven soft-X-ray undulator source[J]. *Nature Phys*, 2009, 5: 826.
- [34] Kneip S, McGuffey C, Martins J L, et al. Bright spatially coherent synchrotron X-rays from a table-top source[J]. *Nature Phys*, 2010, 6: 980.
- [35] Cipiccia S, Islam M R, Ersfeld B, et al. Gamma-rays from harmonically resonant betatron oscillations in a plasma wake[J]. *Nature Phys*, 2011, 7: 867.
- [36] Ta Phuoc K, Corde S, Thauray C, et al. All-optical Compton gamma-ray source[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 308.
- [37] Chen S, Powers N D, Ghebregziabher I, et al. MeV-energy X rays from inverse Compton scattering with laser-wakefield accelerated electrons[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 155003.
- [38] Yan W, Fruhling C, Golovin G, et al. High-order multiphoton Thomson scattering[J]. *Nat Photon*, 2017, 11: 514.
- [39] Fourmaux S, Corde S, Phuoc K T. Single shot phase contrast imaging using laser-produced Betatron X-ray beams[J]. *Optics Letters*, 2011, 36: 2426.
- [40] Wenz J, Schleede S, Khrennikov K, et al. Quantitative X-ray phase-contrast microtomography from a compact laser-driven Betatron source[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7568.
- [41] Doepp A, Hehn L, Goetzfried J, et al. Quick X-ray microtomography using a laser-driven Betatron source[J]. *Optica*, 2018, 5: 199.
- [42] Cole J M, Symes D R, Lopes N C, et al. High-resolution CT of a mouse embryo using a compact laser-driven X-ray Betatron source[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2018, 115: 6335-6340.
- [43] Yabashi M, Tanaka H. The next ten years of X-ray science[J]. *Nat Photon*, 2017, 11: 12-14.
- [44] Guenot D, Gustas D, Vernier A, et al. Relativistic electron beams driven by kHz single-cycle light pulses[J]. *Nat Photon*, 2017, 11: 293-296.
- [45] Nie Z, Pai C H, Hua J, et al. Relativistic single-cycle tunable infrared pulses generated from a tailored plasma density structure[J]. *Nat Photon*, 2018, 12: 489-494.
- [46] Zhu X L, Weng S M, Chen M, et al. Efficient generation of relativistic near-single-cycle mid-infrared pulses in plasmas[J]. *Light: Science & Applications*,

- 2020, 9: 46.
- [47] Zhu X L, Chen M, Weng S M, et al. Single-cycle terawatt twisted-light pulses at midinfrared wavelengths above 10 μm [J]. *Phys Rev Appl*, 2019, 12: 054024.
- [48] Yu L L, Zhao Y, Qian L J, et al. Plasma optical modulators for intense lasers[J]. *Nat Commun*, 2016, 7: 11893.
- [49] Sheng Z M, Mima K, Zhang J, et al. Emission of electromagnetic pulses from laser wakefields through linear mode conversion[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 095003.
- [50] Liao G Q, Li Y T, Li C, et al. Bursts of terahertz radiation from large-scale plasmas irradiated by relativistic picosecond laser pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 255001.
- [51] Chang W W, Zhang L F, Shao F Q, et al. Laser plasma wave electron accelerators[J]. *Acta Physica Sinica*, 1991, 40: 182-189.
- [52] Chen L M, Kotaki H, Nakajima K, et al. Self-guiding of 100 TW femtosecond laser pulses in centimeter-scale underdense plasma[J]. *Phys Plasmas*, 2007, 14: 040703.
- [53] Liu J S, Xia C Q, Wang W T, et al. All-optical cascaded laser wakefield accelerator using ionization-induced injection[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 035001.
- [54] Wang W T, Li W T, Liu J S, et al. high-brightness high-energy electron beams from a laser wakefield accelerator via energy chirp control[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 124801.
- [55] Zeng M, Chen M, Yu L L, et al. Multichromatic narrow-energy-spread electron bunches from laser-wakefield acceleration with dual-color lasers[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 084801.
- [56] Mirzaie M, Li S, Zeng M, et al. Demonstration of self-truncated ionization injection for GeV electron beams[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 14659.
- [57] Li F Y, Sheng Z M, Liu Y, et al. Dense attosecond electron sheets from laser wakefields using an up-ramp density transition[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 135002.
- [58] Zhang C J, Hua J F, Wan Y, et al. Femtosecond probing of plasma wakefields and observation of the plasma wake reversal using a relativistic electron bunch[J]. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 064801.
- [59] Yan W, Chen L, Li D, et al. Concurrence of monoenergetic electron beams and bright X-rays from an evolving laser-plasma bubble[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2014, 111: 5825-5830.
- [60] Vieira J, Mendonca J T. Nonlinear laser driven donut wakefields for positron and electron acceleration[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 215001.
- [61] Chen Y Y, He P L, Shaisultanov R, et al. Polarized positron beams via intense two-color laser pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 174801.
- [62] Wu Y T, Ji L L, Geng X S, et al. Spin filter for polarized electron acceleration in plasma wakefields[J]. *Phys Rev Appl*, 2020, 13: 044064.
- [63] Sahai A A, Tajima T, Shiltsev V D. Schemes of laser muon acceleration: Ultra-short, micron-scale beams[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2019, 34: 1943008.
- [64] Gonsalves A J. Petawatt laser guiding and electron beam acceleration to 8 GeV in a laser-heated capillary discharge waveguide[J]. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 084801.
- [65] Steinke S, van Tilborg J, Benedetti C, et al. Multistage coupling of independent laser-plasma accelerators[J]. *Nature*, 2016, 530: 190-193.
- [66] Luo J, Chen M, Wu W Y, et al. Multistage coupling of laser-wakefield accelerators with curved plasma channels[J]. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 154801.
- [67] Nakajima K. Seamless multistage laser-plasma acceleration toward future high-energy colliders[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 21.
- [68] Zigler A, Bolton M, Ferber Y, et al. Consolidating multiple femtosecond lasers in coupled curved plasma capillaries[J]. *Appl Phys Lett*, 2018, 113: 183505.
- [69] Xu X L, Hua J F, Wu Y P, et al. Physics of phase space matching for staging plasma and traditional accelerator components using longitudinally tailored plasma profiles[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 124801.
- [70] Chen M, Luo J, Li F Y, et al. Tunable synchrotron-like radiation from centimeter scale plasma channels[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5: e16015.
- [71] Doepp A, Mahieu B, Lifschitz A, et al. Stable femtosecond X-rays with tunable polarization from a laser-driven accelerator[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6: e17086.
- [72] Walker P A, Alesini P D, Alexandrova A S, et al. Horizon 2020 EuPRAXIA design study[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2017, 874: 012029.