

轻便型低成本激光驱动加速器将成为现实

——令人振奋的实验结果有力支持了采用新型粒子加速器开发X射线源的计划

文/ Adrian Cho

一个精妙绝伦的新概念可能即将彻底革新粒子加速技术,为大型核粒子对撞机和X射线源注入新活力。数十年来,不少物理学家一直致力于开发由激光驱动的加速器,比现有设备体积更小、成本更低。最新进展表明,激光等离子体加速器(LPAs)可能会加速实现这一光明前景。

劳伦斯伯克利国家实验室的物理学家使用该方法,在30 cm的距离内就将电子加速至9.2 GeV(参见2024年12月《Physical Review Letters》上的报告)。与斯坦福直线加速器中心(SLAC)国家加速器实验室耗资11亿美元新建的长1 km的新型直线加速器相比,其能量值提升了2倍以上。尽管激光等离子体加速器仍会产生相对粗糙的电子束,但全球物理学家已经竞相将其投入使用。

牛津大学激光物理学家Simon Hooker指出:“我们正从等离子体加速器的研究阶段,转向实际应用阶段。”劳伦斯伯克利国家实验室的加速器物理学家Samuel Barber补充道:虽然激光等离子体加速器目前还无法提供物理学家追求的精密调谐束流,但在对束流质量要求不高的应用领域,这类成本更低的机器可以大显身手,“也可以开发一种更符合

个性化需求的机器”。

在传统加速器的长程真空腔体内,电子等带电粒子随着射频波谐振产生的电场运动,实现能量增益。这项已有80年历史的技术存在一个局限:如果射频波强度过高,就会在腔内引发电火花,限制加速场的强度,这意味着高能加速器必须长达数千米。

物理学家可以把高强度激光脉冲射入低压氢气中,以产生远超常规的强加速场。激光使气体电离,并快速将稀薄的电子推开,形成带正电的离子区。在激光脉冲通过后,电子涌回正电区域,形成带负电的尾流,跟随激光脉冲穿过气体。

欧洲核子研究组织(CERN)加速器物理学家Marlene Turner指出:当尾流以99.99%的光速传播时,其运动形态类似于体育场内球迷依次举手时产生的波。总有一波电子在向前移动,但其中的电子不断变化。而且它产生的电场比传统加速器高1000倍,其他电子可以借助该电场获得惊人的能量。2006年,多个研究团队在短短几厘米的距离内就将电子加速至1 GeV。

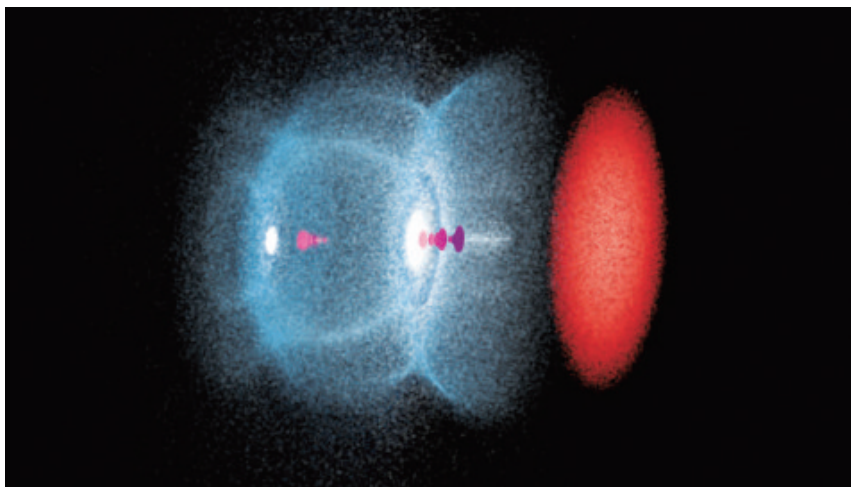
但是激光脉冲会迅速发散,限制电子加速的能量上限。为了破解这种发散性,劳伦斯伯克利国家实验室的加速器物理学家

Anthony Gonsalves和马里兰大学的激光等离子体物理学家Howard Milchberg及其同事采用2束激光脉冲来冲击从叶片状喷嘴喷出的气体。能量较弱的第1束脉冲被特制镜面聚焦为一条贯穿宽幅气体射流的亮线,形成一个比人类发丝还窄的低密度等离子体通道,并像光纤一样引导在数纳秒后紧随而至的第2束脉冲。

Turner指出,有人曾尝试通过电流将微型玻璃毛细管内的气体电离来引导脉冲,但该技术对驱动脉冲的引导效果欠佳。若脉冲触及管壁,会直接将玻璃汽化。Milchberg认为,相比之下,激光生成的通道完全由等离子体构成,因此具备无损特性。2024年12月的研究报告称,采用此技术后,驱动脉冲成功实现了30 cm无损滑行传输。

由此产生的能量略低于德克萨斯大学奥斯汀分校激光等离子体物理学家Manuel Hegelich及其同事创造的记录。2023年11月,他们报告称,尽管使用了更高的激光功率,也只在非制导方案中达到了10 GeV。此外,劳伦斯伯克利国家实验室团队还设法减少了先前激光等离子体加速器产生的能量扩散,这些加速器或多或少随机捕获了等离子体中的杂散电子。

关键在于将氮气混入气体中。制导激光会剥离氮原子的大部分电子,但最后2个电子只有在驱动脉冲达到最强时才会被释放。劳伦斯伯克利国家实验室的加速器物理学家Alexander Pickslley指出:“这些被电离的电子恰



模拟实验中,一个激光脉冲(红色)产生了一个尾波,
电子在这个尾波中被加速到极高的能量
(图片来源:《Science》)

好精准滑入等离子体空泡的加速相位区。”通过在喷嘴的某点位注入氮气,研究人员可控制电子的运动距离及其获得的能量。

法国国家科学研究中心(CNRS)等离子体物理学家 Brigitte Cros说:“这个实验的所有要素都广为人知,但他们成功将所有要素整合在了一起。”当前还有很大提升空间,目前驱动激光等离子体加速器的拍瓦级激光器每秒只能发射一次左右,而且脉冲之间的差异很大。“除了等离子体等要素外,我们还要改进激光技术。”

尽管如此,研究人员已经在考虑一款杀手级应用程序:使用激光等离子体加速器为自由电子激光器(FEL)提供动力,该激光器可通过长磁体发射精确调谐的电子束,使其左右摆动来产生强效的X射线。这些摆动的电子会发光,并在反馈回路中,将电子束分解成微小束团,实现同步辐射。

最终生成一道X射线激光束,这是研究分子和材料的强大工具。

SLAC国家加速器实验室最新的巨型直线加速器为自由电子激光器提供动力,但物理学家可采用激光等离子体加速器取代直线加速器,使这种机器体积更小、成本更低。这是一场全球性的竞赛。2021年,上海光学精密机械研究所的物理学家使用激光等离子体加速器,来驱动一台自由电子激光器发射紫外线波长。然而,它仅在10%的发射中产生了激光。2024年,Barber在劳伦斯伯克利国家实验室的团队通过激光等离子体加速器将这一数值提升到了90%。然而,为了达到可用的X射线波长,开发人员需要更高能量的电子,这可能需要劳伦斯伯克利国家实验室最新研究成果所结合的技术。

欧洲也在大力投资这一应用。2025年,作为“欧洲卓越应用等离子体研究加速器”项目的一

部分,政府官员将为一个耗资高达数亿欧元的项目选址,并将部署由激光等离子体加速器驱动的自由电子激光器。Cros表示,该项目旨在服务研究人员,并加速开发激光等离子体加速器。“基于这些技术,我们从未建造出一台真正全年无休的加速器。”

激光等离子体加速器还可以与其他加速器协同工作。例如,德国电子同步加速器研究所(DESY)的环形加速器PETRA-III可通过循环6 GeV的电子以产生X射线。目前,电子首先通过一个直线加速器和2个较小的环形加速器来达到该能量值。德国电子同步加速器研究所的等离子体加速器物理学家 Andreas Maier及其同事希望在2030年设施升级时,使用劳伦斯伯克利国家实验室团队演示的技术,采用一个激光等离子体加速器补充或替代当前设施。他表示:“对我们来说,这是一项非常令人振奋的研究成果。”

一些物理学家认为激光等离子体加速器的商业化模式已经成熟。例如,Hegelich成立了一家名为TAU Systems的公司,该公司正在加利福尼亚州卡尔斯班建设一座激光等离子体加速器设施,为客户提供服务。NASA的喷气推进实验室已与其签署协议,测试电子设备是否能够承受太空中的辐射环境。他补充道,该设施还将作为展厅,“您可以先来看看设备,如果想要的话,我们就会给您制造一台”。

(译自《Science》,2025,
387(6733))