

# 激光等离子体加速器： 原理、现状以及展望

胡荣豪 颜学庆

(北京大学物理学院 100871)

上帝粒子“希格斯”的发现成就了2013年诺贝尔物理学奖的归属,高能粒子加速器LHC(图1)又一次成为了人们视线的焦点。粒子加速器不仅是高能粒子物理和核物理等高端物理研究的基础工具,利用加速器产生的多波段辐射也在材料、化学、

生物和医疗等领域有着广泛的应用。

传统粒子加速器受到材料电离击穿阈值的限制,其加速梯度被限制在100 MV/m。如费米所言,若用传统的加速器把粒子能量加速到PeV( $10^{15}$ 电子伏特)量级,加速器的周长需绕地球一周!巨大的

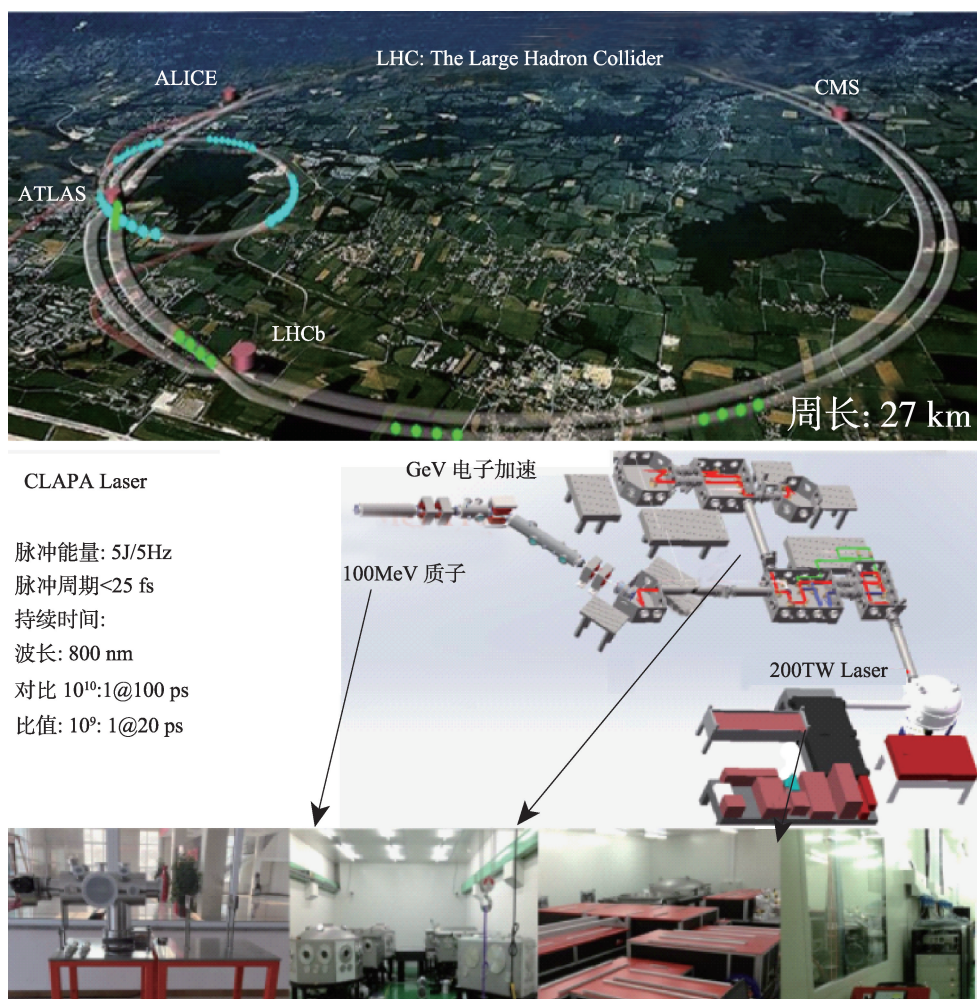


图1 欧洲大型强子对撞机(LHC)与北京大学超小型激光等离子体加速器(CLAPA)

占地面积和昂贵的造价成为了目前传统加速器向更高能量发展的巨大瓶颈,找到突破传统加速梯度限制的新加速机制迫在眉睫。

激光等离子体加速(LPA, Laser Plasma Acceleration)是1979年由田岛俊树(T. Tajima)和道森(J. Dawson)提出的全新加速机制,并在近几十年获得了理论和实验的蓬勃发展。基于此而建造激光加速器成为激光等离子体领域科学家们的目标,近些年激光加速器的建设在世界范围内也快速发展。例如,北京大学超小型激光等离子体加速器CLAPA(Compact Laser Plasma Accelerator)便以在一间中等教室大小的房间内获得能量高达100 MeV的质子和GeV的电子为目标。激光加速器基于什么样的原理?发展到了哪个阶段?面临着什么样的挑战?本文将逐一揭晓。

## 一、激光等离子体加速器的原理

自从1960年梅曼(T. Maiman)发明激光技术以来,激光以其单色性好、相干性好和方向性好等特点成为现代人类生活和科学研究中有巨大价值的光源。在过去的50年里,人们一直在技术上追求更强的激光强度。1985年莫罗(G. Mourou)等人提出的超短脉冲啁啾放大(CPA, Chirped Pulse Amplification)技术是激光技术发展历史上的一个重大突破,CPA技术克服了激光器中放大介质的损伤阈值限制,把激光的光强提高了6个量级以上,超强激光的迅猛发展为科学研究提供了前所未有的研究手段和全新的发展机遇。

通常我们用功率密度(单位时间内照射在物质单位表面积上的能量)来表征激光强度,简称光强,通用单位为: $\text{W}/\text{cm}^2$ ( $\text{J}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$ )。目前,世界先进的超短超强激光器产生的激光,空间尺度小到 $\mu\text{m}$ ( $10^{-6}\text{m}$ )量级,脉冲短至fs( $10^{-15}\text{s}$ )量级,最高光强可达 $10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$ 。目前正在进行的欧洲ELI(Extreme Light Infrastructure)工程计划更致力于将激光强度提高至 $10^{24}\text{W}/\text{cm}^2$ 。

我们知道,光是一种电磁波,由周期性变化的电场和磁场组成。当激光强度大于 $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 时,

绝大多数物质都会被激光的电场电离,形成等离子体。等离子体(plasma)是由处在非束缚态的带电粒子组成的多粒子体系,与固态、液态、气态一起构成自然界物质的四种基本形态。虽然日常中所见的多是固体、液体和气体,但是在宇宙中99%的物质都是以等离子态存在的。超短超强激光与等离子体相互作用能够激发等离子体的集体运动,而合适的等离子集体运动能够将等离子体中的带电粒子加速到非常高的能量。激光的光强与等离子体中自由电子的密度是激光与等离子相互作用的两个重要参数。对于波长为一微米的激光,当激光的光强大于 $1.37\times 10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ 时,电子在激光场内的振动速度将接近光速,同时会被朝激光前进方向推动。这一光强被称为相对论光强阈值。同时,对于波长为一微米的激光,当等离子体中的自由电子密度超过临界密度 $1.1\times 10^{21}\text{cm}^{-3}$ 时,激光会被反射;而当密度低于这一密度时,激光能够在等离子体中传播,因此这个密度被称为临界密度。需要注意的是,相对论光强阈值与激光的波长成反比,而临界密度与激光波长的平方成反比。加速不同种类的带电粒子,所采用的等离子体集体运动的模式有很大的不同,下面就以电子和质子为例,介绍激光等离子体加速应用最广泛的两种加速原理。

当相对论光强的激光在低于临界密度的等离子体中传播时,等离子体中的自由电子会被激光推动,并在激光通过后受静电回复力的作用发生局域的振荡,产生周期性变化的电场。随着激光的传播,激光的后方会不断产生这种周期性变化的电场,看起来这种电场像是跟着激光传播一样,被称作尾场(Wakefield)。在通常用于加速的等离子体密度( $10^{17}\sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$ )下,尾场的幅值高达几十到几百GV/m,同时尾场的传播速度略低于真空中光速而且自由电子密度越低,尾场的速度越接近光速。由于尾场是周期性变化的,有的部分对电子是加速作用,有的部分对电子是减速作用。为了让电子能够一直受到较长时间的加速作用,电子的运动速度和尾场的传播速度要近乎相等。为了便于区分,我们通常将进行局域静电振荡、形成尾场的电子称作背景电子,而将与尾场一起运动受到加速的电子称为

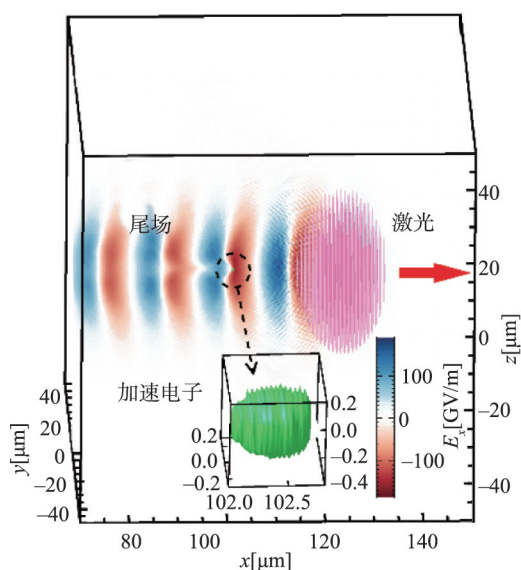


图2 激光尾场加速示意图

加速电子。如何得到加速电子即电子的注入问题是激光等离子体加速器中的一个热点问题。人们提出了很多种注入机制来得到加速电子,有将背景电子转化为加速电子的自注入,有利用高Z原子内壳层电子电离的电离注入,有利用等离子体密度不均匀分布的密度梯度注入,等等。通过注入,加速电子得到一定的初速度,保持跟尾场共同运动,便能在后续的运动中持续获得加速,最终由于速度超过尾场的速度慢慢进入到尾场减速的部分,停止加速。简单总结一下,激光尾场加速的过程可以分为:1. 激光在等离子体中形成尾场;2. 加速电子注入;3. 加速电子持续加速;4. 加速电子进入减速区前引出。

质子的静止质量是电子的近两千倍,电子可以很容易注入到尾场中,而质子却很难跟上尾场的速度。通常质子加速采用的是高于临界密度的等离子体中的集体运动模式。由于激光器技术的限制,激光脉冲之前会有持续时间在皮秒到纳秒的预脉冲(prepulse)。当激光与固体材料(靶)作用时,预脉冲会先作用到材料前表面上,产生预电离和膨胀,在材料的前表面生成具有类似指数密度分布的预等离子体。当激光的主脉冲到来之后,预等离子体中的电子被迅速加热,并向材料的后表面传输。材料的后表面由于负电荷富于正电荷,产生电荷分离场,被称为鞘层电场。鞘层电场对质子起加速作

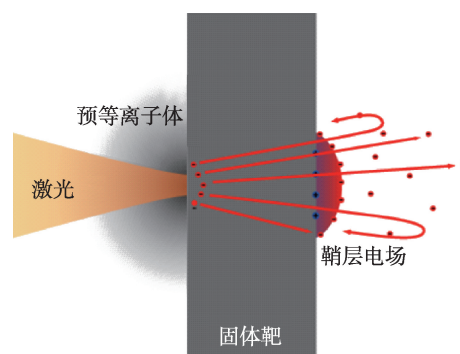


图3 靶后鞘层电场加速示意图

用,并且在时间和空间上变化比较缓慢,有利于材料后表面的质子(通常来自材料吸附的水蒸气和含氢的油污)获得较长时间的加速。简单总结一下,靶后鞘层电场加速的过程包括:1. 预脉冲产生预等离子体;2. 主脉冲产生热电子;3. 热电子传播到靶后形成鞘层电场;4. 靶后质子被鞘层电场加速。

等离子体中的集体运动模式多种多样,这里我们只介绍了其中最常见两种加速机制。对于电子加速,除了激光尾场加速机制以外,还有激光直接加速、拍频波加速、自调制尾场加速以及束流驱动尾场加速等加速机制。对于离子加速,除了靶后鞘层场加速,还有光压加速、冲击波加速、相对论自透明加速等加速机制。有兴趣的读者可以深入了解。

## 二、激光等离子体加速器的现状

激光等离子体加速器目前还处在实验研究的阶段,距离成熟的应用尚有一定的距离。从激光等离子体加速器概念的提出到现在还不到四十年,但是科研工作者在不断的努力下,取得了令人瞩目的进展。

在20世纪90年代末期,高功率钛蓝宝石激光的出现使激光的功率显著提高,脉冲长度也缩短到了25fs到50fs,激光电子加速随之进入到标准的激光尾波场加速阶段。2002年,巴黎综合理工学院LOA实验室的科学家将35fs,强度 $3 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 的激光脉冲聚焦到3mm的喷嘴气体上,将加速电子能量提高到了200 MeV,这个实验标志着LPA电子的能量正式进入到百MeV领域。从2004年至今,

大多数的LPA实验出于空泡机制,而产生准单能高能电子的结果更是层出不穷。2004年法国的LOA,英国的RAL和美国的LOASIS三个实验室分别在各自的激光系统上进行了空泡加速实验,其结果同时发表在当年九月的*Nature*杂志上,引起了世界范围内的广泛关注。这些实验最主要的意义是得到了准单能和准直的电子束,为激光尾场加速电子束的应用打开了希望之门。2006年,美国劳伦斯伯克利国家实验室得到了1GeV准单能电子束。2009年,英国帝国理工大学的尼普(S. Kneip)等人利用200TW激光脉冲自引导通过密度为 $5.7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 长度为10mm等离子体,加速出准单能的800MeV电子束。2010年美国加州大学洛杉矶分校的科学家将110TW激光脉冲聚焦到1.3cm的气体腔中( $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ),利用电离注入机制将加速电子的最高能量再次提高到1.45GeV,但缺点是能谱具有连续性。2013年,美国德克萨斯大学奥斯汀分校在大于100J的PW级的激光器系统上,通过自注入机制得到了能量超过2GeV的准单能电子束(能散5%),这成为电子加速历程上实现电子束高能并且准单能的又一突破。同年,韩国光州科学技术院利用功率高达PW的激光和两极气体喷嘴得到了能量高达3GeV的电子束。2014年,美国劳伦斯伯克利国家实验室的科研工作者们改进了2006年的实验,利用独特设计的放电毛细管来进行电子加速实验。放电毛细管能够产生独特的等离子体密度分布,激光传播轴线上的密度比外围的密度低。这样的等离子体密度分布对激光有导引作用,能够使得激光传播几个厘米而光强不会下降太多。利用9cm长的放电毛细管来导引峰值功率高达300TW( $10^{12} \text{W}$ )的激光,他们得到了中心能量高达4.2GeV,能散6%的电

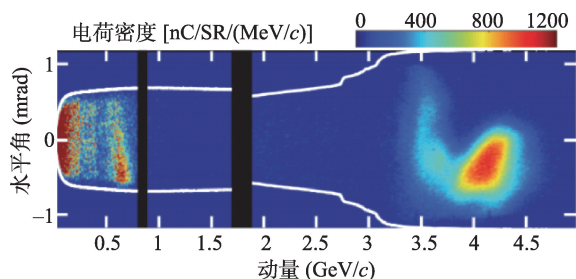


图4 激光等离子体加速得到4.2GeV电子束

子束。这是目前激光尾场加速中获得的最高电子能量记录。2016年,他们又创造性地实现两束激光级联加速,即第一束激光加速得到的电子束注入第二束激光形成的尾场获得二次加速。虽然目前实验中二次加速获得的能量不高,但是这是朝向几十级甚至上百级级联加速获得百GeV高能电子束迈出的重要一步。

国内在激光尾场加速上起步较晚,但在近两年也取得了不俗的成果。2015年上海交通大学通过自截断电离注入的方式得到了能量超过1GeV的准单能电子束。清华大学曾在实验中获得了绝对能散小于1MeV的电子束。2016年上海光机所采用独特的两级气体喷嘴,得到了六维相空间亮度可以媲美传统直线加速器的单能电子束。此外,中科院物理所、中国工程物理研究院以及北京大学都在电子加速领域取得了一些突出的成果。

激光离子加速发展晚于电子加速,目前也处于蓬勃发展中。2000年美国利弗莫尔国家实验室的科学家将超强激光打在金属薄膜靶上,在靶背法线方向得到最高能量达58MeV的质子束引起了广泛关注。这时实验中得到的加速离子的能谱特性并不好,基本呈现出指数下降谱的特征。降低离子束的能散,获得准单能的离子束成为激光离子加速的重要突破方向。2006年德国耶拿大学IOQ实验室在 $3 \times 10^{19} \text{W/cm}^2$ 的激光强度下,利用双层靶(5微米厚的钛膜,附着0.5微米厚的聚甲基丙烯酸甲脂(PMMA))获得了中心能量为1.2MeV,能散度为25%的准单能质子束。同年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室也利用复合靶得到了能散在17%,能量在3MeV/u的准单能离子束。这两个工作同时发表于当年一月的*Nature*杂志上。2016年德国亥姆霍兹重离子研究中心的科研工作者将能量高达200J,脉冲长度500fs的激光聚焦到0.9 $\mu\text{m}$ 厚的固体靶上,得到了能量高达85MeV的质子束。而同年,来自韩国光州科学技术院的科研工作者利用能量为27J,脉冲长度30fs与15nm厚的固体靶相互作用,得到了93MeV的高能质子。2015年,北京大学与光州科学技术院合作在光州得到了能量接近50MeV的质子束和高达600MeV的碳离子束。上海交通大学、上海光机所、中科院物理所、中国工程物

理研究院和北京大学都曾在国内的激光器上获得过能量从几 MeV 到十几 MeV 的质子。

近几年,激光等离子体加速器虽然取得了长足的进步,但也面临着一些问题与挑战。对于电子加速而言,目前电子束的能量已经满足如自由电子激光等应用的需求,但电子束的其他品质,如能散、电量和发射度等,还达不到这些应用的要求,因此阻碍了激光尾场加速电子的实际应用。对于离子加速而言,目前离子能量低于癌症治疗等应用的要求,目前还仅能开展一些对离子能量需求较低的应用,比如生物、材料辐照等。解决这些问题和挑战,既需要激光器等技术的进步,也需要我们从物理上更加深入地理解并改进激光等离子体加速。

### 三、展望

激光等离子体加速器方兴未艾,未来会有着举足轻重的作用。相比于传统加速器,激光等离子体加速器具有加速梯度高、尺寸小以及造价低的特点。相信在不久的将来,激光等离子体加速器将在至少以下三个方向大有用武之地:

#### 自由电子激光

自由电子激光是高能电子在波荡器中扭摆产生的相干 X 射线激光。自由电子激光在化学、材料、原子物理和生物等研究领域、医疗以及工业上都有着重要的应用。传统用于自由电子激光的直线加速器长度都在几百到几千米,同时造价昂贵。激光等离子体加速器能够很好地解决自由电子激

光的尺寸和造价问题,促进自由电子激光的普及。同时,激光等离子体加速器的束流具有与传统加速器不同的特点,可以促进自由电子激光的发展。

#### 对撞机

为了探索更高能量下的物理,对撞机的能量不断提高,而尺寸也越来越大、造价越来越高。而使用激光等离子体加速器可以提高加速梯度,显著减小对撞机的尺寸,并朝更高能量迈进,开辟新的道路,来自美国劳伦斯伯克利国家实验室的科学家就曾提出过基于激光等离子体加速器的下一代直线正负电子对撞机计划。他们设想将 100 级激光等离子体加速器级联起来,每一级中能量增益达到 10 GeV,最终的对撞能量将高达 TeV。除了加速电子,通过转换靶得到的正电子也能够被加速到 TeV。这样高能量的正负电子对撞机将会为我们打开新物理的大门。

#### 小型化癌症放疗装置

质子和重离子在癌症治疗上有着重要的应用。目前国内仅有不到五家质子或重离子癌症治疗装置,而全国每年有上百万癌症患者迫切需要得到治疗。激光等离子体加速器有望降低癌症治疗装置的造价和尺寸,能够让质子和重离子癌症治疗得到普及,造福社会。

在国内外科学家与工程师的不断努力下,今后的几十年里,激光等离子体加速器将能继续取得突破,以上的设想都将可能变为现实,激光等离子体加速器将大有用武之地。

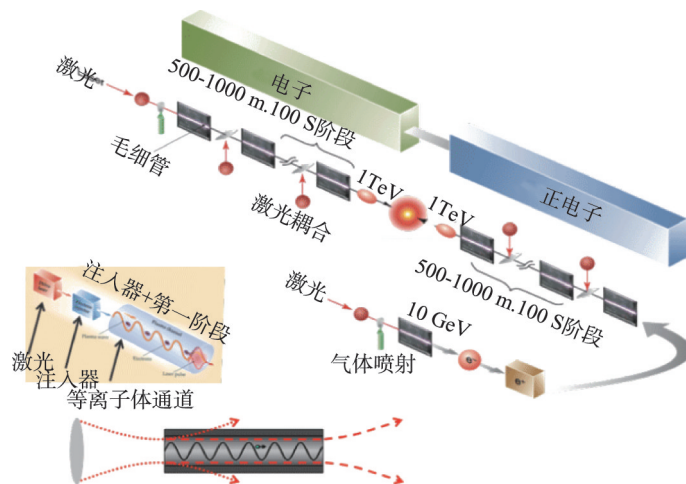


图5 激光等离子体驱动 TeV 对撞机设想