

等离子体尾流场加速进展迅速

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Florian Grüner. *Physics*, February 25, 2019)

等离子体尾流场加速技术是1979年首次提出的。在等离子体中，用驱动器(如激光脉冲)将带负电的电子与带正电的离子分离，产生一个电场，如果驱动器的有效尺寸小于等离子体的波长，便可形成电荷分离的稳定结构，即所谓的尾流场。尾流场中电场梯度可达1 TV/m，而普通加速器只能达到100 MV/m。

如果等离子体尾流场的梯度为1 TV/m，加速器的尺寸可以缩短，“桌上的”加速器是可能实现的。问题是，尾流场通常由激光脉冲驱动，脉冲的速度在等离子体中被大大降低。在某时刻，电子将跑到尾流场加速部分的前面，失去对电子的加速作用。原则上有两种克服这种“失相位”的方法。其一，采用数台串联的激光驱动等离子体加速器单元；其二，选择不同的驱动器——以接近光速的速度通过等离子体的高能质子束团。

若选择激光驱动，每一级加速段需使能量提高10 GeV。2004年，研究人员首次实现用激光—等离子体加速电子，其能谱的峰值在100 MeV左右。两年后，峰值能量达到1 GeV。如今，劳伦斯伯克利国家实验室的Anthony Gonsalves及其同事已能用激光将电子加速到8 GeV。

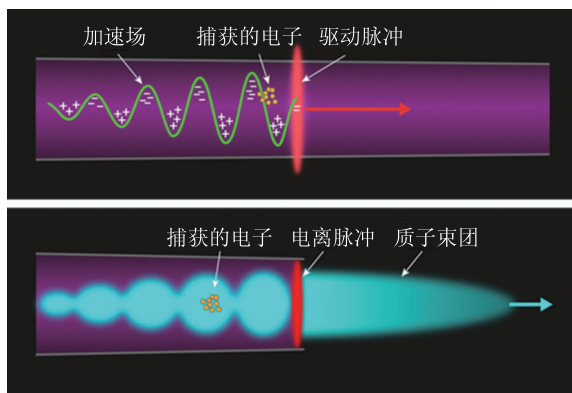
第1代激光—等离子体实验仅使用1束激光，使之通过气体电离产生等离子体，并生成尾流场。第2代实验采用放电毛细管产生电离。毛细管是用玻璃制成的气体容器，内径比头发丝还细，加上高压时，发生放电使气体电离，生成等离子体。由于管壁比中心部分冷却得快，等离子体密度在沿毛细管轴处最低。这种横向的密度梯度帮助引导激光脉冲通过约10 cm的加速长度。Gonsalves等除使用放电毛细管外，又使用了第2个激光系统，使横向等离子体密度梯度进一步增加，这是达到8 GeV水平的先决条件。

如上所述，激光驱动方法需要多段协调，这是尚未解决的技术。另一种方法是使用高能质子束团驱动。这里的困难在于质子束团比等离子体的波长要长很多，不能产生稳定的尾流场。所幸，质子—等离子体相互作用引起质子束团自发地形成

密度调制，分离成多个“微束团”，其间距约等于等离子体的波长。在微束团之间生成稳定的尾流场。为了控制这种自调制，研究人员可以使用激光引起的电离作为使质子束团分离的“引子”。2018年，先进的尾流场实验(AWAKE)首次成功地演示了质子驱动加速，实验中使用了欧洲粒子物理研究所(CERN)的超级质子同步加速器提供的400 GeV质子束团。注入到这些质子束团尾流场的电子能量增益达到2 GeV。在两个后续实验中，AWAKE合作组证实约10 cm长的质子束团分离成约2 mm长的微束团。加速长度达10 m，大约为激光驱动实验中加速长度的100倍。加速距离较长是由于质子束团实验需要较低的等离子体密度，因而电场梯度较弱。质子驱动的方案可能比激光驱动更适于加速正电子。

AWAKE合作组与Gonsalves的团队都获得了重要结果，但是还有大量工作要做。CERN的目标是研究建造新型高能电子—正电子对撞机的可能性。激光驱动方法的目标不仅是用于对撞机，还有用于硬X射线驱动的，可确定蛋白质结构等的自由电子激光。为建成可供使用的装置，尾流场加速需要高质量的稳定束流。这一点，至今两种技术都还没有达到要求。

更多内容详见：*Phys. Rev. Lett.*, 2019, 122: 084801; *Nature*, 2018, 561: 363。



尾流场加速可使用激光驱动(上图)和质子驱动(下图)