

# 激光等离子体加速器

威海暑期学校课程报告

北京大学物理学院 张策 zhangce9516@pku.edu.cn

2016 年 8 月 30 日

## 摘要

激光等离子体加速机制在上个世纪八十年代左右被正式提出。到今天被许多人认为是“未来的加速器”。在威海暑期学校的课程中, Prof. Albert De Roeck and Prof. Henri Videau 都曾在加速器课程中提到激光等离子体加速。这次课程报告的内容就将聚焦于它的历史、原理与现状。

## 1 一些历史

一般认为, Laser Plasma Accelerator (LPA) 激光等离子体加速机制在 1979 年由 Tajima 与 Dawson 首先提出。不过, 在这之前, Veksler 于 1956 年就曾经提出了‘collective acceleration using plasma’的想法, 只不过他的设想是利用等离子体浆来加速重离子 (ions)。而由于离子质量过大, 在短暂的加速后, 就容易造成等离子体扰动, 如水波一样被破坏 (plasma wave breakup), 因此被同行否定, 只是 Prof. Toshiki Tajima 提出, 不加速重离子, 加速电子即可, 电子质量轻, 能克服重离子的劣势, 并且还有其他优势。

Prof. Toshiki Tajima 曾经参与了美国超级超导对撞机 SCC 的设计建造工作, 在 SCC 被美国否决后, 他认为传统的 RF 加速机制几乎就要走到尽头。由于资金, 硬件等方面的原因, 传统加速机制几乎不可能有大的突破, LHC 现有的加速梯度也不超过 100MV/m, 但要再往上提升, 难上加难。于是他目光投向了激光加速 Laser Wakefield Acceleration (LWFA), 也就是今天称呼的激光等离子体加速 (LPA)。

## 2 原理机制

几乎所有介绍激光等离子体加速原理的文章都会将其类比于水波中物体的“随波逐流”。我们先以此来描绘其物理图像: 当船推开水波前进的时候, 会在平静的水面上划开波浪。这时候水波的速度等于船的速度。而波浪前进时, 会带着表面的物体一同前进, 比如在波涛汹涌的水面上冲浪的人, 会跟着波浪一起加速前进。

LPA 的原理几乎完全与之类似。将水波想象为具有一定密度的等离子体, 当一束超短 (short pulse) 的激光注射到等离子体中, 激光推开等离子体电子, 这时的等离子体浆 (plasmon) 的波速与激光的群速度相等。而这时将欲加速的电子注入其中, 电子便会“随波逐流”, 在等离子体构成的谐振腔中加速。我们下面简单介绍一下加速的电子需要满足的一些特定条件。

本质上, 这是一个电子在等离子体波中加速的过程。在激光激发的等离子体浆中, 以其为静止参考系, 等离子体相速度为  $v_p$ , 其同时也是光子的静止参考系, 由洛伦兹变换关系, 对光子和等离子体

$$\begin{pmatrix} \gamma & i\beta\gamma \\ -i\beta\gamma & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ i\omega/c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ i\omega_p/c \end{pmatrix}$$

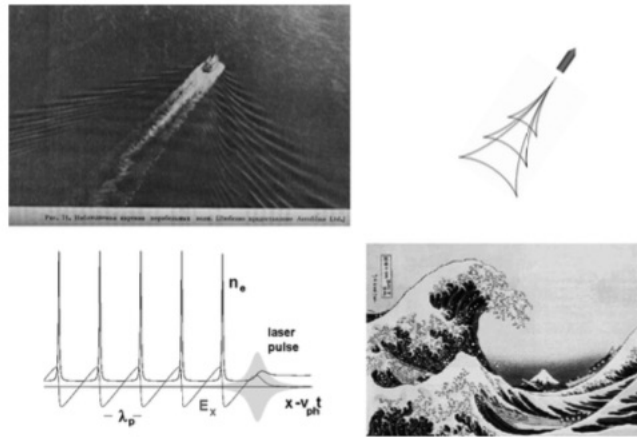


图 1: 加速的物理图像

$$\begin{pmatrix} \gamma & i\beta\gamma \\ -i\beta\gamma & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_p \\ i\omega_p/c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_p/\gamma \\ 0 \end{pmatrix}$$

因此, 在该静止参考系中, 可以将光子 (dressed photon) 视为质量  $\omega_p/c$  的粒子。而等离子体的临界振幅 (critical amplitude) 则由等离子体波的破却极限 (wave-breaking limit) 来确定。在一个周期内, 等离子体的震荡幅度不能超过波长, 也即  $k_p x_L = 1$ , 其中  $x_L \simeq eE_L/m\omega_p^2$ ,  $E_L$  是轴向的电场。由电动力学计算得出

$$eE_L(\text{critical}) \simeq mc\omega_p \quad (1)$$

因此可以得出波的势能 (也即最大的加速能量)

$$e\phi(\text{wave}) \simeq \gamma mc^2 \quad (2)$$

再通过洛伦兹逆变换得到在实验室系中的加速功率

$$W(\text{max}) = \gamma(\text{max})mc^2 \simeq 2\gamma^2 mc^2, \gamma(\text{max}) = 2\omega^2/\omega_p^2 \quad (3)$$

进而计算出最大的加速时间与长度为

$$t = W(\text{max})/ceE, l = ct = 2\omega^2 c/\omega_p^3 \quad (4)$$

举个例子, 对于  $1\mu\text{m}$  波长, 等离子体密度为  $10^{18}\text{cm}^{-3}$ , 其加速电子到  $10^9\text{eV}$  的能量只需要  $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$  的功率, 比起传统的 RF 加速机制有巨大突破。

### 3 放大技术

当然, 为了进一步突破 LPA 的加速电量, 加速能量的限制, 现在的激光加速实验室又在等离子体通道引导激光、分离注入和加速结构上做出了一些改进。我们在此简单介绍一下其中最重要的一种技术: 超短脉冲啁啾放大技术 (CPA)。这种技术大幅度增加了激光的功率, 使激光功率提高了 1000 倍到 TW 级, 并得以从此稳步提高。使得其能真正为激光等离子体加速服务。

激光的功率 = 能量/脉冲宽度。对于预先要注入到等离子体浆中的种子脉冲，其宽度大概在 fs，能量约为  $\mu J$ ，而将其展宽后送到如图所示的光学系统中，经过透镜反复放大，得到展宽后的 ns 级别的脉冲，长波而脉冲较低，最后经过功率放大装置，再由二次光学透镜调试将其压缩，就可以得到高能量的超短脉冲。这时，激光的功率已经增强了百万倍以上。

飞秒 CPA 激光的特点在于超强的聚焦强度与光压。聚焦强度能达到  $10^{20} W/cm^2$ ，光压能达到  $10^{12} bar$ 。作为对比，自然产生的激光其聚焦强度只有  $10^3 W/cm^2$ ，光压约为 1bar。

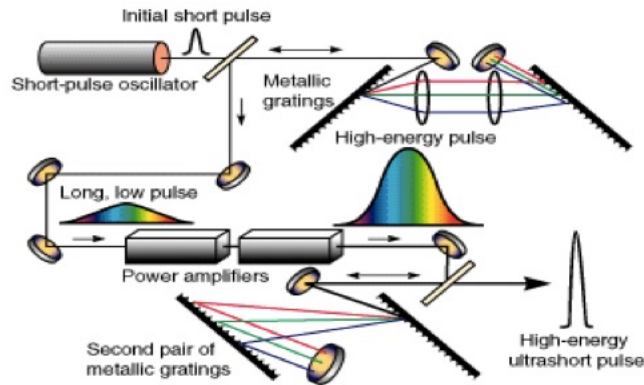
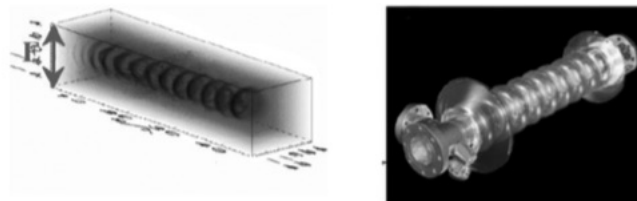


图 2: 啁啾放大技术 (CPA)

## 4 现状

现在，世界上的实验室已经能在很短的距离内将电子加速到高能量，有些甚至达到了对撞机的能量要求，比如北京大学的激光实验室就已经能将单电子加速到上海同步辐射光源的能量水平（当然亮度是远远无法达到）。

等离子体激光加速现在已经在生物技术、医学上不同类型的癌症放射疗法上取得了广泛应用。产生 X 射线用于生物成像都是很好的例子。其体积小而方便，全面优于传统的加速器。下图中，等离子体加速介质如左图所示，其加速长度只有 0.1mm，加速梯度达到了  $10^5 MV/m$ ，加速梯度比传统方法高出了 3 个量级，如右图的费米实验室的超导加速装置，长 40cm，加速梯度只有 32MV/m。



但限制激光等离子体加速发展的一个重要因素是：它只能在很短的空间尺度上加速电子。无法增加加速长度（否则也会造成 plasmon 的 breakup）。如何持续稳定地在长距离上对电子加速，这是激光等离子体加速机制需要解决的问题，也是它能否真正取代传统的加速方式，成为“未来的加速器”必须跨越的障碍。