

激光等离子体稳相加速机制研究*

颜学庆^{1 †} 盛政明^{1 2 3} 郭之虞¹ 陆元荣¹ 陈佳洱¹

(1 北京大学物理学院 核物理与核技术国家重点实验室 北京 100871)

(2 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100190)

(3 上海交通大学物理系 上海 200240)

摘要 现有激光等离子体加速机制中纵向电场对离子的有效加速长度很短(微米量级),且束流能散大,得到的离子能量较低.当采用圆偏振激光和固体靶相互作用时,如果激光的归一化光强矢量 a 与靶的电子面密度 $\frac{n_0 D}{n_c \lambda_L}$ 相当时,则存在一种稳相加速机制.此时激光和等离子体相互作用产生的静电场不仅可以用于加速离子,而且还可以在纵向对离子进行聚束,从而可以有效地降低束流能散.数值模拟结果表明,利用激光加速可以得到能散小于 5% 的单能离子束,这对激光加速器走向实际应用有着重要意义.

关键词 圆偏振 稳相加速 单能

Phase-stable acceleration in laser plasma interactions

YAN Xue-Qing^{1 †} SHENG Zheng-Ming^{1 2 3} GUO Zhi-Yu¹ LU Yuan-Rong¹ CHEN Jia-Er¹

(1 State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(3 Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract A new ion acceleration method called phase-stable acceleration is proposed by use of circularly-polarized laser pulses. When the initial target density n_0 and thickness D satisfy $a_L \sim (n_0/n_c)D/\lambda_L$ and $D > 1$ (where a_L , λ_L , l_s , and n_c are the normalized laser amplitude, the laser wavelength in vacuum, the plasma skin depth, and the critical density of the incident laser pulse, respectively), a quasi-equilibrium for electrons is established due to the light pressure and the electrostatic field built up at the interacting front of the laser pulse. The ions located within the skin-depth of the laser pulse are synchronously accelerated and bunched by the electrostatic field, and thereby a monoenergetic and high intensity proton beam can be generated.

Keywords circularly-polarized, phase-stabilized acceleration, monoenergetic

超短强激光脉冲与物质相互作用可以产生极高的加速梯度,由此可以把其中的带电粒子(包括电子和离子)在厘米量级或者更短距离内加速到 100MeV 甚至 GeV 的能量,加速梯度至少比常规射频加速器高 3 个量级,从而实现台面紧凑型粒子加速.这对于很多应用具有重要价值,譬如强流高能质子可以驱动新型“快点火”核聚变^[1],可以产生高能量密度物质状态^[2],可进行超快成像^[3]和肿瘤治疗^[4],可以产生医用同位素^[5]等.

超短超强激光与薄膜固体靶作用是产生高能质子的有效手段,其主要的物理机制是出现在靶后表面的靶面鞘层加速.激光在靶前表面产生的大量高

* 国家自然科学基金(批准号:10455001,10605003,10425416,10674175)、国家高技术研究发展计划、国家重点基础研究发展计划资助项目

2008-05-06 收到

† 通讯联系人. Email: X. Yan@pku.edu.cn

能电子在穿过靶后与靶面鞘层的离子之间产生强电场,可对靶面鞘层离子进行加速.但大量实验表明,通过该机制产生的质子束能量较低,且能谱很宽,效率不高.这些特点限制了激光质子加速的实用性,所以如何得到准单能离子束是当前的重要研究课题. Esirkepov 等人通过三维 PIC 模拟发现,通过构造双层靶(由高 Z 材料和富含 H 元素的低 Z 材料构成),控制靶后 C-H 层的纵向尺寸和横向尺寸,可以显著减小质子束的能量发散,获得准单色的质子束.最近, Schworer 等人^[6]在 Jena 大学的 JETI 钛宝石激光器上,通过在镀了 $0.5\mu\text{m}$ PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)的 $5\mu\text{m}$ 钛靶上使用飞秒激光烧蚀的方法,构造出横向尺寸为 $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 、纵向尺寸为 $0.5\mu\text{m}$ 的微结构靶,从而获得了准单能的质子束(1MeV , 能散约 20%). Toncian 等人^[7]利用一个空心微柱体,当它受到亚皮秒强激光辐照时,在柱体内部诱生瞬态径向电场,用此电场对能量为 MeV 的质子进行了聚焦.由于诱发的径向电场的瞬态特性,使得这一方法可以对激光等离子体相互作用产生的宽谱质子源中不同能量的质子进行有选择的聚焦.

对现有加速方法作一些改进可以有效地改善束流的品质,但是获得的离子能量较低,束流的能散也仍然较大,而且能散的进一步降低需要以牺牲束流流强为代价.常规射频加速器在加速离子的过程中可以同时束流进行纵向聚束,从而可以获得能散很小的准单能离子束,在加速器物理中,这一加速过程被称之为“稳相加速”.本文中我们将介绍如何在激光与等离子体相互作用中实现稳相加速^[8],从而产生较高能量的低能散离子束.

常规离子加速方法主要采用线偏振激光,当激光入射到固体靶上时,激光有质动力存在一个与时间有关的振荡分量,所以可以有效地加热等离子体.产生的相对论电子将迅速穿过靶体,在靶后表面形成一个“虚”阴极,从而产生鞘层加速.而圆偏振光与线偏振光相比,在有质动力中没有随时间快变的振荡项,对电子的加热效应远不及线偏振光^[9,10].对于圆偏振激光,它的电场可以表示为 $E_L = E(x) (\sin(\omega_L t) \hat{y} + \cos(\omega_L t) \hat{z})$. 等离子体中电子感受到的有质动力可写为:

$$\vec{f}_p = -\frac{m_e c^2}{4} \frac{\partial}{\partial x} a^2(x) \hat{x}, \quad (1)$$

式中归一化场振幅矢量 $a(x) = eE/m_e \omega_L c$ 是随空间变化的函数, e , m_e , ω_L 和 c 分别为电子电荷、质量、激光频率和真空中的光速, E 是激光场的电场强度.

可以看到,激光的有质动力不随时间发生变化.所以当圆偏振光入射到固体靶表面时,在有质动力作用下,电子将被整体向靶内压缩.固体薄膜靶会逐渐形成两个薄层:一层是由缺少电子的正离子组成,我们称之为电子耗尽层;另一层为电子压缩层,为负电荷层.由此形成特定的纵向电场分布,如图 1 所示.

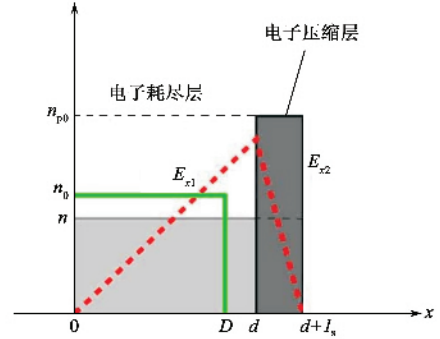


图 1 电子密度(n)和离子密度(n_{p0})分布示意图. 电子和离子的初始密度分别为 n_0 和 D , E_{x1} 和 E_{x2} 为电子耗尽层和电子压缩层中的纵向电场分布

当激光归一化电场强度矢量 a , 等离子体密度 n 和靶的厚度 D 三者之间满足^[8]:

$$a(1 + \eta)^{1/2} \sim (n_0/n_c) (D/\lambda_L), \quad (2)$$

此时有质动力不足以将电子完全推出靶外,而是与静电力达到平衡.(2)式中 η 为激光反射系数, n_c 为等离子体临界密度, λ_L 为激光在真空中的波长.当激光入射到固体靶上时,电子压缩层将被缓慢加速,它可以不断地把动量通过静电力传递给待加速的离子.对于处在电子压缩层内的离子,它受到的静电力随着位置的增加而迅速下降,这意味着跑在前面的离子感受到的场较小,而处在后面的离子感受到的场较大.也就是说,速度较慢的粒子可以在一定的时间内追赶并超过高速粒子,这样就减小了粒子之间的能量差异,从而也降低了能散.可以从图 2 所示的离子相图中观察到这一“追赶”现象.这与常规射频加速器中的稳相加速过程非常类似.根据加速器理论可知,在这种加速机制下,粒子的能散将得到很好的控制.同时随着激光与粒子相互作用的时间延长,粒子的能量也能够得到大幅度提高.

现有的一维模拟计算结果表明,当激光的归一化电场强度矢量与靶的电子面密度相当时,即 $a \sim \frac{n_0}{n_c}$

$\frac{D}{\lambda_L}$, 则存在一种稳相加速机制,此时激光可以如常规加速器一样对离子进行加速和纵向聚束.被加速的离

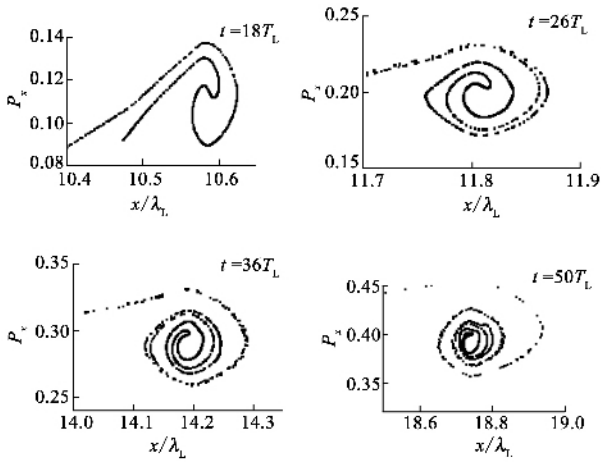


图2 离子在相空间(x, p_x)中的“追赶”运动. 图中给出4个不同时刻的相空间分布

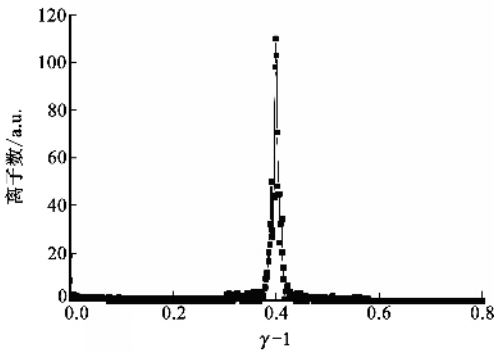


图3 离子能谱(γ 为相对论因子)

子数量可以达到 $\sim an_c \lambda_L (\pi w_L^2)$. 譬如对激光束半径 $w_L = 10 \mu\text{m}$, 波长 $\lambda_L = 1 \mu\text{m}$, 归一化场强度 $a = 10$, 可以产生的高能质子数在 10^{12} 个以上. 在稳相加速过程中, 电子被激光推进的前向速度与质子几乎一致, 这就极大地减小了库仑场对质子束传输过程造成的相

空间扩散, 有利于获得高质量强流质子束. 在实际情况下, 由于激光光强横向分布一般为高斯分布, 所以加速过程中固体靶将逐渐弯曲, 这将会增加束流的能散和发散角. 此外, 在加速过程中, 横向不稳定性也会影响激光和等离子体之间的相互作用.

和靶面鞘层加速机制相比, 稳相加速产生的质子束具有能量高、效率高、单色性好等优点. 这为将来的台面加速器提供了一种可能的方案, 对激光离子加速器走向实际应用将产生重要影响. 例如, 用一个高功率的激光器和固体靶组成的激光加速器有可能得到 200MeV 以上的单能质子束, 它将有可能用于癌症治疗. 采用上述激光加速系统替代现有的常规离子癌症治疗设备, 不仅体积小、造价低, 而且维护方便, 运行费用低廉, 十分有利于离子治癌治疗技术的普及和推广.

参考文献

- [1] Roth M, Cowan T E, Key M H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86 :436
- [2] Patel P, Mackinnon A J, Key M H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 91 :125004
- [3] Borghesi M, Campbell D H, Schiavi A *et al.* Phys. Plasmas, 2002, 9 :2214
- [4] Bulanov S V, Esirkepov T Z, Khoroshkov V S *et al.* Phys. Lett. A, 2002, 299 :240
- [5] Spencer I, Ledingham K W D, Singhal R P *et al.* Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B, 2001, 183 :449
- [6] Schwoerer H, Pfoenhauer S, Jaeckel O *et al.* Nature, 2006, 439 :445
- [7] Toncian T, Borghesi M, Fuchs J *et al.* Science, 2006, 312 :410
- [8] Yan X Q, Lin C, Sheng Z M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100 :135003
- [9] 李玉同, 徐妙华, 张杰. 物理, 2007, 36 :39 [Li Y T, Xu M H, Zhang J. Wuli (Physics), 2007, 36 :39 (in Chinese)]
- [10] Kruer W L, Estabrook K. Physics of Fluids, 1985, 28 :430

· 物理新闻和动态 ·

水蟒工程——水能的利用

在石油价格作螺旋式上涨以及公众对核能的使用存在着恐惧心理的情况下, 人们必然期望着新的能源. 海洋潮汐可转化为水波能量, 这显然是一项可开发与利用的新能源. 英国工程与设计顾问公司发展了一项“水蟒工程”. 所谓的水蟒实际上是一根巨大的橡皮管, 它可以固定漂浮在近海处的海平面下方. 当水波接近橡皮管的一端时, 它就可以在管的另一端产生一个凸出部分, 这个现象类似于在一根绳索上的抖动会沿着绳索进行传播一样, 但两者的区别是, 绳索上的抖动会迅速地耗散掉, 而水蟒上的凸出部分因周围水波的作用而会逐渐地增大, 当它传播到水蟒的另一端时, 就能驱动涡轮并产生电能. 英国 Southampton 大学的 J. Chaptin 博士指出: 他在海岸边工作多年, 开始时对此工程有所怀疑, 现在感到水蟒工程是一项值得期待的新能源工程.

大量的电能是在水蟒与周围水波发生共振时产生的, 海水的水波具有不同的周期, 但会存在一个主周期, 水波主周期的长短是与海域的大小有关. 通常太平洋的水波主周期要比大西洋内水波的主周期长, 所以水蟒的大小要与海洋的参数相匹配, 要考虑让橡皮管内的水压波动与外部水波发生共振. J. Chaptin 博士与他的合作者们设计了一根 8m 长的水蟒样品来进行试验, 他们认为水蟒的最佳长度是 150m, 这样就能在 2000 小时内产生出 1000kW 的电能. 这个设备需要 200 万英镑的预算. 总设计师 T. Roach 估计大约需要 3 年的时间来制作这个怪物工程, 水蟒的重量约有 200 吨左右.

(云中客 摘自 Physics World, 15 July 2008)