

文章编号: 1001-3806(2012)05-0653-04

强激光等离子体中质子加速的新机制

郝东山

(郑州华信学院 信息工程系 新郑 451100)

摘要: 为了研究等离子体中 Compton 散射对靶背法向方向加速质子的影响,采用多光子非线性 Compton 散射模型和等离子体模拟方法,对 Compton 散射下等离子体中的质子加速进行了理论分析和数值模拟,提出了将入射光和 Compton 散射光作为在等离子体靶表面处形成的静电场加速质子的新机制,得到了质子加速的一些重要数据。结果表明,Compton 散射使等离子体内产生的高能电子数增加,高能电子靶表面上所产生的静电场增强,从而使质子获得更高的加速能量;散射使静电场增强效应,有效地补偿了因激光调制不稳定性增强而造成电子在向等离子体输运过程中的能量损失,从而使质子从平缓密度标长等离子体中获得的加速能量高于从陡峭密度标长等离子体中获得的加速能量。因此,采用 Compton 散射下的平缓密度标长等离子体加速质子较为理想。

关键词: 激光物理; 等离子体; 超强激光; 质子加速; 等离子体模拟方法; 多光子非线性 Compton 散射

中图分类号: O539 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.020

A new accelerated mechanism of protons in high power laser-plasma

HAO Dong-shan

(Department of Information Engineering Zhengzhou Huaxin University, Xinzhen 451100, China)

Abstract: In order to study effect of Compton scattering on protons accelerated along the normal direction of the target back side in the plasma based on the model of multi-photon nonlinear Compton scattering and plasma particle-in cell simulation, the accelerated protons were analyzed and simulated, and a new mechanism of protons accelerated by the electrostatic field formed by incident laser and Compton scattering on the plasma face was put forward, then some important data were given out. The results show that the energetic electron numbers induced by Compton scattering in plasma are increased so that the electrostatic field on the target face of the energetic electrons is increased, and higher accelerated energy is absorbed by the protons. The proton gets the accelerated energy from the plasma of the gradual density scale length by Compton scattering higher than the energy getting from the plasma of the steep density scale length, and the key cause is that the effect of the electrostatic field increased by Compton scattering effectively compensates the loss energy of the electron in the transporting energy to the plasma as the increasing of the laser modulation instability taking place under Compton scattering. Therefore, it is perfect to accelerate protons with plasma of the gradual density scale length under Compton scattering.

Key words: laser physics; plasma; ultra-intense laser; proton acceleration; plasma particle-in cell simulation; multi-photon nonlinear Compton scattering

引言

啁啾激光脉冲放大技术的出现,使得激光功率密度达到 10^{21} W/cm^2 数量级以上已成为现实^[1]。如此强激光系统为实现惯性约束核聚变中的快点火提供了极其重要的实验平台^[2],开辟了强场物理的激光核聚变、高能电子和质子加速、高次谐波、X 射线激光器和

热烧蚀效应等新领域^[3-5]。由于高能质子束具有能量高、束流强度大、脉宽窄、方向性好、转换效率高等特点,以及在核聚变快点火和治疗癌症等方面的重要作用,因此引起了人们高度关注和深入研究^[6-8]。在超强激光与等离子体作用中,人们提出了靶背法向鞘层加速质子机制^[9-11]和靶前静电激波加速质子机制^[12-14]。ROTH 等人^[15]利用激光和固体靶作用加速质子束。BORGHESI 等人^[16]通过快点火加速质子。ZEPF 等人^[17]给出了静电激波加速质子的能谱。ESIRKEPOV 等人^[18]指出,激光强度变化影响静电激波加速质子能谱。ZHANG 等人^[19-20]指出,等离子体初始温度对质子加速和产额有一定影响。ABUDMESULI 等人^[21]指出,等离子体前表面密度标长对质子加速亦有影响。

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究资助项目 (092300410227)

作者简介: 郝东山(1949-),男,教授,主要从事激光物理与光纤通信基础理论的研究。

E-mail: haodongshan1948@126.com

收稿日期: 2011-11-14; 收到修改稿日期: 2011-12-28

应指出,以上研究未考虑 Compton 散射的影响。近期,HAO 等人^[22]指出,Compton 散射使等离子体色散增强,电磁波通带变窄阻带变宽,有效地降低了电磁波传输中的交叉相位调制不稳定性,并低于等离子体频率的电磁波的传播几率。实验表明,当光强度达到 10^{16} W/cm^2 数量级以上时,非线性 Compton 效应开始显现^[23],可见,Compton 散射对质子加速的影响是不能忽略的。本文中正是对该问题进行了研究。

1 质子加速新机制

若等离子体中发生多光子非线性 Compton 散射(以下简称散射),散射光频率为^[23]:

$$\omega_s = \frac{N\omega(1 + \beta\cos\theta)(1 - \beta_1\cos\theta_1)}{\eta^2 + \eta N\hbar\omega(1 + \beta\cos\theta) \frac{(1 - \cos\theta)}{m_0c^2}} \quad (1)$$

式中 $\eta = \frac{|\gamma - \gamma_f|}{\gamma - 1}$ 是量度散射非弹性参数; $\gamma_{(i)} = [1 - (\frac{v_{(i)}}{c})^2]^{-1/2} = (1 - \beta_{(i)}^2)^{-1/2}$, $\nu_{(i)} = N m_0 \omega c$, $\hbar = 2\pi\hbar$, θ , θ_1 和 θ' 分别为电子散射前后的 Lorentz 因子和速度、与电子同时作用光子数、电子静止质量、入射光圆频率、真空中的光速、普朗克常数、散射前电子和光子运动方向夹角、电子静止系中电子与散射光子运动方向夹角和光子散射角。若取入射和散射光形成的耦合光频率为 $\omega_c = \omega_s - \omega$ 形式,则有:

$$\omega_c = \left[\frac{N(1 + \beta\cos\theta)(1 - \beta_1\cos\theta_1)}{\eta^2 + \eta N\hbar\omega(1 + \beta\cos\theta) \frac{(1 - \cos\theta)}{m_0c^2}} - 1 \right] \quad (2)$$

耦合光与等离子体作用,光预脉冲先将靶电离,在靶前表面形成的等离子体迅速向真空膨胀,形成高温、低密度等离子体层。等离子体层再与耦合主脉冲作用,在靶前表面产生大量超热电子,超热电子再与靶背表面其它原子碰撞而使其电离,从而在靶与真空交界面的动态 Debye 鞘层中形成很强的静电场。该静电场在极短时间内使质子加速,并沿着靶背法线方向射出,这就是质子加速的新机制。

耦合光所产生的电场强度、磁场强度和耦合光功率密度分别为^[21]:

$$E_c = \frac{2\pi m_0 c^2}{e\lambda_c} a_c \approx 3.21 \times 10^{12} \frac{a_c [\text{V/m}]}{\lambda_c [\mu\text{m}]} \quad (3)$$

$$B_c = \frac{2\pi m_0 c}{e\lambda_c} a_c = 1.07 \times 10^7 \frac{a_c [\text{T}]}{\lambda_c [\mu\text{m}]} \quad (4)$$

$$I_c = \frac{2\pi^2 \varepsilon_0 m_0^2 c^3}{e^2} \frac{a_c^2}{\lambda_c^2} = \frac{a_c^2}{\lambda_c^2} \times 1.37 \times 10^{18} [\text{W/cm}^2] \quad (5)$$

式中 $a_c = \frac{eE_c}{\omega_c m_0 c} \approx \frac{e(E + \Delta E)}{\omega m_0 c}$ 为耦合光的归一化强度, λ_c 为耦合光波长, E 和 ΔE 分别为入射光的电场强度及其增量, e 为电子电量。若入射光波长和功率密度分别为 $1\mu\text{m}$ 和 10^{18} W/cm^2 , 耦合光波长为 $0.9\mu\text{m}$, 则耦合激光的电场强度为 2.97 TV/m , 较散射前激光的电场强度 2.7 TV/m 增加 0.27 TV/m 。可见,在如此强耦合电场作用下,获得很高能量的超热电子能使等离子体表面上的原子电离形成强大的静电场。此时电子振荡速度接近光速,相对论效应和非线性效应应该考虑。

在质子加速的新机制中,动态 Debye 鞘层中的电场满足连续性方程:

$$\frac{\partial n_{c,i}}{\partial t} + \frac{\partial(n_{c,i} v_{c,i})}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

式中 $n_{c,i} = n_i + \Delta n_i$ 和 $v_{c,i} = v_i + \Delta v_i$, n_i 和 v_i 及 Δn_i 和 Δv_i 分别是质子耦合密度和速度、散射前质子密度和速度及其增量。 $n_{c,i}$ 可表示为:

$$n_{c,i} = n_0 \exp\left(-\frac{x}{C_{cs}t} - 1\right) \quad (7)$$

式中 $C_{cs} = \sqrt{\frac{ZK_B T_c}{m_i}}$, Z , K_B , $T_c = T + \Delta T$, m_i 分别为粒子电荷态、Boltzmann 常数、等离子体耦合温度、质子质量, T 和 ΔT 为散射前等离子体温度及其增量; n_0 为等离子体初始密度。由(6)式和(7)式,可得运动方程分别为:

$$\frac{\partial v_{c,i}}{\partial t} + v_{c,i} \frac{\partial v_{c,i}}{\partial x} = \frac{eE_{c,i}}{m_i} \quad (8)$$

式中 $v_{c,i} = C_{cs} + \frac{x}{t}$ 为质子耦合速度。由(8)式,可得加速质子耦合静电场强为:

$$E_{c,i} = \frac{m_i C_{cs}}{et} = \frac{\varepsilon_{c,i}}{eC_{cs}t} = \frac{K_B T_{\text{chot}}}{e\lambda_D} = \frac{K_B T_{\text{chot}}}{el_0} \quad (9)$$

式中 $\varepsilon_{c,i} = \left[\sqrt{\frac{1 + I_{c,i} \lambda_{c,D}^2}{1.37}} - 1 \right] [\text{eV}]$, T_{chot} , $I_{c,i}$, λ_D 分别为质子耦合动能、超热电子温度、激光功率密度、等离子体密度标长; $\lambda_{c,D}$ 为德拜长度,表示靶前后表面加速范围,可用等离子体密度标长代替,且由 $\lambda_{c,D} = \left(\frac{\varepsilon_0 K_B T_{\text{chot}}}{n_{\text{chot}} e^2} \right)^{1/2}$ 决定。

2 粒子模拟

采用等离子体模拟方法计算粒子运动:给出粒子

初始时刻的位置和速度,用平均近似法求得各处电荷和电流密度分布,再通过求解 Maxwell 方程组:

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_c = 4\pi\rho_c, \nabla \cdot \mathbf{B}_c = 0 \quad (10)$$

$$c\nabla \times \mathbf{E}_c = -\frac{\partial \mathbf{B}_c}{\partial t}, \nabla \times \mathbf{B}_c = 4\pi\mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{E}_c}{\partial t} \quad (11)$$

求出各处的电场和磁场强度及每个粒子所受的力,并由牛顿运动方程和相对论运动方程:

$$\frac{d\mathbf{p}_c}{dt} = q\left[\mathbf{E}_c + \frac{\mathbf{v}_c}{c} \times \mathbf{B}_c\right], \mathbf{p}_c = \gamma_c m \mathbf{v}_c \quad (12)$$

$$\gamma = \left(1 - \frac{v_c^2}{c^2}\right)^{-1/2} \quad (13)$$

求出下一时刻每个粒子运动速度。 $\rho_c, \mathbf{J}_c, \mathbf{p}_c, \mathbf{v}_c, \gamma_c, q$ 和 $m, \mathbf{E}_c, \mathbf{B}_c$ 分别为耦合粒子密度、耦合电流密度、耦合动量、耦合速度、耦合相对论因子、电量和质量、耦合电场强度及耦合磁感应强度。通过对大量粒子运动的数值跟踪,可知等离子体集体行为。

采用2维超粒子 ZOHAR PIC 编码程序^[21],取空间和时间步长为 $118\lambda_c \times 17\lambda_c$ 进行模拟。设线极化耦合激光脉冲由真空垂直入射到后表面陡峭靶上,如图1所示。在 $O-x-y$ 平面内,粒子为5维相空间(x, y, p_x, p_y, p_z),电场为2维(E_{cx}, E_{cy}),磁场为1维(B_{cz}), $\mathbf{E}_c // y, \lambda_c = 1.06\mu\text{m}$, 光束直径为 $3\mu\text{m}$, 密度标长 $L_t = 2\mu\text{m}$ 和 $L_g = 0.6\mu\text{m}$, 强度峰值 $I_0 = 10^{20} \text{W/cm}^2$, y 方向为 Gaussian 分布,脉宽为 40fs, 最高电子密度 $n_e = 4n_c$, $n_c = 1.12 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 为密度均匀分布等离子体的临界密度。初始时刻,电子和质子速度为 Maxwell 热分布,等离子体温度对电子、粒子和质子分别为 1.2keV, 1keV 和 0.8keV, 系统粒子数为 10^6 。耦合光在 1keV 和 0.8keV, 系统粒子数为 10^6 。

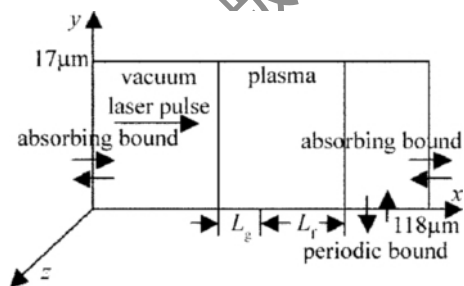


Fig. 1 Plasma density distribution on x direction

3 模拟结果

等离子体密度标长 L_g 分别为 $0.0\mu\text{m}$ 和 $0.6\mu\text{m}$ 时,高能质子能谱如图2和图3所示,图中虚线为散射前高能质子能谱图。由图2和图3知,与散射前相比,在同一时间, $\omega_1 t = 800\text{rad}$ 间隔内, $L_g = 0.6\mu\text{m}$ 的等离子体靶对质子加速能量比 $L_g = 0.0\mu\text{m}$ 时大约

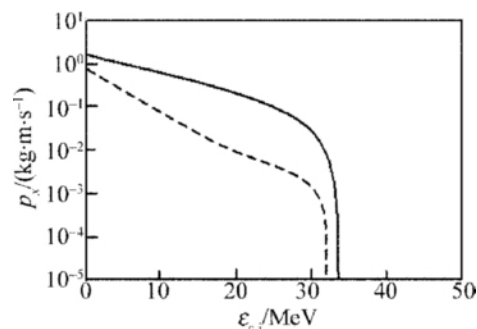


Fig. 2 Energy section of high energy proton $L_g = 0.0\mu\text{m}$ and $\omega_1 t = 800\text{rad}$

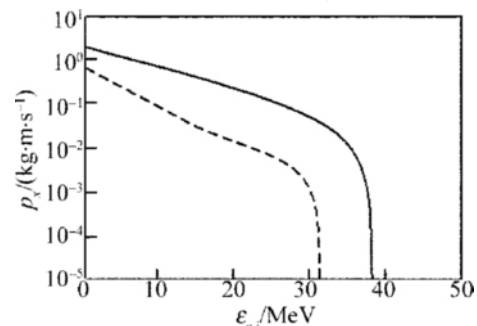


Fig. 3 Energy section of high energy proton $L_g = 0.6\mu\text{m}$ and $\omega_1 t = 800\text{rad}$

多20%。这主要是由于散射使等离子体产生的高能电子数增加,从而使高能电子靶表面上所产生分离静电场的场强增强,并正比于等离子体密度标长。这种增强效应有效地补偿了因散射使激光调制不稳定性增强而造成电子在向等离子体输运能量过程中能量的损失。

4 结论

散射使质子从平缓密度标长的等离子体中获得的加速能量比在陡峭密度标长的等离子体中获得的加速能量要高,这主要是由于散射使等离子体产生的高能电子数增加,从而使高能电子靶表面上所产生分离静电场的场强增强,并正比于等离子体密度标长。这种增强效应有效地补偿了因散射使激光调制不稳定性增强而造成电子在向等离子体输运能量过程中能量的损失。因此,采用 Compton 散射下的平缓密度标长等离子体加速质子较为理想。

参考文献

- [1] COBBLE J A, JOHNSON R P, COWAN T E *et al.* High resolution laser-driven proton radiography[J]. *Journal of Applied Physics* 2002, 92(4): 1775-1779.
- [2] ZHANG J T, HE B, HE X T. Study of mechanism on laser fusion fast igniting[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(5): 919-925 (in Chinese).
- [3] PATEL P K, MACKINNON A J, KEY M H *et al.* Isochoric heating of solid-density matter with an ultrafast proton beam[J]. *Physical Review Letters* 2003, 91(12): 125004/1-125004/4.
- [4] BULANOV S V, KHOROSHKOV V S. Feasibility of using laser ion accelerators in proton therapy[J]. *Plasma Physics Reports* 2002, 28(5): 453-456.

- [5] GAO X ,GUO K M ,SONG X W *et al.* Plasma characteristics of metal Fe ablated by pulsed laser [J]. Chinese Journal of Lasers ,2010 ,37 (3) : 878-881(in Chinese) .
- [6] MAKSIMCHUK A ,GU S ,FLIPPO K *et al.* Forward ion acceleration in thin films driven by a high-intensity laser [J]. Physical Review Letters ,2000 ,84(18) : 4108-4111.
- [7] OKADA T ,MIKADO Y ,KITADTA T *et al.* Fast ion bunch generation by ultraintense laser pulse on plasma foil target [J]. Japanese Journal of Applied Physics ,2005 ,44(3) : 1431-1435(in Japanese) .
- [8] ANDREEV A A ,PLATONOV K Y ,OKADA T *et al.* Nonlinear absorption of a short intense laser pulse in a nonuniform plasma [J]. Physics of Plasmas ,2003 ,10(1) : 220-226.
- [9] WILKS S C ,LANGDON A B ,COWAN T E *et al.* Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions [J]. Physics of Plasmas ,2001 ,8(2) : 542-549.
- [10] BETTI S ,CECCHERINI F ,CORNOLTI F *et al.* Expansion of a finite-size plasma in vacuum [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion ,2005 ,47(3) : 521-529.
- [11] MORA P. Plasma expansion into a vacuum [J]. Physical Review Letters ,2003 ,90(18) : 185002/1-185002/4.
- [12] WEI M S ,MANGLES S P D ,NAJMUDIN Z *et al.* Ion acceleration by collisionless shocks in high-intensity-laser-underdense-plasma interaction [J]. Physical Review Letters ,2004 ,93(15) : 155003/1-155003/4.
- [13] HUMIERES E D ,LEFEBVRE E ,GREMILLET L *et al.* Proton acceleration mechanisms in high-intensity laser interaction with thin foils [J]. Physics of Plasmas ,2005 ,12(6) : 062704/1-062704/13.
- [14] SILVA L O ,MARTI M ,DAVIES J D *et al.* Proton shock acceleration in laser-plasma interactions [J]. Physical Review Letters ,2004 ,92(1) : 015002/1-015002/4.
- [15] ROTH M ,COWAN T E ,KEY M H *et al.* Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams [J]. Physics Review Letters ,2001 ,86 (3) : 436-439.
- [16] BORGHESI M ,ESIRKEPOV T ,BULANOV S Y *et al.* Proton beam taken place by the effect in the laser and solid butt [J]. Physical Review Letters ,2002 ,88(1) : 5002-5005.
- [17] ZEPF M ,CLARK E L ,BEG F N *et al.* Proton acceleration from high-intensity laser interactions with thin foil targets [J]. Physical Review Letters ,2003 ,90(6) : 064801/1-064801/4.
- [18] ESIRKEPOV T ,BORGHESI M ,BULANOV S Y *et al.* Highly efficient relativistic-ion generation in the laser-piston regime [J]. Physical Review Letters ,2004 ,92(17) : 175003.
- [19] ZHANG X M ,SHEN B F ,YU M Y *et al.* Effect of plasma temperature on electrostatic shock generation and ion acceleration by lasers [J]. Physics of Plasmas ,2007 ,14(11) : 113108.
- [20] BIN J H ,LEI A L ,YU W. Influence of initial plasma temperature on energetic proton generation from laser-plasma interaction [J]. Chinese Journal of Lasers ,2009 ,36(6) : 1416-1419(in Chinese) .
- [21] ABUDMESULI ,ZAKER A. Numerical simulation effect of plasma density scale length on the energetic protons generation in laser-plasma interaction [J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition) ,2011 ,28(2) : 213-217(in Chinese) .
- [22] HAO X F ,LI H Y ,HAO D Sh. Photonic band gap properties of magnetized plasma photonic crystals under Compton scattering [J]. Laser Technology ,2012 ,36(1) : 107-110(in Chinese) .
- [23] KONG Q ,ZHU L J ,WANG J X *et al.* Electron dynamics in the extra-intense stationary laser field [J]. Acta Physica Sinica ,1999 ,48 (4) : 650-660(in Chinese) .