

## 粒子数对共振吸收早期现象粒子模拟的影响\*

刘大庆 曹莉华 常文蔚 岳宗五

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

**摘要** 用不同的模拟粒子数对  $10^{16}\text{W}/\text{cm}^2$  功率水平的激光与不均匀等离子体相互作用中的共振吸收现象进行了模拟,比较了粒子数不同对结果带来的差别,并对结果从计算和物理的角度进行了分析。

**关键词** 共振吸收,空穴子,波破碎,粒子模拟

**分类号** O561.4

## Effect of Particle Number on the Particle-simulation of Early Stage Resonance Absorption in Laser-plasma Interaction

Liu Daqing Cao Lihua Chang Wenwei Yue Zongwu

(Department of Applied Physics,NUDT,Changsha,410073)

**Abstract** The results caused by different particle number in particle-simulation of laser-plasma resonance absorption is investigated. The outcome is also analysed in physical and computational aspect.

**Key words** resonance absorption, caviton, two-dimensional particle-simulation, wave-breaking.

### 1 引言

P-极化电磁波在不均匀等离子体中的共振吸收所引起的波破碎和相关的物理现象如超热电子发射,孤立子(soliton)闪现,空穴子(caviton)产生等,揭示了强电磁波与不均匀介质间的非线性相互作用过程。对这一物理机制的了解,对于实现激光聚变具有实际应用

\* 863 高技术基金资助项目  
1997年5月20日修订

意义,近 20 年来引起了广泛的理论和实验工作者的兴趣。但国内对它的研究还不太多,尤其是利用二维粒子模拟的方法研究共振吸收还未见报导。

一束  $P$  极化的强激光斜入射到密度为线性分布且与一温度恒定的热源相连的平板等离子体上,将在回转层截止,但由于隧道效应,在共振层附近,存在着渗透进去的纵向电场。设真空中激光电场振幅为  $E_0$ ,波数为  $K_0$ ,等离子体密度变化一个  $n_c$  的长度为  $L$ , $n_c$  是共振处等离子体的密度,则纵向电场的振幅为<sup>[1]</sup>。

$$E_d = E_0 \frac{\varphi(s)}{\sqrt{2\pi K_0 L}} \quad (1)$$

其中  $\varphi(s)$  为金兹堡函数, $s = (K_0 L)^{\frac{1}{3}} \sin\theta$ , $\theta$  是激光的入射方向与纵向的夹角。

温度不太高,忽略朗道阻尼(Landau damping)时,在驱动场  $E_d$  作用下,共振的等离子体激发起静电波,静电波会增至很强,但并不无限增长,首先,运输对共振层电场的限制<sup>[2]</sup>:

$$E_{conv} \cong 2(L/\lambda_d)^{\frac{2}{3}} E_d \quad (2)$$

$\lambda_d$  为共振层等离子体的德拜半径。

其次,共振层中各层电子流体的振荡发展到电子流体混乱排列时,静电波将破碎,破碎条件对共振层电场的限制为<sup>[5]</sup>:

$$E_{br} = m_e \omega_0 v_{br} / e \quad (3)$$

而  $v_{br} = \sqrt{2\omega_0 v_D L}$ ,  $v_D = eE_d / m_e \omega_0$ ,  $e, m_e$  为电子电荷及电子质量, $\omega_0$  是入射激光的圆频率。

当  $E_{conv} > E_{br}$  时,就会出现波碎现象,因而由(2),(3)可以给出波碎判据:

$$\eta > \frac{1}{2} (\lambda_D / L)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

其中  $\eta = v_D / v_T$ ,  $v_T = \sqrt{KTe / m_e}$ ,  $K$  是波耳兹曼常数, $T_e$  是电子温度。

由于计算机的速度和容量限制。为模拟共振吸收包括后期现象的全过程,将离子和电子的质量比仅取为 100,粒子数仅取为 61440。因为早期各种非线性相互作用很强,系统的变化比较复杂,模拟的误差令人担心,我们通过比较不同的模拟粒子数在相同条件下的模拟结果以检验、评估模拟粒子数为 61440 的模拟结果。

## 2 参量选择

本文采用与文献[4]相同的无量纲方案,参量的选择不加说明也与此相同。

如图 1,  $L_b$  为初始时平板等离子体的厚度, $L_a$  为为使粒子可以膨胀,并使无穷远边界条件近似成立而选取的一段初始真空长度; $n_{pr}$  为右边界的等离子体密度,并设激光从左边入射, $n_{pr} = 1.69n_0$ 。我们将系统划分为  $240 \times 128$  个网络,在入射角度为 0.4 弧度时,使网格大小为  $\Delta x \times \Delta y = 1 \times 0.9003$ , $y$  方向满足周期边界条件, $L_a = L_b = 120$ ,模拟粒子数  $n_p$  为 61440 时(默认为电子云和离子云都是

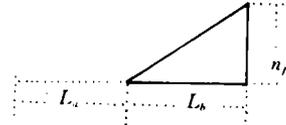


图 1 等离子体初始密度分布

61440 个,下同),电子云带电量  $q = 0.01513 = 2.5 \times 10^3 e$ .

使激光缓慢地加在等离子体上,其时间因子为

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ [3(t/T)^3 - 2(t/T)^2]P & 0 < t \leq T \\ P & t > T \end{cases} \quad (5)$$

其中  $P$  为激光的稳态振幅,  $T$  为振幅的上升时间,可取  $T = 16\pi \approx 50$ ,这样选取的  $f(t)$  有关于时间  $t$  处处连续的导数。

在激光振幅为 0.65 时,由(4)知将会发生波碎。对  $n_p = 30720, 61440, 184320$ ,离子和电子质量比为 1800 : 1 的情况分别进行了模拟,并给出了部分模拟结果,并着重分析了粒子数不同给模拟结果带来的差别。

### 3 模拟结果

图 2 为能量守恒验证中误差随时间的变化,可以看出,随着粒子数的增加,精度提高。在 6 万个模拟粒子时,精度基本被控制在 0.25% 以内。共振吸收产生后,激光和等离子体的扰动比较大,精度有所下将。同时,此时静电能比较大,波碎后,它要把能量转交给电子,由于我们采取了在求粒子运动时将半整网格点的场先平均到整网格点上的方法消除自力,该方法会引起静电波的能量在转交过程中的损失,因而波碎后误差在 -0.1% 附近分布。

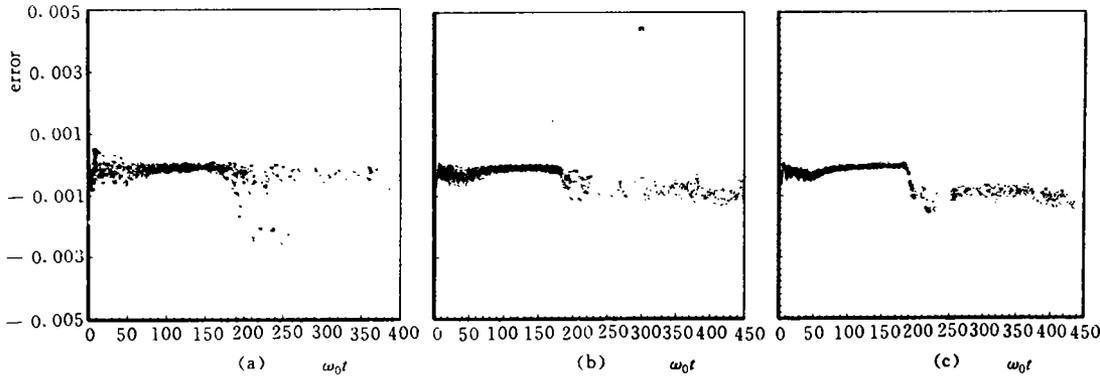


图 2 不同条件下相对误差随时间的变化情况。

模拟粒子数:(a)为 30720,(b)为 61440,(c)为 184320

图 3 和图 4 为(全空间)具有最大动能电子的  $\gamma$  因子及纵向电场的最大值分别随时间的变化。在该功率下,波碎后静电场幅度下降,如图 4 所示,超热电子的能量不应该再上升,图 3(c)是符合物理意义的。但图 3(b)在  $\omega_0 t < 350$  时与图 3(c)差别不大,因而  $\omega_0 t < 350$  时图 3(b)和 3(c)基本反映了物理事实。波碎时纵向电场的最大值为 2.6,按(3)式计算为 3.9。激光传到回转层后才能加到共振层等离子体上,扣除这部分传输时间(理论计算为 37),并假定  $t = T/2 = 25$  时以阶梯函数的形式加入激光信号大致消除上升时间不等于零带来的误差,图 3(c)测得波碎时间为 118(=180-37-25)左右,文[5]计算为 110。

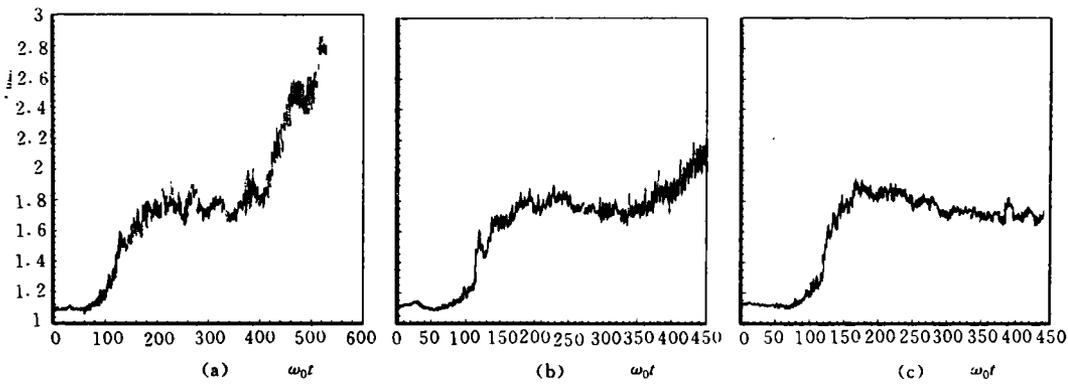


图3 不同时刻电子的最大  $\gamma$  因子

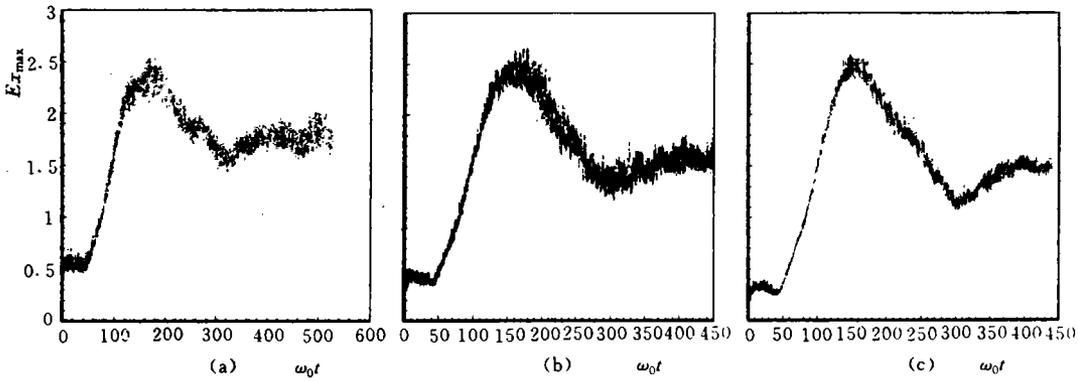


图4 不同时刻全空间中电场 X 分量的最大值

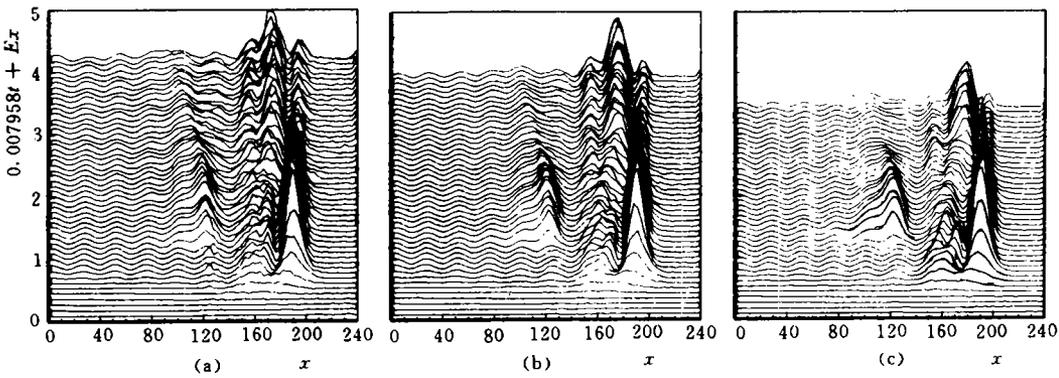


图5 不同时刻电场的 X 分量随时间的变化

粒子数减少造成的一个后果是波碎时间被稍微推迟了,由于静电波的破碎是由共振区域各层电子流体的振荡发展到各层电子流体的混乱排列而产生的,因而这是可以理解的。图4(b)和图4(c)在忽略细微结构时变化趋势一致。

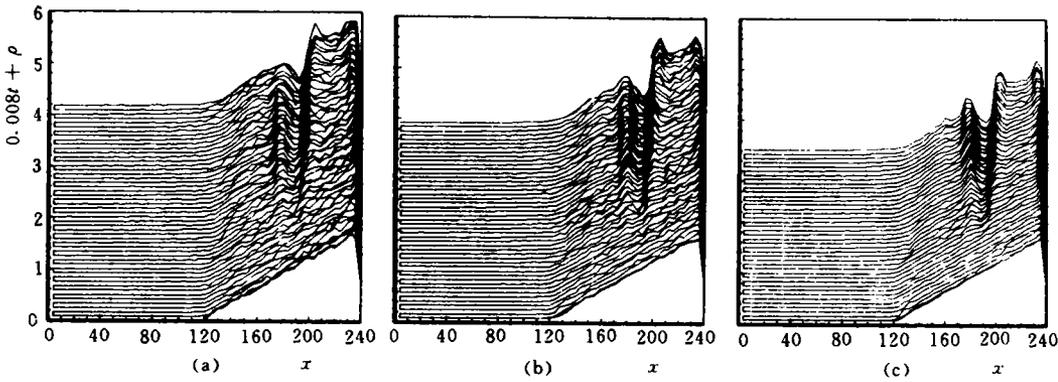


图6 等离子体的密度随时间的变化

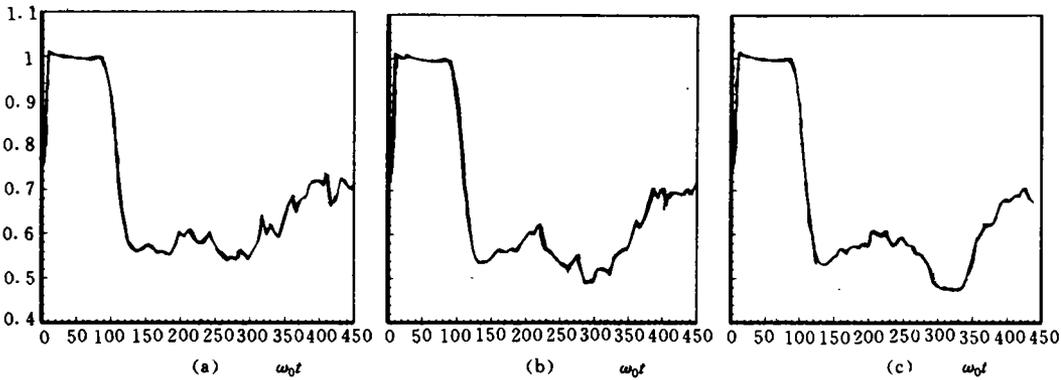


图7 能量的吸收系数随时间的变化曲线

关于共振电子的加速,在三种情况下的模拟结果都指出:粒子的共振吸收主要发生在共振层,该处存在大量被静电场俘获并在其中振荡的高能电子,波碎后一部分高能电子以超热电子的形式发射出去。而同时由于场和粒子的相互作用,波碎后,总的电场能量下降,详情参考文献[3]。

三种情况下得到场的模拟结果一致或接近一致,这说明在本问题中在一定范围内  $n_p$  取值对场的模拟结果影响不大,譬如三种情况下在低密度区域  $E_y$  和  $B_z$  都呈现显著的驻波结构,这与我们的预期是符合的。图5可以看到静电波产生、发展的过程:共振层静电场的振荡宽度越来越窄,直至波碎,5(b)和5(c)尤其显然,波碎后在原共振层仍存在被俘获的振幅不大的静电场,其左侧也出现了共振现象。结合图6,模拟粒子数越多,空穴左边的凸起越明显,左侧的共振现象也越显著,考虑到共振吸收的机制,这是合理的。

最后,图7给出左边界净的入射能量与入射激光的能量之比,在  $t < 90$  以前比值为1,按线性理论, $t = 0$  时刻左边入射激光的反射波在  $t = 73$  时才能传到左边界。由于上升时间不等于零,这与模拟结果是吻合的。该比值大部分时间处在0.5至0.7之间,与文[7]的结果相似。 $n_p$  越大,曲线越光滑, $n_p = 61440$  和  $184320$  的曲线比  $n_p = 30720$  的光滑。

模拟粒子数的增加,使结果更接近物理现实,但必须考虑到计算机的承受能力。对于

共振吸收过程,早期是激光和等离子体变化最剧烈的时期,该时期 $n_p = 61440$ 的模拟结果与 $n_p = 184320$ 的结果一致或接近一致,说明用 $n_p$ 为61440或稍微多一点的粒子模拟程序对该物理过程包括各种后期现象如空穴的传播消失和平台的形成进行模拟是合适的。

### 参 考 文 献

- 1 常铁强等. 激光等离子体相互作用与激光聚变. 长沙:湖南科学技术出版社,1991
- 2 Godoit J. Mattheussent. G Physics Fluid, B2(5), 907
- 3 曹莉华等. 共振吸收中等离子体波对电子的加速. 计算物理, 1997(3): 14
- 4 刘大庆. 二维多时标粒子模拟程序:[硕士论文]. 长沙:国防科技大学, 1996
- 5 顾彪. 物理学报. 33, 331
- 6 金兹堡. 电磁波在等离子体中的传播. 北京:科学出版社, 1978
- 7 Adam J C. Phys. Fluids. 31: 2602

(责任编辑 石少平)