

电子-离子碰撞对超热电子影响 的 PIC 模拟计算 *

吴衍青 韩申生

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(1999 年 4 月 10 日收到; 1999 年 11 月 8 日收到修改稿)

超热电子-离子的产生和输运在传统的 ICF 方案和“快点火”方案中都是很重要的问题。讨论了电子-离子碰撞对参量不稳定性产生超热电子的过程和超热电子输运过程的影响。指出电子-离子弱碰撞项的加入增强了碰撞吸收, 提高了热电子温度, 降低了静电波破裂时的场能, 这些改变了超热电子的总能量和分布, 使之更集中于静电波的相速。电子-离子碰撞的存在还增强了自洽电场, 阻碍了超热电子的输运, 同样也是超热电子能量下降的原因之一。同时, 为确保计算结果的可靠, 讨论了初条件对 PIC 模拟计算的影响, 指出空间位置随机热启动容易引入非物理因素, 对计算结果造成明显的不良影响。

PACC: 5265; 5235

1 引言

众所周知, 超热电子在传统的 ICF 方案中是很重要的问题。它会引起靶核预热, 影响靶核的压缩。所以在传统的 ICF 方案中, 需要抑制超热电子及产生超热电子的各种等离子体静电不稳定性; 而在“快点火”方案中, 则需要产生大量的超热电子, 使其能量在短时间内大量沉积于靶核。所以, 超热电子的产生和输运都是很重要的问题。关于超热电子在高密度区和低密度区的输运, 已经有很多研究工作^[1-3]。这些文献指出, 电导率在超热电子输运中有重要影响, 大大改变了回流热电子的数量。而电导率实际上反映了电子-离子碰撞率。本文主要用加电子-离子弱碰撞效应的 PIC 数值模拟方法, 在等离子体低密度区对参量不稳定性产生超热电子的过程和超热电子输运的过程中的电子-离子碰撞效应进行进一步的综合研究。另外, 用这种方法也可以对由靶材的不同和湍流加热引起的等效碰撞率增加对超热电子的影响进行唯象的研究。同时为确保计算结果的可靠, 我们着重考察了初条件对计算结果的影响。

2 理论考虑

2.1 等离子体中电子-离子碰撞对超热电子产生和输运的影响

在激光打靶产生的等离子体中, 高强度激光可驱动各种等离子体静电不稳定性, 与此相联系的静电波迅速增长, 很快达到非线性饱和阶段。通过各种波-粒子相互作用把波能转交给电子。对于 $10^{14} - 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 的激光强度激发的参量不稳定性的主要饱和机制是模耦合, 而在更高强度激光打靶的条件下, 通过波的破裂把波能转交给电子是重要因素^[5]。根据水袋模型, 波破裂时的最大场能 E_{\max}^2 满足^[4]

$$\frac{e^2 E_{\max}^2}{m^2 \omega_{pe}^2 v_p^2} = 1 + 2\sqrt{\beta} - \frac{8}{3}\beta^{1/4} - \frac{\beta}{3}, \quad (1)$$

其中, $\beta = 3v_e^2/v_p^2$, v_e 为电子热速度, v_p 为静电波相速度, ω_{pe} 为等离子体振荡频率; e , m 分别为电子电荷和电子质量。在波破裂时被波束缚的电子被甩出, 它们的速度达到波的相速度 v_p 量级(通常 $v_p \gg v_e$)成为超热电子。图 1 为在波破裂时最大场能 E_{\max}^2 与 v_e 的关系。可以看出, E_{\max}^2 随温度上升而下降。

* 国家自然科学基金(批准号 69678012)和国家高技术研究发展计划资助的课题。

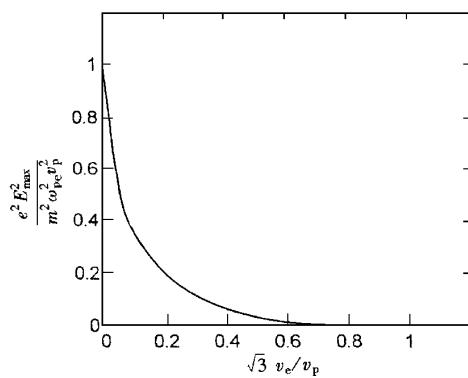


图 1 静电波破裂时的场强与电子热速度的关系

电子-离子碰撞的存在对等离子体中波粒相互作用有重要影响,从而可能影响超热电子的产生.其中重要的影响是碰撞吸收:与电磁波的碰撞吸收相似,电子-离子碰撞会使静电波更多地转化为热电子能量,从而减少总的超热电子能量,而热电子温度的提高又将影响波破裂时的静电场强度 E_{\max}^2 .从波坐标系中看, E_{\max}^2 下降意味着势场 ϕ 下降(对于波有 $E \sim k\phi$),使静电波只能俘获动能小的电子,这样电子被波俘获后在波势场中运动时最大速度小,动能变化范围也就小,即在实验室坐标系中它们的速度分布集中于波的相速.因此,电子-离子碰撞改变了超热电子产生时的能量和分布.

电子-离子碰撞的存在还将影响超热电子的输运.超热电子产生后向各个方向发射,其中,进入密度稀薄区域的超热电子受电荷分离电场的影响而折回;为了保持准电中性,向密度较稠密地区输运的超热电子会引起一股热电子回流,于是产生双极电场^[5].自洽电场是高强度激光打靶中超热电子慢化的主要原因之一.虽然离子与超热电子直接碰撞对超热电子影响不大,但离子与热电子的碰撞可能对热电子的回流产生足够的影响,从而增强双极电场,加剧超热电子的慢化.

2.2 PIC 数值模拟中的电子-离子碰撞及初条件

我们采用加入电子-离子弱碰撞项^[5,6]的粒子模拟方法(PIC)来考察电子-离子碰撞对超热电子的影响,同时为确保计算结果的可靠,我们着重考察了初条件对计算结果的影响.

1. PIC 数值模拟中的初条件^[7]

PIC 模拟要设定每一类粒子中每一个粒子的初始位置 x 和初速度 v .但通常初条件都是由粒子的

分布函数给出,于是就出现了模拟模型中粒子的相空间位置设定是否(或在多大程度上)反映物理模型的分布函数的问题.特别是在模拟粒子数不够多的情况下,我们希望粒子相空间初始设定能尽可能根据分布函数给出,并希望统计涨落尽量小.

通常的做法有顺序摆放法、随机热启动法和静启动.

顺序摆放法是将粒子在速度空间和位置空间分别顺序摆放.这似乎从总体上满足了分布函数,但违背了粒子在相空间中分布的均衡特性,在相空间中产生了严重的相干性失衡.

热启动则用统计分布与粒子分布函数相同的随机数来确定粒子的相空间位置.它满足了相空间均衡分布的要求,但在期望的分布上叠加了随机噪声(热噪声),由于模拟粒子数的限制,该噪声通常较大.

为了观察较小的物理扰动,启动时应尽可能降低热噪声.静启动将满足分布函数的粒子精心摆放在相空间中不会造成相干性失衡的指定位置上.这避免了相空间相干性失衡,也避免了热噪声,但却带来了另一些相干性太强的非物理效应(如多束流不稳定性).

总之,涨落小和无相干很难两全,一般要根据问题的性质,通过数值实验来求取最佳折衷.

2. PIC 模拟中弱碰撞效应的加入^[5,6]

在我们所用的 PIC 模拟程序中,离子仅作均匀正电背景.因此,鉴于所讨论问题的性质,在 PIC 模拟程序中加入弱碰撞效应.

电子-离子碰撞用一维 Fokker-Planck 算符表示

$$\left(\frac{\partial f(u, t)}{\partial t} \right)_{\text{coll}} = \frac{\partial}{\partial u} [\nu(u) u f(u, t) + D \frac{\partial}{\partial u} (\nu(u) f(u, t))], \quad (2)$$

这里, $f(u)$ 表示电子的分布函数, $\nu(u)$ 是电子-离子碰撞频率,

$$\nu(u) = \nu_0 \left(1 + \nu_2 \frac{u^2}{2u_T^2} \right)^{-\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

其中 ν_0, ν_2 是给定常数. $\nu_2 = 0$ 时, ν 是常数 ν_0 , 当 $\nu_2 = 1$ 时,对于大的速度相当于库仑碰撞.这里

$$u_T^2 = \int u^2 f(u, t) du. \quad (4)$$

D 是扩散系数,由能量守恒定义为

$$D = \int \nu(u) u^2 f(u, t) du / \int \nu(u) f(u, t) du. \quad (5)$$

(2) 式右端第一项表示由于碰撞引起的和速度相关的摩擦力,它使粒子慢下来因而减少动能,右端的第二项是碰撞引起的粒子在速度空间的扩散.

在数值计算时(2)式右端的第一项摩擦项

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_f = \frac{\partial}{\partial u} [u v(u) f(u, t)]$$

可以等价于引入一个和速度相关的加速度 $a(u) = -uv(u)$.

第二项为扩散项

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_d = D \frac{\partial^2}{\partial u^2} [v(u) f(u, t)],$$

对扩散项则从计算粒子数分布入手^[4].

3 PIC 数值模拟

在模拟中我们采用 $1\frac{1}{2}$ 维 PIC 电磁模型,除电子-离子弱碰撞项外,离子仅作均匀正电背景.

3.1 PIC 程序的检验

在此我们考察初条件对 PIC 模拟计算的影响以及电子-离子弱碰撞项的检验.

1. 初条件对 PIC 模拟计算的影响

模拟区域长度为 60λ ,密度从 $0.05n_c$ 到 $0.15n_c$ (n_c 为临界密度) 在程序中跟踪 102400 个粒子,空间网格数为 10240;采用短时 Fourier 方法 (STFT)^[8] 作波矢空间分布图(图 2(a)(b)(c)).发现当采用粒子空间位置随机热启动时,容易在静电波中引入一个较强的长波长的扰动,在非均匀的条件下,它逐渐向短波长移动,存在的空间区域也变小并逐渐偏向高密度区,直至最后消失.从计算结果来看,它对电子能量吸收和分布有明显影响.在采用粒子速度静启动,而位置空间热启动的方案时,该现象仍然存在;当采用空间位置顺序摆放,粒子速度静启动或热启动时此现象消失.因此确认这个扰动是粒子空间位置热启动时,随机噪声太大导致整体电荷偏离中性太大而造成的.所以,即使在适于采用热启动的情况下,也应采用空间位置精确摆放,粒子速度热启动的方案.这样既避免了相干性问题,又不至于使整体电荷偏离中性太大造成不良后果.图 3 为采用空间位置精确摆放,粒子速度热启动方案的相图.

另外,经数值实验证,采用静启动后束流不稳定性充分发展饱和后的无序状态作初始分布^[7]也

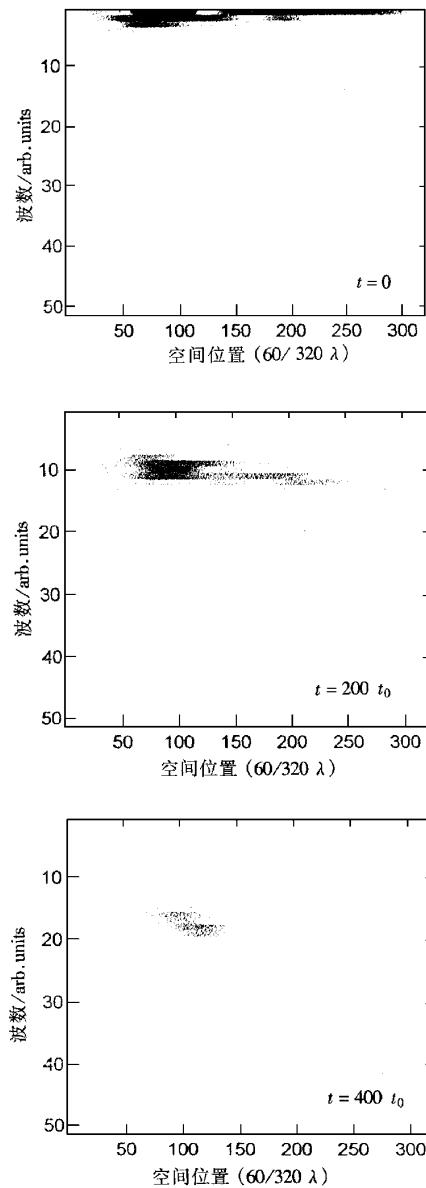


图 2 空间位置随机热启动引入的长波长初始扰动随时间的演化 (t_0 为激光振荡周期)

是合适的.

2. PIC 程序中所加的电子-离子弱碰撞项的检验

为了对 PIC 程序中所加的电子-离子弱碰撞项进行检验,我们对双 Maxwell 速度分布空间均匀等离子体的碰撞弛豫问题进行了模拟. 粒子初始分布为

$$f(u, t=0) = \frac{0.5n}{2\sqrt{2\pi} u_{i0}} \left[\exp\left(-\frac{(u - u_{d0})^2}{2u_{i0}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(u + u_{d0})^2}{2u_{i0}^2}\right) \right]. \quad (8)$$

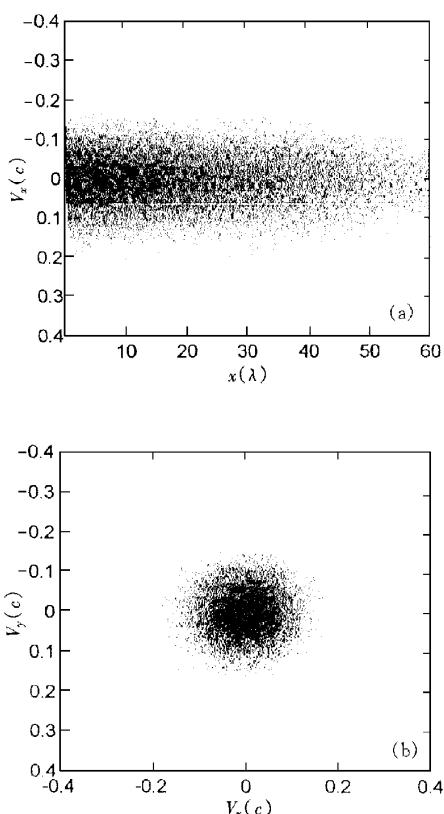


图 3 采用空间位置精确摆放, 粒子速度热启动方案的相图
(a) V_x - x 图 (b) V_x - V_y 图

这里, 电子密度 $n = 10^{21}/\text{cm}^3$, 电子初始热速度 $u_{t0} = \sqrt{\frac{KT_0}{m}}$, $T_0 = 1.5 \text{ keV}$, 电子的漂移速度 $u_{d0} = 5u_{t0}$. 如果 ν 为常数, 则 Fokker-Plank 方程可解析求解. 解为

$$f(u, t) = \frac{0.5n}{2\sqrt{2\pi}u_t} \left[\exp\left(-\frac{(u - u_d)^2}{2u_t^2}\right) + \exp\left(-\frac{(u + u_d)^2}{2u_t^2}\right) \right], \quad (9)$$

其中 $u_t = [D - (D - u_{t0}^2)e^{-2\nu t}]^{1/2}$,
 $u_d = u_{d0}e^{-\nu t}$,
 $f(u, t \rightarrow \infty) = \frac{n}{2\sqrt{2\pi D}}e^{-\frac{\nu^2}{2D}}$. $\quad (10)$

图 4 为模拟值与解析结果的比较. 可以看出, 两者符合很好.

3.2 电子-离子碰撞对超热电子产生和输运影响的数值模拟

我们在模拟中采用下列模拟条件: 模拟区域长度为 60λ ; 密度从 $0.094n_c$ 到 $0.1n_c$ (n_c 为临界密

度); 在这些条件下, 等离子体中主要产生后向 SRS; 在程序中跟踪 102400 个粒子; 空间网格数 $n = 10240$; 抽运激光光强随时间的变化如图 5 所示; 抽运激光在右边界 $x = xt$ 处入射 (xt 对应第 n 个网格点); 高密度边界 ($x = 0$) 电磁波采用无反射边条件, 粒子边条件为: 向低密度区域逸出的粒子反射回来, 向高密度区域逸出的每个粒子则引起一个随机速度的热电子回流. 采用静启动后束流不稳定性充分发展饱和后的无序状态作初始分布, 碰撞项中有效电荷 $Z_{\text{eff}} = 2$.

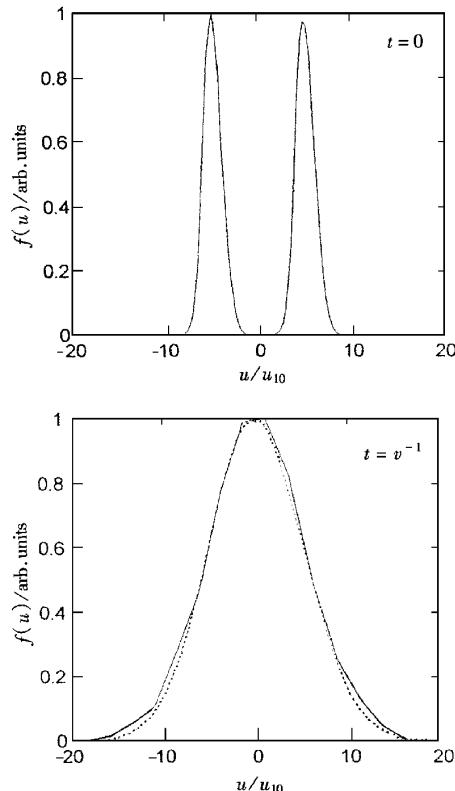


图 4 ν 为常数 ($\nu = 0.05\omega_{pe}$) 的双流分布函数的碰撞弛豫解析结果 (虚线) 与模拟结果 (实线) 的比较

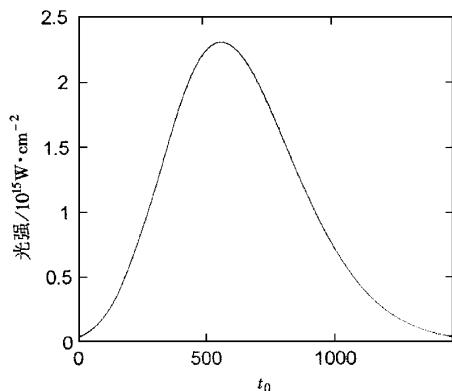
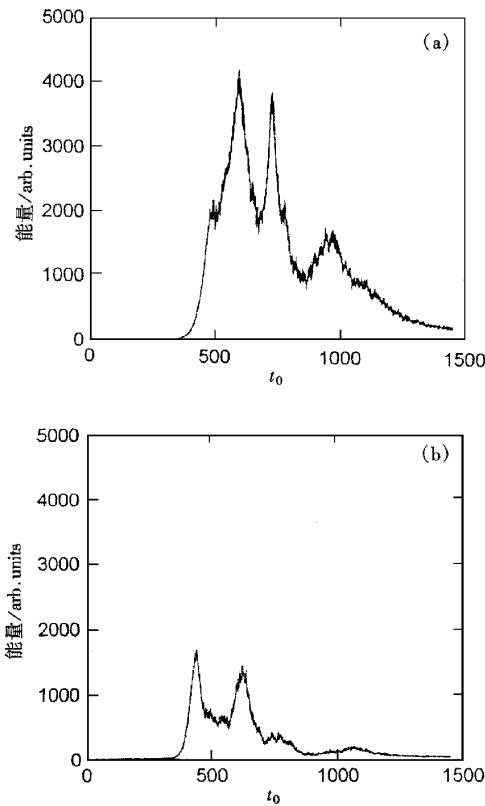


图 5 抽运激光随时间 (以激光振荡周期为单位) 的变化

下面给出数值模拟结果及分析.

图 6(a)(b) 分别给出了没有电子-离子碰撞和



1

图 6 (a) 没有电子-离子碰撞情况下后向 SRS 对应的静电波能量随时间的发展 (b) 有电子-离子碰撞情况下后向 SRS 对应的静电波能量随时间的发展

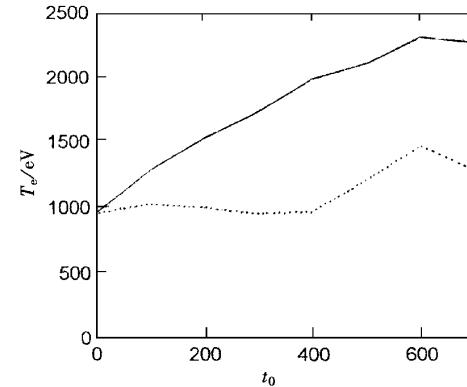


图 7 热电子的温度随时间的发展 其中,虚线为没有电子-离子碰撞的情形,实线为有电子-离子碰撞的情形

有电子-离子碰撞两种情况下后向 SRS 对应的静电波能量随时间的发展;当静电波增强后,在 $t = 500t_0$ (t_0 为激光振荡周期) 左右破裂. 可以发现有电子-离子碰撞的情况下静电波破裂时的场能 E_{\max}^2 明显降低,在图 7 中给出了两种情况下热电子的温度

随时间的发展,图中显示差别较大. 所以,加入电子-离子碰撞后,碰撞吸收的增强使热电子温度上升. 由于波破裂时的场能 E_{\max}^2 对温度变化较敏感,因而导致了波破裂时的场能 E_{\max}^2 的下降. 没有电子-离子碰撞和有电子-离子碰撞两种情况下波破裂时的场能 E_{\max}^2 的比值为 模拟值 2.5, 理论值 2.1(由图 7 及 (1) 式算出). 考虑到水袋模型的简单性,两者符合较好. 抽运激光能量更多地被热电子吸收和波破裂时的场能的下降都影响了超热电子的数量和分布. 图 8 给出了 $t = 700t_0$ 时等离子体内的电子速度分布,

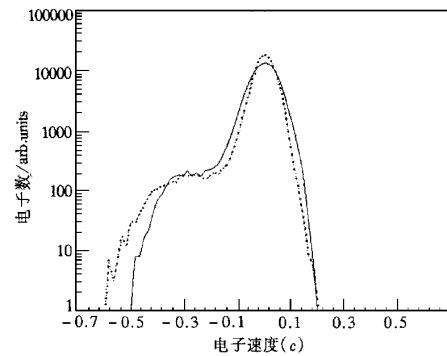


图 8 $t = 700t_0$ 时的电子速度分布

可以看出有电子-离子碰撞的情况下热电子温度上升,而超热电子数下降,并且在分布上更集中于静电波的相速. 该静电波相速 v_p 的理论值和模拟值均为 $-0.18c$ (c 为真空中的光速). 没有电子-离子碰撞的情况下超热电子温度为 26 keV; 有电子-离子碰撞的情况下超热电子温度为 11 keV(这里的超热电子温度是用来表征以静电波相速 v_p 为中心的超热电子分布的). 两者之比为 2.4, 与两者波破裂时的场能之比相当接近.

另外,图 6(a)(b) 中的第二个峰值为第二次静电波破裂. 在第一次波破裂时,主要由于强烈的波粒相互作用,与 SRS 相对应的静电波能量被转移到粒子以及其他静电波模式上,与 SRS 相对应的静电波又从小幅度开始增长,直至第二次波破裂. 至于图 6(a) 中的第三个较小的峰值则未能完全理解,从模拟结果来看,它的波数并不与 SRS 相对应静电波完全一致.

下面考察超热电子的输运.

图 9(a)(b) 分别是两种情况下出射高密度面的超热电子($v > 0.15c$)的数目随时间的变化. 可以看出超热电子主要在 $500t_0$ — $1000t_0$ 中产生. 图 10 是在这段时间内静电场极低频成分空间分布的时间

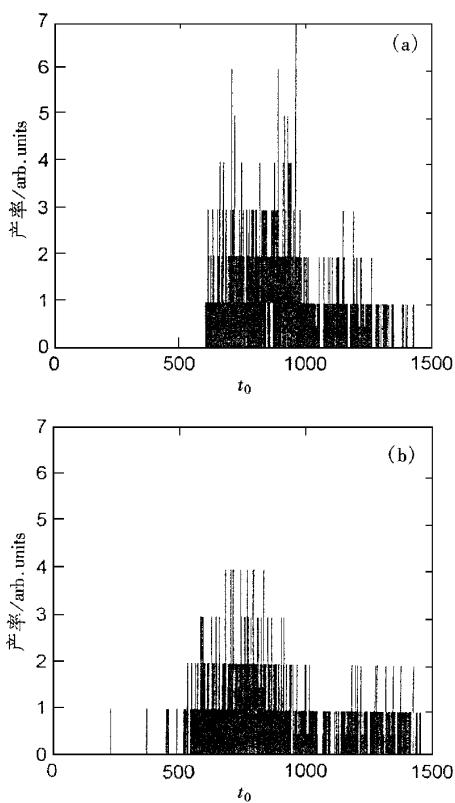


图 9 (a)没有电子-离子碰撞情况下射出高密度面的超热电子($v > 0.15c$)的产率随时间的变化 (b)有电子-离子碰撞情况下射出高密度面的超热电子($v > 0.15c$)的产率随时间的变化

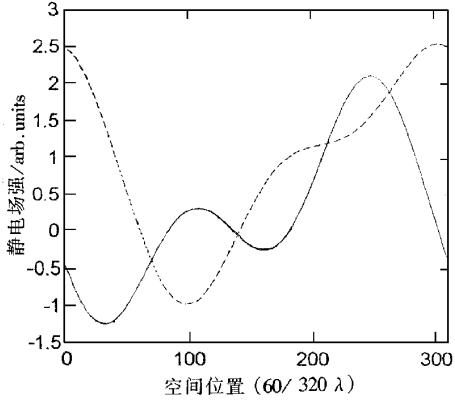


图 10 $500t_0$ — $1000t_0$ 中静电场极低频成分空间分布的时间平均 虚线为没有电子-离子碰撞的情形, 实线为有电子-离子碰撞的情形(静电场强正方向为向右)

平均, 它主要由自洽场决定; 可以看出, 在有电子-离子碰撞的情况下, 超热电子向高密度区域输运须耗

费的能量更大. 这是因为离子与热电子碰撞, 阻碍了回流热电子对自洽电场的中和, 增强了自洽电场对热电子的慢化作用, 降低了超热电子的能量.

最后, 为了综合考察电子-离子碰撞对超热电子产生和输运的影响, 我们给出了在有和没有电子-离子碰撞两种情况下射出高密度面的速度下限为 $0.15c$ 的超热电子总能量(图 11). 结果显示在有电子-离子碰撞的条件下, 射出高密度面的超热电子总能量下降.

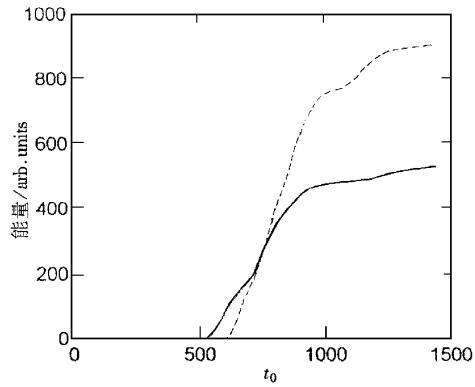


图 11 射出高密度面的速度下限为 $0.15c$ 的超热电子能量对时间的积分 虚线为没有电子-离子碰撞的情况, 实线为有电子-离子碰撞的情况

总之, 碰撞吸收加热热电子提高了热电子温度, 使超热电子总能量下降. 热电子温度上升降低了静电波破裂时的场能, 影响了等离子体内超热电子的分布, 使之更集中于波的相速. 电子-离子碰撞增强了自洽电场, 阻碍了超热电子输运, 也使射出高密度面的超热电子能量下降.

4 结 论

本文讨论了初条件对 PIC 模拟计算的影响, 指出空间位置随机热启动容易引入非物理因素, 对计算结果造成明显的不良影响; 弱碰撞项的加入影响了碰撞吸收, 提高了热电子温度, 静电波破裂时的场能下降. 这些改变了超热电子的总能量和分布; 电子-离子碰撞的存在还增强了自洽电场, 阻碍了超热电子的输运, 同样也是超热电子能量下降的原因之一.

- [1] D. J. Bond, J. D. Hares, J. D. Kilkenny, *Phys. Rev. Lett.*, **45** (1980) 252.
- [2] D. J. Bond, J. D. Hares, J. D. Kilkenny, *Plasma Phys.*, **24** (1982) 91.
- [3] A. R. Bell, J. R. Davies, H. Ruhl, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **39** (1997) 653.
- [4] W. L. Kruer, *The Physics of Laser Plasma Interactions*, chapter 9 (Addison-Wesley Publishing Company, 1988).
- [5] C. E. Rathmann, J. Denavit, *J. Computational Phys.*, **18** (1974) 185.
- [6] T. Q. Chang *et al.*, *Laser Plasma Interaction and Laser Fusion* (Hunan Science and Technology Press, 1991) [in Chinese] 常铁强等:《激光等离子体相互作用与激光聚变》(湖南科学技术出版社,1991)】
- [7] Z. F. Fu, Y. Q. Hu, *The Numerical Simulation of Space Plasma* (Anhui Science and Technology Press, 1995) [in Chinese] 傅竹风、胡友秋:《空间等离子体数值模拟》(安徽科学技术出版社,1995)】
- [8] L. Cohen, *Proc. IEEE*, **77** (1989) 941.

PIC SIMULATION OF THE ELECTRON-ION COLLISION EFFECTS ON SUPRATHERMAL ELECTRONS

WU YAN-QING HAN SHEN-SHENG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(Received 10 April 1999; revised manuscript received 8 November 1999)

ABSTRACT

The generation and transportation of suprathermal electrons are important to both traditional ICF scheme and "Fast Ignition" scheme. This paper discusses the effects of electron-ion collision on the generation and transportation of the suprathermal electrons by parametric instability. It indicates that the weak electron-ion term in the PIC simulation results in the enhancement of the collisional absorption and increase of the hot electron temperature and reduction in the maximum electrostatic field amplitude while wave breaking. Therefore the energy and distribution of the suprathermal electrons are changed. They are distributed more close to the phase velocity of the electrostatic wave than the case without electron-ion collision term. The electron-ion collision enhances the self-consistent field and impedes the suprathermal electron transportation. These factors also reduce the suprathermal electron energy. In addition, we discuss the effect of initial condition on PIC simulation to ensure that the results are correct.

PACC: 5265; 5235

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69678012) and by the National High Technology Development Program of China.