

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНАЯ СТАДИЯ ТРЕХМЕРНОГО ЛЕНГМЮРОВСКОГО КОЛЛАПСА

*В.Е.Захаров, А.Н.Пушкарев, А.М.Рубенчик,
Р.З.Сагдеев, В.Ф.Швец*

Исследуется заключительная стадия эволюции трехмерной ленгмюровской каверны. Найденные значительные (по сравнению с двумерным случаем) окончательные размеры каверны и высокие уровни высокочастотного поля свидетельствуют о существенной роли механизма нелинейного затухания Ландау в диссипации волновой энергии.

1. Для построения последовательной теории ленгмюровской турбулентности плазмы принципиальное значение имеет изучение заключительной стадии коллапса ленгмюровской каверны ¹, на которой происходит переход энергии ленгмюровских колебаний к быстрым электронам. Ввиду малых временных и пространственных размеров каверны экспериментальное изучение этого процесса затруднено, и эксперименты группы А.Вонга ² остаются пока единственными. Поэтому численное моделирование заключительной стадии коллапса

является особенно актуальным. Трудность здесь состоит в том, что на заключительной стадии коллапса неприменимо его описание в рамках усредненных гидродинамических уравнений (по поводу численного моделирования этих уравнений см. ³ и литературу, приведенную в ¹), и необходимо решение полной кинетической задачи, т. е. использование метода частиц. Кроме того, ввиду принципиальной зависимости характера коллапса от размерности пространства ^{1, 4}, для получения полноценных с точки зрения физики плазмы результатов необходимо решение трехмерной задачи (заметим, что двумерная ситуация была рассмотрена ранее в ⁴). В результате численное моделирование заключительной стадии трехмерного ленгмюровского коллапса оказывается на пределе возможностей современной вычислительной техники. Нам удалось решить эту задачу посредством последовательного учета предсказываемых теорией физических свойств коллапсирующей каверны и максимального согласования ⁵ физического параллелизма задачи с архитектурой используемого при проведении численных экспериментов высокоэффективного многопроцессорного комплекса ЕС-1037 – ЕС-2706 ИКИ АН СССР ⁶.

Коллапсирующая каверна имеет сплюснутую форму с дипольным распределением заряда. Пусть ее малая ось ориентирована вдоль оси z . Тогда потенциал электрического поля обладает следующими свойствами симметрии относительно центра каверны:

$$\varphi(x, y, z) = \varphi(x, -y, z) = \varphi(-x, y, z) = \varphi(-x, -y, z) = -\varphi(x, y, -z).$$

Использование их позволило ограничиться рассмотрением одной четверти каверны в области $0 \leq x, y \leq L$, $-L/2 \leq z \leq L/2$, где L изменялось в пределах $32r_D \leq L \leq 64r_D$. На границах расчетной области ставились условия отражения $\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0$, отношение масс ионов и электронов менялось в пределах от 100 до 400. Исходное распределение заряда задавалось в виде:

$$\rho(x, y, z) = \rho_0 \sin kz (1 + \cos kx)(1 + \cos ky), \quad k = \pi/L,$$

вариация плотности плазмы в начальный момент вычислялась из условия равновесия:

$$\left. \frac{\delta n}{n_0} \right|_{t=0} = -\frac{1}{16\pi n_0 T_e} |E|^2, \quad E = -\nabla \varphi.$$

Начальное распределение электронов выбиралось – максвелловским, ионы – холодными. Общее число модельных частиц составляло $\sim 1,8 \cdot 10^6$, интенсивность начального распределения энергии колебаний в центре каверны $W_{max}/n_0 T_e$ ($W_{max} = \left. \frac{E^2}{8\pi} \right|_{r=0}$) менялась в пределах $0,135 \leq \frac{W_{max}}{n_0 T_e} \leq 0,485$. Среднее значение энергии ВЧ поля $\left. \frac{W}{n_0 T_e} \right|_{t=0}$ по каверне изменялось в пределах $0,0242 \leq \left. \frac{W}{n_0 T_e} \right|_{t=0} \leq 0,080$.

2. Результаты расчетов продемонстрировали яркую картину коллапса (рис. 1), экспериментально найденный порог по интенсивности процесса оказался близким к предсказываемому теоретически ¹. В процессе коллапса происходила диссипация значительной части (около 70%) энергии ВЧ колебаний, характерное время этой диссипации порядка $8-9 \omega_{pi}^{-1}$. В соответствии с теоретическими представлениями о роли инерции ионов ⁷, основное углубление ямы плотности (до $-(\delta n_i/n_0) \sim 0,7$) происходило после достижения максимума ВЧ энергии (рис. 1,2). Характерного для двумерного случая образования кавитона при малых превышениях над порогом коллапса ⁴, в трехмерных расчетах не наблюдалось. Для всех вариантов мы наблюдали существенно большие значения уровней ВЧ поля и вариации плотности плазмы в каверне, чем в аналогичных двумерных расчетах, рост волновой энергии в центре каверны опережал (до момента достижения максимального значения) углубление ионной ямы.

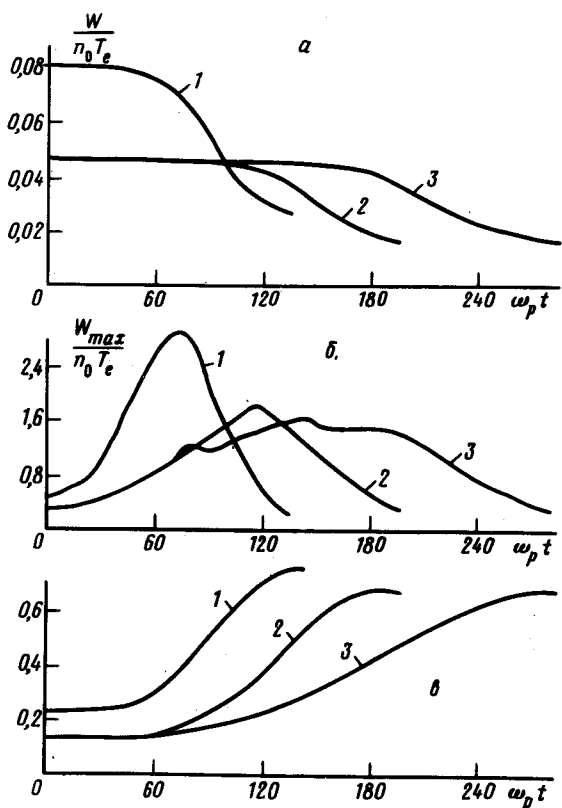


Рис. 1. Временные зависимости характеристик схлопывающейся каверны: 1 - $\rho_0 = 0,020, M/m = 100$; 2 - $\rho_0 = 0,015, M/m = 100$; 3 - $\rho_0 = 0,015, M/m = 400$. а - Средняя энергия W/n_0T_e ВЧ поля в каверне; б - максимальная энергия W_{max}/n_0T_e поля в каверне; в - максимальное по пространству значение вариации плотности $(\delta n_{max}/n_0) - (\delta n_{min}/n_0)$

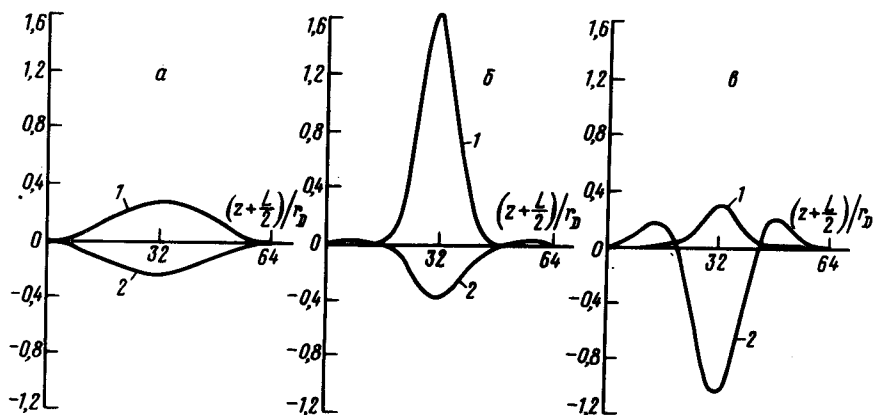


Рис. 2. Пространственные профили вдоль оси диполя в сечении $x = y = 0$ величин $E^2/8\pi n_0T_e$ (кривые 1) и $2(\delta n_i/n_0)$ (кривые 2) для варианта $\rho_0 = 0,015, M/m = 400$; а - $t = 0$; б - $t = 139,2 \omega_p^{-1}$; в - $t = 284,0 \omega_p^{-1}$

В процессе коллапса каверна сохраняла сплюснутую форму. Важным результатом, который мы наблюдали для всех вариантов, является достаточно большой ($\sim 14 - 16 r_D$) минимальный (вдоль оси диполя) размер каверны (рис. 2), в двумерном случае эта величина состав-

ляла $\sim 10 r_D^4$. Это согласуется с данными лабораторных экспериментов², ранее казавшихся необъяснимыми. Объяснение может состоять в том, что за счет высоких значений достигнутых интенсивностей ВЧ энергии (доходящих до $(W_{max}/n_0 T_e) \sim 3$), ее диссипация происходит при помощи механизма затухания Ландау, сильно модифицированного нелинейностью и приближающегося к эффекту самопересечения траекторий. Это дополнительно

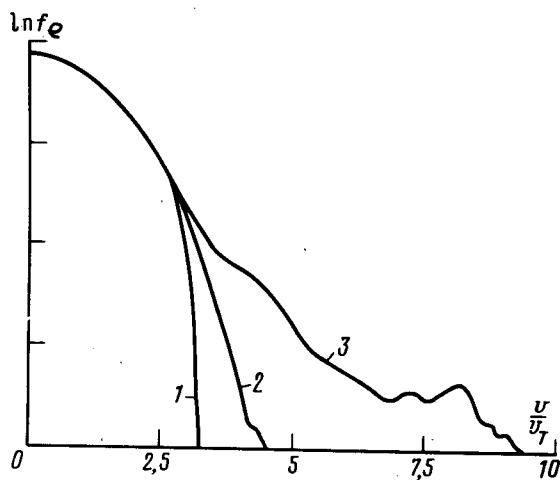


Рис. 3. Функция распределения электронов, проинтегрированная по пространству и по скоростям: 1 — $v_x, v_y (t=0)$; 2 — $v_y, v_z (t=284,0 \omega_p^{-1})$; 3 — $v_x, v_y (t=284,0 \omega_p^{-1})$ для варианта $\rho_0 = 0,015, M/m = 400$

иллюстрируется анализом финального распределения электронов по скоростям (рис. 3). Оно является существенно анизотропным (максимальное ускорение вдоль оси диполя), причем регистрируется существование сильно ускоренных, до $v = v_{max} = 9 v_T$, электронов (в двумерных расчетах $v_{max} \sim 5 v_T$). Это, в частности, означает, что трехмерный коллапс является значительно более эффективным механизмом генерации быстрых электронов, чем двумерный.

Авторы благодарны А.И.Дьяченко за внимание к работе и полезные обсуждения, А.Ю.Головину и И.В.Петрову за существенную помощь при программировании задачи.

Литература

1. Захаров В.Е. Коллапс и самофокусировка ленгмюровских волн. Сб. Основы физики плазмы, т. 2, М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Wong A. Y., Cheung P. Y. Phys. Rev. Lett., 1984, 52, 1744; Cheung P. Y., Wong A. Y. Phys. Fluids, 1985, 28, 1538.
3. Дегтярев Л.М., Захаров В.Е., Сагдеев Р.З. и др. ЖЭТФ, 1983, 85, 1221.
4. Дьяченко А.И., Захаров В.Е., Рубенчик А.М. и др. Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, 504; ЖЭТФ, 1988, 94, 144.
5. Головин А.Ю., Пушкарёв А.Н., Сагдеев Р.З. и др. Препринт ИКИ АН СССР, № 1347, 1988.
6. Велихов Е.П., Лазаров Вл., Марков Ст. и др. Препринт ИКИ АН СССР, № 1169, 1986.
7. Rubenchik A. M., Sagdeev R. Z., Zakharov V. E. Comm. Plasma Phys Contr. Fus., 1985, 9, 183.