

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина Сибирское отделение

Н.С. Бучельникова, В.Э. Карлин

eh - СТРУКТУРЫ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ХОЛОДНОГО ЭЛЕКТРОННОГО
ПУЧКА С ПЛАЗМОЙ. I.

ИЯФ 2005-13

НОВОСИБИРСК
2005

eh-структуры при взаимодействии холодного электронного пучка с плазмой. I.

Н.С. Бучельникова, В.Э. Карлин

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера
630090 Новосибирск СО РАН

Аннотация

Проведены численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию неустойчивости холодного пучка электронов большой плотности ($n_b/n_o = 0.3$ или 0.5) в плазме. Скорость пучка в разных случаях $V_o/V_T = 2, 71; 4.46; 8.28; 15.92$. $L/r_d = 200$. $M/m = 10^{10}$.

Показано, что развитие пучковой неустойчивости сопровождается захватом электронов пучка и плазмы, что приводит к формированию eh-структур на фазовой плоскости ("electron holes"). Неустойчивость слияния eh-структур приводит к формированию квазистационарной одиночной eh-структуры. Скорость этой структуры растет при увеличении скорости пучка и уменьшается при увеличении его плотности.

Interaction of cold electron beam with plasma. Electron holes. I.

N.S. Buchelnikova, V.E. Karlin

Budker Institute of Nuclear Physics
630090 Novosibirsk, SB RAS

Abstract

The instability of a cold high-density ($n_b/n_o = 0.3$ or 0.5) electron beam in a plasma was studied in numerical experiments (PIC-method). The velocity of the beam in different cases is $V_o/V_T = 2, 71; 4.46; 8.28; 15.92$. $L/r_d = 200$. $M/m = 10^{10}$.

It was shown, that the evolution of the beam-plasma instability is followed by the trapping of the beam- and plasma- electrons, which leads to the formation of the electron holes (eh-structures on the phase plane). The coalescence of the electron holes leads to the formation of a quasistationary single electron hole. The velocity of the single electron hole increases with the increasing of the beam velocity and decreases with the increasing of the beam density.

В настоящей работе описаны численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию неустойчивости холодного (мономатрического) пучка электронов большой плотности в плазме. Работа состоит из двух частей. В первой части описаны случаи с малыми скоростями пучка ($V_o/V_T \sim 2.7; 4.5; 8.3$), во второй [1] – случаи со скоростью $V_o/V_T = 15.9$ и разными плотностями пучка ($n_b^o/n_o \sim 0.04 - 0.5$).

Ранее нами исследовалась неустойчивость холодного пучка большой скорости и малой плотности [2-4]. Было показано, что в отсутствие сателлитной неустойчивости (например, в короткой системе), развитие пучковой неустойчивости приводит к формированию квазистационарной волны БГК типа сгустка захваченных электронов [2,4]. В такой волне плотность захваченных частиц максимальна в центре области захвата. Увеличение плотности пучка приводит к росту амплитуды волны и к развитию сателлитной неустойчивости. В результате пучковой и сателлитной неустойчивости на фазовой плоскости формируется область стохастического движения [3].

В настоящей работе показано, что при больших плотностях пучка ($n_b^o/n_o \sim 0.3 - 0.5$) пучковая неустойчивость приводит к захвату не только электронов пучка, но и значительного числа электронов плазмы. В результате формируется структура так называемых electron holes (будем называть их eh-структуры). eh-структуры также являются волнами БГК, квазистационарность которых поддерживается захваченными частицами. Распределение плотности захваченных электронов в такой волне имеет минимум ("дырку") в центре области захвата.

Исследованию eh-структур (electron holes) посвящено значительное число работ (см. например, обзор [5] и работы [6,7]). eh-структуры неоднократно наблюдались в численных экспериментах [6, 8-11]. Наблюдались они также в лабораторных экспериментах [12-14] и при исследовании ближнего космоса спутниками [6,15]. Результаты настоящей работы находятся в хорошем согласии с результатами численного эксперимента [6], а результаты второй части [1] согласуются с результатами [3].

Численный эксперимент выполняется методом частиц в ячейках. Рассматривается одномерная система длиной $L/r_d = 200$ с периодическими граничными условиями. Для электронов и ионов плазмы задается максвелловское распределение с $T_e/T_i = 30$, обрезанное на скорости $V \sim \pm 2.8 V_T$ из-за ограниченности числа счетных частиц ($N^e \sim 2 \cdot 10^5$). Ионы неподвижные ($M/m = 10^{10}$). Задается холодный (монохроматический) пучок со скоростью V_o .

Задается затравочная ленгмюровская волна с параметрами, близкими к параметрам волны с максимальным инкрементом и с амплитудой $E_o/\frac{m r_d}{e T_e^2} = 1$. Длина волны λ^N , номер гармоники $N_e = L/\lambda^N$ и фазовая скорость V_Φ^N этой волны зависят от скорости и плотности пучка.

Начальные параметры пучка и затравочной волны приведены в таблице.

Начальные параметры

| Случай | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| V_o/V_T | 2.71 | 2.71 | 4.46 | 4.46 | 8.28 | 8.28 |
| n_b/n_o | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.30 |
| W_b^o/W_e^o | 3.748 | 2.249 | 10.167 | 6.100 | 35.066 | 21.04 |
| N_e | 16 | 16 | 8 | 8 | 4 | 4 |
| λ^N/r_d | 12.5 | 12.5 | 25 | 25 | 50 | 50 |
| V_Φ^N/V_T | 2.64 | 2.64 | 4.34 | 4.34 | 8.14 | 8.14 |
| V_N^o/V_T | 1.59 | 1.59 | 2.71 | 2.71 | 2.71 | 2.71 |

V_o - начальная скорость пучка; n_b, n_o - плотность пучка и плазмы; W_b^o - начальная энергия электронов пучка, W_e^o - начальная энергия электронов плазмы; $N_e = L/\lambda^N$, λ^N , V_Φ^N - номер гармоники, длина волны и фазовая скорость затравочной ленгмюровской волны; V_N^o - начальная скорость пробных частиц.

Во второй части работы рассмотрены случаи 7-10 с одинаковыми $V_o/V_T = 15.92$; $N_e = 2$; $\lambda^N/r_d = 100$; $V_\Phi^N/V_T = 16.01$; $V_N^o/V_T = 2.71$, но разными n_b/n_o и W_b^o/W_e^o .

| Случай | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------|---------|--------|--------|--------|
| n_b/n_o | 0.50 | 0.30 | 0.10 | 0.04 |
| W_b^o/W_e^o | 129.682 | 77.809 | 25.936 | 10.375 |

В начальный момент задается 100 пробных частиц ($e = m = 0$, e/m то же, что и у электрона). со скоростью V_N^o (см. таблицу) Пробные частицы равномерно распределяются в интервале $x \sim 0 - L$. Выводится 18 траекторий пробных частиц на фазовой плоскости.

Подробности постановки и описания численного эксперимента приведены в работе [2].

Отметим, что в тексте и на рисунках напряженность поля E и амплитуда гармоник E^N нормируется на mr_d/eT_{oe}^2 .

Рассмотрим случаи 1,2 с $V_o/V_T = 2.71$; $N_e = 16$; случаи 3,4 с $V_o/V_T = 4.46$; $N_e = 8$; случаи 5,6 с $V_o/V_T = 8.28$; $N_e = 4$, а также случаи 7,8 с $V_o/V_T = 15.92$; $N_e = 2$ из работы [1].

Кривые, описывающие случай 1, приведены на Рис.1-7, случай 2 – на Рис.8-13, случай 3 – на Рис.14-20, случай 4 – на Рис.21-26, случай 5 – на Рис.27-33, случай 6 – на Рис.34-39, случай 7 – в работе [1] Рис.1-7, случай 8 – в работе [1] Рис.8-13.

Для каждого случая показана зависимость от времени энергии электрического поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ (W_e^o – тепловая энергия электронов плазмы) и потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$; зависимость от времени амплитуды E^N основной волны $N = N_e$ и гармоник; фазовые плоскости электронов в разные моменты времени; функции распределения электронов плазмы $f_e(V)$ и пучка $f_b(V)$ по скорости, нормированные на свой максимум f_{\max} или максимум начальной функции распределения f_{\max} , в линейном и логарифмическом масштабе; распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$; для случаев 1,3,5 и 7 приведены траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости в координатах $x/r_d - V/V_T$, где $x = x_1 + \alpha L$, $0 \leq x_1 \leq L$, L – длина системы, $\alpha = 1, 2, 3, \dots$

Во всех случаях 1-8 начальная стадия определяется пучковой неустойчивостью, которая приводит к возбуждению основной ленгмюровской волны – гармоники с номером $N = N_e$ (Рис.2,3,9,10,15,16,22,23,28,29,35,36, [1] Рис.2,3,9,10). Возбуждается и гармоника $N = 2N_e$. Почти одновременно с захватом электронов пучка начинается захват основной волной электронов плазмы. Это приводит к затуханию электрического поля и росту энергии ΔW_e (Рис.1,8,14,21,27,34, [1] Рис.1,8). Кривые $W(t)$ проходят через максимум и после небольших колебаний становятся практически постоянными или ΔW_b , ΔW_e медленно растут, а W_E немного падает. Проходит через максимум и амплитуда основной волны.

Таблица 1. Амплитуда основной волны и энергии $\Delta W_b, W_E, \Delta W_e$ в первом максимуме кривой $E^N(t)$ или $W(t)$.

| Случай | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| V_o/V_T | 2.71 | 2.71 | 4.46 | 4.46 | 8.28 | 8.28 |
| n_b/n_o | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.30 |
| W_b^o/W_e^o | 3.748 | 2.249 | 10.167 | 6.100 | 35.066 | 21.040 |
| N_e | 16 | 16 | 8 | 8 | 4 | 4 |
| t_{\max}^N/T_{oe} | 3.0 | 3.2 | 6.8 | 4.8 | 4.4 | 6.1 |
| E_{\max}^N | 25.6 | 18.5 | 41.0 | 31.5 | 81.1 | 68.6 |
| $V_{z\max}^N/V_T$ | 2.81 | 2.39 | 4.07 | 3.56 | 8.09 | 7.44 |
| T_B^N/T_{oe} | 1.4 | 1.7 | 2.0 | 2.2 | 2.0 | 2.1 |
| $(E_{\max}^N)^2/8\pi n_o T$ | 0.21 | 0.11 | 0.54 | 0.32 | 2.10 | 1.50 |
| $\Delta W_b/W_e^o$ | 1.83 | 1.29 | 5.92 | 4.44 | 24.00 | 15.62 |
| W_E/W_e^o | 0.30 | 0.16 | 0.90 | 0.56 | 4.64 | 3.28 |
| $\Delta W_e/W_e^o$ | 1.75 | 1.24 | 5.51 | 4.24 | 21.94 | 14.41 |
| $\Delta W_b/W_b^o$ | 0.49 | 0.57 | 0.58 | 0.73 | 0.68 | 0.74 |
| W_E/W_b^o | 0.08 | 0.07 | 0.09 | 0.09 | 0.13 | 0.16 |
| $\Delta W_e/W_b^o$ | 0.47 | 0.55 | 0.54 | 0.70 | 0.63 | 0.68 |

V_o, n_b, W_b^o - начальные скорость, плотность и энергия электронов пучка; N_e - номер гармоники основной волны; E_{\max}^N - максимальная амплитуда основной волны в $t = t_{\max}^N$; E - нормировано на $\frac{mrd}{eT_{oe}^2}$, $V_z = 2\sqrt{\frac{e\phi}{m}}$; $T_B = \frac{2\pi}{k\sqrt{e\phi/m}} = 2\lambda/V_z$ - период оборота захваченных электронов; $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$ - потери энергии электронов пучка; W_E - энергия электрического поля; $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ - энергия электронов плазмы.

В таблице 1 и [1] таблица 1 приведены t_{\max}^N, E_{\max}^N - время достижения первого максимума кривой $E^N(t)$ основной волны и максимальная амплитуда; максимальные значения $\Delta W_b, W_E, \Delta W_e$ в первом максимуме кривых $W(t)$, а также $V_{z\max}^N/V_T$ ($V_z = 2\sqrt{\frac{e\phi}{m}}$), $T_B = \frac{2\pi}{k\sqrt{e\phi/m}} = 2\lambda/V_z$ и плотность энергии $E_{\max}^2/8\pi n_o T$.

По фазовым плоскостям электронов видно, что захват электронов пучка и плазмы за несколько плазменных периодов приводит к формированию eh-структур. В случаях 1,2 эти структуры формируются уже к $t/T_{oe} \sim 2 - 4$, в случаях 3-4 - к $t/T_{oe} \sim 4$, в случаях 5-6 - к $t/T_{oe} \sim 6$, в случаях 7-8 - к $t/T_{oe} \sim 10$ ([1] Рис.4,11).

eh-структурам соответствует характерное распределение поля $E(x)$ и впадина плотности в распределении $\tilde{n}_b(x)$ (Рис.5,12,18,25,31,38, Рис.5,12) и $\tilde{n}_e(x)$ (не приведены на рисунках).

Образованию eh-структур соответствует характерный плоский (или слегка пологий) участок на кривых $E^N(t)$ основной волны (Рис.3,10,16,23, 29,36, [1] Рис.3,10).

Известно, что eh-структуры неустойчивы относительно неустойчивости слияния (коалесценции). Эта неустойчивость наблюдается и в рассматриваемых случаях. Действительно, по фазовым плоскостям (Рис.4,11,17,24,30,37, [1] Рис.4,11) и распределению $E(x)$, $\tilde{n}_b(x)$ видно, что со временем eh-структуры начинают сливаться, так что их число уменьшается. Слияние продолжается до тех пор, пока не образуется одиночная eh-структура. Это происходит в случаях 3,4 в $t/T_{oe} \geq 140$, в случаях 5,6 в $t/T_{oe} \geq 120$, в случаях 7,8 в $t/T_{oe} \geq 80$. В случаях 1,2 слияние также происходит, однако, за время $t/T_{oe} \sim 200$ одиночная eh-структура не успевает сформироваться. Одиночная eh-структура имеет квазистационарный характер и остается устойчивой в течение длительного времени.

По кривым $E^N(t)$ видно, что начало неустойчивости слияния проявляется в быстром спаде амплитуды основных гармоник. Неустойчивость начинается тем позже, чем меньше номер гармоники основной волны, то есть чем больше расстояние между eh-структурами. Действительно, в случаях 1,2 слияние начинается уже в $t/T_{oe} \geq 10$, в случаях 3,4 – в $t/T_{oe} \geq 35 - 40$, в случаях 5,6 – в $t/T_{oe} \geq 45 - 50$, в случаях 7,8 – в $t/T_{oe} \geq 55 - 60$. При формировании одиночной eh-структуры средняя амплитуда основной волны и гармоник, формирующих распределение $E(x)$, становится постоянной (Рис.16,23,29,36, [1] Рис.3,10).

Распределение $E(x)$ после формирования одиночной eh-структуры практически не меняется (хотя немного зависит от фазы) и сохраняет постоянную амплитуду (Рис.18,25,31,38, [1] Рис.5,12). В таблице 2 приведены значения максимальной амплитуды E_m распределения $E(x)$ (выбрана фаза с максимальной амплитудой в $t/T_{oe} \sim 200 - 205$), а также энергии ΔW_b , W_E , ΔW_e в $t/T_{oe} = 200$.

На Рис.6,13,19,26,32,39, ([1] Рис.6,13) приведены функции распределения по скорости электронов пучка $f_b(V)$ и плазмы $f_e(V)$ в $t/T_{oe} = 200$, а в таблицах 3,4 и ([1] таблицы 3,4) приведены некоторые цифры, характеризующие функции распределения. В таблицах 3 приведены максимальные и минимальные скорости электронов пучка и плазмы. В таблицах 4 приведены максимальные значения функций распределения $f_e(V)$ и $f_b(V)$ в $t = 0$ и $t/T_{oe} = 200$, а также оценки V_p – границ плоского (или пологого)

участка $f_e(V)$ и $f_b(V)$ (по $f(V)/f_{o\max}$ в логарифмическом масштабе) и оценки среднего отношения $(f_e(V)/f_b(V))_p$ в пределах этого участка.

Таблица 2. Энергии $\Delta W_b, W_E, \Delta W_e$ в $t/T_{oe} = 200$

| Случай | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------------|------|------|-------|------|-------|-------|
| V_o/V_T | 2.71 | 2.71 | 4.46 | 4.46 | 8.28 | 8.28 |
| n_b/n_o | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.30 |
| W_b^o/W_e^o | 3.74 | 2.25 | 10.17 | 6.10 | 35.07 | 21.04 |
| E_m | 24.0 | 21.0 | 63.4 | 26.8 | 56.0 | 18.6 |
| $\Delta W_b/W_e^o$ | 1.65 | 1.36 | 5.42 | 3.70 | 18.17 | 12.06 |
| $W_E/W_e^o \cdot 10^{-2}$ | 4.79 | 3.34 | 17.04 | 4.14 | 11.59 | 1.04 |
| $\Delta W_e/W_e^o$ | 1.61 | 1.27 | 5.25 | 3.66 | 18.06 | 12.07 |
| $\Delta W_b/W_b^o$ | 0.44 | 0.58 | 0.53 | 0.61 | 0.52 | 0.57 |
| $W_E/W_b^o \cdot 10^{-2}$ | 1.28 | 1.48 | 1.68 | 0.68 | 0.33 | 0.05 |
| $\Delta W_e/W_b^o$ | 0.43 | 0.56 | 0.52 | 0.60 | 0.52 | 0.57 |

Пояснения - см. таблицу 1. E_m - максимальное значение распределения поля $E(x)$ в $t/T_{oe} \sim 200 - 205$.

Таблица 3. Максимальные и минимальные скорости электронов пучка и плазмы в $t/T_{oe} = 200$

| Случай | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| V_{\max}^b/V_T | 5.34 | 4.71 | 11.36 | 9.47 | 19.67 | 18.56 |
| V_{\min}^b/V_T | -3.14 | -2.34 | -4.54 | -2.57 | -3.94 | -1.92 |
| V_{\max}^e/V_T | 5.15 | 4.52 | 9.28 | 10.18 | 19.19 | 17.66 |
| V_{\min}^e/V_T | -4.10 | -3.47 | -5.97 | -4.03 | -12.27 | -6.72 |

V_{\max}^b, V_{\min}^b - максимальная и минимальная скорость электронов пучка; V_{\max}^e, V_{\min}^e - максимальная и минимальная скорость электронов плазмы.

По кривым $f(V)/f_{o\max}$ и по таблицам 4 видно, что в пределах плоского (пологого) участка в случаях 1-4 $f_e(V)$ заметно больше, чем $f_b(V)$, а в случаях 5-8 $f_e(V)$ немного больше или сравнима с $f_b(V)$. В области спада $V > 0$ функции распределения $f_e(V)$ и $f_b(V)$ практически совпадают, близки и максимальные скорости электронов пучка и плазмы (таблица 3).

Таблица 4. Обработка функции распределения по скорости электронов пучка и плазмы. $t/T_{oe} = 200$

| | | | | | | |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Случай | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| V_o/V_T | 2.71 | 2.71 | 4.46 | 4.46 | 8.28 | 8.28 |
| n_b/n_o | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.30 |
| $f_{o\max} \cdot 10^4$ | 1.26 | 1.26 | 1.26 | 1.26 | 2.54 | 2.54 |
| $f_{bo\max} \cdot 10^4$ | 10 | 6 | 10 | 6 | 10 | 6 |
| $f_{e\max}/f_{o\max}$ | 0.63 | 0.71 | 0.57 | 0.77 | 0.60 | 0.83 |
| $f_{b\max}/f_{o\max}$ | 0.71 | 0.25 | 0.22 | 0.21 | 0.18 | 0.16 |
| $f_{e\max}/f_{b\max}$ | 0.9 | 2.9 | 2.6 | 3.6 | 3.4 | 5.4 |
| V_Φ/V_T | 0.6 | 1.4 | 2.7 | 4.5 | 10.8 | 13.5 |
| V_p/V_T | 0 – 1.0 | 0 – 1.5 | 0 – 4.0 | 1.5 – 4.5 | 3 – 11.5 | 2 – 13 |
| $(f_e/f_b)_p$ | 2.6 – 2.7 | 2.4 – 2.5 | 1.6 – 1.7 | 1.7 – 1.9 | 1.2 – 1.3 | 1.3 – 1.4 |

$f_{o\max}, f_{bo\max}$ - максимум начальных функций распределения электронов плазмы и пучка, $f_{bo\max} = N^b$; $f_{e\max}, f_{b\max}$ - максимум функций распределения электронов плазмы и пучка в $t/T_{oe} = 200$; V_Φ - фазовая скорость eh-структуры; V_p - границы плоского участка $f_b(V)$, $f_e(V)$ (приблизленно), $(f_e)_p, (f_b)_p$ - функции распределения на плоском участке (пределы изменения).

На Рис.7,20,33, [1] Рис.7 показаны типичные траектории электронов (пробных частиц) на фазовой плоскости для случаев 1,3,5 и 7. Такой же характер имеют траектории и в остальных случаях. Начальные скорости пробных частиц одинаковы: в случаях 1,2 $V_N^o/V_T = 1.59$, в остальных случаях $V_N^o/V_T = 2.71$; начальные координаты различны: $0 < x_o^N/r_d < 200$.

Регулярные колебания траекторий $V(x, t)$ соответствуют движению захваченной частицы, а средняя скорость такой траектории соответствует фазовой скорости. По фазовым плоскостям электронов видно, что частицы, имеющие регулярные траектории, постоянно находятся в пределах eh-структуры и совершают обороты вокруг центральной "дырки". Таким образом, средняя скорость таких частиц соответствует фазовой скорости eh-структуры.

Анализ траекторий в случаях 1-8 показывает, что некоторые частицы все время остаются захваченными (Рис.7а,20а, [1] Рис.7а), некоторые – ненадолго выходят из захвата во время неустойчивости слияния, а затем снова захватываются (Рис.7с,20б,33а, [1] Рис.7б,с). Часть частиц движется стохастически – они то захватываются, то выходят из захвата

(Рис.7b,d,33b, [1] Рис.7d). Многие частицы, выйдя из захвата, становятся пролетными (Рис.20c,33c,d, [1] Рис.7d), а некоторые – остаются пролетными с самого начала (Рис.20d).

По траекториям захваченных частиц видно, что в случаях 1,2 средняя скорость траектории, соответствующая фазовой скорости еН-структуры, практически не меняется во времени (Рис.7а,20а). В случаях 3,4 средняя скорость немного возрастает, а в случаях 5-8 возрастает заметно при неустойчивости слияния и формировании одиночной еН-структуры (Рис.2а,b;33а, [1] Рис.7а,b,c).

Фазовая скорость одиночной еН-структуры (в случаях 1,2 нескольких структур) определялась в интервале времени $t/T_{oe} \sim 100 - 200$, включающем $t \geq t_1$, где t_1 – время формирования одиночной еН-структуры. В каждом случае V_{Φ} определялась как средняя по нескольким траекториям захваченных частиц. Фазовые скорости еН-структуры, определенные по средней скорости траекторий, приведены в таблице 5.

Таблица 5. Фазовая скорость одиночной еН-структуры

| Случай | 1* | 2* | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| V_o/V_T | 2.71 | 2.71 | 4.46 | 4.46 | 8.28 | 8.28 | 15.92 | 15.92 |
| n_b/n_o | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.30 |
| N_e | 16 | 16 | 8 | 8 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| V_{Φ}^N/V_T | 2.64 | 2.64 | 4.34 | 4.34 | 8.14 | 8.14 | 16.01 | 16.01 |
| t_1/T_{oe} | – | – | 140 | 140 | 120 | 120 | 80 | 80 |
| E_m | 24.0 | 21.0 | 63.4 | 26.8 | 56.0 | 18.6 | 85.3 | 31.4 |
| $t \sim (200 - 205) \cdot T_{oe}; V_{\Phi} = \Delta x / \Delta t, \Delta t = 0.5 \cdot T_{oe}$ | | | | | | | | |
| V_{Φ}/V_T | 0.6 | 1.4 | 2.7 | 4.5 | 10.8 | 13.5 | 21.2 | – |
| $t \sim t_1 - 200 \cdot T_{oe}; V_{\Phi} = \Delta x / \Delta t, \Delta t = 20 \cdot T_{oe}$ | | | | | | | | |
| V_{Φ}/V_T | – | – | 2.8 | 4.4 | 10.8 | 13.5 | 21.5 | 26.0 |
| $t \sim (100 - 200) \cdot T_{oe}; V_{\Phi} = V_{cp}$ | | | | | | | | |
| V_{Φ}/V_T | 0.7 | 1.4 | 2.8 | 4.2 | 9.9 | 12.4 | 20.3 | – |

* В случаях 1 и 2 до $t/T_{oe} = 200$ одиночная еН-структура не формируется (в $t/T_{oe} = 200$ на длине L четыре еН-структуры).

N_e, V_{Φ}^N – номер гармоники и начальная фазовая скорость основной волны; t_1 – время формирования одиночной еН-структуры; E_m – максимальное значение распределения $E(x)$ в $t/T_{oe} \sim 200 - 205$; Δx – сдвиг фазы $E(x) = 0$ за время Δt ; V_{cp} – средняя скорость по траекториям захваченных в еН-структуру частиц.

В таблице 5 приведены также результаты прямого определения фазовой скорости еh-структур в $t/T_{oe} \sim 200 - 205$ по сдвигу фазы распределения $E(x) = 0$ через $0.5T_{oe}$. Кроме того, в таблице 5 приведены результаты оценки фазовой скорости в $t > t_1$ по сдвигу фазы $E(x) = 0$ через $20 \cdot T_{oe}$.

Из таблицы 5 видно, что результаты определения фазовой скорости еh-структур разными способами находятся в хорошем согласии.

Сравнение фазовых скоростей в случаях с разными параметрами пучка показывает, что фазовая скорость одиночной еh-структуры возрастает при увеличении скорости пучка и уменьшается при увеличении его плотности. В отличие от этого максимальная амплитуда еh-структуры E_m (максимальное значение $E(x)$ в $t/T_{oe} \sim 200 - 205$) возрастает при увеличении плотности пучка и гораздо слабее зависит от его скорости (таблица 5).

Из таблицы 5 видно, что в случаях 1-3 фазовая скорость еh-структуры меньше начальной скорости пучка и меньше начальной фазовой скорости V_{Φ}^N ленгмюровской волны, возбуждаемой пучком, а в случае 4 сравнима с ними. В случаях 5-8 фазовая скорость больше V_o и V_{Φ}^N .

В работах [6.11] описаны численные эксперименты по исследованию неустойчивости электронного пучка в плазме такого же типа как в настоящей работе. В работе [11] рассматривался пучок со скоростью $V_o/V_T = 20$ и разными плотностями $R = n_b/(n_e + n_b)$ от 0.1 до 0.9, что соответствует n_b/n_o от 0.11 до 9. Случай "b" из работы [11] с $V_o/V_T = 20$; $R = 0.3$ и $n_b/n_o = 0.43$ близок к случаям 7 и 8 с $V_o/V_T = 15.9$, $n_b/n_o = 0.50$ и 0.30. Сравнение фазовых плоскостей электронов в случаях 7,8 ([1] Рис 4,11) и в случае "b" ([11] Рис.3) показывает, что в случае "b", так же, как в случаях 7 и 8, образуются еh-структуры с большой фазовой скоростью. Сравнение фазовых плоскостей в случае "b" с $R=0.3$, $n_b/n_o = 0.43$ и в случае "c" с $R=0.5$, $n_b/n_o = 1.0$ ([11] Рис.3) показывает, что при увеличении плотности пучка амплитуда еh-структуры значительно увеличивается, а фазовая скорость уменьшается, что согласуется с результатами настоящей работы.

Отметим, что понятие "electron hole" было введено для еh-структур с фазовыми скоростями, близкими к тепловым, и, строго говоря, не относится к структурам с $V_{\Phi} > V_T$, типа наблюдающихся в случаях 5-8. Однако, общий характер этих структур (одинаковый характер фазовых плоскостей, распределений $E(x)$, $\tilde{n}_b(x)$, траекторий) при малых и больших скоростях, неустойчивость слияния, формирование квазистационарных одиночных структур позволяют отнести их к общему типу еh-структур.

Отметим также, что квазистационарный характер одиночных eh -структур и то, что они формируются захваченными электронами, показывает, что eh -структуры являются разновидностью волн БГК.

Список литературы

- [1] *Н.С. Бучельникова, В.Э. Карлин*. Препринт ИЯФ 2005-14, Новосибирск, 2005.
- [2] *Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова*. Препринты ИЯФ 98-36, 98-79 Новосибирск, 1998.
- [3] *Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова*. Препринты ИЯФ 98-37, 98-38, 98-80 Новосибирск, 1998.
- [4] *Н.С. Бучельникова, В.Э. Карлин*. Препринт ИЯФ 2002-5, 2002-6 Новосибирск, 2002.
- [5] *H. Schamel*. Phys. Reports 140, 161, 1986.
- [6] *Y. Omura, H. Matsumoto, T. Miyake, H. Kojima*. J. Geophys. Res., 101, NA2, 2685, 1996.
- [7] *H. Schamel*. Phys. Plasmas, 7, 4831, 2000.
- [8] *H.L. Berk, K.V. Roberts*. Phys. Fluids, 10, 1595, 1967.
- [9] *R.L. Morse, C.W. Nielsen*. Phys. Rev. Lett., 23, 1097, 1969.
- [10] *H.L. Berk, C. Nielsen, K.V. Roberts*. Phys. Fluids, 13, 980, 1970.
- [11] *Y. Omura, H. Kojima, H. Matsumoto*. Geophys. Res. Lett., 21, 2923, 1994.
- [12] *K. Saeki, P. Michelsen, H.L. Pécseli, J.J. Rasmussen*. Phys. Rev. Lett., 42, 501, 1979.
- [13] *J.P. Lynov, P. Michelsen, H.L. Pécseli, J.J. Rasmussen, K. Saeki, V.A. Turikov*. Physica. Scripta, 20, 328, 1979.
- [14] *J.P. Lynov, P. Michelsen, H.L. Pécseli, J.J. Rasmussen*. Phys. Lett., 80A, 23, 1980.
- [15] *H. Matsumoto, H. Kojima, M. Miyatake, Y. Omura, M. Okada, I. Nagano, M. Tsutsui*. Geophys. Res. Lett., 21, 2915, 1994.

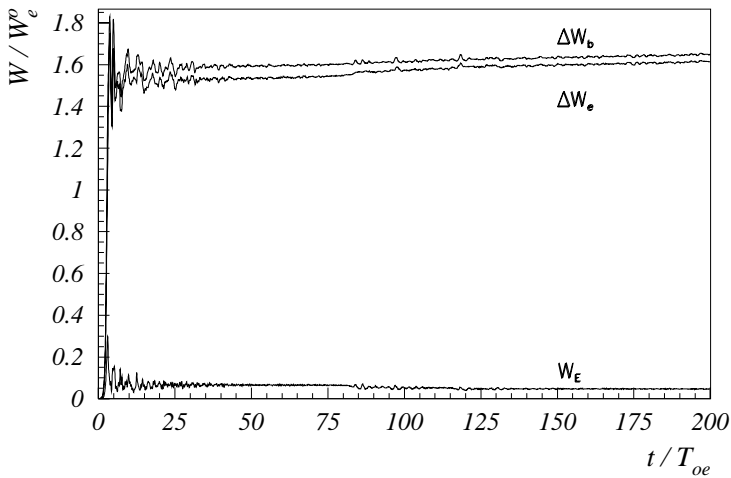


Рис. 1: Зависимость от времени энергии электрического поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ и потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$. Случай 1.

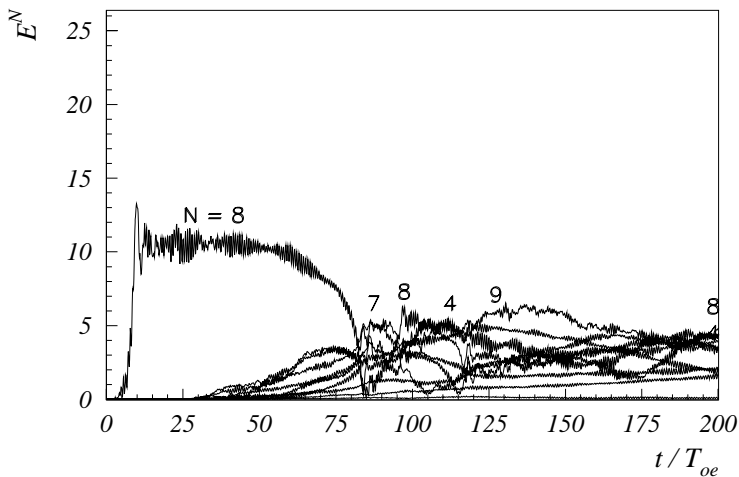


Рис. 2: Зависимость от времени амплитуды гармоник $N_e = 1 \div 10$. Случай 1.

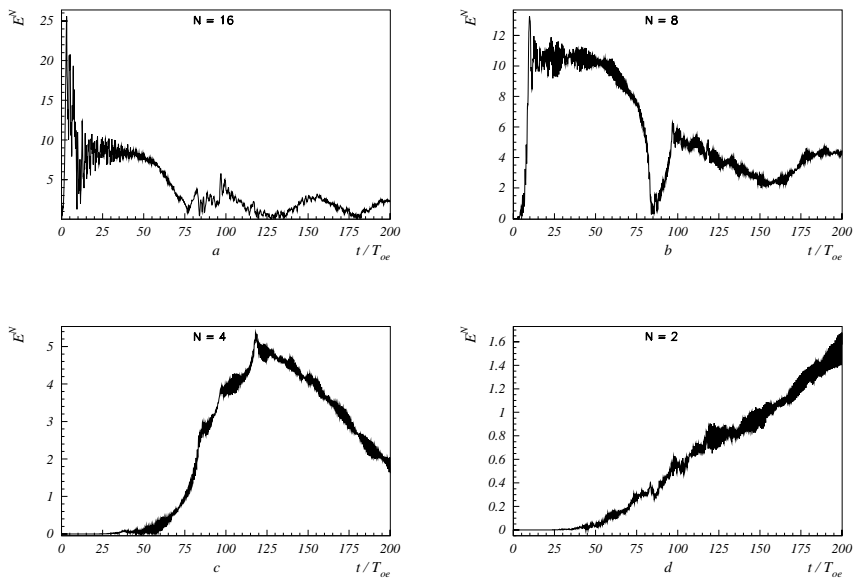


Рис. 3: Зависимость от времени амплитуды основной волны $N=16$ и гармоник. Случай 1.

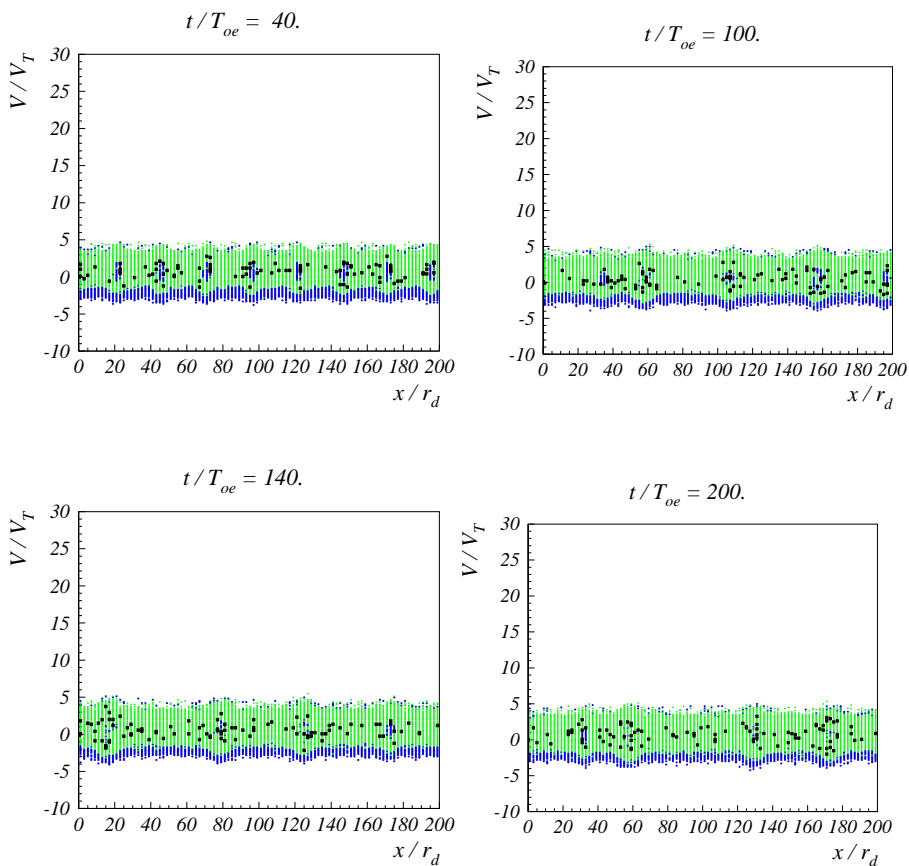


Рис. 4: Фазовые плоскости электронов пучка и плазмы. Случай 1. $V_o/V_T = 2.71$.

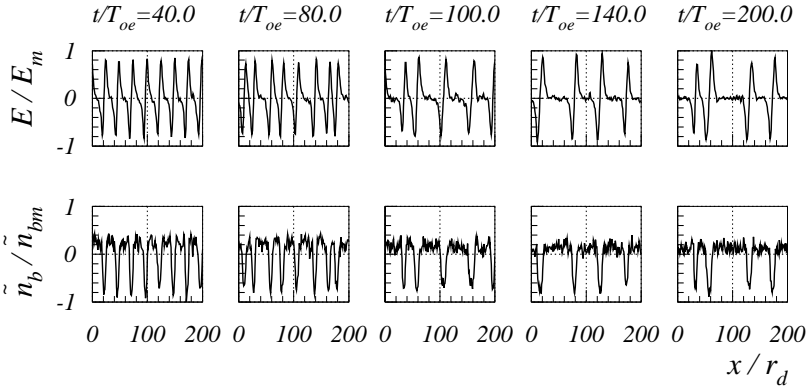


Рис. 5: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$. $E_m = 24.80$, $\tilde{n}_{bm}/n_b^o = 0.19$; $n_b^o/n_o = 0.50$. Случай 1.

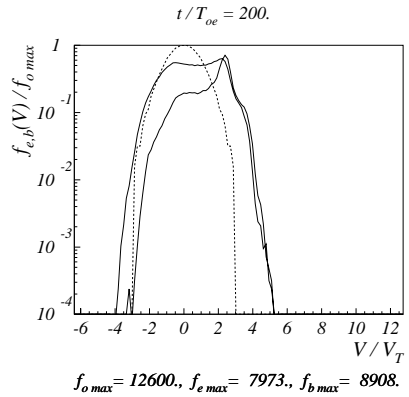
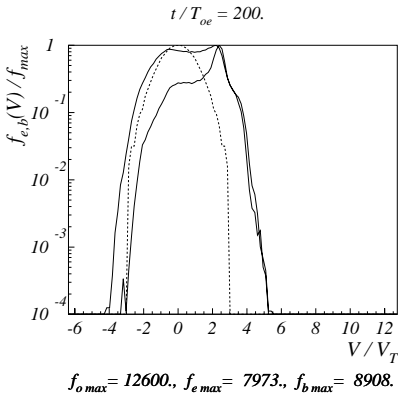
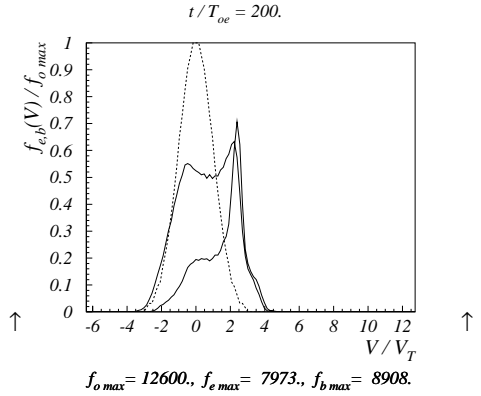
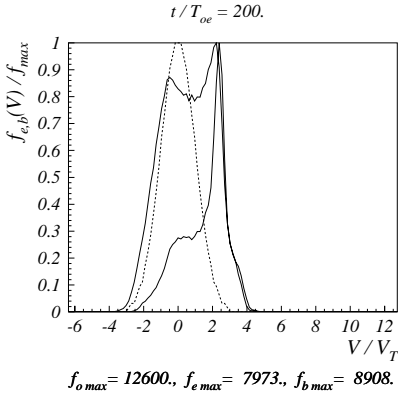


Рис. 6: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка. Пунктир – начальная функция распределения. Случай 1. $V_o/V_T = 2.71.$

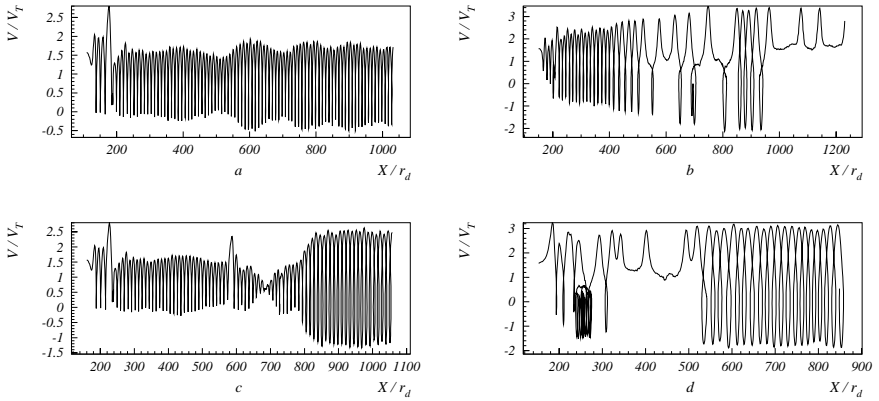


Рис. 7: Траектории электронов плазмы на фазовой плоскости. $V_N^0/V_T = 1.59$. $t/T_{oe} \sim 0 - 200$. Случай 1.

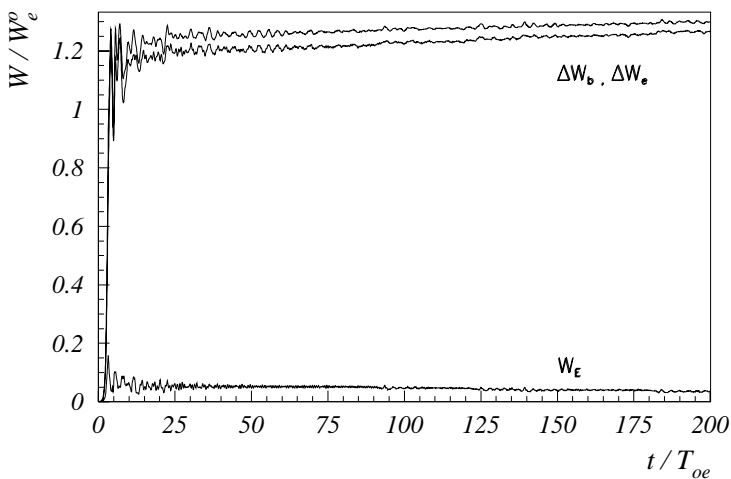


Рис. 8: Зависимость от времени энергии электрического поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ и потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$. Случай 2.

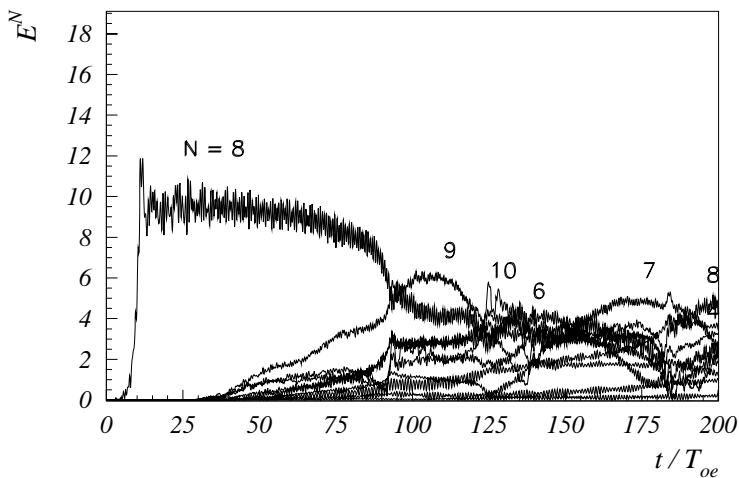


Рис. 9: Зависимость от времени амплитуды гармоник $N_e = 1 \div 10$. Случай 2.

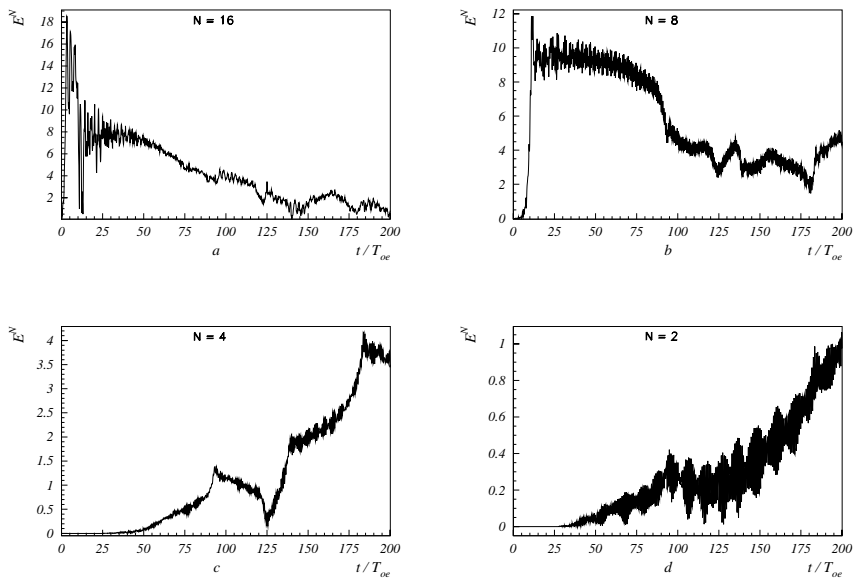


Рис. 10: Зависимость от времени амплитуды основной волны $N=16$ и гармоник. Случай 2.

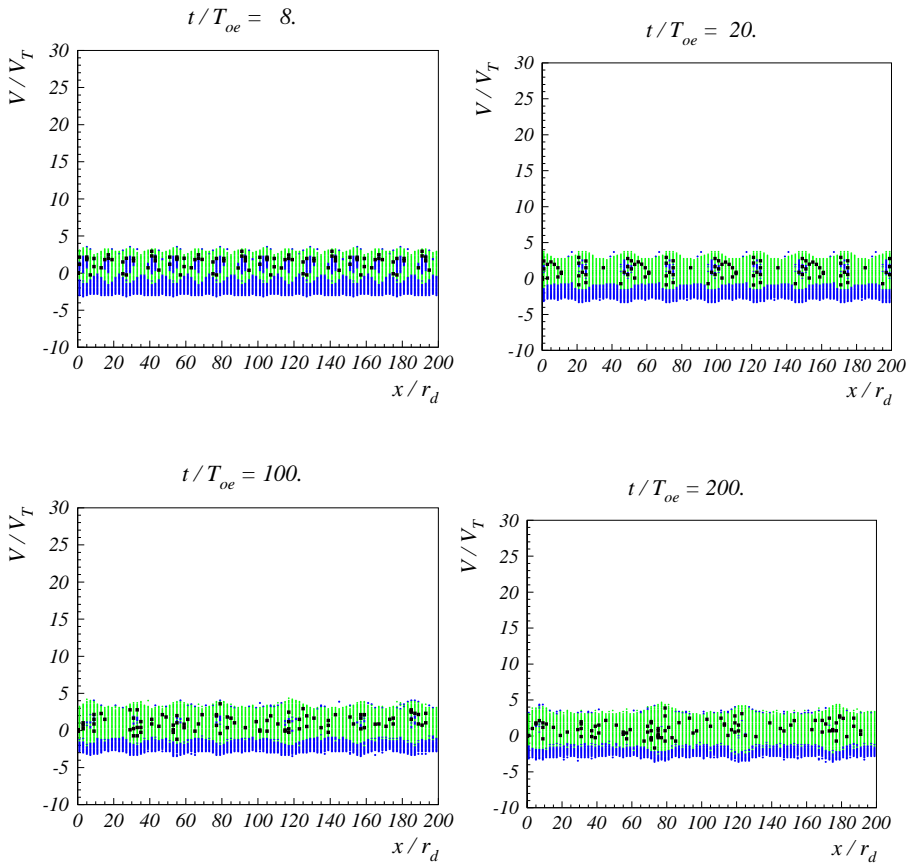


Рис. 11: Фазовые плоскости электронов пучка и плазмы. Случай 2. $V_o/V_T = 2.71$.

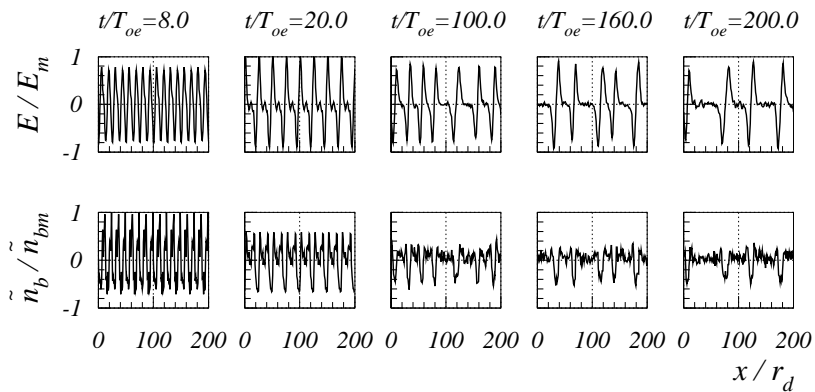


Рис. 12: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$. $E_m = 21.11$, $\tilde{n}_{bm}/n_b^o = 0.64$; $n_b^o/n_o = 0.30$. Случай 2.

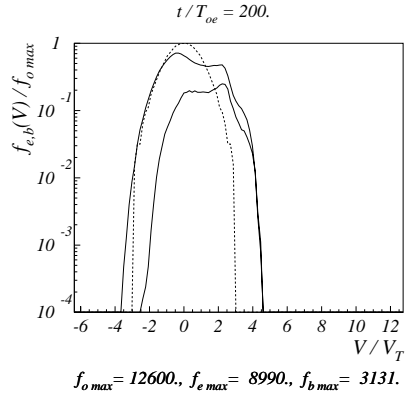
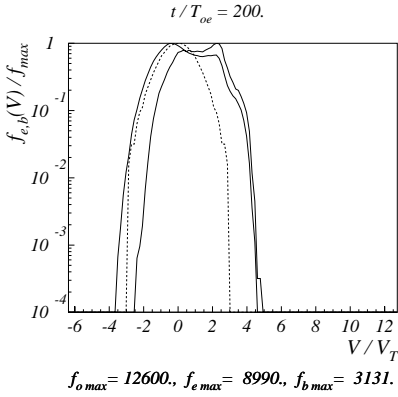
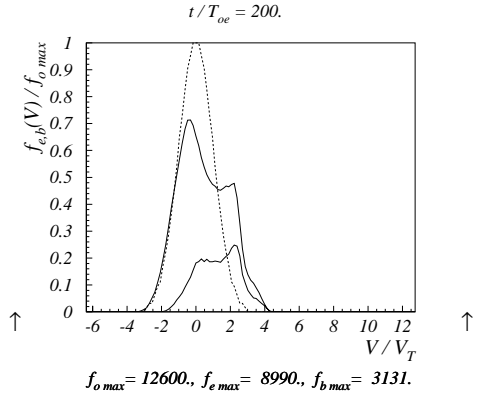
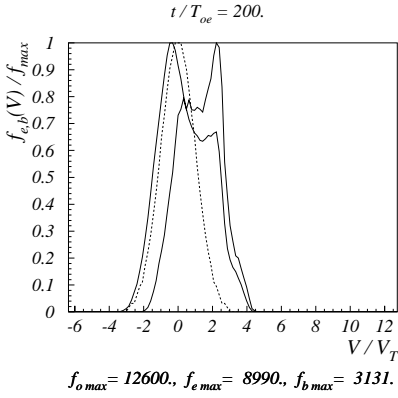


Рис. 13: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка. Пунктир – начальная функция распределения. Случай 2. $V_o/V_T = 2.71.$

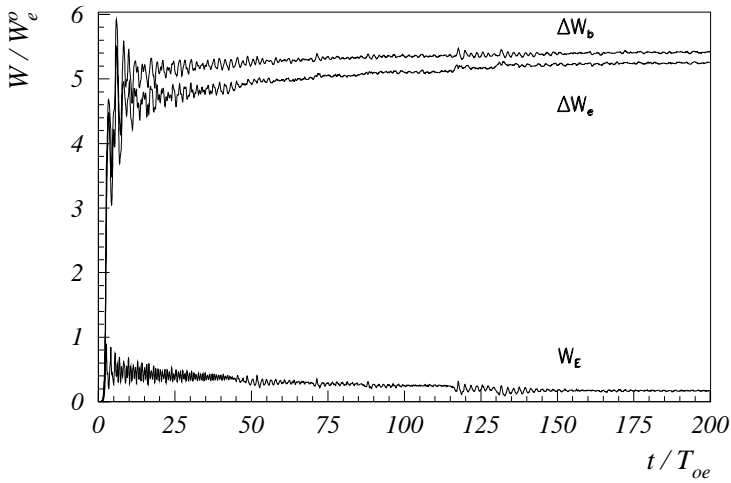


Рис. 14: Зависимость от времени энергии электрического поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ и потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$. Случай 3.

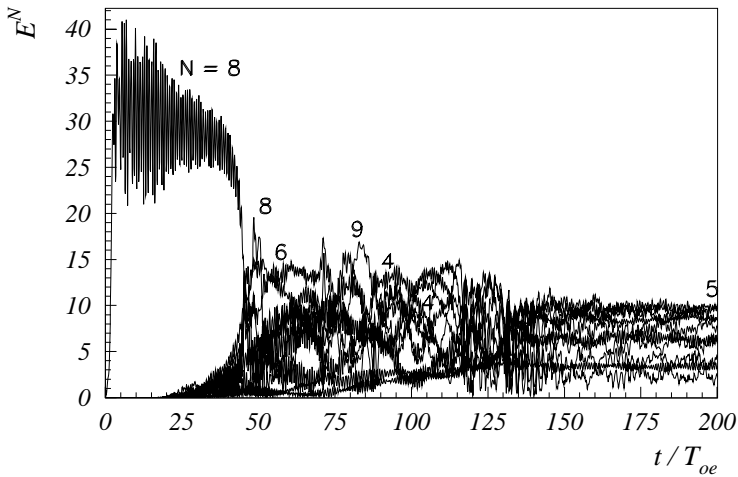


Рис. 15: Зависимость от времени амплитуды гармоник $N_e = 1 \div 10$. Случай 3.

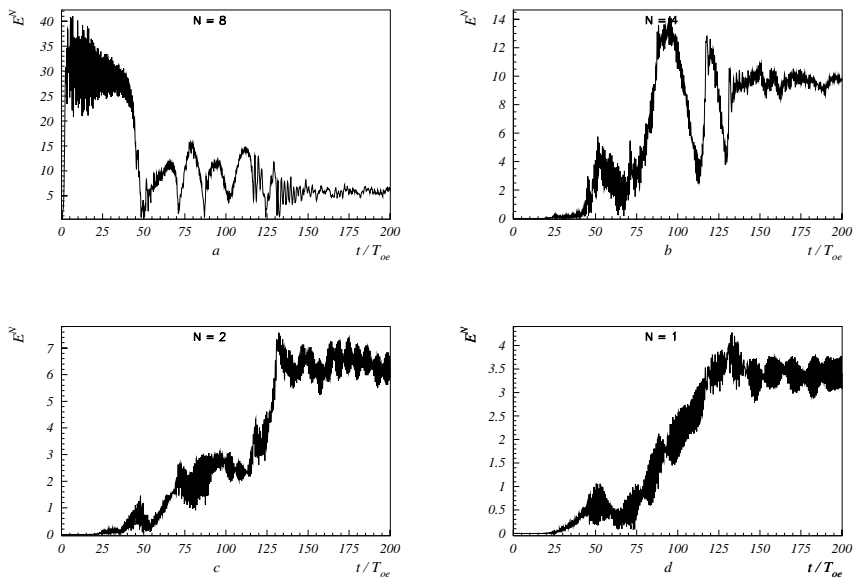


Рис. 16: Зависимость от времени амплитуды основной волны $N=8$ и гармоник. Случай 3.

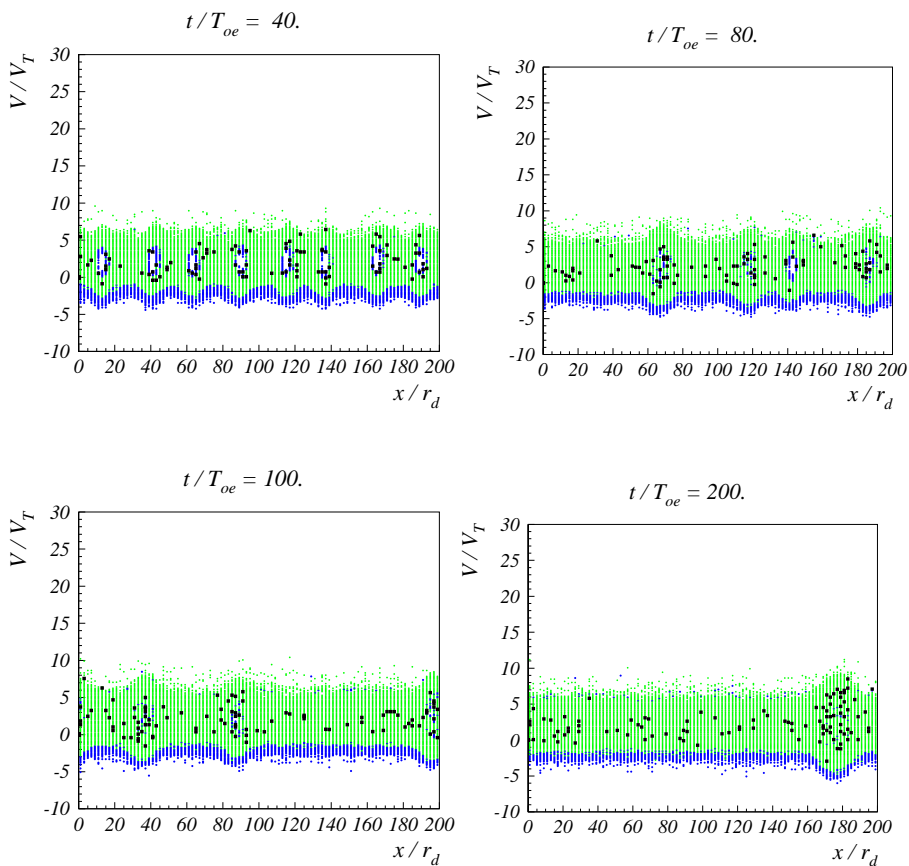


Рис. 17: Фазовые плоскости электронов пучка и плазмы. Случай 3. $V_o/V_T = 4.46$.

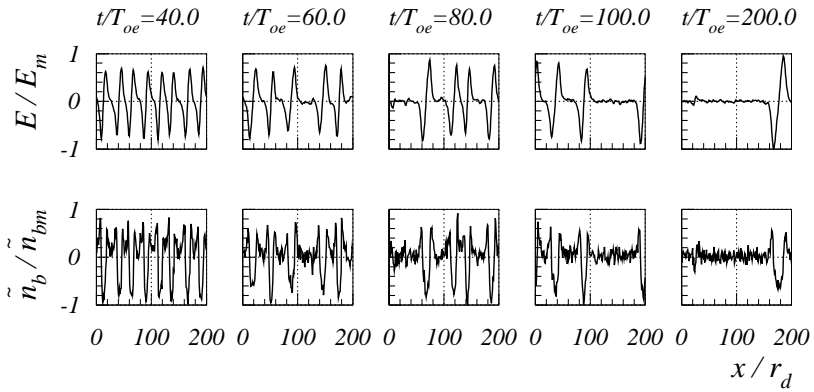


Рис. 18: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$. $E_m = 62.32$, $\tilde{n}_{bm}/n_b^o = 0.36$; $n_b^o/n_o = 0.50$. Случай 3.

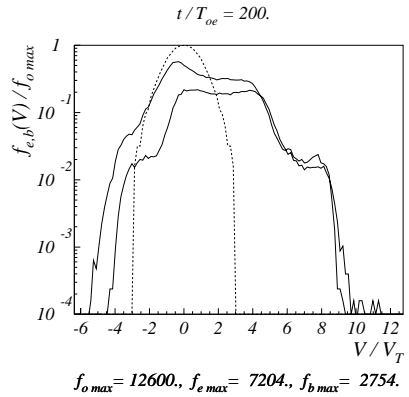
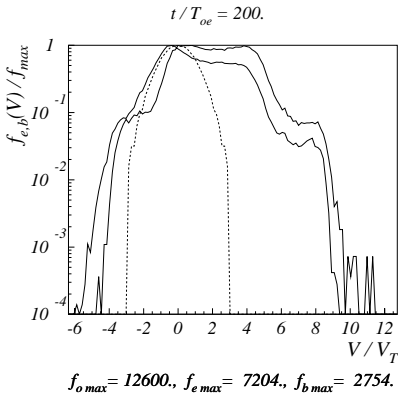
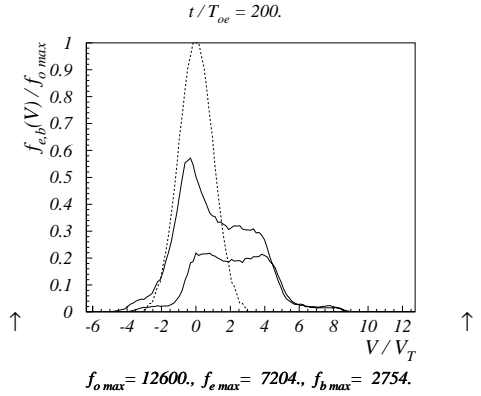
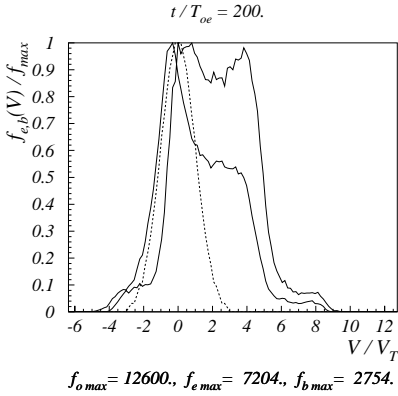


Рис. 19: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка. Пунктир – начальная функция распределения. Случай 3. $V_o/V_T = 4.46.$

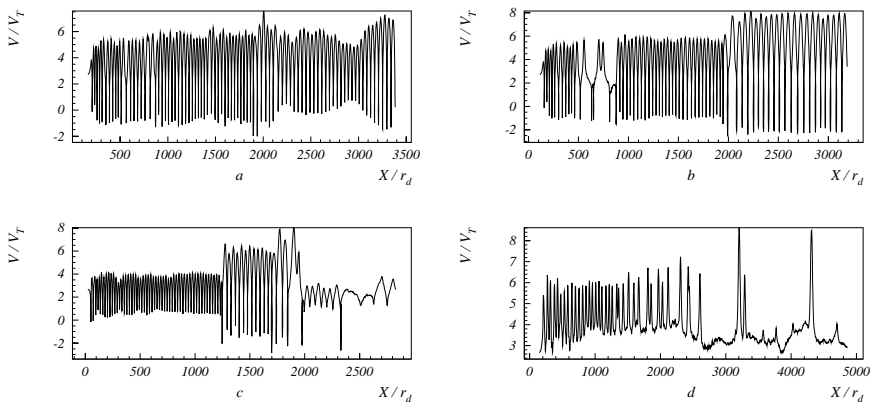


Рис. 20: Траектории электронов плазмы на фазовой плоскости. $V_N^0/V_T = 2.71$. $t/T_{oe} \sim 0 - 200$. Случай 3.

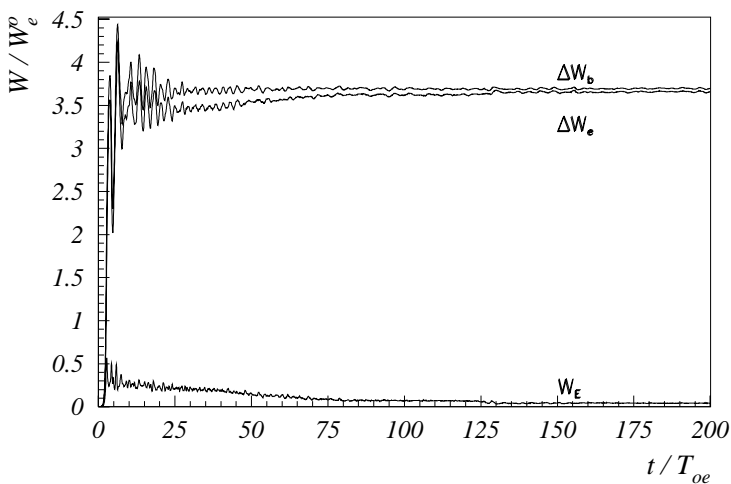


Рис. 21: Зависимость от времени энергии электрического поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ и потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$. Случай 4.

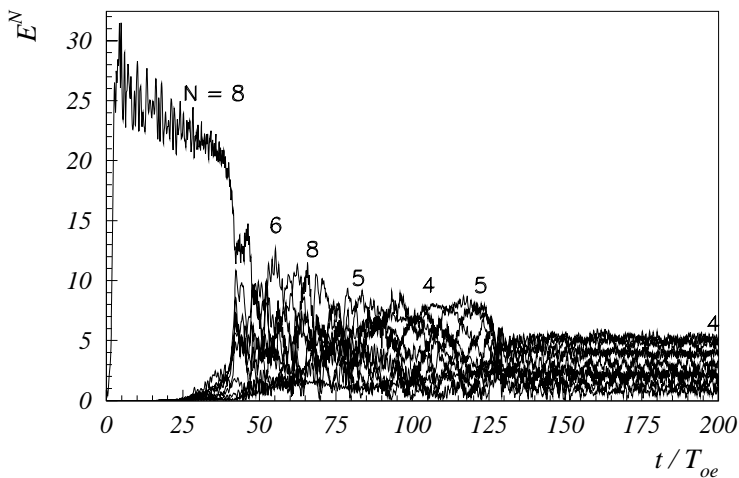


Рис. 22: Зависимость от времени амплитуды гармоник $N_e = 1 \div 10$. Случай 4.

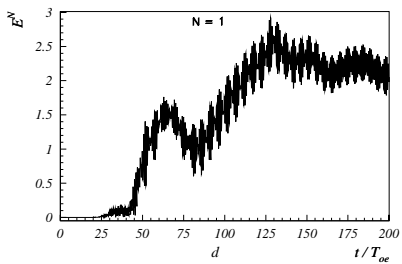
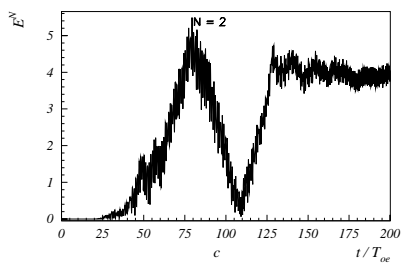
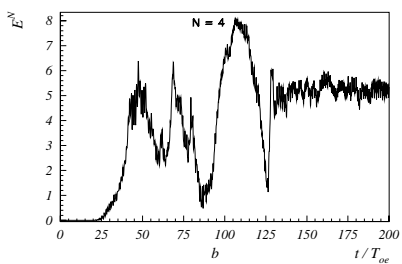
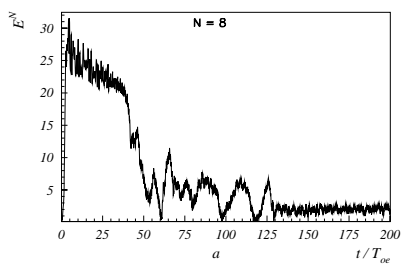


Рис. 23: Зависимость от времени амплитуды основной волны $N=8$ и гармоник. Случай 4.

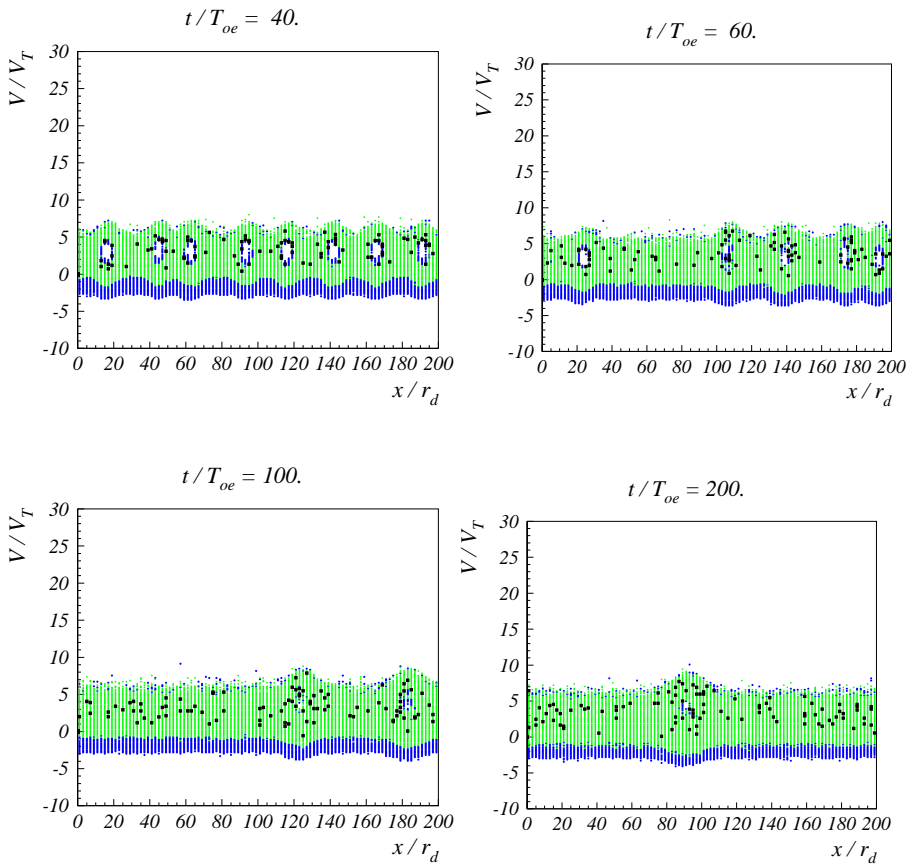


Рис. 24: Фазовые плоскости электронов пучка и плазмы. Случай 4. $V_o/V_T = 4.46$.

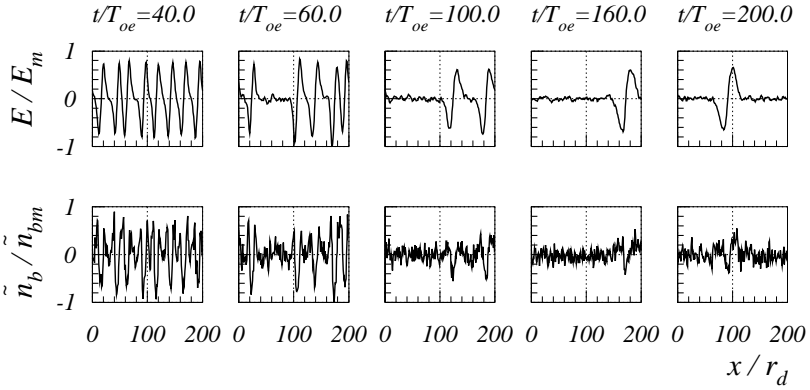


Рис. 25: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$. $E_m = 37.84$, $\tilde{n}_{bm}/n_b^o = 0.34$; $n_b^o/n_o = 0.30$. Случай 4.

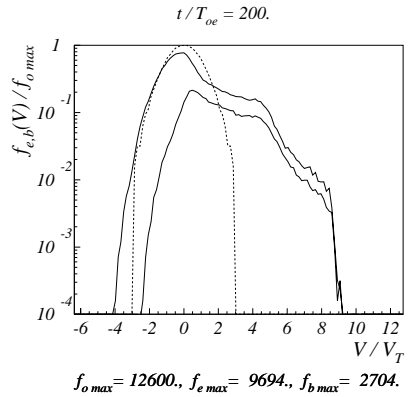
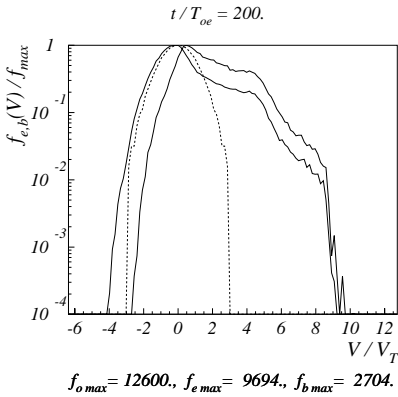
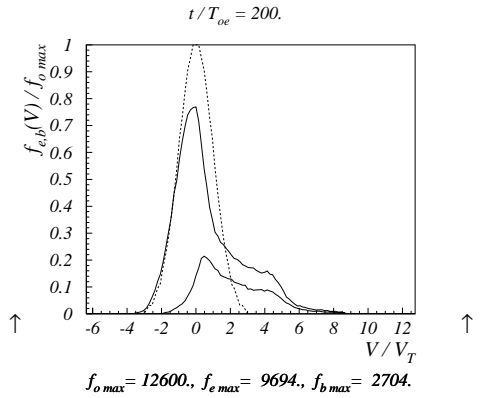
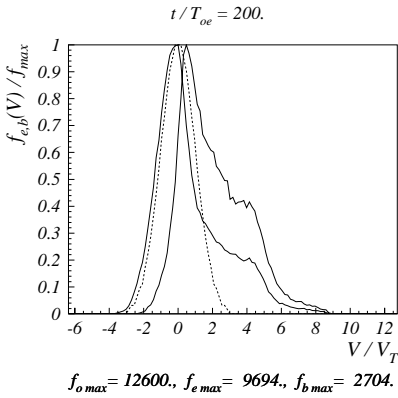


Рис. 26: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка. Пунктир – начальная функция распределения. Случай 4. $V_o/V_T = 4.46.$

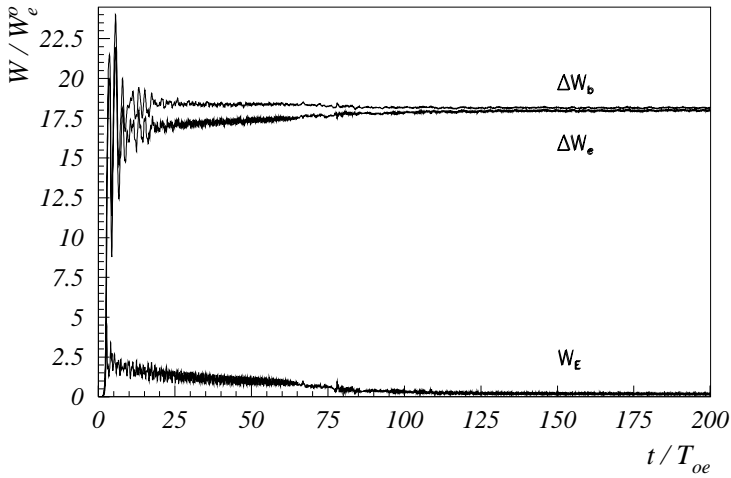


Рис. 27: Зависимость от времени энергии электрического поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ и потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$. Случай 5.

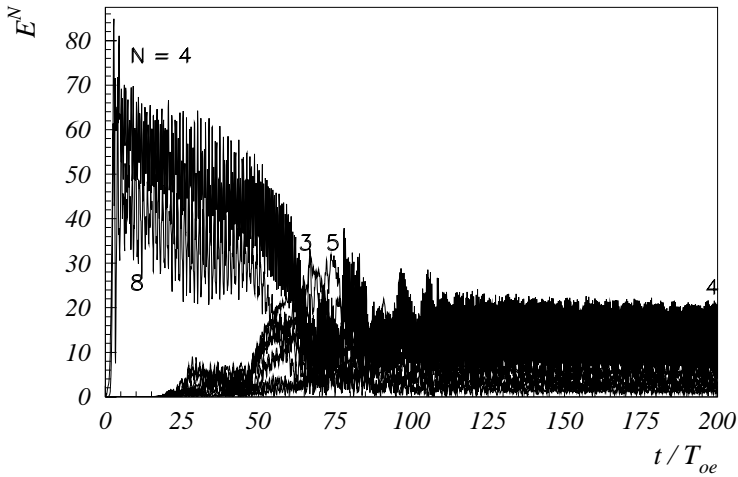


Рис. 28: Зависимость от времени амплитуды гармоник $N_e = 1 \div 10$. Случай 5.

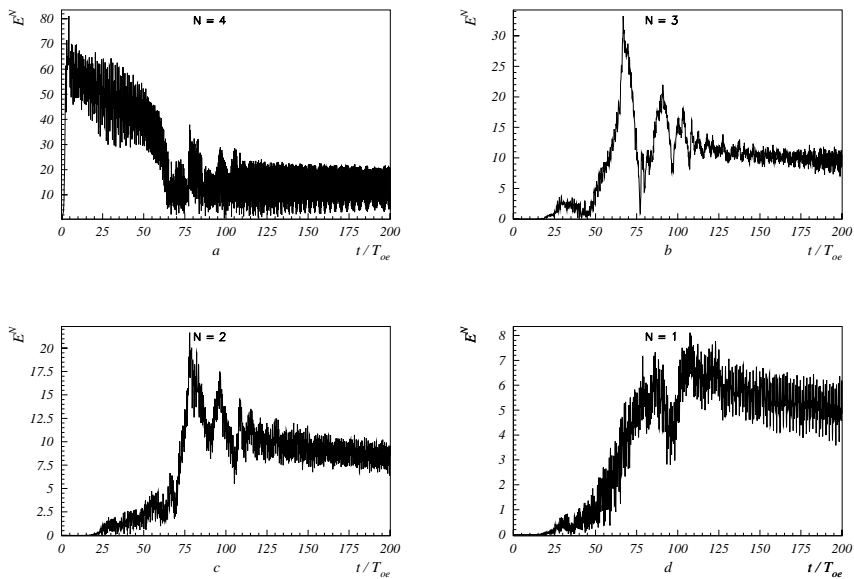


Рис. 29: Зависимость от времени амплитуды основной волны $N=4$ и гармоник. Случай 5.

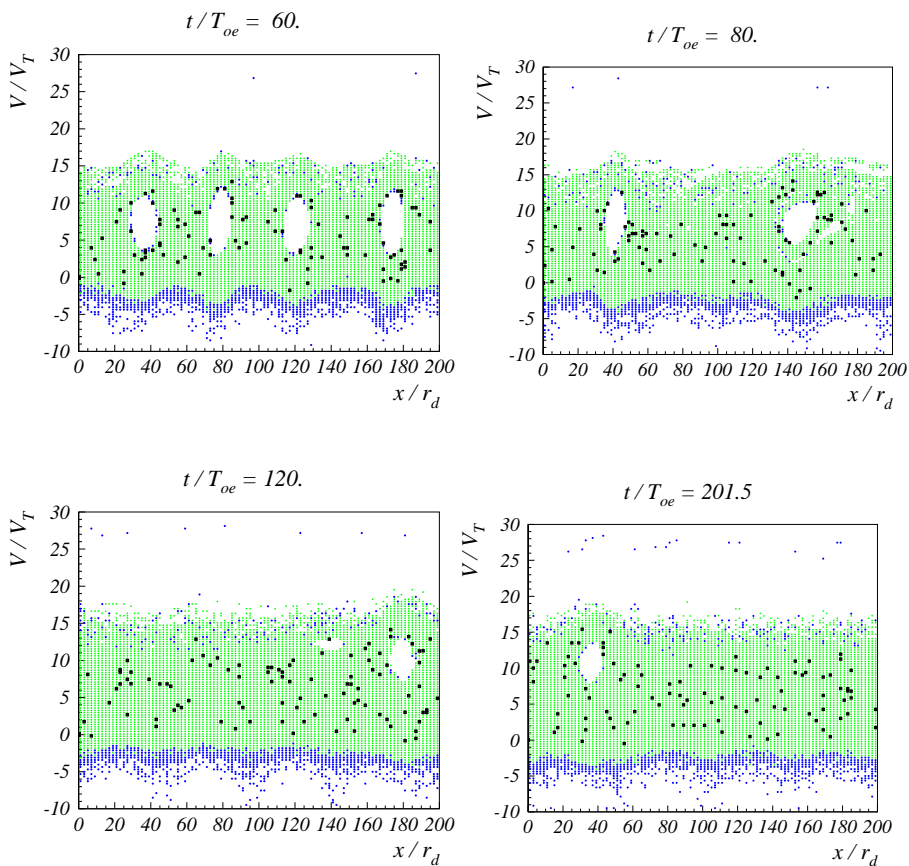


Рис. 30: Фазовые плоскости электронов пучка и плазмы. Случай 5. $V_o/V_T = 8.28$.

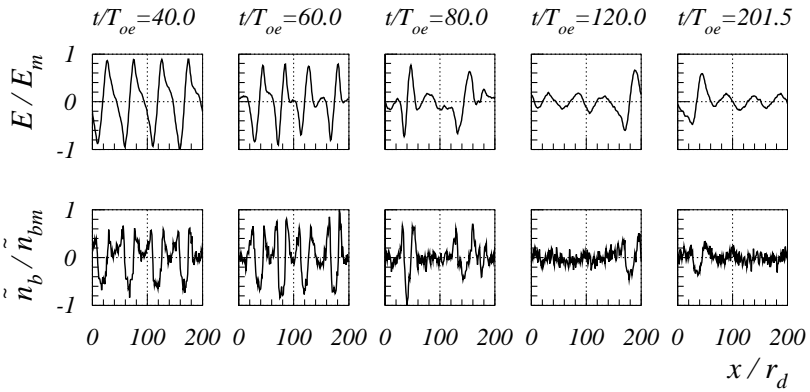


Рис. 31: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$. $E_m = 86.36$, $\tilde{n}_{bm}/n_b^o = 0.38$; $n_b^o/n_o = 0.50$. Случай 5.

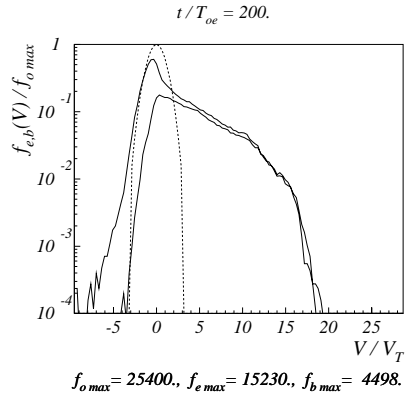
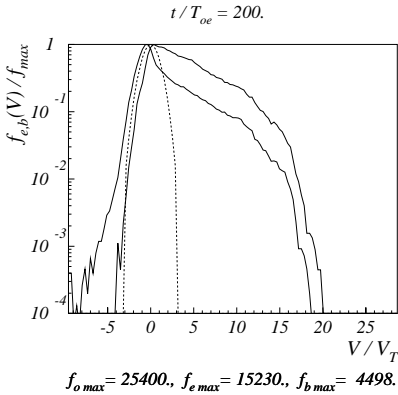
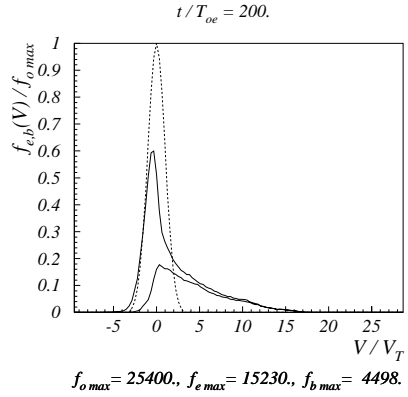
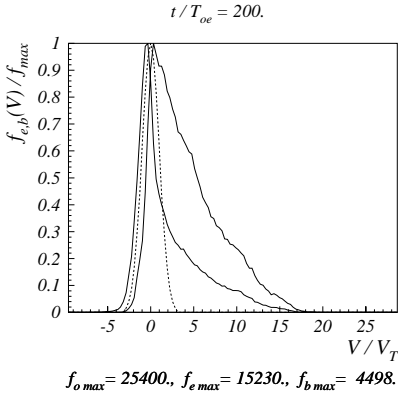


Рис. 32: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка. Пунктир – начальная функция распределения. Случай 5. $V_o/V_T = 8.28.$

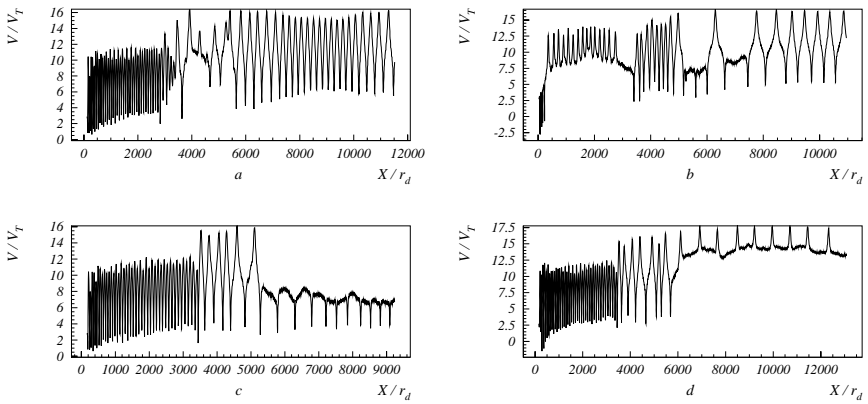


Рис. 33: Траектории электронов плазмы на фазовой плоскости.
 $V_N^0/V_T = 2.71$. $t/T_{oe} \sim 0 - 200$. Случай 5.

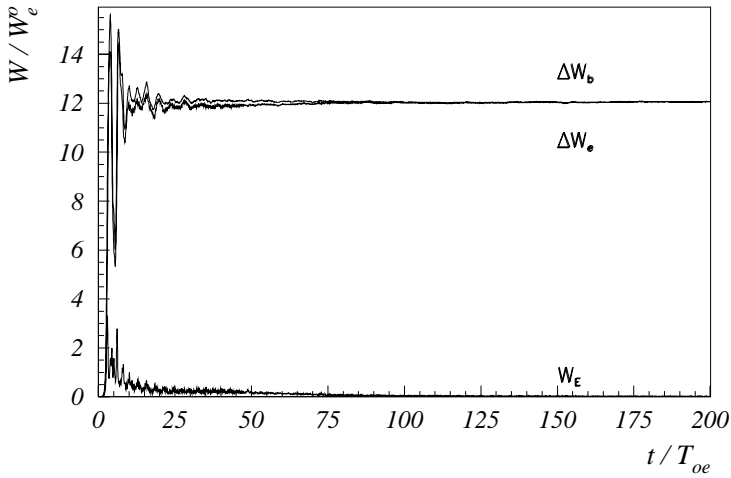


Рис. 34: Зависимость от времени энергии электрического поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ и потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$. Случай 6.

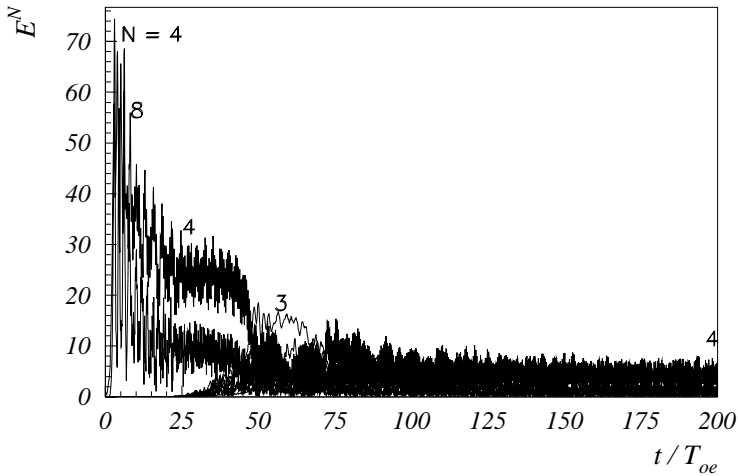


Рис. 35: Зависимость от времени амплитуды гармоник $N_e = 1 \div 10$. Случай 6.

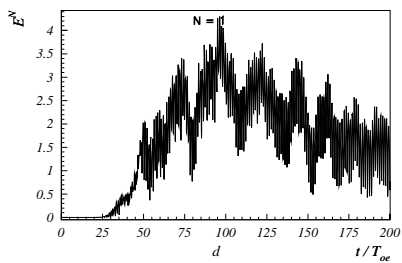
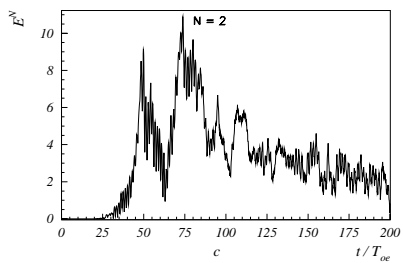
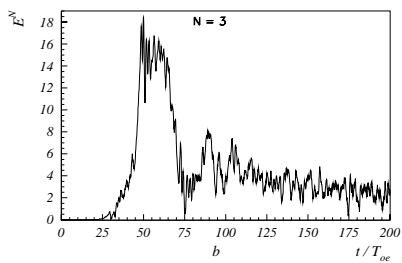
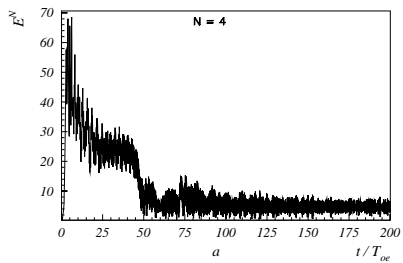


Рис. 36: Зависимость от времени амплитуды основной волны $N=4$ и гармоник. Случай 6.

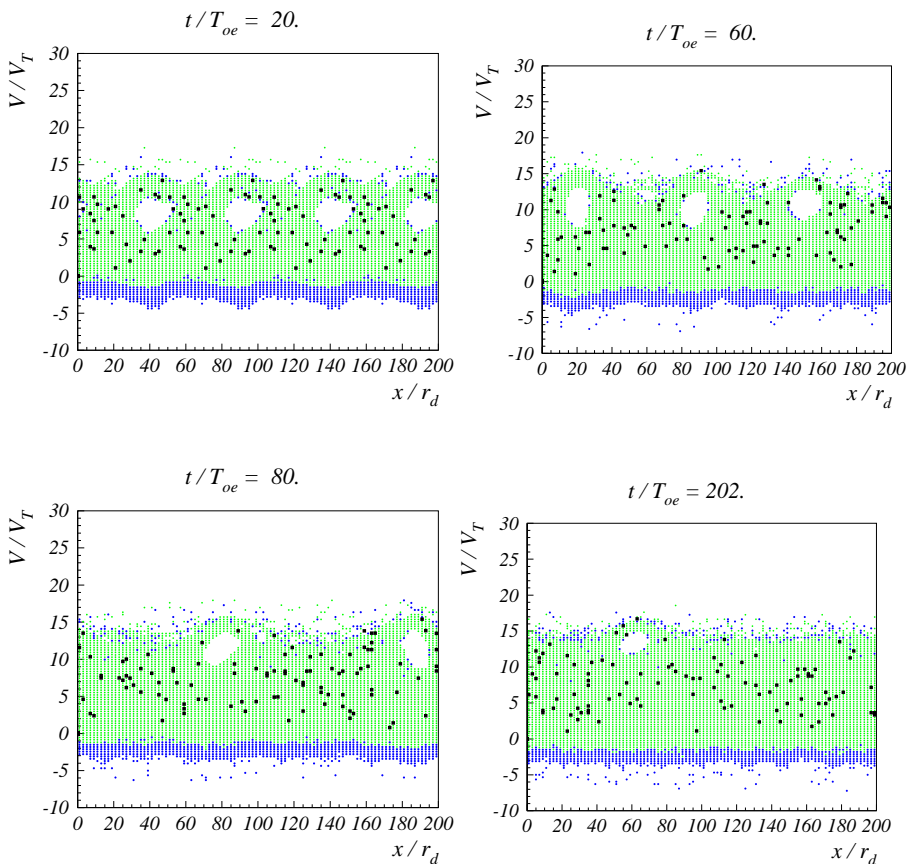


Рис. 37: Фазовые плоскости электронов пучка и плазмы. Случай 6. $V_o/V_T = 8.28$.

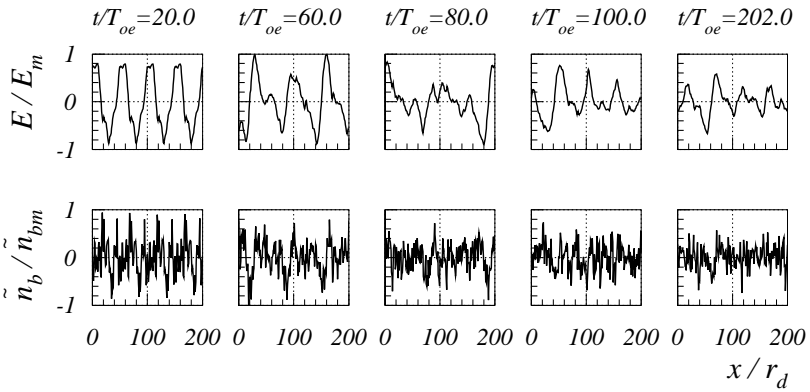


Рис. 38: Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$. $E_m = 27.95$, $\tilde{n}_{bm}/n_b^o = 0.20$; $n_b^o/n_o = 0.30$. Случай 6.

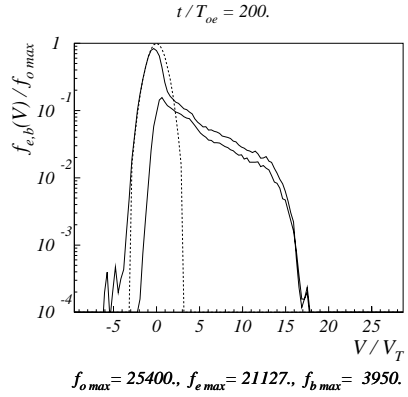
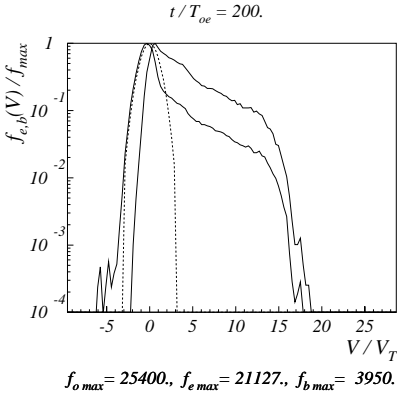
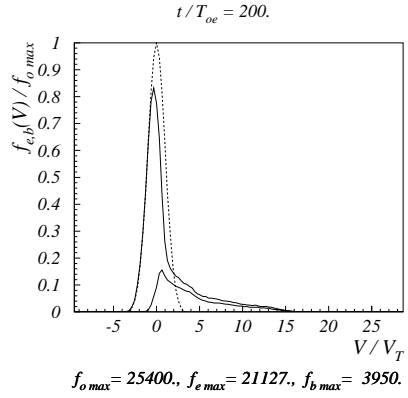
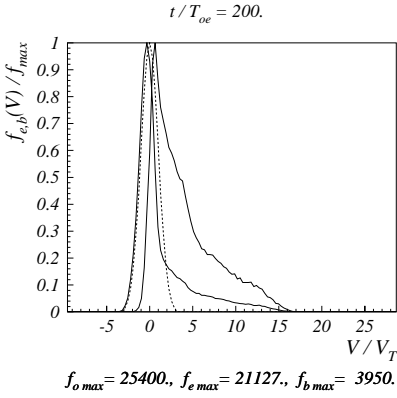


Рис. 39: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка. Пунктир – начальная функция распределения. Случай 6. $V_o/V_T = 8.28.$

Н.С. Бучельникова, В.Э. Карлин

**eh -структуры при взаимодействии холодного
электронного пучка с плазмой. I.**

N.S. Buchelnikova, V.E. Carlin

**Interaction of cold electron beam
with plasma. Electron holes. I.**

ИЯФ 2005-13

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 28.03.2005 г.

Сдано в набор 30.03.2005 г.

Подписано в печать 31.03.2005 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2.9 печ.л., 2.3 уч.-изд.л.

Тираж 115 экз. Бесплатно. Заказ № 13

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.