

Академия наук УССР
Институт теоретической физики

На правах рукописи

Сосенко
Петро Петрович

УДК 533.9

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ
НЕЛИНЕЙНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПЛАЗМЕ

01.04.02 – теоретическая физика .

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Киев – 1991

Работа выполнена в Институте теоретической физики АН УССР

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор физико-математических наук,
профессор, ведущий научный сотрудник
Ю.М.АЛИЕВ

доктор физико-математических наук,
профессор, ведущий научный сотрудник
О.П.ПОГУЦЕ

доктор физико-математических наук,
профессор, академик АН УССР
И.Р.ЮХНОВСКИЙ

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ - ХГУ (г.Харьков)

Защита диссертации состоится "12" ноября 1992 г.
в 11 часов на заседании специализированного совета по
защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук
(Д 016.34.01) при Институте теоретической физики АН УССР
(252130, Киев-130, ул. Метрологическая, 14-б).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТФ АН УССР.

Автореферат разослан "6" октября 1992 г.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00816236 (Q)

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат физико-математических наук

ЛННБ України ім. В. Стефаника В.В. ПЕРЕСЫПКИН
АН УРСР

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Теория электромагнитных колебаний и флуктуаций является важнейшим разделом физики плазмы, на ее основе возможно построение замкнутой статистической электродинамики плазмы. Это связано с тем, что характер собственных самосогласованных колебаний, а также спектральные распределения флуктуаций различных физических величин обусловлены электродинамическими свойствами среды. Исследование колебаний и флуктуаций особенно существенно для плазмы, являющейся классическим примером среды, в которой имеют место разнообразные коллективные явления, и представляет интерес как с научной, так и прикладной точек зрения.

Развитие физики плазмы существенно расширило представления о природе турбулентного состояния вещества, которое следует понимать как неравновесное состояние, характеризующееся чрезвычайно высоким уровнем коллективных колебаний и флуктуаций и в котором существенны процессы нелинейного взаимодействия между модами. Учет эффектов нелинейного взаимодействия является важнейшей предпосылкой для построения количественной теории турбулентности в плазме. Теория процессов переноса так же, как и теория турбулентности, должна основываться на рассмотрении флуктуационных спектров поскольку при достаточно высоком уровне флуктуаций столкновительный механизм процессов переноса оказывается неосновным.

Экспериментальные исследования с несомненностью свидетельствуют об аномально высоком уровне коллективных возбуждений в магнитоактивной плазме и их важной роли в процессах диффузии и теплопереноса. При этом на низкочастотные явления (характерная частота для которых много меньше гирочастоты) обращается особое внимание. Наличие слабонеоднородных вдоль направления магнитного поля низкочастотных колебаний и флуктуаций постоянно подтверждается в экспериментах на магнитных ловушках и в газоразрядной плазме, а также при численном моделировании. Возрастание интереса к низкочастотным колебаниям и флуктуациям в плазме обусловлено, во-первых, совершенствованием методов экспериментальных исследований, позволяющих определять все более детальные характеристики движений плазмы, во-вторых, разработкой теоретических методов изучения нелинейных явлений в плазме, в-третьих, совер-

шенствованием и расширением возможностей численного моделирования и, наконец, тем, что экспериментальные результаты, полученные на современных крупных тороидальных установках свидетельствуют о более сложном поведении плазмы, по сравнению с первоначальными предположениями (возникновение турбулентности, хаоса и самоорганизации). Для объяснения экспериментальных данных по аномальным процессам в плазме, находящейся как в естественных, так и лабораторных условиях, необходимо теоретическое исследование нелинейных низкочастотных явлений в неоднородной магнитоактивной плазме.

При изучении нелинейного взаимодействия коллективных возбуждений плазмы плодотворным является гидродинамический подход, который особенно удобен при численном моделировании, поскольку позволяет ограничиться рассмотрением эволюции только нескольких моментов функции распределения (в отличие от полного кинетического описания). В основу такого подхода положены гидродинамические уравнения переноса, в которых коэффициенты переноса определяются столкновениями. Учет флуктуаций осуществляется в рамках подхода Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица.

Экспериментальные данные по низкочастотной турбулентности свидетельствуют об ограниченности гидродинамического описания и указывают на необходимость построения кинетической теории нелинейных движений в бесстолкновительной или слабо столкновительной неоднородной магнитоактивной плазме. Кинетическая теория позволяет учесть влияние эффектов конечного гирорадиуса и конечной тепловой скорости частиц при нелинейном взаимодействии колебаний, а тем самым последовательно описать слабую турбулентность низкочастотных волн.

Нелинейная кинетическая теория самосогласованных колебаний обычно строится на основе нелинейного материального соотношения между поляризацией и напряженностью электрического поля в плазме, полученного из решения кинетического уравнения Власова методом последовательных приближений. Учет диссипативных эффектов, обусловленных слабыми столкновительными процессами может быть осуществлен путем приближенного решения кинетического уравнения с интегралом столкновений в форме Ландау. При этом исследование нелинейного взаимодействия самосогласованных колебаний плазмы является эффективным в рамках упрощенных нелинейных уравнений, следующих из общего материального соотношения и правильно учитывающих дисперсию и характер нелинейного взаимодействия колебаний.

Во многих случаях наблюдаемые спектры низкочастотных флуктуаций характеризуются ширинами, сравнимыми с характерными частотами, что указывает на существенно нелинейную природу явлений в низкочастотном диапазоне. В связи с этим представляется чрезвычайно важным выйти за рамки теоретических моделей, основанных на использовании метода последовательных приближений и пригодных для изучения только слабонелинейных (слаботурбулентных) состояний плазмы, и развить перенормированную теорию нелинейных взаимодействий. Описание сильнонелинейных низкочастотных движений магнитоактивной бесстолкновительной плазмы возможно на основе перенормированного нелинейного соотношения между поляризацией и напряженностью электрического поля. Так же, как и теория самосогласованных колебаний, с учетом перенормировок должна строиться и статистическая теория нелинейных низкочастотных флуктуаций в плазме.

Современная теория плазмы основывается на широком использовании методов статистической физики. Наиболее полное описание свойств плазмы может быть получено в рамках общего динамического подхода в статистической теории, разработанного Н.Н.Воголюбовым. В работах А.Г.Ситенко этот подход обобщен для описания нелинейных процессов в плазме на основе нелинейного уравнения для микроскопического поля. Путем последовательного перемножения этого уравнения самого на себя и последующего статистического усреднения нетрудно получить иерархию нелинейных уравнений для последовательности корреляционных функций. Обрывая эту цепочку уравнений и исключая из нее высшие корреляционные функции, можно получить замкнутое уравнение для парной корреляционной функции флуктуаций поля с учетом как квадратичных по интенсивности поля процессов, так и кубических, а также с учетом некогерентных явлений, обусловленных случайным движением отдельных частиц. В стационарном случае такое уравнение непосредственно определяет спектральное распределение энергии флуктуационного поля. В общем случае это уравнение суть основа для вывода обобщенного кинетического уравнения для волн, которое и описывает турбулентные процессы в плазме, а также процессы рассеяния и трансформации волн, обусловленные флуктуациями диэлектрической проницаемости и нелинейных электрических восприимчивостей плазмы.

Непосредственный анализ нелинейного уравнения для спектральной квадратичной корреляционной функции для флуктуаций электрического поля с учетом кубических слагаемых показывает, что часть

из них, описывающая трехволновое взаимодействие, расходится. Выборочное суммирование расходящихся слагаемых формально сводится к введению диэлектрической проницаемости плазмы, модифицированной за счет нелинейных эффектов. Разрешение теоретических трудностей, возникающих при суммировании рядов теории возмущений и использовании невозмущенных функций отклика, возможно путем перенормировки теории.

Впервые перенормированные уравнения, описывающие плазменную турбулентность были введены Б.Б.Кадомцевым на основе приближения слабой связи. В работах А.Г.Ситенко и его учеников разработан перенормированный динамический подход в статистической теории плазмы, позволивший включить в схему перенормированной теории некогерентные явления в плазме с учетом кубических по интенсивности флуктуаций процессов. Этот подход был использован для построения микроскопической нелинейной теории флуктуаций в однородной плазме без магнитного поля в приближении потенциального взаимодействия между частицами. Естественно применить общий перенормированный динамический подход для построения нелинейной теории флуктуаций в неоднородной магнитоактивной плазме в общем случае электромагнитного взаимодействия.

Перенормировка статистической теории плазмы позволяет исследовать в ее рамках нелинейные низкочастотные явления, что важно с точки зрения дальнейшего развития теории и практических приложений, требующих фундаментальных знаний о таких явлениях.

Целью работы является построение кинетической теории низкочастотных нелинейных явлений в плазме на основе первых принципов и исследование в рамках такой теории нелинейной динамики низкочастотных колебаний и спектральных распределений низкочастотных флуктуаций.

Научная новизна. Построена кинетическая теория слабого нелинейного взаимодействия низкочастотных самосогласованных движений неоднородной магнитоактивной плазмы. Выявлены фундаментальные закономерности нелинейного взаимодействия низкочастотных волн и предсказано существование стационарных слаботурбулентных состояний плазмы, в которых возбуждены низкочастотные волны. Предложена общая методика нахождения стационарных решений кинетического уравнения для низкочастотных волн.

Впервые получены условия двойного каскада и рассчитаны спектры слабой турбулентности для различных типов потенциальных колебаний, решена задача о нелинейном взаимодействии перестановочных волн с произвольной дисперсией в плазме конечной температуры. Предложен новый механизм нелинейной генерации крупномасштабного магнитного поля в плазме, связанный с двойным каскадом колебаний магнитного поля.

Построена кинетическая теория сильного нелинейного взаимодействия низкочастотных движений бесстолкновительной плазмы на основе перенормировки нелинейного соотношения между поляризацией и напряженностью электрического поля. Обнаружены основные нелинейные эффекты, определяющие временную эволюцию плотностей нелинейных заряда и тока. Впервые введена перенормированная нелинейная электрическая восприимчивость плазмы второго порядка.

Впервые показано существование в плазме собственных кинетических возбуждений электромагнитного поля существенно нелинейной природы и обнаружено явление суперконденсации таких возбуждений, найдены решения перенормированных динамических уравнений, описывающие как поляризационные, так и электромагнитные нелинейные структуры в плазме, которые имеют кинетические размеры.

На основе общего динамического подхода развита перенормированная статистическая теория флуктуаций в неоднородной магнитоактивной плазме для общего случая электромагнитного взаимодействия между частицами. Разработан метод моментов, позволяющий впервые перейти от детального описания флуктуаций фазовой плотности к сокращенному описанию флуктуаций электромагнитного поля в условиях сильного нелинейного взаимодействия.

В рамках сокращенного описания впервые найдены стационарные состояния плазмы, характеризуемые возбуждением сильной низкочастотной турбулентности.

Развита перенормированная теория кубического нелинейного взаимодействия флуктуаций магнитного поля. Обнаружен двойной каскад магнитных возбуждений и рассчитаны стационарные спектры сильной магнитной турбулентности.

Впервые для низкочастотных гидродинамических флуктуаций в магнитоактивной плазме предложена перенормированная статистическая теория, учитывающая нелинейное взаимодействие потенциальных и магнитных флуктуаций. Рассчитаны спектральные распределения для флуктуаций электромагнитного поля. Обнаружено, что магнитные

флуктуации приводят к значительному уширению спектра потенциальных флуктуаций и уменьшению коэффициента диффузии пробной частицы.

Научная и практическая ценность. В результате проведенных изысканий разработана общая концепция перенормировки статистической теории плазмы и построена перенормированная нелинейная электродинамика плазмы, пригодная для описания нелинейного взаимодействия колебаний и флуктуаций в условиях магнитного удержания плазмы. Предложенная теория, основанная на общем динамическом подходе в статистической теории плазмы и концепции перенормировки такой теории, описывает широкий круг низкочастотных нелинейных явлений в плазме (нелинейное взаимодействие волн и флуктуаций, слабая и сильная турбулентность, сильнонелинейные возбуждения и структуры, аномальный перенос и самоорганизация плазмы) и их фундаментальные свойства в условиях как слабого, так и сильного нелинейного взаимодействия с учетом кинетических и электромагнитных эффектов.

Проведенные исследования позволяют глубже понять фундаментальные закономерности поведения систем многих заряженных частиц, а также природу аномальных явлений в плазме в условиях ее магнитного удержания. Практическая ценность диссертационной работы определяется фундаментальным характером рассмотренных в ней проблем и возможностью интерпретации и постановки экспериментов для более глубокого выяснения сущности физических процессов, происходящих в плазме в условиях ее магнитного удержания.

Разработанные общие теоретические методы и полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности и плодотворности дальнейших теоретических исследований низкочастотных нелинейных явлений в плазме управляемого термоядерного синтеза. Все возрастающий интерес к таким исследованиям и их важность обусловлены потребностями дальнейшего развития фундаментальной теории многочастичных систем, совершенствованием методов экспериментальных исследований и расширением возможностей численного моделирования, а также результатами экспериментов и астрофизическими данными, свидетельствующими о более сложном поведении плазмы по сравнению с первоначальными предложениями и требующих фундаментальных знаний о поведении систем многих заряженных частиц.

Развитая в работе теория может быть использована для предсказания закономерностей аномальных явлений в неоднородной магнитоактивной плазме, что приобретает особое значение, в первую очередь, в связи с проблемой управляемого термоядерного синтеза, поиском экологически безопасных источников энергии.

Апробация работы. Работы, вошедшие в диссертацию, докладывались и представлялись на следующих конференциях: Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Будапешт (Венгрия, 1985), II Советско-Итальянском симпозиуме по математическим проблемам статистической физики, Львов (1985), Всесоюзной конференции по статистической физике, Львов (1987), Международной конференции по физике плазмы, Киев (1987), Международной рабочей группе по статистической физике, Киев (1987), Международной рабочей группе по нелинейным явлениям в бесстолкновительной плазме, Кардфез (Франция, 1988), Европейской конференции по управляемому синтезу и нагреву плазмы, Дубровник (Югославия, 1988), Международном симпозиуме по физике ионизованных газов, Сараево (Югославия, 1988), Международной конференции по физике плазмы, Нью-Дели (Индия, 1989), а также на семинарах Западного научного центра АН УССР, ИТФ АН УССР, ИАЗ и ФИАН СССР.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка работ автора, положенных в основу диссертации. Этот список приведен в конце автореферата.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определяется актуальность и важность исследований, проведенных в диссертации, сформулирована цель работы и дается изложение полученных результатов.

Первая глава посвящена разработке кинетической теории слабого нелинейного взаимодействия низкочастотных самосогласованных движений неоднородной магнитоактивной плазмы. В § I методом последовательных приближений построено решение кинетического уравнения Власова для одночастичной функции распределения (в приближении потенциального взаимодействия между частицами). На основе этого решения сформулировано нелинейное материальное соотношение

между поляризацией и напряженностью электрического поля в плазме:

$$P_{\kappa} = P_{\kappa}^{(0)} + \sum_{\kappa_1 + \kappa_2 = \kappa} M^{(1)}(\kappa_1, \kappa_2) E_{\kappa_1} + \dots + \\ + \sum_{\kappa_1 + \dots + \kappa_{n+1} = \kappa} M^{(n)}(\kappa_1, \dots, \kappa_{n+1}) E_{\kappa_1} \dots E_{\kappa_n} + \dots \quad (I)$$

Здесь $P_{\kappa} \vec{k}/k$ и $E_{\kappa} \vec{k}/k$ – пространственно-временные компоненты Фурье поляризации $\vec{P}(\vec{r}, t)$ и напряженности самосогласованного электрического поля $\vec{E}(\vec{r}, t)$. Явный вид итераций функции распределения определяет величины $P_{\kappa}^{(0)}$ и $M^{(n)}(\kappa_1, \dots, \kappa_{n+1})$. Нелинейное материальное соотношение является основой для исследования нелинейных явлений в плазме. Получены предельные выражения для итераций функции распределения, а также для электродинамических коэффициентов плазмы (линейной и нелинейных электрических восприимчивостей) в низкочастотном приближении (частота много меньше гирочастоты $\omega_B = eV_0/mc$, V_0 – величина индукции внешнего магнитного поля, e и m – заряд и масса частицы, c – скорость света). Рассчитаны электрические восприимчивости холодной плазмы с учетом тепловых поправок, связанных с эффектами конечных гирорадиусов и продольных тепловых скоростей частиц. Сформулировано уравнение для самосогласованного поля, полностью описывающее динамику нелинейного взаимодействия мелкомасштабных (по сравнению с масштабом неоднородности $f^{(0)}$) низкочастотных волн в плазме:

$$\varepsilon(\kappa) E_{\kappa} + \sum \varkappa^{(2)}(\kappa_1, \kappa_2) E_{\kappa_1} E_{\kappa_2} + \\ + \sum \varkappa^{(3)}(\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3) E_{\kappa_1} E_{\kappa_2} E_{\kappa_3} + \dots = (4\pi/ik) \vec{p}_{\kappa}^{ext} \quad (2)$$

$\kappa_1 + \kappa_2 + \kappa_3 = \kappa$

здесь $\varepsilon(\kappa)$ – диэлектрическая проницаемость, $\varkappa^{(n)}$ – нелинейные электрические восприимчивости плазмы порядка n , $\kappa = \vec{k}, \omega$.

В § 2 установлены общие свойства нелинейного взаимодействия низкочастотных волн: двойной каскад волн в пространствах фазовых скоростей и волновых векторов, анизотропия спектральных процессов, приводящих к образованию структур, которые вытянуты

поперек направления неоднородности плазмы, и конверсия колебаний вверх по спектру в неравновесной плазме. Эти свойства являются универсальными в том смысле, что обусловлены общими законами сохранения энергии и импульса волн при их распадном взаимодействии, а также анизотропией частоты волн. Направления спектральных процессов определяются характером дисперсии собственной частоты колебаний. Двойной каскад волн имеет характер процесса самоорганизации плазмы. В § 2 предложена и на основе кинетического уравнения для волн проанализирована возможность стационарных слаботурбулентных состояний плазмы. В случае, когда спектры слабой турбулентности формируются в процессах трехволнового взаимодействия, кинетическое уравнение для низкочастотных волн имеет вид

$$\begin{aligned} \partial_t I_{\vec{k}} = S_{\vec{k}} - 2\gamma_{\vec{k}} I_{\vec{k}} + \\ + (1/2\pi^2) \operatorname{Re} \int d\vec{k}_1 \Delta(\vec{k}_1, \vec{k} - \vec{k}_1) M(\vec{k}_1, \vec{k} - \vec{k}_1) \cdot \\ \cdot [M^*(\vec{k}_1, \vec{k} - \vec{k}_1) I_{\vec{k}_1} I_{\vec{k} - \vec{k}_1} + M(\vec{k}, -\vec{k}_1) I_{\vec{k}_1} I_{\vec{k}} + (\vec{k}_1 \rightarrow \vec{k} - \vec{k}_1)] , \end{aligned} \quad (3)$$

где $I_{\vec{k}}$ - спектральная интенсивность волн с частотой $\omega_{\vec{k}}$, $\Delta(\vec{k}_1, \vec{k}_2) = \delta(\omega_{\vec{k}} - \omega_{\vec{k}_1} - \omega_{\vec{k}_2})$, первые два слагаемые в правой части (3) учитывают возможность возбуждения волн (за счет тепловых флуктуаций, внешних источников и т.д.) и их линейную диссипацию, коэффициент нелинейного взаимодействия M выражается через нелинейную электрическую восприимчивость второго порядка. Найдено решение кинетического уравнения для волн, описывающее спектр низкочастотных флуктуаций в термодинамически равновесном нелинейном состоянии плазмы, которому соответствуют нулевые потоки энергии и импульса по спектру. Предложена процедура нахождения радиальной части стационарных решений кинетического уравнения для волн, которые описывают неравновесные состояния плазмы с отличными от нуля потоками энергии и импульса: усреднение кинетического уравнения по азимутальному углу волнового вектора в плоскости, перпендикулярной внешнему магнитному полю \vec{B}_0 , и нелинейное преобразование интеграла столкновений волн по методу Б.Б.Кадамцева и В.М.Конторовича. Для радиальной части спектральной плотности $\bar{I}_{\vec{k}} \sim k^n$ следует, что $n = (m - \nu)/2 - p - 2$, где m и p - показатели однородности величин $\Delta(\vec{k}_1, \vec{k}_2)$ и $M(\vec{k}_1, \vec{k}_2)$, ν - определяется из функционального уравнения

для $\Psi_{\vec{k}} k^\nu$:

$$\Psi_{\vec{k}_1} M^*(\vec{k}_2, \vec{k}_3) + \Psi_{\vec{k}_2} M(\vec{k}_1, -\vec{k}_3) + \Psi_{\vec{k}_3} M(\vec{k}_1, -\vec{k}_2) = 0. \quad (4)$$

Решение последнего уравнения можно найти, используя свойства симметрии коэффициента нелинейного взаимодействия, которые отражают законы сохранения для системы взаимодействующих волн.

В § 3 рассмотрены конкретные примеры нелинейного взаимодействия низкочастотных волн в простой плазме. Исследованы почти желобковые ($k_{\parallel} \ll k_{\perp}$, индекс \parallel (\perp) относится к проекции вектора вдоль (поперек) \vec{E}_0) слабонелинейные конвективные и дрейфовые волны. Параллельная фазовая скорость ω/k_{\parallel} конвективных (дрейфовых) волн значительно превосходит (меньше, чем) скорость продольного теплового движения электронов. Показано, что поскольку дисперсия конвективных волн в длинноволновом диапазоне обусловлена эффектами конечного гирорадиуса для ионов, то нелинейное взаимодействие конвективных волн приводит к их двойному каскаду в пространстве волновых векторов. Рассчитаны нелинейная электрическая восприимчивость второго порядка и коэффициент нелинейного взаимодействия конвективных волн. Выяснено, что возможное слаботурбулентное состояние плазмы не реализуется в условиях, при которых нелинейное взаимодействие волн обусловлено эффектами конечного гирорадиуса ионов.

Установлено, что для коротковолновых конвективных колебаний дисперсия частоты также определяет форму двойного каскада для распадного взаимодействия волн в пренебрежении отклонением от адиабатического распределения ионов. Получены условия двойного каскада в диапазоне длин волн, в котором существенны отклонения от адиабатического распределения ионов. Рассчитаны нелинейная электрическая восприимчивость второго порядка и коэффициент нелинейного взаимодействия для коротковолновых конвективных колебаний. Установлено, что существуют стационарные состояния плазмы, характеризуемые конечным уровнем слабой коротковолновой конвективной турбулентности, и рассчитано радиальное распределение спектральной интенсивности волн в таких состояниях.

Показано, что свойствами двойного каскада и анизотропии спектральных процессов обладает и нелинейное взаимодействие дрейфовых волн, особенностью которых является конечность продольной проекции k_{\parallel} волнового вектора. Выведено условие двой-

ного каскада дрейфовых волн по величине обратной параллельной фазовой скорости. Рассчитан коэффициент нелинейного взаимодействия и найдены соответствующие решения кинетического уравнения для волн, описывающие слабую дрейфовую турбулентность.

Рассмотрены также электронные конвективные волны (которые являются низкочастотными только по отношению к электронам). Выяснено, что для таких волн возможны два типа спектральных процессов: нелинейное взаимодействие в форме двойного каскада по величине волнового вектора или нелинейное взаимодействие, имеющее одномерный характер и приводящее к обратному каскаду волн. Показано, что существуют стационарные слаботурбулентные состояния плазмы, характеризующиеся возбуждением электронных конвективных волн.

В § 4 развита теория нелинейных движений плазмы, находящейся в скрещенных полях: магнитном и эффективном поле тяжести, моделирующим кривизну силовых линий магнитного поля. В качестве примера подробно рассмотрена турбулентность, связанная с перестановочной модой колебаний плазмы. В рамках гидродинамики холодной бесстолкновительной плазмы прояснена физика низкочастотных колебаний. Показано согласованность кинетического и гидродинамического подходов при описании нелинейного взаимодействия перестановочных волн в холодной плазме. Обращено внимание на дополнительную неоднозначность определения нелинейных электрических восприимчивостей.

Выяснены свойства нелинейного взаимодействия перестановочных волн с произвольной дисперсией (как слабой, так и сильной) в холодной плазме при благоприятной кривизне, или же при неблагоприятной кривизне вдали от порога линейной устойчивости. Разрешен вопрос об интегралах такого взаимодействия. Показано, что нелинейное взаимодействие перестановочных волн, принадлежащих одной ветви (ω^+ или ω^-) приводит к двойному каскаду колебаний в пространстве волновых векторов и к развитию анизотропии плазменных движений. При взаимодействии же волн, принадлежащих различным ветвям, имеет место обратный каскад по фазовым скоростям. Показано, что последнее свойство подразумевает прямой (обратный) каскад в пространстве волновых векторов для равновесной (неравновесной) плазмы, при этом при взаимодействии волн с положительной (ω^+) и отрицательной (ω^-) энергией в неравновесной плазме имеет место явление конверсии волн вверх по спектру: $|\omega_{k_2}^+| > |\omega_{k_1}^+|$. Путем решения кинетического уравнения для волн установлено, что

существуют стационарные состояния холодной плазмы, характеризующиеся конечным уровнем слабой перестановочной турбулентности.

В рамках кинетического подхода решена задача о нелинейном взаимодействии перестановочных волн с произвольной дисперсией в плазме конечной температуры (т.е. с учетом диамагнитного дрейфа и эффектов конечного гирорадиуса для ионов). Показано, что свойства нелинейного взаимодействия волн в холодной плазме и плазме конечной температуры одинаковы, а тепловые эффекты существенно сказываются на величине коэффициента нелинейного взаимодействия. Установлено, что для плазмы конечной температуры также возможны стационарные слаботурбулентные состояния, характеризующиеся возбуждением перестановочных волн, и показано, что тепловые эффекты существенно влияют на спектральное распределение флуктуаций в этих состояниях.

В § 5 предложен и исследован механизм нелинейной генерации крупномасштабного магнитного поля в плазме, связанный с двойным каскадом колебаний магнитного поля. Конкретно рассмотрены магнитные электронные и магнитостатические волны.

Выведено упрощенное нелинейное уравнение для магнитных электронных волн. Доказаны свойства симметрии для коэффициентов нелинейного взаимодействия. Из дисперсионного уравнения параметрической неустойчивости получено известное решение, описывающее распад магнитной электронной волны на магнитную электронную волну и ионнозвуковую волну, а также решение, описывающее двойной каскад магнитных электронных волн, который сопровождается развитием анизотропии движений плазмы. Установлены условия, при которых последний нелинейный механизм является доминирующим.

Предложена также упрощенная нелинейная модель для магнитостатической моды колебаний плазмы. Выяснено возможность двойного каскада магнитостатических волн. Показано, что существует стационарное слаботурбулентное состояние плазмы, характеризующееся возбуждением магнитостатических волн.

Вторая глава посвящена исследованию сильного нелинейного взаимодействия низкочастотных самосогласованных движений бесстолкновительной плазмы. Чтобы построить кинетическую теорию такого взаимодействия, предложено и разработано приближение квадратичной поляризации плазмы. Принципиальной особенностью этого приближения является то, что не используется предположение о малости нелинейной поляризации и полагается, что основным нелиней-

ным эффектом является взаимодействие минимального числа полей, т.е. квадратичное нелинейное взаимодействие. Приближение квадратичной поляризации приводит к перенормированному материальному соотношению между поляризацией и напряженностью электрического поля в плазме, к перенормировке нелинейной электрической восприимчивости второго порядка. Приближение квадратичной поляризации позволяет обнаружить основные нелинейные эффекты, определяющие временную эволюцию плотностей нелинейного заряда и нелинейного продольного тока в плазме: производство этих величин при поляризации плазмы и их конвективный перенос поперек внешнего магнитного поля.

В § I из кинетического уравнения Власова выведена бесконечная цепочка уравнений для моментов,

$$\rho = e \int d\vec{v} f, \quad \vec{j} = e \int d\vec{v} \vec{v} f, \quad M_n = e \int d\vec{v} v_1 \dots v_n f \quad (n \geq 2),$$

одночастичной функции распределения f . Чтобы описать движения плазмы, для которых нелинейные изменения плотностей заряда ρ и тока \vec{j} не малы, необходимо рассматривать величины напряженности самосогласованного электрического поля и плотности заряда и тока (которые связаны линейными соотношениями) на равноправной основе и предположить наличие функциональной связи

$$M_2 = M_2 [\vec{E}], \quad (5)$$

замыкающей цепочку уравнений для моментов. (Связь (5) можно рассматривать в качестве уравнения состояния). Поскольку из бесконечной цепочки уравнений для моментов в общем случае кинетики не удастся получить соотношение вида (5), то необходимо ввести определенные приближения, имеющие модельный характер.

Если представить моменты ($n \geq 2$) функции распределения в виде

$$M_n = M_n^0 + M_n^1 + M_n^2 + \Delta M_n \quad (6)$$

(где M_n^0 - часть, не зависящая от величины самосогласованного поля, M_n^1 (M_n^2) - линейная (квадратичная) по амплитуде поля часть, а часть ΔM_n учитывает остаточное нелинейное взаимодействие), и предположить, что остаточным нелинейным взаимодействием можно пренебречь (приближение квадратичной поляризации), то из бесконечной цепочки уравнений для моментов можно вывести со-

кращенные уравнения для плотностей нелинейного заряда,

$$\rho_N = \rho - e \int d\vec{v} (f^{(0)} + f^{(1)}) , \quad (7)$$

отдельных компонент плазмы:

$$\partial_t \rho_N + \vec{\nabla} \cdot (c \rho_N \vec{E} \times \vec{B}_0 / B_0^2) = \partial_t \rho^{(2)} , \quad (8)$$

здесь $\rho^{(2)} = e \int d\vec{v} f^{(2)}$.

Это уравнение в совокупности с уравнениями для итераций функции распределения (нулевой, линейной и квадратичной) и с уравнением Пуассона для напряженности самосогласованного электрического поля составляет основную систему уравнений приближения квадратичной поляризации. Такая система уравнений описывает сильнонелинейные низкочастотные движения бесстолкновительной плазмы с учетом кинетических эффектов (конечности гирорадиусов и продольных тепловых скоростей частиц).

Получено сокращенное нелинейное уравнение для напряженности электрического поля. В пределе слабого нелинейного взаимодействия это уравнение переходит в нелинейное уравнение для поля, правильно учитывающее в общем случае кинетику линейную и квадратичную поляризацию плазмы, а в пределе холодной плазмы — в уравнение идеальной гидродинамики плазмы для конвективных ячеек, точное по нелинейности. В случае мелкомасштабных движений сформулировано перенормированное материальное соотношение между поляризацией и напряженностью электрического поля в плазме:

$$P_{Na}(k) = \sum_{k_1+k_2=k}^{(2)} [\chi_a^{(2)}(k_1, k_2) E_{k_2} - \chi^{(2)}(k_1, k_2) P_{Na}(k_2)] E_{k_1} , \quad (9)$$

где $P_N(k) = 4\pi i \rho_{Nk} / k$ — нелинейная поляризация плазмы,

$$\chi^{(2)}(k_1, k_2) = (ck_2 / B_0^2 \omega k k_1) \vec{B}_0 \cdot \vec{k}_1 \times \vec{k}_2 . \quad (10)$$

Перенормированное материальное соотношение приводит к следующему нелинейному уравнению для поля:

$$\begin{aligned} \varepsilon(k) E_k + \sum_{k_1+k_2=k}^{(2)} [\chi_R^{(2)}(k_1, k_2) E_{k_2} + \\ + (4\pi i / k_2) \chi^{(2)}(k_1, k_2) \tilde{\rho}_{k_2}^{ext}] E_{k_1} = (4\pi / ik) \tilde{\rho}_k^{ext} , \end{aligned} \quad (11)$$

в котором

$$\begin{aligned} \chi_R^{(2)}(k_1, k_2) = & \sum \chi^{(2)}(k_1, k_2) + \\ & + \frac{1}{2} \left[\chi^{(2)}(k_1, k_2) \varepsilon(k_2) + \chi^{(2)}(k_2, k_1) \varepsilon(k_1) \right] - \end{aligned} \quad (12)$$

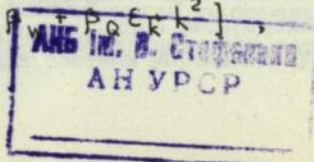
перенормированная нелинейная электрическая восприимчивость второго порядка.

Доказано, что приближение квадратичной поляризации приводит к точному по нелинейности закону сохранения энергии для почти желобковых низкочастотных движений плазмы. Этот закон выражает тот факт, что работа электрического поля по перемещению в плазме нелинейного заряда равна нулю. Согласно закона сохранения энергии плотность энергии почти желобковых низкочастотных движений плазмы является квадратичным функционалом напряженности электрического поля при произвольном (как слабом, так и сильном) нелинейном взаимодействии, а также при произвольных отношениях размера неоднородности плазмы к размерам низкочастотных структур и к гирорадиусам частиц. Приведено достаточное условие устойчивости неоднородной плазмы относительно возбуждения в ней почти желобковых низкочастотных колебаний.

В § 2 сокращенное нелинейное уравнение для напряженности электрического поля применено в исследовании сильного нелинейного взаимодействия низкочастотных возбуждений однородной плазмы. Предсказаны собственные колебания напряженности электрического поля существенно нелинейной природы (кинетические конвективные и дрейфовые колебания). Найден дополнительный к энергии интеграл нелинейного взаимодействия: квадрат полной плотности нелинейного заряда. Установлены направления спектральных процессов: наличие двух квадратичных интегралов приводит к двойному каскаду кинетических возбуждений (по величине отношения диэлектрической проницаемости плазмы к квадрату длины волны), подобному двойному каскаду энергии и энтропии для двумерных гидродинамических возбуждений.

Исследовано термодинамически равновесное нелинейное состояние плазмы. Рассчитаны спектры флуктуаций напряженности электрического поля,

$$\langle |E_E|^2 \rangle = 4\pi / \varepsilon_E \left[\rho_w + \rho_e \varepsilon_k k^2 \right], \quad (13)$$



(здесь $E_{\vec{k}} \vec{k}/k$ - пространственная компонента Фурье напряженности электрического поля, $\epsilon_{\vec{k}}$ - диэлектрическая проницаемость плазмы, $T^* = 1/\beta_w$ - эффективная температура возбуждений, β_Q - эффективный потенциал, соответствующий квадрату плотности нелинейного заряда), и плотностей зарядов в этом состоянии. Обнаружено явление суперконденсации кинетических возбуждений. Указано на существование такого явления для слабого нелинейного взаимодействия низкочастотных волн в неоднородной плазме. Полученные спектры характеризуют состояние плазмы, к которому стремятся релаксировать произвольные турбулентные состояния, и указывают на возможные направления и характер обмена энергией между возбуждениями. Эти спектры аналогичны равновесному распределению для частиц, к которому релаксирует одночастичная функция распределения в результате столкновений между частицами. Аналогом столкновений между частицами является нелинейное взаимодействие коллективных возбуждений.

В § 3 проанализировано роль неоднородности плазмы при сильном нелинейном взаимодействии ее низкочастотных возбуждений. Рассчитана перенормированная нелинейная электрическая восприимчивость второго порядка для кинетических конвективных колебаний длинноволнового диапазона. Нелинейное взаимодействие обусловлено эффектами конечного гирорадиуса для ионов.

Рассчитана также перенормированная нелинейная электрическая восприимчивость для коротковолновой конвективной моды и показано, что сильное нелинейное взаимодействие возбуждений обусловлено отклонениями от квазинейтрального состояния плазмы, эффектами конечного гирорадиуса для электронов и неоднородностью одночастичной функции распределения ионов. Определены условия образования зональных потоков частиц в результате нелинейного взаимодействия. Предсказано значительное усиление нелинейного взаимодействия в плазме с сильной неоднородностью температуры электронов.

Изучены нелинейные свойства кинетической дрейфовой моды неоднородной плазмы. Рассчитана перенормированная нелинейная электрическая восприимчивость и выяснено, что сильное нелинейное взаимодействие дрейфовых возбуждений обусловлено эффектами конечного гирорадиуса и продольного движения ионов, а также резонансного взаимодействия электронов с колебаниями и неоднородности одночастичной функции распределения электронов. Установлены условия применимости известных нелинейных моделей дрейфовых колебаний, которые являются частными случаями приближения квадратичной поля-

ризации.

§ 4 посвящен построению приближения квадратичной поляризации плазмы для общего случая электромагнитного взаимодействия между частицами (а также неоднородного внешнего магнитного поля). Электромагнитные эффекты проявляются, в первую очередь, в дополнительном переносе нелинейного заряда со скоростью магнитного дрейфа, зависящей от плотности нелинейного продольного тока в плазме:

$$\vec{j}_{N\perp} = (c/B_0^2) \rho_N \vec{E} \times \vec{B}_0 + \vec{j}_{\perp}^{(2)} + j_{N\parallel} \vec{B}_{\perp} / B_0 + \dots, \quad (14)$$

где

$$\vec{j}_N = \vec{j} - e \int d\vec{v} \vec{v} (f^{(0)} + f^{(1)}) - \quad (15)$$

плотность нелинейного тока, $\vec{j}^{(2)} = e \int d\vec{v} \vec{v} f^{(2)}$, \vec{v} - самосогла-
сованные колебания индукции магнитного поля. Временная эволюция
плотности нелинейного заряда теперь определяется следующим урав-
нением:

$$\begin{aligned} \tilde{\partial}_t \rho_N + \vec{\nabla} \cdot [c \rho_N \vec{E} \times \vec{B}_0 / B_0^2 + j_{N\parallel} \vec{B}_{\perp} / B_0] + \\ + \nabla_{\parallel} j_{N\parallel} = \tilde{\partial}_t \rho^{(2)} + \nabla_{\parallel} j_{\parallel}^{(2)}, \end{aligned} \quad (16)$$

$\tilde{\partial}_t = \partial_t + \vec{v}_g \cdot \vec{\nabla}$, \vec{v}_g - скорость дрейфа в неоднородном магнитном поле.
Временная эволюция плотности нелинейного продольного тока опреде-
ляется производством этой величины вследствие нелинейной поляри-
зации плазмы и ее конвективным переносом со скоростью электричес-
кого дрейфа поперек внешнего магнитного поля:

$$\tilde{\partial}_t j_{N\parallel} + \vec{\nabla} \cdot (c j_{N\parallel} \vec{E} \times \vec{B}_0 / B_0^2) = \tilde{\partial}_t j_{\parallel}^{(2)}. \quad (17)$$

Сокращенные уравнения для плотностей нелинейных заряда и продоль-
ного тока дополняются кинетическими уравнениями для итераций фун-
кции распределения и уравнениями Максвелла для электромагнитного
поля. Вид полученных уравнений указывает на существование в бес-
столкновительной плазме собственных электромагнитных колебаний
существенно нелинейной природы в широком диапазоне длины волны
и фазовой скорости.

Найденные решения кинетических уравнений для итераций функ-
ции распределения в двухпотенциальном приближении. Получены пре-
дельные выражения для итерации функции распределения в низкочас-
тотном приближении. Выведена система упрощенных уравнений для

слабонелинейных электромагнитных волн. Коэффициенты этих уравнений определяют компоненты тензорных линейной и нелинейной электрических восприимчивостей плазмы.

Выведена система перенормированных нелинейных уравнений для колебаний электрического и магнитного полей. Эти уравнения определяют компоненты перенормированной тензорной нелинейной электрической восприимчивости плазмы. Рассчитаны спектры термодинамически равновесных желобковых флуктуаций электрического и магнитного полей в однородной плазме.

В § 5 найдены решения уравнений приближения квадратичной поляризации, которые описывают как потенциальные, так и электромагнитные нелинейные структуры с кинетическими размерами. Получены дисперсионные соотношения для таких структур.

В третьей главе разработана перенормированная статистическая теория флуктуаций для общего случая электромагнитного взаимодействия между частицами в неоднородной магнитоактивной плазме. Такая теория применена для описания низкочастотных флуктуаций с учетом эффектов сильного нелинейного взаимодействия. Особенностью развитой концепции перенормировки является то, что теория с необходимостью включает в себя перенормировку как функций линейного отклика, так и нелинейной электрической восприимчивости плазмы. Исходным при построении теории является уравнение непрерывности в фазовом пространстве для микроскопической плотности частиц.

В § I в рамках квадратичного приближения выведено нелинейное уравнение для перенормированной функции линейного отклика и получены выражения для перенормированных оператора движения голдой частицы и оператора взаимодействия. Введена перенормированная функция неэкранированного отклика. Получено соотношение факторизации для перенормированной функции линейного отклика. Введен перенормированный тензор диэлектрической проницаемости плазмы. Установлена связь между перенормированными функцией линейного отклика и функцией неэкранированного отклика, в которой явно выделены коллективные эффекты, описываемые перенормированным тензором диэлектрической проницаемости плазмы.

В § 2 на основе общего динамического подхода в статистической теории плазмы, разработанного А.Г.Ситенко, сформулирована иерархия нелинейных уравнений для последовательности корреляционных функций для флуктуаций δf микроскопической плотности частиц,

$$\langle \delta f(x) \delta f(x') \rangle, \langle \delta f(x) \delta f(x') \delta f(x'') \rangle \quad (18)$$

и т.д., и выведено перенормированное уравнение для парной корреляционной функции $\langle \delta f(x) \delta f(x') \rangle$. Некогерентные флуктуации учтены путем введения перенормированной функции источника. Получено соотношение факторизации для перенормированной функции источника. Выведена связь между перенормированными функцией источника и функцией неэкранированного источника. Построено статистическое описание флуктуаций в неоднородной магнитоактивной плазме, в терминах парной корреляционной функции для неэкранированных флуктуаций, перенормированных функции неэкранированного источника, функции неэкранированного отклика и оператора взаимодействия. При таком описании явно выделены коллективные эффекты, учитываемые перенормированным тензором диэлектрической проницаемости плазмы. Выведена система нелинейных уравнений для парной корреляционной функции для флуктуаций напряженности электрического поля $\langle E_i(\vec{r}, t) E_j(\vec{r}', t') \rangle$ и перенормированного тензора диэлектрической проницаемости, учитывающая флуктуации тензорных электрических восприимчивостей плазмы. Выведено детальное флуктуационно-диссипативное соотношение, связывающее корреляционную функцию для флуктуаций фазовой плотности и плотности флуктуационного тока с перенормированными функцией линейного отклика и оператором взаимодействия в равновесной плазме. Построено кубическое приближение перенормированной статистической теории флуктуаций в неоднородной магнитоактивной плазме.

В § 3 разработан метод моментов, позволяющий перейти от детального описания сильнонелинейных низкочастотных флуктуаций в фазовом пространстве к сокращенному описанию в терминах парной корреляционной функции для флуктуаций напряженности электрического поля, перенормированной дисперсионной функции и перенормированной нелинейной электрической восприимчивости плазмы. Выведена замкнутая система сокращенных нелинейных уравнений для спектрального распределения флуктуаций электрического поля $\langle \vec{E}^2 \rangle_k$ и перенормированной дисперсионной функции $D(k)$:

$$|D(k)|^2 \langle \vec{E}^2 \rangle_k = \sum_{k_1 + k_2 = k} 2 |\chi_R^{(2)}(k_1, k_2)|^2 \langle \vec{E}^2 \rangle_{k_1} \langle \vec{E}^2 \rangle_{k_2}, \quad (19)$$

$$D(k) = \varepsilon(k) + \sum 2 [2 \chi_R^{(2)}(k_1, k_2) \chi_R^{(2)}(k, -k_1) / D(k_2) - \bar{\chi}_R^{(3)}(k_1, k, -k_1)] \langle \vec{E}^2 \rangle_{k_1}, \quad (20)$$

где $\chi_R^{(2)}$ - перенормированная нелинейная электрическая восприимчивость второго порядка, а перенормированная нелинейная электрическая восприимчивость третьего порядка $\bar{\chi}_R^{(3)}$ связана с перенормированной величиной соотношением:

$$\bar{\chi}_R^{(3)}(k_1, k_2, k_3) = \bar{\chi}^{(3)}(k_1, k_2, k_3) + \chi^{(2)}(k_1, k_2 + k_3) \chi^{(2)}(k_2, k_3) \quad (21)$$

В § 4 рассмотрены приложения общей статистической теории, представляющие теоретический и практический интерес. В рамках сокращенного описания (19) и (20) найдены стационарные состояния плазмы, характеризующиеся возбуждением сильной конвективной турбулентности и аномальным переносом плазмы поперек внешнего магнитного поля. Спектр флуктуаций можно представить в виде

$$\langle \vec{E}^2 \rangle_k = I_k \frac{2 \gamma_k^N}{(\omega - \omega_k)^2 + (\gamma_k^N)^2}, \quad (22)$$

где ширина спектра определяется величиной перенормированного коэффициента нелинейного затухания возбуждений γ_k^N . Согласно (19) и (20) спектральная интенсивность I_k может быть найдена из решения кинетического уравнения вида (3), в котором

$$\Delta(\vec{k}_1, \vec{k}_2) = 1 / [-i(\omega_k - \omega_{k_1} - \omega_{k_2}) + \gamma_{k_1}^N + \gamma_{k_2}^N + \gamma_k^N] \quad (23)$$

и перенормирован коэффициент нелинейного взаимодействия:

$$M(\vec{k}_1, \vec{k}_2) \rightarrow M_R(\vec{k}_1, \vec{k}_2) = \omega \chi_R^{(2)}(k_1, k_2) / \varepsilon_k. \quad (24)$$

Кинетическое уравнение замыкается уравнением для коэффициента нелинейного затухания возбуждений:

$$\gamma_k^N = -\text{Re} \sum_{\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}} 4 M_R(\vec{k}_1, \vec{k}_2) M_R(\vec{k}, -\vec{k}_1) \Delta(\vec{k}_1, \vec{k}_2) I_{k_1}. \quad (25)$$

Режиму сильной турбулентности соответствует

$$\gamma_k^N + \gamma_{k_1}^N + \gamma_{k_2}^N \gg |\omega_k - \omega_{k_1} - \omega_{k_2}|. \quad (26)$$

В случае сильной турбулентности необходимо учесть характер взаимодействия различных масштабов. Это можно сделать по методу Б.Б.Кадамцева, исключив крупномасштабную область путем обрезания интеграла в (25),

$$\int_0^{\infty} dk_1 \rightarrow \int_{\xi k}^{\infty} dk_1, \quad (27)$$

полагая, что для мелкомасштабных движений крупномасштабные движения проявляются в виде некоторого сложного фонового потока, переносящего их со слабой деформацией. Интегралы нелинейного взаимодействия вида $\sum_{\vec{k}} \Psi_{\vec{k}} I_{\vec{k}}$ находим из решения функционального уравнения (4), перенормированного согласно (24). Для однородного в инерционном интервале перенормированного коэффициента нелинейного взаимодействия, - с показателем ρ , - в режиме (26) решение уравнений (3), (4) и (25) представляем в виде

$$I_{\vec{k}} \sim k^n, \quad \gamma_{\vec{k}}^N \sim k^m, \quad \Psi_{\vec{k}} \sim k^\nu \quad (28)$$

При этом должно выполняться соотношение $n = (m - \nu)/2 - \rho - 2$ между показателями (28). Второе соотношение между показателями следует из (25) согласно (27): $2m = n + 2(\rho + 1)$. В § 4 получены спектры длинноволновых и коротковолновых конвективных флуктуаций. Так, в коротковолновом диапазоне, если доминирует нелинейность, связанная с неоднородностью температуры ионов: $n = -2/3$, $m = 2/3$, $\nu = -2$ (сохранение энергии), - спектр флуктуаций является анизотропным в плоскости, перпендикулярной \vec{B}_0 . Если нелинейное взаимодействие, обусловленное неоднородностью температуры, не существенно, $n = -8/3$, $m = 8/3$, $\nu = -2$

$$\text{и} \quad n = -4, \quad m = 2, \quad \nu = 0 \quad (29)$$

(сохранение энергии и квадрата плотности нелинейного заряда). Этому состоянию соответствует двойной каскад энергии, в котором энергия перекачивается вниз по спектру. Коротковолновая конвективная турбулентность может обусловить усиление переноса плазмы. В частности, для коэффициента турбулентной электронной теплопроводности в неравновесном состоянии плазмы (29) в рамках перенормированного квазилинейного приближения следует выражение

$$D \sim |P_w c^2 / B_0^2 (1 + \alpha_e)|^{1/2} \rho_i^{4/3} \quad (30)$$

Уровень переноса (30) определяется величиной постоянного потока энергии P_w вниз по спектру.

На основе упрощенных нелинейных моделей в § 4 проанализирована возможность стационарных состояний плазмы при сильном нелинейном взаимодействии флуктуаций магнитного поля. Предложена модель сильного нелинейного взаимодействия магнитостатических флуктуаций в неоднородной плазме, согласно которой

$$M_R(\vec{k}_1, \vec{k}_2) = -i \frac{cd^2}{4\pi en_0 B_0} \frac{k_1 k_2}{1+d^2 k^2} \vec{k} \cdot \vec{B}_C, \quad (31)$$

где \vec{B}_C — магнитное поле шира, $d = c/\Omega_e$, Ω — плазменная частота. Для модели (31) найдены спектральная интенсивность $I_R = \sum_{\omega} k^2 \langle A_{||}^2 \rangle_k$ магнитных флуктуаций ($A_{||}$ — продольная компонента магнитного потенциала) и коэффициент нелинейного затухания возбуждений в неравновесном состоянии плазмы. Если инерционный интервал расположен в диапазоне $dk < I$, тогда

$$I_R \sim |P_B en_0 B_0 / d^2 c B_C|^{2/3} k^{-14/3}, \quad (32)$$

$$\gamma_R \sim |P_B c^2 B_C^2 / d^2 e^2 n_0^2 B_0^2|^{1/3} k^{8/3}, \quad (33)$$

P_B — постоянный поток энергии магнитного поля. Спектр флуктуаций рассчитан также для режима $dk > I$, которому соответствует постоянный поток кинетической энергии продольного движения электронов.

Развита теория кубического нелинейного взаимодействия магнитных флуктуаций. Введена система уравнений кубического приближения для спектрального распределения флуктуаций $\langle \vec{B}^2 \rangle_k$ магнитного поля и перенормированной дисперсионной функции

$$|D(k)|^2 \langle \vec{B}^2 \rangle_k = \sum_{k_1+k_2+k_3=k} 6 |\hat{\alpha}(k_1, k_2, k_3)|^2 \langle \vec{B}^2 \rangle_{k_1} \langle \vec{B}^2 \rangle_{k_2} \langle \vec{B}^2 \rangle_{k_3}, \quad (34)$$

$$D(k) = \varepsilon(k) - \sum_{k_1+k_2+k_3=k} 18 \hat{\alpha}(k_1, k_2, k_3) \cdot \hat{\alpha}(k, -k_1, -k_2) \langle \vec{B}^2 \rangle_{k_1} \langle \vec{B}^2 \rangle_{k_2} / D(k_3).$$

Выведено кинетическое уравнение для магнитных возбуждений, а также уравнение для перенормированного коэффициента их нелинейного затухания. Установлены свойства симметрии для коэффициента нелинейного взаимодействия $\hat{\alpha}$ и показано, что наряду с энергией

существует еще один квадратичный интеграл нелинейного взаимодействия. Это предполагает двойной каскад магнитных возбуждений в пространстве волновых векторов, при котором энергия переносится в направлении более коротких длин волн. Проведен анализ нелинейной релаксации системы. Сформулирована и доказана "H-теорема". Найдено стационарное решение кинетического уравнения, описывающее спектр флуктуаций в термодинамически равновесном состоянии плазмы:

$$I_{\mathcal{K}} = \frac{4\pi}{1 + d^2 k^2} \frac{k^2}{\beta_N + \beta_W k^2}, \quad (35)$$

β_N и β_W - постоянные. Установлено, что явление суперконденсации возбуждений может быть следствием кубического нелинейного взаимодействия. Найдены стационарные неравновесные решения кинетического уравнения для сильной магнитной турбулентности.

Четвертая глава посвящена построению перенормированной статистической теории низкочастотных гидродинамических флуктуаций в магнитоактивной плазме. § I содержит обзор результатов ряда теоретических и экспериментальных исследований по проблеме конвективных ячеек и аномальной диффузии в плазме.

В § 2 изложены основные положения статистической теории гидродинамических флуктуаций в магнитоактивной плазме и выведены упрощенные нелинейные уравнения для низкочастотных флуктуаций электромагнитного поля. Исходными при построении теории являются уравнения переноса для электронов и ионов: уравнения непрерывности, уравнения движения и уравнения баланса тепла. Чтобы описать флуктуации, в уравнения переноса введены ланжевеновские источники, корреляционные функции для которых рассчитаны на основе подхода Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица.

В § 3 выведена замкнутая система уравнений для спектральных распределений для флуктуаций потенциалов электромагнитного поля и перенормированных дисперсионных функций. Найдено решение этой системы уравнений, определяющее стационарные спектры потенциальных и магнитных флуктуаций с учетом их нелинейного взаимодействия. Выяснено, что в плазме с конечной температурой электронов нелинейное уширение спектра потенциальных флуктуаций существенно зависит от флуктуаций магнитного поля. Рассчитаны коэффициенты нелинейного затухания потенциальных и магнитных флуктуаций в плазме без внешнего тока. Показано, что в плазме низкого, но ко-

нечного давления магнитные флуктуации приводят к значительному уширению спектра потенциальных флуктуаций.

§ 4 посвящен исследованию диффузии пробной частицы в поле низкочастотных флуктуаций. Рассчитан коэффициент такой диффузии. Показано, что в плазме низкого, но конечного давлений флуктуации магнитного поля обуславливают существенное уменьшение коэффициента диффузии пробной частицы.

В § 5 изучены низкочастотные гидродинамические флуктуации в неравновесной плазме. Рассчитано спектральное распределение для флуктуаций напряженности электрического поля в трехкомпонентной плазме в неоднородном внешнем магнитном поле.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана кинетическая теория слабого нелинейного взаимодействия низкочастотных самосогласованных движений неоднородной магнитоактивной плазмы. Методом последовательных приближений получено решение кинетического уравнения Власова для одночастичной функции распределения, определяющее нелинейное материальное соотношение между поляризацией и напряженностью электрического поля в плазме. Выведены общие выражения для нелинейных электрических восприимчивостей плазмы.

2. Установлены общие свойства распадного взаимодействия низкочастотных волн: анизотропия спектральных процессов и двойной каскад волн. Показано, что эти свойства обусловлены общими законами сохранения энергии и импульса волн при их нелинейном взаимодействии, а также анизотропией и характером дисперсии собственной частоты колебаний. Установлено существование стационарных слаботурбулентных состояний плазмы, в которых возбуждены низкочастотные волны. Рассчитана спектральная интенсивность флуктуаций электрического поля в термодинамически равновесном состоянии плазмы. Предложена процедура нахождения стационарных неравновесных решений кинетического уравнения для волн.

3. Исследованы слабонелинейные конвективные волны в плазме. Рассчитаны нелинейные электрические восприимчивости второго порядка и коэффициенты нелинейного взаимодействия. Установлены направления спектральных процессов и получены условия двойного каскада волн. Получены стационарные решения кинетического уравнения, описывающее слабую турбулентность конвективных волн.

4. Развита теория нелинейных движений плазмы в неоднородном магнитном поле. Получено решение задачи о нелинейном взаимодействии перестановочных волн с произвольной дисперсией в плазме конечной температуры. Установлены свойства нелинейного взаимодействия таких волн в равновесной и неравновесной плазме. Рассчитана спектральная интенсивность перестановочных волн для стационарных слаботурбулентных состояний плазмы. Показано, что свойства нелинейного взаимодействия волн в холодной плазме и плазме конечной температуры одинаковы, однако тепловые эффекты существенно сказываются на величине коэффициента нелинейного взаимодействия и спектральной интенсивности волн.

5. Предложен механизм нелинейной генерации крупномасштабного магнитного поля в плазме, связанный с двойным каскадом колебаний магнитного поля. Установлены условия двойного каскада магнитных электронных волн. Рассчитан спектр слабой турбулентности магнитостатических волн.

6. Построена кинетическая теория сильного нелинейного взаимодействия низкочастотных движений бесстолкновительной плазмы. Обнаружены основные нелинейные эффекты, определяющие временную эволюцию плотностей нелинейных зарядов и тока в плазме: производство этих величин при поляризации плазмы и их конвективный перенос поперек внешнего магнитного поля. Выведено перенормированное нелинейное соотношение между поляризацией и напряженностью электрического поля, подразумевающее перенормировку нелинейной электрической восприимчивости плазмы второго порядка. Выведены сокращенные нелинейные уравнения для электрического поля. Доказано, что в случае почти желобковых движений плазмы работа электрического поля по перемещению в плазме нелинейного заряда равна нулю.

7. Показано, что в однородной плазме существуют собственные колебания напряженности электрического поля существенно нелинейной природы в кинетическом диапазоне длин волн и фазовых скоростей. Выяснена динамика взаимодействия таких колебаний. Развита теория термодинамически равновесного состояния однородной плазмы. Рассчитаны спектры флуктуаций электромагнитного поля и плотностей зарядов. Обнаружено явление суперконденсации кинетических возбуждений, указано на существование такого явления для слабонелинейных волн в неоднородной плазме.

8. Выяснена роль неоднородности плазмы при сильном нелинейном взаимодействии ее низкочастотных возбуждений. Для различных

колебаний рассчитана перенормированная нелинейная электрическая восприимчивость плазмы второго порядка и установлены физические эффекты, обуславливающие сильное нелинейное взаимодействие колебаний. Определены условия анизотропии спектральных процессов и предсказано значительное усиление нелинейного взаимодействия в неоднородной плазме.

9. Найдены решения уравнений приближения квадратичной поляризации, описывающие как потенциальные, так и электромагнитные нелинейные структуры в плазме, которые имеют кинетические размеры. Выведены дисперсионные соотношения для таких структур.

10. Развита перенормированная статистическая теория флуктуаций в неоднородной магнитоактивной плазме для общего случая электромагнитного взаимодействия между частицами. Выведена замкнутая система уравнений для парной корреляционной функции для флуктуаций фазовой плотности, перенормированных функций линейного отклика и источника с учетом нелинейных эффектов второго и третьего порядка по парным корреляционным функциям. Получены соотношения факторизации для перенормированных функций линейного отклика и источника, введен перенормированный тензор диэлектрической проницаемости плазмы и построено статистическое описание нелинейных процессов в плазме, при котором явно выделены коллективные эффекты. Выведена система нелинейных уравнений для парной корреляционной функции для электромагнитных флуктуаций и перенормированного тензора диэлектрической проницаемости и описаны флуктуации тензорных электрических восприимчивостей плазмы. Получено детальное флуктуационно-диссипативное соотношение.

11. Разработан метод моментов, позволяющий перейти от детального описания сильнонелинейных флуктуаций фазовой плотности к сокращенному описанию флуктуаций напряженности электрического поля в терминах перенормированных дисперсионной функции и нелинейной электрической восприимчивости плазмы.

12. В рамках сокращенного описания найдены стационарные состояния плазмы, характеризующиеся возбуждением сильной конвективной турбулентности и аномальным переносом плазмы поперек внешнего магнитного поля.

13. Предложена модель квадратичного нелинейного взаимодействия магнитных флуктуаций в неоднородной плазме и рассчитаны стационарные спектры сильной магнитной турбулентности. Развита теория кубического нелинейного взаимодействия флуктуаций магнит-

ного поля. Обнаружен двойной каскад магнитных возбуждений. Получен спектр магнитных возбуждений в термодинамически равновесном состоянии плазмы и установлено, что явление суперконденсации возбуждений может быть следствием кубического нелинейного взаимодействия. Найдены стационарные неравновесные решения кинетического уравнения для сильной магнитной турбулентности в условиях кубического нелинейного взаимодействия.

14. Развита перенормированная статистическая теория низкочастотных гидродинамических флуктуаций в магнитоактивной плазме. Выведена и решена система уравнений для спектральных распределений для флуктуаций потенциалов электромагнитного поля и перенормированных дисперсионных функций. Показано, что нелинейное уширение спектра потенциальных флуктуаций существенно зависит от флуктуаций магнитного поля. В плазме низкого, но конечного давления магнитные флуктуации приводят к значительному уширению спектра потенциальных флуктуаций. Исследованы флуктуации в неравновесной плазме, рассчитано спектральное распределение для флуктуаций напряженности электрического поля в трехкомпонентной неоднородной плазме.

15. Рассчитан коэффициент диффузии пробной частицы в поле низкочастотных электромагнитных флуктуаций. Показано, что в плазме низкого, но конечного давления флуктуации магнитного поля обуславливают существенное уменьшение коэффициента диффузии пробной частицы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Nonlinear magnetic drift waves in plasmas // Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (Budapest, 8-12 July, 1985). Proc. Contr. Papers. Budapest, 1985. P.42.
2. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Aspects of the renormalized statistical theory of plasma turbulence // II Soviet-Italian Symposium on Mathematical Problems of Statistical Physics (Lviv, Sept.30 - Okt.11, 1985). Abstr. of Contr. Kiev: ITP, 1985. P.105-106.
3. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Short-wave convective turbulence and anomalous electron thermal conductivity of a plasma. - Kiev, 1985. - 17 p. - (Preprint/Ukrainian SSR Acad. Sci.

- ИТР, 85-73Е).
4. Ситенко А.Г., Сосенко П.П. О перенормировке в теории турбулентности плазмы // Проблемы современной статистической физики. - Киев: Наукова думка, 1985. - С.266-273.
 5. Ситенко А.Г., Сосенко П.П. Кинетическая теория нелинейных низкочастотных колебаний плазмы в магнитном поле // Вопросы теоретической физики. - Киев: Наукова думка, 1986. - С.225-237.
 6. Ситенко А.Г., Сосенко П.П. Метод моментов в перенормированной теории турбулентности плазмы // Украинский физ. журнал. - 1987. - Т.32, № 5. - С.702-708.
 7. Ситенко А.Г., Сосенко П.П. О стационарных спектрах магнитных возбуждений плазмы // УФЖ. - 1987. - Т.32, № 8. - С.1199-1203.
 8. Ситенко А.Г., Сосенко П.П. О коротковолновой конвективной турбулентности и аномальной электронной теплопроводности плазмы // Физ. плазмы. - 1987. - Т.13, вып. 4. - С.456-462.
 9. Ситенко А.Г., Сосенко П.П. Низкочастотная турбулентность в неоднородной замагниченной плазме // Современные проблемы статистической физики / Труды Всесоюзной конференции. (Львов, 3-5 февраля 1987 г.) - Т.1. - С.231-238. - Киев: Наукова думка, 1989.
 10. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Kinetic theory of low-frequency nonlinear structures in magnetized plasmas // Int. Conf. on Plasma Physics (Kiev, April 6-12, 1987). Proc. Invited Papers. - Singapore: World Scientific, 1987. - V. 1. - P.486-524.
 11. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Renormalized microscopic theory of fluctuations in inhomogeneous magnetized plasmas // Int. Conf. on Plasma Physics (Kiev, April 6-12, 1987). Proc. Invited Papers. - Singapore: World Scientific, 1987. - V.2. - P.1009-1041.
 12. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Nonlinear magnetic fluctuations in shear plasmas // Int. Conf. on Plasma Physics (Kiev, April 6-12, 1987). Proc. Contr. Papers. - Kiev: Naukova Dumka, 1987. - P.232-234.
 13. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Nonlinear generation of large-scale magnetic fields in plasmas // 15th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Heating (Dubrovnik, May 16-20,

- 1988). Proc. Contr. Papers. - Budapest: European Physical Society, 1988. - V. 12B, Part III. - P. 1233.
14. Ситенко А.Г., Сосенко П.П. О нелинейном взаимодействии конвективных волн в плазме // Физ. плазмы. - 1988. - Т.14, № 12. - С.1466-1472.
 15. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Stationary spectra of nonlinear magnetic fluctuations in inhomogeneous plasmas // Int. Symposium on the Physics of Ionized Gases (Sarajevo, August 15-19, 1988). Proc. Contr. Papers. - Sarajevo, 1988. - P. 569-572.
 16. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Weak interchange turbulence in cold plasmas // Int. Symposium on the Physics of Ionized Gases (Sarajevo, August 15-19, 1988). Proc. Contr. Papers. - Sarajevo, 1988. - P. 569-572.
 17. Sitenko A.G., Sosenko P.P. On convective fluctuations in a three-component plasma in a curved magnetic field. - Kiev, 1988. - 12 p. - (Preprint/Ukrainian SSR Acad. Sci. ITP, 88-144E).
 18. Ситенко А.Г., Сосенко П.П. О стационарных спектрах магнито-статических флуктуаций в неоднородной плазме // Физ. плазмы. - 1988. - Т.14, вып. II. - С.1396-1399.
 19. Ситенко А.Г., Сосенко П.П. Слабая турбулентность низкочастотных волн в холодной плазме // УФЖ. - 1989. - Т.34, № 1. - С.65-70.
 20. Ситенко О.Г., Сосенко П.П. Нелінійне збудження великомасштабного магнітного поля у плазмі // УФЖ. - 1989. - Т. 34, № 3. - С. 390-394.
 21. Sosenko P.P. Low-frequency oscillations in Vlasov plasmas: the quadratic polarization approximation // Nonlinear Phenomena in Vlasov Plasmas / Ed. F.Doveil. Orsay: Editions de Physique, 1989. - P. 305-322.
 22. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Electromagnetic effects in convective cells turbulence. - Kiev, 1989. - 12 p. - (Preprint/Ukrainian SSR Acad. Sci. ITP, 89-38E).
 23. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Low-frequency turbulence in an inhomogeneous magnetized plasma // Int. Conf. on Plasma Physics (New Delhi, November 22-28, 1989). Proc. Contr. Papers. - New Delhi, 1989. - V. III. - P. 877-880.

24. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Nonlinear oscillations in plasmas (renormalization concept). - Kiev, 1989. - 36 p. - (Preprint/Ukrainian SSR Acad. Sci. ITP, 89-60E).
25. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Renormalized theory of low-frequency hydrodynamic fluctuations in plasmas. Kiev, 1989. - 39 p. - (Preprint/Ukrainian SSR Acad. Sci. ITP, 89-54E).
26. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Electromagnetic properties of inhomogeneous magnetoactive plasma: low-frequency limit. Kiev, 1989. - 52 p. - (Preprint/Ukrainian SSR Acad. Sci. ITP, 89-59E).
27. Sitenko A.G., Sosenko P.P. Renormalized material relations in plasmas. Kiev, 1990. - 37 p. - (Preprint/Ukrainian SSR Academy of Science ITP, 90-10E).
28. Ситенко О.Г., Сосенко П.П. Кінетична теорія нелінійної взаємодії низькочастотних коливань у неоднорідній магнітоактивній плазмі (Огляд) // УФЖ. - 1990. - Т. 35, № 4. - С. 554-571.

Сосенко Петро Петрович

Кинетическая теория низкочастотных нелинейных явлений в плазме

Зак. 205 Формат 60x84/16. Уч.-изд.л. I,86

Подписано к печати 9.09.1991 года. Тираж 100.

Полиграфический участок Института теоретической физики АН УССР