

На правах рукописи

НЕЧАЕВ Антон Андреевич

**МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ НЕОДНОРОДНЫЕ
СТРУКТУРЫ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ
ПЛАЗМЕ С АНИЗОТРОПНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ
ЧАСТИЦ ПО СКОРОСТЯМ**

1.3.9 – физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Кочаровский Владимир Владиленович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Андреев Николай Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН» (г. Москва)

Малова Хельми Витальевна, доктор физико-математических наук, ФГБУН «Институт космических исследований РАН» (г. Москва)

Ведущая организация: Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва)

Защита состоится «19» декабря 2022 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте rfpa.ru ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Автореферат разослан « » 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э.Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Магнитные и электрические квазистационарные самосогласованные структуры в бесстолкновительной неравновесной плазме в существенной мере определяют ее динамику и кинетику происходящих в ней явлений. В последнее время этот круг вопросов привлекает все большее внимание, особенно благодаря вновь появляющимся возможностям их экспериментального исследования и численного моделирования. Специального исследования заслуживают структуры и динамические процессы в неравновесной неоднородной плазме с анизотропным распределением частиц по скоростям, в том числе при наличии сильного магнитного поля. В этих условиях актуальными являются задачи о развитии различных неустойчивостей, прежде всего наиболее быстрых неустойчивостей вейбелевского типа, и о формировании долгоживущих токовых слоев и филаментов, образующих как турбулентные, так и регулярные конфигурации. В настоящей диссертации рассматривается ряд таких задач, представляющих интерес как для фундаментальной физики плазмы, так и для различных приложений в астрофизической и лазерной плазме.

Одной из них является задача о расширении плазмы с горячими электронами в холодную и разреженную фоновую плазму, сопровождающемуся образованием тех или иных структур в области фронта ударной волны (см., например, [1–5]). В частности, открытыми остаются вопросы о возможности и условиях образования скачка плотности плазмы, его зависимости от свойств фоновой плазмы и профиля неоднородности разогретой плазмы, наличии и проявлениях многопоточности ионов, а также условиях генерации и пространственной структуре быстро эволюционирующего сильного магнитного поля и его корреляции с локальной анизотропией распределения электронов по скоростям.

Подобные задачи о распаде сильного разрыва и разлете плазмы с горячими электронами особенно важны для современной физики лазерной плазмы и связанной с ней лабораторной астрофизикой, где при абляции различных мишеней используются мощные фемтосекундные импульсы, позволяющие разогревать только электроны, но не ионы [6–10]. Актуальным является анализ многообразных задач с различными геометриями и физическими параметрами создаваемой таким образом плазмы, требующих описания ожидаемых или интерпретации наблюдаемых самосогласованных магнитных полей и токовых структур, которые возникают в рассматриваемых переходных процессах с неизбежным формированием сильно анизотропных распределений электронов по скоростям.

Не изученными являются свойства вейбелевской неустойчивости и формируемой ей квазимагнитостатической турбулентности, возникающих в двухкомпонентной плазме со сравнимыми по величине энергосодержанием и

степенью анизотропии электронов и ионов. Вместе с тем подобная ситуация вполне реализуема при контакте звездного (солнечного) ветра с различными магнитоплазменными образованиями, например магнитосферами планет, магнитными облаками или корональными арками (см., например, [11–15]).

Значительная часть теоретических исследований квазистационарных токовых слоев, являющихся важнейшими структурными элементами в бесстолкновительной плазме магнитосфер планет и звезд, опирается на плоские конфигурации силовых линий магнитного поля, магнитогидродинамическое приближение и максвелловские распределения частиц по скоростям [16–21]. В то же время интерпретация результатов многочисленных современных наблюдений этих структур требуют выхода за рамки указанных приближений и построения кинетической теории существенно неоднородных токовых слоев, в том числе с широким силовых линий магнитного поля и противотоками различных фракций частиц, а также учета конечной толщины переходных слоев в плазме и разнообразия их пространственных профилей в условиях немаксвелловского распределения частиц [16; 22–26].

Ключевые задачи работы диктуются логикой систематического анализа сложной картины указанных физических процессов, построение которой ведет к важным результатам теоретического и прикладного характера в тех или иных областях физики космической и лабораторной плазмы.

Цели и задачи работы

Общей целью диссертационной работы является аналитическое и численное исследование ряда магнитных и электрических структур в анизотропной бесстолкновительной плазме и особенностей связанных с ними кинетических эффектов. Задачами работы являются следующие.

1. Исследование условий формирования и свойств слоя уплотнения в электростатической ударной волне, образующейся при расширении плазмы с горячими электронами в разреженную и холодную фоновую плазму.
2. Анализ свойств квазимагнитоэлектростатической турбулентности, вызванной одно- или двухкомпонентной вейбелевской неустойчивостью в однородной безграничной или неоднородной разлетающейся плазме, в том числе в присутствии внешнего магнитного поля.
3. Построение аналитической модели токового слоя в плазме с произвольным распределением частиц по энергиям и широким силовых линий магнитного поля, описывающего распределенную границу между двумя областями однородной бесстолкновительной плазмы с различными параметрами и заданными внешними полями.

Методы исследования

Основным методом исследования являлось аналитическое и численное решение самосогласованных уравнений Власова – Максвелла с граничными и начальными условиями, отвечающими поставленным задачам. Численное

моделирование осуществлялось методом частиц в ячейках. Анализ различных полученных решений, аналитических и численных, производился с использованием теории возмущений для кинетического уравнения, метода дисперсионных уравнений, параметрического представления функций, усреднения по углу и других методов современной теоретической физики.

Научная новизна

В диссертационной работе на основе численного моделирования методом частиц в ячейках расширения бесстолкновительной плазмы с горячими электронами в холодную разреженную плазму выяснены условия возникновения, особенности кинетики электронов, роль многопоточности ионов и общий характер эволюции слоя уплотнения на фронте электростатической ударной волны для широкого диапазона тех или иных параметров горячей плазмы и начальных профилей ее концентрации.

Найдены основные закономерности вейбелевского механизма генерации магнитного поля и характерные структуры поддерживающих его токов при инжекции или разлете плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму или в вакуум при наличии внешнего магнитного поля в условиях сильно анизотропного распределения неравновесных электронов.

С использованием численного моделирования установлены свойства двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости и нелинейной эволюции магнитного поля, имеющих место в первоначально однородной бесстолкновительной плазме со сравнимыми по величине анизотропиями и энергосодержанием электронной и ионной компонент. Найдены закономерности эволюции пространственного спектра вейбелевской турбулентности и показано, что индукционное электрическое поле, возникающее благодаря затуханию созданного электронами мелкомасштабного магнитного поля, формирует долгоживущие крупномасштабные токи ионов.

Разработаны оригинальные аналитические модели токовых слоев, которые разделяют области многокомпонентной бесстолкновительной плазмы с отличающимися значениями параметров и внешнего магнитного поля и допускают как сложные локализованные профили токов различных фракций частиц, так и шир силовых линий магнитного поля. Впервые такие модели построены для случая произвольных распределений частиц по энергиям.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы определяется новыми свойствами решений уравнений Власова – Максвелла, выявленными аналитически и численно для ряда актуальных кинетических процессов и конфигураций полей в неравновесной бесстолкновительной плазме. Подобные процессы и конфигурации характерны для лазерной и космической плазмы, и практическая значимость работы обусловлена возможностью использования полученных теоретических результатов для интерпретации данных соответствующих плазменных экспериментов и наблюдений. В частности, построенные модели

токовых слоев открывают новые возможности интерпретации наблюдений долгоживущих магнитных структур в области головной ударной волны и магнитопаузы для различных конфигураций, порождаемых звездным или солнечным ветром при обдувании магнитосфер планет (экзопланет), высоко расположенных корональных магнитных структур или магнитных облаков, контактирующих с областями слабо замагниченной плазмы и образующих магнитный переходный слой.

Рассмотренные в диссертации явления, связанные с неравновесными частицами, особенно электронами, типичны для целого ряда экспериментов с разлетающейся горячей лазерной плазмой, создаваемой в результате абляции различных мишеней фемтосекундными импульсами при наличии достаточно холодной фоновой плазмы, в том числе в присутствии внешнего магнитного поля. Такого рода эксперименты с лазерной плазмой, предложенные автором диссертации, проводились в Йенском университете им. Фридриха Шиллера в 2019 году и ИПФ РАН в 2022 году. Подобные явления возможны при взрывных деформациях корональных арок в звездах поздних спектральных классов, при быстром нагреве вытянутых филаментов (дактов) плотности в солнечной короне или в магнитосферной плазме экзопланет, при взаимодействии филаментов горячей плазмы с магнитными облаками более разреженной и холодной плазмы в звездном ветре, при тех или иных взрывных процессах в магнитосферах планет. Перспективы использования изученных эффектов для анализа физических процессов в различных ситуациях в космической и лабораторной плазме представляются вполне реальными и требуют проведения дальнейшего численного моделирования рассмотренных задач.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Расширение бесстолкновительной плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму в определенной области параметров исходного разрыва приводит к многопоточности ионов и к образованию и длительному существованию слоя уплотнения на фронте электростатической ударной волны. Одновременно под фронтом и перед ним происходит генерация сильного неоднородного магнитного поля за счет вейбелевской неустойчивости формирующегося анизотропного распределения электронов по скоростям.
2. При инъекции плазмы с горячими электронами в фоновую холодную плазму или в вакуум при наличии внешнего магнитного поля, когда ударная волна отсутствует, в широкой области физических и геометрических параметров задачи формируются токовые структуры разных масштабов, мелкомасштабная составляющая которых определяется электронной вейбелевской неустойчивостью. Последняя обусловлена многопоточностью и анизотропным остыванием электронов и переводит вплоть до нескольких процентов их энергии

в энергию квазистатического магнитного поля, созданного токовыми слоями и филаментами. Ориентация однородного внешнего магнитного поля, даже сравнительно слабого, в плоскости, параллельной границе исходного разрыва в плазме, влияет на степень нарушения симметрии разлета плазмы и его кумуляцию, а также на условия возникновения и деформацию токовых структур.

3. Нелинейная динамика анизотропного распределения частиц и пространственного спектра магнитного поля в процессе развития двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости в первоначально однородной бесстолкновительной плазме со сравнимыми по величине анизотропиями и энергосодержанием электронной и ионной компонент определяется эстафетными процессами захвата и высвобождения электронов из все более крупномасштабных филаментов тока и диффузионного рассеяния ионов под действием квазимагнитостатической турбулентности и создаваемого ей индукционного электрического поля. На позднем этапе эволюции токовых филаментов, первоначально созданных за счет электронной вейбелевской неустойчивости, главная роль в поддержании токов постепенно переходит от электронов к ионам, несмотря на то что вейбелевская неустойчивость последних подавлена замагничиванием первых.
4. Существует аналитически описываемый класс кинетических переходных токовых слоев между областями плазмы с различными величинами магнитного поля, параметров анизотропных распределений и концентрации частиц, в котором эти распределения зависят только от инвариантов движения частиц — энергии и обобщенного импульса. Указанный класс токовых слоев допускает широкий выбор энергетических распределений и пространственных профилей плотности тока различных фракций частиц, а также соответствующих профилей согласованного магнитного поля, в том числе с широким его силовым линиям и немонотонным изменением величины.

Достоверность результатов

Проведенные исследования опираются на известные физические модели, широко используемые при изучении квазистационарных процессов в слабостолкновительной плазме и основанные на уравнениях Власова – Максвелла или Грэда – Шафранова, а также на ряд общетеоретических методов, имеющих строгое математическое обоснование: теорию возмущений, спектральные разложения, метод усреднения по большим интервалам и другие. Полученные аналитические оценки и результаты численного моделирования согласованы с экспериментальными данными и теоретическими результатами других научных групп.

Публикации и апробация результатов

Основные результаты работы были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях и научных школах: International Conferences «Frontiers of Nonlinear Physics» (2016–2019 г.), XVII–XIX научные школы «Нелинейные волны» (2016–2020 г.), International Conferences «Laser Optics» (2016–2020 г.), International Symposium «Topical Problems of Nonlinear Wave Physics» (2017 г.), International Conference «Physics of Neutron Star» (2017 г.), «Всероссийская астрономическая конференция» (2017 г.), International Conferences «Shilnikov Workshop» (2018–2021 г.), международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз» (2019 г.), 24-ая Нижегородская сессия молодых ученых (2019 г.), конференции «Физика плазмы в Солнечной системе» (2018–2022 г.), Asia-Pacific Conferences on Plasma Physics (2018 г., 2021 г.), EPS Conferences on Plasma Physics (2019 г., 2021 г.), IX международная конференция «Солитоны, коллапсы и турбулентность: достижения, развитие и перспективы» (2019 г.), IV International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight» (2020 г.), APS March Meeting (2021 г.), EGU General Assembly (2021 г.), 44th Scientific Assembly COSPAR (2022 г.), XXXI International Astronomical Union General Assembly (2022 г.). Результаты работы обсуждались на семинарах в Институте прикладной физики РАН и Калифорнийском университете в Беркли.

Всего по теме диссертации опубликовано 12 статей в рецензируемых журналах [A1–A12], из них 11 — в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных материалов, более 50 тезисов докладов в сборниках трудов конференций.

Личный вклад автора

Все основные теоретические результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии. Постановка начальных задач для численного моделирования разлета бесстолкновительной плазмы с горячими электронами, результаты которого представлены в главах 1–4, осуществлялась автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавтора совместных работ Степанова А.Н. Расчеты методом частиц в ячейках проводились совместно с Гарасёвым М.А. Численная обработка и теоретический анализ результатов расчетов осуществлены лично автором. Численное моделирование вейбелевской неустойчивости однородной анизотропной двухкомпонентной плазмы, результаты которого анализируются в главе 5, было выполнено сотрудниками МГУ им. М.В. Ломоносова Бородачёвым Л.В. и Коломийцем Д.О. Количественная обработка и качественная физическая интерпретация этих расчетов выполнена автором совместно с научным руководителем. Аналитические модели токовых слоев, представленные в главе 6, построены автором лично с использованием рекомендаций научного руководителя.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 200 страниц, включая 64 рисунка. Список литературы содержит 270 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы основные цели и задачи работы, описаны методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, изложена основная информация об апробации результатов работы.

В основу **главы 1** положен анализ целого ряда проведенных автором одномерных (1D) и двумерных (2D) расчетов методом частиц в ячейках (particle-in-cell, PIC) расширения бесстолкновительной плазмы с горячими электронами в холодную и значительно более разреженную плазму, т. е. распада сильного разрыва, который приводит к образованию слоя уплотнения плазмы (рис. 1), сопровождающего электростатическую ударную волну [A1; A7]. В **разделе 1.1** дано обоснование постановки задачи для моделирования разлета плазмы, созданной абляцией мишени фемтосекундным лазерным импульсом, а также обсуждаются существующие работы, посвященные описанию структуры ударной волны при распаде разрыва в плазме (например, [2; 3; 5; 27; 28]). Осуществленное PIC-моделирование для большого числа различных параметров плазмы и начальных профилей ее концентрации позволило дать качественное описание явления в целом (**раздел 1.2**) и выявить основные динамические свойства слоя уплотнения плазмы на фронте ударной волны, включая как стадию его формирования

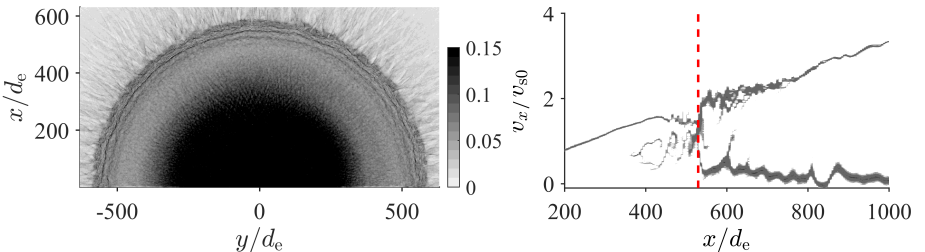


Рис. 1 — Слева распределение нормированной концентрации ионов в момент времени $t \approx 5$ пс, полученное в 2D расчете распада сильного разрыва в плазме. Исходное отношение концентраций по разные стороны разрыва равно 100. Справа фазовая плоскость ионов фоновой плазмы в тот же момент, полученная в 1D расчете с теми же параметрами плазмы (по вертикали — продольная скорость в единицах начальной скорости ионного звука). Штрихи отмечают положение фронта ударной волны. $d_e \approx 40$ нм.

(раздел 1.3), так и долговременную эволюцию и постепенное исчезновение (раздел 1.4). Особенности рассматриваемого явления в случае плавных переходов от горячей к холодной плазме обсуждаются в разделе 1.5.

Во всех рассмотренных случаях возникновение слоя уплотнения в электростатической ударной волне выходит за рамки развитых ранее представлений о возбуждении ионно-звуковых волн и солитонов и связано с появлением особенности на фазовой плоскости ионов и обрушением их потока, ведущим к двухпотокости. Последнее продемонстрировано на рис. 1, где показан также характерный вид ударной волны со слоем уплотнения. Слой уплотнения формируется встречными потоками ионов основной и фоновой плазмы (т. е. в значительной мере является проточным), хотя часть и тех, и других отражается от него. С течением времени слой уплотнения уширяется за счет насыщения ионами основной разлетающейся плазмы, которые начинают преобладать и в опережающем его потоке ускоренных ионов, обгоняющих отраженные ионы фоновой плазмы.

Главы 2–4 посвящены проблеме возникновения сильно неоднородного магнитного поля в условиях эффективного развития вейбелевской неустойчивости теплового и филаментационного типов при разлете плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму или вакуум, в том числе в присутствии внешнего магнитного поля. В этих главах области параметров задачи выбраны соответствующими лазерной плазме, создаваемой абляцией плоской мишени при квазицилиндрической фокусировке пучка излучения мощного фемтосекундного лазера.

В главе 2 рассмотрены особенности динамики магнитного поля, возникающего при расширении полуцилиндрического сгустка плотной плазмы с горячими электронами в разреженную и холодную плазму без внешнего магнитного поля, когда анизотропное распределение электронов по скоростям обусловлено уменьшением их эффективной температуры вдоль направления разлета [А6; А7]. Раздел 2.1 содержит краткий обзор механизмов генерации магнитного поля в лазерной плазме за счет электронной компоненты. В разделе 2.2 описаны детали поставленной начальной задачи для PIC-моделирования распада сильного разрыва, рассмотренного в главе 1. В разделе 2.3 представлены результаты, касающиеся особенностей формируемой при разлете плазмы анизотропии распределения по скоростям электронов двух фракций. Раздел 2.4 посвящен описанию общей структуры возникающих токов и магнитного поля в различных областях плазмы. В разделе 2.5 приводятся аналитические оценки характерной длины волны и инкремента вейбелевской неустойчивости, связанной с доминирующей фракцией горячих электронов, и полученные результаты сравниваются со значениями этих величин, найденными в численном моделировании. Изучаются свойства линейного и нелинейного этапов генерации мелкомасштабного магнитного поля, включая корреляцию его структуры с

пространственной структурой анизотропии распределения электронов по скоростям. Эта корреляция, выявленная впервые, представлена на рис. 2.

В главе 3 анализируется иная ситуация, когда имеется резкий переход от плоского слоя однородной плазмы, содержащей длинную полуцилиндрическую каверну с горячими электронами, к вакууму и всюду присутствует однородное внешнее магнитное поле, параллельное плоской границе разрыва концентрации частиц [A9–A11]. Это поле может препятствовать разлету горячих электронов и менять характер их анизотропного охлаждения, которое происходит в такой системе в отсутствие разреженного фона. В разделе 3.1 содержатся вводные замечания к главе и обосновывается актуальность поставленной задачи. В разделе 3.2 дана развернутая формулировка поставленной задачи для PIC-моделирования. В разделе 3.3 приведены простейшие аналитические оценки условий развития и пространственно-временных масштабов вейбелевской неустойчивости, затем дано описание результатов типичных расчетов и выявленных физических эффектов для исходной концентрации плазмы в пределах $10^{21} - 1.7 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ и для сильного внешнего магнитного поля с величиной в пределах 13–2500 Т. Раздел 3.4 посвящен изложению особенностей аналогичных физических эффектов в расчетах с меньшей концентрацией плазмы, равной 10^{20} см^{-3} , и меньшими величинами внешнего магнитного поля, лежащими в пределах 0.5–13 Т.

Установлено, в частности, что для указанных исходных концентраций плазмы внешнее магнитное поле \vec{B}_0 в диапазоне величин порядка 1–1000 Т существенно влияет на структуру возникающих токов и генерируемых ими магнитных полей, хотя не так сильно сказывается на расширении плазмы, идущем примерно с ионно-звуковой скоростью. При этом ориентации

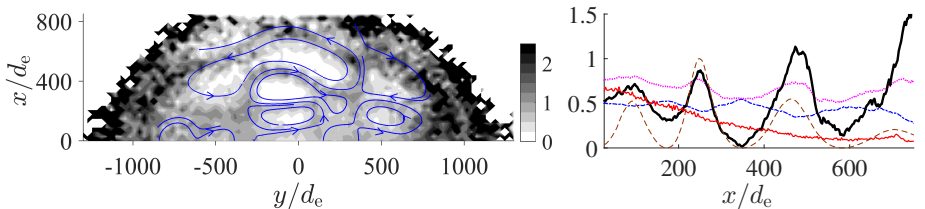


Рис. 2 — Слева распределение степени анизотропии горячих электронов $A_e = T_z/T_x - 1$ в момент времени $t \approx 5$ пс в расчете с теми же параметрами плазмы, что на рис. 1, но не круглой, а эллиптической формой сгустка плазмы, начальный размер которого вдоль оси y вдвое больше диаметра полукруга. Показаны некоторые силовые линии магнитного поля в проекции на плоскость xy . Справа продольная (штрихпунктир) и поперечная (пунктир) температуры горячих электронов, T_x и T_y , нормированные на начальные значения; параметр A_e (толстая сплошная кривая); безразмерная концентрация ионов (тонкая) и плотность энергии компонент магнитного поля в плоскости счета (штрихи) как функции координаты x . Профили получены усреднением распределений по координате y в узкой полосе.

внешнего поля вдоль оси полуцилиндра ($\vec{B}_0 \parallel Oz$) и поперек нее ($\vec{B}_0 \parallel Ox$) приводят к качественно различным структурам, представленным на рис. 3. В первом случае образуется вытянутая область с сильно вытесненной компонентой полного поля B_z и мелкомасштабной структурой компоненты поля B_x (и B_y), отвечающей токовым филаментам, направленным вдоль оси полуцилиндра z , что обусловлено остыванием разлетающихся электронов только в плоскости xy , но не вдоль оси z . Подобная анизотропия и, следовательно, вейбелевская неустойчивость не возникают во втором случае, когда компонента полного поля B_x вытесняется не столь эффективно токами другой структуры, а в области вытесненного поля мелкомасштабная структура всех компонент магнитного поля по существу отсутствует.

В **главе 4** исследование процессов формирования магнитных полей и соответствующих им токовых структур (слоев или филаментов) в лазерной плазме продолжено в рамках задачи, в которой плазма с горячими электронами не заготовлена исходно в виде полуцилиндрической ступки или каверны, а непрерывно впрыскивается через пятно с границы области счета в относительно холодную фоновую плазму с монотонно спадающим профилем концентрации [A13; 29]. В подобной граничной задаче, благодаря двум качественно различным неустойчивостям вейбелевского типа, филаментационной и тепловой, в определенных соседних слоях плазмы возможно образование взаимно ортогональных токовых структур с достаточно сильными магнитными полями. **Раздел 4.1** содержит введение к главе. В **разделе 4.2** сформулирована задача для PIC-моделирования, затем подробно описаны основные этапы изучаемого переходного процесса, обнаруженные в расчетах для типичного набора параметров лазерной плазмы. В **разделе 4.3** обсуждаются зависимости деталей этого процесса от параметров инжектируемой и фоновой плазмы, а также длительности впрыска. Типичная картина двух разнесенных в пространстве структур магнитного поля B_z и $B_{\perp} = (B_x^2 + B_y^2)^{1/2}$, образованных ортогональными токовыми структурами, слоями и филаментами (z -пинчами), представлена на рис. 4.

Глава 5 посвящена анализу динамики и спектральных характеристик вейбелевской неустойчивости в однородной бесстолкновительной плазме, в которой и электроны, и ионы в начальный момент имеют одинаковые анизотропные, бимаксвелловские распределения по скоростям и одинаковые температуры [A2]. В **разделе 5.1** даны вводные замечания к главе. В **разделе 5.2** описана постановка задачи для численного моделирования и приведены дисперсионные соотношения для двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости на линейной стадии. **Раздел 5.3** посвящен обсуждению эстафетного механизма ее насыщения за счет захвата электронов в пространственные гармоники с постепенно увеличивающимися масштабами. В **разделе 5.4** приведена простейшая модель диффузии ионов в мелкомасштабных магнитных полях, созданных электронной неустойчивостью, и с помощью нее объяснено уменьшение параметра анизотропии

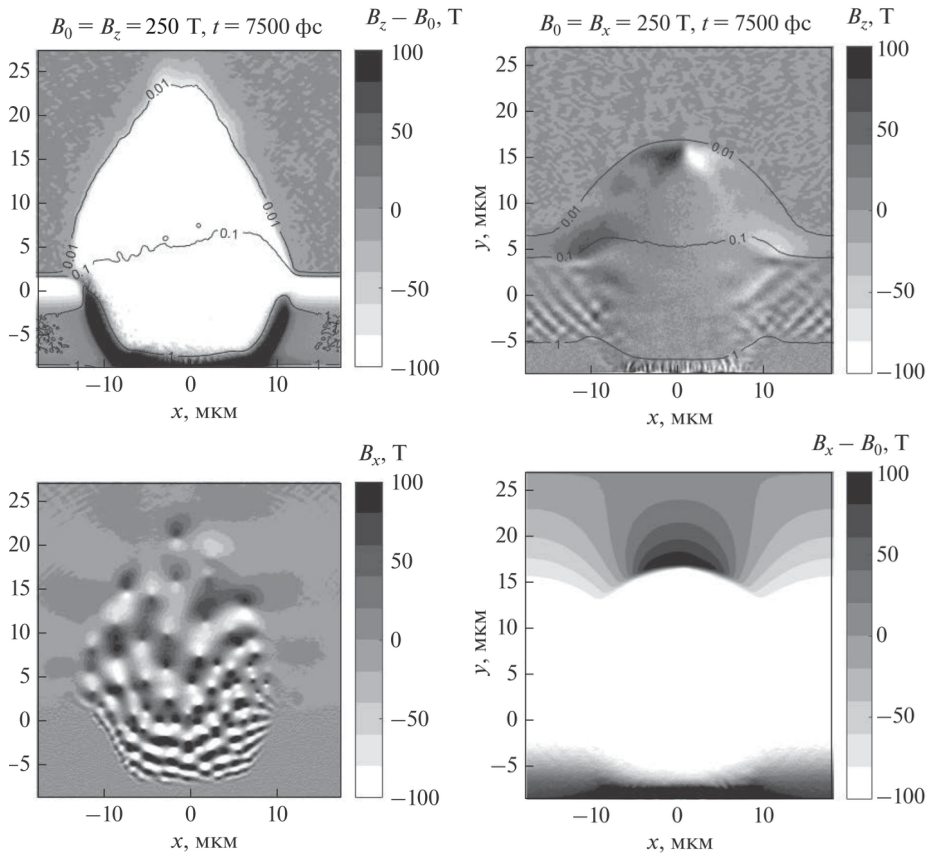


Рис. 3 — Магнитные структуры, полученные в 2D расчете в момент времени 7.5 пс. Слева расчет с внешним магнитным полем $B_{0z} = 250$ Т, ортогональным плоскости счета, справа — с внешним магнитным полем $B_{0x} = 250$ Т, лежащим в плоскости. На верхних панелях цветом показана z -компонента поля за вычетом внешнего, $B_z - B_{0z}$ (в теслах), если оно присутствует; на нижних — компонента $B_x - B_{0x}$ (в теслах). Изолинии показывают уровни концентрации плазмы $n/n_0 = 0.01, 0.1, 1$. Начальная концентрация плазмы $n_0 = 1.7 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$.

распределения ионов на временах после насыщения роста магнитного поля. Описан автомодельный степенной закон эволюции пространственного спектра неустойчивости. В **раздел 5.5** обсуждается возможность развития ионной вейбелевской неустойчивости или ее подавления и особенности эволюции крупномасштабных филаментов тока, созданных ионами.

Пример эволюции пространственного спектра турбулентных филаментов тока после насыщения вейбелевской неустойчивости приведен на рис. 5 (верхняя панель), где смещение доминирующего волнового числа K_{opt} со временем, как оказалось, происходит по закону $K_{\text{opt}} \propto t^{-1/2}$. На нижней панели представлена типичная динамика различных пространственных гармоник тока. Следует обратить внимание на обнаруженную смену экспоненциального роста на степенной на определенном этапе перед насыщением для всех длинноволновых гармоник электрического тока (и магнитного поля), что может быть связано с эстафетным процессом освобождения захваченных электронов из затухающих коротковолновых филаментов и последующим захватом электронов в нарастающие длинноволновые.

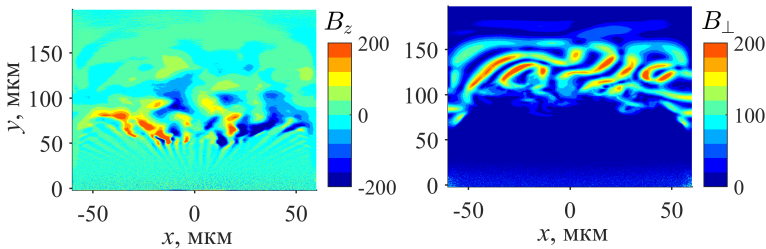


Рис. 4 — Слева распределение компоненты магнитного поля B_z (в теслах), справа — величины поперечного магнитного поля B_{\perp} (в теслах) в момент времени 3.6 пс. Впрыск горячих электронов длился 2 пс.

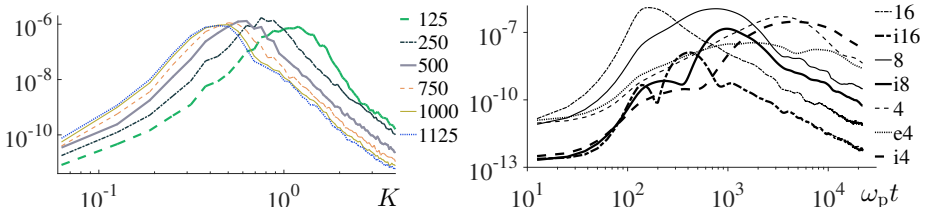


Рис. 5 — Сверху спектральная мощность полной плотности тока в зависимости от безразмерного волнового числа K в разные моменты безразмерного времени $\omega_p t$. Снизу спектральная мощность различных гармоник электронной, ионной и полной плотности тока в зависимости от времени. Номера гармоник см. на вставке: индекс i обозначает гармонику плотности тока ионов, e — электронов, номер без индекса — полной плотности тока.

В главе 6 построена аналитическая модель квазистационарного токового слоя, описывающего границу между областями с разными концентрациями бесстолкновительной плазмы, энергетическими распределениями частиц и величинами магнитного поля [A5; A8], в том числе с широм его силовых линий [A3; A4]. Модель существенно расширяет рамки магнито-гидродинамического подхода и обеспечивает кинетическое согласование пространственно неоднородных анизотропных функций распределения электронов и ионов. Согласно проведенным оценкам, она позволяет дать качественное описание токовой структуры магнитопауз, отделяющих магнитосферы планет или высокие корональные арки от звездного ветра, а также звездный ветер с магнитным полем от окружающей межзвездной среды.

Раздел 6.1 содержит краткий обзор имеющихся в литературе моделей токовых слоев и ограничений этих моделей. Предлагаемая модель токового слоя и исходные уравнения сформулированы в разделе 6.2. Рассмотрена наиболее простая ситуация, в которой две области с квазиоднородной плазмой различной концентрации и квазиоднородными магнитными полями различной величины, ортогональными оси неоднородности x , разделены согласующим их токнесущим слоем плазмы, имеющей анизотропные распределения частиц по скоростям. В случае слоев без шира магнитное поле $\vec{B}(x)$ полагалось ориентированным параллельно оси y , а создающий его ток электронов и ионов — вдоль оси z декартовой системы координат.

Согласно подходу [30], в качестве точных решений стационарных уравнений Власова – Максвелла, описывающих структуру магнитного поля и согласованные с ним анизотропные распределения частиц по скоростям, использованы функции инвариантов движения частиц f_α . Они взяты для каждой фракции частиц $\alpha = e, i$ (электронов и однозарядных ионов) в виде изотропных функций $F_\alpha(v)$, зависящих только от энергии частицы, умноженных на ступенчатую функцию Хевисайда H от проекции обобщенного импульса на ось z , $V_{\alpha z} = v_z + e_\alpha A_z / (m_\alpha c)$, взятой с определенным знаком:

$$f_{e,i}(x, \vec{v}) = N_{i,e} F_{i,e}(v) H(\pm V_{\alpha z}) + n_{i,e0}(x) F_{i,e0}(v), \quad (1)$$

где \vec{v} — вектор скорости частицы, m_α — ее масса, A_z — единственная ненулевая компонента вектор-потенциала, N_α — концентрации токнесущих частиц в области $A_z \rightarrow +\infty$, где $H = 1$ и плазма изотропна, e и c — величина элементарного заряда и скорость света в вакууме. Функции $F_{\alpha 0}(v)$, нормированные на единицу, во многом произвольны и отвечают не дающим вклада в ток фракциям частиц с концентрациями $n_{\alpha 0}(x)$, обеспечивающим электронейтральность; эти фракции считаются холодными и изотропными.

Профили плотности тока $j_z(A_z)$ и концентрации $n_\alpha(A_z)$ токнесущих фракций как функции вектор-потенциала определяются интегрированием по скоростям функций распределения f_α . Согласованное с ними магнитное поле $B_y(A_z)$ и пространственный профиль самого $A_z(x)$ могут быть затем найдены из первого интеграла уравнения Грэда – Шафранова (см. [30]),

что в итоге дает параметрическое выражение всех перечисленных характеристик слоя через функцию $A_z(x)$. При этом значение первого интеграла, являющееся свободным параметром модели, выбирается так, чтобы магнитное поле нигде не меняло знак и зависимость $A_z(x)$ была монотонной.

В диссертационной работе проведен детальный анализ свойств предложенных моделей для случая, когда распределения частиц по энергиям $F_\alpha(v)$ максвелловские с температурами T_α . В **разделе 6.3** обсуждаются токовые слои, сформированные одной или несколькими анизотропными фракциями частиц, которые создают электрический ток в одном направлении. Характерный вид слоя, образованного единственной фракцией протонов и являющегося асимметричным, показан на рис. 6. В **разделе 6.4** приведены слои со встречными токами электронов или ионов по разные стороны от центра токового слоя, в том числе слои с нулевым полным током.

Раздел 6.5 посвящен обобщениям обсуждаемой модели, позволяющим конструировать структуры, в которых максимумы плотностей тока разных фракций частиц сдвинуты относительно друг друга на произвольную величину, а вектор магнитного поля поворачивается при переходе через слой и немонотонно меняется по величине. Интегрированием функции (1) по скоростям можно получить для плотности тока частиц фракции α выражение $j_{\alpha z}(A_z) \propto \int_{|a_\alpha|}^{+\infty} v F_\alpha(v) (v^2 - a_\alpha^2) dv$, где $a_\alpha = A_z(x)e/(m_\alpha c)$. Его анализ совместно с подобными выражениями для магнитного поля и концентрации плазмы показывает, что от конкретного вида энергетического распределения частиц (максвелловского, кашпа- и других, в том числе релятивистских) зависят количественные, но не качественные свойства построенных слоев. Так, профиль плотности тока, создаваемого какой-то одной фракцией частиц, имеет единственный максимум и убывает к нулю при $x \rightarrow \pm\infty$, а профиль ее концентрации монотонен и изменяется от заданного значения N_α с одной стороны слоя до нуля с другой, как на рис. 6. Примеры моделей с кашпа-распределениями частиц по энергиям приведены в работе [A8].

Учесть шир силовых линий магнитного поля можно с помощью метода, развитого с участием автора в работах [A3; A4; 30]. Для этого

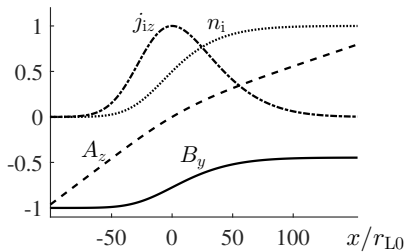


Рис. 6 — Профили магнитного поля (сплошная кривая), вектор-потенциала (штрихи), плотности тока (штрих-пунктир) и концентрации протонов (пунктир) в токовом слое, созданном единственной анизотропной фракцией протонов. Все величины и координата x даны в безразмерных единицах.

достаточно рассмотреть суммы двух цилиндрически симметричных функций обобщенного импульса вида (1) с ортогональными осями симметрии, $f_\alpha = f_\alpha^{(y)}(v, V_{\alpha y}) + f_\alpha^{(z)}(v, V_{\alpha z})$, которые отвечают суперпозициям двух планарных слоев, взятых так, что магнитное поле одного из них направлено вдоль тока частиц другого. Получающиеся из уравнений Грэда – Шафранова структуры магнитного поля, согласованного с такими функциями f_α , могут иметь довольно сложные пространственные профили шири [A3; A4].

В целом, предложенные модели допускают многократное немонотонное изменение величины магнитного поля и могут иметь асимметричные, многогорбые и знакопеременные профили плотности тока. Токи различных фракций плазмы могут обладать разными масштабами и быть сдвинуты друг относительно друга, пространственные масштабы токового слоя, образованного какой-либо одной фракцией плазмы, оказываются порядка типичного гирорадиуса частиц этой фракции, а общая толщина токового слоя определяется фракцией частиц с наибольшим энергосодержанием.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. С использованием численного моделирования методом частиц в ячейках процесса расширения бесстолкновительной лазерной плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму определены условия возникновения и особенности эволюции слоя уплотнения на фронте электростатической ударной волны. Установлено, что возникновение этого слоя под действием электрического поля энергичных электронов в области фронта бегущей ударной волны изменяет характер генерируемых ионно-звуковых волн и сопровождается сложной, неламинарной кинетикой различных фракций ускоренных и тепловых ионов, в том числе отраженных от фронта. Показано, что длительное существование слоя уплотнения и его тонкая структура обусловлены согласованным отражением от него и прохождением сквозь него встречных потоков ионов фоновой и основной плазмы.
2. Установлена возможность и найдены основные закономерности вейбелевского механизма генерации магнитного поля при разлете полуцилиндрического плазменного сгустка с горячими электронами в холодную фоновую плазму, сопровождающей распад указанного сильного разрыва. За генерацию магнитного поля ответственна анизотропия распределения электронов, в основном обусловленная их расширением с существенным уменьшением тепловых скоростей в направлении нормали к фронту электростатической ударной волны

при слабом уменьшении тепловых скоростей в поперечных направлениях. Сильное магнитное поле возникает в слое с наибольшей анизотропией под фронтом, захватывает всю область расширяющейся плазмы и на нелинейной стадии эволюции приобретает квазипериодическую модуляцию вдоль нормали к фронту, коррелирующую с модуляцией степени электронной анизотропии.

3. Для ряда существенно различных параметров начального ограниченного плоского слоя бесстолкновительной плазмы и параллельного его поверхности внешнего магнитного поля найдены закономерности деформации структуры магнитного поля и динамики разлета плазмы в вакуум из области с первоначально изотропно разогретыми электронами, имеющей вид длинного полуцилиндра, ось которого расположена на поверхности плазменного слоя. Выявлены особенности распада подобного неоднородно нагретого сильного разрыва и анизотропии возникающего распределения электронов по скоростям, обуславливающей вейбелевскую неустойчивость и переход до нескольких процентов энергии горячих электронов в энергию квазистатического магнитного поля. Показано, что степень нарушения симметрии разлета плазмы и его кумуляция, а также возникновение и деформация токовых структур всех масштабов существенно зависят от ориентации даже несильного однородного внешнего магнитного поля в плоскости, параллельной границе исходного разрыва в плазме.
4. Доказана возможность формирования и длительного сосуществования ортогональных токовых структур в соседствующих слоях холодной плазмы, пронизываемой потоком горячих электронов и имеющей монотонно спадающий профиль концентрации. Для широкой области параметров плазмы и потока инжектируемых электронов показано, что эти структуры возникают в результате развития вейбелевских неустойчивостей двух разных типов, связанных с качественно различными анизотропными распределениями электронов по скоростям.
5. Выявлены свойства двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости и эволюции порождаемого ей магнитного поля, происходящих в первоначально однородной бесстолкновительной плазме с одинаковыми (сравнимыми по величине) анизотропиями и энергосодержанием электронной и ионной компонент. Показано, что индукционное электрическое поле, возникающее благодаря затуханию созданного электронами мелкомасштабного магнитного поля, формирует долгоживущие токи ионов, которые со временем увеличивают свои масштабы, а связанное с ними магнитное поле в свою очередь создает соответствующие крупномасштабные токи электронов. При этом после остановки роста среднеквадратичной величины

полного магнитного поля, в ходе ее дальнейшего медленного спада, экспоненциальный рост гармоник электронного и ионного токов на определенном этапе перед их насыщением сменяется на степенной и сверхэкспоненциальный соответственно, а само насыщение роста для длинноволновых гармоник происходит позднее, чем для коротковолновых.

6. Определены законы нелинейной эволюции и затухания гармоник пространственных спектров магнитного поля и плотности тока, созданных в результате развития указанной двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости. Показано, что они в значительной мере определяются совместным действием эстафетных процессов захвата электронов во все более крупномасштабные филаменты тока и диффузионного рассеяния ионов на квазимагнитостатической турбулентности, приводя к универсальному степенному закону спада компонента пространственного спектра магнитного поля (и тока) во времени с показателем, близким к $5/2$. При этом волновое число, отвечающее максимуму спектра магнитного поля и тока, уменьшается со временем приблизительно по корневому закону, а среднеквадратичная величина индукционного электрического поля спадает по степенному закону с показателем, близким к $5/3$. Аналитически найдены приближенный закон нелинейной эволюции плотности энергии магнитного поля данной турбулентности и условия подавления ионной вейбелевской неустойчивости замагничиванием электронов в самосогласованном поле.
7. Аналитически разработан обширный класс кинетических токовых слоев, описывающих структуру магнитопаузы — перехода между областями плазмы с разными величинами магнитного поля, концентрациями и эффективными температурами частиц. В этих слоях токи различных фракций плазмы могут обладать разными масштабами и быть сдвинуты друг относительно друга в пространстве, а пространственные масштабы токового слоя, образованного какой-либо одной фракцией плазмы, имеют порядок типичного гирорадиуса частиц этой фракции, тогда как общая толщина всей конфигурации определяется величинами сдвигов между токами фракций с наибольшим энергосодержанием и типичными гирорадиусами частиц этих фракций.
8. Предлагаемые аналитические модели токовых слоев допускают немонотонное изменение величины магнитного поля и шир его силовых линий, а также могут иметь асимметричные, многогорбые и знакопеременные профили плотности тока, причем величина магнитного поля и полная концентрация плазмы могут нарастать одновременно при смещении вглубь слоя. Показано, что конкретный вид энергетического распределения частиц (максвелловский, каппа-

и другие) не влияет на качественные, общие свойства токовых слоев рассматриваемого класса, в котором функции распределения частиц зависят только от инвариантов их движения, энергии и обобщенного импульса.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Особенности генерации бесстолкновительной электростатической ударной волны в плазме при лазерной абляции / М. А. Гарасёв, А. И. Корытин, В. В. Кочаровский, Ю. А. Мальков, А. А. Мурзанев, А. А. Нечаев, А. Н. Степанов // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105, вып. 3. С. 148–152.
- A2. Динамика самосогласованного магнитного поля и диффузионное рассеяние ионов в плазме с сильной анизотропией температуры / Л. В. Бородачёв, М. А. Гарасёв, Д. О. Коломиец, В. В. Кочаровский, В. Ю. Мартьянов, А. А. Нечаев // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 12. С. 1107–1117.
- A3. Analytical theory of neutral current sheets with a sheared magnetic field in collisionless relativistic plasma / V. V. Kocharovsky, V. V. Kocharovsky, V. Y. Martyanov, A. A. Nechaev // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 932. P. 012019.
- A4. Токовые слои с широкими силовыми линиями магнитного поля / В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский, В. Ю. Мартьянов, А. А. Нечаев // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 2018. Т. 114, № 1. С. 75–80.
- A5. Аналитическая модель токовой структуры границы магнитослоя в бесстолкновительной плазме / В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский, В. Ю. Мартьянов, А. А. Нечаев // Письма в Астрономический журнал. 2019. Т. 45, № 8. С. 591–604.
- A6. Вейбелевский механизм генерации магнитного поля при расширении ступки бесстолкновительной плазмы с горячими электронами / А. А. Нечаев, М. А. Гарасёв, В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 12. С. 932–952.
- A7. Формирование слоя уплотнения в бесстолкновительной электростатической ударной волне при расширении горячей плотной плазмы в холодную и разреженную / А. А. Нечаев, М. А. Гарасёв, А. Н. Степанов, В. В. Кочаровский // Физика плазмы. 2020. Т. 46, № 8. С. 694–713.

- A8. *Кочаровский, В. В.* Аналитическая модель магнитопаузы в многокомпонентной бесстолкновительной плазме с капша-распределением частиц по энергиям / В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский, А. А. Нечаев // ДАН. Физика, технические науки. 2021. Т. 496. С. 19–23.
- A9. Вейбелевская неустойчивость и деформация внешнего магнитного поля в области распада сильного разрыва в плазме с горячими электронами / М. А. Гарасёв, А. А. Нечаев, А. Н. Степанов, В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62, № 3. С. 307–324.
- A10. Multiscale magnetic field structures in an expanding elongated plasma cloud with hot electrons subject to an external magnetic field / M. A. Garasev, A. A. Nechaev, A. N. Stepanov, V. V. Kocharovskiy, V. V. Kocharovskiy // J. Plasma Phys. 2022. Vol. 88, issue 3. P. 175880301.
- A11. Формирование и разлет токовых филаментов при распаде цилиндрической области плазмы с горячими электронами, нагретыми у поверхности раздела холодной плазмы и вакуума / А. Н. Степанов, М. А. Гарасёв, В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский, А. А. Нечаев // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60, вып. 3. С. 325–330.
- A12. Насыщающее магнитное поле вейбелевской неустойчивости в плазме с бимаксвелловским и бикапша-распределением частиц / А. А. Кузнецов, В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский, А. А. Нечаев, М. А. Гарасёв // Физика плазмы. 2022. Т. 48, № 9. С. 836–846.
- A13. Формирование и перестройка токовых структур в процессе разлёта горячих электронов из плотной в разреженную плазму / В. В. Кочаровский, М. А. Гарасёв, А. А. Нечаев, А. Н. Степанов, В. В. Кочаровский // Семнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Москва, 7–11 февраля 2022 г. : сб. тез. докл. Москва : ИКИ РАН, 2022. С. 298.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gurevich, A. V.* Expanding self-similar discontinuities and shock waves in dispersive hydrodynamics / A. V. Gurevich, A. P. Meshcherkin // Sov. Phys. JETP. 1984. Vol. 60, no. 4. P. 732–740.
2. *Медведев, Ю. В.* Нелинейные явления при распадах разрывов в разреженной плазме / Ю. В. Медведев. Москва : Физматлит, 2012. 344 с.
3. The expansion of a collisionless plasma into a plasma of lower density / M. Perego [et al.] // Physics of Plasmas. 2013. Vol. 20, no. 5. P. 052101.

4. Time-Resolved Characterization of the Formation of a Collisionless Shock / H. Ahmed [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 110, issue 20. P. 205001.
5. Ion-acoustic shocks with self-regulated ion reflection and acceleration / M. A. Malkov [et al.] // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23, no. 4. P. 043105.
6. The Generation of a Dense Hot Plasma by Intense Subpicosecond Laser Pulses / N. E. Andreev [et al.] // *High Temperature*. 2003. Vol. 41, no. 5. P. 594–608.
7. Relativistic Electron Streaming Instabilities Modulate Proton Beams Accelerated in Laser-Plasma Interactions / S. Göde [et al.] // *Physical Review Letters*. 2017. Vol. 118, no. 19.
8. Self-Organized KiloTesla Magnetic-Tube Array in an Expanding Spherical Plasma Irradiated by kHz Femtosecond Laser Pulses / S. Zhou [et al.] // *Physical Review Letters*. 2018. Vol. 121, no. 25. P. 255002.
9. Evidence of radial Weibel instability in relativistic intensity laser-plasma interactions inside a sub-micron thick liquid target / G. K. Ngirmang [et al.] // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 9872.
10. Measurements of the Growth and Saturation of Electron Weibel Instability in Optical-Field Ionized Plasmas / C. Zhang [et al.] // *Physical Review Letters*. 2020. Vol. 125, no. 25. P. 255001.
11. *Marsch, E.* Kinetic Physics of the Solar Corona and Solar Wind / E. Marsch // *Living Reviews in Solar Physics*. 2006. Vol. 3. P. 1.
12. *Веселовский, И. С.* Солнечный ветер и гелиосферное магнитное поле / И. С. Веселовский // *Модель космоса : научно-информационное издание : в 2 т. Т. 1 / под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова.* Москва : КДУ, 2007. С. 314–359.
13. Nonequilibrium Processes in the Solar Corona, Transition Region, Flares, and Solar Wind (Invited Review) / J. Dudík [et al.] // *Solar Physics*. 2017. Vol. 292, no. 8.
14. *Степанов, А. В.* Магнитосферы активных областей Солнца и звёзд / А. В. Степанов, В. В. Зайцев. Москва : Физматлит, 2018. С. 392.
15. Temperature Anisotropy Instabilities Stimulated by the Solar Wind Suprathermal Populations / M. Lazar [et al.] // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022. Vol. 8. P. 777559.
16. Тонкие токовые слои в бесстолкновительной плазме: равновесная структура, плазменные неустойчивости и ускорение частиц / Л. М. Зелёный [и др.] // *Физика плазмы*. 2011. Т. 37, № 2. С. 137–182.
17. High-latitude Conic Current Sheets in the Solar Wind / O. V. Khabarova [et al.] // *The Astrophysical Journal*. 2017. Vol. 836, no. 1. P. 108.

18. A model of the magnetosheath magnetic field during magnetic clouds / L. Turc [et al.] // *Annales Geophysicae*. 2014. Vol. 32, no. 2. P. 157–173.
19. *Izmodenov, V. V.* Three-dimensional kinetic – MHD model of the global heliosphere with the heliopause – surface fitting / V. V. Izmodenov, D. B. Alexashov // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2015. Vol. 220, no. 2. P. 32.
20. Kinetic models of magnetic flux ropes observed in the Earth magnetosphere / A. A. Vinogradov [et al.] // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23, no. 7. P. 072901.
21. Two-dimensional self-similar plasma equilibria / A. Lukin [et al.] // *Physics of Plasmas*. 2018. Vol. 25, no. 1. P. 012906.
22. Current Sheet in a non-Maxwellian collisionless plasma: Self-consistent theory, simulation, and comparison with spacecraft observations / K. V. Malova [et al.] // *Plasma Physics Reports*. 2010. Vol. 36, no. 10. P. 841–858.
23. *Livadiotis, G.* Kappa Distributions: Theory and Applications in Plasmas / G. Livadiotis. Elsevier, 2017. P. 738.
24. Electron Reconnection in the Magnetopause Current Layer / C. Norgren [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2018. Vol. 123, no. 11. P. 9222–9238.
25. Characteristics of the Flank Magnetopause: THEMIS Observations / S. Haaland [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2019. Vol. 124, no. 5. P. 3421–3435.
26. Crescent-Shaped Electron Distributions at the Nonreconnecting Magnetopause: Magnetospheric Multiscale Observations / B.-B. Tang [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46, no. 6. P. 3024–3032.
27. *Mora, P.* Rarefaction Acceleration and Kinetic Effects in Thin-Foil Expansion into a Vacuum / P. Mora, T. Grismayer // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102, issue 14. P. 145001.
28. Expansion of a radial plasma blast shell into an ambient plasma / M. E. Dieckmann [et al.] // *Physics of Plasmas*. 2017. Vol. 24, no. 9. P. 094501.
29. Существование ортогональных токовых структур и развитие разнотипных вейбелевских неустойчивостей в соседствующих областях переходного слоя плазмы с потоком горячих электронов / М. А. Гарасёв [и др.] // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2023. Т. 63, № 1. (В печати.)
30. Аналитическая теория самосогласованных токовых структур в бесстолкновительной плазме / В. В. Кочаровский [и др.] // *Усп. физ. наук*. 2016. Т. 186, № 12. С. 1267–1314.

НЕЧАЕВ Антон Андреевич

**МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ
НЕОДНОРОДНЫЕ СТРУКТУРЫ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ
ПЛАЗМЕ С АНИЗОТРОПНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЧАСТИЦ
ПО СКОРОСТЯМ**

Автореферат

Подписано к печати 10.10.2022
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 57(2022).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46