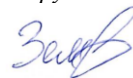


На правах рукописи



ЗЕМСКОВ Роман Сергеевич

**МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ
С СИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

1.3.9 – физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2025

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

Научный руководитель: Стародубцев Михаил Викторович, заместитель директора по научной работе, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты: Рыжков Сергей Витальевич, профессор, доктор физико-математических наук, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (г. Москва);

Крауз Вячеслав Иванович, начальник лаборатории, кандидат физико-математических наук, ФГБУ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (г. Москва).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук» (г. Москва).

Защита состоится «11» декабря 2025 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ИПФ РАН: ipfran.ru.

Автореферат разослан «30» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Представленная диссертация посвящена исследованию, выполненному на стыке физики плазмы, физики высоких плотностей энергии [1] и лабораторной астрофизики [2–4]. Работа имеет преимущественно экспериментальный характер с применением численного моделирования, что позволяет интерпретировать полученные данные. В ней изучается динамика разлета плазмы, образованной при облучении твердотельных мишеней наносекундными и фемтосекундными лазерными импульсами. Особое внимание уделено взаимодействию плазмы с внешним магнитным полем с индукцией порядка и более 10 Тл, а также развитию сопутствующих магнитогидродинамических и кинетических неустойчивостей.

Рассматриваются приложения лабораторных экспериментов к интерпретации астрофизических процессов — аккреции и коллимации протозвёздных джетов [5], генерации бесстолкновительных ударных волн в межзвёздной среде [6], взаимодействия звёздного ветра с магнитосферами планет [7]. Анализируется вейбелевская неустойчивость [8], которая в астрофизике рассматривается как один из ключевых элементов механизма возникновения ускоренных частиц в бесстолкновительных ударных волнах [9], ответственных за синхротронное излучение космических гамма-всплесков [10]. Такой междисциплинарный подход к моделированию ряда астрофизических явлений способствует более глубокому пониманию сложных процессов в астрофизической и околоземной плазме, что делает данное исследование значимым для науки и космических технологий.

Актуальность темы

Возможности прямых наблюдений процессов в далёких астрофизических объектах ограничены, поэтому для проверки теоретических моделей, описывающих астрофизические явления в молодых звёздных объектах, сверхновых и активных ядрах галактик, применяется лабораторное моделирование. Лабораторные установки позволяют контролировать ключевые параметры — плотность и температуру плазмы, а также магнитное поле, что недостижимо в наблюдательной астрофизике. Такие эксперименты дополняют астрономические данные и делают возможным тестирование моделей [2–4].

Важная роль лазерного излучения для физики высоких плотностей энергии и лабораторного моделирования разнообразных физических процессов была осознана почти сразу после создания лазеров в 1960-х годах [11]. Сегодня динамика потоков плазмы, создаваемой наносекундными импульсами, исследуется как в задачах управляемого термоядерного синтеза [12–14], так и в лабораторной астрофизике [2–4]. После внедрения технологии усиления чирпированных импульсов [15] начались исследования плазмы, сгенерированной короткими ($\tau < 1$ пс) лазерными импульсами. Фемтосекундные и пикосекундные лазерные импульсы начали применяться для быстрого зажига-

ния термоядерного топлива [16], генерации ускоренных частиц, рентгеновского и терагерцового излучения [17], а также получения электрон-позитронных пар [18]. Получила широкое распространение лазерная абляция мишеней наносекундными и фемтосекундными импульсами для анализа состава вещества [19].

Уникальность лазеров для решения задач лабораторного моделирования объясняется возможностью локально достигать гигантских плотностей энергии (10^{12} Дж/см³ и более), моделируя процессы от вспышек сверхновых до солнечных корональных выбросов. Взаимодействие такого сильного электромагнитного поля с конденсированной средой практически моментально приводит к генерации потоков горячей и плотной плазмы. Благодаря этому современные лазерно-плазменные системы позволяют моделировать широкий спектр процессов, связанных с плазменными потоками - от взрывов сверхновых до аккреции в звездах и корональных выбросов массы на Солнце (см. обзоры [2–4]).

Ключевым условием применения лабораторных данных в астрофизике является наличие скейлинга — возможности масштабировать лабораторные системы до астрофизических [20, 21]. Методы масштабирования, подробно обсуждаемые в диссертации, позволяют корректно сопоставлять процессы в плазменных объектах разных масштабов.

Теоретическое описание лазерной плазмы затруднено необходимостью учёта процессов ионизации, нагрева, генерации энергичных электронов и ионов. Характер плазмы определяется параметрами импульса: наносекундно-индуцированная плазма может быть близка к равновесной [22], тогда как фемтосекундно-индуцированная может содержать значительную фракцию ускоренных электронов с энергией вплоть до сотен МэВ. Такие электроны формируют электрические и магнитные поля, влияющие на макродинамику плазмы, включая генерацию крупномасштабных «фонтанных» и мелкомасштабных магнитных полей до сотен тесла [23].

Для описания эволюции плазмы применяются магнитогидродинамические (МГД), кинетические и гибридные численные коды. Обоснованию их корректности способствуют эксперименты в упрощённой геометрии, например, разлёт плазмы во внешнее квазиоднородное магнитное поле [24]. Однако природа наблюдаемых при таком взаимодействии неустойчивостей все еще остаётся предметом дискуссий. Это подчёркивает необходимость дальнейших исследований с использованием современных диагностик и моделирования. МГД-модели способны корректно описывать крупномасштабную динамику потоков плазмы, созданных наносекундными лазерными импульсами [25], однако применимость их к плазме, сгенерированной фемтосекундными лазерными импульсами релятивистской интенсивности, остаётся открытым вопросом. В диссертации анализируется влияние кинетических эффектов на крупномасштабную динамику фемтосекундно-индуцированной плазмы, в том числе при взаимодействии с магнитным полем величиной до 14 Тл. Сравне-

ние наносекундно-индуцированной и фемтосекундно-индуцированной плазмы при схожих флюенсах (3×10^4 Дж/см²) позволяет выявить фундаментальные различия в их динамике. Эти результаты важны не только для физики плазмы и астрофизики, но и для прикладных задач – термоядерного синтеза, лазерно-искровой спектроскопии и масс-спектрометрии.

Цели и задачи работы

Целью данной работы является исследование структуры и динамики плазменных потоков, создаваемых при облучении твердотельных мишеней двумя типами лазерного излучения со схожей энергией $E \sim 10$ Дж, а именно мощного лазерного излучения наносекундной длительности ($\tau = 1$ нс) с интенсивностью $I \sim 5 \times 10^{10} - 10^{13}$ Вт/см², и фемтосекундного ($\tau \sim 60$ фс) излучения с релятивистской интенсивностью до $I \sim 2 \times 10^{18}$ Вт/см². Ставилась задача изучить особенности взаимодействия таких плазменных потоков с внешними магнитными полями с индукцией до 18 Тл, а также исследовать свойства возникающих неустойчивостей плазмы. Для достижения поставленных целей были выполнены эксперименты на лазерном комплексе PEARL, разработаны диагностические методы и оригинальные схемы экспериментов. Кроме того, для интерпретации полученных экспериментальных результатов ставилась цель численно исследовать некоторые наблюдаемые процессы, а именно, выполнить моделирование: (а) взаимодействия лазерной плазмы с внешним поперечным магнитным полем, (б) возбуждения филаментации вейбелевского типа сверхмощным фемтосекундным лазерным импульсом.

Научная новизна

Впервые проведено детальное сравнительное исследование динамики плазменных потоков, генерируемых мощными наносекундными и фемтосекундными лазерными импульсами релятивистской интенсивности с совпадающими флюенсами. Экспериментально продемонстрировано, что фемтосекундно-индуцированный плазменный поток распространяется в вакууме в виде коллимированной структуры, в то время как наносекундно-индуцированный поток характеризуется значительной угловой расходимостью порядка 40° .

Впервые осуществлено экспериментальное исследование взаимодействия фемтосекундно-индуцированной плазмы с поперечным магнитным полем с индукцией свыше 14 Тл и проведен сравнительный анализ с динамикой взаимодействия наносекундно-индуцированных плазменных потоков. Подтверждено, что наносекундно-индуцированный плазменный поток, расширяющийся в поперечном магнитном поле, формирует диамагнитную каверну, на границе которой развивается неустойчивость Рэлея – Тейлора с характерными длинами желобковых структур, сопоставимыми с масштабами самой каверны. В случае воздействия фемтосекундным излучением впервые зафиксиро-

ровано перенаправление плазменного потока в узкий плазменный лист без образования каверны и сопутствующей желобковой неустойчивости.

Впервые экспериментально обнаружена и исследована неустойчивость Рэлея – Тейлора на границе диамагнитной каверны, образованной при наносекундной инжекции плазменного потока вдоль квазиоднородного магнитного поля.

Впервые экспериментально зарегистрировано развитие холловской модификации неустойчивости Рэлея – Тейлора в фемтосекундно-индуцированном плазменном потоке, вытянутом в направлении перпендикулярном к магнитному полю и превышающем по размерам классический радиус останковки R_b . Вследствие развития неустойчивости наблюдалось расслоение такого плазменного потока на отдельные структуры типа «язычков», то есть вытянутых и тонких струй плазмы (рис. 11), проникающих в поперечное магнитное поле. Впервые экспериментально установлено существенное влияние холловских эффектов на динамику фемтосекундных плазменных «язычков» в магнитных полях.

В результате облучения твердотельной мишени сверхмощным фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью $\sim 2 \times 10^{18}$ Вт/см² впервые экспериментально наблюдалось возникновение долгоживущей (~ 25 нс) неустойчивости вейбелевского типа в расширяющемся в вакуум плазменном потоке. Впервые экспериментально исследовано влияние внешнего поперечного магнитного поля индукции ~ 18 Тл на возникновение вейбелевской неустойчивости.

Впервые выполнено лабораторное моделирование коллимации джетов в полоидальном магнитном поле со структурой типа «песочных часов», наблюдающейся в окрестности молодых звездных объектов.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты лабораторных исследований, выполненных с лазерной плазмой, взаимодействующей с внешними магнитными полями, необходимы для верификации и проверки численных кодов и аналитических моделей, применяемых для описания явлений в астрофизике, физике термоядерной плазмы и физике высоких плотностей энергии.

Исследования вейбелевской неустойчивости и неустойчивости Рэлея-Тейлора в лазерной плазме находят применение как в фундаментальной науке, так и в прикладных областях. Фундаментальные знания о магнитной неустойчивости Рэлея – Тейлора в плазменных потоках, сгенерированных наносекундными и фемтосекундными лазерными импульсами, могут быть использованы в работах по УТС.

Лабораторные наблюдения долгоживущей вейбелевской неустойчивости позволяют по-новому интерпретировать природу долгоживущих магнитных структур и токовых слоев, наблюдаемых в солнечном ветре, особенно в области магнитопаузы. Эти данные также важны для понимания механизмов

взрывных процессов в корональных арках звезд, что существенно влияет на достоверность прогнозирования солнечной активности.

Для термоядерного синтеза с быстрым зажиганием полученные результаты исследования вейбелевской неустойчивости дают важные знания для понимания роли мелкомасштабных магнитных полей в плазме, создаваемой сверхинтенсивными лазерными импульсами. Особую ценность представляют выявленные закономерности формирования и эволюции магнитных структур, которые могут оказывать существенное влияние на процессы переноса энергии в плазме.

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют тесную взаимосвязь между фундаментальными исследованиями плазменных неустойчивостей и их практическими приложениями в различных областях — от космической физики до энергетики будущего.

Методология и методы исследования

Экспериментальная часть работы полностью выполнена на передовом петаваттном лазерном комплексе PEARL, технологии которого сочетают важные для лазерно-плазменных экспериментов свойства, например, оптическую синхронизацию наносекундной накачки и фемтосекундного импульса, а также возможность использования технологии «компрессии после компрессии» (SafCa) [26], обеспечивающую укорачивание сверхмощного лазерного импульса до 10 фс, что в свою очередь позволяет существенно (более 3 раз) увеличить интенсивность лазерного излучения в перетяжке и исследовать сверхбыстрые лазерно-плазменные релятивистские процессы.

Уникальная магнитная система, генерирующая импульсные (существующие в течении времени ~ 1 мс) магнитные поля с индукцией вплоть до 18 Тл, позволяет вести исследования взаимодействия плазмы и магнитного поля в условиях, оптимально масштабируемых до астрофизических.

Использованные оптические диагностические методы, такие как интерферометрия, теневое фотографирование и поляриметрия, позволяют делать моментальные снимки всей плазмы, определять особенности структуры с высоким разрешением, не хуже 30 мкм, а также измерять плотность плазмы и магнитные поля, что обеспечивает высокую точность и надежность экспериментальных результатов.

Для детального описания наблюдаемых в эксперименте явлений и их интерпретации используется численное моделирование, построенное на основе надежных и признанных открытых кодов, таких как релятивистский PIC (метод частиц в ячейках) код Smilei, гибридный код АКА, сочетающий свойства PIC подхода для ионов и гидродинамического описания электронов, а также МГД код FLASH с радиационным переносом и 3-х компонентной температурой.

Положения, выносимые на защиту

1. Неустойчивость Рэлея – Тейлора возникает на границе диамагнитной каверны, образованной при инжекции плазменного потока наносекундным лазерным импульсом как поперек, так и вдоль внешнего магнитного поля.

2. Для коллимации потока плазмы достаточно обеспечить его взаимодействие с полоидальным магнитным полем в вакууме на квазиднородном участке с пространственным масштабом порядка классического радиуса остановки R_b . Сформированный таким образом плазменный поток при выходе из области квазиднородного полоидального магнитного поля в область сильно расходящегося поля сохраняет свою коллимированность.

3. В плазменном потоке, созданном при облучении твердотельной мишени фемтосекундным лазерным импульсом релятивистской интенсивности, магнитостатическая филаментация плазмы вейбелевского типа может сохраняться на временах, существенно превышающих время релаксации анизотропии температуры фракции горячих электронов.

4. Плазменный поток, индуцированный при абляции плоской мишени фемтосекундным лазерным импульсом релятивистской интенсивности, имеет коллимированную структуру, в то время как поток плазмы, сгенерированной наносекундным лазерным импульсом с таким же флюенсом, является расходящимся. При наличии внешнего поперечного магнитного поля изначально коллимированный плазменный поток перенаправляется в тонкий плазменный лист без образования каверны и развития желобковой неустойчивости на ее поверхности.

5. Фемтосекундно-индуцированные тонкие плазменные струи со структурой типа «языка», плотность и скорость которых ниже, чем у наносекундно-индуцированных струй, демонстрируют нетипичное для классической МГД системы поведение, выражающееся в систематическом искривлении в сторону циклотронного вращения ионов в магнитном поле.

Апробация и достоверность результатов

По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 9 статей [A1– A9] в рецензируемых ведущих российских и зарубежных научных журналах, таких как *Astronomy & Astrophysics*, *Plasma MDPI*, “Астрономический журнал” и “Известия высших учебных заведений. Радиофизика”, а также 4 работы [A10–A13] в трудах конференций. Все публикации по теме диссертации входят в систему цитирования Web of Science (WOS), Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и представлены в конце автореферата [A1–A13].

Результаты работы были апробированы на семинарах ИПФ РАН, межинститутских семинарах, а также на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. Международная конференция «XIX научная школа - Нелинейные волны», Бор, Россия, 2020. 2. XXVII Нижегородская сессия молодых ученых

(технические, естественные, математические науки), Нижний Новгород, Россия, 2022. 3. Международная конференция «XX научная школа - Нелинейные волны», Бор, Россия, 2022. 4. XXXVIII Fortov International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (ELBRUS), the Kabardino-Balkar Republic of the Russian Federation, 2023. 5. I Всероссийская школа НЦФМ по экспериментальной лабораторной астрофизике и геофизике, Саров, Россия, 2023. 6. XXXIX Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS), the Kabardino-Balkar Republic of the Russian Federation, 2024. 7. 2024 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, Russia, 2024. 8. Международная конференция «XXI научная школа - Нелинейные волны», Бор, Россия, 2024. 9. The 8th International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics", Moscow – Kostroma – Moscow, Russia, September 1–6, 2024. 10. The VII-th International Symposium "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics", Moscow – St.Petersburg, Russia, September 7–13, 2025.

Личный вклад автора

Эксперименты выполнены в коллективе соавторов на большой и технологически сложной лазерной установке PEARL. Автор является одним из основных исполнителей экспериментов с плазменными потоками, индуцированными сверхмощными лазерными импульсами. Численное моделирование PIC, гибридным и МГД кодами выполнено автором лично. Вклад автора во все представленные результаты является основополагающим и присутствует на всех этапах проведения исследования: от планирования экспериментов, разработки экспериментальных схем и диагностик, получения и обработки экспериментальных данных, до интерпретации экспериментальных данных для применения в астрофизическом моделировании, подготовки и написания статей. Задача исследования взаимодействия встречных потоков фемтосекундно-индуцированной лазерной плазмы и схема реализации была предложена лично автором. Постановка остальных научных задач проводилась научным руководителем М.В. Стародубцевым, а также А.А. Соловьевым, К.Ф. Бурдоновым, В.В. Кочаровским и А.Н. Степановым.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 141 страниц, включая 38 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, дан краткий обзор ранее полученных результатов, сформулированы основные цели и задачи работы, описаны методы исследования, научная новизна, практическая и научная значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, дано описание личного вклада автора, а также

приведены списки научных трудов и тезисов научных конференций, подтверждающих достоверность научных результатов.

Глава 1 имеет общий характер и включает расширенный обзор современного положения дел по основным направлениям лабораторной астрофизики, описание наиболее часто используемых подходов для лабораторно-астрофизического масштабирования. В данной главе также описаны экспериментальные возможности лазерного комплекса PEARL, где была выполнена экспериментальная часть работы. Подробно рассмотрены основные экспериментальные подходы к диагностике и исследованию лабораторной плазмы.

В **параграфе 1.1** описаны некоторые проблемы современных астрономических наблюдений, связанные с ограничениями наблюдательного астрономического метода исследований. Описаны некоторые современные представления об астрофизических объектах и явлениях, экспериментально моделируемых в данной работе, таких как аккреция вещества из аккреционного диска, генерация и коллимация джетов в молодых звездных объектах, вейбелевская неустойчивость и ударные волны во встречных потоках плазмы. Продемонстрировано, что типичного разрешения (~ 50 а.е.) современных наблюдений далеких молодых звездных объектов недостаточно, чтобы подробно исследовать процессы аккреции и коллимации джетов, происходящих в данных объектах в областях с размерами порядка 10 а.е.. Обсуждается современное состояние знаний о вейбелевской неустойчивости и ударных волнах в астрофизике. Подчеркивается, что понимание природы возникновения данных явлений остаются неполными в первую очередь из-за сложной микрофизики таких явлений, затрудняющей теоретические исследования и моделирование. Сформулированы основные вопросы и проблемы астрофизики, на которые данная работа нацелена ответить.

В **параграфе 1.2** рассмотрены основные подходы для построения масштабирования между лабораторными и астрофизическими объектами. Описан наиболее часто используемый подход, основанный на идеальных МГД уравнениях. Указывается, что в приближении малости диссипативных параметров, то есть при выполнении условий Re , Re_m , $Pe \gg 1$, масштабирование между двумя системами выполняется, если численно совпадают параметры подобия Эйлера Eu и плазменная бета β . Упомянуты некоторые другие подходы масштабирования, основанные на кинетическом уравнении Власова.

В **параграфе 1.3** описана ретроспектива некоторых важных экспериментальных исследований в области лабораторного моделирования. Дан общий обзор проведенных исследований по лабораторной астрофизике, начиная с пионерских работ с плазменными генераторами и пинчами, заканчивая современными лазерными экспериментами.

В **параграфе 1.4** рассмотрены экспериментальные возможности лазерного комплекса PEARL для лабораторно-астрофизических исследований. Приведена общая схема лазера PEARL с описанием доступных и наиболее часто

используемых в экспериментах типов лазерного излучения: мощного наносекундного с энергией вплоть до 300 Дж и сверхмощного фемтосекундного излучения с энергией до 20 Дж. В **пункте 1.4.2** описана типичная схема эксперимента (рис. 1) в мишенной вакуумной камере для лабораторно - астрофизического моделирования, например, аккреции в МЗО.

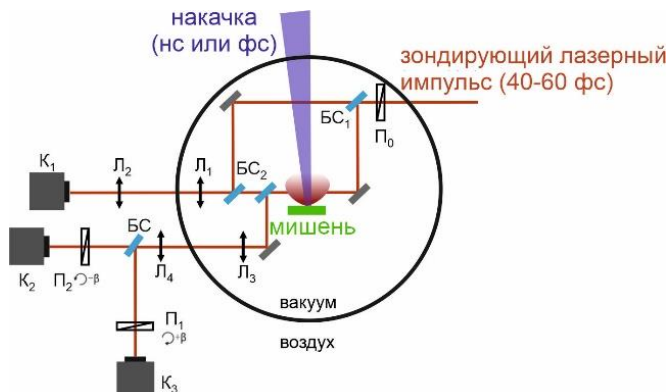


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента для генерации и исследования плазменных потоков. Приведены типичные схемы интерференционной и поляриметрической фемтосекундных диагностик. «Накачка» – мощный наносекундный или сверхмощный фемтосекундный лазерный импульс. Плазменный объект нарисован над мишенью красным цветом. L_1, L_2, L_3, L_4 – линзы; BC, BC_1, BC_2 – делители пучка; Π_0 – поляризатор перед плазменным объектом; Π_1 и Π_2 – скрещенные на угол 2β поляризаторы на $\pm\beta$; K_1, K_2, K_3 – камеры

В **пункте 1.4.3** рассмотрены основные применяемые оптические методы диагностики плазмы, такие как теневое фотографирование, интерферометрия и поляриметрия (см. рис. 1). Указывается, что теневое фотографирование обеспечивает пространственное разрешение не менее 30 мкм и позволяет визуализировать области с резкими градиентами плотности плазмы. Представлена схема и устройство используемого интерферометра Маха – Цендера (рис. 1). Демонстрируется, что интерферометрические измерения, выполненные в рамках заданных приближений, дают возможность реконструировать пространственное распределение электронной концентрации и трёхмерную структуру плазмы. Приведена схема поляриметрической диагностики, которая применяется для восстановления интегральной величины и структуры магнитного поля (рис. 1). Результаты данного пункта опубликованы в статье [A7] и материалах конференции [A10].

В **пункте 1.4.4** описываются характеристики и устройство уникальной магнитной системы, используемой для исследования взаимодействия плазмы с внешним магнитным полем. Внешний вид, трехмерная модель магнитной системы приведены на рисунке 2 (а-в), а структура генерируемого магнитного поля приведена на рис. 2 (г, д). Продемонстрировано, что достигаемые с

помощью данной катушки магнитные поля $\sim 10\text{--}20$ Тл ограничивают разлет лазерной плазмы до размеров ~ 1 см, следовательно, позволяют достигать оптимальных условий для применения оптических диагностических методов и подходов масштабирования к астрофизическим объектам.

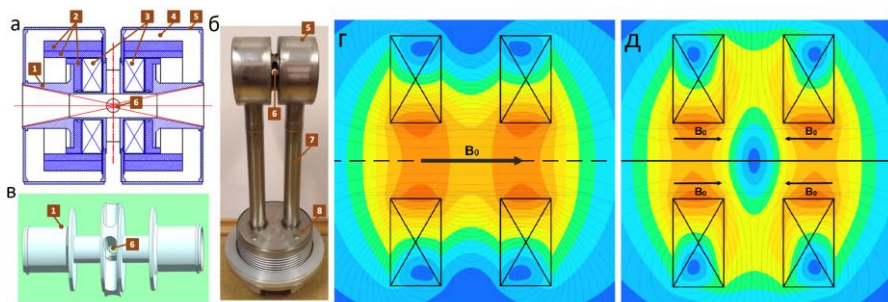


Рис. 2. Схематический разрез магнитной системы (а), трехмерная модель несущего каркаса (б) и внешний вид изготовленной магнитной системы (в). Цифрами обозначены: 1 – металлический несущий каркас, 2 – составные элементы несущего каркаса, 3 – обмотки, 4 – азотная камера, 5 – внешний экран, 6 – конические отверстия для ввода лазерного излучения и потока плазмы, 7 – каналы для подачи жидкого азота и размещения токоподводов, 8 – узел стыковки герметичных сильфонов. Структура магнитного поля при (z) – сонаправленном подключении катушек, (d) – при противоположно направленном подключении

Глава 2 посвящена исследованиям разлета плазменных потоков, сгенерированных при облучении твердотельных мишеней из тефлона $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ наносекундными лазерными импульсами с энергией ~ 10 Дж. В **параграфе 2.1** описаны основные параметры таких плазменных потоков при квазисферическом разлете в вакуум без внешнего магнитного поля. Показано, что на временах $t \sim 10$ нс после облучения плазма характеризуется температурой $T_e \sim 50\text{--}100$ эВ, концентрацией $N_e \sim 10^{18}\text{--}10^{19}$ см $^{-3}$, скоростью потока $V \sim 300\text{--}400$ км/с и средним зарядовым числом $Z \sim 4\text{--}5$. С помощью интерферометрии продемонстрировано, что плазменный поток расширяется в вакуум квазисферически с углом разлета порядка 40° .

В **параграфе 2.2** исследован разлет плазмы из квазиточечного источника во внешнее поперечное квазироднородное магнитное поле с индукцией порядка 14 Тл. В **пункте 2.2.1** описаны основные стадии такого квазисферического разлета: образование диамагнитной каверны, возникновение желобков на ее границе, эволюция неустойчивости от начальной стадии до нелинейной, когда размеры наблюдаемых желобков достигают размера каверны (рис. 3, а). С помощью линейной теории демонстрируется, что наиболее вероятным кандидатом на роль наблюдаемой неустойчивости является неустойчивость Рэлея – Тейлора.

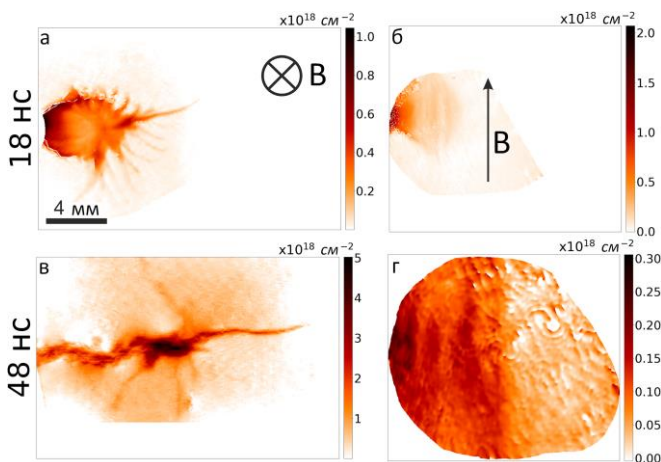


Рис. 3. Измеренные двумерные распределения линейной концентрации потока лазерной плазмы при 18 нс (*а*, *б*) и при 48 нс (*в*, *г*) после лазерного воздействия на мишень. Слева (*а*, *в*) приведены результаты зондирования вдоль магнитного поля, справа (*б*, *г*) – поперек.

В пункте 2.2.2 продемонстрировано, что на дальнейших этапах эволюции плазменная каверна сжимается внешним магнитным полем и образует плазменную структуру в виде листа, вытянутого вдоль поля и распространяющегося поперек внешнего магнитного поля с постоянной скоростью в виде узконаправленного неустойчивого течения (рис. 3, *в*, *г*). Представленное численное моделирование МГД кодом FLASH с хорошей точностью воспроизводит динамику плазмы, а именно образование каверны с желобками неустойчивости и образование вытянутого плазменного листа. Численное МГД моделирование, учитывающее температуру электронов T_e , ионов T_i и радиационную температуру T_{rad} , а также резистивность плазмы, демонстрирует, что плазменный лист является существенно диамагнитным (рис. 4, *г* – *е*). Так же, как и в эксперименте, наблюдается случайное изменение направления распространения плазменного листа, не зависящее от направления внешнего магнитного поля. Основные результаты, представленные в параграфе 2.2, опубликованы в статьях [A1, A8].

В пункте 2.2.3 представлена интерпретация наблюдаемого механизма проникновения плазмы в магнитное поле для объяснения нерегулярной аккреции в молодых звездах типа EXor. Предположение о выполнении масштабирования лабораторных и аккреционных потоков в объектах EXor позволило оценить ранее не известное в таких объектах магнитное поле ~ 20 Гс, согласованное с современными теоретическими представлениями. Результаты данного пункта опубликованы в статье [A2].

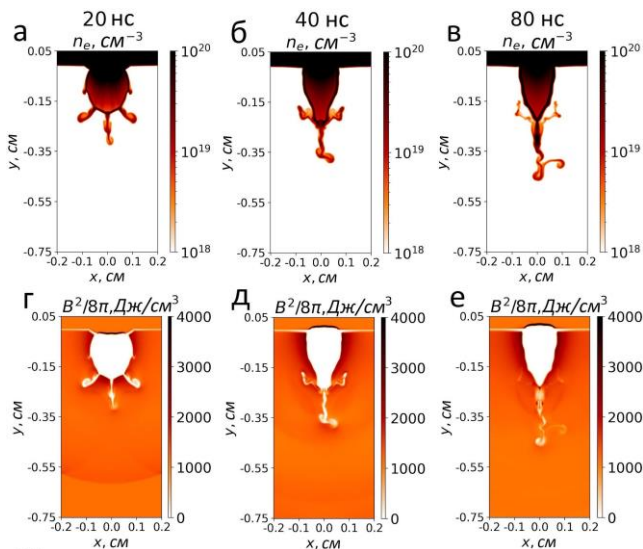


Рис. 4. Симуляции трехмерным МГД кодом FLASH. На всех рисунках представлены срезы $z = 0$: (а – в) плотности плазмы и (г – е) давления магнитного поля для 20, 40 и 80 нс после начала облучения

В параграфе 2.3 представлено детальное исследование коллимации потоков лазерной плазмы для моделирования джетов в молодых звездных объектах. В пункте 2.3.1 экспериментально продемонстрированы основные этапы коллимации лабораторного джета в квазиоднородном полоидальном (вдоль оси симметрии) магнитном поле. Исследовано перенаправление потока, образование диамагнитной каверны с магнитной конической ударной структурой, называемой магнитным соплом, и образование узконаправленного джета (рис. 5).

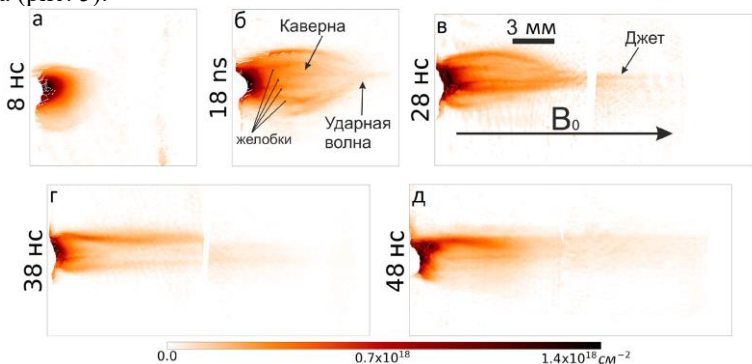


Рис. 5. Экспериментальные профили концентрации для разлета плазмы вдоль квазиоднородного магнитного поля, полученные с помощью интерферометрической диагностики

Впервые для такой геометрии разлета экспериментально наблюдалось возникновение желобков неустойчивости Рэля – Тейлора на границе плазменной каверны (рис. 5, б, в).

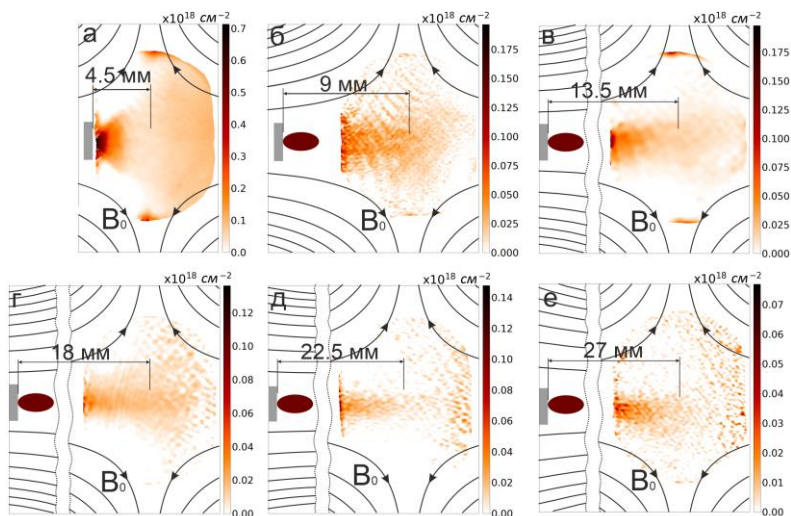


Рис. 6. Экспериментальные профили концентрации плазмы при разлете в расходящееся магнитное поле. Профили концентрации получены с помощью интерферометрической диагностики через 68 нс после облучения мишени. Рисунок *а* соответствует ближайшему к нулевой точке положению мишени, рисунок *б* – смещению на 4.5 мм, *в* – 9 мм, *г* – 13.5 мм, *д* – 18 мм, *е* – 22.5 мм. Серым прямоугольником обозначено положение мишени

В пункте 2.2.3 представлены результаты первого экспериментального моделирования коллимации плазменных джетов в неоднородном полоидальном магнитном поле со структурой типа «песочных часов» (рис. 6). Для воспроизведения астрофизических условий использовалась экспериментальная конфигурация магнитного поля типа касп (рис. 2, д), имитирующая структуру поля, наблюдаемую в окрестности молодых звездных объектов. Экспериментально установлено, что для эффективной коллимации лабораторного джета достаточно взаимодействия плазменного потока с квазиоднородным магнитным полем на масштабах, сравнимых с классическим радиусом остановки R_b . (см. рис. 6). На основе МГД масштабирования лабораторных и астрофизических потоков показано, что данный масштаб коллимации для астрофизического джета составляет порядка 30 а.е., что согласуется с современными наблюдательными данными. Результаты параграфа 2.3 опубликованы в статье [А6] и конференционных материалах [А11, А12].

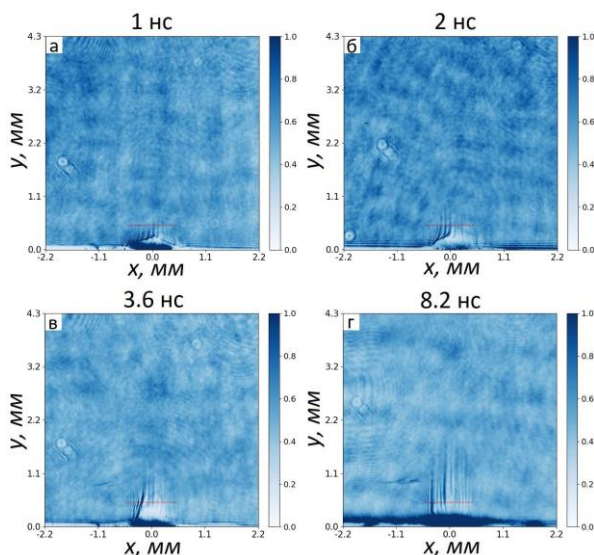


Рис. 7. Теневые снимки плазмы (а, б, в и г), полученные через 1, 2, 3.6 и 8.2 нс после облучения мишени лазерным импульсом с интенсивностью 2×10^{18} Вт $\cdot$ см $^{-2}$, соответственно

Глава 3 посвящена исследованию динамики плазменных потоков, возникающих при воздействии сверхмощных фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью до $I \sim 2 \times 10^{18}$ Вт/см 2 на твердотельные мишени. В **параграфе 3.1** детально изучен разлет такой плазмы в вакуум без магнитного поля. Впервые экспериментально обнаружено образование долгоживущей филаментационной структуры (рис. 7, 8) с уникальными характеристиками: филаменты ориентированы строго перпендикулярно мишени и сохраняются в течение 25 нс после лазерного воздействия. В **пункте 3.1.2** приведены результаты двумерного PIC-моделирования, которое показало, что ускоренные электроны с энергиями до нескольких сотен кэВ, образующиеся при взаимодействии релятивистского лазерного излучения с плазмой, генерируют мелкомасштабные вейбелевские филаментационные и крупномасштабные фонтанные магнитные поля с амплитудой до 500 Тл на пикосекундных временах. С другой стороны, показано, что горячие электроны подвержены быстрой релаксации за времена < 10 пс, что ставит под сомнение их роль в поддержании экспериментально наблюдаемой долгоживущей (~ 25 нс) филаментации. Основываясь на этих результатах и теоретических оценках, предложены гипотезы об иных механизмах поддержания долгоживущих филаментационных структур. Материалы, представленные в **параграфе 3.1**, опубликованы в статье [A7] и конференционных материалах [A13].

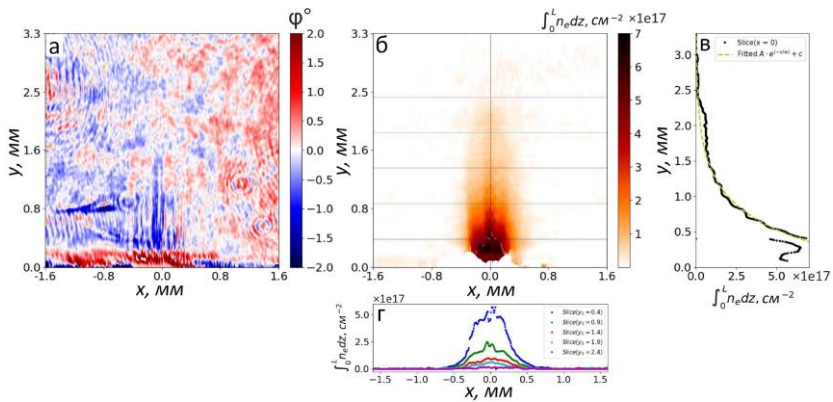


Рис. 8. Снимки плазмы, полученной через 8.2 нс после облучения мишени, также представленный ранее на рис. 7, *г*: *а* – угол деполаризации лазерного луча, зондирующего плазму. На панели *б* представлена двумерная картина линейной концентрации плазмы. Вертикальной линией изображен срез, представленный на панели *в*, а горизонтальными линиями изображены срезы, представленные на панели *г*. На панели *в* представлен срез распределения концентрации *б* плазмы вдоль оси $x = 0$ и аппроксимация зависимостью $N_e = A \times e^{-x/(C_s t)}$, где $t = 8$ нс, $C_s = 60$ км/с – скорость ионного звука, соответствующая температуре $T_e \sim 50$ эВ

В пункте 3.1.3 представлено первое экспериментальное исследование влияния внешнего магнитного поля порядка 18 Тл на возникновение вейбелевской неустойчивости. Продemonстрировано, что вейбелевская неустойчивость продолжает наблюдаться в плазменном потоке, за исключением области сжатого плазменного листа.

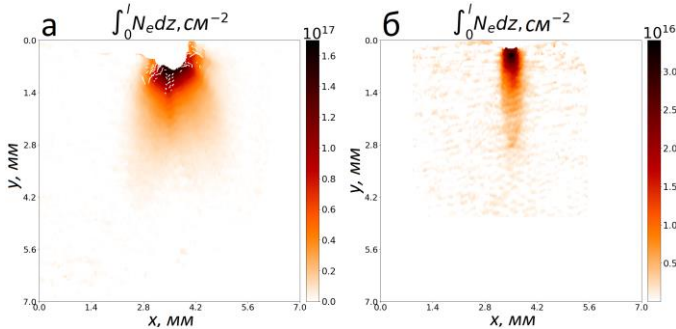


Рис. 9. Сравнение морфологии наносекундно-индуцированной (слева) и фемтосекундно-индуцированной (справа) плазмы, расширяющейся в вакуум: *а* – линейная концентрации плазмы через 18 нс после облучения наносекундным импульсом с энергией 10 Дж; *б* – линейная концентрации плазмы через 15 нс после облучения фемтосекундным импульсом (60 фс) с энергией 10.9 Дж

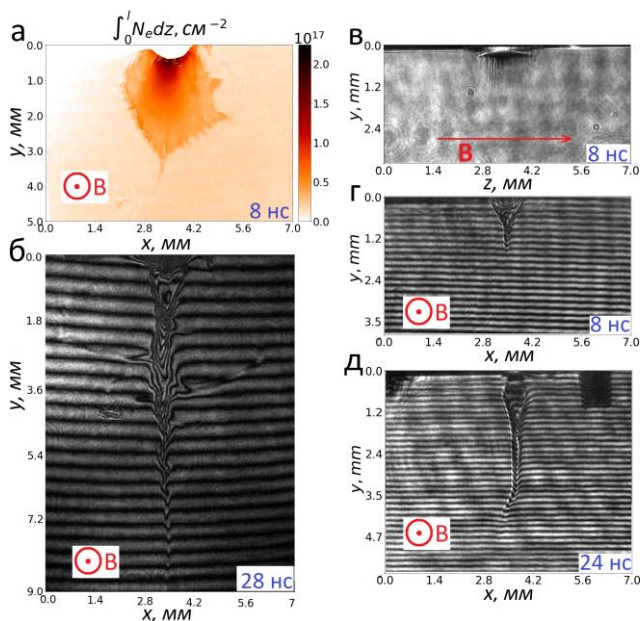


Рис. 10. Линейная концентрация плазмы через 8 нс после облучения наносекундным импульсом (а). Интерферограмма, полученная через 28 нс после облучения наносекундным импульсом (б). Теневая фотография (в) и интерферограмма плазмы (г) через 8 нс после облучения фемтосекундным импульсом, полученные в проекциях поперек и вдоль магнитного поля соответственно. Интерферограмма плазмы через 24 нс после облучения фемтосекундным импульсом (д)

Параграф 3.2 представляет детальное исследование крупномасштабной динамики плазменных потоков, путем сравнения характеристик плазмы, генерируемой фемтосекундными и наносекундными лазерными импульсами при сопоставимых флюенсах. В **пункте 3.2.1** рассматриваются особенности структуры и динамики вакуумного разлета фемтосекундно-индуцированной плазмы в сравнении с наносекундно-индуцированной плазмой (рис. 9). Экспериментальные данные демонстрируют существенное различие в геометрии разлета в вакуум без магнитного поля: поток фемтосекундной плазмы имеет коллимированную структуру в отличие от «наносекундной» плазмы, расширяющейся с типичным углом разлета $\sim 40^\circ$. Этот эффект объясняется генерацией в фемтосекундном случае сильных (сотни Тл) фонтанных тороидальных магнитных полей, генерируемых популяцией ускоренных электронов, что характерно только для взаимодействия сверхмощного фемтосекундного и субпикосекундного излучения с мишенью. Приведенное в **пункте 3.1.2** PIC моделирование эксперимента на пикосекундных временах подтверждает генерацию фонтанных магнитных полей ~ 500 Тл, способных ограничивать радиальное расширение плазмы.

Пункт 3.2.2 посвящен исследованию разлета «фемтосекундных» плазменных потоков во внешнее поперечное магнитное поле с индукцией порядка 14 Тл (рис. 10). Принципиальное отличие от наносекундного случая проявляется уже на начальных стадиях разлета: вместо формирования квазисферической каверны с развитыми желобковыми неустойчивостями в наносекундном случае, «фемтосекундная» плазма сразу структурируется в узкий коллимированный плазменный лист, который распространяется поперек магнитного поля с практически постоянной скоростью до $t < 40$ нс. Такое различие в поведении объясняется изначально более высокой степенью коллимации «фемтосекундного» потока. На временах свыше 40 нс наблюдается дополнительное различие в динамике: «фемтосекундные» плазменные листы демонстрируют систематический поворот в направлении вращения иона в магнитном поле, тогда как «наносекундные» листы проявляют хаотическую динамику вращения. Это наблюдение интерпретируется как следствие эффектов, выходящих за рамки идеальной МГД, в частности, значительного вклада холловских токов на фронте распространения «фемтосекундной» плазмы. Однако, как подчеркивается, проявление крупномасштабных эффектов кинетического типа в «фемтосекундной» плазме, в частности холловских эффектов, связано не с фракцией горячих ускоренных электронов, сгенерированных при облучении интенсивным фемтосекундным импульсом и релаксирующих на пикосекундных временах, а с характерными для таких эффектов значениями параметров плотности, температуры и скорости «фемтосекундной» плазмы.

В **пункте 3.2.3** представлено первое экспериментальное исследование, сравнивающее динамику вытянутых плазменных потоков (размер источника 1×10 мм) наносекундного и фемтосекундного происхождения в поперечном квазиоднородном магнитном поле (рис. 11). В ходе экспериментов обнаружено, что оба типа плазмы демонстрируют расслоение на отдельные субпотоки или «языки» вследствие развития неустойчивости Рэлея – Тейлора. Так же, как и с единственным плазменным листом, обнаружено различное поведение «наносекундных» и «фемтосекундных» плазменных языков, взаимодействующих с поперечным магнитным полем. «Фемтосекундные» плазменные языки приобретают систематическое вращение, согласованное с направлением движения ионов в магнитном поле, что в результате приводит к формированию на фронте плазменного потока характерных вихревых структур. В случае «наносекундной» плазмы систематического вращения не наблюдается, наоборот, перенаправление языков от прямолинейного распространения имеет случайный характер. Сравнение с результатами предыдущих кинетических и гибридных расчетов позволяет предположить, что наблюдаемое в случае «фемтосекундных» языков закручивание обусловлено действием холловских электрических полей, которые иницируют развитие неустойчивости Кельвина – Гельмгольца на границе плазменных образований. Результаты, изложенные в **параграфе 3.2**, опубликованы в статьях [A3, A9].

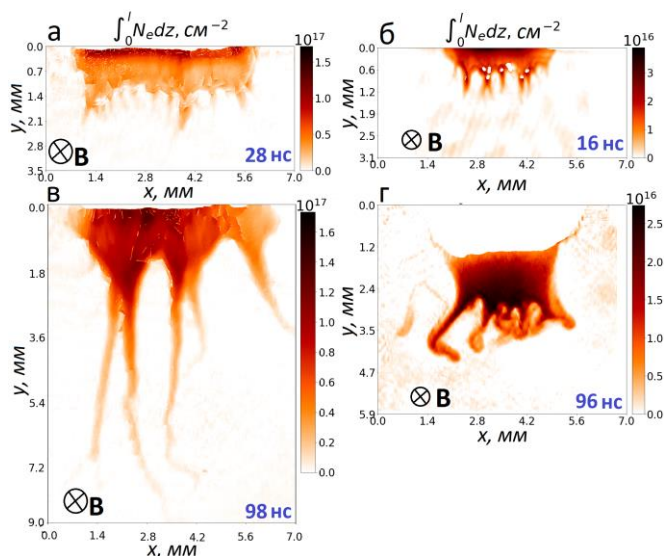


Рис. 11. Картины линейной концентрации плазмы через 28 и 98 нс после облучения наносекундными импульсами – *а* и *в*: картины линейной концентрации плазмы через 16 и 96 нс после облучения фемтосекундными импульсами – *б* и *г*. Все рисунки даны в одном масштабе. На рисунке наблюдается расслоение плазменных потоков на структуры типа «язычков»

Параграф 3.3 посвящен исследованию взаимодействия встречных плазменных потоков, генерируемых сверхмощными лазерными импульсами, с использованием оригинальной экспериментальной схемы, позволяющей создавать контрнаправленные потоки единственным лазерным импульсом. В ходе экспериментов при встречном взаимодействии потоков зафиксировано увеличение поперечных размеров плазмы и образование симметричных уплотнений, что также сопровождается существенным торможением и перенаправлением плазменных потоков. Проведенное моделирование гибридным кодом позволило установить, что наблюдаемая стагнация и перенаправление потоков обусловлены динамикой самогенерированного тороидального магнитного поля: в области взаимодействия встречные потоки адвектируют и усиливают тороидальное самогенерированное магнитное поле, которое и определяет последующую эволюцию системы, то есть образование уплотнений и перенаправление плазменных потоков. Эти результаты демонстрируют ключевую роль самогенерированных магнитных полей в динамике взаимодействующих плазменных потоков и представляют важный шаг в понимании сложных процессов перераспределения энергии в лазерной плазме.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертации

1. В плазменном потоке, созданном абляцией твердотельной мишени наносекундным лазерным импульсом и расширяющемся в вакуум во внешнее поперечное магнитное поле с индукцией 14 Тл, на границе диамагнитной каверны наблюдается развитие магнитной неустойчивости Рэлея – Тейлора с длинами желобков, достигающими диаметра каверны.

2. В случае облучения твердотельной мишени наносекундным лазерным импульсом экспериментально обнаружено сжатие диамагнитной каверны в структуру типа тонкого плазменного листа, распространяющегося поперек внешнего магнитного поля с постоянной скоростью. С помощью численного моделирования радиационным трехмерным МГД кодом продемонстрировано, что сходящаяся двумерная магнитоплазменная структура в вершине каверны приводит к локальному увеличению динамического давления и проникновению плазмы в область магнитного поля.

3. При облучении наносекундным лазерным импульсом твердотельной мишени и последующей инжекции потока плазмы вдоль внешнего магнитного поля, направленного ортогонально плоскости мишени, на границе образованной диамагнитной каверны впервые экспериментально наблюдалось образование желобков неустойчивости Рэлея – Тейлора.

4. Выполнено лабораторное моделирование коллимации астрофизических джетов полоидальным неоднородным магнитным полем со структурой типа «песочных часов», существование которой ожидается в окрестности молодых звездных объектов. Продemonстрировано, что для формирования коллимированного джета потоку плазмы достаточно провзаимодействовать с квазиоднородным магнитным полем на пространственном масштабе порядка радиуса остановки R_b .

5. В плазменном потоке, сгенерированном при облучении твердотельной мишени фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью $I \sim 2 \times 10^{18}$ Вт/см², обнаружены ортогональные к мишени долгоживущие (до 25 нс) филаменты плотности плазмы и мелкомасштабная структура магнитного поля, связанные с развитием неустойчивости вейбелевского типа. Экспериментально продемонстрировано, что наложение внешнего поперечного магнитного поля 18 Тл не приводит к полному подавлению вейбелевской неустойчивости в плазменном потоке. Филаментация не наблюдается только в области тонкого сжатого внешним магнитным полем плазменного листа.

6. Экспериментально обнаружено, что фемтосекундно-индуцированные плазменные потоки при разлете в вакуум являются существенно коллимированными, в отличие от расходящихся наносекундно-индуцированных потоков, имеющих угол разлета более 40°. На основе результатов численного моделирования PIC кодом предложен механизм коллимации фемтосекундно-индуцированных потоков «фонтанным» тороидальным магнитным полем, генерируемым горячими электронами.

7. При взаимодействии с поперечным магнитным полем с индукцией 14 Тл, фемтосекундно-индуцированный плазменный поток, в отличие от наносекундного потока, не образует квазисферическую диамагнитную плазменную каверну с желобками неустойчивости на границе, а сразу перенаправляется в узконаправленный плазменный лист. Обнаружен различный характер перенаправления «языков» наносекундно-индуцированной и фемтосекундно-индуцированной плазмы во внешнем магнитном поле: фемтосекундно-индуцированные «языки» систематически поворачиваются в сторону вращения ионов в магнитном поле, в то время как наносекундно-индуцированные «языки» меняют свое направление случайным образом, не зависящим от направления магнитного поля.

Список публикаций автора по теме диссертации

A1. Соловьёв А.А., Бурдонов К.Ф., Котов А.В., Перевалов С.Е., Земсков Р.С., Гинзбург В.Н., Кочетков А.А., Кузьмин А.А., Шайкин А.А., Шайкин И.А., Хазанов Е.А., Яковлев И.В., Лучинин А.Г., Морозкин М.В., Проявин М.Д., Глявин М.Ю., Фукс Ж., Стародубцев М.В. Экспериментальное исследование взаимодействия потока лазерной плазмы с поперечным магнитным полем // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 11. С. 973-984.

A2. Burdonov K., Bonito R., Giannini T., Aidakina N., Argiroffi C., Beard J., Chen S. N., Ciardi A., Ginzburg V., Gubskiy K., Gundorin V., Gushchin M., Kochetkov A., Korobkov S., Kuzmin A., Kuznetsov A., Pikuz S., Revet G., Ryazantsev S., Shaykin A., Shaykin I., Soloviev A., Starodubtsev M., Strikovskiy A., Yao W., Yakovlev I., Zemskov R., Zudin I., Khazanov E., Orlando S. and Fuchs J. Inferring possible magnetic field strength of accreting inflows in EXor-type objects from scaled laboratory experiments // Astronomy & Astrophysics. 2021. V. 648. P. A81.

A3. Burdonov K., Yao W., Sladkov A., Bonito R., Chen S.N., Ciardi A., Korzhimanov A., Soloviev A., Starodubtsev M., Zemskov R., Orlando S., Romanova M., Fuchs J. Laboratory modelling of equatorial ‘tongue’ accretion channels in young stellar objects caused by the Rayleigh-Taylor instability // Astronomy & Astrophysics. 2022. V. 657. P. A112.

A4. Fazzini A., Yao W., Burdonov K., Beard J., Chen S.N., Ciardi A., d’Humieres E., Diab R., Filippov E.D., Kisyov S., Lelasseux V., Miceli M., Moreno Q., Orlando S., Pikuz S., Ribeyre X., Starodubtsev M., Zemskov R., Fuchs J. Particle energization in colliding subcritical collisionless shocks investigated in the laboratory // Astronomy & Astrophysics. 2022. V. 665. P. A87.

A5. Коробков С.В., Николенко А.С., Гуцин М.Е., Стриковский А.В., Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Шайхисламов И.Ф., Руменских М.С., Земсков Р.С., Стародубцев М.В. Особенности динамики и неустойчивости плазменных струй, расширяющихся во внешнее магнитное поле, в лабораторных экспериментах с компактными коаксиальными генераторами плазмы на крупно-

масштабном стенде “Крот” // *Астрономический журнал*. 2023. Т. 67, № 1. С. 93-103.

A6. Zemskov R., Burdonov K., Soloviev A., Sladkov A., Korzhimanov A., Fuchs J., Bisikalo D., Zhilkin A., Barkov M., Ciardi A., Yao W., Glyavin M., Morozkin M., Proyavin M., Luchinin A., Chuvakin P., Ginzburg V., Kochetkov A., Kuzmin A., Shaykin A., Shaikin I., Perevalov S., Kotov A., Pikuz S., Ryazantsev S., Khazanov E., Starodubtsev M. Laboratory modeling of YSO jets collimation by a large-scale divergent interstellar magnetic field // *Astronomy & Astrophysics*. 2024. V. 681. P. A37.

A7. Соловьев А.А., Бурдонов К.Ф., Гинзбург В.Н., Глявин М.Ю., Земсков Р.С., Котов А.В., Кочетков А.А., Кузьмин А.А., Мурзанев А.А., Мухин И.Б., Перевалов С.Е., Пикуз С.А., Стародубцев М.В., Степанов А.Н., Фукс Ж., Шайкин И.А., Шайкин А.А., Яковлев И.В., Хазанов Е.А. Исследования в области физики плазмы и ускорения частиц на петаваттном лазере PEARL // *Успехи физических наук*. 2024. Т. 194, №. 3. С. 313-335.

A8. Земсков Р.С., Бурдонов, К., Кузьмин, А., Шайкин, И., Гинзбург, В., Яковлев, И., Кочетков А.А., Перевалов С.Е., Котов А.В., Соловьев А.А., Шайкин А.А., Стародубцев М.В. Хазанов Е.А. Лабораторное исследование неустойчивости Рэлея – Тейлора в лазерной плазме, взаимодействующей с внешним магнитным полем 14 Тл // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2024. Т. 67, № 11-12. С. 1029–1037.

A9. Zemskov R., Barkov M., Blinov E., Burdonov K., Ginzburg V., Kochetkov A., Kotov A., Kuzmin A., Perevalov S., Shaikin I., Stukachev S., Yakovlev I., Soloviev A., Shaykin A., Khazanov E., Fuchs J. and Starodubtsev M. Non-Ideal Hall MHD Rayleigh-Taylor Instability in Plasma Induced by Nanosecond and Intense Femtosecond Laser Pulses // *Plasma*. 2025. V. 8, № 2. P. 23.

A10. Земсков Р. С. Оптические методы диагностики плазмы в лабораторной астрофизике // *Нелинейные волны-2020*. 2020. С. 115.

A11. Земсков Р. С., Бурдонов К. Ф., Соловьев А. А., Перевалов С. Е., Котов А. В., Стародубцев М.В. Лабораторное моделирование коллимации протозвездных джетов крупномасштабным межзвездным магнитным полем // *Нелинейные волны-2022*. 2022. С. 105-106.

A12. Земсков Р. С., Соловьев А. А., Бурдонов К. Ф., Стародубцев М. В. Лабораторное исследование коллимации протозвездных джетов сильно неоднородным полюидальным магнитным полем // XXVII Нижегородская сессия молодых ученых: технические, естественные, математические науки. 2022. С. 336-341.

A13. Zemskov R. S., Kotov A. V., Perevalov S. E., Murzanov A. A., Stepanov, A. N., Soloviev A. A., Starodubtsev, M. V. Experimental observation of Weibel instability in the astrophysical and Fast Ignition relevant plasmas induced by ultrashort 250 TW laser pulse // 2024 International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE, 2024. P. 218.

Литература

1. *Drake R. P.* Introduction to high-energy-density physics // High-Energy-Density Physics: Fundamentals, Inertial Fusion, and Experimental Astrophysics. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. 2006. P. 1-17.
2. *Remington B. A., Arnett D., Drake, R. P., Takabe, H.* Modeling astrophysical phenomena in the laboratory with intense lasers // Science. 1999. V. 284, № 5419. P. 1488-1493.
3. *Remington B. A., Drake R. P., Takabe H., Arnett D.* A review of astrophysics experiments on intense lasers // Physics of Plasmas. 2000. V. 7, № 5. P. 1641-1652.
4. *Takabe H., Kuramitsu Y.* Recent progress of laboratory astrophysics with intense lasers // High Power Laser Science and Engineering. 2021. V. 9. P. e49.
5. *Kulkarni A. K., Romanova M. M.* Accretion to magnetized stars through the Rayleigh–Taylor instability: global 3D simulations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2008. V. 386, №. 2. P. 673-687.
6. *Uchiyama Y., Aharonian F. A., Tanaka T., Takahashi T., Maeda Y.* Extremely fast acceleration of cosmic rays in a supernova remnant // Nature. 2007. V. 449. № 7162. P. 576-578.
7. *Kasper J.C., Lazarus A.J., Gary S.P.* Hot solar-wind helium: Direct evidence for local heating by Alfvén-cyclotron dissipation // Physical review letters. 2008. V. 101, № 26. P. 261103.
8. *Weibel E.* Die Blutgefäßanastomosen in der menschlichen Lunge // Zeitschrift für Zellforschung und Mikroskopische Anatomie. 1959. V. 50, № 5. P. 653-692.
9. *Sironi L., Spitkovsky A.* Particle acceleration in relativistic magnetized collisionless electron-ion shocks // The Astrophysical Journal. 2010. V. 726, № 2. P. 75.
10. *Fleishman G. D.* Diffusive synchrotron radiation from relativistic shocks in gamma-ray burst sources // The Astrophysical Journal. 2006. V. 638, № 1. P. 348.
11. *Basov N. G., Krokhin O. N.* Conditions for heating up of a plasma by the radiation from an optical generator // Sov. Phys. JETP. 1964. V. 19, № 1. P. 123-126.
12. *Ryzhkov S. V.* Magneto-inertial fusion and powerful plasma installations (a review) // Applied Sciences. 2023. V. 13, № 11. P. 6658.
13. *Chang P. Y., Fiksel G., Hohenberger M., et al.* Fusion yield enhancement in magnetized laser-driven implosions // Physical review letters. 2011. V. 107, № 3. P. 035006.
14. *Chirkov A. Y., Ryzhkov S. V.* The plasma jet/laser driven compression of compact plasmoids to fusion conditions // Journal of Fusion Energy. 2012. V. 31, № 1. P. 7-12.
15. *Strickland D., Mourou G.* Compression of amplified chirped optical pulses // Optics communications. 1985. V. 55, № 6. P. 447-449.

16. Roth M., Cowan T. E., Key M. H. et al. Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams // Physical review letters. 2001. V. 86, № 3. P. 436.
17. Albert F., Thomas A. G. R. Applications of laser wakefield accelerator-based light sources // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2016. V. 58, № 10. P. 103001.
18. Chen H., Fiuza F. Perspectives on relativistic electron-positron pair plasma experiments of astrophysical relevance using high-power lasers // Physics of Plasmas. 2023. V. 30. № 2.
19. Singh J. P., Thakur S. N. Laser-induced breakdown spectroscopy. Elsevier, 2020.
20. Ryutov D., Drake R. P., Kane J. et al. Similarity criteria for the laboratory simulation of supernova hydrodynamics // The Astrophysical Journal. 1999. V. 518, № 2. P. 821.
21. Ryutov, D. D., Remington, B. A., Robey, H. F. et al. Magnetohydrodynamic scaling: From astrophysics to the laboratory // Physics of Plasmas. 2001. V. 8, № 5. P. 1804-1816.
22. Amoroso S., Bruzzese R., Spinelli N., Velotta R. Characterization of laser-ablation plasmas // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 1999. V. 32, № 14. P. R131.
23. Sarri, G., Macchi, A., Cecchetti, C. A. et al. Dynamics of Self-Generated, Large Amplitude Magnetic Fields Following “format” High-Intensity Laser Matter Interaction // Physical review letters. 2012. V. 109, № 20. P. 205002.
24. Khair B., Revet G., Ciardi A. et al. Laser-produced magnetic-Rayleigh-Taylor unstable plasma slabs in a 20 T magnetic field // Physical review letters. 2019. V. 123, № 20. P. 205001.
25. Ryutov D. D. Scaling laws for dynamical plasma phenomena // Physics of Plasmas. 2018. V. 25, № 10.
26. Хазанов Е. А., Миронов С. Ю., Муру Ж. Нелинейное сжатие сверхмощных лазерных импульсов: компрессия после компрессора // Успехи физических наук. 2019. Т. 189, № 11. С. 1173-1200.

Для заметок

ЗЕМСКОВ Роман Сергеевич

**МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ
ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С СИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Автореферат

Подписано к печати 29.09.2025 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 32 (2025).

Отпечатано на ризографе в типографии Института прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46