

УТВЕРЖДАЮ

Директор Физического института

им. П.Н. Лебедева РАН

академик РАН

Н.Н. Колачевский

«18» ноября 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института

им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) на

диссертационную работу Земскова Романа Сергеевича

“Магнитогидродинамические и кинетические процессы при взаимодействии

высокоскоростных потоков лазерной плазмы с сильным магнитным полем”,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по

специальности 1.3.9 - физика плазмы

Диссертационная работа Романа Сергеевича Земскова “Магнитогидродинамические и кинетические процессы при взаимодействии высокоскоростных потоков лазерной плазмы с сильным магнитным полем” представляет собой завершённое экспериментально-теоретическое исследование взаимодействия лазерно-индуцированных плазменных потоков с сильными внешними магнитными полями (до 18 Тл). Работа выполнена на стыке физики плазмы, высокоэнергетических плотностей и лабораторной астрофизики. Автор использует комплексный подход, сочетая эксперименты на петаваттном лазере PEARL с численным моделированием, таким как кинетический метод частиц-в-ячейке (PIC), гибридные и МГД-коды. При этом применение методов масштабирования позволило интерпретировать результаты в астрофизическом контексте.

Диссертация состоит из Введения, трёх Глав, Заключение и списка цитируемой литературы.

Во Введении обоснована актуальность темы, чётко сформулированы цели, задачи, новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также вклад автора.

Первая Глава носит обзорный характер и раскрывает связь работы с современными исследованиями в области лабораторной астрофизики. Рассмотрены проблемы наблюдательной астрофизики, подходы к масштабированию и обзор экспериментов на других установках. Подробно описаны возможности комплекса PEARL и импульсной

магнитной системы (до 18 Тл), методология экспериментов и подходы для диагностики плазмы. Глава демонстрирует высокий уровень экспериментальных подходов и методической проработки исследования.

Во Второй главе представлены результаты экспериментов с плазменными потоками, создаваемыми наносекундными лазерными импульсами. В параграфе 2.1 определены основные параметры плазмы, демонстрируется расходящаяся структура потока плазмы при расширении в вакуум. Далее, в параграфе 2.2 исследуется поведение плазменных потоков во внешнем магнитном поле индукции 14 Тл. В этом случае описано формирование диамагнитной каверны, развитие неустойчивостей и образование плазменной структуры, имеющей вид плоского «листа». Численное же моделирование с помощью трёхмерного МГД-кода FLASH позволило понять природу возникновения наблюдаемых плазменных структур. Наконец, в разделе 2.3 рассмотрены процессы коллимации потоков в полоидальном магнитном поле, аналогичные формированию астрофизических джетов. Экспериментально показано образование «магнитного сопла» и узконаправленного плазменного джета. Впервые выполнено моделирование коллимации джетов в магнитном поле типа песочных часов, наблюдаемого в окрестности молодых звезд. Результаты сопоставлены с астрофизическими масштабами и наблюдениями.

Третья Глава посвящена исследованию плазмы, создаваемой при облучении твёрдотельных мишеней фемтосекундными импульсами релятивистской интенсивности ($\tau \approx 60$ фс, $I \sim 2 \times 10^{18}$ Вт/см²). В параграфе 3.1 описано распространение такой плазмы в вакууме. Впервые зафиксировано длительное (до 25 нс) существование ортогональных филаментов плотности и связанной с ними магнитостатической структуры, обусловленной вейбелевской неустойчивостью. Проведённое PIC-моделирование показало генерацию филаментированных и крупномасштабных магнитных структур с амплитудой поля до ~500 Тл на пикосекундных временах. Автор установил, что анизотропия распределения ускоренных электронов быстро (за время меньше 10 пс) релаксирует и не объясняет длительное существование филаментации, предложив альтернативные гипотезы её поддержания.

В параграфе 3.2 сопоставлены динамика и структура плазмы, создаваемой фемто- и наносекундными импульсами при одинаковых флюенсах. Выявлено, что фемтосекундно-индуцированная плазма обладает высокой коллимацией, тогда как плазма, созданная за времена порядка наносекунд, расширяется под углом ~40°. Сравнение взаимодействия обоих типов потоков с поперечным магнитным полем (~14 Тл) показало принципиальные различия: в наносекундном случае плазма формирует диамагнитную каверну и неустойчивости Рэлея–Тейлора, а в фемтосекундном — узконаправленный плазменный

лист без каверны, демонстрирующий регулярное искривление в сторону циклотронного вращения ионов. Различия объясняются влиянием холловских эффектов и переходом от классической неустойчивости Рэля–Тейлора к её холловской модификации вследствие различий в параметрах плазмы.

Параграф 3.3 описывает оригинальную схему создания встречных плазменных потоков одним лазерным импульсом. Наблюдаются формирование симметричных магнитостатических уплотнений, торможение и радиальное перенаправление потоков. Сравнение с численным моделированием, выполненным гибридным кодом, показало, что эти эффекты связаны с усилением самогенерированного тороидального магнитного поля.

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

Тематика диссертации безусловно актуальна и соответствует современным направлениям мировой науки. Аналогичные эксперименты проводятся на крупнейших лазерных установках ведущих международных институтах. Представленные исследования важны для интерпретации астрофизических процессов, недоступных прямым наблюдениям, и способствуют проверке теоретических моделей. Полученные результаты углубляют понимание лазерно-плазменных взаимодействий и имеют прикладное значение.

О высокой степени обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, свидетельствуют публикация материала диссертации в высокорейтинговых изданиях, шесть из которых относятся к категориям Q1–Q2 в базах WoS/Scopus. Дополнительно достоверность выводов подтверждается высоким качеством проведённых экспериментов и моделирования, а также их согласованностью с результатами, полученными на других установках.

Научная новизна результатов, положений, выводов и рекомендаций не вызывает сомнений. Исследование отличается значительной научной новизной. Впервые наблюдаются жёлобковые неустойчивости при инжекции наносекундно-индуцированной плазмы вдоль сильного магнитного поля и выполнено моделирование коллимации потоков в неоднородном поле «песочных часов». Особо выделяются результаты с фемтосекундными импульсами релятивистской интенсивности — впервые зафиксирована долгоживущая вейбелевская неустойчивость и проведено сравнительное исследование динамики фемто- и наносекундных потоков во внешнем магнитном поле. Новаторским также является эксперимент со встречными фемтосекундными потоками, выявивший ранее не наблюдавшиеся эффекты.

Вклад автора является определяющим. Роман Земсков внес существенный вклад на всех этапах работы: при постановке и проведении экспериментов, обработке данных, численном моделировании и подготовке публикаций.

Диссертация представляет собой завершённое научное исследование, включающее новые результаты теоретического и прикладного значения. Комплексный подход, сочетающий эксперименты на петаваттном комплексе PEARL с современным моделированием, обеспечивает глубокую и достоверную интерпретацию полученных данных.

Автореферат полностью отражает содержание и основные результаты диссертации. Работа отличается высоким уровнем изложения: материал представлен чётко и логично, оформление выполнено аккуратно, а обширный иллюстративный материал способствует наглядности представленных данных.

Полученные результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. Данные экспериментов по взаимодействию лазерно-индуцированной плазмы с магнитными полями могут быть использованы для верификации численных моделей и аналитических подходов в астрофизике и физике термоядерной плазмы. Исследования неустойчивостей Рэлея–Тейлора и Вейбеля в плазменных потоках представляют интерес для научных групп, занимающихся разработками в области управляемого термоядерного синтеза (например, в НИЦ «Курчатовский институт»).

В целом, диссертация Р.Земскова представляет собой фундаментальное исследование процессов, происходящих в сильно замагниченной лабораторной плазме. Особенно следует подчеркнуть то, что в работе проведено как собственно лабораторное, так и численное моделирование таких важных, но до конца еще не исследованных процессов, как вейбелевская неустойчивость и кинетические эффекты. Впервые экспериментально установлено существенное влияние холловских эффектов на динамику фемтосекундных плазменных процессов.

Что же касается замечаний, то они сводятся к следующему.

1. Глава 1 является фактически продолжением Введения, в ней не содержатся никакие результаты, выносимые на защиту. Лучше было бы расширить Введение, а результаты расположить в большее число Глав.

2. При обсуждении результатов численного моделирования практически ничего не говорится об адаптации используемых пакетов к рассматриваемым задачам. Поэтому сложно судить о том, насколько полно удалось описать обсуждаемые в диссертационной работе процессы. Кроме того, очевидно, что двумерный декартовый PIC-код не соответствует реальной изначально осесимметричной задаче.

3. Подробное обсуждение методов масштабирования лабораторных и астрофизических систем есть скорее дань традиции, а не необходимая составная часть

диссертации (тем более что астрофизические приложения упомянуты лишь вскользь). С другой стороны, для полноты картины следовало бы упомянуть и число Лундквиста.

4. Неудачным, на мой взгляд, является название подпункта 2.2.1.1 'Линейный анализ наблюдаемых неустойчивостей', поскольку в нем не обсуждаются линеаризованные уравнения, а лишь сделаны оценки инкрементов неустойчивости, полученных в других работах.

5. Автору не удалось избежать и ряда опечаток. Так на стр. 44 читаем 'табуированные' вместо 'табулированные', на стр. 49 - 'волновое вектор неустойчивости' вместо 'волновой вектор ...', на стр. 96 размерность дана на английском (m/s). Прямой знак деления в тексте вместо знака '/' подчас затрудняет чтение.

Несмотря на сделанные замечания, высокий научный уровень и значимость результатов, полученных в диссертации Р.С.Земскова «Магнитогидродинамические и кинетические процессы при взаимодействии высокоскоростных потоков лазерной плазмы с сильным магнитным полем», не вызывает сомнения. Диссертация является завершенной работой, имеющей важное значение для физики плазмы, обладает значительной актуальностью, новизной, достоверностью, практической значимостью и соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (действует с 01.01.2014 г.), которые предъявляются к кандидатским диссертациям, а ее автор Земсков Роман Сергеевич, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Диссертация и отзыв о ней обсуждены и одобрены на семинаре Отделения теоретической физики ФИАН им. П.Н. Лебедева.

Председатель семинара
главный научный сотрудник,
доктор физико-математических наук,
профессор


18.10.2025
Бескин Василий Семенович

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

Помощник
директора


Савинов С.Ю.