



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПФ РАН,
академик РАН Г.Г. Денисов
«10» июля 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

по диссертации Земскова Романа Сергеевича «Магнитогидродинамические и кинетические процессы при взаимодействии высокоскоростных потоков лазерной плазмы с сильным магнитным полем» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.9. физика плазмы.

Работа выполнена в отделе нелинейной и лазерной оптики (отд. 370) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель – Стародубцев Михаил Викторович, заместитель директора ИПФ РАН по научной работе, доктор физико-математических наук.

В 2021 г. соискатель учёной степени окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" по направлению подготовки 03.04.02. Физика.

Сроки обучения в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»: с 1 сентября 2021 года по 31 августа 2025 года.

Свидетельство об окончании аспирантуры № 105200 00000031 от 10 июля 2025 года.

В период подготовки диссертации соискатель Земсков Роман Сергеевич работал младшим научным сотрудником в отделе нелинейной и лазерной оптики (отд. 370) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Личное участие аспиранта в получении результатов, изложенных в диссертации

Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично аспирантом, либо при его непосредственном участии. Экспериментальные результаты получены в коллективе соавторов на большой и технологически сложной петаваттной лазерной установке PEARL. В частности, аспирант являлся одним из основных исполнителей экспериментов с

плазменными потоками, индуцированными сверхмощными лазерными импульсами. 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. Аспирантом выполнены все присутствующие в работе численные расчёты и реализованы алгоритмы обработки экспериментальных данных. Численные расчёты выполнялись с использованием программ с открытым исходным кодом.

Научная новизна и основные результаты диссертационного исследования

1. В плазменном потоке, созданном наносекундным лазерным импульсом и расширяющемся во внешнее поперечное магнитное поле 14 Тл, на границе диамагнитной каверны наблюдалось возникновение магнитной неустойчивости Релея-Тейлора с размерами желобков, достигающими размер каверны.

2. Экспериментально обнаружено сжатие диамагнитной каверны в структуру в виде тонкого плазменного листа, распространяющегося поперек внешнего магнитного поля с постоянной скоростью. С помощью численного моделирования радиационным 3Д МГД кодом продемонстрировано, что сходящаяся двумерная магнитно-плазменная структура в вершине каверны приводит к локальному увеличению динамического давления и проникновению плазмы в область магнитного поля.

3. При инъекции потока наносекундной плазмы вдоль внешнего магнитного поля на границе образованной 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, предполагаемой в окрестности молодых звездных объектов. Впервые продемонстрировано, 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 магнитного поля, связанные с развитием неустойчивости вейбелевского типа. Экспериментально продемонстрировано, что наложение внешнего поперечного магнитного поля 18 Тл не приводит к подавлению вейбелевской неустойчивости в плазменном потоке. Филаментация не наблюдается только в области тонкого сжатого внешним магнитным полем плазменного листа.

6. Впервые экспериментально обнаружено, что фемтосекундно-индуцированные плазменные потоки при разлете в вакуум являются сразу существенно коллимированными, в отличие от расходящихся наносекундно-индуцированных потоков, имеющих угол разлета более 40°. На основе результатов численного моделирования PIC кодом предложен

механизм коллимации фемтосекундных потоков фонтанными тороидальными магнитными полями индуцированными горячими электронами.

7. При взаимодействии с поперечным магнитным полем 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. Впервые обнаружен различный характер перенаправления языков наносекундной и фемтосекундной плазмы во внешнем магнитном поле: фемтосекундные языки систематически поворачиваются в сторону вращения ионов в магнитном поле, в то время как наносекундные языки меняют свое направление случайным образом, не зависящим от направления магнитного поля.

8. Предложена и реализована оригинальная схема, позволяющая с помощью одного субпетаваттного лазерного импульса генерировать встречные плазменные потоки фемтосекундной плазмы. При взаимодействии встречных фемтосекундно-индуцированных плазменных потоков обнаружена стагнация и перенаправление плазмы от направления начального движения. Основываясь на численном моделировании гибридным кодом продемонстрировано, что перенаправление плазмы происходит в результате адвекции и сжатия самогенерированного тороидального магнитного поля в средней плоскости взаимодействия.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Все представленные результаты диссертационного исследования являются достоверными и обоснованными. В ходе работы использовались проверенные диагностические подходы для исследования потоков лазерной плазмы, что обеспечивает высокую надежность полученных экспериментальных данных. Численные расчеты выполнены с помощью надежных и широко применяемых открытых численных кодов, специально предназначенных для моделирования подобных задач, что дополнительно подтверждает их точность и воспроизводимость. Согласование результатов численных моделей с экспериментальными данными свидетельствует о высокой достоверности полученных положений и выводов. Основные положения и результаты диссертационной работы были опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, что подтверждает их научную ценность и соответствие высоким стандартам оценки. Кроме того, результаты проходили экспертную оценку независимых международных специалистов. Доклады по теме исследования делались на всероссийских и международных симпозиумах, конференциях, научных школах, а также обсуждались на научных семинарах, что дополнительно свидетельствует о признании их научной значимости и надежности.

Практическая и теоретическая значимость результатов исследования

Результаты лабораторных исследований с лазерной плазмой, взаимодействующей с внешними магнитными полями, могут быть использованы для верификации и проверки численных кодов и аналитических моделей, применяемых для описания явлений в областях астрофизики, физики термоядерной плазмы и физики высоких плотностей энергии.

Созданный на базе петаваттного лазерного комплекса PEARL уникальный, не имеющий аналогов в России экспериментальный стенд используется для лабораторного моделирования широкого круга задач на стыке физики плазмы, физики высоких плотностей энергии и астрофизики.

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 термоядерному синтезу.

Приведенные 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 дают важные детали для понимания механизмов взрывных процессов в корональных арках звезд, что существенно улучшает возможности прогнозирования солнечной активности.

Для термоядерного синтеза с быстрым зажиганием полученные результаты исследования вейбелевской неустойчивости приносят важные знания для понимания роли мелкомасштабных магнитных полей в плазме, индуцированной 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.

Список работ, опубликованных в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. 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 //Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – №. 11. – С. 973-984.

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

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

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

5. R.S. Zemskov, A.V. Kotov, S.E. Perevalov et al. Experimental observation of Weibel instability in the astrophysically and Fast Ignition relevant plasmas induced by ultrashort 250 TW laser pulse // 2024 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE, 2024. – P. 218-218.

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

7. Р.С. Земсков, К.Ф. Бурдонов, А.А. Кузьмин и др. Лабораторное исследование неустойчивости Рэлея-Тейлора в лазерной плазме, взаимодействующей с внешним магнитным полем 14 Тл // *Известия вузов. Радиофизика*. 2024. Т. 67, №. 11-12. С. 1029–1037.

8. R. Zemskov, M. Barkov, E. Blinov, K. Burdonov, V. Ginzburg, A. Kochetkov, A. Kotov, A. Kuzmin, S. Perevalov, I. Shaikin, S. Stukachev, I. Yakovlev, A. Soloviev, A. Shaykin, E. Khazanov, J. Fuchs and M. Starodubtsev; «Non-Ideal Hall MHD Rayleigh-Taylor Instability in Plasma Induced by Nanosecond and Intense Femtosecond Laser Pulses» // *Plasma*. – 2025. – Vol. 8. – №. 2. – P. 1-23; <https://doi.org/10.3390/plasma8020023>

Ценность научных работ диссертанта отражается высоким уровнем публикаций в рецензируемых международных журналах. Работа аспиранта была удостоена призового места на конкурсе молодых специалистов ИПФ РАН и стипендии Президента Российской Федерации. Результаты работы неоднократно обсуждались на различных конференциях и семинарах, получили высокую оценку ведущих специалистов и имеют высокую цитируемость.

Результаты, представленные в диссертационной работе, в полной мере изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Формулировки результатов изложены в соответствии с личным вкладом автора в каждую из опубликованных статей. Ссылки на источники заимствования материалов оформлены корректно.

Научная специальность, которой соответствует диссертация: 1.3.9. Физика плазмы.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике".

Диссертация «Магнитогидродинамические и кинетические процессы при взаимодействии высокоскоростных потоков лазерной плазмы с сильным магнитным полем» Земскова Роман Сергеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.9. Физика плазмы.

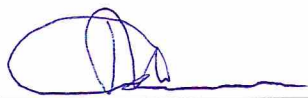
Настоящее заключение составлено на основании решения совместного заседания Ученого совета отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН по проведению итоговой аттестации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности: 1.3.9. Физика плазмы и квалификационного семинара специализированного совета ИПФ РАН по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Присутствовало на заседании 30 чел.

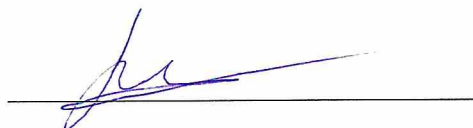
Результаты голосования: «за» — 30 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел.
протокол № 3/6 от « 17 » июня 2025 г.



Голубев Сергей Владимирович,
доктор физико-математических наук,
руководитель научного направления «Физика
плазмы», председатель квалификационного
семинара специализированного совета ИПФ РАН
по специальности «Физика плазмы»



Стародубцев Михаил Викторович,
доктор физико-математических наук,
Председатель Ученого совета отделения
нелинейной динамики и оптики



Шилягин Павел Андреевич,
кандидат физико-математических наук,
Учёный секретарь отделения нелинейной динамики
и оптики, зам. зав. отделом 340