

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

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

Р.С. Земсков начал участвовать в научной работе в ИПФ РАН в 2017 году, а с 2019 года выполнял исследования под моим руководством. Еще будучи студентом факультета ВШОПФ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, он активно включился в экспериментальные исследования процессов взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом по нескольким направлениям: лабораторная астрофизика, физика высоких плотностей энергии и лазерно-плазменное ускорение. Роман Сергеевич проявил себя как разносторонний исследователь, успешно освоивший не только экспериментальные методики, но теоретические и вычислительные инструменты для моделирования наблюдаемых явлений, что позволило ему выполнять научные исследования на мировом уровне. Как самостоятельно, так и в составе коллектива он получил ряд значимых результатов, опубликованных более чем в 14 научных статьях в ведущих рецензируемых журналах. В диссертацию включена часть этих результатов, относящихся к тематике лабораторной астрофизики.

Диссертационная работа Романа Сергеевича посвящена исследованию взаимодействия лазерно-индуцированных плазменных потоков с сильными магнитными полями – актуальному научному направлению, находящемуся на стыке физики плазмы, физики высоких плотностей энергии и лабораторной астрофизики. В ней представлены результаты комплексных экспериментальных и теоретических исследований динамики лазерной плазмы в сильных магнитных полях, имеющие существенное значение прежде всего для лабораторной астрофизики. Последняя в настоящее время является быстро развивающимся направлением, целью которого является лабораторное моделирование процессов, протекающих в астрофизических объектах, недоступных для прямого наблюдения с помощью телескопов. Например, ограничения астрономических методов не позволяют детально исследовать динамику процессов в окрестностях молодых звезд, и поэтому особую ценность приобретают масштабируемые лабораторные эксперименты. Современные лазерно-плазменные системы дают возможность воспроизводить в лаборатории широкий спектр астрофизических явлений, включая генерацию высокоскоростных потоков плазмы и их взаимодействие с магнитными полями.

Существенным достижением работы является детальное исследование динамики формирования плазменных структур во внешнем магнитном поле. Экспериментально продемонстрировано возникновение неустойчивости Рэлея–Тейлора на границе диамагнитной каверны как при поперечной, так и при продольной инжекции плазменного потока, создаваемого мощными наносекундными лазерными импульсами. Проведенные с участием автора эксперименты и выполненное им трехмерное МГД-моделирование позволили выявить механизмы формирования подобных структур, включая образование тонкого диамагнитного плазменного слоя с динамическим давлением, превышающим давление магнитного поля. Данные исследования имеют важное значение для интерпретации механизмов аккреции в молодых звездах.

Впервые проведено сравнительное исследование разлета плазменных потоков, созданных фемтосекундными и наносекундными лазерными импульсами с одинаковым флюенсом, но различающихся по интенсивности более чем на пять порядков. Установлено, что плазма, созданная фемтосекундными импульсами релятивистской интенсивности, разлетается в вакуум коллимированным образом, в отличие от расходящихся потоков плазмы, сгенерированных наносекундными лазерными импульсами. Показано, что за коллимацию фемтосекундно-индуцированной плазмы может отвечать самогенерированное тороидальное магнитное поле, создаваемое горячей электронной компонентой и отсутствующее при облучении наносекундными импульсами. Численные расчеты, выполненные Романом Сергеевичем, показали, что величина этого поля может достигать более 500 Тл, что достаточно для ограничения радиального разлета

плазмы. Исследовано взаимодействие фемтосекундно-индуцированной и наносекундно-индуцированной плазмы с внешним магнитным полем: показано, что для разреженной «фемтосекундной» плазмы значимую роль начинают играть холловские эффекты, в то время как для более плотной наносекундной плазмы они несущественны. Для описания этих эффектов введен новый безразмерный параметр.

Следует также отметить представленные в диссертационной работе результаты исследования вейбелевской неустойчивости. Экспериментально показано, что при облучении твердотельной мишени фемтосекундными импульсами с интенсивностью порядка и выше 10^{18} Вт/см² в плазменном потоке возникают филаменты плотности, строго перпендикулярные мишени и сохраняющиеся длительное время (до 25 нс), существенно превышающее времена релаксации анизотропии функции распределения горячих электронов. Экспериментально и численно подтверждено, что в этих филаментах формируется самогенерированное магнитное поле порядка 100 Тл, что подтверждает вейбелевский механизм филаментации. Впервые экспериментально исследована динамика таких филаментов в присутствии сильного внешнего магнитного поля до 18 Тл.

Значительная часть работы посвящена лабораторному моделированию астрофизических процессов, в частности, коллимации джетов в полоидальных магнитных полях. Экспериментально подтверждено, что неоднородное магнитное поле типа «песочные часы» может эффективно коллимировать плазменные потоки в узконаправленные джеты, что имеет прямое значение для понимания процессов в окрестности молодых звезд.

Актуальность выполненной работы обусловлена как фундаментальной значимостью изучаемых явлений, так и возможностью применения полученных результатов в таких практически значимых областях, как инерциальный термоядерный синтез, лабораторное моделирование астрофизических процессов и разработка новых плазменных технологий, что и определяет ее практическую значимость. Теоретическая значимость диссертации состоит в существенном расширении представлений о динамике лазерной плазмы в сильных магнитных полях и развитии неустойчивостей в таких системах, а также в возможности верификации численных моделей и кодов.

Научная новизна работы заключается в комплексном экспериментальном и теоретическом исследовании процессов, которые ранее оставались недостаточно изученными или вовсе неизученными. Результаты по взаимодействию наносекундной плазмы с магнитным полем существенно расширяют богатый задел прежних исследований, дополняя их данными для ранее недостижимых параметров. Работы по лабораторному моделированию коллимации джетов в полоидальных магнитных полях существенно развивают исследования зарубежных коллег, учитывая и определяя влияние неоднородности магнитного поля на коллимацию джетов. Особенно значимы результаты по динамике плазмы, индуцированной фемтосекундными импульсами релятивистской интенсивности, для которой подобные исследования практически отсутствовали. Экспериментально обнаруженная самоколлимация таких потоков и длительное существование филаментов на ионных временах зарегистрированы впервые. Сравнительный анализ «фемтосекундных» и «наносекундных» плазменных потоков также предложен и выполнен Романом Сергеевичем впервые.

Достоверность полученных результатов обеспечивается сочетанием современных методов диагностики с численным моделированием, независимыми методиками измерений, согласованностью данных эксперимента и моделирования, а также статистической значимостью результатов. Все ключевые выводы работы подтверждаются публикациями в высокорейтинговых журналах и докладами на ведущих международных и российских конференциях.

В процессе работы над диссертацией Роман Сергеевич проявил себя как высококвалифицированный исследователь, обладающий глубокими знаниями в области физики плазмы и лазерной физики, современными экспериментальными навыками и методами численного моделирования. Его работа отличается высокой степенью самостоятельности, тщательностью проведения экспериментов и глубиной анализа. Роман Сергеевич продемонстрировал умение уверенно работать с экспериментальным оборудованием и программными пакетами, способность

к критическому осмыслению и обобщению больших массивов данных, а также умение ясно и аргументированно излагать результаты как в публикациях, так и в научных обсуждениях.

Представленная диссертационная работа является завершенным самостоятельным исследованием, внесшим весомый вклад в развитие физики плазмы и лабораторной астрофизики. Полученные результаты по теме диссертации имеют важное теоретическое и прикладное значение, что подтверждается публикацией 9 статей по теме диссертации в престижных научных журналах и докладами на более чем 10 международных конференциях. Роман Сергеевич зарекомендовал себя как перспективный ученый, способный к самостоятельной и плодотворной научной деятельности.

Диссертация Романа Сергеевича «Магнитогидродинамические и кинетические процессы при взаимодействии высокоскоростных потоков лазерной плазмы с сильным магнитным полем» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.9 «Физика плазмы», а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Согласен на обработку моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.

Научный руководитель:

Зам. дир. по науч. раб. ИПФ РАН,
доктор физ.-мат. наук


(подпись)

М.В. Стародубцев

(расшифровка подписи)

«18» 09 2025 г.

Телефон: +7(903)043-82-75, адрес электронной почты: mstar@ipfran.ru

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

«Подпись Стародубцева Михаила
Викторовича заверяю»
Ученый секретарь ИПФ РАН



(подпись)

И.В. Корюкин

(расшифровка подписи)