

ОТЗЫВ
официального оппонента
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

Диссертация Романа Сергеевича Земскова представляет собой завершённое экспериментально-теоретическое исследование взаимодействия лазерно-индуцированных плазменных потоков с внешними сильными магнитными полями (порядка 10–18 Тл). Важно подчеркнуть комбинированный, комплексный подход автора к исследованиям. Автором выполнены лабораторные эксперименты на петаваттном лазерном комплексе PEARL, а также успешно применены различные численные подходы (PIC, гибридные и МГД-коды) для описания эксперимента. В работе применяются ранее разработанные подходы масштабирования для интерпретации экспериментальных результатов в астрофизических условиях и для астрофизических объектов.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Во введении автор чётко формулирует актуальность исследований, представленных в диссертации. Описаны цели и задачи работы, а также основные положения, выносимые на защиту, и вклад автора в получение представленных результатов. Отмечены их новизна, теоретическая и практическая значимость; изложено краткое содержание работы.

Глава 1 имеет обзорный, методологический характер. Показывается преемственность работы с современными исследованиями в области лабораторной астрофизики и место проведённых исследований в общем спектре мировых работ. В ней подробно рассмотрены: проблемы наблюдательной астрофизики и обоснование лабораторного моделирования астрофизических процессов; основные подходы к масштабированию; ретроспектива экспериментальной лабораторной астрофизики. Сформулированы возможности, которые предоставляет петаваттный лазерный комплекс PEARL, а именно применение мощного наносекундного и фемтосекундного излучения релятивистской интенсивности для создания плазмы. Также описывается уникальная импульсная магнитная система, позволяющая генерировать магнитные поля с индукцией до ~18 Тл. В данной главе изложена методология экспериментов и устройство оптических диагностик (интерферометрия, теневое фотографирование и поляриметрия), а также методики восстановления распределения концентрации плазмы и структуры магнитного

поля (МП). Эта глава показывает, что экспериментальная работа, проводимая автором, характеризуется современными подходами и развитой экспериментальной базой.

Глава 2 посвящена сериям экспериментов с плазменными потоками, созданными наносекундными лазерными импульсами. В параграфе 2.1 автор даёт количественную характеристику наносекундно-индуцированной плазмы в вакууме, а именно — характерную плотность, температуру, скорость разлёта и среднее зарядовое число ионов. Демонстрируется, что плазменный поток разлетается в вакуум с конусной геометрией разлёта с углом порядка 40° . В параграфе 2.2 проанализировано поведение такого потока во внешнем поперечном квазиоднородном магнитном поле (~ 14 Тл): выявлены стадии образования диамагнитной каверны, последующее развитие желобковых структур на её границе, линейная и нелинейная эволюция неустойчивости. Автор применяет линейную теорию и проводит трёхмерное МГД-моделирование (FLASH) в модели с тремя температурами — электронной, ионной и радиационной — и с учётом резистивности, что воспроизводит наблюдаемую динамику и демонстрирует диамагнитную природу образующихся тонких вытянутых плазменных структур, так называемых «листов». Параграф 2.3 посвящён моделированию коллимации плазменного потока в полоидальном квазиоднородном магнитном поле и имеет значение для лабораторного моделирования коллимации астрофизических джетов. Наблюдается, что при инжекции потока лазерной плазмы вдоль внешнего квазиоднородного магнитного поля образуется диамагнитная каверна с жёлобками неустойчивости. Экспериментально продемонстрированы формирование магнитного сопла, перенаправление потока и образование узконаправленной струи. Впервые выполнено моделирование коллимации джетов в полоидальном магнитном поле с неоднородной структурой типа «песочных часов», наблюдаемой в окрестности молодых звёздных объектов. Показано, что масштаб взаимодействия, сравнимый с классическим радиусом остановки R_b , определяет эффективность коллимации. Результаты сопоставлены с астрофизическими масштабами (порядок 30 а.е.) и с существующими наблюдениями.

Глава 3 сосредоточена на исследовании плазмы, индуцированной при облучении твердотельной мишени фемтосекундными импульсами релятивистской интенсивности ($\tau \approx 60$ фс, $I \sim 2 \times 10^{18}$ Вт/см²). В параграфе 3.1 описан разлёт такой плазмы в вакуум. Впервые зарегистрировано длительное (до ~ 25 нс) существование ортогонально ориентированных филаментов плотности и соответствующей магнитостатической структуры — следствие возбуждения вейбелевской неустойчивости. Проведенное автором PIC-моделирование показывает генерацию филаментированных и крупномасштабных магнитостатических структур (фонтанные магнитные поля - на пикосекундных временах МП с амплитудой ~ 500

Тл). Численное моделирование позволило автору установить, что анизотропия функции распределения горячих ускоренных лазерным импульсом электронов релаксирует на временах < 10 пс и потому не может быть ответственна за столь продолжительное (~ 25 нс) поддержание магнитостатической филаментации. Автор предлагает гипотезы альтернативных механизмов поддержания филаментационных структур, которые требуют дальнейшего развития и проверки.

В параграфе 3.2 подробно сравнивается крупномасштабная динамика плазмы, индуцированной «фемтосекундными» и «наносекундными» лазерными импульсами при одинаковых флюенсах. Фемтосекундно-индуцированная плазма имеет существенно коллимированную структуру при разлёте в вакуум, тогда как наносекундно-индуцированные потоки расходятся под углом $\approx 40^\circ$. В параграфе 3.2 автор представляет комплексное сравнительное исследование взаимодействия наносекундно- и фемтосекундно-индуцированных потоков с внешним поперечным магнитным полем индукции ≈ 14 Тл. Как показано в Главе 2, плазма, созданная наносекундными импульсами, при взаимодействии с поперечным полем образует диамагнитную каверну с жёлобками неустойчивости Рэля–Тейлора; на дальнейших этапах она сжимается в тонкий «лист», распространяющийся поперёк магнитного поля. В случае фемтосекундно-индуцированной плазмы квазисферической каверны с жёлобками не наблюдается: поток на начальных этапах эволюции перенаправляется в узконаправленный плазменный лист. Важным отличием является то, что фемтосекундно-индуцированный лист демонстрирует систематическое искривление в сторону направления циклотронного вращения ионов, тогда как наносекундные листы ведут себя хаотично. При вытянутой геометрии в направлении, перпендикулярном внешнему полю, потоки расслаиваются на несколько листов или так называемых «языков» вследствие возникновения неустойчивости; также наблюдается систематическое искривление потоков в фемтосекундном случае и случайное поведение в наносекундном случае.

Параграф 3.3 представляет оригинальную экспериментальную схему создания встречных потоков единственным импульсом. При взаимодействии потоков плазмы наблюдаются образование симметричных магнитостатических уплотнений, торможение и радиальное перенаправление потоков плазмы. Экспериментальные результаты, сопоставленные с гибридным моделированием, объясняют наблюдаемую динамику усилением самогенерированного тороидального магнитного поля.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Тема диссертации является безусловно актуальной. Подобные исследования выполняются во многих ведущих научных центрах по всему миру на мощных лазерных

установках. Представленные эксперименты важны для интерпретации астрофизических явлений, труднодоступных для прямых наблюдений. Проведенные лабораторные исследования в модельной геометрии позволяют проверять теоретические модели, углубляют понимание физики лазерно-плазменных процессов и имеют значение для прикладных задач, в том числе в области термоядерного синтеза.

Представленные исследования обладают существенной научной новизной. В опытах с плазмой, созданной наносекундными лазерными импульсами в сильном внешнем магнитном поле до 14 Тл, получены уникальные результаты, связанные с наблюдением жёлобковой неустойчивости при инжекции лазерной плазмы вдоль магнитного поля и с моделированием коллимации плазменных потоков в неоднородном поле со структурой типа «песочные часы». Результаты, полученные с применением фемтосекундных лазерных импульсов релятивистской интенсивности, имеют особую актуальность и не имеют прямых аналогов в литературе: долгоживущая вейбелевская неустойчивость в подобном эксперименте наблюдается впервые. Впервые также выполнено сравнительное исследование динамики фемтосекундно- и наносекундно-индуцированных плазменных потоков во внешнем поперечном магнитном поле. Эксперименты со встречными фемтосекундно-индуцированными потоками также проведены впервые и продемонстрировали специфические эффекты, ранее не наблюдавшиеся при наносекундных импульсах.

Личный вклад соискателя не вызывает сомнения: начиная с подготовки и выполнения экспериментов, обработки экспериментальных данных, заканчивая выполнением численных расчётов и в подготовки публикаций.

По работе имеются следующие замечания:

1. В диссертационной работе ничего не сказано о спонтанных магнитных полях, хотя они могут вносить существенный вклад.

2. Утверждается о генерации "фонтанных тороидальных магнитных полей", но не объясняется почему именно они тороидальные (а не азимутальные, например)?

3. Несколько раз упоминается "полоидальное неоднородное магнитное поле со структурой типа «песочных часов»" - видимо имеется ввиду открытая магнитная конфигурация (касп, пробкотрон или компактный тор)?

4. Фраза "Обнаружен различный характер перенаправления «языков»..." в Заключение также нуждается в пояснении.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что она представляет собой законченный исследовательский труд, в котором получены актуальные научные

результаты, значимые и в теоретическом, и в практическом аспектах. Существенное достоинство работы — её комплексный характер: сочетание продвинутых экспериментов на современном петаваттном комплексе PEARL и детального численного моделирования с использованием современных кодов, что позволяет качественно интерпретировать экспериментальные данные. Положительно оценивается качество изложения и оформления результатов: текст изложен ясно и чётко, работа хорошо оформлена и содержит большое число иллюстраций, делающих представление результатов наглядным.

Результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 9 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК, 6 из которых входят в первый и второй квартили, а также в 4 сборниках трудов конференций. Уровень публикаций, тщательность экспериментов и численного моделирования, а также согласие с результатами, полученными на других установках, позволяют считать научные положения и результаты, сформулированные в диссертации, обоснованными и достоверными.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, можно заключить, что диссертация Р.С. Земскова «Магнитогидродинамические и кинетические процессы при взаимодействии высокоскоростных потоков лазерной плазмы с сильным магнитным полем» является завершённой работой, имеющей важное значение для физики плазмы и удовлетворяет 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.

Выражаю согласие на обработку диссертационным советом моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.

Официальный оппонент: профессор,
доктор физико-математических наук,
профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана



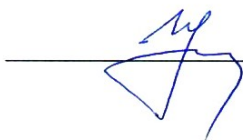
Рыжков Сергей Витальевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет)»
ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»

Почтовый адрес: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 1 стр. 1
Телефон: 8(499)263-65-70. Адрес электронной почты: svrzhkov@bmstu.ru

Подпись Рыжкова Сергея Витальевича удостоверяю:

Инспектор



Щеткова Т.В.