

ОТЗЫВ

официального оппонента Маловой Хельми Витальевны, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Института космических исследований Российской Академии Наук

о диссертационной работе Нечаева Антона Андреевича

«Магнитные и электрические квазистационарные неоднородные структуры в бесстолкновительной плазме с анизотропным распределением частиц по скоростям», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. – физика плазмы

Диссертация Антона Андреевича Нечаева посвящена теоретическому исследованию нестационарных, быстро эволюционирующих магнитоплазменных структур, образующихся в бесстолкновительной неравновесной плазме, как лабораторной, так и космической. Основное внимание в диссертации уделяется моделированию процессов расширения горячей плазмы в холодную разреженную среду или вакуум. В подобных плазменных конфигурациях, при наличии анизотропии электронов по скоростям, может возбуждаться вейбелевская неустойчивость, при которой образуется система эволюционирующих токовых жгутов, возбуждаются регулярные и турбулентные, хаотические магнитоплазменные структуры. Нестационарные процессы в лабораторной плазме являются аналогом фундаментальных крупномасштабных физических процессов в астро- и гелиофизике. В частности, подобные модели могут быть применены для объяснения и интерпретации вспышек, происходящих в короне Солнца, процессов формирования ударных волн и сопутствующих токовых слоев или филаментов со сложной топологией в солнечном ветре, а также процессов генерации сильных транзитных магнитных и электрических полей в солнечной и астрофизической плазмах.

В диссертации А.А. Нечаева предложена модель квазистационарных токовых структур – переходных токовых слоев, располагающихся на границах плазм с разными свойствами, например, на магнитопаузах планет и на гелиопаузе. Рассмотрен класс аналитических одномерных моделей, в которых тангенциальная компонента магнитного поля претерпевает достаточно резкий скачок, причем магнитное поле внутри пограничного слоя согласуется с магнитными полями на границах раздела разных плазм. Тема квазистационарных моделей токовых слоев очень интересна и актуальна, подобные модели позволяют интерпретировать данные наблюдений космических аппаратов, а также предсказывать свойства наблюдаемых структур в космической плазме. В диссертации эта тема нашла свое решение в оригинальной модели пограничного токового слоя, где свойства плазмы по обе стороны от некоторой срединной оси внутри слоя различны, что порождает асимметрию и многомасштабность общей токовой конфигурации.

Во Введении автор диссертации осветил актуальность темы исследования, цели и задачи работы, методы исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, изложил основные положения, выносимые на защиту, обосновал достоверность результатов, а также представил основные публикации и апробацию результатов. Детально освещен личный вклад автора по ходу проведения совместных работ в коллективе исследователей.

Каждая глава диссертации предваряется вводной литературной частью, в которой рассматривается состояние исследуемых задач на современном уровне их решения в работах

разных авторов. В конце введения внутри каждой главы приводятся кратко постановка и пути решения рассматриваемой задачи. Первые 5 глав диссертации посвящены рассмотрению разных аспектов задачи о разлете быстро нагретой плазмы в холодную фоновую плазму или вакуум с магнитным полем. Данная тема связана с успехами в практической реализации и численном моделировании экспериментов по лазерной абляции мишеней сверхкороткими фемтосекундными импульсами, разогревающими электронную компоненту плазмы, и является весьма актуальной. Моделирование разлета плазмы с горячими электронами позволяет детально изучить процессы образования и эволюции бесстолкновительной ударной волны как следствия распада сильного разрыва в плазме. Для рассмотренных в Главах 1-4 исследований использованы кинетические численные коды (модель EPOCH; Arber et al., *Plas. Phys. Control. Fus.*, 2015), основанные на стандартном методе крупных частиц. Численное моделирование в Главе 5 проведено на основе ранее опубликованного кода DarWin (Borodachev and Kolomiets, *Journal of Plasma Physics*, 2011) сотрудниками МГУ и соавторами А.А. Нечаева; результаты опубликованы в совместной статье, где расчеты вейбелевских токов проводятся в Дарвинском приближении с помощью метода крупных частиц.

В Главе 1 диссертации, в рамках вышеупомянутой численной модели, рассматривается динамика расширения подготовленной горячей плотной плазмы в разреженную ионизированную среду, сопровождающаяся прохождением ударной волны и формированием на ней слоя уплотнения. Проведено детальное исследование динамических процессов, вызывающих образование уединенного плотного слоя плазмы, распространяющегося вместе с ударной волной. Установлено, что принципиальную роль в возникновении ударной волны играет фоновая плазма, чья динамика выходит за рамки традиционных представлений, основанных на сценарии распространения ионно-звуковых волн и солитонов. Показано, что образование слоя уплотнения в значительной мере определяется взаимодействием более холодных фоновых ионов с нагретыми электронами. Такое взаимодействие осуществляется посредством амбиполярного электрического поля, возникающего из-за различной динамики частиц, и создания достаточно большой области разделения зарядов на раннем этапе их распространения. На этом этапе эволюция скачка концентраций частиц в неравновесной плазме (первоначально заданной в форме ступеньки) определяется, главным образом, трансформацией тепловой энергии горячих электронов в энергию направленного движения ионов и последующего быстрого «сгребания» ионов фоновой плазмы в единый слой. В конечном счете, указанный эффект приводит к формированию устойчивого широкого слоя уплотнения плазмы, распространяющегося вместе с фронтом ударной волны. В процессе распространения слой уплотнения вбирает в себя все большее число частиц, расширяется и постепенно начинает тормозиться, что продолжается до тех пор, пока хватает энергии первоначально разогретых электронов в области сильно неоднородной плазмы.

Следующие три главы диссертации посвящены детальному рассмотрению процессов развития вейбелевской неустойчивости на линейной и нелинейной стадиях при разных режимах расширения: при взрывном расширении плотной плазмы с горячими электронами (приобретающими анизотропию распределения по скоростям) в разреженную фоновую плазму (Глава 2) и в вакуум с однородным магнитным полем (Глава 3), а также при

непрерывной инжекции плазмы с горячими электронами из локализованной области плоской мишени в холодную фоновую плазму (Глава 4).

Конкретно, Глава 2 посвящена динамике магнитного поля, возникающего при расширении полуцилиндрического сгустка плотной плазмы с горячими электронами в разреженную холодную плазму. Представлены результаты численного моделирования, показывающие особенности формируемой при разлете плазмы анизотропии распределения по скоростям электронов двух фракций – горячих и холодных, а также дано описание общей структуры возникающих токов и магнитного поля в различных областях плазмы. Кроме этого, приведены аналитические оценки характерных длины волны и инкремента вейбелевской неустойчивости, связанной с доминирующей фракцией горячих электронов, и осуществлено сравнение полученных результатов со значениями указанных величин, найденными в численном моделировании. Изучены также свойства линейного и нелинейного этапов генерации мелкомасштабного магнитного поля, включая выявленную впервые корреляцию его структуры с пространственной структурой анизотропии распределения электронов по скоростям.

В Главе 3 исследуется распад разрыва между плоским слоем однородной плазмы, содержащим длинную полуцилиндрическую каверну с горячими электронами, и вакуумом в присутствии однородного внешнего магнитного поля, параллельного плоской границе этого разрыва. С использованием численного моделирования показано, что такое поле может препятствовать разлету горячих электронов и менять характер их анизотропного охлаждения, которое происходит благодаря разлету электронов в отсутствие разреженного фона. Снова приведены простейшие аналитические оценки условий развития и пространственно-временных масштабов вейбелевской неустойчивости, выполнен сравнительный анализ результатов типичных расчетов и выявленных физических эффектов в широкой области значений исходной концентрации плазмы и внешнего магнитного поля. Установлено, в частности, что при типичной для лазерной абляции исходной концентрации плазмы внешнее магнитное поле в диапазоне величин порядка 1–1000 Т существенно влияет на структуру возникающих токов и генерируемых ими магнитных полей, хотя слабо сказывается на расширении плазмы, идущем примерно с ионно-звуковой скоростью. При этом ориентации внешнего поля вдоль оси полуцилиндра и поперек нее приводят к качественно различным структурам. В первом случае образуется вытянутая область с сильно вытесненной компонентой внешнего поля и мелкомасштабной структурой поперечных к нему компонент поля, отвечающей токовым филаментам, направленным вдоль оси полуцилиндра, что обусловлено остыванием разлетающихся электронов только в плоскости поперек этой оси. Подобная анизотропия и, следовательно, вейбелевская неустойчивость не возникают во втором случае, когда имеющаяся компонента внешнего поля вытесняется не столь эффективно, а в области вытесненного поля мелкомасштабная структура всех компонент магнитного поля практически отсутствует.

В Главе 4 продолжено численное исследование процессов формирования магнитных полей и соответствующих им токовых структур (слоев или филаментов) в лазерной плазме с горячими электронами, которая теперь не заготовлена исходно в виде полуцилиндрической каверны, а непрерывно впрыскивается через соответствующее пятно с поверхности мишени (границы области моделирования) в относительно холодную фоновую плазму с монотонно

спадающим профилем концентрации. Показано, что в подобной граничной задаче, благодаря двум качественно различным неустойчивостям вейбелевского типа – филаментационной и тепловой, в определенных соседних слоях плазмы возможно образование взаимно ортогональных токовых структур с достаточно сильными магнитными полями. Изучены детали этого процесса в зависимости от параметров инжектируемой и фоновой плазмы, а также длительности впрыска.

В Главе 5 на основе численного моделирования исследованы особенности этапов развития и спектральных характеристик двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости в бимаксвелловской однородной плазме, в которой и электроны, и ионы в начальный момент имеют одинаковые анизотропные распределения по скоростям и одинаковые температуры. С использованием найденных дисперсионных соотношений для двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости на линейной стадии, установлен нелинейный эстафетный механизм ее насыщения за счет захвата электронов в пространственные гармоники с постепенно увеличивающимися масштабами. С целью анализа долговременной эволюции возникающей квазимагнитостатической турбулентности, развита простейшая модель диффузии ионов в мелкомасштабных магнитных полях, созданных электронной неустойчивостью, и с помощью нее объяснено медленное уменьшение параметра анизотропии распределения ионов на продолжительных временах после насыщения роста магнитного поля. Выявлен автомодельный степенной закон эволюции пространственного спектра этой турбулентности. Обсуждаются также возможности развития ионной вейбелевской неустойчивости или ее подавления и особенности эволюции крупномасштабных филаментов тока, созданных ионами, в зависимости от исходного энергосодержания электронов.

Шестая глава диссертации посвящена построению и исследованию стационарной одномерной кинетической модели переходного плоского токового слоя, граничащего с однородной замагниченной плазмой. Данная аналитическая модель может быть применена для описания космических магнитоплазменных структур, таких как магнитопаузы планет, гелиопауза, границы корональных арок, токовые слои в магнитосферах и т.д. Модель представляет собой, в каком-то смысле, модификацию известной модели токового слоя Харриса (Harris, Nuovo Cimento, 1962), в отличие от которой в данной модели аналитически рассчитана самосогласованная анизотропная функция распределения частиц по скоростям специального вида. Так, функции распределения ионов и электронов брались в виде некоторой изотропной функции энергии частицы, умноженной на ступенчатую функцию Хевисайда от проекции обобщенного импульса на ось, определяемую направлением тока. В результате упрощения полагалось, что функция распределения частиц зависит от двух интегралов движения - полной скорости v и обобщенного импульса Pz . Благодаря этому вектор-потенциал системы является решением самосогласованного уравнения Грета-Шафранова и удовлетворяет балансу давлений на границе, обеспечивающему равновесие системы. Изящная постановка задачи позволяет найти аналитическое выражение для полной поверхностной плотности тока, определяющей скачок магнитного поля через слой. В диссертации рассмотрены разные варианты токовых слоев, с доминирующими вкладами протонов или электронов в полный ток. Проведено сравнение параметров модели с токовыми слоями планет солнечной системы (Земли, Сатурна, Юпитера), обсуждается ее применение для описания магнитопауз экзопланет. В разделе 6.5. предлагается обобщение

модели на случай присутствия многих ионных фракций в плазме. Показано, что предлагаемые модели могут демонстрировать большое разнообразие форм профилей плотности тока. Оценка пространственных масштабов токового слоя, поддерживаемого какой-либо плазменной популяцией, дает толщину порядка характерных гирорадиусов соответствующих частиц - токоносителей, а общая толщина слоя определяется токами наиболее энергичных популяций частиц и по порядку величины сопоставима с их гирорадиусами. Представленные модели токовых слоев позволяют сделать детальное аналитическое описание структуры переходных и граничных магнитных слоев в космосе и применить их для сравнения с данными наблюдений.

В Заключение сформулированы общие результаты диссертационной работы и приводится обширный список использованной литературы.

Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию. Результаты диссертации в полной мере отражены в 13 работах, опубликованных в рецензируемых научных журналах, и доложены на российских и международных конференциях.

Диссертация А.А. Нечаева написана ясным и четким языком, в ней содержатся только лишь единичные мелкие опечатки, не влияющие на понимание содержания и уровень выполненной работы. У меня есть несколько замечаний. Во-первых, в диссертации используемый для моделирования плазмы численный метод называется неизменно «методом частиц в ячейках». Это калька английского термина «particle-in cell method», использованного впервые в работе Харлоу (1967). В российской научной литературе более предпочтителен термин «метод макрочастиц» (см., например, Бородачев и Анненков, УЗФФ, №4, 2140801, 2021). Второе замечание касается 6-й главы, где на страницах 141-142 явно не хватает схемы с изображением ориентации токового слоя по отношению к рассматриваемой системе координат. Третье замечание относится к рис. 6.3 с изображением траекторий частиц в асимметричном токовом слое, которое сделано слишком схематично и требует более детального описания. В частности, следовало бы подробнее прокомментировать характер движения частиц, пересекающих плоскости смены знака проекций векторного потенциала A_u и магнитного поля B_u (см. рис. 6.2b). Так, если бы магнитная компонента B_u меняла знак в области траектории протона, показанной черной кривой на рис. 6.3, то он не мог быть просто замагниченным в этой области, а двигался бы вдоль серпантинной петляющей траектории, как это происходит в стандартной модели Харриса и в других моделях (см., например, Zelenyi et al., NPG, 2000). Следует заметить, что указанные замечания не являются существенными и несколько не умаляют высокого уровня научного исследования, представленного в диссертации А.А. Нечаева.

В целом диссертация А.А. Нечаева производит впечатление серьезного и глубокого научного исследования, выполненного со всей тщательностью. Диссертация написана грамотно, на высоком профессиональном уровне и представляет собой законченную научную работу. Результаты и положения диссертации, несомненно, являются обоснованными и достоверными, они опираются на известные физические модели и численные методы, широко используемые при изучении нестационарных процессов в бесстолкновительной плазме. Разработанная аналитическая модель токового слоя

представляет большой интерес, согласована с известными моделями других научных групп и может быть использована для интерпретации данных наблюдений в космосе.

К основным результатам диссертационной работы А.А. Нечаева, обладающим научной значимостью и новизной, следует отнести выводы 1) о многопоточности ионов при расширении бесстолкновительной плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму и «сгребании» частиц в слой уплотнения на ударной волне; 2) о развитии электронной вейбелевской неустойчивости при расширении плазмы с горячими электронами в фоновую плазму или в вакуум с магнитным полем, в результате которой энергия электронов трансформируется в энергию квазистатического магнитного поля, создаваемого токовыми филаментами; 3) об особенностях эволюции токовых филаментов на нелинейной стадии развития, когда главная роль в поддержании токов переходит от электронов к ионам, несмотря на то что вейбелевская неустойчивость ионов может быть подавлена замагничиванием электронов, 4) об аналитическом описании класса самосогласованных кинетических одномерных моделей, описывающих переходные токовые структуры на границах между разными плазмами и магнитными полями.

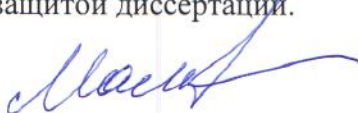
Диссертация А.А. Нечаева является актуальной по своей тематике, содержит новые научные результаты и свидетельствует о высокой научной квалификации автора этой работы. Диссертация является важным научным исследованием и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор, Нечаев Антон Андреевич, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. – физика плазмы.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник

Института космических исследований Российской Академии наук

Выражаю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертаций.



Малова Хельми Витальевна

Контактные данные:

Тел. +7(495)333-51-22, e-mail: hmalova@yandex.ru

Специальность, по которой оппонентом защищена диссертация:

01.04.02 – «Теоретическая физика»

Адрес места работы:

117934, г. Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32,

Институт космических исследований РАН,

Тел. +7(495)333-51-22, , e-mail: hmalova@yandex.ru

Подпись доктора физ.-мат. наук,
ведущего научного сотрудника ИКИ РАН

Маловой Х.В. заверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН,
кандидат физ.-мат. наук



А.М. Садовский