

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор - начальник Управления
научной политики Федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский
государственный университет имени М.

В. Ломоносова» (МГУ), профессор



Федянин А.А.

«29» 11 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Нечаева А.А.

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

Диссертационная работа А.А. Нечаева посвящена аналитическому и численному исследованию ряда магнитных и электрических структур в бесстолкновительной плазме с анизотропией распределения частиц по скоростям и анализу особенностей кинетических эффектов, связанных с этими структурами. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитированной литературы.

Во Введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы основные цели и задачи работы, описаны методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, изложена основная информация об апробации результатов работы.

Глава 1 посвящена задаче о разлете бесстолкновительной плазмы с горячими электронами в холодную и значительно разреженную плазму, в ходе которого образуется слой уплотнения плазмы, сопровождающий электростатическую ударную волну. Анализ этой задачи выполнен автором на основе ряда проведенных одномерных и двумерных расчетов методом частиц в ячейках. В начале главы дано обоснование постановки задачи для моделирования разлета плазмы, созданной абляцией мишени фемтосекундным лазерным импульсом, а также обсуждаются имеющиеся в литературе подходы к описанию структуры ударной волны при распаде разрыва в плазме. Осуществленное моделирование для различных наборов параметров плазмы и начальных профилей ее концентрации позволило автору дать качественное описание явления в целом и выявить основные закономерности как формирования слоя уплотнения, так и его долговременной эволюции и

постепенного исчезновения. В конце главы обсуждаются особенности рассматриваемого явления в случае неоднородного плавного перехода от горячей к холодной плазме.

Главы 2–4 посвящены проблеме возникновения сильно неоднородного магнитного поля в условиях эффективного развития вейбелевской неустойчивости теплового и филаментационного типов при разлете плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму или вакуум, в том числе в присутствии внешнего магнитного поля. В этих главах области параметров задачи соответствуют лазерной плазме, создаваемой абляцией плоской мишени при квазицилиндрической фокусировке пучка излучения мощного фемтосекундного лазера.

В главе 2 рассмотрены особенности динамики магнитного поля, возникающего при расширении полуцилиндрического сгустка плотной плазмы с горячими электронами в разреженную и холодную плазму без внешнего магнитного поля, когда анизотропное распределение электронов по скоростям обусловлено уменьшением их эффективной температуры вдоль направления разлета. В начале главы дан краткий обзор механизмов генерации магнитного поля в лазерной плазме за счет электронной компоненты. Приведены детали постановки начальной задачи для численного моделирования распада сильного разрыва, рассмотренного в главе 1. Описаны особенности формируемой при разлете плазмы анизотропии распределения по скоростям электронов двух фракций, а также общая структура возникающих токов и магнитного поля в различных областях плазмы. Приведены аналитические оценки характерной длины волны и инкремента вейбелевской неустойчивости, связанной с доминирующей фракцией горячих электронов, и полученные результаты сопоставлены со значениями этих величин, найденными в моделировании. Продемонстрирована корреляция структуры возникшего мелкомасштабного магнитного поля с пространственной структурой анизотропии распределения электронов по скоростям.

В главе 3 проанализирована иная постановка начальной задачи о разлете горячих электронов, в которой имеется резкий переход от плоского слоя однородной плазмы, содержащей длинную полуцилиндрическую каверну с горячими электронами, к вакууму и всюду присутствует однородное внешнее магнитное поле, параллельное плоской границе разрыва концентрации частиц. Приведены простейшие аналитические оценки условий развития и пространственно-временных масштабов вейбелевской неустойчивости, дано описание результатов типичных расчетов и выявленных физических эффектов для исходной концентрации плазмы в пределах 10^{20} – 10^{22} см⁻³ и внешнего магнитного поля с величиной в пределах 0.5–2500 Тл. Установлено, что для указанных исходных концентраций плазмы внешнее магнитное поле с величиной в диапазоне 1–1000 Тл существенно влияет на структуру возникающих токов и генерируемых ими магнитных полей, причем ориентация внешнего поля вдоль оси полуцилиндра и поперек нее приводят к качественно различным структурам. В первом случае в области вытесненного внешнего поля формируется мелкомасштабная структура сгенерированного плазмой магнитного поля, отвечающая токовым филаментам, направленным вдоль оси полуцилиндра, что обусловлено остыванием разлетающихся электронов только в радиальном направлении, но не вдоль указанной оси. Подобная анизотропия и, следовательно, вейбелевская неустойчивость не возникают во втором случае, когда внешнее поле вытесняется не столь эффективно, а в области вытесненного поля мелкомасштабная структура магнитного поля по существу отсутствует.

В главе 4 процессы формирования магнитных полей и токовых структур в лазерной плазме исследованы в рамках граничной задачи, в которой плазма с горячими электронами непрерывно впрыскивается через пятно с границы области счета в относительно холодную фоновую плазму с монотонно спадающим профилем концентрации. Показано, что 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. Обсуждаются зависимости деталей процесса формирования этих структур от параметров инжектируемой и фоновой плазмы, а также длительности впрыска.

Глава 5 посвящена анализу динамики и спектральных характеристик вейбелевской неустойчивости в однородной плазме, в которой электроны и ионы в начальный момент имеют одинаковые бимаксвелловские распределения по скоростям и одинаковые температуры. В начале главы описана постановка задачи для численного моделирования и приведены дисперсионные соотношения для двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости на линейной стадии. Далее описан эстафетный механизм ее насыщения за счет захвата электронов в пространственные гармоники с постепенно увеличивающимися масштабами. На основе простейшей модели диффузии ионов в мелкомасштабных магнитных полях, созданных электронной неустойчивостью, объяснено уменьшение анизотропии распределения ионов на временах после насыщения полного магнитного поля. Указан автомодельный степенной закон эволюции пространственного спектра неустойчивости, состоящий в том, что характерная длина волны возмущений увеличивается со временем по корневому закону. Обсуждается возможность развития ионной вейбелевской неустойчивости или ее подавления и особенности эволюции крупномасштабных филаментов тока, созданных ионами.

В главе 6 построена аналитическая модель квазистационарного токового слоя, описывающего границу между областями с разными концентрациями бесстолкновительной плазмы, энергетическими распределениями частиц и величинами магнитного поля, в том числе с широким набором силовых линий. Рассмотрена простейшая плоскостроенная ситуация, в которой две области с квазиоднородной плазмой различной концентрации и квазиоднородными магнитными полями различной величины, ортогональными осям неоднородности, разделены согласующим их токнесущим слоем плазмы, имеющей анизотропные распределения частиц по скоростям. Сформулирована предлагаемая модель токового слоя в виде функции распределения частиц, зависящей только от точных инвариантов их движения и содержащей изотропный множитель, который имеет смысл энергетического распределения частиц с одной стороны слоя. Проведен подробный анализ свойств предложенных моделей для случая, когда распределения частиц по энергиям максвелловские. В главе описаны токовые слои, сформированные как одной, так и несколькими анизотропными фракциями частиц, в том числе со встречными токами, причем максимумы плотностей тока разных фракций частиц могут быть сдвинуты относительно друг друга на произвольную величину. Показано, что от конкретного вида энергетического распределения частиц (максвелловского, каппа- и других, в том числе релятивистских) зависят количественные, но не качественные свойства построенных слоев. Построенные модели обобщены на случай широкого набора силовых линий магнитного поля, когда вектор магнитного поля поворачивается при переходе через слой.

В Заключении представлены основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных материалов, и более чем 50 работах в сборниках трудов и тезисов докладов международных и российских конференций. Текст работ, опубликованных по теме диссертации, соответствует ее содержанию.

Достоверность и обоснованность основных результатов и положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений.

Тема диссертации соответствует специальности 1.3.9 – физика плазмы, автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Научная значимость результатов и практическое использование

В диссертационной работе аналитически и численно выявлены новые свойства решений уравнений Власова – Максвелла для ряда актуальных задач физики неравновесной

бесстолкновительной плазмы и дано качественное объяснение найденных физических явлений.

Исследованные кинетические процессы и конфигурации полей характерны для лазерной и космической плазмы, и практическая значимость работы обусловлена возможностью использования полученных теоретических результатов для интерпретации данных соответствующих лабораторных экспериментов и астрономических наблюдений. Так, рассмотренные в диссертационной работе явления, связанные с неравновесными частицами, особенно электронами, типичны для целого ряда экспериментов с разлетающейся горячей лазерной плазмой, создаваемой в результате абляции плоских мишеней фемтосекундными импульсами при наличии достаточно холодной фоновой плазмы, в том числе в присутствии внешнего магнитного поля.

Подобные явления возможны и при взрывных деформациях корональных арок в звездах поздних спектральных классов, при быстром нагреве вытянутых филаментов плотности в солнечной короне или в магнитосферной плазме экзопланет, при взаимодействии филаментов горячей плазмы с магнитными облаками более разреженной и холодной плазмы в звездном ветре, при тех или иных взрывных процессах в магнитосферах планет.

Построенные автором модели токовых слоев открывают новые возможности интерпретации наблюдений долгоживущих магнитных структур в области головной ударной волны и магнитопаузы для различных конфигураций, порождаемых звездным или солнечным ветром при обдувании магнитосфер экзопланет, высоко расположенных корональных магнитных структур или магнитных облаков, контактирующих с областями слабо замагниченной плазмы и образующих магнитный переходный слой.

Замечания

Работа в целом выполнена на очень высоком уровне, однако несколько замечаний, возникших в ходе ее обсуждения, хотелось бы отметить.

1. В защищаемом положении 1 условия реализации слоя уплотнения не приводятся – сказано лишь, что это реализуется «в определенной области параметров». Представляется, что эта область параметров должна была быть четко определена.
2. При постановке задачи о формировании слоя уплотнения предполагалось, что распределение электронов по энергии – однотемпературное с «температурой» 2.5 кэВ. Вместе с тем, при воздействии фемтосекундного импульса в рассматриваемом диапазоне интенсивностей энергии в единицы – десятки кэВ характерны для быстрых (или горячих) электронов, а основную долю электронов составляют электроны со значительно, примерно на порядок, меньшей температурой. При этом горячие электроны обладают анизотропным распределением по скоростям. Хотелось бы уточнить, насколько наличие этих факторов влияет на результаты, представленные в работе.
3. Подавляющее большинство расчетов проведено в работе в 2D геометрии, при этом плазменное пятно не ограничено по одной из координат. Это, в частности, приводит к генерации токов, вейбелевской неустойчивости и формированию квазистационарных структур магнитного поля. В реальных условиях плазменное пятно всегда имеет конечную длину (даже если производить фокусировку цилиндрической линзой), при фокусировке гауссова пучка вытянутость вдоль одной из координат может возникнуть лишь вследствие падения излучения под углом. Возникает вопрос: насколько конечность длины плазменного пятна влияет на полученные результаты и в каких условиях реально наблюдение указанных магнитных структур?
4. Представляется, что объем работы существенно превышает общепринятые стандарты и часть материала (например, главу 6) вполне можно было бы

исключить без ущерба с точки зрения выполнения квалификационных требований.

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы и не влияют на обоснованность полученных результатов.

Заключение

Диссертация отвечает всем требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК Минобрнауки России к кандидатским диссертациям, а ее автор Нечаев Антон Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Содержание диссертации обсуждалось на семинаре кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова 18.11.2022 г. по результатам доклада соискателя. Настоящий отзыв составлен с учётом этого обсуждения.

Отзыв составил профессор кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н. по специальности лазерная физика Савельев-Трофимов Андрей Борисович, abst@physics.msu.ru, +7 916 1845084

профессор, д.ф.-м.н.



Савельев-Трофимов А.Б.

зав.кафедрой общей физики и волновых процессов
профессор, д.ф.-м.н.



Макаров В.А.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1
Телефон: (495) 939-10-00,
Email: info@rector.msu.ru,
сайт: www.msu.ru