

ОТЗЫВ

официального оппонента Андреева Николая Евгеньевича
о диссертационной работе Нечаева Антон 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

Диссертационную работу составляют проведенные А.А.Нечаевым исследования ряда новых особенностей коллективных кинетических явлений в бесстолкновительной анизотропной плазме, обусловленных формированием квазистационарных магнитных и электрических структур. Нарастающая в последнее время экспериментальная и теоретическая активность подобных исследований обусловлена как вновь открывающимися вопросами фундаментальной физики плазмы, так и актуальными приложениями в физике космической и лазерной плазмы, допускающими эффективное моделирование.

Целями работы выбраны три следующие группы задач: многопотоковая динамика слоя уплотнения в электростатической ударной волне, созданной расширением плазмы с горячими электронами в разреженную плазму; генерация турбулентности в переходных процессах 1- и 2-компонентной вейбелевской неустойчивости в однородной или неоднородной плазме, в том числе замагниченной; стационарные токовые слои между двумя областями по-разному замагниченной плазмы с разными параметрами и произвольным распределением частиц по энергиям.

За исключением последней задачи, решаемой в основном аналитически и относящейся к магнитосферной и корональной плазме, все остальные задачи фактически относятся к лазерной плазме и исследуются численно методом макрочастиц (частиц в ячейках) с последующим качественным анализом полученных результатов путем проведения аналитических оценок.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитированной литературы.

Во введении дано обоснование актуальности тематики исследования, сформулированы общая цель и задачи работы, представлены методы исследования, отмечены научная новизна и значимость полученных результатов, приведены сведения об их апробации, перечислены защищаемые положения и указан личный вклад автора работы.

Первая глава посвящена задаче о бесстолкновительном расширении плазмы с горячими электронами в холодную и разреженную фоновую плазму, при котором на фронте образующейся электростатической ударной волны формируется особенность концентрации плазмы, названная в работе слоем уплотнения. Особое внимание уделено кинетическим особенностям различных фракций частиц, ранее детально не изучавшимся для данной задачи о распаде сильного разрыва в плазме, физика которого не сводится к генерации ионно-звуковых волн и солитонов, определяющей характер хорошо изученного распада слабого разрыва. На основе анализа результатов численного моделирования качественно описан механизм образования слоя уплотнения и найдены необходимые для этого условия. Показано, что структура слоя уплотнения определяется, прежде всего, проходящими через него встречными

потоками ионов фоновой (разреженной) и основной (плотной) плазмы, что приводит к особенностям плотности, отличным от обсуждавшихся ранее в литературе и описываемым аналитическими моделями с ламинарным течением плазмы.

Во **второй главе** проанализировано формирование токовых структур на более поздней стадии уже сформировавшейся квазиэлектростатической ударной волны при распаде сильного разрыва в плазме с горячими электронами, исследовавшемся в предыдущей главе. Поскольку на этой стадии распределение электронов по скоростям является достаточно сильно анизотропным в довольно обширной пространственной области, особенно под фронтом ударной волны, то происходит развитие «фонтанных» и «вейбелевских» токов. Они создают квазистационарные магнитные поля, обладающие энергией вплоть до нескольких процентов энергии горячих электронов, т.е. во много раз превышающей энергию генерируемых электрических полей, но все же не сильно влияющей на разлет плазмы. Автором указаны не изучавшиеся ранее особенности анизотропии разлетающейся неоднородной плазмы и развития вейбелевской неустойчивости в возникающих условиях нестационарного неоднородного бесстолкновительного потока частиц. Особое внимание обращено на роли разогревающихся электронов фоновой плазмы и анизотропно остывающих электронов расширяющейся плазмы. Установлена корреляционная связь пространственной структурой анизотропии распределения электронов по скоростям со структурой возникшего мелкомасштабного магнитного поля.

В данной, предыдущей и двух последующих главах диссертации компьютерные расчёты и качественные оценки сделаны для типичных параметров лазерной плазмы, получаемой при абляции мишени фемтосекундными импульсами.

Третья глава содержит результаты численного моделирования и их анализ для другой постановки задачи о распаде разрыва, когда имеется неоднородно прогретый (в форме полуцилиндра) резкий переход от плоского слоя однородной плазмы к вакууму и всюду присутствует однородное внешнее магнитное поле, параллельное границе разрыва концентрации частиц. В зависимости от ориентации это внешнее поле может по-разному препятствовать разлету горячих электронов и менять характер их анизотропного охлаждения, которое в данном случае происходит в отсутствие разреженного фона, когда электростатическая ударная волна фактически не формируется. Как оказалось, развивающаяся в этих условиях неустойчивость вейбелевского типа и генерация магнитных полей разного масштаба приводят к ряду кинетических эффектов, которые выходят за рамки магнитогидродинамического приближения и в должной мере еще не исследовались. В частности, в широкой области параметров возможно формирование мелкомасштабных токовых структур типа z-пинчей, а генерируемые магнитные поля могут во много раз превышать по величине внешнее поле и при этом сильно зависеть от его величины и ориентации.

В **четвертой главе** проведено аналогичное исследование более сложной задачи о распаде сильного разрыва и последующем развитии вейбелевской неустойчивости теплового и филаментационного типов при разлете плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму с сильно неоднородным профилем концентрации в отсутствие внешнего магнитного поля. В отличие от предыдущих глав, здесь плазма с горячими электронами не заготовлена исходно в виде полуцилиндрического сгустка (глава 2) или каверны (глава 3), а непрерывно впрыскивается с граничной поверхности, которая выбрана в форме длинной полосы, отвечающей цилиндрической фокусировке лазерного пучка. В подобной граничной задаче, как показано на основе

детального двумерного и тестового трехмерного моделирования, неустойчивости вейбелевского типа в соседних слоях плазмы приводят к образованию взаимно ортогональных токовых структур с достаточно сильными магнитными полями.

Сначала, уже на субпикосекундных временах, в лазерной плазме начинается развитие филаментационной неустойчивости вейбелевского типа, связанной с многопоточковым анизотропным распределением электронов по скоростям. В результате в тонком слое достаточно плотной холодной плазмы происходит эффективное формирование мелкомасштабных слоев тока, ориентированных вдоль направления впрыска и созданных встречными потоками горячих и холодных электронов. Позднее, на пикосекундных временах и на большем удалении от мишени, в слое более разреженной плазмы накапливаются анизотропно остывшие при разлете горячие электроны, характер анизотропии распределения которых по скоростям оказывается качественно иным. Он напоминает бимаксвелловский с осью наибольшей температуры, ориентированной не ортогонально, а параллельно плоскости мишени, вдоль полосы, разогретой лазерным излучением. Поэтому меняется тип вейбелевской неустойчивости и по соседству с возникшими ранее токовыми слоями начинают довольно быстро развиваться ортогональные им токовые филаменты в виде z-пинчей, которые имеют больший пространственный масштаб и постепенно занимают все большую область переходного слоя, в котором доминируют горячие электроны. Рассмотрено как долговременное развитие обеих указанных токовых структур, так и их затухание после окончания впрыска плазмы с горячими электронами.

В **пятой главе** детально разобраны спектрально-динамические особенности развития электрон-ионной вейбелевской неустойчивости в однородной плазме, в которой электроны и ионы в начальный момент имеют одинаковые бимаксвелловские распределения по скоростям и одинаковые температуры. С учетом полученных дисперсионных соотношений для этой двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости выяснен эстафетный механизм ее насыщения за счет захвата электронов в пространственные гармоники с постепенно увеличивающимися масштабами. С использованием простейших представлений о захвате электронов и диффузии ионов, в мелкомасштабных магнитных полях, созданных электронной неустойчивостью, дана интерпретация подавления ионной вейбелевской неустойчивости и медленного уменьшения анизотропии распределения ионов после насыщения роста полного магнитного поля. Кроме того, показано, что характерный масштаб филаментов тока в образующейся квазимагнитостатической турбулентности увеличивается со временем примерно по корневому закону, и найдены особенности эволюции структуры крупномасштабных филаментов тока, созданных ионами.

В **шестой главе** предложен и детально проанализирован новый класс аналитических моделей токового слоя магнитопаузы — переходного слоя между двумя областями по-разному замагниченной плазмы с произвольными энергетическими распределениями частиц и различными величинами магнитного поля, в том числе с возможным широким его силовым линиями. Точное решение получено для специального вида функций распределения частиц по скоростям, включающего только точные инварианты движения. Типичные свойства предложенных моделей продемонстрированы для максвелловских и каппа-распределений частиц по энергиям.

Рассмотрены варианты токовых слоев с несколькими анизотропными фракциями частиц как со встречными, так и с сонаправленными токами, максимумы профилей плотности которых могут быть сдвинуты относительно друг друга на

произвольную величину. Для всех этих случаев от конкретного вида энергетического распределения частиц (максвелловского, каппа- и других, в том числе релятивистских) зависят лишь количественные, но не качественные свойства построенных слоев. Построенные токовые слои могут быть использованы для аналитического моделирования структуры магнитопаузы в области применимости плоскострого приближения для различных задач набегания потока бесстолкновительной плазмы на такие объекты, как магнитосфера планеты (экзопланеты), отдельная высокая арка магнитного поля в короне звезды или магнитное облако звездного (солнечного) ветра, движущееся со скоростью, отличающейся от скорости окружающего ветра.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В целом, диссертация представляет собой законченную научную работу, содержащую новые важные результаты, востребованные в теоретической и прикладной физике, и изложенную в хорошем литературном стиле.

Достоверность результатов работы определяется тем, что они опираются на известные физические модели, широко используемые при изучении процессов в бесстолкновительной плазме и основанные на классических уравнениях Власова – Максвелла, а также на ряд математических методов, имеющих строгое обоснование.

Полученные результаты имеют продуманную интерпретацию и качественно согласуются с экспериментальными данными, численными расчетами и теоретическими выводами других научных групп для подобных физических ситуаций.

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, опираются на полученные в ней результаты и являются полностью обоснованными.

Личный вклад автора не вызывает сомнений, детально охарактеризован в автореферате и, в частности, состоит как в проведении численного моделирования, включая постановку основных задач для него и объяснение его результатов, так и в аналитических расчетах, особенно важных для аналитических моделей в главе 6.

По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания.

1) В разделе 1.5 слишком кратко и фрагментарно представлены особенности динамики и структуры переходного слоя уплотнения плазмы на фронте электростатической ударной волны в случае расширения плазмы с горячими электронами в разреженную холодную плазму с различными плавно спадающими профилями неоднородности концентрации. Судя по проведенным автором расчетам, выявленная сложная картина физических явлений в данной постановке задачи заслуживает более систематического описания и может быть интересной для будущих экспериментов по фемтосекундной лазерной абляции мишеней.

2) В главах 3 и 4 недостает более детального, анализа пространственной корреляции между степенью анизотропии распределения электронов по скоростям и величиной генерируемого мелкомасштабного магнитного поля, как это сделано в разделе 2.5 (см. рисунок 2.9 в главе 2). Можно только сожалеть о том, что автор не воспользовался возможностью проследить эволюцию обнаруженной им корреляции для различных рассмотренных им постановок задачи о распаде сильного разрыва в плазме.

3) В главе 5 справедливость одномодового приближения, сделанного при получении нового аналитического выражения (5.10) для плотности энергии магнитного поля турбулентности вейбелевского происхождения, требует дополнительного анализа. Остается неясной полезность полученного выражения для

