

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Лужковского Артемия Араратовича «Самосогласованное описание нелинейного взаимодействия квазимонохроматических волн с резонансными частицами в неоднородной плазме», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 «теоретическая физика»

Диссертационная работа Лужковского А.А. посвящена исследованию нелинейного взаимодействия свистовых и ленгмюровских волн с энергичными электронами в неоднородной плазме с акцентом на разработку и использование аппарата численного моделирования, призванного обеспечить самосогласованный расчёт взаимодействия волна-частица. Интерес к исследованию такого рода процессов традиционно мотивирован задачами описания ряда магнитосферных явлений, включая эффекты ускорения частиц в радиационных поясах Земли и их высыпания в атмосферу, развития средств связи посредством низкочастотных сигналов, а также для интерпретации спутниковых измерений.

Следует отметить актуальность работы в контексте проблемы нагрева и генерации тока в лабораторной плазме. Задача безындукционного поддержания тока в токамаке принципиальна для стационарной работы токамака-реактора. Генерация тока с помощью геликонных волн считается особенно эффективным механизмом передачи энергии и импульса частицам плазмы высокого давления, поэтому его разработка относится к числу первоочередных задач для токамаков следующего поколения. Такие исследования активно ведутся в настоящее время на токамаках KSTAR, HL-2M и EAST; первые результаты, демонстрирующие эффективный нагрев электронов геликонными волнами, получены на токамаке DIII-D с мощностью нагрева в 1,2 МВт. Ещё одной областью практического применения геликонов является ионизация плазмы в безэлектродных плазменных двигателях, к числу которых относятся двигатели семейства VASIMR.

Основными проблемами геликонного метода воздействия на плазму являются сильное затухание волн вблизи границы плазмы и трудности в достижении желаемой формы вклада мощности. Для повышения эффективности использования геликонных волн необходимо их комплексное моделирование, учитывающее специфику распространения волн в неоднородной плазме, поглощение энергии электронами и ионами, а также возникающие в результате этого процесса изменения функции распределения электронов. При этом ввиду высокой мощности используемых антенн существенными являются эффекты нелинейности. Отсутствие на сегодняшний день адекватных численных моделей

затрудняет постановку экспериментов в условиях высокой плотности плазмы и препятствует дальнейшему прогрессу в этой области.

Разработанные в диссертационной работе подходы, помимо отмеченных самим диссертантом приложений, могут служить основой для моделирования процессов генерации тока и нагрева плазмы в лабораторных системах магнитного удержания, включая токамаки, при соответствующем изменении топологии магнитного поля. Весьма значимыми также видятся результаты, полученные автором в главе 4, демонстрирующие различные режимы эволюции электростатических волн в неоднородной плазме. Новый виток интереса к процессу передачи энергии волна-частица связан с недавно обнаруженным эффектом бесстолкновительного нагрева ионной компоненты плазмы в экспериментах на токамаках и стеллараторах, показывающих существенный рост температуры ионов при комбинированном ЭЦР нагреве и инжекции пучков нейтральных атомов. Считается, что высокоэнергичные частицы плазмы, рождающиеся в результате перезарядки нейтралов, возбуждают низкочастотные волны, которые, в свою очередь, осуществляют нагрев основной ионной компоненты плазмы посредством затухания Ландау. Детальное описание этого процесса считается одной из наиболее перспективных теоретических задач в термоядерном сообществе.

Представленные в диссертации результаты основаны на математической формулировке процесса резонансного взаимодействия высокоэнергичных частиц со свистовыми и ленгмюровскими волнами, наблюдаемыми экспериментально в неоднородной плазме, что относит работу к научной специальности *теоретическая физика*. В работе активно используется схема итерационного решения системы уравнений Власова–Больцмана–Максвелла, на первом этапе которой осуществляется решение кинетического уравнения для резонансных частиц с заданным полем, а на втором определяется изменение амплитуды волны, вызванное взаимодействием волна-частица. Применение такого подхода, относящегося к методам теории слабой турбулентности, хорошо обосновано для собственных колебаний плазмы малой амплитуды.

В диссертационной работе определён самосогласованный пространственный профиль амплитуды сигнала ОНЧ передатчика в дипольном поле Земли с учётом резонансного взаимодействия сигнала с энергичными электронами плазмы. В расчётах использовано выражение для нелинейного инкремента квазимонохроматической свистовой волны, справедливое при произвольном соотношении между параметрами нелинейности и неоднородности плазмы. Показано, что при учёте нелинейного резонансного взаимодействия волна-частица профиль амплитуды волны становится сильно асимметричным относительно экватора.

В диссертации исследован процесс передачи энергии между различными группами электронов посредством свистовых волн, распространяющихся в магнитосфере Земли. Показано, что в приэкваториальной области магнитосферы происходит раскачка вистлеровских волн в результате взаимодействия с электронами на первом циклотронном резонансе. По мере распространения волны от экватора к Земле нормальный вектор волны становится всё более наклонным, и в действие вступают минус первый циклотронный резонанс и резонанс Ландау, приводящие к затуханию волны и соответствующему увеличению энергии резонансных частиц. Определена широта, на которой эффекты затухания и раскачки полностью компенсируют друг друга. Тогда энергия волны остаётся неизменной, при этом частицы первого циклотронного резонанса теряют свою энергию, а частицы на резонансах Ландау и $n = -1$ резонансе получают энергию. Этот нестандартный процесс ответственен за передачу энергии между различными популяциями резонансных частиц, опосредованную волной.

Проведён детальный численный анализ различных режимов эволюции ленгмюровских волн в неоднородной плазме. Решается задача Коши для функции распределения электронов и поля волны. Исследуемые режимы отличаются выбором начальной функции распределения резонансных частиц (устойчивой/неустойчивой) и спектральным составом возмущений (монохроматическая волна/набор гармоник). Исследовано влияние пространственной неоднородности плазмы на динамику возмущений. Для верификации расчётов использована проверка сохранения полной энергии системы, состоящей из энергии резонансных частиц и энергии волны, во времени. Продemonстрирована реализация механизма классического затухания Ландау с экспоненциальным уменьшением энергии волны и режима О'Нила с характерными колебаниями энергии вблизи постоянного значения. Показано, что пространственная неоднородность плазмы препятствует переходу энергии волны в колебательный режим, свойственный однородной плазме. В случаях с неустойчивой функцией распределения продемонстрирован экспоненциальный рост энергии волн, сопровождающийся образованием плато на профиле функции распределения вблизи резонансных скоростей. Показано, что характерной особенностью широкого спектра гармоник в начальном возмущении является появление пространственной и временной модуляции амплитуды поля.

Имеются некоторые замечания/комментарии по тексту и содержанию диссертации.

1) При анализе свистовых волн не приводится обоснование выбора используемой невозмущённой функции распределения, которая, вообще говоря, может быть

любой функцией интегралов движения, при этом этот выбор может существенно влиять на результаты расчёта.

2) На мой взгляд, вывод о передаче энергии от частиц низкой энергии к более энергичным частицам посредством промежуточного агента в виде свистовых волн нуждается в более глубоком физическом обосновании. Сделан он на основе сравнения оценок для энергий резонансных частиц в разных точках пространства на пути распространения волны: в приэкваториальной области возбуждения волны и в области затухания волны вдали от экватора. Вывод сформулирован так, как будто передача энергии происходит в одной точке. Наиболее показательна в этом смысле была бы широта $\lambda = 16^\circ$, на которой энергия волны неизменна ввиду равенства инкремента и декремента затухания, обусловленных взаимодействием с частицами $n = 1$ и $n = 0, -1$ резонансов, соответственно. К сожалению, графики для подынтегральных функций G_n на этой широте не приводятся. Следовало бы привести расчёты энергобаланса с учётом перекачки энергии и потока энтропии в рамках неравновесной термодинамики.

3) Следовало бы объяснить физический смысл особенности на функции β_0 для частиц с энергией 10 кЭв на широте $\sim 28^\circ$ (рис. 3.4 справа).

4) Формирование плато на функции распределения вблизи резонансной скорости характерно как для процесса раскачки волны в результате резонансного взаимодействия, так и для процесса затухания. Однако в представленных в главе 4 диссертации расчётах уплощение функции распределения отмечается только в неустойчивых случаях; желательно объяснить, чем это обусловлено.

5) Рисунок 4.8f демонстрирует существенное нарушение закона сохранения энергии в численном расчёте, что требует разъяснений, поскольку в других режимах таких проблем не возникает.

6) Формальное замечание: надписи на рисунках на английском языке.

Сформулированные замечания не умаляют важности полученных в диссертации результатов.

Основные положения и выводы диссертации опубликованы в виде трёх статей в ведущих тематических научных журналах первого и второго квартилей, входящих в «перечень ВАК». Автореферат соискателя в полной степени отражает положения и выводы, содержащиеся в диссертации.

Диссертационное исследование Лужковского Артемия Араратовича на тему «Самосогласованное описание нелинейного взаимодействия квазимонохроматических волн с резонансными частицами в неоднородной плазме» выполнено на высоком уровне, соответствует требованиям ВАК,

предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 «теоретическая физика».

Официальный оппонент
кандидат физико-математических наук
по специальности «01.04.08 – физика плазмы»
доцент, начальник Лаборатории
физики неравновесной плазмы
Отдела теории плазмы
Курчатовского комплекса термоядерной
энергетики и плазменных технологий
НИЦ «Курчатовский институт»
тел. (499) 196-93-75, e-mail: Sorokina_EA@nrcki.ru

Сорокина Екатерина Алексеевна

02.12.2025

НИЦ «Курчатовский институт»
123182 г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Подпись Е.А. Сорокиной заверяю:

Первый заместитель
главного учёного секретаря
руководитель службы
главного учёного секретаря
НИЦ «Курчатовский институт»



К.Е. Борисов