

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Анненкова Владимира Вадимовича
«Электромагнитная эмиссия в тонкой пучково-плазменной системе»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук
по специальности 01.04.08 – физика плазмы

1. Актуальность

Проблема удержания высокотемпературной плазмы в открытых магнитных ловушках является одной из животрепещущих задач современной физики. Электронная теплопроводность определяет тепловые потери плазмы, поэтому вопрос о методах ее подавления, в частности, путем возбуждения плазменной турбулентности, имеет большое практическое значение. Поскольку показателем уровня плазменной турбулентности является электромагнитное излучение на гармониках плазменной частоты, то отсюда следует необходимость разработки методов ее диагностики. Понимание механизмов генерации излучения в тонкой пучково-плазменной системе важно не только для понимания электромагнитной эмиссии, обусловленной эффективной конверсией энергии суб-релятивистского электронного пучка, но и для создания мощных генераторов терагерцового излучения, имеющих важное прикладное значение. Результаты исследования могут оказаться полезными и для астрофизических исследований, в частности, при решении проблем, связанных с существованием сверхгорячих вспышечных петель в коронах Солнца и звезд, а также с природой суб-ТГц излучения солнечных вспышек и радиовсплесков различных типов.

Необходимо особо подчеркнуть и то, что в настоящее время численное моделирование плазменных явлений является бурно развивающимся самостоятельным направлением. Это обусловлено, прежде всего, сложностью и многообразием плазменных процессов, экспериментальное исследование которых не может быть полным без активного применения современных численных методов, описывающих, в частности, пучково-плазменные образования.

В свете сказанного выше актуальность диссертационной работы Анненкова Владимира Вадимовича, посвященной изучению эволюции и механизмов преобразования энергии электронных пучков, инжектируемых в тонкую замагниченную плазму, в излучение, сомнений не вызывает.

2. Новизна исследования и полученных результатов

Кратко сформулируем основные результаты работы, которые были получены впервые и представляются наиболее значимыми.

1. Показано, что инжекция электронного пучка в тонкий слой плазмы с продольной модуляцией плотности приводит к генерации электромагнитных волн подобно дипольной антенне. Предложена аналитическая модель рассматриваемого явления. Полученная оценка эффективности конверсии мощности пучка в мощность излучения составляет 7%, что находится в хорошем согласии с численным моделированием методом частиц в ячейках.
2. Разработана численная модель, позволяющая изучать процесс непрерывной инжекции релятивистского пучка электронов в замагниченную плазму, сопровождаемый генерацией электромагнитного излучения. Доказана реализуемость пучково-плазменной антенны в такой системе и возможность генерации излучения вблизи первой и второй гармоник плазменной частоты.
3. Установлено, что продольная модуляция плотности плазмы может нарастать в результате развития модуляционной неустойчивости, обусловленной инжекцией электронного пучка в плазму.
4. На основе численного моделирования непрерывной инжекции субрелятивистского пучка в условиях лабораторного эксперимента ГОЛ-3 показана возможность генерации электромагнитного излучения на первой и второй гармонике плазменной частоты. Обнаружены режимы, когда около 30% мощности пучка приходится на вторую гармонику.
5. Предложена качественная интерпретация экспериментов по релаксации электронного пучка с энергией 100 кэВ на установке ГОЛ-3. Показано, что даже в сильном магнитном поле излучение связано с гармониками плазменной частоты. Подтверждена эффективность реализации механизма плазменной антенны при параметрах эксперимента. Предложен сценарий формирования отдельных вспышек излучения.
6. Обоснована возможность эффективной генерации излучения вблизи второй гармоники плазменной частоты встречными электронными пучками как разного поперечного профиля, так и одинаковых размеров.

Диссертационная работа позволяет лучше понять особенности плазменных явлений, связанных с распространением электронных пучков в плазме и генерацией ими электромагнитных волн. Теория и результаты численного моделирования могут быть проверены экспериментально. Разработанные методики и подходы будут востребованы международным сообществом не только физиков-плазменщиков, но и астрофизиков. Результаты диссертации могут быть использованы в ряде научных центров ближнего и дальнего зарубежья, а отдельные параграфы включены в учебные курсы по астрофизике.

3. Степень обоснованности и достоверности каждого научного положения, выводов и заключений соискателя, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений и выводов, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием современных методов математического анализа и достаточным пониманием физической сущности

рассматриваемых явлений. Все приводимые результаты сопровождаются строгими доказательствами и необходимыми разъяснениями. Их достоверность подтверждается экспериментальными данными и применением численных методов. Основные положения, выносимые на защиту, докладывались на конференциях и семинарах, опубликованы в открытой печати.

4. Соответствие работы требованиям

Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям (пункты 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней»).

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и списка литературы, включающего 102 наименований. Полный объем составляет 105 страниц и содержит 35 рисунков.

Во Введении приводится обзор литературы, обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи исследования, кратко изложены содержание и основные положения диссертации с указанием их научной новизны и практической значимости.

Глава 1 посвящена описанию генерации электромагнитных волн тонкой пучково-плазменной системы с поперечным размером, сопоставимым с длиной волны излучения. Показано, что в однородной вдоль слоя плазме пучок электронов раскачивает плазменную волну. Резонанс может иметь место только для сверхсветовых волн, которые могут возникнуть в плазме при рассеянии доминирующей пучковой волны на периодическом возмущении ионной плотности. При этом период модуляции плотности плазмы должен не сильно отличаться от длины пучковой волны. Электромагнитное излучение в вакууме может возникнуть только вблизи поверхности плазмы, где происходит преобразование плазменных волн в электромагнитные, т.е. система работает как плазменная антенна. Для проверки предложенной теории проведено моделирование методом частиц в ячейке. Получено хорошее согласие между численными расчетами и аналитическими оценками.

Во второй главе представлены результаты исследования электромагнитного излучения в случае непрерывной инжекции релятивистского электронного пучка через границу плазмы. Показано, что предложенная модель плазменной антенны хорошо описывает электромагнитную эмиссию системы плазма-пучок, ширина которой сравнима с длиной волны излучения. Согласно численным расчетам мощность излучения на первой гармонике плазменной частоты может достигать 5-10% от мощности пучка. В такой системе возможно также слияние доминирующей пучковой волны и ее длинноволнового сателлита, возникающего при рассеянии на периодическом возмущении ионной плотности, что приводит к генерации излучения на второй гармонике с эффективностью 0.4%. Продольная модуляция плотности плазмы формируется вследствие развития модуляционной неустойчивости пучковой волны большой амплитуды. Нелинейная стадия сопровождается захватом колебаний плазмы отдельными ямами плотности, в

которых длина волны совпадает с размерами ямы, что автоматически обеспечивает эффективное излучение вблизи плазменной частоты.

В третьей главе проводится моделирование методом частиц в ячейке непрерывной инжекции в плазму тонкого субрелятивистского электронного пучка в условиях лабораторного эксперимента на открытой магнитной ловушке ГОЛ-3. Обосновывается возможность генерации в этих условиях электромагнитного излучения вблизи плазменной частоты и ее второй гармоники, мощность которого составляет несколько процентов от мощности инжектируемого пучка. Установлены режимы, когда значительная доля электромагнитного излучения генерируется на второй гармонике, что согласуется с результатами эксперимента. Приведены веские указания, что и в случае сильного магнитного поля излучение привязано к гармоникам плазменной частоты. Получены свидетельства в пользу возможности эффективной реализации механизма плазменной антенны в условиях эксперимента. Предложен сценарий формирования отдельных вспышек излучения. Получено хорошее согласие между результатами численного моделирования и экспериментальными данными для излучения максимальной мощности на второй гармонике.

В четвертой главе детально рассматривается механизм генерации электромагнитного излучения на удвоенной плазменной частоте встречными электронными пучками с различной поперечной структурой. Моделирование сталкивающихся пучков низкой плотности с различными поперечными размерами показало, что излучение является узкополосным ($\sim 1\%$), а его мощность достигает нескольких процентов от полной мощности пучков. Исследуемый механизм излучения может работать с той же эффективностью в системе плотных пучков с равными размерами, поскольку поперечные структуры плотности пучков и разные амплитудные профили возбуждения волн возникают автоматически вследствие развития филаментационной неустойчивости.

5. Замечания по диссертации

Среди замечаний хотелось бы отметить следующие.

Автору следовало бы детально обсудить достоинства и недостатки численного моделирования методом частиц в ячейках. В работе встречаются опечатки. В частности, между третьей и четвертой главами имеет место вставка на десять страниц, которая явно повторяет описание почти трех разделов Главы 3. Нередки и повторения. Так, механизм пучково-плазменной антенны детально описывается сразу в двух разделах - 1.1 и 3.2.1. Кроме того, пояснения обозначений для плотности плазмы, массы электрона и элементарного заряда содержится и на стр. 16, и на стр. 76. Иногда встречаются жаргонные выражения. Например, автор вместо понятия концентрации электронов использует плотность плазмы (см. стр. 16). Вызывает некоторое недоумение фраза о связи «с изучением солнечных вспышек II и III рода» (стр.4). Здесь, видимо, идет речь о солнечных радиовсплесках II и III типа.

Однако сделанные замечания и отмеченные недостатки ни в коей мере не умоляют достоинств диссертационной работы В.В. Анненкова ввиду важности и

сложности затронутых проблем. Соискатель прекрасно владеет прикладными методами исследования и умело ими пользуется.

Вывод

Оценивая работу в целом, следует отметить ее высокий теоретический уровень, а также актуальность и перспективность проведенных исследований. Соискатель разработал комплекс программ для численного моделирования плазменных явлений в тонкой пучково-плазменной системе. Автору удалось получить новые, интересные результаты, которые вносят определенный вклад в понимание природы эволюции и эмиссии в пучково-плазменной системе, что может иметь важное прикладное значение.

Автореферат отражает в полной мере содержание работы. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях из перечня ВАК, включенных в библиографическую базу данных Web of Science и Scopus, 2 – в сборниках трудов международных конференций.

Считаю, что диссертация Анненкова Владимира Вадимовича «Электромагнитная эмиссия в тонкой пучково-плазменной системе» является законченной работой, выполнена на высоком научном уровне и отвечает всем требованиям ВАК при Минобрнауки России согласно критериям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а соискатель заслуживает присвоения научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

19.11.2019

Ведущий научный сотрудник
отдела физики Солнца и Солнечной
системы КрАО РАН,

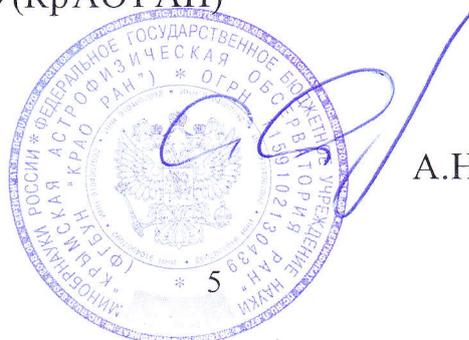
доктор физ.-мат. наук

Телефон: +79780204196

Email: yur@craocrimea.ru

 Ю.Т. Цап

Подпись Ю. Т. Цап заверяю
Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Крымская астрофизическая обсерватория
Российской академии наук» (КрАО РАН)



А.Н. Ростпочина-Шаховская