

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу
Спицына Романа Игоревича

«Исследование механизмов разрушения плазменной кильватерной волны с помощью контроля потоков энергии в численном моделировании», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертационная работа Романа Игоревича Спицына направлена на изучение того, как разрушается плазменная кильватерная волна и чем ограничено время её жизни; исследование проводится с использованием метода контроля потоков энергии в рамках численного моделирования. Актуальность темы связана с необходимостью определения времени существования плазменной волны — одного из ключевых параметров в процессах плазменного кильватерного ускорения. Данный параметр влияет как на область, где за драйвером, создавшим волну, может размещаться ускоряемый пучок частиц, так и на максимальную энергию, до которой этот пучок способен ускориться. В связи с этим изучение механизмов, приводящих к разрушению плазменной волны, представляет собой важную практическую задачу.

В рамках диссертации разработан новый инструментарий численного моделирования, позволяющий определять время жизни плазменной волны в задачах плазменного кильватерного ускорения. Возможности этого инструментария продемонстрированы на двух практически значимых задачах, относящихся к данной области.

Диссертация включает введение, три главы и заключение. Полный объём работы составляет 89 страниц, содержит 30 рисунков и 4 таблицы. Библиографический список насчитывает 44 наименования.

Во введении обоснованы актуальность и выбор темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследования, перечислены положения, выносимые на защиту, а также представлены научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Приведены сведения об апробации результатов, публикациях и личном вкладе автора.

Первая глава посвящена описанию инструментов численного моделирования, применявшихся в исследовании. Рассмотрены принципы работы программного комплекса LCODE, при этом подробно изложен разработанный автором алгоритм численного решения уравнения эволюции лазерного импульса в плазме. Описан метод контроля потоков энергии, дающий возможность отслеживать перенос энергии в расчётной области.

Вторая глава посвящена применению метода контроля потоков энергии к задаче об опрокидывании плазменной волны, вызванном движением ионов

плазмы. Проведено численное моделирование и получены количественные оценки времени жизни плазменной волны применительно к задаче генерации терагерцового излучения в плазменных волнах, создаваемых встречными лазерными импульсами. Кроме того, с помощью численного моделирования и метода контроля потоков энергии исследована зависимость времени жизни плазменной волны от массы ионов плазмы.

Третья глава посвящена применению метода контроля потоков энергии к изучению механизма разрушения слабонелинейной плазменной волны электронным гало в эксперименте AWAKE (ЦЕРН). На основе анализа энергообмена между плазменной волной и электронным гало, выполненного с помощью численного моделирования, установлено, что плазменная волна, созданная узким протонным драйвером, разрушается первыми электронами гало, возвращающимися в плазму.

В заключении приведены основные результаты и выводы работы.

Разработан алгоритм, встроенный в программный комплекс LCODE, который вычисляет эволюцию лазерного импульса в плазме и позволяет рассчитывать долговременную динамику лазерного импульса с сохранением энергетического баланса системы с требуемой точностью.

Численным моделированием подтверждён теоретический вывод: если ограничение времени жизни плазменной волны обусловлено движением ионов плазмы, то время жизни волны пропорционально кубическому корню из отношения массы иона плазмы к его заряду.

Установлено, что в эксперименте AWAKE при низкой плотности плазмы волна, созданная узким протонным драйвером, разрушается из-за того, что первые возвращающиеся в плазму электроны гало, обладающие сравнительно небольшой энергией, сильно подвержены воздействию полей плазменной волны; эти электроны направляются волной в область её ускоряющей фазы, забирая тем самым энергию из волны.

Автор диссертации с помощью разработанного инструментария численного моделирования обнаружил и исследовал эффекты, учёт которых необходим для достижения контролируемого ускорения частиц с малым энергетическим разбросом в экспериментах по плазменному кильватерному ускорению. Предложенный метод контроля потоков энергии в численном моделировании вместе с изученными механизмами разрушения плазменной волны позволяет определять время её жизни. Полученные результаты могут быть использованы при планировании экспериментов по плазменному кильватерному ускорению.

Достоверность полученных результатов обеспечивается косвенным совпадением наблюдаемых в эксперименте процессов и результатов численного моделирования. Материалы диссертационного исследования были представлены в виде докладов на всероссийских и международных конференциях. Результаты и положения диссертации опубликованы в 7-ми научных статьях в рецензируемых

научных журналах, рекомендованных ВАК, что также подтверждает их достоверность.

Все результаты, на основе которых сформулированы защищаемые положения и выводы диссертации, получены автором лично, его вклад в работы по теме диссертации является определяющим.

По работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Граничные условия для электронов на стенках расчетной области выбраны следующим образом: электрон теряет всю энергию и продолжает двигаться в полях плазмы. Не совсем ясно, почему выбраны именно такие, а не, например, просто поглощающие условия.
2. Параметры лазерного импульса и плазмы для эксперимента XCELS и для эксперимента по генерации терагерцового излучения имеют конкретные оптимальные значения, однако не объясняется почему они такие и как были получены.
3. Изображение «гало» на рис. 3.3 ассиметрично, однако в расчетах предполагалась цилиндрическая симметрия. Хотелось бы получить обоснование использования цилиндрически симметричного кода для моделирования такой задачи.
4. Введение в каждую задачу и обзор физических принципов сделаны излишне кратко.

Указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают ценности полученных в ней результатов.

Заключение

Диссертация Спицына Р.И. представляет собой законченную научную работу, направленную на развитие и использование инструментов численного моделирования при изучении процессов плазменного кильватерного ускорения. Все результаты, на основе которых сформулированы выводы диссертации, получены автором лично. Автореферат полностью отражает тему и основные положения диссертации. Содержание диссертационной работы соответствует специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в направлении исследований «Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования взаимодействий пучков заряженных частиц с электромагнитными полями, друг с другом, с молекулами остаточного газа и мишенями» (п.7 паспорта научной специальности). Материалы диссертации опубликованы в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, доложены на международных и российских конференциях. Основные публикации автора по теме работы корректно и полно отражают содержание диссертации и ее основные результаты.

По актуальности, новизне, научной и практической значимости диссертация Р.И.Спицына «Исследование механизмов разрушения плазменной кильватерной волны с помощью контроля потоков энергии в численном моделировании»

соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Спицын Роман Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Отзыв составил:

кандидат физико-математических наук (01.04.21 – Лазерная физика),
научный сотрудник лаборатории фотоядерных реакций
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук
(117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а),
тел. +8 926 0279771
e-mail: ivankrupenin2@gmail.com



Цымбалов Иван Николаевич

08.06.2026 г.

Подпись И.Н. Цымбалова заверяю:
ученый секретарь ИЯИ РАН



Анна Васильевна Вересникова