

На правах рукописи



Спицын Роман Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ
ПЛАЗМЕННОЙ КИЛЬВАТЕРНОЙ ВОЛНЫ
С ПОМОЩЬЮ КОНТРОЛЯ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ
В ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор физико-математических наук, профессор РАН Лотов Константин Владимирович.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КОСТЮКОВ Игорь Юрьевич – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», заведующий отделом.

ЦЫМБАЛОВ Иван Николаевич – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, научный сотрудник.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина».

Защита диссертации состоится «01» июля 2026 г. в 17 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «13» мая 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор РАН

Лотов Константин
Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Ускорители заряженных частиц плотно вошли в жизнь человечества. Сейчас они играют важную роль как в фундаментальной физике в качестве инструмента для изучения строения материи на субъядерных масштабах, так и в прикладных задачах, например как источники пучков частиц для медицины или мощного излучения для рентгенографии.

В современных установках ускорение частиц осуществляется с помощью высокочастотных резонаторов, в которых создается электромагнитная волна определенной моды. Ускоряющее поле в таких металлических структурах имеет верхний предел по величине примерно в сотню мегавольт на метр, связанный с риском электрического пробоя. Получается, что в погоне за более высокими энергиями ускоряемых частиц потребуются строить все более крупные установки, размещая в них нужное количество резонаторов. В то же время, хочется достичь высоких энергий ускоренных пучков на установке как можно меньшего размера. Это стремление применимо как к установкам «большой науки», так и к ускорителям из области прикладных задач и источникам излучения на их основе.

Одним из перспективных путей решения этой проблемы является плазменное кильватерное ускорение, которое уже продемонстрировало свой потенциал [1–3]. Идея его достаточно проста и напоминает серфинг в волнах позади катера на спокойном озере: создаем в невозмущенной среде волну (на воде — катером, а в плазме — лазерным импульсом или пучком заряженных частиц, называемым «драйвером»), и в этой волне начинает приобретать энергию ускоряемый объект (на воде — серфингист, а в плазме — ускоряемый электронный пучок, называемый «витнессом»). Причина интереса к этой идее заключается в достижимых ускоряющих полях. Плазма — уже разрушенная среда, поэтому генерируемые таким образом поля в ней достигают величин в десятки гигаВольт на метр, что не идет в сравнение с полями в металлических высокочастотных резонаторах, на которых успешно функционируют современные ускорители. Кроме того, ускорение частиц в этих полях происходит на коротких масштабах, что делает плазменное кильватерное ускорение потенциальным кандидатом на методы ускорения электронных пучков до энергий в гигаэлектронвольты в компактных установках («комнатных» масштабов).

Для плазменного кильватерного ускорения большую роль играют время жизни плазменной волны и механизмы её разрушения, поскольку ими ограничивается возможная её область, в которую можно поместить и ускорить витнесс, а также величина энергии, которую он сможет набрать, пока волна не разрушится. Кроме того, это интересный вопрос сам по себе, поскольку добавляет понимание новых эффектов в пучково-плазменных взаимодействиях.

Степень разработанности темы исследования

При изучении плазменного кильватерного ускорения большую роль играет численное моделирование. Происходящие в плазме процессы являются быстропотекающими, поскольку драйверы двигаются с околосветовыми скоростями, и происходят на малых пространственных масштабах. Кроме того, не всегда есть возможность непосредственно наблюдать то или иное явление внутри плазменной секции, например, из-за невозможности разместить диагностическое оборудование, не повлияв критически на условия проведения эксперимента. Поэтому численное моделирование позволяет предсказать, что именно можно ожидать от эксперимента с заданными параметрами. Численное моделирование взаимодействия лазерных импульсов, пучков заряженных частиц и плазмы может осуществляться основанными на методе частиц в ячейках (Particle-in-Cell) кодами (PIC-кодами). Однако расчеты этими кодами крайне ресурсоёмки с точки зрения количества требуемых процессорных часов, что влечет за собой еще и финансовые затраты для работы на суперкомпьютерах.

В связи с этим крайне актуально создание и использование при моделировании плазменного кильватерного ускорения специализированных быстрых кодов, основанных на каких-либо упрощениях и приближениях, снижающих на порядки трудоемкость вычислительных задач и значительно уменьшая время расчетов. Тогда появляется возможность еще и быстрого сканирования области параметров эксперимента и поиска наиболее перспективных вариантов, что, несомненно, является важным преимуществом для теоретических расчетов при постановках экспериментальных задач. Одним из таких кодов является разработанный в ИЯФ СО РАН код LCODE [4–6], описанию принципов работы которого посвящена одна из глав данной работы, включающая в себя также подробное описание разработанного автором функционального блока по расчету эволюции лазерных импульсов в плазме.

Целью данной работы является разработка метода определения времени жизни плазменной кильватерной волны и механизмов её опрокидывания и разрушения в нескольких практически важных конфигурациях с помощью численного моделирования.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Дополнить существующий программный код LCODE функциональным блоком, позволяющим рассчитывать эволюцию лазерного импульса в плазме.
2. Разработать метод контроля потоков энергии в численном моделировании.
3. Изучить с помощью метода контроля потоков энергии ограничение времени жизни плазменной волны из-за движения ионов плазмы.

4. Изучить с помощью метода контроля потоков энергии в численном моделировании механизм разрушения слабонелинейной плазменной волны электронным гало, определяющий время жизни плазменной волны в радиально ограниченной плазме.

Научная новизна состоит в разработке и применении нового инструмента численного моделирования, который позволяет определить в задачах плазменного кильватерного ускорения время жизни волны в плазме позади движущегося драйвера.

Теоретическая и практическая значимость

С помощью разработанного инструментария численного моделирования найдены и исследованы эффекты, учет которых необходим для достижения контролируемого ускорения частиц с малым энергоразбросом в экспериментах по плазменному кильватерному ускорению. Кроме того, объяснены дополнительные ограничения на минимальную ширину окна моделирования.

Методология и методы исследования

Численное моделирование проводилось разработанным в ИЯФ СО РАН, в том числе и автором диссертации, квазистатическим кодом LCODE, используемым для моделирования процессов плазменного кильватерного ускорения с пучковыми и лазерными драйверами. Обработка выходных данных осуществлялась в интерактивной среде Jupyter, работающей на основе языка программирования Python.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Контроль потоков энергии в численном моделировании является эффективным инструментом для характеристики энергетических процессов в плазменном кильватерном ускорении и удобным индикатором выхода ошибки расчетов за допустимые пределы.
2. Метод контроля потоков энергии позволяет определить время жизни плазменной волны.
3. Численным моделированием подтвержден теоретический вывод о том, что если ограничение времени жизни плазменной волны связано с движением ионов плазмы, то время жизни волны пропорционально кубическому корню отношения массы иона плазмы к его заряду.
4. Плазменная волна, созданная узким протонным драйвером в эксперименте AWAKE при низкой плотности плазмы ($2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$), затухает за счет того, что вокруг плазмы образуется электронное гало и уносит из волны энергию.
5. За разрушение плазменной волны, созданной узким протонным драйвером, ответственны первые возвращающиеся электроны гало, энергия которых невелика, из-за чего они направляются полями плазменной волны именно в область её ускоряющей фазы, забирая из волны энергию.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается косвенным совпадением наблюдаемых в эксперименте процессов и результатов численного моделирования. Результаты работы докладывались автором и обсуждались на следующих международных конференциях и семинарах:

1. 4-я Европейская конференция по современным методам ускорения «ЕААС — 2019» (Италия, о.Эльба, сентябрь 2019).
2. 38-е собрание коллаборации AWAKE по физическим и экспериментальным вопросам (Швейцария, ЦЕРН, дистанционно, май 2020).
3. Общее собрание коллаборации AWAKE (Швейцария, ЦЕРН, дистанционно, сентябрь 2020).
4. Межинститутский семинар «Новые методы ускорения частиц и экстремальные состояния материи» (Новосибирск, дистанционно, февраль 2021).
5. Семинар ускорительных лабораторий ИЯФ СО РАН (Новосибирск, май 2021).
6. Зимняя школа по физике высоких плотностей энергии РФЯЦ-ВНИИТФ (Снежинск, 25 февраля - 01 марта 2024 года).

Также результаты докладывались соавторами работ на конференциях:

1. 20-я научная школа «Нелинейные волны — 2022» (Нижний Новгород, 07 – 13 ноября 2022 года).
2. 12-й Азиатский форум по ускорителям и детекторам «AFAD — 2023» (Австралия, Мельбурн, дистанционно, 12 – 14 апреля 2023 года).
3. 28-я Международная конференция по ускорителям заряженных частиц «RuPAC'23» (Новосибирск, 11 – 15 сентября 2023 года).
4. 13й Азиатский форум по ускорителям и детекторам «AFAD — 2024» (Тайвань, Синьчжу, дистанционно, 17 – 19 апреля 2024 года).
5. 7-я Международная конференция по экстремальным состояниям вещества и излучения «ICMRE — 2024» (Китай, Ханчжоу, 13 – 17 мая 2024 года).
6. 8-я Международная конференция по сверхбыстрым оптическим явлениям «UltrafastLight — 2024» (Москва, 30 сентября – 02 октября 2024 года).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 работ, из которых 3 публикации в научных журналах из списка ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации [A1–A3], 4 публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в базы Scopus и Web of Science и приравненных к статьям из списка ВАК [A4–A7].

Личный вклад автора в получении результатов, выносимых на защиту, является определяющим. Автор принимал активное участие в поста-

новке задачи, участвовал в разработке применяемых в работе численных кодов, проводил численное моделирование и анализ полученных результатов, а также участвовал в подготовке публикаций и докладов. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в его опубликованные работы:

в статьях [A1], [A2] и [A3] — в разработке и реализации численной схемы для решения уравнения эволюции лазерного импульса в плазме;

в статье [A4] — в проведении численного моделирования, анализе влияния движения ионов плазмы на время жизни плазменной волны, разработке метода определения времени жизни плазменной волны в численном моделировании и установлению зависимости величины времени жизни волны от отношения массы иона плазмы к его заряду;

в статье [A5] — в проведении численного моделирования, анализа динамики электронного гало и процессов его энергообмена с плазменной кильватерной волной, а также установления механизма её разрушения;

в статьях [A6] и [A7] — в объяснении механизма затухания плазменной волны вследствие её взаимодействия с электронами гало.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 89 страниц, включая 30 рисунков. Список литературы содержит 44 наименования.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются цель и задачи, решению которых посвящена работа.

Первая глава посвящена описанию принципов функционирования программного комплекса LCODE, а конкретно — двумерной версии кода, которая моделирует процессы в плоской декартовой или осесимметричной геометрии.

В подразделах **1.1.1** и **1.1.2** раздела **1.1** описаны общие принципы построения кода LCODE и его блоков, взятые из источников [4–6]. Подраздел **1.1.3** содержит описание реализованного в виде функционального блока кода LCODE оригинального лазерного решателя, разработанного автором диссертации [7, A1]. Он основан на численном решении уравнения эволюции огибающей вектор-потенциала лазерного импульса [8] методом конечных разностей с последующим решением получающейся системы уравнений методом матричной прогонки [9]. Это позволяет встроить данный алгоритм в существующую архитектуру кода программного комплекса LCODE, сохраняя его преимущество в быстродействии и возможности распараллеливания.

В разделе **1.2**, не содержащем оригинальных результатов автора, вводится и объясняется понятие потоков энергии Ψ в сопутствующем окне, впервые появившееся в работе [10]. Предлагаемый метод контроля потоков энергии позволяет проследить, как энергия перемещается по области моделирования, и обнаружить момент опрокидывания плазменной волны за счет разного учета кинетической энергии образующихся быстрых плазменных электронов при вычислении потока кинетической энергии в гидродинамической модели описания плазмы и при прямом суммировании энергии частиц, пересекающих выбранное сечение окна моделирования.

Раздел **1.3** посвящен применению метода контроля потоков энергии для определения точности квазистатического моделирования лазер-плазменного взаимодействия, подробно изложенному в работах [A2, A3], в которых использовался разработанный автором диссертации лазерный решатель. С помощью метода контроля потоков энергии можно определять требуемые параметры расчета для достижения заданной точности сохранения энергии в моделируемой системе. Кроме того, установлено, что для квазистатического моделирования истощения лазерного импульса даже в модели огибающей требуется использовать малый шаг по продольной координате, чтобы на масштабе длины волны лазерного импульса оказывалось много узлов сетки моделирования.

Вторая глава основана на работе [A4] и посвящена применению метода контроля потоков энергии к задаче по опрокидыванию плазменной волны, вызванному движением ионов плазмы. Если из-за движения ионов их плотность оказывается сильно возмущенной, происходит пересечение траекторий частиц плазмы, то есть плазменная волна опрокидывается и, как следствие, затухает [11–14].

Раздел **2.1** содержит описание возможной постановки эксперимента в Институте лазерной физики СО РАН по генерации терагерцового излучения в плазменных волнах встречных аксиально симметричных соосных гауссовых лазерных импульсов, сформулированное коллективом сотрудников ИЯФ СО РАН, изучающих плазменные методы генерации терагерцового излучения.

В разделе **2.2** описано применение автором диссертации метода контроля потоков энергии для определения времени жизни плазменной волны. Для постановки эксперимента по генерации терагерцового излучения получены оценки, накладывающие ограничение на возможную временную задержку между лазерными импульсами, встречающимися в плазме из водорода, гелия и пятикратно ионизованного азота.

В разделе **2.3** содержатся результаты проведенного автором диссертации исследования зависимости времени жизни плазменной волны от массы ионов плазмы с помощью численного моделирования и его сравнения с существующей теоретической моделью, описанной в работах [11, 12]. Обнаружена корреляция между качественным изменением поведения ионов

в приосевой области с резким ростом ионной плотности на оси и моментом опрокидывания плазменной волны. Зависимость времени жизни плазменной волны пропорциональна кубическому корню из отношения массы иона плазмы m_i к его заряду q_i (рисунок 1), однако систематического исследования в этом направлении не проводилось, поэтому этот результат не выносится как защищаемое положение.

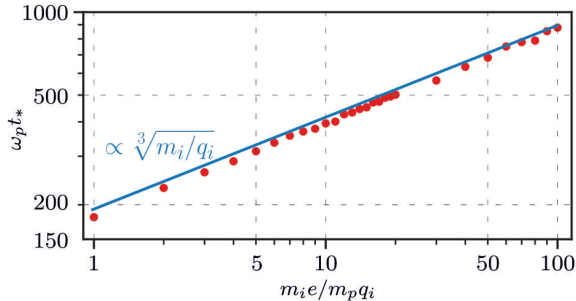


Рисунок 1 — Момент опрокидывания волны t_* в зависимости от отношения массы иона m_i к его заряду q_i (в единицах отношения m_p/e для протона). Синяя линия соответствует теоретической оценке (адаптация формулы (33) из работы [12]), красные точки получены из результатов численного моделирования

Третья глава основана на работе [A5] и посвящена применению метода контроля потоков энергии при изучении механизма разрушения плазменной волны электронным гало в эксперименте AWAKE.

В разделе 3.1 приводится краткое описание эксперимента AWAKE по ускорению электронов в кильватерной волне, созданной самомодулированным протонным драйвером, что изложено в работе [1].

Раздел 3.2 основан на выполненных сотрудниками коллаборации AWAKE работах [15] и [A6], посвященных сравнению результатов диагностики поперечного размера протонного пучка в эксперименте AWAKE с численным моделированием, а также на работе [A7], в которой изучалась эффективность ускорения электронов в зависимости от положения лазерного импульса относительно протонного драйвера. В этих работах согласие экспериментальных результатов и численного моделирования появилось только после корректного учета влияния электронного гало на плазменную волну.

Раздел 3.3 посвящен анализу формирования и динамики электронного гало. Пересечение траекторий электронов плазмы не всегда приводит к опрокидыванию плазменной волны (рисунок 2). Если пересечение траекторий электронов происходит на «гребне» плотности плазмы, когда фронт

плазменной волны оказывается сильно искривленным, эти электроны плазмы получают достаточную добавку к поперечному импульсу и энергии, чтобы вылететь из плазмы (рисунок 2(a)).

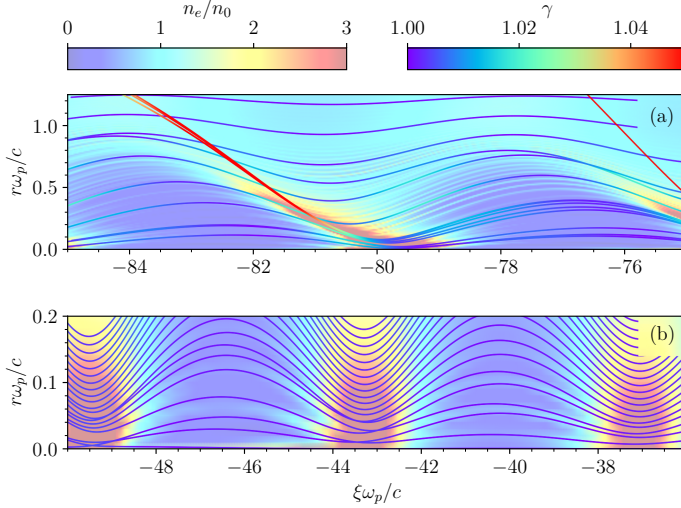


Рисунок 2 — Траектории электронов плазмы на фоне электронной плотности n_e . (a) — Опрокидывание плазменной волны, сопровождающееся появлением электронов гало. (b) — Пересечения траекторий, которые не приводят к появлению быстрых электронов, способных покинуть плазму. Цвет линии траектории соответствует релятивистскому фактору γ электрона

Видно, что электроны, образующие гало вокруг плазменного столба, с некоторого момента начинают вылетать пучками из определенной фазы каждого периода плазменной волны. Поскольку за счет вылета электронов плазма заряжается положительно, образующееся электрическое поле притягивает эти вылетевшие электроны обратно, и они возвращаются в плазму в весьма широком интервале по продольной координате (рисунок 3(a)). Корреляции между точкой вылета и точкой возвращения в плазму не наблюдается, а пройденное снаружи плазмы расстояние зависит от энергии ΔW_{wb} , полученной электроном в приосевой области (рисунок 3(b)).

Раздел 3.4 посвящен анализу энергообмена между плазменной волной и электронами гало.

В подразделе 3.4.1 проводится анализ энергетических процессов в электронном гало. Впервые вылетающие из приосевой области электроны плазмы забирают некоторую энергию $\Delta W_{wb} > 0$ из плазменной волны и при последующих пролетах сквозь плазму могут как изъять из плазменной волны еще некоторое количество энергии $\Delta W_{ee} > 0$, если попадут в

ускоряющую фазу волны, так и вернуть часть энергии $\Delta W_{ee} < 0$, если окажутся в замедляющей фазе. Сопоставление величины изменения энергии при таких пролетах с продольной координатой, в которой пролетающий электрон пересекает ось, и последующее суммирование этих изменений энергии от начала окна моделирования до заданной продольной координаты ξ позволяет получить величину $\Upsilon_{ee}(\xi)$. Аналогичное суммирование по энергиям ΔW_{wb} дает величину $\Upsilon_{wb}(\xi)$. В сумме они образуют величину $\Upsilon_{\Sigma}(\xi)$, характеризующую энергию, которую электроны гало приобретают из плазменной волны (рисунок 4). Видно, что характер накопления энергии электронами гало необычен: первые возвращающиеся в плазму электроны преимущественно забирают из плазменной волны энергию, будто бы некая сила толкает эти электроны именно в ускоряющую фазу волны, несмотря на ожидаемое в среднем равномерное распределение возвращающихся электронов по всем фазам волны (рисунок 3(a)).

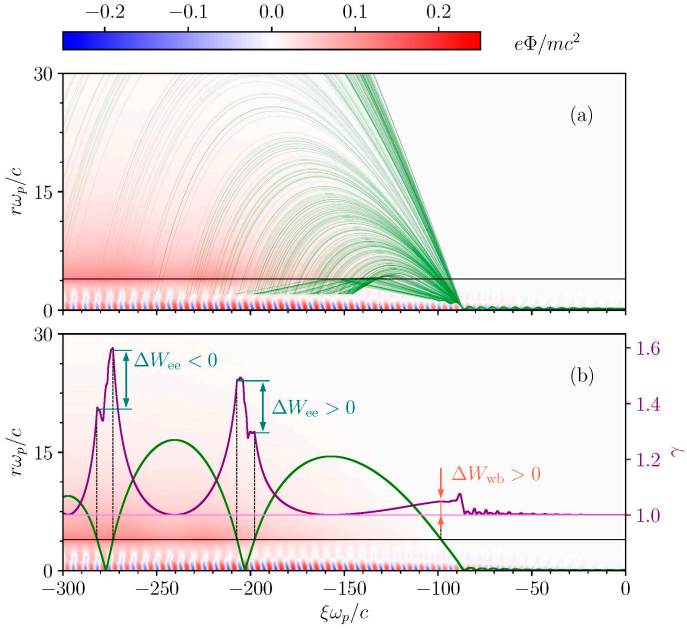


Рисунок 3 — Характерные траектории электронов гало на фоне кильватерного потенциала Φ , показанного цветом. (a) — Пример пучка траекторий электронов гало, появившихся в одном периоде плазменной волны. Траектории не дорисованы до конца, чтобы была видна фаза кильватерного потенциала, в которую возвращаются электроны. (b) — Траектория электрона гало (зеленая линия) и его релятивистский фактор $\gamma(\xi)$ (фиолетовая линия). Черные горизонтальные линии соответствуют границе плазмы

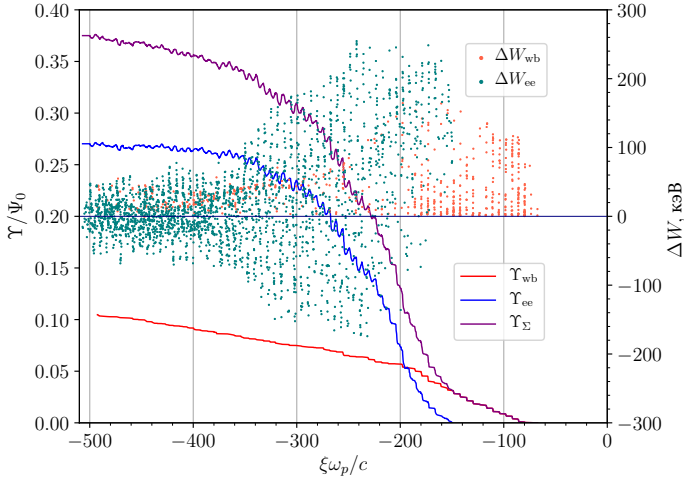


Рисунок 4 — Энергообмен с плазменной волной с точки зрения электронного гало. Красные точки — величина энергии ΔW_{wb} , которую уносит из плазменной волны электрон, вылетающий впервые после опрокидывания волны. Бирюзовые точки — величина энергии ΔW_{ee} , которую забирают из волны или отдают в волну возвращающиеся электроны во всех последующих пролетах через плазму. Красная, синяя и фиолетовая линия — величины Υ_{wb} , Υ_{ee} и Υ_{Σ} , соответственно

В подразделе **3.4.2** проводится анализ энергетических процессов в плазменной волне. Разность между полным потоком энергии Ψ_{Σ} и потоком энергии плазменной волны Ψ_{wf} определяет величину потерь энергии плазменной волной Ψ_{loss} , которая достаточно хорошо качественно и количественно совпадает с темпом накопления энергии электронами гало Υ_{Σ} (рисунок 5), что подтверждает непосредственную роль электронов гало в разрушении плазменной волны.

Раздел **3.5** посвящен объяснению механизма разрушения плазменной волны электронами гало. Изучение траекторий первых возвращающихся электронов гало, влетающих в плазму под примерно одинаковыми углами α (рисунок 6), показывает, что электроны, которые должны были бы попасть в присоевой области в ускоряющую фазу поля плазменной волны, фокусируются полями волны как можно ближе к окрестности его максимального значения. Напротив, электроны, которые должны были бы попасть в область максимального замедляющего поля, отклоняются в стороны от этой области.

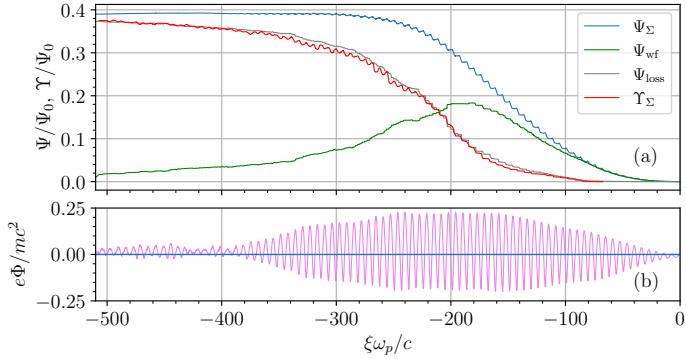


Рисунок 5 — Поток энергии различных частей системы как функции продольной координаты ξ . Серая линия соответствует потерям энергии плазменной волной Ψ_{loss} , а красная — изменению энергии электронного гало Υ_Σ . Для оценки масштабов по продольной координате ξ ниже приведен кильватерный потенциал Φ на оси

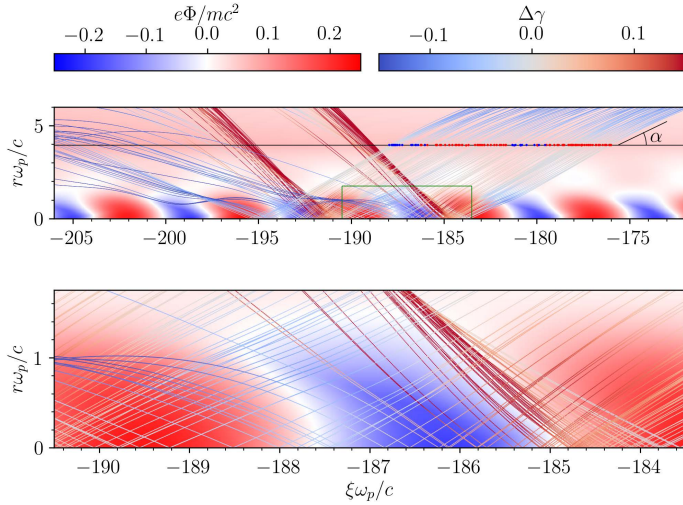


Рисунок 6 — Траектории электронов, влетающих в плазму под одинаковым углом α . Нижнее изображение — выделенный зелёной рамкой фрагмент верхнего. Цветной фон соответствует кильватерному потенциалу Φ . Черная линия — граница плазмы. Красные и синие точки на траекториях в месте их пересечения границы плазмы — пометки ускоренных или замедленных электронов, а цвет траектории — изменение $\Delta\gamma$ релятивистского фактора электрона относительно его значения на входе в плазму

Анализ траекторий электронов гало и их энергии показывает, что первые возвращающиеся в плазму электроны гало, во-первых, влетают в плазму под малыми углами относительно границы плазмы, во-вторых, имеют относительно малую энергию, и в-третьих, действительно только забирают из волны энергию. Под большими же углами электроны, во-первых, влетают в плазму гораздо позднее, и во-вторых, с большей энергией. Объясняется это тем, что большую энергию на влете в плазму имеют электроны, которые изначально вылетели из плазмы с большой энергией и достаточно долго двигались снаружи плазмы. Поэтому возвращаются они в плазму позднее, влетают в неё под большими углами и оказываются достаточно высокоэнергичными, чтобы пролететь приосевую область почти по прямолинейным траекториям, практически не отклоняясь полями волны (рисунок 7(a)). Первые же возвращающиеся в плазму электроны гало имеют относительно небольшую энергию, которой им хватило только для достижения границы плазмы после опрокидывания волны. Из-за этого они сильно подвержены влиянию электромагнитных полей плазменной волны, а потому преимущественно «скатываются» в область максимального ускоряющего поля (рисунок 7(b)), забирая из волны энергию и, тем самым, разрушая её.

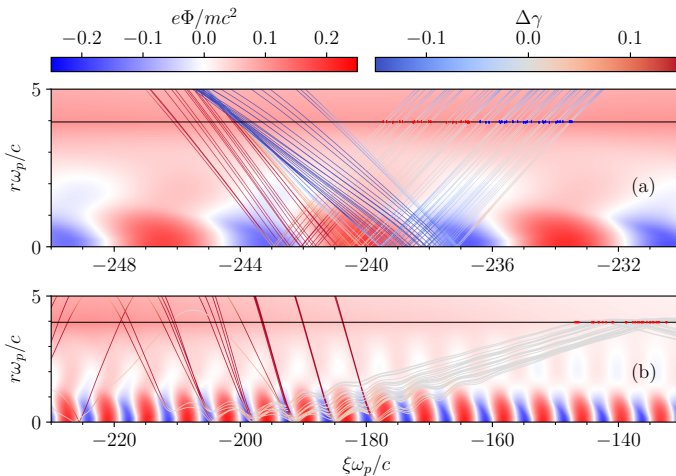


Рисунок 7 — Траектории высокоэнергичных (a) и низкоэнергичных (b) электронов гало, влетающих в плазму под примерно одинаковыми углами. Цветной фон соответствует кильватерному потенциалу Φ . Черная горизонтальная линия — граница плазмы. Красные и синие точки на траекториях в месте их пересечения границы плазмы — пометки ускоренных или замедленных электронов, а цвет траектории — изменение $\Delta\gamma$ релятивистского фактора электрона относительно его значения на входе в плазму

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Заключение

С помощью численного моделирования квазистатическим кодом LCODE изучены ограничения времени жизни плазменной волны и механизмы её разрушения в нескольких практических значимых конфигурациях. Эти вопросы очень критичны для задач плазменного кильватерного ускорения, поскольку проясняют, как долго плазменная волна будет существовать в конкретной точке плазмы, что важно для определения ограничений возможной области позади драйвера, в которой можно разместить витнес для его ускорения. Код LCODE был дополнен функциональным блоком, вычисляющим эволюцию лазерного импульса в плазме в модели огибающей вектор-потенциала, что позволило моделировать лазерные драйверы, создающие плазменную волну и изменяющиеся в ходе лазер-плазменного взаимодействия. Важным инструментом в исследовании стал предложенный метод контроля потоков энергии в окне моделирования, с помощью которого можно отслеживать, куда и каким образом передается энергия в процессах, связанных с плазменной волной, а также обнаруживать появление быстрых электронов, которые при опрокидывании плазменной волны выбиваются из коллективного движения. Метод продемонстрировал, что встроенный в код LCODE лазерный решатель при условии разрешения лазерной длины волны продольным шагом сетки способен корректно моделировать истощение лазерных импульсов в плазме.

В частности, с помощью такого метода было изучено опрокидывание плазменной волны из-за движения ионов плазмы. Результаты численного моделирования позволили оценить время жизни кильватерной волны до разрушения её этим эффектом. Полученный результат имеет практическую важность для экспериментальной проверки идеи по генерации терагерцового излучения плазменными кильватерными волнами встречных лазерных импульсов, поскольку ограничивает возможную временную задержку или рассинхронизацию между двумя встречными лазерными импульсами.

Другим изученным механизмом, ограничивающим время жизни плазменной волны, стало взаимодействие электронного гало со слабонелинейной плазменной волной, важное для эксперимента AWAKE. С помощью метода контроля потоков энергии был изучен энергообмен между электронами гало и плазменной волной и установлено, что энергия из плазменной волны уносится пролетающими сквозь плазму электронами гало. При этом плазменная волна оказывает линзирующий эффект на пролетающие в приосевой области электроны: она сама направляет их в ускоряющее поле, отклоняя от замедляющего. Непосредственно за разрушение волны

ответственны именно первые возвращающиеся обратно в плазму электроны. Их энергия недостаточно высока, чтобы игнорировать линзирование, поэтому они преимущественно забирают из плазменной волны энергию в процессе ускорения, тем самым разрушая её. Этот эффект также накладывает дополнительное требование на размер окна моделирования: узкое окно не просто исключает электронное гало, а изменяет динамику кильватерной волны, поэтому нельзя пренебрегать этим эффектом в численном моделировании.

Цитированная литература

- [1] E. Adli [и др.] / Acceleration of electrons in the plasma wakefield of a proton bunch. - Текст : электронный // Nature. - 2018. - Vol.561. - P. 363–367. - URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0485-4>. - Дата публикации: 29.08.2018.
- [2] C. Aniculaesei [и др.] / The acceleration of a high-charge electron bunch to 10 GeV in a 10-cm nanoparticle-assisted wakefield accelerator. - Текст: электронный // Matter and Radiation at Extremes. - 2024. - Vol.9. - P. 014001. - URL: <https://doi.org/10.1063/5.0161687>. - Дата публикации: 15.11.2023.
- [3] I. Blumenfeld, C. Clayton, F. Decker [и др.] / Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator. - Текст : электронный // Nature. - 2007. - Vol.445. - P. 741–744. - URL: <https://doi.org/10.1038/nature05538>. - Дата публикации: 15.02.2007.
- [4] K.V. Lotov / Simulation of ultrarelativistic beam dynamics in plasma wake-field accelerator. - Текст : электронный // Physics of Plasmas. - 1998. - Vol.5. - P. 785–791. - URL: <https://doi.org/10.1063/1.872765>. - Дата публикации: 01.03.1998.
- [5] K.V. Lotov / Fine wakefield structure in the blowout regime of plasma wakefield accelerators. - Текст : электронный // Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams. - 2003. - Vol.6. - P. 061301. - URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.6.061301>. - Дата публикации: 06.06.2003.
- [6] A.P. Sosedkin and K.V. Lotov / LCODE: A parallel quasistatic code for computationally heavy problems of plasma wakefield acceleration. - Текст : электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2015. - Vol.829. - P. 350–352. - URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.12.032>. - Дата публикации: 23.12.2015.

- [7] Р.И. Спицын / Численная реализация квазистатической модели лазерного драйвера для плазменного кильватерного ускорения. - Текст : электронный // Магистерская диссертация, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ). - Новосибирск, 2016. - URL: <https://lib.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/11450>. - Дата публикации: 01.11.2016.
- [8] P. Mora, T.M. Antonsen / Kinetic modeling of intense, short laser pulses propagating in tenuous plasmas. - Текст : электронный // Physics of Plasmas. - 1997. - Vol.4. - P. 217–229. - URL: <https://doi.org/10.1063/1.872134>. - Дата публикации: 01.01.1997.
- [9] А.А. Самарский, Е.С. Николаев / Методы решения сеточных уравнений. - Текст : непосредственный // Москва : Наука, 1978. – 592 с.
- [10] K.V. Lotov / Blowout regimes of plasma wakefield acceleration. - Текст : электронный // Physical Review E. - 2004. - Vol.69. - P. 046405. - URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.046405>. - Дата публикации: 27.04.2004.
- [11] L.M. Gorbunov, P.Mora, and A.A. Solodov / Plasma ion dynamics in the wake of a short laser pulse. - Текст : электронный // Physical Review Letters. - 2001. - Vol.86. - P. 3332. - URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.3332>. - Дата публикации: 09.04.2001.
- [12] L.M. Gorbunov, P.Mora, and A.A. Solodov / Dynamics of a plasma channel created by the wakefield of a short laser pulse. - Текст : электронный // Physics of Plasmas. - 2003. - Vol.10. - P. 1124–1134. - URL: <https://doi.org/10.1063/1.1559011>. - Дата публикации: 01.04.2003.
- [13] J. Vieira, R.A. Fonseca, W.B. Mori [и др.] / Ion motion in selfmodulated plasma wakefield accelerators. - Текст : электронный // Physical Review Letters. - 2012. - Vol.109. - P. 145005. - URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.145005>. - Дата публикации: 05.10.2012.
- [14] J. Vieira, R.A. Fonseca, W.B. Mori [и др.] / Ion motion in the wake driven by long particle bunches in plasmas. - Текст : электронный // Physics of Plasmas. - 2014. - Vol.21. - P. 056705. - URL: <https://doi.org/10.1063/1.4876620>. - Дата публикации: 22.05.2014.
- [15] M. Turner [и др.] / Experimental Observation of Plasma Wakefield Growth Driven by the Seeded Self-Modulation of a Proton Bunch. - Текст : электронный // Physical Review Letters. - 2019. - Vol.122. - P. 054801. - URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.054801>. - Дата публикации: 08.02.2019.

**Список работ, опубликованных автором по теме
диссертации в рецензируемых научных журналах,
рекомендованных ВАК:**

- [A1] Tuv P.V., Spitsyn R.I., Lotov K.V. / Advanced quasistatic approximation. – Текст : электронный // Plasma Physics Reports. – 2023. – Vol.49. – nr. 2. – P. 229–238. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063780X22601249>. – Дата публикации: 17.04.2023.
- [A2] M.S. Dorozhkina, K.V. Baluev, D.D. Kutergin [и др.] / Laser Wakefield Acceleration in a Plasma Channel. – Текст : электронный // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – Vol.50. – Suppl. 6. – P. S715–S723. – URL: <https://doi.org/10.3103/S1068335623180057>. – Дата публикации: 07.10.2023
- [A3] Kutergin D.D., Lotov I.K., Minakov V.A. [и др.] / Plasma Wakefield Acceleration Driven by XCELS Laser Pulse. – Текст : электронный // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2024. – Vol.21. – nr. 3. – P. 316–321. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477124700183>. – Дата публикации: 07.06.2024.
- [A4] R.I. Spitsyn, I.V. Timofeev, A.P. Sosedkin, and K.V. Lotov / Characterization of wavebreaking time and dissipation of weakly nonlinear wakefields due to ion motion. – Текст : электронный // Physics of Plasmas. – 2018. – Vol. 25. – nr. 4. – P. 103103. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.5048549>. – Дата публикации: 03.10.2018.
- [A5] R.I. Spitsyn, K.V. Lotov / Wakefield decay in a radially bounded plasma due to formation of electron halo. – Текст : электронный // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2021. – Vol.63. – nr. 5. – P. 055002. – URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/abe055>. – Дата публикации: 19.03.2021.
- [A6] A.A. Gorn, M. Turner, E. Adli [и др.] / Proton beam defocusing in AWAKE experiment: comparison of simulations and measurement. – Текст : электронный // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020. – Vol. 62. – nr. 12. – P. 125023. – URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/abc298>. – Дата публикации: 06.11.2020.
- [A7] J. Chappell, E. Adli [и др.]. / Experimental study of long timescale dynamics of a plasma wakefield driven by a self-modulated proton bunch. – Текст : электронный // Physical Review Accelerators and Beams. – 2021. – Vol.24. – nr. 1. – P. 011301. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.011301>. – Дата публикации: 05.01.2021.

Спицын Роман Игоревич

**Исследование механизмов разрушения
плазменной кильватерной волны
с помощью контроля потоков энергии
в численном моделировании**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 13.04.2026.

Подписано в печать 14.04.2026.

Формат 60×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 7

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11