

На правах рукописи



Горн Александр Андреевич

**ОСОБЕННОСТИ КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРЕНИЯ
С ПРОТОННЫМ ДРАЙВЕРОМ В РАДИАЛЬНО
ОГРАНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2022

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:

БОЧКАРЕВ Сергей Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, высококвалифицированный старший научный сотрудник.

СТАРОДУБЦЕВ Михаил Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», заместитель директора учреждения по научной работе.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур.

Защита диссертации состоится «14» декабря 2022 г. в «16:30» часов 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://www.inp.nsk.su/images/Gorn_disser.pdf.

Автореферат разослан «27» октября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Багрянский Петр Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Достижение высоких энергий в современных ускорителях упирается в их размер, а значит, в их высокую стоимость. Одно из возможных решений этой проблемы было найдено и описано в 1979 году [1]. Авторы Dawson и Tajima предложили концепцию первого *плазменного ускорителя*, в котором источником энергии, или драйвером, служит лазерный импульс. Короткий лазерный импульс входит в плазму и расталкивает ее электроны в результате действия поперечной пондеромоторной силы. При этом ионы плазмы смещаются незначительно. Вдоль пути лазерного импульса образуется положительно заряженный ионный канал. После прохождения лазерного импульса электроны плазмы устремляются обратно к положению равновесия, притягиваясь ионным каналом. Частицы проходят центр канала, вновь разлетаются, притягиваются обратно и так далее. Так возбуждаются колебания, вызванные нескомпенсированным пространственным зарядом в плазме. За лазерным импульсом формируются области чередующегося отрицательного и положительного заряда, вследствие чего возникают продольные поля, называемые плазменной кильватерной волной.

В настоящее время такая схема ускорения реализована во множестве экспериментальных установок по всему миру, а энергия электронов в таких ускорителях достигла величины, достаточной для применения в лазерах на свободных электронах.

Позднее Pisin Chen и его соавторы показали [2], что для возбуждения кильватерной волны в плазме можно с тем же успехом использовать сгустки заряженных частиц, однако для этого они должны быть достаточно короткими по сравнению с плазменной длиной волны (оптимальное значение — около четверти длины волны) и иметь ультрарелятивистскую энергию, чтобы обеспечить стабильное ускорение. Так получила свое начало ветвь плазменного кильватерного ускорения с электронным драйвером. В настоящее время это направление получило большое развитие.

Протонные пучки долгое время не рассматривались в качестве драйверов, так как было не ясно, каким образом создать достаточно короткий ультрарелятивистский протонный сгусток.

Несмотря на все трудности в создании коротких протонных сгустков, в 2009 году в статье [3] A. Caldwell и соавторы показали все преимущества использования подобного пучка в качестве драйвера, предложив эксперимент по кильватерному ускорению на базе пучка из Большого Адронного Коллайдера (БАК) в ЦЕРН. В статье не описывалось, как именно продольно сжать 7.5-сантиметровый пучок протонов из БАК до 100 мкм, и за неимением разумных решений от этого варианта со временем отказались.

Однако годом позже был предложен способ получения последовательности коротких протонных микросгустков в плазме под действием самомодуляционной неустойчивости. Оказалось, что длинный протонный пучок с модулированным на плазменной частоте продольным профилем плотности начинает самопроизвольно разбиваться в плазме на микросгустки, которые способны резонансно возбудить кильватерную волну, пригодную для последующего ускорения в ней электронов. Авторы идеи плазменного кильватерного ускорителя с протонным драйвером совместно с коллегами из ЦЕРН решили для начала проверить эту идею и провести первые эксперименты с пучком не из БАК, а из Суперпротонного Синхротрона (SPS). Это решение было одобрено в ЦЕРН, и таким образом была начата работа над проектом первого плазменного кильватерного ускорителя электронов с протонным драйвером AWAKE (The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment). Актуальность данного исследования продиктована важностью работ над этим экспериментом.

Степень разработанности темы исследования

Вне зависимости от схемы ускорения, ключевое место в развитии новых методов ускорения занимает численное моделирование. Прежде всего, для расчета взаимодействия лазерного импульса или пучка заряженных частиц с плазмой используются кинетические коды общего назначения, основанные на методе частиц в ячейках, так называемые full particle-in-cell (full-PIC) коды. Расчеты в full-PIC кодах крайне ресурсоемки. Так одно полномасштабное моделирование AWAKE потребовало 22 млн процессорных часов, при этом затраты на одну лишь электроэнергию составили по оценкам как минимум 220000 евро. По этой причине крайне актуальным является создание и использование кодов, содержащих какие-либо упрощающие предположения. Чаще всего таким образом рассчитываются задачи, обладающие симметрией, что позволяет эффективно снизить трудоемкость задачи за счет понижения ее размерности. Наряду с упрощенной геометрией понизить размерность задачи можно за счет того, что в экспериментах с ультрарелятивистскими драйверами пучок заряженных частиц эволюционирует на порядки медленнее, чем плазма. В этом случае применимо квазистатическое приближение. Оно на порядки сокращает время моделирования без потери основных физических эффектов, описывающих плазменное кильватерное ускорение. В данный момент существует несколько программ, использующих данное упрощение, в том числе LCODE, разработанный нашим коллективом в ИЯФ СО РАН.

Целью данной работы является поиск и изучение физических эффектов, оказывающих влияние на ускорение электронов в радиально ограниченной плазме с помощью длинного пучка заряженных частиц. Рассматриваемые эффекты специфичны для этого случая, а также играют ключевую роль в получении достоверных результатов моделирования.

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

1. Измерить начальные параметры протонного пучка в эксперименте AWAKE с наибольшей возможной точностью, с целью минимизации ошибки во входных данных численных расчетов;
2. Найти и изучить основные физические эффекты, возникающие при взаимодействии длинного ультрарелятивистского пучка заряженных частиц с резким передним фронтом с радиально ограниченной плазмой, в контексте плазменного кильватерного ускорения;
3. Исследовать совокупное влияние конечного радиального размера плазмы и наличия в ней продольных неоднородностей плотности на инжекцию электронного пучка в кильватерную волну;
4. Выполнить сравнение результатов численного моделирования с измерениями, проведенными в ходе эксперимента AWAKE, и установить критерии, которым должен удовлетворять численный код и расчет для корректного моделирования плазменного кильватерного ускорителя с драйвером в виде длинного пучка заряженных частиц.

Научная новизна

1. Впервые проведено сравнение данных первого в мире эксперимента по кильватерному ускорению с протонным драйвером AWAKE с результатами численного моделирования и достигнуто их количественное согласие.
2. Изучена реакция радиально ограниченной плазмы на ультрарелятивистский пучок заряженных частиц в широком диапазоне плотности плазмы. Результаты этого исследования повлияли на выбор схемы инжекции в эксперименте AWAKE.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты работ [4, 5] позволили объяснить оптимальную схему инжекции электронов в плазму в эксперименте AWAKE, с помощью которой удалось добиться их воспроизводимого ускорения [6]. Учет изученных в ходе этих работ физических эффектов, а также измерений протонного пучка до попадания в плазменную секцию [7] позволил добиться численного согласия моделирования с измерениями протонного пучка, проведенными в ходе эксперимента [8], что свидетельствует о применимости квазистатических кодов для моделирования кильватерных ускорителей с протонным драйвером.

Методология и методы исследования

Для выполнения работы используется квазистатический 2D3V код LCODE, основанный на численном решении системы уравнений Максвелла методом частиц в ячейках (particle-in-cell, PIC).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для осесимметричной системы, состоящей из радиально ограниченной плазмы и ультрарелятивистского пучка, возможно в линейном по амплитуде поля приближении построить гидродинамическую аналитическую модель. Модель обеспечивает корректный расчет электрического и магнитного поля вплоть до плотности плазмы порядка пиковой плотности пучка, что по сравнению с аналитикой для бесконечной плазмы расширяет нижнюю границу применимости модели по плотности плазмы примерно на порядок;
2. При взаимодействии положительно заряженных драйверов с плазмой в плазме в среднем преобладает положительный радиальный градиент кильватерного потенциала, что приводит к дефокусировке ультрарелятивистских электронных сгустков, движущихся вблизи оси драйвера в плазме с плавно нарастающей, но на порядок меняющейся плотностью в продольном направлении. Этот факт исключил осевую инжекцию ускоряемого электронного сгустка в плазму в эксперименте AWAKE;
3. Электронное гало вокруг плазменного столба образуется в случае положительно заряженных драйверов в результате пересечения траекторий плазменных электронов, обладающих достаточным для вылета за пределы плазмы радиальным импульсом, а в случае отрицательно заряженных драйверов — также в результате частичной компенсации заряда ионов плазмы зарядом драйвера;
4. Электроны плазменного гало создают в областях, ограниченных по радиусу их траекториями, отрицательный радиальный градиент кильватерного потенциала, являющийся фокусирующим для ультрарелятивистских электронов, движущихся вблизи границы плазмы сонаправленно с драйвером;
5. Учет плазменного электронного гало необходим для достижения количественного согласия моделирования и эксперимента;
6. Радиальное распределение протонов после самомодуляции в эксперименте AWAKE имеет центральную и периферийную части. Размер и форма центральной части определяется невозмущенной частью протонного пучка и зависит преимущественно от его начального эмиттанса. Периферийная же часть образуется в ходе самомодуляции, и среди всех параметров, описывающих пучок, ее форма наиболее чувствительна к его поперечному размеру на входе в плазменную секцию;
7. Согласно сравнению результатов моделирования эксперимента AWAKE кодом LCODE с диагностическими измерениями квазистатический осесимметричный код позволяет предсказывать процесс самомодуляции в подобных системах с относительной точностью до нескольких процентов.

Степень достоверности работы

Достоверность полученных результатов обеспечивается достижением стабильного и воспроизводимого ускорения электронов в эксперименте AWAKE [6], а также согласием результатов проведенного исследования с экспериментальными измерениями и работами других авторов [8–10]. Достоверность также подтверждается публикациями результатов работы в рецензируемых зарубежных журналах.

Апробация результатов

Основные результаты работы вошли в выпускную квалификационную работу аспиранта [11] и докладывались на следующих конференциях:

1. 47-я конференция Европейского Физического Сообщества (EPS) по физике плазмы, 21–25 июня 2021;
2. Конкурс молодых ученых ИЯФ СО РАН, 19.05.2021;
3. 4-й Семинар по Новым Концепциям Ускорителей (ЕААС), о. Эльба, Италия, сентябрь 2019;
4. Собрание коллаборации AWAKE, ЦЕРН, Швейцария, 09.09.2019;
5. Собрание коллаборации AWAKE, ЦЕРН, Швейцария, 02.04.2019;
6. Конкурс молодых ученых ИЯФ СО РАН, 04.02.2018;
7. 45-я конференция Европейского Физического Сообщества (EPS) по физике плазмы, Прага, Чешская Республика, 2–6 июля 2018;
8. Собрание коллаборации AWAKE, Манчестер, Соединенное Королевство, 14.03.2018;
9. 3-й Семинар по Новым Концепциям Ускорителей (ЕААС), о. Эльба, Италия, 24–30 сентября 2017;
10. Международная Научная Студенческая Конференция, Новосибирск, 21.04.2017;
11. XLIV Международная (Звенигородская) Конференция по Физике Плазмы и Управляемому Термоядерному Синтезу, февраль 2017 г.;
12. Международная Научная Студенческая Конференция, Новосибирск, 18.04.2016;
13. Собрание коллаборации AWAKE, ЦЕРН, Швейцария, 30.09.2015.

Личный вклад соискателя

Автор принимал активное участие в разработке теории и подготовке эксперимента AWAKE в ЦЕРН, анализе экспериментальных данных и их последующем сравнении с численным моделированием.

Результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. **Gorn, A.A.**, Lotov K.V., Generation of plasma electron halo by a charged particle beam in a low density plasma, *Phys. Plasmas* **29**, 023104 (6 стр., Scopus, опубликована 22.02.2022) [4];
2. Hafych, V., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), Analysis of proton bunch parameters in the AWAKE experiment, *Journal of Instrumentation* **16**, P11031 (6 стр., Scopus, опубликована 24.11.2021) [7];

3. Morales Guzmán, P.I., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), Simulation and experimental study of proton bunch self-modulation in plasma with linear density gradients, *Physical Review Accelerators and Beams*, **24(10)**, 101301 (13 стр., Scopus, опубликована 01.10.2021) [9];
4. Batsch, F., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), Transition between Instability and Seeded Self-Modulation of a Relativistic Particle Bunch in Plasma, *Physical Review Letters*, **126(16)**, 164802 (6 стр., Scopus, опубликована 20.04.2021) [12];
5. Chappell, J., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), Experimental study of extended timescale dynamics of a plasma wakefield driven by a self-modulated proton bunch, *Physical Review Accelerators and Beams*, **24(1)**, 011301 (13 стр., Scopus, опубликована 05.01.2021) [10];
6. **Gorn, A.**, et al. (AWAKE collaboration), Proton beam defocusing in AWAKE: comparison of simulations and measurements, *Plasma Phys. Control. Fusion* **62**, 125023 (8 стр., Scopus, опубликована 06.11.2020) [8];
7. Braummüller, F., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), Proton Bunch Self-Modulation in Plasma with Density Gradient, *Physical Review Letters*, **125(26)**, 264801 (7 стр., Scopus, опубликована 28.12.2020) [13];
8. Turner, M., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), Experimental study of wakefields driven by a self-modulating proton bunch in plasma, *Physical Review Accelerators and Beams*, **23(8)**, 081302 (8 стр., Scopus, опубликована 04.08.2020) [14];
9. Gschwendtner, E., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), Proton-driven plasma wakefield acceleration in AWAKE, *Phil. Trans. R. Soc. A* **377**: 20180418 (9 стр., Scopus, опубликована 24.06.2019) [15];
10. Adli, E., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), Experimental Observation of Proton Bunch Modulation in a Plasma at Varying Plasma Densities, *Physical Review Letters*, **122(5)**, 054802 (6 стр., Scopus, опубликована 08.02.2019) [16];
11. Turner, M., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), Experimental Observation of Plasma Wakefield Growth Driven by the Seeded Self-Modulation of a Proton Bunch, *Physical Review Letters*, **122**, 054801 (7 стр., Scopus, опубликована 08.02.2019) [17];
12. Adli, E., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), Acceleration of electrons in the plasma wakefield of a proton bunch, *Nature*, **561**, стр. 363–368 (6 стр., Scopus, опубликована 20.09.2018) [6];

13. **Gorn, A.A.**, Tuev, P.V., Petrenko, A.V., Sosedkin, A.P., Lotov, K.V., Response of narrow cylindrical plasmas to dense charged particle beams, *Physics of Plasmas*, **25(6)**, 063108 (9 стр., Scopus, опубликована 06.06.2018) [5];
14. Muggli, P. ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), AWAKE readiness for the study of the seeded self-modulation of a 400 GeV proton bunch, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **60(1)**, 014046 (13 стр., Scopus, опубликована 29.11.2017) [18];
15. Gschwendtner, E., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), AWAKE, The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment at CERN, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **829**, стр. 76–82 (7 стр., Scopus, опубликована 22.02.2016) [19];
16. Caldwell, A., ..., **Gorn, A.A.**, ..., et al. (AWAKE collaboration), Path to AWAKE: Evolution of the concept, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **829**, стр. 3–16 (14 стр., Scopus, опубликована 02.01.2016) [20].

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 95 страниц, включая 41 рисунок и 5 таблиц. Список литературы содержит 108 наименований.

Содержание работы

Во **введении** проводится обзор типов ускорительных установок, описана проблема получения высоких энергий в современных ускорителях, объяснен принцип работы кильватерных ускорителей. Показана необходимость численного моделирования при исследовании кильватерного ускорения, проведено сравнение всех доступных на данный момент численных кодов для моделирования кильватерного ускорения. Обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются цель и задачи, решению которых посвящена работа.

В **первой главе** описывается эксперимент AWAKE, приводится и объясняется схема экспериментальной установки (Рисунок 1) и принцип ускорения электронов с помощью сгустка протонов из SPS в ЦЕРН. В этой же главе описываются режимы работы экспериментальной установки, схема инжекции, а также диагностические модули. В конце главы обсуждаются результаты эксперимента, описано явление самомодуляции протонного пучка, показано стабильное и воспроизводимое ускорение электронов. В основе данного раздела лежат работы [6, 12, 13, 15–20], написанные и опубликованные в соавторстве с коллаборацией AWAKE.

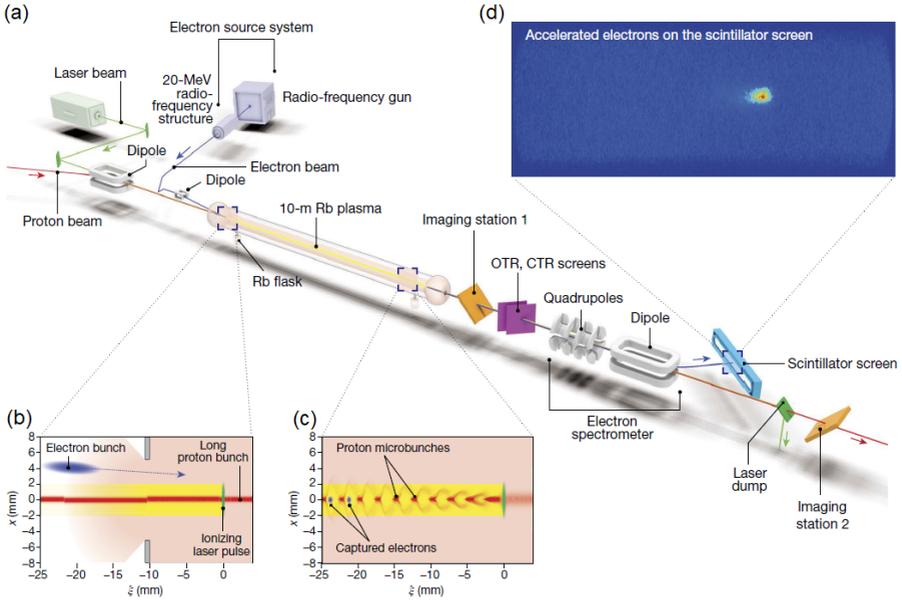


Рис. 1 — Схема эксперимента AWAKE [6]

Вторая глава посвящена теоретическому изучению реакции ограниченного по радиусу плазменного столба на длинный ультрарелятивистский пучок заряженных частиц. В этом разделе описываются эффекты, возникающие вследствие наличия у плазмы резкой границы, которые оказывают непосредственное влияние на возбуждаемую кильватерную волну и воздействуют на развитие самомодуляции заряженного драйвера в плазме.

В **разделе 2.1** подробно описана постановка задачи. Приведена геометрия задачи, основные параметры моделирования, базовые параметры эксперимента AWAKE. Показано, что плотность плазмы n вблизи торцов плазменной ячейки AWAKE имеет меняющийся продольный профиль (Рисунок 2(b)). Она уменьшается в сторону расширительных объемов от номинальной плотности n_0 (в эксперименте этот параметр мог контролируемо изменяться) до нуля по степенному закону. Из-за неоднородной плотности плазмы режимы взаимодействия протонного пучка с ней на этом участке сменяют друг друга от сильно нелинейного до линейного. Описана иерархия пространственных масштабов, в широком диапазоне плотности плазмы рассмотрены все режимы пучково-плазменного взаимодействия. **Раздел 2.2** посвящен изучению линейного режима, когда плотность плазмы большая, нелинейные эффекты не важны, и возможно описать реакцию плазмы аналитически. Приведены выражения для кильватерного потенциала в этом случае, получены выражения для полей. Получена зависимость

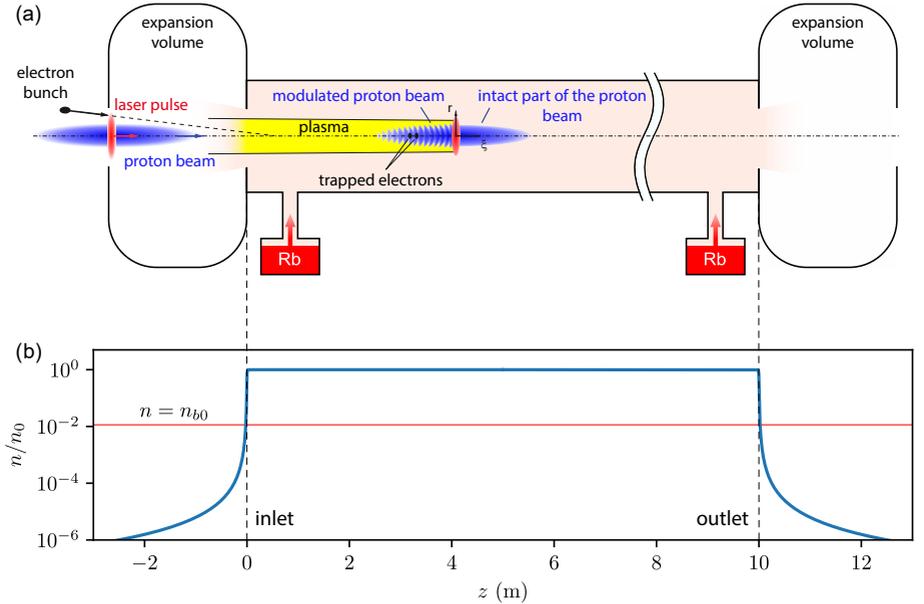


Рис. 2 — (a) Схема эксперимента AWAKE и (b) профиль плотности плазмы $n(z)$ вдоль плазменной ячейки. Красная линия соответствует максимальной плотности протонного пучка $n_{b0} = 4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ [4]

кильватерного потенциала от плотности плазмы на оси системы и найдены границы применимости аналитической теории (Рисунок 3).

Раздел 2.3 посвящен описанию слабонелинейного режима. Подробно описаны границы применимости линейной теории, описаны эффекты, вызванные поперечной неоднородностью возмущения плотности плазмы. Обнаружено, что снос фронтов кильватерной волны вблизи оси приводит к ее опрокидыванию и появлению вылетающих за ее границу плазменных электронов (Рисунок 4).

Раздел 2.4 посвящен подробному исследованию причины появления вылетающих электронов. Полуаналитическая теория, основанная на модели Доусона для нелинейных плазменных волн, позволяет уточнить механизм образования электронного гало, найти местоположение источника струй вылетающих электронов и определить область без гало за пределами плазмы в установках типа AWAKE. Теория согласуется с результатами моделирования и показывает, что в случае протонного драйвера гало-электроны появляются в результате опрокидывания волны, то есть пересечения траекторий электронов внутри плазмы. Для длинных пучков с резким передним краем расположение точки опрокидывания зависит только от поперечного размера пучка и отношения плотностей пучка и плазмы. Увеличение последней все дальше отсрочивает опрокидывание плазмен-

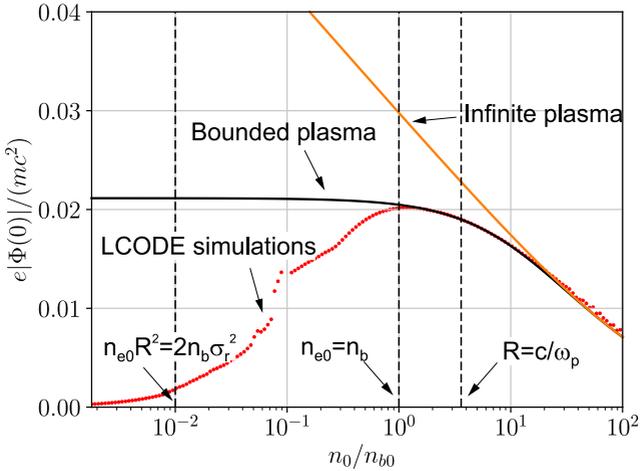


Рис. 3 — Зависимость абсолютного значения кильватерного потенциала на оси от плотности плазмы, рассчитанная в линейном приближении для ограниченной и неограниченной плазмы (сплошные линии) и с помощью численного моделирования LCODE (точки) для ограниченной плазмы.

Вертикальные пунктирные линии показывают границы режимов взаимодействия [5]

ной волны. Отрицательно заряженные драйверы создают электронное гало, как только они начинают взаимодействовать с плазмой. При плотности плазмы, значительно превышающей плотность пучка, эффект электронного гало становится слабым для немодулированных пучков с любым знаком заряда, поскольку гало появляется значительно позже и имеет меньший относительный заряд.

В **Разделе 2.5** кратко описан нелинейный режим взаимодействия пучка с плазмой.

В **Разделе 2.6** объясняется выбор схемы инжекции электронов в эксперименте. При взаимодействии положительно заряженных драйверов с плазмой в среднем в плазме преобладает положительный радиальный градиент кильватерного потенциала, что приводит к дефокусировке ультрарелятивистских электронных сгустков, движущихся вблизи оси драйвера в плазме с плавно нарастающей, но на порядки меняющейся плотностью в продольном направлении. Этот факт исключил осевую инжекцию ускоренного электронного сгустка в плазму в эксперименте AWAKE.

Результаты, изложенные в этой главе, опубликованы в работах [4, 5].

В рамках **третьей главы** проведено сравнение данных измерений протонного пучка, собранных в ходе эксперимента AWAKE, с результатами численного моделирования осесимметричным квазистатическим кодом LCODE. В **Разделе 3.1** описаны измерения протонного пучка в пустой

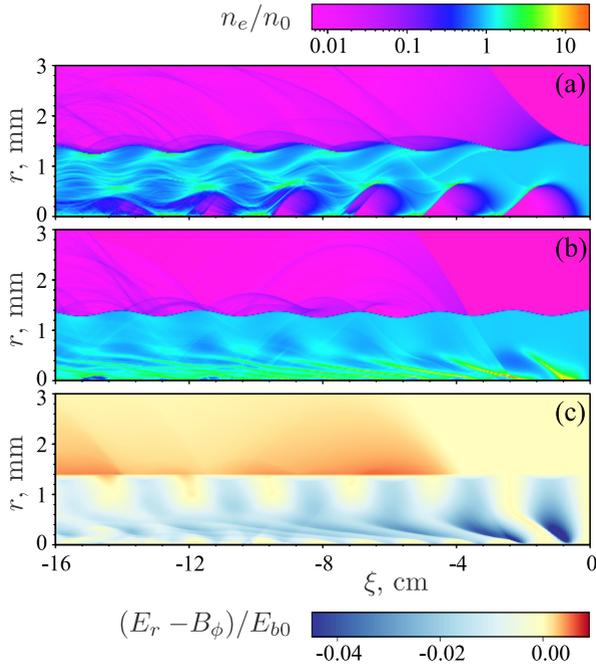


Рис. 4 — Карты плотности электронов плазмы n_e для электронного (а) и протонного (б) пучков. Карта радиальной силы $E_r - B_\phi$ для случая протонного пучка (с). Невозмущенная плотность плазмы $n = 0.5n_{b0}$ [5]

плазменной секции для установления корреляций между его параметрами, а **Раздел 3.2** подробно описывает сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования. Это сравнение показало, что процесс самомодуляции чувствителен к поперечному размеру пучка, его эмиттансу и положению затравки на входе в плазму. Первые два параметра строго коррелируют с зарядом пучка, что подтверждается измерениями в кольце SPS и измерениями в пустой плазменной секции. Радиальное распределение протонов после самомодуляции в эксперименте AWAKE имеет центральную и периферийную части. Размер и форма центральной части определяется невозмущенной частью протонного пучка и зависит преимущественно от его начального эмиттанса, периферийная же часть образуется в ходе самомодуляции, и ее форма наиболее чувствительна к его поперечному размеру на входе в плазменную секцию. Данное обстоятельство позволило восстановить начальный размер и эмиттанс протонного пучка, а также их корреляцию с зарядом, и учесть данные зависимости в моделировании. Для достижения количественного согласия эксперимента с расчетами также необходим учет эффекта плазменного электронного гало. Это требует проведения расчетов с достаточно широким окном моделирования. В ка-

честве величины для сравнения выбран максимальный радиус протонного гало, образующегося в ходе самомодуляции. Сравнение проведено для трех серий измерений, в двух из которых варьировался заряд протонного пучка, а в последней — относительное изменение плотности рубидия на концах плазменной ячейки. Во всех сериях достигнуто количественное согласие результатов моделирования эксперимента AWAKE кодом LCODE с диагностическими измерениями с относительной точностью до нескольких процентов.

Заключение

Оказалось, что на входе в плазменную секцию, в области низкой плотности плазмы, протонный пучок образует в плазме зону, дефокусирующую ультрарелятивистские электроны. Также в этой области сравнительно быстро происходит опрокидывание кильватерной волны, в результате которого часть электронов плазмы вылетает за ее границы, образуя вокруг плазменного столба электронное гало. Сравнение измерений протонного пучка, проведенных в ходе эксперимента AWAKE, с результатами численного моделирования осесимметричным квазистатическим кодом LCODE, а также измерения в пустой плазменной секции позволили установить корреляции между параметрами протонного пучка. Корреляции учтены во входных данных моделирования для минимизации неопределенностей. Наконец, на основе данных с диагностических узлов экспериментальной установки выбрана наиболее удобная для сравнения величина — максимальный радиус дефокусированных в ходе самомодуляции протонов. Также установлено, что эффект электронного гало играет ключевую роль в достижении согласия между моделированием и экспериментом. Учитывая все, описанное выше, в работе удалось достичь совпадения численных расчетов с измерениями с точностью до 5%.

Литература

- [1] Tajima, T. Laser electron accelerator / T. Tajima, J. M. Dawson. — Текст: электронный // Physical Review Letters. — 1979. — Vol. 43., nr. 4. — P. 267–270. — URL: <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevLett.43.267>. — (Дата обращения: 09.03.1979).
- [2] Chen, P. Acceleration of electrons by the interaction of a bunched electron beam with a plasma / P. Chen, J. M. Dawson, R. W. Huff, T. Katsouleas. — Текст: электронный // Physical Review Letters. — 1985. — Vol. 54. — P. 693. — URL: <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevLett.54.693>. — (Дата обращения: 20.12.1984).

- [3] Caldwell, A. Proton-driven plasma-wakefield acceleration / A. Caldwell, K. Lotov, A. Pukhov, F. Simon, — Текст: электронный // Nature Physics. — 2009. — Vol. 5. — P. 363-367. — URL: <https://www.doi.org/10.1038/nphys1248>. — (Дата публикации: 12.04.2009).
- [4] Gorn, A.A. Generation of plasma electron halo by a charged particle beam in a low density plasma / A.A. Gorn, K.V. Lotov, — Текст: электронный // Physics of Plasmas. — 2022. — Vol. 29. — P. 023104. — URL: <https://doi.org/10.1063/5.0080675>. — (Дата публикации: 22.02.2022).
- [5] Response of narrow cylindrical plasmas to dense charged particle beams / M. Turner, et al., — Текст: электронный // Physics of Plasmas. — 2018. — Vol. 25, nr. 6. — P. 063108. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.5039803>. — (Дата публикации: 06.06.2018).
- [6] Acceleration of electrons in the plasma wakefield of a proton bunch / E. Adli, et al., — Текст: электронный // Physical Review Letters. — 2018. — Vol. 561. — P. 363–368. — URL: <https://doi.org/s41586-018-0485-4>. — (Дата публикации: 20.09.2018).
- [7] Analysis of proton bunch parameters in the AWAKE experiment / V. Hafych, et al., — Текст: электронный // Journal of Instrumentation. — 2021. — Vol. 16. — P. P11031. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/P11031>. — (Дата публикации: 24.11.2021).
- [8] Proton beam defocusing in AWAKE: comparison of simulations and measurements / A. Gorn, et al., — Текст: электронный // Plasma Physics and Controlled Fusion. — 2020. — Vol. 62. — P. 125023. — URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/abc298>. — (Дата публикации: 06.11.2020).
- [9] Simulation and experimental study of proton bunch self-modulation in plasma with linear density gradients / P.I. Morales Guzmán, et al., — Текст: электронный // Physical Review Accelerators and Beams. — 2021. — Vol. 24, nr. 10. — P. 101301. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.101301>. — (Дата публикации: 01.10.2021).
- [10] Experimental study of extended timescale dynamics of a plasma wakefield driven by a self-modulated proton bunch / J. Chappell, et al., — 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).

- [11] Горн А. Особенности кильватерного ускорения с протонным драйвером в радиально ограниченной плазме: специальность 1.3.18 «Физика ускорителей и пучков заряженных частиц»: научно-квалификационная работа аспиранта. — 2022. — Новосибирский государственный университет. — Новосибирск. — 69 стр. — Текст: непосредственный.
- [12] Transition between Instability and Seeded Self-Modulation of a Relativistic Particle Bunch in Plasma / F. Batsch, et al., — Текст: электронный // Physical Review Letters. — 2021. — Vol. 126, nr. 16. — P. 164802. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.164802>. — (Дата публикации: 20.04.2021).
- [13] Proton Bunch Self-Modulation in Plasma with Density Gradient / F. Braunmüller, et al., — Текст: электронный // Physical Review Letters. — 2020. — Vol. 125, nr. 26. — P. 264801. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.264801>. — (Дата публикации: 28.12.2020).
- [14] Experimental study of wakefields driven by a self-modulating proton bunch in plasma / M. Turner, et al., — Текст: электронный // Physical Review Accelerators and Beams. — 2020. — Vol. 23, nr. 8. — P. 081302. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.081302>. — (Дата публикации: 04.08.2020).
- [15] Proton-driven plasma wakefield acceleration in AWAKE / E. Gschwendtner, et al., — Текст: электронный // Philosophical Transactions of the Royal Society A. — 2019. — Vol. 377. — P. 20180418. — URL: <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0418>. — (Дата публикации: 25.04.2019).
- [16] Experimental Observation of Proton Bunch Modulation in a Plasma at Varying Plasma Densities / E. Adli, et al., — Текст: электронный // Physical Review Accelerators and Beams. — 2019. — Vol. 122, nr. 5. — P. 054802. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.054802>. — (Дата публикации: 08.02.2019).
- [17] Experimental Observation of Plasma Wakefield Growth Driven by the Seeded Self-Modulation of a Proton Bunch / M. Turner, et al., — Текст: электронный // Physical Review Letters. — 2019. — Vol. 122, nr. 5. — P. 054802. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.054801>. — (Дата публикации: 08.02.2019).
- [18] AWAKE readiness for the study of the seeded self-modulation of a 400 GeV proton bunch / P. Muggli, et al., — Текст: электронный // Plasma Physics and Controlled Fusion. — 2017. — Vol. 60, nr. 1. — P. 014046. —

URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa941c>. — (Дата публикации: 29.11.2017).

- [19] AWAKE, The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment at CERN / E. Gschwendtner, et al., — Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2017. — Vol. 829. — P. 76–82. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.02.026>. — (Дата публикации: 22.02.2016).
- [20] Path to AWAKE: Evolution of the concept / A. Caldwell, et al., — Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2016. — Vol. 829. — P. 3–16. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.12.050>. — (Дата публикации: 02.01.2016).

Горн Александр Андреевич

Особенности кильватерного ускорения с протонным драйвером в радиально ограниченной плазме

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 10.10.2022

Подписано в печать 12.10.2022

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

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 11

Обработано на РС и отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11