

На правах рукописи



Минаков Владимир Алексеевич

**ОСОБЕННОСТИ УСКОРЕНИЯ ПУЧКОВ
В ПЛАЗМЕННОЙ КИЛЬВАТЕРНОЙ ВОЛНЕ
ДЛИННОГО МОДУЛИРОВАННОГО ДРАЙВЕРА**

1.3.9. Физика плазмы
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:

НЕРУШ Евгений Николаевич – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», старший научный сотрудник.

САВЕЛЬЕВ-ТРОФИМОВ Андрей Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», профессор.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Защита диссертации состоится «8» апреля 2022 г. в «14:00» 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://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «17» февраля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Багрянский Петр Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы

На фоне невозможности увеличить темп ускорения при использовании высокочастотных (ВЧ) резонаторов альтернативные методы ускорения заряженных частиц получили стимул к развитию. Одним из таких методов является плазменное кильватерное ускорение. Если не вдаваться в подробности, то этот метод состоит в следующем (рисунок 1). В плазму запускают два пучка. Первый из них — это высокоэнергетичный пучок заряженных частиц или мощный лазерный импульс, который называется драйвер. Заряженный драйвер действует на электроны плазмы своим кулоновским полем, расталкивая их со своего пути или же притягивая на ось, в зависимости от знака его заряда. Лазерный драйвер воздействует на электроны посредством пондеромоторной силы, заставляя их покинуть приосевую область. Ионы плазмы гораздо тяжелее электронов и в большинстве моделей считаются неподвижными. Электроны начинают колебаться вокруг положений равновесия и создают в плазме волну. В поле этой волны ускоряется второй пучок, который называется витнесс. Фаза волны привязана к драйверу, значит, если драйвер и витнесс будут иметь скорости, близкие к скорости света, возможно длительное ускорение. Интерес к этому методу вызван тем, что в плазме можно создать большие электрические поля. Например, эксперимент AWAKE, речь о котором пойдет дальше, использует плазму плотности порядка 10^{15} см^{-3} . При такой плотности характерный масштаб электрических полей составляет несколько ГВ/м, а длина плазменной волны — примерно 0.2 мм. С одной стороны, поля в плазме получаются на несколько порядков больше, чем в ВЧ резонаторах. С другой стороны, малость пространственного и временного масштабов накладывает строгие ограничения на точность синхронизации и позиционирования пучков. Стоит отметить, что увеличение плотности плазмы приводит как к росту электрического поля, так и к уменьшению длины плазменной волны.

В зависимости от типа драйвера можно разделить кильватерное ускорение на три направления: протонное, лазерное и электронное. У каждого типа есть свои преимущества и недостатки. В данной работе мы будем рассматривать только ускорение с протонным драйвером. Его преимуществом является огромный энергозапас. Он превосходит запас энергии в электронных или лазерных пучках на несколько порядков и потенциально позволяет ускорить электронный пучок до энергий порядка 1 ТэВ в одной плазменной секции, без необходимости синхронизировать пучки много раз на входе в большое число секций. Недостатком протонного драйвера является его размер. В отличие от других драйверов, длины которых сопоставимы с длиной плазменной волны, протонные сгустки в современных синхротронах имеют длину порядка 10 см, что на несколько порядков превосходит плазменную длину волны. Такой пучок не будет эффективно

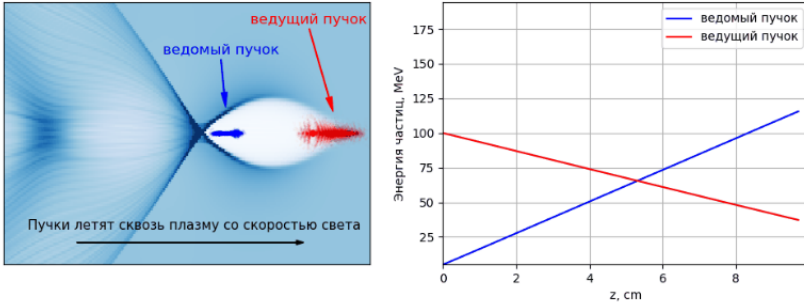


Рис. 1 — Принципиальная схема плазменного ускорения.

возбуждать волну. Сжать пучок в продольном направлении в сотни раз не представляется возможным, зато можно разбить пучок на последовательность коротких сгустков. Сделать это можно, используя самомодуляционную или поперечную двухпотокую неустойчивость.

Целью данной работы является обнаружение и исследование различных специфических эффектов, возникающих при взаимодействии длинного протонного пучка с плазмой в контексте плазменного кильватерного ускорителя.

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

1. Используя квазистатический 2D3V код, численно исследовать, каким образом изменение параметров плазмы и драйвера повлияет на величину возбуждаемых ускоряющих кильватерных полей.
2. В ходе моделирования эксперимента AWAKE идентифицировать физические эффекты, возникающие из-за большой длины пучка.
3. Исследовать найденные эффекты аналитически и численно.

Методология и методы исследования

Для выполнения работы используется квазистатический 2D3V код LCODE [1–5], использующий метод частиц в ячейках (particles in cell, PIC). Поскольку время бетатронных колебаний протонного пучка гораздо больше периода колебаний кильватерной волны, квазистатическое приближение допустимо.

Научная новизна состоит в обнаружении ранее не известных физических эффектов в пучково-плазменном взаимодействии, связанных с большой длиной драйвера. Обнаруженные эффекты оказались универсальными, и, хотя большая длина пучка помогает их выявить, но проявляются они для всех видов драйвера.

Научная и практическая значимость Результаты работы [6] позволили идентифицировать и охарактеризовать оптимальные режимы эксперимента AWAKE [7–11], что стало важной составляющей его успе-

ха [12, 13]. Результаты моделирования были подтверждены экспериментально [14] и позволили по результатам косвенных измерений охарактеризовать происходящие в плазме процессы [15, 16].

Найденные в работе [17] эффекты влияют на качество ускоряемого пучка и должны учитываться для достижения количественного согласия моделирования и эксперимента.

Кроме того, обнаруженный эффект увеличения поля из-за движения ионов [18] увеличивает коэффициент трансформации без дополнительных манипуляций с пучком. Это параметр, повышение которого очень важно для кильватерного ускорения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Базовые значения эмиттанса и заряда пучка в первой очереди эксперимента AWAKE являются пороговыми в том смысле, что их улучшение не приводит к пропорциональному росту амплитуды ускоряющего поля, а ухудшение — уменьшает поле.
2. Малые изменения параметров пучка и плазмы, происходящие от выстрела к выстрелу, не приводят к значительному изменению амплитуды возбуждаемой волны.
3. Неоднородности плотности драйвера, появляющиеся во время релаксации пучка к равновесному состоянию в плазме, приводят к появлению флуктуаций фокусирующей силы в кильватерной волне, которые, в свою очередь, вызывают рост эмиттанса витнесса. Рост эмиттанса замедляется при увеличении заряда витнесса, поскольку витнесс начинает дополнительно фокусироваться своим собственным кильватерным полем.
4. Движение ионов может приводить к увеличению ускоряющего поля в кильватерном ускорителе. Величина эффекта не зависит от массы ионов и составляет 40% для AWAKE.

Достоверность полученных результатов обеспечивается совпадением результатов моделирования используемым численным кодом и экспериментальных данных в близких режимах [14].

Личный вклад

Автор принимал активное участие в постановке задачи, производил расчеты, проводил анализ полученных результатов, а также участвовал в подготовке публикаций.

Апробация работы

Результаты работы представлялись на международных конференциях, в том числе:

1. Международной конференции Laser-Plasma Accelerator Workshop 2019 (г. Сплит, 2019)
2. Международной конференции European Advanced Accelerator Concepts Workshop (о. Эльба, 2017)
3. Собрании коллаборации AWAKE (г. Новосибирск, 2017)

Большая часть результатов диссертации вошла в выпускную квалификационную работу аспиранта [19], которая была успешно защищена в 2020 году.

Результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. K.V. Lotov, **V.A. Minakov**, and A.P. Sosedkin, Parameter sensitivity of plasma wakefields driven by self-modulating proton beams. *Phys. Plasmas* **21**, 083107 (2014) [6].
2. **V.A. Minakov**, M. Tschu, A.P. Sosedkin, and K.V. Lotov, Witness emittance growth caused by driver density fluctuations in plasma wakefield accelerators. *Phys. Plasmas* **25**, 093112 (2018) [17].
3. **V.A. Minakov**, A.P. Sosedkin and K.V. Lotov, Accelerating field enhancement due to ion motion in plasma wakefield accelerators. *Plasma Phys. Control. Fusion* **61**, 114003 (2019) [18].
4. K.V. Lotov and **V.A. Minakov**, Proton beam self-modulation seeded by electron bunch in plasma with density ramp. *Plasma Phys. Control. Fusion* **62**, 115025 (2020) [7].
5. A.A. Gorn, M. Turner, E. Adli, ..., **V.A. Minakov**, ..., et al. (The AWAKE Collaboration), Proton beam defocusing in AWAKE: comparison of simulations and measurements. *Plasma Phys. Control. Fusion* **62**, 125023 (2020) [14].
6. E. Gschwendtner, M. Turner, E. Adli, ..., **V.A. Minakov**, ..., et al. (The AWAKE Collaboration) Proton-driven plasma wakefield acceleration in AWAKE. *Phil. Trans. R. Soc. A* **378**, 20180418 (2019) [12].
7. M. Turner, E. Adli, A. Ahuja, ..., **V.A. Minakov**, ..., et al. (The AWAKE Collaboration), Experimental Observation of Plasma Wakefield Growth Driven by the Seeded Self-Modulation of a Proton Bunch. *Phys. Rev. Lett.* **122**, 054801 (2019) [15].
8. E. Adli, A. Ahuja, O. Apsimon, ..., **V.A. Minakov**, ..., et al. (The AWAKE Collaboration), Experimental observation of proton bunch modulation in a plasma at varying plasma densities. *Phys. Rev. Lett.* **122**, 054802 (2019) [16].
9. E. Adli, A. Ahuja, O. Apsimon, ..., **V.A. Minakov**, ..., et al. (The AWAKE Collaboration), Acceleration of electrons in the plasma wakefield of a proton bunch. *Nature* **561**, 363 (2018) [13].
10. P. Muggli, E. Adli, R. Apsimon, ..., **V.A. Minakov**, ..., et al. (The AWAKE Collaboration), AWAKE readiness for the study of the seeded self-modulation of a 400GeV proton bunch. *Plasma Phys. Control. Fusion* **60**, 014046 (2018) [8].
11. A. Caldwell, E. Adli, L. Amorim, ..., **V.A. Minakov**, ..., et al. (The AWAKE Collaboration), Path to AWAKE: Evolution of the concept. *Nuclear Instr. Methods A* **829**, 3 (2016) [9].

12. E. Gschwendtner, E. Adli, L. Amorim, ..., **V.A. Minakov**, ..., et al. (The AWAKE Collaboration), AWAKE, The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment at CERN. Nuclear Instr. Methods A **829**, 76 (2016) [10].
13. C. Bracco, L.D. Amorim, R. Assmann, ..., **V.A. Minakov**, ..., et al. (The AWAKE Collaboration), AWAKE: A Proton-Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment at CERN. Nuclear and Particle Physics Proceeding **273**, 175 (2016) [11].

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 76 страниц, включая 28 рисунков. Список литературы содержит 57 наименований.

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 работы численного кода, использованного при выполнении данной работы. Она содержит обзор моделей описания плазмы и пучка, а также уравнений, которые при этом решаются. Кроме того, кратко описан способ распараллеливания кода для работы с большим числом вычислительных узлов.

Во **второй главе** описана схема эксперимента AWAKE, а также изучены зависимости амплитуды кильватерной волны от различных параметров эксперимента.

Ключевым параметром, определяющим поведение волны, является пиковый ток или, что эквивалентно, прирост поля из-за одного микросгустка, сфокусированного до радиального размера $\sigma_{rb} \sim c/\omega_p$ [20], где c — скорость света, а ω_p — плазменная частота. Этот параметр не сильно различается в современных протонных ускорителях ТэВ-ного класса. Таким образом, количественный результат, полученный для протонного пучка SPS, будет применим к другим установкам. Основные результаты параметрического поиска показаны на рисунке 2. В каждой группе графиков мы варьируем один из параметров системы и строим графики зависимости амплитуды волны от длины взаимодействия протонного драйвера и плазмы. Все остальные параметры при этом остаются неизменными и, их значения указаны в таблице 1.

Из рисунка 3 мы видим, что при росте заряда пучка выше базового значения рост максимума амплитуды возбуждаемой волны сильно замедляется, в то время как уменьшение заряда приводит к пропорциональному ослаблению волны. Таким образом, базовое значение этого параметра находится вблизи некоего порога, выше которого поднимать заряд практически

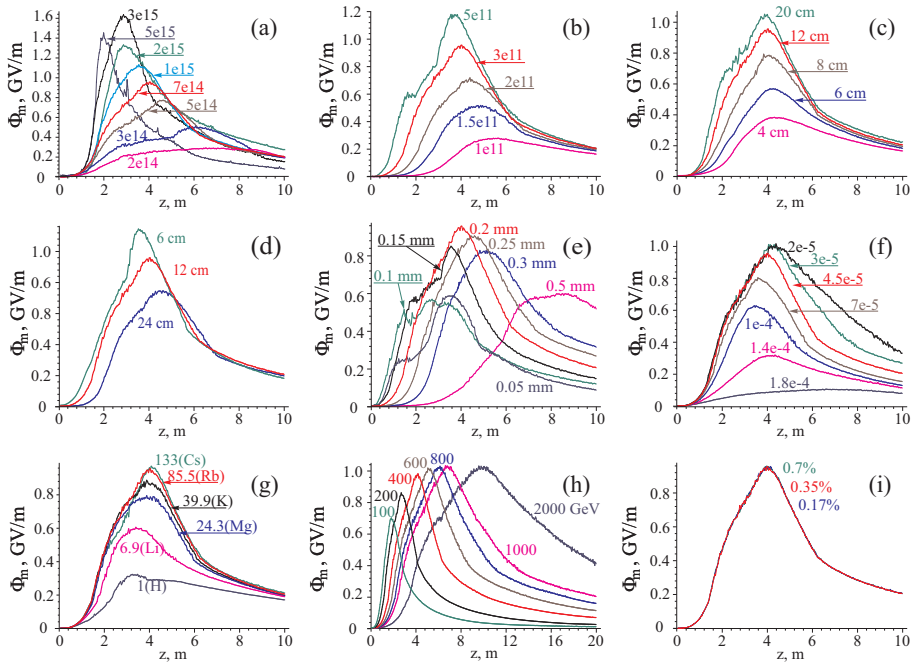


Рис. 2 — Зависимости амплитуды кильватерной волны $\Phi_m(z)$ от длины распространения драйвера в плазме, сгруппированные по варьируемому параметру: (а) плотность плазмы n_0 , (б) число частиц N_b , (с) длина пучка при постоянном пиковом токе σ_{zb} , (д) длина пучка при постоянном числе частиц σ_{zb}^* , (е) радиус пучка σ_{rb} , (ф) угловой разброс пучка $\delta\alpha_b$, (г) атомный вес ионов плазмы M_i , (h) энергия пучка W_b , (и) энергоразброс пучка δW_b . Значения варьируемых параметров подписаны около графиков.

нет смысла. Пороговое значение определяется эффектом нелинейного удлинения периода кильватерной волны. Аналогичная ситуация складывается и с эмиттансом пучка [рисунок 2(ф)]. Улучшение этого параметра почти не влияет на максимум амплитуды возбуждаемой волны, а вот ухудшение приводит к пропорциональному ослаблению волны.

Третья глава содержит описание нового физического эффекта, приводящего к росту эмиттанса в кильватерном ускорителе. Эффект состоит в том, что во время релаксации к равновесному состоянию в драйвере возникают флуктуации плотности, которые, в свою очередь, приводят к появлению флуктуаций фокусирующей силы. Постоянное действие знакопеременной фокусирующей силы приводит к постоянному росту эмиттанса витнесса. Наиболее ярко этот эффект проявился во время анализа одной из возможных схем улучшения эксперимента AWAKE, предполагающей ис-

Таблица 1 — Базовые значения варьируемых параметров.

Параметр, обозначение	Величина
Плотность плазмы, n_0	$7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$
Атомный вес ионов плазмы, M_i	85.5
Число частиц в пучке, N_b	3×10^{11}
Длина пучка, σ_{zb}	12 см
Радиус пучка, σ_{rb}	0.02 см
Энергия пучка, W_b	400 ГэВ
Энергоразброс пучка, δW_b	0.35%
Угловой разброс пучка, $\delta\alpha_b = \epsilon_b/\sigma_{rb}$,	4.5×10^{-5}
Положение лазера относительно центра пучка, ξ_s	0 см

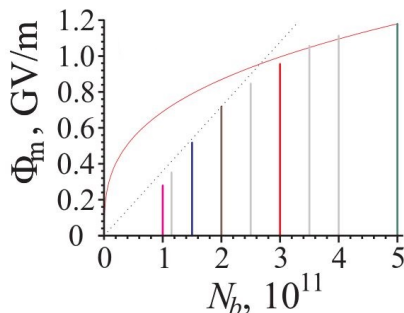


Рис. 3 — Абсолютный максимум кильватерной амплитуды Φ_m (высота столбцов) в зависимости от числа частиц в пучке для фиксированной длины пучка. Тонкими линиями показаны скейлинги.

пользование двух плазменных секций, разделенных вакуумным промежутком длиной порядка 1 м. При пролете через этот промежуток протонный пучок расширяется, поскольку в эксперименте нет возможности установить в этом месте магнитные фокусирующие элементы, и его форма становится сильно отличной от равновесной, что и приводит к возникновению эффекта.

Рисунок 4 иллюстрирует обнаруженный эффект. Для сравнения был сделан расчет, в котором не было вакуумного промежутка, а протонный пучок двигался внутри одной длинной плазменной секции. Сразу в начале счета нормализованный среднеквадратичный эмиттанс витнесса в таком случае быстро достигает некоторого равновесного значения порядка 6 ммрад, а затем медленно растет. При наличии промежутка эмиттанс растет гораздо быстрее. Этот рост не может быть следствием численных ошибок, он обусловлен физическим эффектом. Об этом свидетельствует сравнение с расчетами при меньшем разрешении. Поэтому мы заключаем,

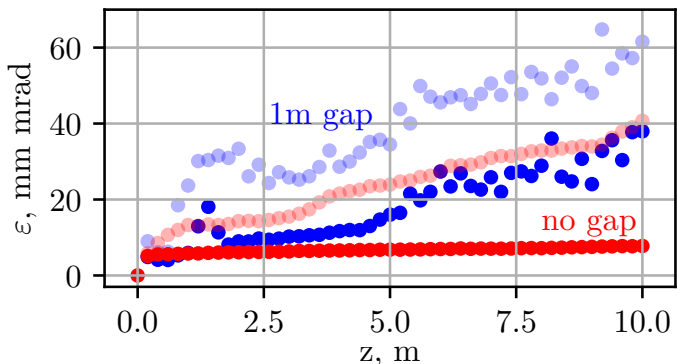


Рис. 4 — Зависимость нормализованного эмиттанса ε от длины распространения во второй плазменной секции z при наличии 1 м вакуумного промежутка между секциями (синий) и без него (красный).

Бледные точки соответствуют результатам запусков с низким разрешением.

что рост эмиттанса, связанный с численными эффектами, не может быть больше, чем рост эмиттанса в расчете без метрового вакуумного промежутка. Этот вклад пренебрежимо мал по сравнению с ростом в случае наличия этого промежутка.

Сравнение расчетов показало, что основным их различием является поведение потенциала. Протонный драйвер, расширившийся в промежутке, создал потенциал, минимум которого находится не на оси системы. В яме такой формы электроны совершают за время счета порядка 100 колебаний, то есть, сама по себе такая форма потенциала не может привести к постоянному росту эмиттанса. Однако оказалось, что глубина, ширина и положение центра этой внеосевой ямы постоянно меняется во время счета, что и приводит к постоянному росту эмиттанса электронного пучка.

Во второй части этой главы описано моделирование поведения электронного сгустка в потенциале, имеющем плоское дно и зависящие от времени флуктуации, наложенные на основную форму. Оно проведено в декартовых координатах, ведь в осесимметричном моделировании невозможно понять, как распределены по углу электроны, покидающие ось из-за наличия там локального максимума потенциала. Выполнить трехмерное моделирование затруднительно, поскольку счет с необходимыми временным и пространственным разрешением находится на данный момент за пределами возможностей компьютеров.

Для того, чтобы сформулировать обобщенные выводы о динамике электронного сгустка в флуктуирующем потенциале, мы воспроизводим

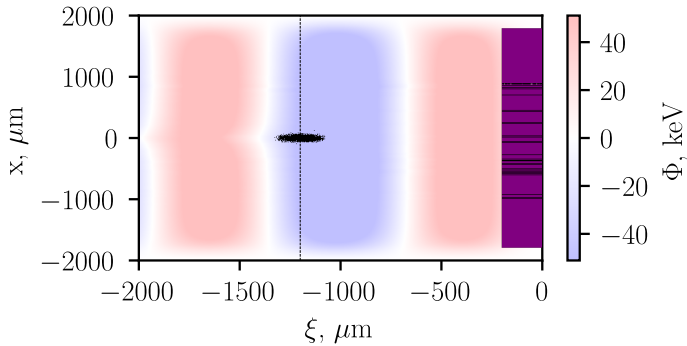


Рис. 5 — Геометрия задачи в плоском случае: бледным цветом показан кильватерный потенциал, фиолетовый прямоугольник — это протонный драйвер, имеющий равномерное распределение плотности, темные полоски на нем — флуктуации плотности, черные точки — это электронный пучок, а вертикальная пунктирная линия показывает сечение, потенциал в котором рассматривался.

требуемое нам поведение потенциала с помощью короткого драйвера и контролируемых вручную флуктуаций (рисунок 5).

После подбора параметров системы с помощью пучка пробных частиц можно переходить к исследованию влияния собственного заряда пучка на рост его эмиттанса. Для этого было произведено три разных моделирования, отличающихся зарядом электронного пучка. Для каждого из пучков построена зависимость его эмиттанса от длины распространения в плазме (рисунок 6). По ним, а также по портретам пучка сделаны выводы о том, что увеличение собственного заряда пучка приводит к уменьшению роста эмиттанса. По пучку от головы к хвосту движется фронт разрушения, но его скорость тем ниже, чем больше заряд пучка.

В рамках четвертой главы рассматривается влияние движения ионов плазмы на кильватерную волну, а конкретно, ситуация, в которой это движение может увеличить амплитуду волны. При работе с лазерным или электронным драйвером ионы плазмы часто считают неподвижными, поскольку интересующие исследователей размеры системы составляют 2-3 периода плазменной волны. На таком коротком расстоянии плотность ионов плазмы почти не успевает измениться и перестать быть однородной. Этот эффект становится важным или в случае, если плотность пучка на несколько порядков больше плотности плазмы, или, как в этой работе, при использовании длинного протонного пучка в качестве драйвера. В эксперименте AWAKE нас интересуют масштабы порядка 100 длин волн, этого достаточно, чтобы ионное движение успело заметно исказить картину плотности.

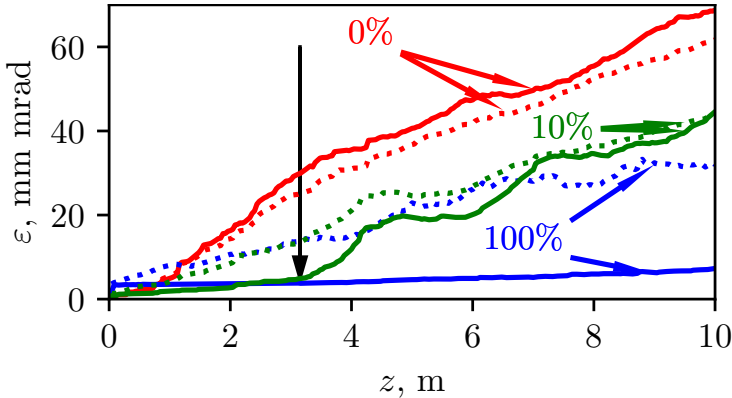


Рис. 6 — Зависимость эммитанса витнесса ε от длины распространения z для разных зарядов витнесса: полный заряд (синие кривые), 10% полного заряда (зеленые кривые) и пробные электроны с пренебрежимо малым зарядом (красные кривые). Пунктиром показан эммитанс всего пучка, а непрерывные кривые показывают эммитанс центрального слоя длиной 40 мкм. Стрелка показывает момент, когда фронт эрозии пришел в начало центрального слоя пучка с неполным зарядом.

Эффект роста поля из-за движения ионов проявляется после того, как драйвер самомодулируется. Формы отдельных микросгустков и пучка как целого в этот момент типичны для процесса самомодуляции (рисунок 1 в [20], рисунок 2 в [9]). Увеличение поля оказывается наиболее сильным незадолго до опрокидывания волны (рисунок 7), сразу после чего продольное поле быстро разрушается в случае подвижных ионов. Эффект не может быть следствием узких пиков поля, поскольку кильватерный потенциал, в котором все локальные пики усредняются, ведет себя так же. Величина эффекта слабо зависит от массы ионов, что видно из сравнения с моделированием для подвижных ионов калия, масса которых примерно вдвое меньше, чем у рубидия (зеленая линия на рисунке 7).

Начало усиления поля коррелирует с видимыми возмущениями ионной плотности n_i . Плотность увеличивается на оси и уменьшается вне оси, что типично для волны, созданной узким драйвером [21–24]. Известно, что этот профиль плотности искажает волновые фронты, что вызывает передачу энергии от продольных колебаний к поперечным [22]. Таким образом, увеличение кривизны волнового фронта не может объяснить рост продольного поля.

Причиной эффекта является пространственное перераспределение энергии волны. Чтобы увидеть это, мы рассмотрим плотность потока энергии в сопутствующем окне [25]. Энергия в сопутствующем окне преимущественно течет против направления оси z . Таким образом, компонента S_z

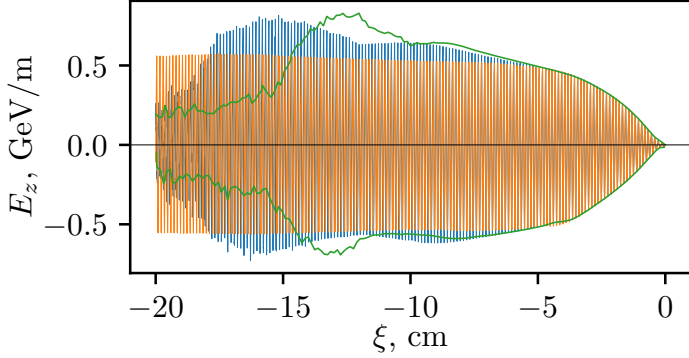


Рис. 7 — Зависимость поля E_z на оси от сопутствующей координаты ξ в точке $z = 5$ м для неподвижных (оранжевая кривая) и подвижных (синяя кривая) ионов рубидия. Зеленая линия показывает огибающую для подвижных ионов калия.

показывает, где находится энергия волны (рисунок 8). В отличие от плотности энергии, плотность потока энергии S_z не осциллирует с плазменной частотой [24], что облегчает визуализацию.

В случае неподвижных ионов энергия остается приблизительно на том же радиусе в плазме, куда её высадил пучок [рисунок 8(a,c)], что типично для слабонелинейной волны [25]. Если же ионы могут двигаться, энергия перераспределяется по радиусу [рисунок 8(b,d)], концентрируясь около оси, что влияет на амплитуду волны (рисунок 7).

Дополнительным приятным следствием обнаруженного эффекта роста поля является увеличение коэффициента трансформации. Коэффициент трансформации — это параметр схемы ускорения, равный отношению поля, в котором ускоряется витнесс, к полю, в котором замедляется драйвер. В случае, если схема предполагает потерю драйвером всей его энергии, коэффициент трансформации оказывается равен отношению энергии, набранной витнессом в процессе ускорения, к начальной энергии драйвера. Конечно, такой параметр хотелось бы увеличить, однако сделать это довольно сложно. В нашем же случае из-за движения ионов выросла продольная компонента электрического поля. И если в области выросшего поля инжектировать витнесс, то коэффициент трансформации окажется выше, чем в гипотетическом случае, в котором этот эффект не существовал бы. Происходит это потому, что электроны витнесса начинают ускоряться в большем поле, в то время как темп замедления драйвера не изменился.

В заключении перечислены основные результаты работы, опубликованные в [6, 17, 18]:

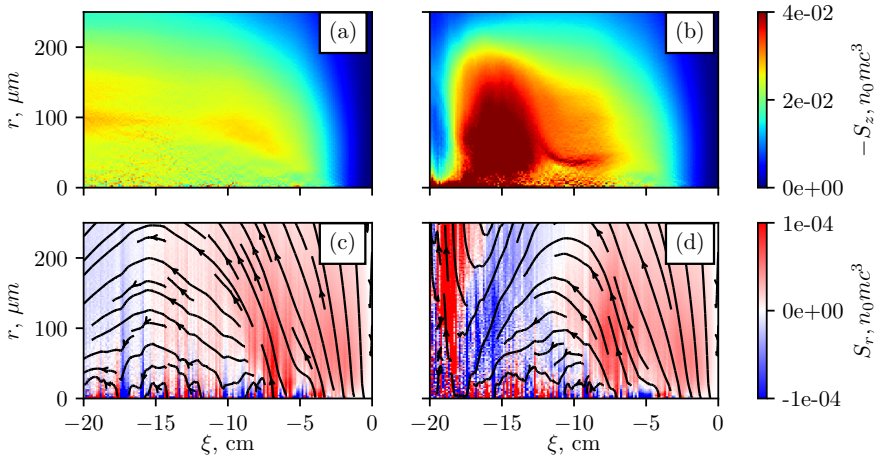


Рис. 8 — Продольные (a,b) и радиальные (c,d) компоненты плотности потока энергии \vec{S} в сопутствующем окне для неподвижных (a,c) и подвижных (b,d) ионов. Черные стрелки показывают направление потока энергии.

1. Проведенное исследование прояснило чувствительность возбужденного кильватерного поля к параметрам пучка и плазмы и помогло выявить физические эффекты, ограничивающие амплитуду кильватерного поля в различных областях пространства параметров. Наиболее важным эффектом оказалось нелинейное удлинение волны [26]. До тех пор, пока этот эффект не вступил в игру, кильватерная амплитуда прямо пропорциональна числу протонов, возбуждающих волну. Если же, из-за улучшения какого-либо из параметров, достигается некий предел числа микросгустков, то рост амплитуды в дальнейшем сильно замедляется. Два других важных эффекта — это разлет пучка из-за эмиттанса и движение ионов. Оба эффекта характеризуются неким граничным значением, или, если быть точным, поверхностью в многомерном пространстве параметров. Если перейти границу, то амплитуда начнет стремительно падать. Иначе эти параметры не влияют на амплитуду волны.
2. Обнаружен новый физический эффект, приводящий к росту эмиттанса витнесса в плазменном кильватерном ускорителе из-за флуктуаций фокусирующей силы. Этот эффект применим ко всем схемам плазменного ускорения, работающим в линейном или слабонелинейном режиме. Blowout режим [27] невосприимчив к этому механизму роста эмиттанса, поскольку фокусирующая сила в ка-

верне полностью определена ионной плотностью и не меняется со временем.

Основной причиной появления поперечной силы, зависящей от времени, является рассогласование драйвера и плазмы. Равновесное состояние пучка в собственном кильватерном поле довольно экзотическое и заметно отличается от распределения Гаусса по импульсам и координатам [28]. Таким образом, любой драйвер будет менять свою форму после входа в плазму, а значит, создавать зависящий от времени кильватерный потенциал. Даже если радиус пучка подобран точно, все равно будет происходить процесс перехода формы пучка в равновесное состояние. Возможно, инъекция витнесса сбоку [29] в тот момент, когда драйвер уже пришел к равновесию, поможет обойти этот эффект, но это еще предстоит выяснить.

Рост эмиттанса можно замедлить с помощью увеличения заряда витнесса, поскольку он начинает дополнительно фокусироваться своим собственным кильватерным полем. Несмотря на это, голова витнесса все равно будет разваливаться. В процессе ускорения фронт эрозии движется по пучку от головы к хвосту.

3. Найден эффект увеличения амплитуды кильватерной волны из-за движения ионов плазмы. Причиной эффекта становится перераспределение энергии в волне, приводящее к увеличению плотности энергии на оси. Прибавка энергии превышает даже потери, связанные с переходом части энергии колебаний из продольных в поперечные из-за поперечной неоднородности плотности ионов.

Полученные результаты представляют интерес для предсказания и объяснения результатов эксперимента AWAKE и для других экспериментов по кильватерному ускорению. Большую часть результатов можно обобщить, поскольку параметры протонных пучков на многих ускорителях схожи. Кроме того, показано, что некоторые эффекты являются общими и могут проявить себя с драйвером любого типа.

Литература

- [1] K.V.Lotov, Simulation of ultrarelativistic beam dynamics in plasma wakefield accelerator. *Phys. Plasmas* **5**, 785 (1998).
- [2] K.V.Lotov, Fine wakefield structure in the blowout regime of plasma wakefield accelerators. *Phys. Rev. ST - Accel. Beams* **6**, 061301 (2003).
- [3] K.V.Lotov, et al, Simulation of Self-modulating Particle Beams in Plasma Wakefield Accelerators. *Proceedings of IPAC2013 (Shanghai, China)*, p.1238-1240.

- [4] <https://lcode.info/>.
- [5] A.P.Sosedkin, et al, LCODE: A parallel quasistatic code for computationally heavy problems of plasma wakefield acceleration. *Nuclear Instr. Methods A* **829**, 350 (2016).
- [6] K.V.Lotov, et al, Parameter sensitivity of plasma wakefields driven by self-modulating proton beams. *Phys. Plasmas* **21**, 083107 (2014).
- [7] K.V.Lotov, et al, Proton beam self-modulation seeded by electron bunch in plasma with density ramp. *Plasma Phys. Control. Fusion* **62**, 115025 (2020).
- [8] P.Muggli, et al, AWAKE readiness for the study of the seeded self-modulation of a 400 GeV proton bunch. *Plasma Phys. Control. Fusion* **60**, 014046 (2018).
- [9] A.Caldwell, et al, Path to AWAKE: Evolution of the concept. *Nuclear Instr. Methods A* **829**, 3 (2016).
- [10] E.Gschwendtner, et al, AWAKE, The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment at CERN. *Nuclear Instr. Methods A* **829**, 76 (2016).
- [11] C.Bracco, et al, AWAKE: A Proton-Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment at CERN. *NUCLEAR AND PARTICLE PHYSICS PROCEEDINGS* **273**, 175 (2016).
- [12] E.Gschwendtner, et al, Proton-driven plasma wakefield acceleration in AWAKE. *Phil. Trans. R. Soc. A* **378**, 20180418 (2019).
- [13] E.Adli, et al,(The AWAKE Collaboration) Acceleration of electrons in the plasma wakefield of a proton bunch. *Nature* **561**, 363 (2018).
- [14] A.A.Gorn, et al, Proton beam defocusing in AWAKE: comparison of simulations and measurements. *Plasma Phys. Control. Fusion* **62**, 125023 (2020).
- [15] M.Turner, et al, Experimental Observation of Plasma Wakefield Growth Driven by the Seeded Self-Modulation of a Proton Bunch. *Phys. Rev. Lett.* **122**, 054801 (2019).
- [16] E.Adli, et al, Experimental Observation of Proton Bunch Modulation in a Plasma at Varying Plasma Densities. *Phys. Rev. Lett.* **122**, 054802 (2019).
- [17] V.A.Minakov, et al, Witness emittance growth caused by driver density fluctuations in plasma wakefield accelerators. *Phys. Plasmas* **25**, 093112 (2018).

- [18] V.A.Minakov, et al, Accelerating field enhancement due to ion motion in plasma wakefield accelerators. *Plasma Phys. Control. Fusion* **61**, 114003 (2019).
- [19] В.А.Минаков, Особенности ускорения пучков в плазменной кильватерной волне длинного модулированного драйвера, выпускная квалификационная работа аспиранта, Новосибирск 2020.
- [20] A.Caldwell, et al, Plasma wakefield acceleration with a modulated proton bunch. *Phys. Plasmas* **18**, 103101 (2011).
- [21] L.M.Gorbunov, et al, Plasma ion dynamics in the wake of a short laser pulse. *Phys. Rev. Lett.* **86**, 3332 (2001).
- [22] L.M.Gorbunov, et al, Dynamics of a plasma channel created by the wakefield of a short laser pulse. *Phys. Plasmas* **10**, 1124 (2003).
- [23] J.Vieira, et al, Ion Motion in Self-Modulated Plasma Wakefield Accelerators. *Phys. Rev. Lett.* **109**, 145005 (2012)
- [24] R.I.Spitsyn, et al, Characterization of wavebreaking time and dissipation of weakly nonlinear wakefields due to ion motion. *Phys. Plasmas* **25**, 103103 (2018).
- [25] K.V.Lotov, Blowout regimes of plasma wakefield acceleration. *Phys. Rev. E* **69**, 046405 (2004).
- [26] K.V.Lotov, Excitation of two-dimensional plasma wakefields by trains of equidistant particle bunches. *Phys. Plasmas* **20**, 083119 (2013).
- [27] J.B.Rosenzweig, et al, Acceleration and focusing of electrons in two-dimensional nonlinear plasma wake fields. *Phys. Rev. A* **44**, 6189 (1991).
- [28] K.V.Lotov, Radial equilibrium of relativistic particle bunches in plasma wakefield accelerators. *Phys. Plasmas* **24**, 023119 (2017).
- [29] K.V.Lotov, Optimum angle for side injection of electrons into linear plasma wakefields, *J. Plasma Phys.* **78**(4), 455 (2012).

Минаков Владимир Алексеевич

**Особенности ускорения пучков в плазменной кильватерной волне
длинного модулированного драйвера**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 14.02. 2022 г.

Подписано в печать 15.02.2022 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 3

Обработано на РС и отпечатано на

ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11