

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию

Горна Александра Андреевича

«Особенности кильватерного ускорения с протонным драйвером
в радиально ограниченной плазме»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Развитие технологии плазменных ускорителей с источником энергии в виде лазерных импульсов фемтосекундной длительности или коротких сгустков ультрарелятивистских электронов, имеет огромную практическую ценность и привлекает внимание передовых мировых лабораторий. Важным направлением развития этих новых плазменных ускорительных технологий является реализуемый в настоящее время на международном ускорителе CERN уникальный проект AWAKE, направленный на создание первого в мире плазменного ускорителя электронов с протонным драйвером и ставящий перед собой цели достичь ранее недостижимых значений энергии ускоренных электронов суб-ТэВ-ного уровня. Диссертационная работа Горна А.А., посвященная исследованию кильватерного ускорения с протонным драйвером, является важным шагом на пути развития современных методов плазменного ускорения электронов, что и определяет **актуальность темы диссертации**. Предложенные в диссертации методы численного исследования и экспериментальной диагностики режимов взаимодействия протонного пучка с плазмой, позволившие существенно увеличить точность количественного совпадения результатов моделирования с экспериментальными данными и объяснить оптимальную схему инжекции электронов в плазменную волну, определяют **научную значимость** результатов, полученных автором. Эти результаты могут широко использоваться как в крупных ускорительных центрах, так и (с соответствующими модификациями) в других

лабораториях, занимающихся задачами плазменного ускорения электронов с использованием различного типа драйверов для возбуждения плазменной волны.

Научная новизна диссертационной работы определяется представленными в ней новыми научными результатами. В частности, автором проведено детальное сравнение экспериментальных данных, полученных в ходе первого в мире эксперимента по ускорению электронов плазменной волной с протонным драйвером, с результатами своих численных расчетов и продемонстрировано их количественное согласие с очень высокой точностью.

Диссертационная работа Горна А.А. состоит из введения, трех глав, заключения, содержит 95 страниц, 41 рисунок, 5 таблиц и библиографический список из 108 наименований.

Во **введении** приводятся: актуальность и цели диссертационной работы, ее научная новизна и практическая ценность, описываются методы исследования и излагается краткое содержание диссертации, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дается описание проекта AWAKE. Эксперимент является прототипом первого в мире плазменного кильватерного ускорителя с протонным драйвером. В данной главе приводятся основные параметры экспериментальной установки, главным элементом которой является 10-метровая плазменная секция, наполненная парами рубидия. Описаны характеристики лазерного импульса, ионизирующего газ в вакуумной камере, драйвера – пучка протонов из кольца SPS в CERN, а также ускоряемого пучка электронов. Большая часть главы посвящена описанию измерительных частей установки, приведены измерения энергетического спектра ускоренных электронов.

Во **второй главе** описываются режимы взаимодействия длинного ультрарелятивистского пучка заряженных частиц с ограниченной по радиусу плазмой при разной ее плотности. Разделы главы упорядочены от линейной по амплитуде поля реакции плазмы на пучок до сильно нелинейной. В **первом разделе** обсуждается постановка задачи, выбор геометрии и упрощающих предположений. Во **втором разделе** реакция радиально-ограниченной плазмы

находится в качестве решения системы уравнений Максвелла и уравнения движения частиц плазмы в линейном приближении. Результат сравнивается со случаем неограниченной плазмы и численным моделированием. **Третий раздел** посвящен слабонелинейному режиму взаимодействия пучка с плазмой. Найдена область параметров, при которых применима линейная теория, объяснен эффект искривления волнового фронта кильватерной волны в приосевой области при плотности плазмы сопоставимой с максимальной плотностью пучка. Показано по какой причине эффект проявляется для поперечной силы, в то время как волновой фронт кильватерного потенциала остается невозмущенным. **Четвертый раздел** описывает физику образования электронного плазменного гало. В рамках раздела получена полуаналитическая модель, позволяющая предсказывать момент возникновения гало. В **пятом разделе** описан нелинейный режим взаимодействия пучка с плазмой. Приведены результаты моделирования для этого случая. В **шестом разделе** подводятся итоги главы. Показано как результаты, описанные в данной главе, повлияли на эксперимент, и, в частности, на выбор схемы инжекции электронного пучка в плазму.

Третья глава посвящена сравнению результатов моделирования с измерениями в эксперименте AWAKE. Глава начинается с описания диагностических станций, измеряющих протонный пучок после выхода из плазменной ячейки, и данных, которые были собраны с их помощью. Далее в **первом разделе** автор минимизирует ошибку во входных данных моделирования, используя результаты измерений начального состояния протонного пучка, собранные в пустой плазменной секции, а также в кольце SPS. Во **втором разделе** выбирается величина, с помощью которой далее результаты моделирования кодом LCODE сравниваются с тремя сериями экспериментальных данных. Серии представлены наборами измерений максимального радиуса дефокусированных в ходе взаимодействия с плазмой протонов при изменяющемся заряде пучка протонов и продольном градиенте плотности плазмы. В итоге автору удается добиться количественного согласия с точностью до нескольких процентов.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

Диссертация Горна А.А. является законченным научным трудом, содержащим большое количество нового научного материала по актуальной теме исследования плазменных методов ускорения электронов протонными драйверами. Необходимо отметить высокую достоверность и качество аналитических и численных исследований, изложенных в диссертации, полноту и убедительность полученных данных, а также обоснованность научных положений, сформулированных в диссертации.

Тем не менее, как всякая значимая работа, диссертация Горна А.А. не лишена некоторых (впрочем, незначительных) недостатков. Отметим следующие из них.

1. Автор использовал full-PIC код для проверки процессов формирования электронного плазменного гало, обнаруженного первоначально в ходе моделирования квазистатическим осесимметричным кодом LCODE. Проверялись ли остальные результаты с помощью полномасштабного PIC моделирования или в этом не было необходимости?
2. Не могут ли обнаруженные сложные траектории вылетающих плазменных электронов, формирующие электронные струи и гало, приводить в каких-то случаях к возникновению “паразитному” захвату электронов в плазменную волну или скорости этих электронов всегда оказываются слишком малыми?
3. Не предложено качественного объяснения зависимости параметров протонного пучка от его заряда (рис.3.3). Несмотря на то, что этот результат не являлся предметом изучения в рамках диссертации, представляется, что его краткое объяснение украсило бы работу.
4. В качестве критерия для сравнения режимов самомодуляции протонного пучка в экспериментах и численном моделировании выбран максимальный радиус протонного гало. Не может ли несимметричность гало быть критерием выхода за пределы применимости осесимметричного численного моделирования?
5. В работе указано, что основными параметрами, влияющими на количественные характеристики самомодуляции пучка, являются его длина, радиус и эмиттанс (и именно их влияние, в основном, исследуется в рамках

диссертации), но не описано, на основании каких критериев были отброшены остальные параметры, представленные, например в Таблице 5.

6. Хотелось бы, чтобы по результатам работы автором были сформулированы дальнейшие направления развития экспериментальных исследований в рамках проекта AWAKE.

Оценка диссертационной работы. В целом, изложенные замечания не являются принципиальными и ни в коей мере не меняют общей высокой оценки диссертационной работы А.А. Горна. Следует отметить, что все изученные автором задачи глубоко и систематически проработаны. Автор продемонстрировал глубокое знание обсуждаемой тематики. Тема диссертации является весьма актуальной, а полученные выводы – оригинальными, достоверными и обоснованными.

Необходимо отметить большой объем проведенных исследований, которые нашли отражение в 16 статьях в ведущих физических журналах, индексируемых в международных базах данных, причем в трех из них А.А. Горн является первым автором. Результаты диссертационной работы докладывались на многих международных и российских конференциях и хорошо известны специалистам, работающим в этой области. Диссертация в целом оформлена аккуратно, изложение сопровождается большим количеством хорошо подобранных рисунков. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации. Результаты работы могут быть использованы в ИЛФ СО РАН, ИПФ РАН, ФИАН, МИФИ, НИЦ “Курчатовский институт”, CERN и других организациях.

Заключительная часть

Учитывая актуальность темы, научную новизну результатов и достоверность выводов, можно заключить, что диссертационная работа полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Горн Александр Андреевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой

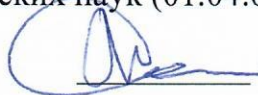
степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Я, Стародубцев Михаил Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.162.02 и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Заместитель директора по научной работе
Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федерального исследовательского центра
института прикладной физики Российской академии наук»,
доктор физико-математических наук (01.04.08 - физика плазмы)

21 ноября 2022



/ Стародубцев Михаил Викторович /

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
института прикладной физики Российской академии наук»
Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46
тел.: +7(903)043-82-75
e-mail: mstar@ipfran.ru

Подпись М.В. Стародубцева заверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН

к.ф.-м.н.



/ Корюкин Игорь Валерьевич /