

ОТЗЫВ

официального оппонента Бочкарева Сергея Геннадьевича
на диссертационную работу *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

Объем диссертации Горна А.А. составляет 94 страницы. Библиография включает 108 наименований. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и публикаций диссертанта.

Во введении обозначена актуальность темы исследования, степень разработанности темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, показана её научная новизна, а также научная и практическая значимость, сформулированы основные результаты и положения, выносимые на защиту, содержатся сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

Первая глава состоит из одного раздела. В данной главе приводится и объясняется схема и режим работы экспериментальной установки, описывается эксперимент AWAKE (The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment), а также принцип ускорения электронов с применением пучка заряженных частиц (протонного драйвера).

Вторая глава содержит шесть разделов и посвящена теоретическому анализу реакции ограниченного по радиусу плазменного столба на длинный ультрарелятивистский пучок заряженных частиц. Обсуждаются эффекты, возникающие вследствие наличия у плазмы резкой границы. Данные эффекты оказывают влияние на возбуждаемую кильватерную волну и влияют на развитие самомодуляции драйвера в плазме. **В первом разделе** описана постановка задачи, геометрия задачи и приведены основные параметры моделирования и базовые параметры эксперимента AWAKE. Показано, что плотность плазмы вблизи торцов плазменной ячейки установки AWAKE характеризуется изменяющимся продольным профилем. Описаны все возможные режимы пучково-плазменного взаимодействия в широком диапазоне значений плотности плазмы. **Второй и третий разделы** посвящены описанию, соответственно, линейного и слабонелинейного режимов взаимодействия пучок-плазма. **Во втором разделе** приведены и проанализированы аналитические выражения для линейного случая, в том числе для кильватерного потенциала и полей, создаваемых в радиально ограниченной однородной плазме пучком частиц низкой плотности. Выведена зависимость кильватерного потенциала от плотности плазмы на оси системы и получены границы применимости аналитической теории. **В третьем разделе** даны границы применимости линейной теории, исследовано влияние поперечной неоднородности возмущения плотности плазмы. Продемонстрировано, что искажение фронтов кильватерной волны вблизи оси вызывает её опрокидывание, а также приводит к появлению вылетающих за её границу плазменных электронов.

В четвертом разделе проведен подробный анализ исследования причины вылета электронов из плазмы. Развита теория для нелинейных плазменных волн, что позволило уточнить механизм генерации электронного гало, определить положения источника струй вылетающих электронов. Показано, что в случае протонного драйвера электронное гало формируется в результате опрокидывания волны. Также проанализирован случай отрицательно заряженного драйвера. **В пятом разделе** описан нелинейный режим взаимодействия пучка с плазмой. **В шестом разделе** дано объяснение выбора способа инжекции электронов в кильватерную волну. При использовании положительнозаряженного драйвера, в среднем в плазме преобладает положительный радиальный градиент кильватерного потенциала, что приводит к дефокусировке релятивистских сгустков, движущихся вблизи оси драйвера в плазме с плавно нарастающей плотностью в продольном направлении. На основании этого сделан вывод о неприменимости осевой инжекции электронного сгустка в эксперименте AWAKE.

В третьей главе диссертант приводит сравнение данных измерений протонного пучка полученных в эксперименте AWAKE с результатами численного моделирования осесимметричным квазистатическим кодом LCODE. Данная глава состоит из двух разделов. **В первом разделе** описано измерение характеристик протонного пучка в пустой плазменной секции с целью установления корреляций между параметрами пучка. **Во втором разделе** подробно описывается сравнение экспериментальных данных и данных численного моделирования. Продемонстрировано, что процесс самомодуляции чувствителен к следующим параметрам: поперечному размеру пучка, его эмиттансу и положению затравки на входе в плазму. На основании сравнений с экспериментальными данным показано, что для достижения разумного согласия необходим учет эффекта плазменного электронного гало.

Заключение содержит формулировки основных результатов диссертационной работы.

Замечания:

- 1) В диссертации не приводятся теоретические оценки (пусть даже сверху) на максимальную энергию ускоренных электронов, а также из данных численного моделирования, хотя экспериментально измеренные спектры электронов приводятся.
- 2) В теоретической части диссертации в начале второй главы (раздел 2.1) не приводится вывод полной системы уравнений для описания динамики системы пучок-плазма, которая решалась численно и аналитически. С учетом того что работа является квалификационной, а размер диссертации позволяет, вывод соответствующих уравнений имело бы смысл привести.
- 3) Во второй главе диссертации (раздел 2.5) описан нелинейный режим взаимодействия пучка с плазмой. В частности, указывается на хаотичный характер реакции плазмы, когда одновременно присутствуют колебания на плазменной частоте и радиальные колебания электронного гало. Этот режим стоило бы описать

подробнее, указав как «хаотический характер реакции плазмы» может повлиять на характеристики ускоренных электронов.

- 4) В тексте диссертации не указан четкий критерий выбора размера окна моделирования, что в принципе можно сделать из аналитических оценок, приводится только сравнение результатов моделирования для узкого и широкого окна, см. рис. 3.7, на стр. 66.
- 5) В диссертации, в том числе и во введении, присутствуют нерасшифрованные англоязычные сокращения, например, FBPIC. Вместе с тем этот код также используется для расчета динамики плазмы, в том числе для анализа вылета электронов из плазмы в результате опрокидывания. Стоило бы описать более подробно особенности этого кода, а также кода LCODE, в том числе указать какие граничные условия для полей (потенциала), частиц пучка и плазмы используются в моделировании.
- 6) В тексте также присутствуют жаргонные термины и выражения, которые стоило бы пояснить, в том числе на стр. 71 ” электроны ... могут выносить с собой ненулевой потенциал”; “стенка окна моделирования” на стр. 65, “карта «интегральной» радиальной силы” на стр. 55, “узкое окно ... «выключает» эффект гало электронов” на стр. 65, и др.
- 7) Есть неаккуратности в структурировании текста диссертации, так в конце второй и третьей главы не приводятся выводы и результаты по текущей главе, что стоило бы сделать.

Актуальность. Возможность применения протонных пучков в качестве драйвера для получения сгустков ускоренных электронов вызывает большой интерес у исследовательских групп по всему миру. Это связано с важным преимуществом протонного драйвера – его огромной энергоемкостью в совокупности с потенциальной возможностью получать высокоэнергетичные электронные пучки на одной стадии ускорения. Дальнейшее использование ускоренных частиц, например, для целей фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц, накладывает определенные ограничения на требуемые темпы ускорения снизу и на длину ускорения сверху.

Таким образом, проведенные диссертантом исследования являются актуальными. Тема диссертации Горна А.А. соответствует паспорту специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Полученные Горном А.А. результаты обладают несомненной **научной новизной, теоретической и практической значимостью**. Они могут быть полезны как при реализации различных международных проектов, таких как AWAKE, так и для планирования будущих экспериментов. Результаты диссертации неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в 16 статьях, причем все в высокорейтинговых реферируемых журналах из списка ВАК. Их **достоверность** также подтверждается хорошим согласием с экспериментальными результатами на установке AWAKE, а также хорошо оттестированными расчетными моделями.

Заключительная часть:

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы. Диссертация Горна Александра Андреевича «Особенности кильватерного ускорения с протонным драйвером в радиально ограниченной плазме», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Бочкарев Сергей Геннадьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Горна Александра Андреевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Высококвалифицированный старший научный сотрудник
сектора лазерно-плазменной физики высоких энергий
отделения квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
кандидат физико-математических наук (01.04.21 – Лазерная физика)

16 ноября 2022 г.

 / Бочкарев Сергей Геннадьевич /

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53
Тел.: +7 (499) 132-68-36
E-mail: bochkarevsg@lebedev.ru

Подпись Бочкарева С.Г. заверяю:

Ученый секретарь ФИАН, к.ф.-м.н.



/ Колобов Андрей Владимирович /