

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Минакова Владимира Алексеевича

**«Особенности ускорения пучков в плазменной кильватерной волне длинного модулированного драйвера»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.9. Физика плазмы и 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

### **Актуальность темы исследования**

Новые методы ускорения заряженных частиц – актуальная в настоящее время тема, важность которой обусловлена в первую очередь желанием уменьшить размеры традиционных ускорителей заряженных частиц за счет увеличения ускоряющих градиентов. Диссертация соискателя посвящена одному из перспективных методов в данной области – кильватерному ускорению в плазме. Ускоряющие поля возбуждаются в плазме с помощью компактного объекта: мощного лазерного импульса или пучка заряженных частиц. Такой подход позволяет достичь темпов ускорения в несколько ГэВ/м при плотности плазмы около  $10^{15}$  частиц на кубический сантиметр, что на порядок превосходит рекордные параметры традиционных ускорителей. От типа драйвера зависит область применения кильватерного ускорителя. Протонные пучки обладают большой энергоемкостью, и позволяют производить ускорение электронов до энергий порядка ТэВ в схемах с одной плазменной секцией. Именно поэтому данный метод исследуется в контексте получения пучков электронов сверхвысоких энергий для использования в коллайдерах частиц. Для эффективного возбуждения кильватерной волны, драйвер должен быть как можно более коротким по сравнению с плазменной длиной волны. Сжать протонный пучок, который обычно в синхротроне имеет длину около 10 см, до такого размера не представляется возможным, однако из длинного

пучка возможно получить последовательность протонных микросгустков, используя самомодуляционную или поперечную двухпотоковую неустойчивость.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Содержание и структура диссертации Минакова В.А. соответствуют заявленной специальности и цели исследования. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 76 страницах, включая 28 рисунков, 6 таблиц, и содержит 57 наименований библиографии.

Во **введении** автор обосновывает актуальность проведенных исследований, формирует цель и задачи работы, а также описывает методологию и методы исследования.

В **первой главе** описывается код, который выступал в роли основного инструмента исследований в его работе. Приведены модели описания плазмы и пучка, численная схема и способ проведения параллельных вычислений с большим числом вычислительных узлов.

Во **второй главе** описан эксперимент AWAKE, который проводился в ЦЕРН с целью проверки работоспособности схемы кильватерного ускорения с протонным драйвером. В рамках этой части диссертации проводилось исследование чувствительности эксперимента к начальным параметрам плазмы и пучка. Эта работа была необходимым этапом в разработке эксперимента и показывала его устойчивость к случайному изменению параметров системы от выстрела к выстрелу, а также позволила определить основные эффекты, ограничивающие максимальное ускоряющее поле.

**Третья глава** описывает как качество ускоряемого электронного сгустка портится в процессе ускорения. Автор перечисляет важнейшие эффекты, увеличивающие эмиттанс пучка, и выделяет еще один, не описанный ранее. Попадающему в плазму драйверу необходимо некоторое время, чтобы прийти к равновесному состоянию. За это время вместе с формой драйвера меняется и

фокусирующая сила, удерживающая электронный сгусток в ходе ускорения, что приводит к увеличению его фазового объема.

**Четвертая глава** посвящена влиянию движения ионов плазмы на амплитуду возбуждаемой в ней кильватерной волны. Описываются режимы, при которых движение тяжелых ионов плазмы успевает проявиться и повлиять на ускорение электронов. Установлено, что это влияние может иметь не только негативный, как происходит в основном, но и позитивный характер. Подбором параметров драйвера найден случай, когда благодаря этому эффекту ускоряющее поле возрастает на 40%.

В **заключении** автор приводит основные результаты, полученные в ходе диссертационной работы.

Тема диссертации полностью соответствует ее содержанию. Представленные положения и выводы хорошо обоснованы в тексте диссертации. Текст автореферата правильно отражает содержание диссертации и содержание публикаций по теме диссертации.

#### **Научная новизна результатов**

1. Произведено исследование чувствительности эксперимента AWAKE к начальным параметрам пучка протонов и плазмы. Показана устойчивость системы к случайным флуктуациям в пределах, ожидаемых в эксперименте.
2. Исследовано ухудшение качества пучка электронов в ходе ускорения. Обнаружен новый физический эффект, влияющий на этот процесс. Предложен способ предотвращения роста эмиттанса электронного сгустка. Данные результаты носят общий характер и применимы ко всем схемам плазменного ускорения.
3. Впервые найден режим, при котором движение тяжелых ионов плазмы приводит к росту величины ускоряющего поля в кильватерном ускорителе.

**Практическая и научная значимость полученных в диссертации результатов** не вызывает сомнений. Результаты могут быть использованы для предсказания и интерпретации экспериментальных данных экспериментов по кильватерному ускорению, особенно, эксперимента AWAKE. Исследования по большей части носят общий характер и потому могут быть обобщены на случаи конфигураций с похожими параметрами протонных пучков, которые схожи на многих ускорителях. Часть же исследованных эффектов относятся к драйверам любого типа.

### **Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность данных, изложенных в диссертационной работе, обеспечивается использованием современного программного обеспечения и методик проведения исследований. Результаты численного моделирования согласуются как с измерениями, проведенными в ходе эксперимента AWAKE, так и выводами аналитических теорий. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 статьях, индексируемых в WoS и Scopus, они представлялись на зарубежных и всероссийских конференциях, и получили одобрение коллаборации AWAKE.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Диссертация по объему едва дотягивает до 75 страниц со списком литературы. При этом в работе, по сути, отсутствует литературный обзор по проблеме плазменного ускорения заряженных частиц, совершенно не ясна роль работ автора – что было известно до его работ. Отсутствуют выводы по главам, а понять что-то из текста заключения можно, лишь прочитав текст всей диссертации. Существенным и не ясным остается также вопрос о вкладе автора – участвовал ли он в разработке и оптимизации использованных кодов или использовал уже существующие пакеты без их существенной доработки?

2. Защищаемые положения по диссертации также совершенно не могут быть прочитаны, как самостоятельные научные утверждения: ...улучшение заряда пучка? ... не приводит к пропорциональному росту ускоряющего поля, а к непропорциональному? Что такое малые изменения??? И какое изменение амплитуды считается значительным??? Движение ионов может приводить .. а может и нет???
3. В главе 2 проведены расчеты в широком диапазоне параметров, которые показали, что наилучшими являются некие «базовые» параметры? Из текста работы не ясно, откуда взялись эти базовые параметры. Если для таких параметров проводятся или планируются эксперименты, то кем и когда они предложены?
4. На стр.40 постулируется, что плазменная граница – резкая. Насколько такое предположение оправданно?
5. В работе можно найти массу опечаток. Надписи на рисунках выполнены на английском языке. В табл.1 в формуле для фокусирующей силы, по-видимому, содержится опечатка.

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки работы и квалификации ее автора. Все основные положения и выводы диссертации опубликованы в 13 публикациях в рецензируемых журналах и сборниках трудов конференций. Автореферат соискателя в полной степени отражает положения, выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации.

Диссертационная работа Минакова Владимира Алексеевича «Особенности ускорения пучков в плазменной кильватерной волне длинного модулированного драйвера» выполнена на высоком научном уровне, является законченной научно-квалификационной работой и полностью соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением

Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Минаков Владимир Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.9. Физика плазмы и 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Савельев-Трофимов Андрей Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Минакова Владимира Алексеевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук, профессор  
кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета  
Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

А.Б. Савельев-Трофимов

17.03.2022

Контактная информация:

Савельев-Трофимов Андрей Борисович,  
доктор физико-математических наук (специальность 01.04.21), профессор  
физический факультет, Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова»  
адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1,  
телефон: 8 (495) 939-53-18,  
e-mail: abst@physics.msu.ru

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора А.Б. Савельева-Трофимова заверяю

Декан  
физического факультета  
Московского государственного  
университета имени М.В.Ломоносова  
профессор



И.Н. Сысоев