

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу *Пугачёвой Дарьи Валерьевны*

«Лазерно-плазменное ускорение поляризованных заряженных частиц» на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.9 – Физика плазмы

Объём диссертации Пугачёвой Д.В. составляет 106 страниц. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и публикаций диссертанта.

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

Литературный обзор состоит из трёх разделов и включает обзор экспериментальных результатов. **Первый раздел** содержит описание процесса генерации лазерным импульсом кильватерных волн в плазме в режимах лазерного кильватерного ускорения, самомодуляции и в режиме плазменного пузыря. Приведены условия бездифракционного распространения лазерного импульса. **Во втором разделе** рассматриваются процессы инжекции и ускорения электронов в поле кильватерной волны. Обсуждается прямое ускорение частиц лазерным полем. **Третий раздел** посвящен обзору различных ускорительных схем на основе лазерно-плазменных методов для генерации частиц ультрарелятивистских энергий в ТэВ-диапазоне и целесообразности использования спин-поляризованных сгустков частиц в экспериментах.

Первая глава состоит из пяти разделов. **В первых двух разделах** диссертант описывает систему уравнений, используемую в дальнейшем для моделирования динамики распространения лазерного импульса и генерации кильватерной волны в плазме, и самосогласованного расчета эволюции траектории, импульса и спин-поляризации заряженной частицы в процессе ускорения в поле кильватерной волны без учета влияния синхротронного излучения. **В третьем разделе** исследуется динамика прецессии спина при движении частицы под действием линейной фокусирующей силы и постоянной однородной ускоряющей силы, что является некоторым приближением реальных кильватерных полей, действующих на частицу вблизи оси ускорения. В заданных приближенных полях получена аналитическая формула, позволяющая описывать прецессию спина электрона в зависимости от его начального положения и энергии.

В четвертом разделе исследуется деполяризация электрона в зависимости от его начального положения, энергии и фазы инжекции при его ускорении в поле кильватерной волны, генерируемой лазерным импульсом в плазменном канале с параболическим профилем плотности в умеренно нелинейном режиме. Описаны условия, позволяющие минимизировать величину конечной деполяризации. **В пятом разделе** приведены выводы по результатам, полученным в первой главе.

Вторая глава содержит шесть разделов и посвящена проблеме сохранения качества электронных и позитронных сгустков при многостадийном лазерно-плазменном ускорении, а также анализу различий в процессах ускорения этих сгустков в различных режимах. **В первом разделе** исследуются факторы, влияющие на рост эмиттанса в поперечном сечении электронного сгустка при его ускорении в умеренно нелинейном режиме. Обозначены ограничения на начальные параметры сгустка для минимизации роста эмиттанса в процессе ускорения. **Второй, третий и четвертый разделы** содержат сравнительный анализ динамики характеристик поляризованных электронов и позитронов при ускорении в линейном и умеренно нелинейном режимах. Показано, что в случае линейного режима ускорение электронов и позитронов происходит с одинаковой эффективностью. В умеренно нелинейном режиме ускорительная фаза для позитронов укорачивается, а максимальный прирост энергии уменьшается. **В пятом разделе** предлагается способ сохранения эмиттанса и поляризации при вводе электронного сгустка в ускорительную стадию и выводе из нее. Показано, что для характерных параметров умеренно нелинейного режима ускорения использование линейно нарастающих и спадающих профилей плотности с одновременным линейным уменьшением/увеличением радиуса плазменного канала на входе и выходе из ускорительной стадии позволяет уменьшить рост эмиттанса в ~ 1.5 раза, деполяризации — в ~ 2.5 раза. **Шестой раздел** обобщает выводы и результаты, полученные в предыдущих разделах второй главы.

В третьей главе диссертант исследует влияние различных эффектов, связанных с бетатронным излучением, на темп набора энергии электроном, динамику его траектории и поляризации при движении в полях, характерных для различных режимов лазерно-плазменного ускорения. **В первом разделе** влияние бетатронного излучения учитывается посредством включения в уравнения движения электрона силы радиационного трения в форме Ландау-Лифшица. С помощью моделирования ускорения частицы до энергии около 4 ТэВ в однородной ускоряющей и линейной фокусирующей силах показано, что большая фокусирующая сила, характерная для сильно нелинейного режима (режим плазменного пузыря), приводит к снижению темпа набора энергии электроном и уменьшает величину деполяризации. Аналогичное моделирование ускорения частицы под действием сил, характерных для умеренно нелинейного режима, показывает, что в этом случае сила радиационного трения практически не влияет на динамику характеристик частицы. **Во втором разделе** помимо влияния силы радиационного трения исследуется эффект радиационной поляризации, возникающий в следствие взаимодействия спина электрона с полем излученного фотона. Диссертант приводит оценки характерного времени радиационной поляризации для величин полей, свойственных лазерно-плазменным ускорителям. Показано, что рассматриваемый эффект не оказывает значительного влияния на динамику прецессии спина электрона при ускорении до энергии ~ 4 ТэВ как в сильно нелинейном, так и в умеренно нелинейном режимах, несмотря на то что время ускорения в этих случаях на несколько порядков превышает характерное время радиационной поляризации. **В третьем разделе** сформулированы основные результаты главы.

Заключение содержит формулировки основных результатов диссертационной работы.

Замечания:

- 1) В главе 2 диссертации пренебрегается влиянием собственного заряда инжектируемого сгустка. Логично было бы обсудить условия, при которых можно пренебречь влиянием собственного заряда инжектируемого извне пучка электронов (позитронов) на кильватерные поля, и, в конечном счете, на процесс ускорения и деполяризации сгустков электронов (позитронов). В тексте диссертации также не указано, для какого числа электронов (позитронов) в сгустке были произведены расчеты, результаты которых представлены в главах 2-3.
- 2) В диссертации все время вперемешку встречаются термины “синхротронное излучение” и “бетатронное излучение”, нигде нет четкого пояснения: это одно и то же, или автор вкладывает разный смысл в эти термины?
- 3) В диссертации, в том числе и во введении, а также в главах 2, 3 обсуждаются условия согласования параметров, определен самосогласованный радиус канала, однако, главе 1 (раздел 1.4) не обозначено, являются ли параметры лазера и плазмы самосогласованными, или как подбирались в данном случае эти параметры?
- 4) В тексте диссертации не дается определения эмиттанса (или эмиттансов, так как характеристик несколько), хотя и есть отсылка к соответствующей литературе. Также в тексте диссертации, к сожалению, не приводится формулирована теоремы, которая определяет условия, при которых эмиттанс строго говоря сохраняется.

Актуальность. Возможность создания компактных (table-top) ускорителей заряженных частиц на основе лазерно-плазменных методов для широкого круга практических приложений вызывает большой интерес к этой тематике у исследовательских групп по всему миру. Уже получены экспериментальные результаты по ускорению электронов до энергии около 8 ГэВ. Дальнейшее использование ускоренных частиц, например, для создания лазера на свободных электронах, накладывает определенные ограничения на качество сгустка. Для возможности практического применения, пучки электронов должны обладать малым эмиттансом и энергетическим разбросом.

Создание альтернативного классическому электрон-позитронного лазерно-плазменного коллайдера требует большой теоретической и экспериментальной работы по согласованию ускорительных каскадов. Для успешной транспортировки частиц между ускорительными этапами с сохранением качества сгустка необходимо обеспечить плавный ввод частиц в каскад и вывод из него. Для того, чтобы ускоренные в таком коллайдере частицы можно было использовать в современных экспериментах по физике высоких энергий, они должны обладать заданной спин-поляризацией. Таким образом, проведенные диссертантом исследования по сохранению качества ускоряемых электронных и позитронных сгустков, а также исследование динамики поляризации в лазерно-плазменном ускорителе являются актуальными. Тема диссертации Пугачёвой Д.В. соответствует паспорту специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Полученные Пугачёвой Д.В. результаты обладают несомненной **научной новизной, теоретической и практической значимостью**. Они могут быть полезны как при реализации различных международных проектов, таких как EuPRAXIA, так и для планирования и анализа экспериментов, проводимых соответствующими группами в Институте прикладной физики РАН и Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова.

Результаты диссертации неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в реферируемых журналах из списка ВАК. Их достоверность также подтверждается хорошим соответствием между аналитическими оценками и результатами численного моделирования. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Заключительная часть:

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор, Пугачёва Дарья Валерьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Официальный оппонент

Высококвалифицированный старший научный сотрудник
сектора лазерно-плазменной физики высоких энергий
отделения квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
кандидат физико-математических наук



/ Бочкарев Сергей Геннадьевич

119991 г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, тел.: (499) 132-68-36, e-mail: bochkarevsg@lebedev.ru

Подпись Бочкарева С.Г. заверяю
Ученый секретарь ФИАН,
к.ф.-м.н.

24.11.2021



/ Колобов Андрей Владимирович

119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, тел.: (499) 132-69-78, kolobov@lebedev.ru
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) 119991 г. Москва, Ленинский проспект, д.53, 8 (499) 132-65-54, office@lebedev.ru