

### Отзыв

Официального оппонента Пугачёвой Дарьи Валерьевны на диссертационную работу  
Артеменко Ивана Игоревича «Ионизационная инициация каскадов, спиновые и  
радиационные эффекты в сильных лазерных и плазменных полях», представленную на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9  
- «Физика плазмы»

**Актуальность** данного диссертационного исследования, выполненного И.И. Артеменко, обусловлена значительными достижениями в области лазерных технологий. Разработка лазерных систем с пиковой мощностью достигающей 10 петаватт (SULF), и достижение интенсивности излучения  $10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup> в экспериментах CoReLS, наряду с планами по созданию экзаваттных лазерных установок, стимулируют научный интерес к области нелинейных квантово-электродинамических эффектов. Характер этих эффектов, возникающие при взаимодействии заряженных частиц с лазерными полями высокой мощности, может сильно зависеть от спиновых степеней свободы, что, в свою очередь, стимулирует исследования поляризационных свойств частиц в рамках сильнополевой квантовой электродинамики. В научной среде активно обсуждаются различные конфигурации экспериментальных установок для генерации КЭД-каскадов, разработки методов получения поляризованных пучков электронов, а также разработки методологий корректного моделирования реакции излучения при взаимодействии электронов с лазерными полями высокой интенсивности. В данном контексте исследование, проведенное И.И. Артеменко занимает важное место в спектре актуальных научных исследований.

Диссертационное исследование, выполненное И.И. Артеменко, включает введение, три главы и заключение. Кроме того, в работе представлен список из 166 наименований цитируемых источников, охватывающий 17 страниц, а также список публикаций автора по теме диссертации, занимающий 2 страницы. Полный объем диссертации составляет 143 страницы, 26 рисунков и 2 таблицы.

**Во введении** диссертационного исследования И.И. Артеменко освещается актуальность выбранной тематики, описывается современное состояние экспериментальных и теоретических разработок по тематике работы. Определены основные термины и физические величины, необходимые для понимания представленного материала читателем. Формулируются цели и задачи исследования, артикулируются основные научные положения, предлагаемые к защите. Также изложен индивидуальный вклад автора в проведенное исследование и приведены доказательства апробации диссертации.

**Первая глава** диссертации И.И. Артеменко разделена на две части. В первой части представлен анализ задачи о взаимодействии лазерного импульса с контрпропагирующим пучком электронов, а также изучается динамика этого же пучка в магнитном поле. Продемонстрирована возможность замены лазерного поля постоянным магнитным полем в контексте уравнения Больцмана, при которой энергетические спектры электронов не меняются. Рассмотрено одномерное уравнение Больцмана, представлено его решение в общем виде и обсуждается справедливость применения приближения Фоккера – Планка. Задача о прохождении пучка электронов сквозь лазерное поле была промоделирована с использованием PIC-кода, аналогично задача о взаимодействии пучка электронов с постоянным магнитным полем исследовалась численно с помощью кода Scintillans. Было показано, что в пределах приближения Фоккера – Планка спектры электронов, взаимодействующих с лазерным полем, могут быть воспроизведены путем замены лазерного поля эквивалентным постоянным магнитным полем, действующим в течение соответствующего времени взаимодействия. Установленное соответствие между магнитными и лазерными полями, а также продолжительностью взаимодействия с постоянным магнитным полем, остается валидным даже за пределами применимости приближения Фоккера – Планка.

Во второй части **первой главы** диссертации проводится исследование излучения электрона, движущегося в постоянном магнитном поле, с учетом влияния действительной части вакуумного показателя преломления. Исследование базируется на квазиклассическом подходе и использует формулу для показателя преломления вакуума во внешнем магнитном поле, полученную в предшествующих работах. Было выявлено, что вклад действительной части вакуумного показателя преломления, индуцированного магнитным полем, в модификацию спектра фотонов, излучаемых электроном, становится заметным в режимах, выходящих за рамки применимости теории возмущений. Дополнительно была продемонстрирована перспективность использования мюонов в качестве пробных частиц для экспериментального обнаружения эффектов, обусловленных действительной частью показателя преломления вакуума, на радиационные спектры. Это открытие предоставляет новые возможности для дизайна экспериментов, направленных на изучение квантово-электродинамических эффектов в сильных магнитных полях.

**Вторая глава** диссертации И.И. Артеменко также разделена на две части. В первой части главы проводится анализ ионизационной инициации квантово-электродинамических каскадов, при взаимодействии двух лазерных импульсов, распространяющихся в области, заполненной инертным газом. Во второй части главы представлены теоретические выводы выражений для скорости роста каскада во вращающемся электрическом поле. Полученные аналитические формулы для скорости роста каскада были проверены моделированием методом частиц в ячейках (PIC). В рамках главы также осуществлено рассмотрение теоретических подходов к описанию процесса полевой ионизации и реализация различных численных методик для интеграции эффектов полевой

ионизации в PIC-коды. Используя феноменологический подход, выведено выражение для вероятности надбарьерной ионизации. Численное моделирование показало, что тяжелые инертные газы являются более предпочтительными кандидатами для роли инициаторов развития КЭД-каскадов, что обусловлено высоким потенциалом ионизации внутренних электронных оболочек. Это приводит к тому, что электроны, освобожденные в результате ионизации, сразу попадают в область сильного поля, что способствует развитию каскада.

**Третья глава** диссертационной работы И.И. Артеменко посвящена анализу модели непрерывных радиационных потерь (НРП) и оценке ее применимости в контексте динамики электрона, движущегося в постоянном магнитном поле, с учетом радиационного демпфирования и спиновых степеней свободы. Было показано, что рассматриваемая модель, дополненная квантовыми поправками, остается адекватной на временных интервалах, значительно превосходящих характерное время диссипации энергии в квазиклассическом приближении. Для сильно квантового режима было выполнено численное моделирование, показавшее, что модель НРП дает качественно корректное представление о динамике системы в постоянном магнитном поле.

**В Заключении** приведены основные результаты диссертации.

Диссертационное исследование, выполненное И.И. Артеменко, эффективно интегрирует аналитические методы и численное моделирование для решения поставленных задач. Валидность разработанных автором теоретических моделей подтверждена согласием с результатами, полученными с использованием различных программных пакетов, в том числе разработанных автором данной работы, которые прошли тщательную апробацию. Научные положения, сформулированные в диссертации, а также выводы и рекомендации обоснованы и подкреплены результатами моделирования и теоретическими разработками, представленными в работе, сопровождающимися подробными математическими расчетами и соответствующими литературными ссылками. Новизна исследования выражается в установлении соотношений между магнитными и лазерными полями, что позволяет воспроизводить спектры электронов в задаче взаимодействия электронного пучка с лазерным полем путем замены последнего на эквивалентное постоянное магнитное поле. Моделирование формирования КЭД-каскадов с применением различных инертных газов в качестве мишени дает ориентиры, которые могут быть полезны для проектирования будущих экспериментов, направленных на изучение взаимодействия лазерных импульсов с газовыми мишенями и генерацию КЭД-каскадов. Полученное выражение для скорости роста КЭД-каскада может служить инструментом для оценки параметров и планирования подобных экспериментальных исследований. Результаты диссертационной работы были опубликованы в 12 научных изданиях, включая 6 статей в журналах, рецензируемых и индексируемых в базе данных Web of Science и входящих в список ВАК, а также 6 тезисов, представленных на научных конференциях. Автореферат отражает содержание диссертации и дает полное представление о ней. Проведенная диссертационная работа является завершенным исследованием и отвечает всем требованиям ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации. Все результаты получены автором лично или при его определяющем участии (п.10

«Положения»).

**К тексту диссертации и автореферата были выдвинуты следующие замечания:**

- 1) В разделе 2.2.4 проводится сравнение результатов, полученных в приближении глобального постоянного поля, и расчетов трехмерного PIC-моделирования. Приводятся характеристики лазерного импульса, используемые при моделировании, однако отсутствует часть информации о параметрах сгустка частиц (продольный размер, пространственное распределение частиц, их число в сгустке). Если в работе рассматривался плоский пучок, в котором все электроны имеют одинаковую продольную координату в начальный момент времени, то возникает вопрос, как изменятся результаты моделирования и сравнения с ППП при наличии у пучка конечной длины, и какие существуют ограничения на длину сгустка.
- 2) В выводах из раздела 2.2.5 написано, что электронные и фотонные спектры могут быть эффективно вычислены из одномерных уравнений Больцман в ППП, а эффекты, связанные с дифракцией импульса и расталкиванием электронов в сгустке, как правило малы. Однако на рис. 1а кривые 1 для электронных спектров заметно отличаются, так же в комментариях к рисунку указывается, что эти отличия являются следствием дифракции лазерного импульса. Значит ли это, что выбранные для кривых 1 на рис. 1а параметры не являются типичными? Не хватает пояснения с примерами, в каких случаях возникают типичные параметры.
- 3) В разделе 3.2.1 на рис. 12 приведено сравнение предложенного алгоритма для моделирования многоэлектронной ионизации и результатов из работы [129]. Для кривых относительного распределения ионов наблюдаются качественные различия (на графике слева в промежутке  $ct/\lambda \in [5, 5.5]$  “ступеньки” у красной и черной кривых поменялись местами, при  $ct/\lambda \in [5.5, 6]$  появилась ступенька у синей кривой), но в тексте отсутствуют комментарии относительно причины этих различий.
- 4) В подглаве 4.4 на рис. 24 наблюдаются резкие колебания в распределениях электронов и средней проекции спина для электронов с энергией  $> 2.5$  ГэВ. В тексте не хватает пояснения, является ли это следствием нехватки количества частиц при моделировании, или же такое поведение физически обосновано.

Диссертация Артеменко Ивана Игоревича «Ионизационная инициация каскадов, спиновые и радиационные эффекты в сильных лазерных и плазменных полях» представляет собой законченную научно-квалификационную работу высокого уровня, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., предъявленным к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 1.3.9. - «Физика плазмы».

Кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.9 - «Физика плазмы», младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения

науки «Объединённый институт высоких температур РАН», 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2. +7(495) 485 97 22, E-mail: sedyakina.d@gmail.com

Пугачёва Дарья Валерьевна  
«26» апреля 2024 г.

Даю свое согласие на обработку своих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Подпись Пугачёвой Д.В. заверяю:  
Ученый секретарь ОИВТ РАН,  
д.ф.-м.н.



Киверин Алексей Дмитриевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединённый институт высоких температур РАН», 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, +7(495) 484-2300, office@ihed.ras.ru