

## Отзыв

Официального оппонента Брантова Андрея Владимировича 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 диссертационного исследования, проведенного И.И. Артеменко, определяется последними достижениями в области лазерных технологий, связанными с разработкой лазерных систем мощностью в 10 петаватт (SULF), достижением интенсивности в  $10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup> (CoReLS), а также рядом амбициозных проектов, направленных на создание экзаваттных установок (включая Российский проект XCELS). Все это стимулирует интерес к изучению нелинейных квантово-электродинамических (КЭД) эффектов, возникающих при взаимодействии заряженных частиц со сверхмощными лазерными полями. В настоящее время ведется активное обсуждение различных конфигураций для генерации КЭД каскадов, методик получения поляризованных пучков электронов и подходов к моделированию реакции излучения в процессах взаимодействия электронов с интенсивными лазерными полями. Эти явления могут быть чувствительны к спиновым степеням свободы электронов, что стимулирует рост интереса к исследованию поляризационных свойств частиц в области сильнополевой КЭД. В этом контексте, исследование И.И. Артеменко, направленное на разработку упрощенных приближений для теоретического и численного анализа радиационных эффектов и механизмов ионизационной инициации каскадов в поле двух лазерных импульсов, представляет собой важный вклад в развитие этой области науки. Таким образом, актуальность диссертационной работы не вызывает сомнения и она занимает достойное место в ряду современных исследований.

Диссертация Артеменко И.И. состоит из введения, трех глав, заключения, списка публикаций по диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 143 страницы, включая 26 рисунков, 2 таблицы, список литературы из 166 наименований на 17 страницах и список публикаций по диссертации на 2 страницах.

Во введении описывается актуальность темы исследования, текущий прогресс экспериментов и теории в исследуемой области, вводятся необходимые для понимания работы термины и

величины. Определены цели работы, произведена постановка решаемых задач, представлены положения, выдвигаемые на защиту, описывается личный вклад автора, показано, что работа была апробирована.

Первая глава состоит из двух частей. В первой части рассматривается взаимодействие пучка электронов с лазерным импульсом или с магнитным полем, действующим в течении некоторого времени. С использованием уравнения Больцмана в приближении Фоккера-Планка решается задача об изменении спектра электронов вследствие излучения. Используя центральную предельную теорему, получены формулы для связи между магнитным полем, временем его взаимодействия с электронным пучком и характеристиками лазерного поля, которые приводят к одинаковым спектрам электронов после их взаимодействия либо с лазерным импульсом либо с магнитным полем. Выполнено моделирование PIC-кодом задачи о прохождении пучка электронов через лазерное поле, а также, кодом Scintillans, задачи о взаимодействии пучка электронов с постоянным магнитным полем. Показано, что полученное соответствие между постоянным магнитным и лазерным полями и между длительностью лазерного поля и длительностью взаимодействия с постоянным магнитным полем оказывается справедливо даже за пределами применимости приближения Фоккера – Планка. Вторая часть первой главы посвящена исследованию излучения электрона, при его движении в постоянном магнитном поле с учетом добавки к действительной части показателя преломления за счет поляризации вакуума. Используя квазиклассический подход и известную формулу для показателя преломления вакуума во внешнем магнитном поле, показано, что учет поляризации вакуума приводит к незначительным изменениям в спектре фотонов, излучаемых электроном, движущемся в постоянном магнитном поле. Эти изменения могут быть существенными только в области параметров, где теория возмущений несправедлива. Продемонстрировано, что использование мюонов более перспективно для экспериментального наблюдения влияния действительной части показателя преломления вакуума на радиационные спектры (за счет подавления их синхротронного излучения).

Вторая глава также состоит из двух частей. В первой части рассматривается ионизационная инициация КЭД-каскадов в результате столкновения двух лазерных импульсов, распространяющихся в области, заполненной инертным газом. Рассмотрен теоретический подход к описанию полевой ионизации и разные численные способы, для учета полевой ионизации в PIC моделировании. Используя феноменологический подход, получено выражение для вероятности надбарьерной ионизации. Показано, что тяжелые инертные газы оказываются более



перспективными для их использования в качестве затравки для развития КЭД-каскада, что объясняется высоким потенциалом ионизации нижних оболочек, из-за которого электроны с этих оболочек попадают в результате ионизации сразу в область сильного поля. Во второй части выводится выражение для скорости роста КЭД-каскада во вращающемся электрическом поле, которое возникает при столкновении двух циркулярно-поляризованных лазерных импульсов, с учетом силы трения, вызванной реакцией излучения. Полученное выражение для скорости роста каскада проверяется PIC моделированием.

В третьей главе рассматриваются условия применимости модели непрерывных радиационных потерь (НРП) на примере динамики электрона, движущегося в постоянном магнитном поле, с учетом радиационных эффектов и спиновых степеней свободы. Показано, что данная модель с учетом квантовых поправок применима на временах, существенно превышающих характерное время диссипации энергии для квазиклассического режима. В сильно квантовом режиме, как было показано с помощью численного моделирования для постоянного магнитного поля, модель НРП дает качественное описание динамики системы.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертации.

Диссертационная работа Артеменко И. И. хорошо сочетает в себе аналитические подходы и численное моделирование для исследования задач квантовой электродинамики. Достоверность разработанных автором теоретических моделей подтверждается их согласием с результатами моделирования хорошо апробированными кодами, в том числе и теми, что разработал сам автор. **Научные положения, выводы и рекомендации**, сформулированные в диссертационной работе, хорошо аргументированы и обоснованы результатами проведенного моделирования и предложенными в диссертации теоретическими моделями, снабженными необходимыми математическими выкладками и ссылками на литературные источники. Новизна диссертационной работы заключается в получении соотношения между магнитным и лазерным полями, которое позволяет вычислить спектры электронов в задаче о взаимодействии электронного пучка с лазерным импульсом заменой лазерного поля на постоянное магнитное поле; выявлении параметров, при которых возможно изменение спектра излучения пучка электронов/мюонов за счет поляризации вакуума; детальном исследовании ионизационной инжекции электронов для затравки КЭД-каскадов; определении условий применимости модели непрерывных радиационных потерь. **Практическая значимость** проведенных в диссертационной работе исследований состоит в

возможности использования полученных результатов (описание формирования КЭД-каскада с использованием в качестве мишени различных сортов идеальных инертных газов и найденное выражение для скорости роста КЭД-каскада) для планирования будущих экспериментов по наблюдению КЭД-каскадов.

Материалы диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из них 6 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК, индексируемых базой Web of Science, и 6 тезисов докладов.

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»).

**По тексту диссертации и автореферата имеются следующие замечания:**

1. В тексте диссертации и в ряде выносимых на защиту положениях недостаточно четко сформулированы условия применимости представленных моделей и следующих из них выводов. Формулировка первого положения вообще выглядит противоречивой. С одной стороны автор утверждает, спектры электронов, взаимодействующих с лазерным полем, могут быть получены заменой лазерного поля на некоторое постоянное магнитное поле в приближении Фоккера – Планка, а затем пишет, что это справедливо и за пределами применимости приближения Фоккера – Планка. Необходимо более четко математически сформулировать как условия применимости приближения Фоккера–Планка, так и условия применимости возможности замены лазерного поля на магнитное поле. Фактически, для этой замены используются только предположения, что вероятность излучения, энергия излученного фотона и разброс по энергиям фотонов пропорциональны поперечной силе, действующий на электрон, а изменения распределения электронов полностью определяется излучением, которое характеризуется математическим ожиданием и дисперсией, что, вероятно, и увеличивает область применимости полученных выражений. Во втором положении утверждается, что отличия в спектре становятся существенными в области, где теория возмущений несправедлива. Не совсем ясно, означает ли это, что используемая модель также неприменима в этих условиях. Было бы полезно четко сформулировать условия применимости теории возмущений и используемые в модели излучения приближения.

2. В первой главе требуется уточнение какие параметры лазерного пучка и излученных фотонов могут быть получены вследствие замены поля лазерного импульса на постоянное магнитное поле. Можно ли помимо спектров электронов и фотонов получить угловое распределение излучения, проследить изменение пространственных характеристик электронов?
3. Во второй главе представляется интересным провести сравнение туннельной и надбарьерной ионизации. Насколько существенной является надбарьерная ионизация, для которой автором получено модельное выражение?
4. Во второй части второй главы было бы полезно представить на Рис. 21 результаты других авторов, которые обсуждаются в тексте, чтобы наглядно продемонстрировать важность учета силы реакции излучения для вычисления скорости роста КЭД каскада.
5. Название третьей главы «Динамика спина заряженных частиц в сильном лазерном поле» не совпадает с ее содержанием, поскольку в главе рассматривается движение электрона в постоянном магнитном поле.
6. В тексте диссертации встречаются опечатки, жаргонизмы, ошибки в пунктуации, пропущенные слова в предложениях и неточные формулировки. (См. например, стр.8 «затравочных частицы», «атомов с высоким номером»; стр.10 «с использованием фотонной функция Грина» и т.д. Стр. 32 «хорошее совпадение ... показывают, что можно найти более корректное соотношение чем (19).» - видимо имелось ввиду, что (19) работает вне области ее применимости. )

Данные замечание носят скорее рекомендательный характер и не влияют на высокую положительную оценку работы. Диссертация Артеменко И. И. содержит ряд новых и интересных результатов, связанных с теоретическим описанием влияния квантовых эффектов на взаимодействие сверхсильного лазерного излучения с пучками электронов. Особо стоит отметить предложенный механизм ионизационного возбуждения квантового каскада в двух встречных лазерных импульсах и описанную возможность замены лазерного поля на постоянное магнитное для оценки изменения спектров электронов и предсказания спектров излучения.

Диссертация Артеменко Ивана Игоревича «Ионизационная инициация каскадов, спиновые и радиационные эффекты в сильных лазерных и плазменных полях» представляет собой законченную научно-квалифицированную 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».

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.21 - «Лазерная физика», ведущий научный сотрудник Сектора лазерно-плазменной физики высоких энергий Отдела квантовой радиофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН», 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, 53, тел. 499 132 6906 E-mail: brantovav@lebedev.ru



Брантов Андрей Владимирович

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

Подпись Брантова А.В. заверяю:



Ученый секретарь ФИАН к.ф.-м.н. Колобов А.Ф. 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53. (499) 132-62-06. scilpi@mail.ru



«16» апреля 2024 г.

## СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе 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»

№		
1	<b>Фамилия Имя Отчество</b>	Брантов Андрей Владимирович
2	<b>Ученая степень, шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация</b>	Доктор физико-математических наук, 01.04.21 – Лазерная физика
3	<b>Ученое звание</b>	Нет
4	<b>Академическое звание</b>	Нет
<b>Место основной работы:</b>		
5	<b>Полное название организации</b>	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
6	<b>Ведомственная принадлежность</b>	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
7	<b>Тип организации</b>	Научно-исследовательский институт
8	<b>Занимаемая должность, подразделение</b>	Ведущий научный сотрудник, Сектор лазерно-плазменной физики высоких энергий
9	<b>Почтовый индекс, адрес</b>	119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53
10	<b>Телефон</b>	+7 (499) 132-69-06
11	<b>Адрес электронной почты</b>	brantovav@lebedev.ru
<p><b>Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Brantov, A. V., Laser meson factory / A. V. Brantov, M. G. Lobok, V. Yu. Bychenkov - Текст : электронный // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – Vol. 50 (Suppl 7). – P. S790. – URL: <a href="https://doi.org/10.3103/S1068335623190041">https://doi.org/10.3103/S1068335623190041</a> – Дата публикации: 16.10.2023.</li> <li>2. Rakitina, M.A., Target expansion modelling for problems of laser ion acceleration optimization / M. A. Rakitina, A. V. Brantov, S. I. Glazyrin// Optics and Spectroscopy. – 2023. – Vol. 131. – P. 181 – URL: <a href="https://doi.org/10.61011/EOS.2023.02.55782.20-23">https://doi.org/10.61011/EOS.2023.02.55782.20-23</a>– Дата публикации: 26.01.2023.</li> <li>3. Lobok, M. G., Bremsstrahlung gamma-ray source and gamma radiography based on laser-triggered electron acceleration in the regime of relativistic self-trapping of light / M. G. Lobok, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov - Текст : электронный // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – Vol. 50 (Suppl 7). – P. S815. – URL: <a href="https://doi.org/10.3103/S1068335623190132">https://doi.org/10.3103/S1068335623190132</a> – Дата публикации: 16.10.2023.</li> <li>4. Brantov, A. V., Dependence on laser pulse duration of the maximum energy of protons accelerated by intense “slow light” / A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov - Текст : электронный // Plasma Physics Reports. – 2022. – Vol. 48. – P. 585. – URL: <a href="https://doi.org/10.1134/S1063780X22700192">https://doi.org/10.1134/S1063780X22700192</a> – Дата публикации: 12.09.2022.</li> <li>5. Kuratov, A. S. Powerful laser-produced quasi-half-cycle THz pulses / A. S. Kuratov, A. V. Brantov, V. F. Kovalev, V. Yu. Bychenkov - Текст : электронный // Phys. Rev. E. –</li> </ol>		



2022. – Vol. 106. – P. 035201. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.035201> – Дата публикации: 02.09.2022.
6. Lobok, M. G. Laser-based photonuclear production of medical isotopes and nuclear waste transmutation / M. G. Lobok, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov. – Текст : электронный // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2022. – Vol. 64. – P.054002. – URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6587/ac53f0>. – Дата публикации: 18.03.2022.
  7. Brantov, A. V. Proton acceleration from thin foils by extremely short PW laser pulse / A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov. – Текст : электронный // Physics of Plasmas. – 2021. – Vol. 28. – P. 063106. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0048024>. – Дата публикации: 21.06.2021.
  8. Lobok, M. G. Proton Shielded radiography with gamma rays from laser-accelerated electrons in a self-trapping regime / M. G. Lobok, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov. – Текст : электронный // Physics of Plasmas. – 2020. – Vol. 27. – P. 123103. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0028888>. – Дата публикации: 18.12.2020.
  9. Ultrafast target charging due to polarization triggered by laser-accelerated electrons / A. V. Brantov, A. S. Kuratov, Yu. M. Aliev, V. Yu. Bychenkov. – Текст : электронный // Physical Review E. – 2020. – Vol. 102. – P. 021202(R). – URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.102.021202>. – Дата публикации: 13.08.2020.
  10. Brantov, A. V. Laser-triggered fast charge-separation field generates a strong surface current and wave / A. V. Brantov, A. S. Kuratov, V. Yu. Bychenkov. – Текст : электронный // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020. – Vol. 62. – P. 094003. – URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6587/ab9f8f>. – Дата публикации: 27.07.2020.
  11. Anomalous absorption due to development of return current instability / S. I. Glazyrin, A. V. Brantov, M. A. Rakitina, V. Yu Bychenkov. – Текст : электронный // High Energy Density Physics. – 2020. – Vol. 36. – P. 100824. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.hedp.2020.100824>. – Дата публикации: 14.05.2020.
  12. Brantov, A. V. Magnetic field generation from a coil-shaped foil by a laser-triggered hot-electron current / A. V. Brantov, Ph. Korneev, V. Yu. Bychenkov. – Текст : электронный // Laser Physics Letters. – 2019. – Vol. 16. – P. 066006. – URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1612-202X/ab1cb4>. – Дата публикации: 10.05.2019.
  13. Lobok, M. G. Effective production of gammas, positrons, and photonuclear particles from optimized electron acceleration by short laser pulses in low-density targets / M.G. Lobok, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov. – Текст : электронный // Physics of Plasmas. – 2019. – Vol. 26. – P. 124004. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.5125968>. – Дата публикации: 13.12.2019.
  14. Generation of high-charge electron beam in a subcritical-density plasma through laser pulse self-trapping / V. Yu. Bychenkov, M. G. Lobok, V. F. Kovalev, A. V. Brantov. – Текст : электронный // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2019. – Vol. 61. – P. 124004. – URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6587/ab5142>. – Дата публикации: 11.11.2019.

Я, Брантов Андрей Владимирович, согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

\_\_\_\_\_/ Брантов А.В. /

Подпись Брантова А.В. удостоверяю  
Ученый секретарь ФИАН, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_/ Колобов А.В. /

«16» апреля 2024 г.

