

## ОТЗЫВ

официального оппонента Брантова Андрея Владимировича  
на диссертационную работу Самсонова Александра Сергеевича «Влияние реакции  
излучения и генерации электрон-позитронных пар на взаимодействие лазерного  
излучения и потоков заряженных частиц с веществом», представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 –  
«Физика плазмы»

С ростом интенсивности лазерного излучения вводимых в строй и планируемых установок эффектам, связанным с ультра-релятивистским лазерно-плазменным взаимодействием, включая эффекты квантовой электродинамики, уделяется все больше внимания. В первую очередь речь идет о значительном усилении генерации гамма-излучения лазерно-ускоренными электронами, ожидаемом при интенсивностях падающего излучения больше  $10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup>. В этом режиме электроны могут практически сразу терять полученную от лазера энергию на синхротронное излучение, что необходимо учитывать при моделировании взаимодействия. Кроме того, рост интенсивности лазерных полей и энергий ускоренных электронов приводит к необходимости учета эффектов квантовой электродинамики, связанных в том числе с рождением электрон-позитронных пар. Уже появились первые экспериментальные работы, претендующие на нахождение эффектов, связанных с радиационным торможением электронов и рождением электрон-позитронных пар даже при значительно меньших интенсивностях света. Именно изучению характеристик движения электрона в поле электромагнитных импульсов экстремальной интенсивности, особенностей возникновения электрон-позитронной плазмы, а также взаимодействию пучков ультрарелятивистских электронов и позитронов друг с другом и с плазмой и посвящена диссертационная работа Самсонова А. С. Поэтому **актуальность** избранной диссертантом темы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, трех глав, одного приложения, заключения, библиографии и списка рисунков. Общий объем диссертации составляет 176 страниц, из них 144 страницы текста, включая 39 рисунков. Библиография включает 220 наименований.

**Во введении** приводится краткий обзор эффектов квантовой электродинамики, связанных с рождением электрон-позитронных пар и радиационным трением, показана актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлены выносимые на защиту научные положения. Аргументируется достоверность полученных

результатов и дается доказательство апробации диссертационной работы (список конференций и количество опубликованных статей).

**В первой главе** построена модель движения электрона в экстремально сильном электромагнитном поле с учетом радиационного трения. Показано что, если гамма-фактор ультрарелятивистского электрона много меньше безразмерной амплитуды поля, он стремится двигаться по траектории, на которой его потери на излучения минимальны. В асимптотическом пределе данная траектория отвечает движению электрона со скоростью света по прямой, вдоль которой радиационная сила трения в точности обращается в ноль. Построены приближенные траектории электрона в поле стоячей волны, плоской волны и вращающихся постоянных и параллельных друг другу электрическом и магнитном полях, которые в условиях своей применимости хорошо согласуются с результатами численного моделирования. Обсуждается бесконечный рост энергии электрона в поле плоской монохроматической волны. Изучено влияние радиационных потерь на ускорение электрона плазменной волной в рамках упрощенной модели.

**Во второй главе** рассматривается процесс формирования самоподдерживающегося квантово-электродинамического (КЭД) каскада при взаимодействии лазерного импульса с твердотельной мишенью. Показано, что электроны твердотельной мишени могут являться затравкой, которая приводит к возникновению электрон-позитронной плазмы между лазерным импульсом и ускоренной мишенью. Возникающая плазма изменяет величину электромагнитного поля внутри себя (магнитное поле более сильно проникает в плазму по сравнению с электрическим, которое сильнее скинируется), тем самым создавая условия для обратной связи, связанной с циклическим движением позитронов/электронов, испускающих гамма-кванты навстречу лазерному импульсу. Именно эти жесткие гамма-кванты вызывают рождение новых электрон-позитронных пар, позволяя увеличивать область, занимаемую электрон-позитронной плазмой вплоть до полного истощения лазерного импульса. На основе описанного сценария, следующего из результатов численного моделирования, предлагается квази-гидродинамическая модель, включающая законы сохранения для частиц и гамма-квантов, а также законы сохранения их энергий с учетом интегралов рождения электрон-позитронных пар и излучения электронов/позитронов (рождения гамма-квантов). Решение полученной системы уравнений в вакуумной области и области электрон-позитронной плазмы довольно хорошо совпадает с результатами численных расчетов, что говорит о хорошем понимании физики процессов и их полном включении в модель.



**В третьей главе** анализируется взаимодействие пучков релятивистских электронов со встречным пучком позитронов и со слоем плазмы. Представлена аналитическая модель, описывающая разрушение пучка электронов/позитронов в поле встречного пучка с учетом радиационных потерь, хорошо согласующаяся с результатами трехмерного численного моделирования. Показана возможность эффективной конвертации энергии пучка ультрарелятивистских электронов в энергию гамма-излучения в протяженной плазменной мишени. Также приведена модифицированная схема решения уравнений Максвелла в численном коде, позволяющая избегать излучения Вавилова-Черенкова в вакууме неизбежно присутствующего в стандартной схеме за счет численного уменьшения скорости волны (изменения закона дисперсии на сетке).

**В Приложении** приводится численная схема решения уравнений движения частиц с учетом силы радиационного трения (радиационных потерь частиц) в классическом и квантовом приближениях.

**В заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

В диссертационной работе хорошо сочетаются простые аналитические модели с результатами полномасштабного трехмерного моделирования. **Достоверность** разработанных автором моделей подтверждается их согласием с результатами полномасштабного моделирования, проведенного хорошо апробированным численным кодом, и воспроизведением уже известных опубликованных результатов. **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** полученных результатов, заключающаяся в разработке моделей для описания движения электрона в сверхсильных полях и вычисления параметра разрушения сильноточного пучка с учетом релятивистских потерь, а также предсказанию существования самоподдерживающегося КЭД каскада в поле сверхсильного лазерного импульса, не вызывает сомнений, цитирование работ других авторов проведено достаточно полно. Практическая ценность полученных теоретических результатов определяется возможностью их использования для планирования будущих лазерных экспериментов и экспериментов на высокоэнергичных сильноточных коллайдерах, направленных на изучение эффектов квантовой электродинамики и создания эффективных источников жестких гамма-квантов, а также усовершенствованием стандартной схемы численного решения уравнений Максвелла.

Материалы диссертации опубликованы в 20-х печатных работах, из них 10 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК, индексируемых базой Web of Science, и 10 тезисов докладов.

Проведенная работа, судя по автореферату и тексту диссертации, является законченным исследованием. Автореферат отражает содержание диссертации и дает полное представление о ней. Диссертация представляет специально подготовленную рукопись, содержит совокупность новых научных результатов, имеет внутреннее единство. Оформление диссертации отвечает требованиям ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации. Все результаты получены автором лично или при его определяющем участии (п.10 «Положения»).

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

1. В основных результатах работы (и/или защищаемых положениях) явно не хватает количественных оценок. Например, во втором защищаемом положении указывается на формирование самоподдерживающегося квантово-электродинамического каскада в плоской волне экстремальной интенсивности. Было бы полезно расшифровать хотя бы в основных результатах работы, что в данном случае понимается под экстремальной интенсивностью и с каких значений безразмерной амплитуды поля каскад становится самоподдерживающимся.
2. В первой главе утверждается, что развита асимптотическая модель движения электрона в режиме экстремальных радиационных потерь. В то же время модель предсказывает движение электрона по неизлучающей траектории, сводящей его потери на излучения к минимуму. Очевидно, что данное приближение будет работать и в режиме, когда потери на излучения еще не становятся экстремальными, что частично подтверждается и приведенными примерами.
3. В диссертации обсуждается бесконечное ускорение электрона в плоской волне с учетом радиационной силы трения. Было бы полезно указать, сохраняется ли этот эффект для плоской волны конечной длительности, т.е. будет ли ускоряться электрон в вакууме в импульсе конечной длительности (позволяет ли учет радиационной силы трения нарушить адиабатичность взаимодействия электрона с волной)?
4. Во второй главе при выводе гидродинамических уравнений было бы полезно указать, какая величина является параметром, позволяющим ограничиться только низшими моментами функции распределения, обрезав бесконечную систему уравнений для моментов. Например, в классической гидродинамике таким малым



параметром является отношение длины свободного пробега электронов ко всем другим характерным масштабам.

5. Утверждение, что электрон-позитронная плазма эффективно поглощает лазерное излучение (стр. 94) вводит в заблуждение читателей. Энергия лазерного импульса тратится только на ускорение электронов и позитронов в вакуумной области, что и заложено в модели, а лазерный импульс частично отражается от границы плазмы.
6. В третьей главе при изучении сильноточных пучков релятивистских электронов было бы полезно обсудить максимальный ток, который может нести пучок в вакууме (так называемый предельный альфеновский ток).
7. Есть замечания по оформлению диссертации. При записи уравнения движения (1.11) не понятно почему сила обозначена как перпендикулярная, если она содержит явно и продольную компоненту. Ряд графиков приводятся без их подробного обсуждения в тексте (например, рисунок 1.1 б – читателю предлагается самостоятельно разбираться, зачем он приведен). В главе 2 не уточнено, какие ионы используются в численном моделировании. Встречаются опечатки и жаргонизмы (например, стр. 53- последнее предложение «... теория предсказывает к периодическим траекториям электронов... », стр. 66 в выражении 2.4 знак «-» после переноса превратился в «+», стр. 128 – «степ-функция Хевисайда», На стр. 131 в формуле 3.94 пропущен множитель пропорциональный «Т»). В ряде мест было бы полезно провести более подробные выкладки (например на стр. 139 написано, что «величина  $k$  пропорциональна максимальной плотности пучка», однако из приведенных формул это не очевидно).

Отмеченные выше недостатки, носящие, в основном, рекомендательный характер, не влияют на положительную оценку работы в целом. Диссертация Самсонова А. С. содержит ряд новых и интересных результатов, важных как для планирования экспериментов, так и для дальнейших теоретических работ. Особо стоит отметить получение простых аналитических выражений, описывающих движение электрона в плоской волне с учетом радиационных потерь, а также предсказание развития КЭД каскада при воздействии лазерного импульса на тонкую фольгу. Результаты диссертационной работы хорошо известны научной общественности в нашей стране и за рубежом, неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в ведущих международных журналах по тематике работы (десять публикаций в реферируемых журналах из списка ВАК, из них 5 публикаций в журналах первого квартиля).

Диссертация Самсонова Александра Сергеевича «Влияние реакции излучения и генерации электрон-позитронных пар на взаимодействие лазерного излучения и потоков заряженных частиц с веществом» 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., предъявляемым 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. В. 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53. (499) 132-62-06. scilpi@mail.ru

« 8 » ноября 2023 г.



## СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе Самсонова Александра Сергеевича «Влияние реакции излучения и генерации электрон-позитронных пар на взаимодействие лазерного излучения и потоков заряженных частиц с веществом», представленной 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. 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>3. 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>4. 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. – 2022. – Vol. 106. – P. 035201. – URL: <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.035201">https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.035201</a> – Дата публикации: 02.09.2022.</li> </ol>		

5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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. /

« 8 » ноября 2023 г.