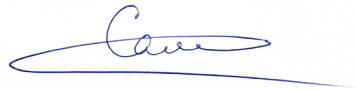


На правах рукописи



САМСОНОВ Александр Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ
И ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПАР
НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ**

1.3.9. — Физика плазмы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН).

Научный руководитель: **Костюков Игорь Юрьевич**,
доктор физико-математических наук, заведующий отделом ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: **Вейсман Михаил Ефимович**,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ «Объединённый институт высоких температур РАН» (г. Москва),

Брантов Андрей Владимирович,
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН» (г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»

Защита состоится 11.12.2023 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.238.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» по адресу: г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН, а также на сайте www.ipfran.ru.

Автореферат разослан 08 ноября 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.1.238.01,
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Квантовая электродинамика (КЭД), описывающая взаимодействие заряженных частиц и электромагнитного (ЭМ) поля, на данный момент является наиболее точной теорией, с точки зрения экспериментального подтверждения её теоретических предсказаний. Однако ряд аналитических результатов нелинейной КЭД, основным из которых является образование электрон-позитронных пар из вакуума (эффект Завтера—Швингера) [1; 2] в сильном постоянном поле, впервые сделанных ещё в работах 30-х годов прошлого столетия, до сих пор не был подтвержден экспериментально. С ожидаемым в ближайшие годы вступлением в строй лазерных установок нового поколения мультитераваттного и субэкзаваттного уровня мощности, таких как ELI, Apollon, SULF, SEL, XCELS и др., станет доступным экспериментальное исследование взаимодействия излучения с веществом в режиме экстремальной интенсивности, что открывает новые возможности для наблюдения эффектов *сильнополевой* КЭД. За определение, какое поле является сильным согласно КЭД, отвечают 4 лоренц-инвариантных параметра: a_0 , \mathcal{F} , \mathcal{G} , χ .

Параметр a_0 — классический параметр нелинейности — определяет безразмерную амплитуду внешнего ЭМ поля и существенность релятивистских эффектов

$$a_0 = \frac{e}{mc} \sqrt{-A_\mu A^\mu} \equiv \frac{eE_0}{mc\omega} \approx 0.85 \sqrt{I[10^{18} \text{ Вт/см}^2] \lambda[\text{мкм}]}, \quad (1)$$

где m и $e > 0$ — масса и модуль заряда электрона соответственно, c — скорость света, A_μ — вектор-потенциал ЭМ поля, E_0 и ω — характерная величина напряжённости и характерная частота изменения ЭМ поля соответственно. При $a_0 > 1$ движение заряженных частиц становится релятивистским. Прогресс лазерных технологий в 20-м веке позволил реализовать идею Векслера о когерентном ускорении частиц [3] за счёт генерации высоких ускоряющих градиентов в плазме при распространении в ней интенсивного лазерного излучения. В настоящее время лазерное ускорение электронов, ионов и даже позитронов рассматривается как одна из самых многообещающих альтернатив классическим ускорителям и одна из самых важных задач как экспериментальной, так и теоретической физики.

Параметры \mathcal{F} , \mathcal{G} фактически определяют взаимодействие ЭМ поля с вакуумом

$$\mathcal{F} = \frac{E^2 - B^2}{E_S^2}, \quad (2)$$

$$\mathcal{G} = \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}}{E_S^2}, \quad (3)$$

где $E_S = m^2 c^3 / e \hbar$ — критическое поле КЭД или поле Заутера—Швингера [4; 5], \hbar — постоянная Планка. Эффект образования электрон-позитронных пар из вакуума является экспоненциально подавленным при $|\mathcal{F}| \lesssim 1$, что объясняет трудность его экспериментального наблюдения. При этом, например, двулучепреломление вакуума [6—9], также являющееся одним из наиболее ранних предсказаний КЭД и определяющееся величинами \mathcal{F} и \mathcal{G} , подтверждается в экспериментах в области $|\mathcal{F}| \ll 1$ как косвенно [10; 11], так и напрямую [12]. Отметим, что поля лазерных импульсов и пучков заряженных частиц являются скрещенными, поэтому в таких конфигурациях значения параметров \mathcal{F} и \mathcal{G} близки к нулю. Далее в работе всегда будет предполагаться выполнение условия $\mathcal{F} = \mathcal{G} = 0$.

Наконец, параметр χ определяет существенность чисто квантовых эффектов при взаимодействии ЭМ поля с частицами

$$\chi = \frac{e \hbar \sqrt{-(F_{\mu\nu} p^\nu)^2}}{m^3 c^4} = \frac{1}{E_S m c} \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{c} \mathbf{E} + \mathbf{p} \times \mathbf{B}\right)^2 - (\mathbf{pE})^2}, \quad (4)$$

где $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ — тензор ЭМ поля, ε и \mathbf{p} — энергия и импульс частицы. Данное выражение записывается для фотонов аналогичным образом с учётом того, что $\varepsilon = \hbar\omega$, $p^\nu = \hbar k^\nu$. Здесь необходимо указать на важную дилекцию между квантовым описанием ЭМ поля как совокупности фотонов и классическим описанием через напряжённости поля. При больших числах заполнения квантовое описание совпадает с классическим, таким образом относительно сильные внешние поля описываются классически, а единичные фотоны, образующиеся в результате КЭД процессов, с помощью собственно квантового подхода. Более того, взаимодействие электронов (и позитронов) с сильным классическим полем ($a_0 > 1$) должно учитываться непертурбативно, т.е. во всех порядках теории возмущений, что делается с помощью представления Фарри [13] и использования Волковских функций для описания состояния электронов [14] (более подробно данная особенность описана, например, в обзоре [15]). Классическое внешнее поле также зачастую существенно отличается от фотонов, образующихся при движении частиц в этом внешнем поле, со спектральной точки зрения. Так, экстремально сильные ЭМ поля доступны сейчас преимущественно в оптическом диапазоне $\hbar\omega_L \sim 1$ эВ, тогда как характерная частота излучения частиц в таком поле, которую можно оценить по синхротронным формулам как $\hbar\omega \sim \gamma^2 \hbar\omega_L$, обычно лежит в области рентгена или даже гамма-диапазоне.

В режиме $\chi > 1$ становятся вероятными квантовые процессы, приводящие к образованию электрон-позитронных пар. К ним относятся, например, процесс Брейта—Уилера [16], в котором жёсткий фотон «распадается» на электрон-позитронную пару, и так называемый *трайидент* про-

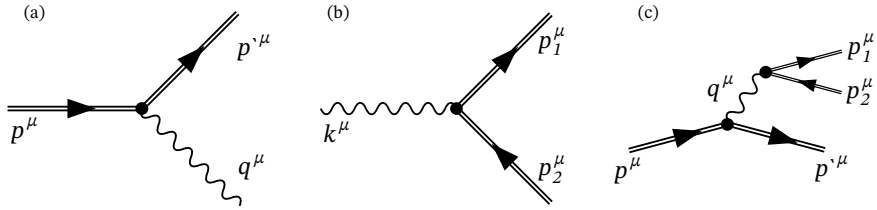


Рис. 1 — Некоторые КЭД процессы во внешнем поле. (а) Комптоновское рассеяние, (b) процесс Брейта—Уилера, (с) трайдект процесс. Двойная прямая линия соответствует «одетому» состоянию электрона во внешнем поле, описываемому Волковской функцией.

процесс, в котором электрон или позитрон излучает виртуальный фотон, который распадается на электрон-позитронную пару (рис. 1). Эти процессы являются экспоненциально подавленными при $\chi \lesssim 1$ и во многом аналогичны процессу образования электрон-позитронных пар по механизму Заутера—Швингера. Однако даже в этом режиме, когда образование электрон-позитронных пар подавлено, взаимодействие заряженных частиц с ЭМ полем может существенно изменяться за счёт реакции излучения. Сам факт того, что заряженные частицы испытывают силу отдачи при излучении известен уже более века и изначально был описан в рамках классической электродинамики, однако привёл к противоречивости понятия об электроне как о точечном объекте и обозначил границу применимости классической ЭД, которую можно определить условием $E_{cl} = m^2 c^4 / e^3 = E_S / \alpha$. Поле такой напряжённости создаёт электрон на расстоянии своего классического радиуса $r_e = e^2 / mc^2$. Отметим, что оно в $1/\alpha \approx 137$ раз больше критического поля КЭД, поэтому квантовые эффекты появляются «раньше», чем становится противоречивой классическая ЭД. Квантовая же электродинамика описывает излучение фотонов электронами непротиворечивым образом и ожидаемо совпадает с результатами классической ЭД в пределе $\chi \ll 1$. Отдельный интерес, однако, представляет модификация спектра излучения и существенный эффект отдачи в режиме $\chi \sim 1$, который до сих пор практически не исследован экспериментально. До недавнего времени существовал лишь единственный пример из 1990-х годов, а именно эксперимент E-144 на ускорителе SLAC, где электронный пучок с энергией 46.6 ГэВ взаимодействовал с лазерным импульсом мощностью $I \sim 10^{18}$ Вт/см² ($a_0 \lesssim 1$, $\chi \ll 1$), производя фотоны высокой энергии, которые, в свою очередь, превращались в электрон-позитронные пары в электромагнитном поле лазерного импульса [17; 18]. Недавно концептуально схожие эксперименты были проведёны на уста-

новке Astra Gemini, где один лазерный импульс использовался для ускорения электронов, а второй — для рассеяния на ускоренных электронах [19; 20]. Важно отметить, что несмотря на неоспоримую ценность этих экспериментов, их результаты содержат определённый уровень погрешности, который пока не позволяет с уверенностью заявлять о подтверждении предсказаний КЭД в режиме $\chi \sim 1$. Благодаря развитию технологий как лазерных установок, так и ускорителей, в ближайшем будущем ожидаются новые эксперименты по физике сильных полей, в частности прямой наследник эксперимента E-144 — эксперимент E-320, на котором ожидается достижение существенно квантового режима взаимодействия [21] ($a_0 > 1$, $\chi > 1$). Тем временем стремительно растёт число теоретических исследований, предсказывающих новые эффекты, вызванные влиянием реакции излучения на коллективные процессы при взаимодействии излучения экстремальной интенсивности с веществом. Эти эффекты крайне различны и включают в себя, например, изменение механизмов ускорения частиц, радиационный захват частиц, крайне эффективное поглощение лазерного излучения, подавление релятивистской прозрачности, обратный эффект Фарадея, поляризацию частиц и многое другое. Сильные радиационные потери также могут оказывать существенное влияние на динамику частиц вблизи различных астрофизических объектов, и в частности могут определять верхний предел энергии ускоренных частиц, динамику магнитосферы пульсаров, характер магнитного пересоединения и пр.

В режиме $\chi \gtrsim 1$ предполагается, что поведение вещества в экстремальных ЭМ полях в большом числе конфигураций во многом определяется развитием *квантово-электродинамических каскадов*. Суть КЭД каскада состоит в излучении жёстких фотонов ультрарелятивистскими частицами в результате нелинейного комптоновского рассеяния и последующего «распада» первых на электрон-позитронные пары в результате процесса Брейта-Уилера¹. Вторичные частицы также становятся вовлечены в образовании следующего поколения пар, что приводит к лавинообразному росту числа частиц. Считается, что процессы развития КЭД каскадов играют немаловажную роль в различных астрофизических феноменах, таких как космические ливни [22], гамма-вспышки [23], процессы в магнитосфере пульсаров [24–27] и др. Разнообразие и сложность образующихся в результате развития КЭД каскада структуры электрон-позитронной плазмы объясняет их активное исследование, далёкое от завершения.

Лабораторное моделирование астрофизических процессов (*лабораторная астрофизика*) за счёт использования экстремально интенсивных лазеров является одной из востребованных, но при этом и крайне нетри-

¹Как было отмечено выше, образование электрон-позитронной пары также возможно напрямую из электрона во внешнем поле в результате трайденд процесса.

виальных задач экспериментальной физики [28]. Во многом это связано с тем, что ключевую роль в таких процессах играет взаимодействие потоков частиц друг с другом, которые необходимо контролируемым образом создавать за счёт взаимодействия лазерного излучения с веществом. В этой связи также исследуются альтернативные возможности, например, использование коллайдеров, являющихся основным инструментом исследований в области физики элементарных частиц и основанных на лобовом столкновении пучков заряженных частиц высокой энергии. В настоящее время существует несколько проектов, нацеленных на строительство высоко-энергетических лептонных коллайдеров с рекордными параметрами, таких как ILC и CLIC. Относительно недавно плазменное ускорение стало рассматриваться в качестве привлекательного альтернативного метода создания линейных коллайдеров с большим ускоряющим градиентом [29]. В области взаимодействия на таких коллайдерах могут генерироваться сильные ЭМ поля, благодаря чему возможно проявление таких эффектов, как *разрушение* пучков (*disruption*), *пучковое излучение* (*beamstrahlung*), образование вторичных электрон-позитронных пар, и даже эффектов *непертурбативной* сильнополевой КЭД. Так как достижение всё больших интенсивностей излучения на лазерных установках предъявляет всё более жёсткие требования к контрасту, стабильности, качеству пучка, пока не достигнутые на практике [30], сильноточные высокоэнергетические коллайдеры, отличающиеся высоким качеством и стабильностью пучка, могут стать привлекательной «безлазерной» альтернативой для экспериментов в области физики сильного поля. Наиболее активно в таком контексте обсуждается проект FACET-II, посвященный изучению плазменного ускорения [21; 31–33].

Целью данной работы является исследование влияния реакции излучения и образования электрон-позитронных пар на процессы, происходящие в экстремально сильных электромагнитных полях в различных конфигурациях, в частности при взаимодействии лазерного излучения с твердотельной мишенью, столкновении сильноточных пучков ультрарелятивистских частиц друг с другом и с плазменной мишенью.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать теорию движения отдельных заряженных частиц в сильных полях в режиме экстремальных радиационных потерь. Определить общие свойства движения частиц согласно разработанной модели. Применить теорию в различных конфигурациях электромагнитного поля. Определить область применимости модели, в частности путём сравнения полученных результатов с результатами, полученными численными методами.

2. Исследовать взаимодействие лазерного импульса экстремальной интенсивности с твердотельной мишенью с помощью численного моделирования. Определить особенности и механизм развития квантово-электродинамического каскада при таком взаимодействии.
3. Разработать аналитическую модель развития квантово-электродинамического каскада в поле плоской волны. Определить точность разработанной модели путём сравнения с результатами численного моделирования.
4. Исследовать влияние реакции излучения на процесс фокусировки пучков ультрарелятивистских частиц при их лобовом столкновении. Разработать модель для вычисления параметра разрушения с учётом реакции излучения. Сравнить полученные аналитические результаты с результатами численного моделирования.
5. Исследовать процесс генерации гамма-излучения при взаимодействии сильноточного пучка ультрарелятивистских электронов с плазменной мишенью с помощью численного моделирования. Разработать модели для вычисления эффективности конверсии энергии пучка в энергию гамма-излучения. Определить параметры пучка на установке FACET-II, оптимальные с точки зрения генерации гамма-излучения.
6. Разработать численную схему решения уравнений Максвелла на сетке с подавленной черенковской неустойчивостью.

Научная новизна:

1. Разработана асимптотическая теория движения заряженных частиц в режиме экстремальных радиационных потерь. Определены общие свойства движения частиц в таком режиме, существенно отличающиеся от таковых в режиме слабой реакции излучения. Продемонстрирован новый метод получения приближённого решения уравнений движения в различных конфигурациях.
2. Обнаружен и качественно описан эффект развития самоподдерживающегося квантово-электродинамического каскада в поле, приближенном к полю плоской волны. Разработана аналитическая модель, описывающая развитие такого каскада.
3. Разработана модель для вычисления параметра разрушения при лобовом столкновении сильноточных пучков ультрарелятивистских частиц с учётом реакции излучения. Достоверность модели подтверждена полноразмерным численным трёхмерным моделированием.
4. С помощью полноразмерного трёхмерного численного моделирования продемонстрирована схема эффективной генерации гамма-

излучения при взаимодействии сильноточного пучка ультрарелятивистских электронов с протяжённой плазменной мишенью. Разработана аналитическая модель для вычисления эффективности конверсии энергии пучка в энергию гамма-излучения. Найдены параметры пучка для установки FACET-II, оптимальные с точки зрения генерации гамма-излучения.

5. Разработана и реализована в коде QUILL альтернативная схема для численного решения уравнений Максвелла на регулярной сетке, отличающаяся существенно подавленной численной черенковской неустойчивостью и подходящей для моделирования пучков ультрарелятивистских частиц.

Практическая значимость:

1. Разработанная теория движения частиц в условиях экстремальных радиационных потерь может быть использована в качестве дополнительного аналитического инструмента для определения динамики частиц в различных конфигурациях электромагнитного поля.
2. Проведённое численное моделирование процесса взаимодействия экстремально интенсивного слабо-сфокусированного лазерного излучения с тонкой твердотельной мишенью расширяет класс конфигураций электромагнитного поля, в которых возможно наблюдение самоподдерживающегося квантово-электродинамического каскада.
3. Разработанная аналитическая модель развития квантово-электродинамического каскада в плоской волне, учитывающая пространственную, а не только временную, динамику частиц, может быть адаптирована для исследования развития квантово-электродинамических каскадов в других конфигурациях, например, при взаимодействии лазерного излучения с различными мишенями, пучками частиц, взаимодействии пучков друг с другом.
4. Проведённое численное моделирование и разработанная аналитическая модель усиления фокусировки сильноточных пучков при их столкновении за счёт реакции излучения может быть использована для уточнения требуемых параметров пучков при проведении экспериментов на коллайдерах и ускорителях нового поколения, таких как CLIC, ILC, FACET-II.
5. Проведённое численное моделирование взаимодействия сильноточного пучка ультрарелятивистских частиц с протяжённой плазменной мишенью может быть использовано для планирования

экспериментов на коллайдерах и ускорителях нового поколения по генерации яркого гамма-излучения.

6. Разработанная схема для численного решения уравнений Максвелла на сетке с подавленной черенковской неустойчивостью может быть реализована в PIC-кодах для существенного увеличения достоверности результатов моделирования процессов с участием пучков ультрарелятивистских частиц.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Уравнения динамики заряженных частиц в режиме экстремальных радиационных потерь могут быть укорочены в силу приближения вектора скорости частицы к безрадиационному направлению. Решения этих уравнений могут существенно отличаться от решений уравнений движения, не учитывающих реакцию излучения, и включают, в частности, периодические траектории частиц в стоячих волнах, неограниченный рост средней энергии частицы в плоских волнах, снижение среднего темпа ускорения частиц в линейном ускорителе.
2. Квантово-электродинимический каскад может развиваться в плоской волне экстремальной интенсивности в самоподдерживающемся режиме. Образующаяся в результате электрон-позитронная плазма расширяется навстречу излучению и эффективно поглощает его. Данный эффект может наблюдаться при взаимодействии лазерного импульса с тонкой твердотельной мишенью в режиме «светового паруса».
3. Учёт пучкового излучения увеличивает скорость фокусировки или дефокусировки сильнооточных пучков ультрарелятивистских частиц при их лобовом столкновении и приводит к увеличению параметра разрушения.
4. При взаимодействии сильнооточного пучка ультрарелятивистских электронов с протяжённой плазменной мишенью происходит эффективная конверсия энергии пучка в энергию гамма-квантов. При доступных на данном этапе проекта ФАСЕТ-II параметрах пучка возможна конверсия энергии пучка в гамма-излучение с энергией отсечки около 5 ГэВ с эффективностью более 10%.
5. Модификация шаблона численной схемы и определённый выбор свободных параметров могут существенно подавить нефизичную генерацию волн частицами в вакууме за счёт черенковского механизма, возникающую из-за наличия дисперсии электромагнитных волн при численном решении уравнений Максвелла на сетке с использованием схем, основанных на методе конечных разностей.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием надёжных физических моделей и применением теоретических методов, имеющих строгое математическое обоснование, таких как теория возмущений, разложение в ряд по малому параметру, усреднение по «быстрому» времени и др. Результаты сопоставлялись с результатами, полученными с помощью различных проверенных численных методов, в частности полномасштабного трехмерного численного моделирования, основанного на базовых физических принципах, а также с результатами, полученными ранее другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на семинарах ИПФ РАН, а также на следующих конференциях, в том числе лично:

1. XXII Научная конференция по радиофизике, Нижний Новгород, Россия, 2018;
2. XXVIII Научная школа «Нелинейные волны 2018», Нижний Новгород, Россия;
3. XXIII Научная конференция по радиофизике, Нижний Новгород, Россия, 2019;
4. VII International Conference “Frontiers of Nonlinear Physics”, Nizhny Novgorod, Russia, 2019;
5. XIX Научная школа «Нелинейные волны 2020», Нижний Новгород, Россия, 2020;
6. IV International Conference «UltrafastLight-2020», Moscow, Russia, 2020;
7. ELI-NP Autumn School, Magurele, Romania, 2020;
8. 20 международная конференция и молодёжная школа «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии», Нижний Новгород, Россия, 2020;
9. 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 2020;
10. The 2nd China-Russia Frontier Seminar on Ultra Intense Laser Technology and Intense Field Physics, Nizhny Novgorod, Russia, 2020;
11. EPS 47th Conference on Plasma Physics, Sitges, Spain, 2021;
12. 29th annual International Laser Physics Workshop, Lyon, France, 2021;
13. V International Conference «UltrafastLight-2021», Moscow, Russia, 2021;
14. 18th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation, Moscow, Russia, 2022;
15. 30th annual International Laser Physics Workshop, Lyon, France, 2022.

Личный вклад. Основные положения, выносимые на защиту, отражают личный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 20 изданиях, в том числе в 10 статьях [A1—A10] в рецензируемых научных журналах, индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, формулируются положения, представляемые на защиту, обосновывается достоверность полученных результатов, а также приводятся данные об апробации работы, личном вкладе автора и количестве публикаций по теме диссертации.

Первая глава посвящена исследованию общих свойств движения частиц в условиях экстремальных радиационных потерь. В *Разделе 1.1* описываются и обосновываются основные приближения, используемые далее, такие как приближение локально постоянного поля (LCFA) и приближение непрерывной силы реакции излучения. В *Разделе 1.2* разрабатывается теория, описывающая динамику заряженной частицы в электромагнитном поле в режиме, когда потери на излучение сравнимы или превосходят набор энергии частицей в этом поле [A2]. Демонстрируется, что в этом режиме скорость электронов ориентируется в сильном поле вдоль некоего выделенного направления за время много меньшее, чем характерное время изменения самого ЭМ поля. Это выделенное направление соответствует отсутствию поперечной составляющей силы Лоренца и соответственно силы радиационного трения, поэтому оно также называется *безрадиационным*. Так как данное направление определяется локальными электрическим и магнитным полем, то оказывается возможным понизить порядок уравнений движения на единицу, считая, что скорость частицы всегда совпадает с асимптотическим безрадиационным направлением. Данная процедура существенно упрощает дальнейший анализ свойств движения частиц в режиме экстремальных радиационных потерь. В *Разделе 1.3* показывается, что согласно разработанной *асимптотической* теории,

траектории частиц в довольно большом классе конфигураций ЭМ поля, включающих стоячие волны, являются периодическими. Данное наблюдение позволяет объяснить известный эффект радиационного захвата частиц, который заключается в том, что частицы продолжительное время способны оставаться в области сильного поля при учёте реакции излучения, что существенно отличается от поведения, предсказываемого в рамках пондеромоторного приближения. В *Разделе 1.4* разрабатывается общий метод упрощения уравнений движения частиц с учётом реакции излучения, основанный на разложении скорости электрона относительно асимптотического безрадиационного направления в ряд теории возмущений и сохранении конечного числа членов разложения [A10]. Успешное применение этого подхода было продемонстрировано в различных конфигурациях электромагнитного поля. В частности, было воспроизведено решение обобщённой задачи Зельдовича о движении электрона во вращающихся параллельных электрическом и магнитном полях [34; 35], продемонстрировано снижение среднего темпа ускорения электронов в модельном плазменном ускорителе [36; 37], и описана малоизвестная особенность движения электрона в сильных плоских волнах — неограниченное продольное ускорение [38–40] (рис. 2).

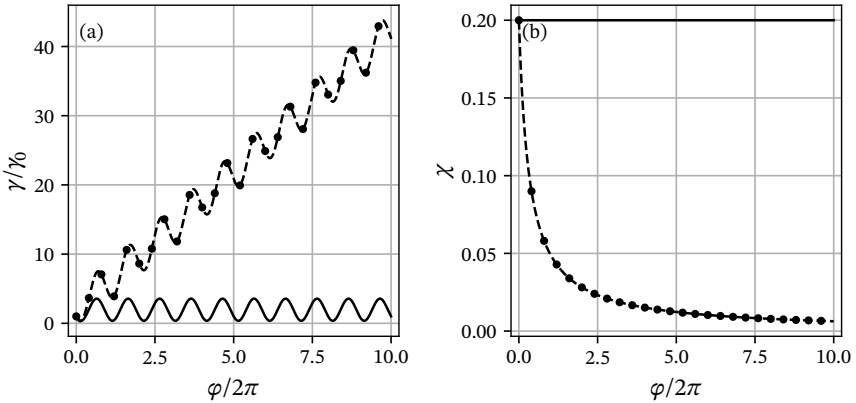


Рис. 2 — Динамика электрона в плоской циркулярно-поляризованной монохроматической волне с безразмерной амплитудой $a_0 = 500$ и длиной волны $\lambda = 1$ мкм ($\chi_0 = 0.2$): (a) энергия электрона, нормированная на начальное значение, (b) значение КЭД параметра χ . Сплошная (штриховая) линия соответствует численному решению уравнений движения без учёта (с учётом) реакции излучения. Кружки соответствуют приближённому аналитическому решению, полученному в рамках разработанного подхода.

Вторая глава посвящена исследованию взаимодействия экстремально интенсивного лазерного излучения с тонкой твердотельной мишенью. В *Разделе 2.2* с помощью полноразмерного трёхмерного численного моделирования методом частиц-в-ячейках (particles-in-cell, PIC) с учётом КЭД процессов с помощью метода Монте-Карло показано, что в результате такого взаимодействия развивается самоподдерживающийся КЭД каскад, вопреки достаточно распространённому мнению, что такая конфигурация поля является неподходящей для наблюдения КЭД каскадов [A1; A3; A6]. Развитие КЭД каскада приводит к образованию плотной электрон-позитронная «подушки», фронт которой движется существенно медленнее скорости света, и которая эффективно поглощает лазерное излучение (рис. 3). Качественно описываются ключевые особенности взаимодействия, способствующие поддержанию КЭД каскада (рис. 4). Результаты моделирования показывают, что порог развития КЭД каскада в плоской волне соответствует примерно интенсивности $6 \cdot 10^{24}$ Вт/см² при длине волны 1 мкм, которая, как указывалось выше, потенциально может быть достигнута с помощью лазерных установок нового поколения, хотя и за счёт использования достаточно острой фокусировки излучения. Тем не менее, возникновение волны пробоя вакуума и последующее поглощение лазерного излучения может рассматриваться как ещё одно из

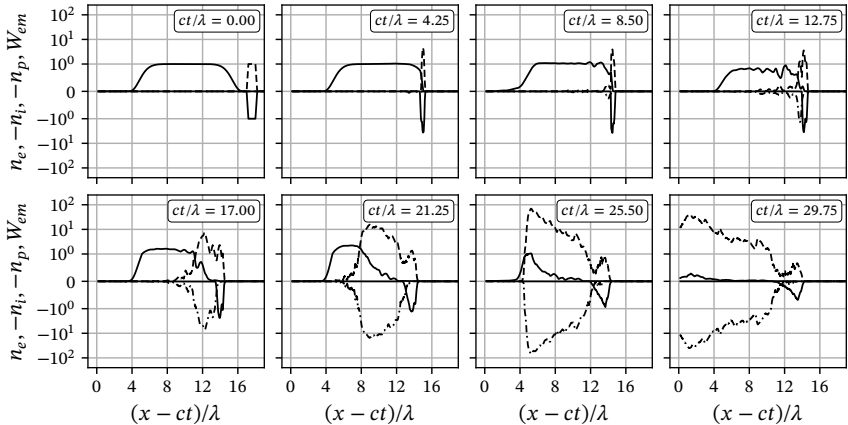


Рис. 3 — Распределение плотности частиц (электронов — штриховая линия, ионов — сплошная линия снизу, позитронов — штрих-пунктирная линия) и электромагнитной энергии (сплошная линия сверху) в различные моменты времени в численном моделировании взаимодействия экстремально интенсивного лазерного излучения ($a_0 = 2500$) с твердотельной мишенью ($n_e \sim 10^{23}$ см⁻³).

фундаментальных ограничений на достижимую интенсивность лазерного излучения, впервые исследованных в публикациях [41; 42], на случай слабой фокусировки.

В Разделе 2.3 разрабатывается аналитическая модель, описывающая развитие КЭД каскада в плоской волне [A5]. С помощью ряда приближений, достоверность которых подтверждается численным моделированием, записывается система одномерных гидродинамических уравнений, достаточно полно описывающая процессы, происходящие при развитии КЭД каскада. За счёт дальнейших упрощений оказывается возможным получить некоторую грубую аналитическую оценку, которая связывает скорость распространения границы вакуум-плазма с характерной продольной скоростью частиц плазмы. Сравнение численного решения модельных уравнений с результатами полноразмерного 3D QED-PIC моделирования показывает работоспособность разработанной модели. Несмотря на сложность и нелинейность динамики каскада, оказывается, что относительно простая одномерная модель позволяет качественно предсказать его развитие, например, макроскопическое пространственно-временное распределение частиц и энергетический баланс в системе. Этот факт оправдывает выбранный метод аналитического описания и подтверждает наше понимание этого процесса. Методы, используемые для разработки данной модели, вероятно, могут быть применены для построения схожих моде-

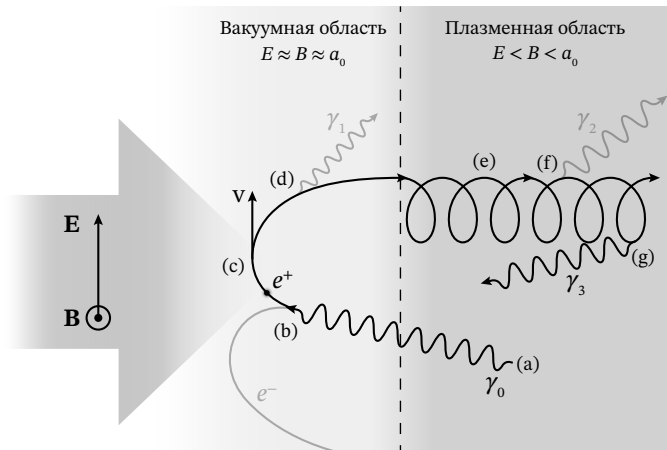


Рис. 4 — Схематическое изображение механизма поддержания КЭД каскада: (a), (f), (g) Излучение гамма-кванта в плазменной области, (b) распад гамма-кванта в вакуумной области, (c) ускорение электрона и позитрона в плоской волне, (d) излучение гамма-кванта в вакуумной области, (e) движение позитрона по винтовой линии в плазменной области.

лей, описывающих астрофизические явления, такие как развитие КЭД каскадов в магнитосферах нейтронных звезд, также отличающихся сложной пространственно-временной динамикой и сопровождающихся генерацией волн пробоя вакуума [43].

Третья глава посвящена исследованию взаимодействия сильноточных пучков ультрарелятивистских частиц друг с другом и с плазменной мишенью. В *Разделе 3.2* рассматривается лобовое столкновение электронного и позитронного пучков с идентичными параметрами. Исследуется влияние реакции излучения при движении частиц одного пучка в поле встречного пучка (пучковое излучение) на скорость фокусировки пучков (разрушение) [A7; A8]. Разрабатывается аналитическая модель, которая позволяет рассчитывать параметр разрушения с учётом реакции излучения в режиме, когда характерный масштаб потерь энергии на излучения существенно меньше времени фокусировки. Предсказания модели подтверждаются с результатами полноразмерного 3D QED-PIC моделирования. Показывается, что увеличение разрушения из-за пучкового излучения для будущих коллайдеров CLIC и ILC может достигать нескольких десятков процентов и приводить к дополнительному увеличению яркости. В приложении же к ускорителю FАCET-II, перспективы которого для изучения эффектов непертурбативной КЭД за счёт столкновения пучков обсуждаются в работе [32], увеличение параметра разрушения приводит к еще более жестким требованиям к параметрам пучка для прецизионных измерений. Показывается, что область применимости построенной модели распространяется и на случай столкновения пучков одного заряда. Также решаются уравнения движения с учётом реакции излучения частиц пучка при взаимодействии с встречным длинным пучком. Такая постановка задачи соответствует взаимодействию пучков с существенно различающимися плотностями энергии в системе центра масс.

В *Разделе 3.3* рассматривается столкновение сильноточного электронного пучка с протяжённой плазменной мишенью. С помощью полноразмерного трёхмерного численного моделирования нами было обнаружено, что в таком случае генерируются два коротких сгустка гамма-фотонов [A9]. Первый из них связан с излучением электронами начального пучка, а второй — с излучением электронами, инжектированными в плазменную полость, создаваемую начальным пучком. При этом эффективность конверсии энергии пучка электронов в энергию гамма-фотонов может достигать 90%. Изученная схема получения гамма-излучения является перспективной с точки зрения простоты экспериментальной реализации и крайне высокой эффективности. Моделирования и аналитические оценки, проведённые для достигнутых на данный момент параметров пучка на установке FАCET-II, показывают, что реально достижимая эффективность конверсии

оказывается существенно меньше, однако, всё равно достигает более десяти процентов. Также было продемонстрировано, что использование пучка в виде диска, т.е. с диаметром пучка, превосходящим его длину, является неэффективным даже при достижении большей концентрации пучка, что связано с тем, что в таком случае лишь малая часть частиц оказывается в области сильного плазменного поля.

В *Разделе 3.4* описаны особенности численного моделирования сильноточных пучков ультрарелятивистских частиц с помощью метода частиц-в-ячейках. Показывается, что при использовании стандартной схемы, используемой в этом методе для решения уравнений Максвелла, электромагнитные волны в вакууме начинают обладать дисперсией. При этом фазовая скорость всех ЭМ волн оказывается меньше скорости света, что приводит к тому, что ультрарелятивистские частицы могут находиться в черенковском резонансе и возбуждать в вакууме ЭМ волны, что противоречит физической реальности — эффект, известный как численная черенковская неустойчивость. Разрабатывается альтернативная схема численного решения уравнения Максвелла, которая позволяет контролировать дисперсию ЭМ волн за счёт некоторого набора свободных параметров схемы [A4]. Предложен набор параметров, который гарантирует превышение фазовой скорости ЭМ волн скорости света, что позволяет существенно подавить численную черенковскую неустойчивость, при сохранении дисперсии достаточно близкой к вакуумной для волн с частотами, хорошо разрешаемыми на численной сетке. Разработанная схема успешно реализована в комплексе QUILL [44] и использована для получения результатов данной главы.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработана асимптотическая теория движения заряженных частиц в режиме экстремальных радиационных потерь. Определены общие свойства движения частиц в таком режиме, существенно отличающиеся от таковых в режиме слабой реакции излучения.
2. Продемонстрирован новый метод получения приближённого решения уравнений движения с учётом реакции излучения в различных конфигурациях: однородных вращающихся параллельных электрическом и магнитном полях, полях линейного ускорителя, плоских волнах.
3. Обнаружен и качественно описан эффект развития самоподдерживающегося квантово-электродинамического каскада в поле, приближенном к полю плоской волны, возникающий при взаимодействии экстремально интенсивного лазерного излучения

с тонкой твердотельной мишенью. Разработана аналитическая модель, описывающая развитие такого КЭД каскада.

4. Разработана модель для вычисления параметра разрушения при лобовом столкновении сильнооточных пучков ультрарелятивистских частиц с учётом реакции излучения. Достоверность модели подтверждена результатами полноразмерного трёхмерного численного моделирования. Оценено влияние реакции излучения на столкновение пучков с параметрами, ожидающимися на ускорителях нового поколения ILC, CLIC, FACET-II.
5. С помощью полноразмерного трёхмерного численного моделирования продемонстрирована схема эффективной генерации гамма-излучения при взаимодействии сильнооточного пучка ультрарелятивистских электронов с протяжённой плазменной мишенью. Разработана аналитическая модель для вычисления эффективности конверсии энергии пучка в энергию гамма-излучения. Найдены параметры пучка для установки FACET-II, оптимальные с точки зрения генерации гамма-излучения.
6. Разработана и реализована в коде QUILL альтернативная схема для численного решения уравнений Максвелла на регулярной сетке, отличающаяся существенно подавленной численной черенковской неустойчивостью и подходящая для моделирования пучков ультрарелятивистских частиц.

Список литературы

1. *Sauter, F.* Uber das Verhalten eines Elektrons im homogenen elektrischen Feld nach der relativistischen Theorie Diracs / F. Sauter // Z. Phys. A. — 1931. — Т. 69, № 11/12. — С. 742—764.
2. *Schwinger, J.* On Gauge Invariance and Vacuum Polarization / J. Schwinger // Phys. Rev. — 1951. — Т. 82, № 5. — С. 664—679.
3. *Veksler, V.* The principle of coherent acceleration of charged particles / V. Veksler // The Soviet Journal of Atomic Energy. — 1957. — Т. 2, № 5. — С. 525—528.
4. *Берестецкий, В. И.* Квантовая электродинамика. Вып. 4 / В. И. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. — ФИЗМАТЛИТ, 2002. — 720 с.
5. *Байер, В. Н.* Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах / В. Н. Байер, В. М. Катков, В. М. Страховенко. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. — 400 с.

6. *Dirac, P. A.* Discussion of the infinite distribution of electrons in the theory of the positron / P. A. Dirac // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. T. 30. — Cambridge University Press. 1934. — С. 150—163.
7. *Serber, R.* Linear modifications in the Maxwell field equations / R. Serber // Physical Review. — 1935. — Т. 48, № 1. — С. 49.
8. *Uehling, E. A.* Polarization effects in the positron theory / E. A. Uehling // Physical Review. — 1935. — Т. 48, № 1. — С. 55.
9. *Heisenberg, W.* Folgerungen aus der diracschen theorie des positrons / W. Heisenberg, H. Euler // Zeitschrift für Physik. — 1936. — Т. 98, № 11/12. — С. 714—732.
10. Final report of the E821 muon anomalous magnetic moment measurement at BNL / G. W. Bennett [и др.] // Physical Review D. — 2006. — Т. 73, № 7. — С. 072003.
11. *Hanneke, D.* New measurement of the electron magnetic moment and the fine structure constant / D. Hanneke, S. Fogwell, G. Gabrielse // Physical review letters. — 2008. — Т. 100, № 12. — С. 120801.
12. Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC // Nature physics. — 2017. — Т. 13, № 9. — С. 852—858.
13. *Furry, W.* On bound states and scattering in positron theory / W. Furry // Physical Review. — 1951. — Т. 81, № 1. — С. 115.
14. *Wolkow, D. M.* Über eine klasse von lösungen der diracschen gleichung / D. M. Wolkow // Zeitschrift für Physik. — 1935. — Т. 94, № 3/4. — С. 250—260.
15. Advances in QED with intense background fields / A. Fedotov [и др.]. — 2022. — arXiv: 1912.07508 [hep-ph].
16. *Breit, G.* Collision of two light quanta / G. Breit, J. A. Wheeler // Physical Review. — 1934. — Т. 46, № 12. — С. 1087.
17. Observation of nonlinear effects in Compton scattering / C. Bula [и др.] // Physical Review Letters. — 1996. — Т. 76, № 17. — С. 3116.
18. Positron production in multiphoton light-by-light scattering / D. Burke [и др.] // Physical Review Letters. — 1997. — Т. 79, № 9. — С. 1626.
19. Experimental signatures of the quantum nature of radiation reaction in the field of an ultraintense laser / K. Poder [и др.] // Physical Review X. — 2018. — Т. 8, № 3. — С. 031004.

20. Experimental evidence of radiation reaction in the collision of a high-intensity laser pulse with a laser-wakefield accelerated electron beam / J. Cole [и др.] // *Physical Review X*. — 2018. — Т. 8, № 1. — С. 011020.
21. *Meuren, S.* Probing strong-field QED at FACET-II (SLAC E-320) / S. Meuren // Third conference on extremely high intensity laser physics (exhlp). Т. 7. — 2019.
22. *Bhabha, H. J.* The passage of fast electrons and the theory of cosmic showers / H. J. Bhabha, W. Heitler // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences*. — 1937. — Т. 159, № 898. — С. 432–458.
23. *Meszáros, P.* Gamma-ray bursts / P. Meszaros // *Reports on Progress in Physics*. — 2006. — Т. 69, № 8. — С. 2259.
24. *Sturrock, P.* A model of pulsars / P. Sturrock // *The Astrophysical Journal*. — 1971. — Т. 164. — С. 529.
25. *Ruderman, M.* Theory of pulsars-Polar caps, sparks, and coherent microwave radiation / M. Ruderman, P. G. Sutherland // *The Astrophysical Journal*. — 1975. — Т. 196. — С. 51–72.
26. *Daugherty, J.* Electromagnetic cascades in pulsars / J. Daugherty, A. Harding // *The Astrophysical Journal*. — 1982. — Т. 252. — С. 337–347.
27. Ab initio pulsar magnetosphere: the role of general relativity / A. A. Philippov [и др.] // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2015. — Т. 815, № 2. — С. L19.
28. On the problems of relativistic laboratory astrophysics and fundamental physics with super powerful lasers / S. Bulanov [и др.] // *Plasma Physics Reports*. — 2015. — Т. 41. — С. 1–51.
29. Physics considerations for laser-plasma linear colliders / C. Schroeder [и др.] // *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*. — 2010. — Т. 13, № 10. — С. 101301.
30. Petawatt and exawatt class lasers worldwide / C. N. Danson [и др.] // *High Power Laser Science and Engineering*. — 2019. — Т. 7.
31. Technical Design Report for the FACET-II Project at SLAC National Accelerator Laboratory. — 2016.
32. Prospect of studying nonperturbative QED with beam-beam collisions / V. Yakimenko [и др.] // *Physical Review Letters*. — 2019. — Т. 122, № 19. — С. 190404.
33. Bright γ rays source and nonlinear Breit-Wheeler pairs in the collision of high density particle beams / F. Del Gaudio [и др.] // *Physical Review Accelerators and Beams*. — 2019. — Т. 22, № 2. — С. 023402.

34. *Зельдович, Я. Б.* Взаимодействие свободных электронов с электромагнитным излучением / Я. Б. Зельдович // Успехи физических наук. — 1975. — Т. 115, № 2. — С. 161—197.
35. *Kostyukov, I. Y.* Production and dynamics of positrons in ultrahigh intensity laser-foil interactions / I. Y. Kostyukov, E. N. Nerush // Physics of Plasmas. — 2016. — Т. 23, № 9. — С. 093119.
36. *Kostyukov, I. Y.* Radiative damping in plasma-based accelerators / I. Y. Kostyukov, E. N. Nerush, A. G. Litvak // Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams. — 2012. — Т. 15, № 11. — С. 111001.
37. *Golovanov, A. A.* Radiation reaction-dominated regime of wakefield acceleration / A. A. Golovanov, E. N. Nerush, I. Y. Kostyukov // New Journal of Physics. — 2022. — Т. 24, № 3. — С. 033011.
38. *Gunn, J. E.* On the Motion and Radiation of Charged Particles in Strong Electromagnetic Waves. I. Motion in Plane and Spherical Waves / J. E. Gunn, J. P. Ostriker // The Astrophysical Journal. — 1971. — Т. 165. — С. 523.
39. *Grewing, M.* Acceleration of charged particles and radiation reaction in strong plane and spherical waves. II / M. Grewing, E. Schrüfer, H. Heintzmann // Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei. — 1973. — Т. 260, № 5. — С. 375—384.
40. *Thielheim, K.* Particle acceleration in extremely strong electromagnetic wave fields / K. Thielheim // Proceedings of International Conference on Particle Accelerators. — IEEE. 1993. — С. 276—278.
41. *Bell, A. R.* Possibility of Prolific Pair Production with High-Power Lasers / A. R. Bell, J. G. Kirk // Physical Review Letters. — 2008. — Т. 101, вып. 20. — С. 200403.
42. Limitations on the attainable intensity of high power lasers / A. Fedotov [и др.] // Physical review letters. — 2010. — Т. 105, № 8. — С. 080402.
43. *Timokhin, A. N.* Time-dependent pair cascades in magnetospheres of neutron stars—I. Dynamics of the polar cap cascade with no particle supply from the neutron star surface / A. N. Timokhin // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2010. — Т. 408, № 4. — С. 2092—2114.
44. QUILL code — <https://github.com/QUILL-PIC/Quill>.

Список работ автора по теме диссертации

- A1. Formation and dynamics of a plasma in superstrong laser fields including radiative and quantum electrodynamics effects / I. I. Artemenko [и др.] // JETP letters. — 2016. — Т. 104, № 12. — С. 883—891.
- A2. *Samsonov, A. S.* Asymptotic electron motion in the strongly-radiation-dominated regime / A. S. Samsonov, E. N. Nerush, I. Yu. Kostyukov // Physical Review A. — 2018. — Т. 98, № 5. — С. 053858.
- A3. *Samsonov, A. S.* Laser-driven vacuum breakdown waves / A. S. Samsonov, E. N. Nerush, I. Yu. Kostyukov // Scientific reports. — 2019. — Т. 9, № 1. — С. 1—11.
- A4. *Samsonov, A.* Superluminal phase velocity approach for suppression of Numerical Cherenkov Instability in Maxwell solver / A. Samsonov, A. Pukhov, I. Kostyukov // Journal of Physics: Conference Series. T. 1692. — IOP Publishing. 2020. — С. 012002.
- A5. *Samsonov, A. S.* Hydrodynamical model of QED cascade expansion in an extremely strong laser pulse / A. S. Samsonov, I. Yu. Kostyukov, E. N. Nerush // Matter and Radiation at Extremes. — 2021. — Т. 6, № 3. — С. 034401.
- A6. *Samsonov, A. S.* Effect of electron-positron plasma production on the generation of a magnetic field in laser-plasma interactions / A. S. Samsonov, E. N. Nerush, I. Yu. Kostyukov // Quantum Electronics. — 2021. — Т. 51, № 10. — С. 861.
- A7. Beamstrahlung-enhanced disruption in beam-beam interaction / A. S. Samsonov [и др.] // New Journal of Physics. — 2021. — Т. 23, № 10. — С. 103040.
- A8. Effect of transverse displacement of charged particle beams on quantum electrodynamic processes during their collision / M. Filipovic [и др.] // Quantum Electronics. — 2021. — Т. 51, № 9. — С. 807.
- A9. *Samsonov, A. S.* Simulation of Gamma-Ray Generation in Interaction of High-Current Ultrarelativistic Particle Beams with Plasma / A. S. Samsonov, I. Yu. Kostyukov // Optics and Spectroscopy. — 2022. — Т. 130, № 3. — С. 219—223.
- A10. *Samsonov, A. S.* High-order corrections to the radiation-free dynamics of an electron in the strongly radiation-dominated regime / A. S. Samsonov, E. N. Nerush, I. Yu. Kostyukov // Matter and Radiation at Extremes. — 2022. — Т. 8, № 1. — С. 014402.

САМСОНОВ Александр Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ
И ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПАР
НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ**

Автореферат

Подписано к печати 3.10.2023.

Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 32(2023).

Отпечатано в типографии ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова 46

