

На правах рукописи

Прозоркевич Александр Васильевич

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ
ВАКУУМНОГО РОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ
В ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ И ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

01.04.21 – Лазерная физика

01.04.02 – Теоретическая физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Саратов – 2010

Работа выполнена на кафедре теоретической физики
Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор Смолянский С.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Аветисян Ю.А.

доктор физико-математических наук,
профессор Мельников Л.А.

доктор физико-математических наук,
профессор Веницкий С.И.

Ведущая организация: Саратовский филиал
Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

Защита диссертации состоится 11 октября 2010 г. в 15.30 на заседании
диссертационного совета Д 212.243.05 при Саратовском государственном уни-
верситете им. Н.Г. Чернышевского (410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83,
корпус 3, ауд. 34)

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке
им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета

Автореферат разослан _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор



В.Л. Дербов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Исследование квантовых эффектов в сильных внешних полях имеет долгую историю. Практически сразу после появления уравнения Дирака был обнаружен парадокс Клейна¹, который получил впоследствии адекватное истолкование как процесс вакуумного рождения пар^{2,3}. В 1951 г. Ю. Швингер получил математически строгий результат⁴ для вероятности рождения электрон-позитронных пар в постоянном электрическом поле, который позднее стали называть формулой Швингера, а само явление вакуумного рождения в поле – механизмом Швингера. Эта формула нашла позднее многочисленные применения в различных феноменологических моделях. Характерный масштаб напряженности электрического поля, определяемый формулой Швингера (критическое поле), оказался настолько велик, $E_{cr} \sim 10^{16}$ В/см, что экспериментальная проверка этого фундаментального эффекта остается недоступной до сих пор.

Положение стало меняться только в последние годы благодаря стремительному развитию лазерных технологий. Настоящий технологический прорыв произошел после изобретения метода «chirped pulse amplification»⁵, благодаря чему интенсивность лазерного излучения быстро достигла уровня $\sim 10^{18}$ Вт/см². В таких полях электроны приобретают релятивистскую энергию и могут инициировать неупругие элементарные реакции. Поэтому можно говорить о возникновении нового направления на стыке лазерной физики и физики высоких энергий – релятивистской лазерной оптики^{6,7}. Особенно перспективна идея лазерных ускорителей, которые могут заменить дорогостоящие традиционные установки в медицинских и технологических применениях. С другой стороны, мощные компактные лазеры могут стать удобным экспериментальным средством для проверки фундаментальных физических теорий, наряду с традиционными большими ускорителями и космическими телескопами. Тем временем предлагаются новые технологии, например «coherent harmonic focusing»⁸, с помощью которых становится принципиально достижи-

¹Klein O. // Z. Phys. 1929. Vol.53. P.157.

²Sauter F. // Z. Phys. 1932. Vol.73. P.547

³Нарожный Н.Б., Никишов А.И. // ЯФ. 1970. Т.11. С.1072.

⁴Schwinger J. // Phys. Rev. 1951. Vol.82. P.664.

⁵Strickland D., Mourou G. Opt. // Commun. 1985. V.56. P.219.

⁶Borovski A.V., Galkin A.L., Shiryayev O.B., Auguste T. Laser Physics at Relativistic Intensities. Berlin: Springer, 2003.

⁷Mourou G., Tajama T., Bulanov S.V. // Rev. Mod. Phys. 2006. V.78. P.309.

⁸Gordienko S., Pukhov A., Shorokhov O., Baeva T. // Phys. Rev. Lett. 2005. V.94. P.103903.

мым уровень интенсивности лазерного поля $\sim 10^{29}$ Вт/см² (швингеровский предел). Существующие оценки предсказывают достижение этого предела в ближайшее десятилетие, хотя есть предположение, что этому могут помешать принципиальные ограничения квантовой электродинамики⁹. С точки зрения эксперимента можно ожидать наблюдение целого ряда нелинейных вакуумных эффектов, таких как рождение пар, двойное лучепреломление, рассеяние света на свете, расщепление фотона, генерация высших гармоник и т.п. В связи с такими перспективами, в последние годы наблюдается новая волна интереса к изучению нелинейных вакуумных явлений в сильных полях.

В отличие от эксперимента, теория вакуумного рождения частиц успешно развивалась. Уже в 1969 г. были сделаны первые оценки для лазерного поля¹⁰, которые позднее неоднократно уточнялись различными методами и в различных приближениях^{11,12,13}. Основное продвижение в теории было связано с переходом от случая постоянного поля к электромагнитным полям с произвольной зависимостью от времени. Были предложены различные методы, среди которых можно выделить S-матричный подход (Н.Б. Нарожный, А.И. Никишов, В.И. Ритус; В.Г. Багров, Д.М. Гитман, Е.С. Фрадкин, Ш.М. Шварцман), метод мнимого времени (квазиклассический подход, В.С. Попов), метод диагонализации гамильтониана (А.А. Гриб, С.Г. Мамаев, В.М. Мостепаненко, В.М. Фролов). Наиболее общим и гибким является, по-видимому, метод диагонализации гамильтониана с помощью канонических преобразований Боголюбова, зависящих от времени¹⁴. Такая процедура эквивалентна точному решению гейзенберговских уравнений движения и позволяет выразить искомые матричные элементы через коэффициенты преобразований Боголюбова без использования понятий функции Грина или матрицы рассеяния.

С помощью этих методов удалось рассмотреть достаточно широкий класс электромагнитных полей: плоские волны различной поляризации, комбинации плоских волн и постоянных полей, однородные поля с произвольной зависимостью от времени. Наиболее полное описание удастся получить при наличии точных решений уравнения Дирака, такие решения известны для случая плоской волны и для импульсного однородного поля. Для произволь-

⁹Fedotov A.M., Narozhny N.B., Mourou G., Korn G. // Limitations on the attainable intensity of high power lasers. Preprint arXiv:1004.5398.

¹⁰Бункин Ф.М., Тугов И.И. // ДАН СССР. 1969. Т.187. Р.541.

¹¹Brezin E., Itzykson C. // Phys. Rev. D. 1970. V.2. P.1191.

¹²Marinov M.S., Popov V.S. // Fortsch. Phys. 1977. V.25. P.373.

¹³Попов В.С. // Письма в ЖЭТФ. 2001. V.74. P.151.

¹⁴Гриб А.А., Мамаев С.Г., Мостепаненко В.М. Вакуумные квантовые эффекты в сильных полях. М.: Энергоатомиздат, 1988.

ного однородного переменного поля задача сводится к решению одномерного осцилляторного уравнения с комплексной частотой. Тем не менее, доступный на сегодня спектр решений не позволяет учесть одновременно два ключевых для лазерного поля условия – ограниченность поля как во времени, так и в пространстве. Поэтому приходится прибегать, в той или иной степени, к использованию численных методов, хотя вычислительная задача оказывается экстремально жесткой из-за наличия двух временных масштабов, различающихся на много порядков. Речь идет о характерном времени рождения (аннигиляции) пары $\tau_c \sim 1/m$ и времени действия лазерного поля $\tau \sim n/\nu$, которые отличаются на 6–8 порядков для наиболее интересного случая оптического лазера ($n \sim 100$ – число периодов в импульсе, ν – частота лазера)¹⁵.

За много десятилетий развития теории, способа экспериментальной проверки эффекта Швингера так и не было найдено. В какой-то степени это объясняется одной особенностью большинства используемых подходов: они ориентированы на поиск асимптотических решений при $t \rightarrow +\infty$, когда внешнее поле выключается. В такой постановке вероятность «выживания» пары в подкритических полях $E \ll E_{cr}$ исчезающе мала. Для полей, действующих в течение ограниченного интервала времени τ , важным управляющим параметром становится отношение τ_c/τ : если $\tau_c \ll \tau$, то даже при $E \ll E_{cr}$ за время действия поля может рождаться заметное количество пар квазичастиц, которые успевают полностью аннигилировать при выключении поля. Это наблюдение подсказывает другую возможную тактику эксперимента: регистрацию вторичных продуктов элементарных реакций квазичастичных пар, например, аннигиляционных фотонов. *Именно такая возможность изучается в диссертационной работе.* Некоторые оценки, полученные в этом направлении, планируется вскоре проверить в эксперименте на одном из самых мощных действующих оптических лазеров – Astra Gemini, Rutherford Appleton Laboratory, UK.

По мере развития теории вакуумного рождения оказалось, что ее применимость не ограничивается квантовой электродинамикой. После появления ускорителей тяжелых ионов (RHIC), эксперименты по столкновениям релятивистских ядер стали одним из основных источников информации для фундаментальной физики. Гидродинамическая теория множественного рождения частиц стала трансформироваться в различные модели, основанные на кинетическом описании. Появление модели цветных трубок¹⁶ сделало возможным применение теории, созданной «под лазерное поле», к горячей ядерной

¹⁵Как правило, в работе используется естественная система единиц $c = \hbar = 1$.

¹⁶Casher A., Neuberger H., Nussinov S. // Phys. Rev. D. 1979. V.20. P.179.

материи и кварк-глюонной плазме. По мере роста энергии RHIC, происходящие в них события все более приобретают неравновесный характер: столкновения порождают многочастичную сверхплотную неравновесную систему, которая быстро ($\sim 10^{-23}$ с) эволюционирует, испытывая фазовые переходы и проходя стадию образования кварк-глюонной плазмы. Все это заканчивается стадией адронизации, множественного рождения и вылета различных типов частиц. Для описания такой системы требуется объединение методов квантовой теории поля и неравновесной статистической физики.

Роль швингеровского механизма была выявлена в рамках стационарных моделей, следующим шагом стало использование кинетического уравнения для функции распределения партонов, в правую часть которого входят источник, описывающий изменение числа частиц в результате вакуумного рождения, и интеграл столкновений, обеспечивающий перераспределение частиц по импульсу при их взаимодействии. Первоначально оба этих слагаемых конструировались феноменологически: так источник выбирался в форме, соответствующей формуле Швингера для постоянного поля, а для интеграла столкновений использовалось приближение времени релаксации. Позднее швингеровский источник в кинетическом уравнении стали выводить на динамической основе через точное решение уравнений движения сначала в абелевом приближении, а затем и с учетом цветовых степеней свободы. Применение такого обобщенного кинетического уравнения к физике кварков и глюонов (партонов) приводит к ряду новых эффектов, отсутствующих в феноменологических подходах.

Еще одно применение теории вакуумного рождения обнаружилось в моделях со спонтанным нарушением симметрии, например, калибровочной или киральной, где фазовые переходы сопровождаются изменением эффективной массы частиц. Это изменение запускает новый механизм генерации пар, отличающийся от полевого. Учет конечных продольных размеров цветовой трубки, границы которой быстро расширяются, приводит к вакуумному рождению пар, которое можно рассматривать как динамический аналог¹⁷ классического эффекта Казимира. Таким образом, модель цветowych трубок может служить основой для построения комбинированного описания вакуумного рождения под действием трех различных конкурирующих механизмов.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка кинетического описания вакуумного рождения частиц и последующей их неравновесной эволюции

¹⁷Schwinger J. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1993. V.90. P.958.

под действием различных механизмов – электромагнитного поля, параметрического изменения массы или геометрических размеров системы, получение количественных оценок нелинейных вакуумных эффектов в сильном лазерном поле и при столкновениях релятивистских тяжелых ионов.

Для реализации поставленной цели решаются следующие основные задачи:

- ◇ Последовательное получение релятивистских кинетических уравнений на базе соответствующей модели квантовой теории поля.
- ◇ Численное исследование динамики вакуумного рождения пар в различных моделях лазерного поля.
- ◇ Учет обратного влияния плазмы на динамику рождения пар (самосогласованное описание).
- ◇ Анализ нелинейных вакуумных эффектов в сильном лазерном поле с точки зрения их возможной экспериментальной проверки на существующих лазерных установках.
- ◇ Исследование возможных режимов лазерного ускорения тяжелых ионов в вакууме с точки зрения их применимости на выходе обычных ускорителей.
- ◇ Описание множественного рождения частиц при столкновениях тяжелых ионов в модели цветовых трубок.
- ◇ Построение кинетической теории вакуумного рождения частиц с параметрически меняющейся массой.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Вакуумное рождение пар (эффект Швингера) может быть обнаружено в экспериментах на встречных пучках оптических лазеров с уровнем интенсивности излучения $I \gtrsim 10^{22}$ Вт/см² по регистрации продуктов реакций квазичастиц, возникающих во время действия лазерного импульса.
2. Выход мягких γ -квантов за счет одно и двухфотонной аннигиляции электрон-позитронных пар, возникающих при столкновении сфокусированных пучков тераваттных оптических лазеров класса Astra Gemini может составить не менее 5–10 событий на лазерный импульс.
3. Плотность e^-e^+ пар, усредненная за период лазерного поля, не зависит от частоты в диапазоне напряженностей поля $\nu^2 \ll E \ll m^2$, поэтому оптические лазеры более эффективны, чем рентгеновские, в экспериментах по проверке эффекта Швингера в подкритических полях.

4. Изменение эффективного показателя преломления в области столкновения сфокусированных лазерных пучков с уровнем интенсивности $I \gtrsim 10^{25}$ Вт/см² может быть обнаружено интерференционным методом с помощью пробного коротковолнового лазера.
5. Существуют режимы вакуумного ускорения тяжелых ионов типа Au⁷⁹⁺ в лазерном поле с интенсивностью $10^{25} - 10^{26}$ Вт/см², которые обеспечивают приращение энергии ~ 10 ГэВ/нуклон при одновременном уменьшении разброса ионов по энергии.
6. Вакуумное рождение в лазерном поле нестабильных частиц (пионов), распадающихся по слабому каналу $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ с характерным временем $\tau_\pi \approx 2.6 \cdot 10^{-8}$ с, позволяет зарегистрировать реальные мюоны уже при интенсивности поля $I \sim 10^{27}$ Вт/см².
7. Механизм вакуумного рождения частиц, обусловленного параметрической зависимостью массы от времени, позволяет объяснить наблюдаемую плотность реликтового излучения за счет рождения массивных векторных бозонов в конформных космологических моделях.
8. Повышенный выход странных кварков, как один из возможных сигналов образования кварк-глюонной плазмы при столкновениях релятивистских ядер, может быть объяснен на основе эффекта Швингера в модели цветowych трубок, при этом уменьшение кварковых масс за счет восстановления киральной симметрии является более эффективным механизмом увеличения фактора подавления странности, чем механизм слияния струн.
9. Интегралы столкновений для нуклонов, взаимодействующих с массивными векторными и скалярными мезонами (релятивистские аналоги интегралов столкновений Блоха и Больцмана – Юлинга – Уленбека), позволяющие учесть влияние спиновых степеней свободы на процессы рассеяния.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации

обеспечивается использованием надежных математических методов; детальным анализом общих физических принципов, на которых основаны используемые модели; совпадением результатов, полученных разными методами; воспроизведением известных результатов в предельных случаях.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Установлена возможность косвенной регистрации эффекта Швингера по наблюдению продуктов реакций квазичастиц, возникающих в течение действия лазерного импульса.
2. Получены оценки наблюдаемых нелинейных вакуумных эффектов обусловленных неустойчивостью вакуума в лазерных полях при интенсивности излучения $I \gtrsim 10^{22}$ Вт/см².
3. Установлено, что оптические лазеры более эффективны, чем рентгеновские, при постановке экспериментов по проверке эффекта Швингера в диапазоне напряженностей поля $\nu^2 \ll E \ll m^2$.
4. Предложен эксперимент нового типа по проверке эффекта Швингера, в котором вакуумное рождение в лазерном поле нестабильных частиц (пионов), распад которых не контролируется полем, открывает возможность регистрации реальных мюонов уже при интенсивности поля $I \sim 10^{27}$ Вт/см².
5. Получена оценка изменения эффективного показателя преломления в области фокуса двух встречных лазерных пучков, которое может быть зафиксировано интерференционным методом с помощью пробного коротковолнового лазера.
6. Построена квантовополевая модель фотопроводимости полупроводника по аналогии с механизмом рождения пар в квантовой электродинамике. В рамках осцилляторного представления получено бесстолкновительное кинетическое уравнение для квазичастиц и проведено сравнение со стандартным подходом, основанном на уравнениях Блоха для электрон-дырочной системы во внешнем переменном электрическом поле.
7. Установлена возможность дополнительного ускорения релятивистских тяжелых ионов на выходе обычных ускорителей с помощью лазерных пучков различных конфигураций.
8. Построено самосогласованное кинетическое описание плазмы, возникающей в результате вакуумного рождения частиц в однородном нестационарном поле. Численно исследована самосогласованная система кинетического уравнения Власова с источником и перенормированного уравнения Максвелла. Получены указания на стохастический характер временной зависимости функции распределения и существенную нерегулярность импульсных распределений на больших временах.

9. Кинетический подход использован для описания кварк-глюонной плазмы на базе модели цветowych трубок; изучено рождение дилептонных пар и повышенный выход странных кварков на временах порядка 1 фм/с как возможные косвенные признаки образования кварк-глюонной плазмы.
10. Построено кинетическое описание нового механизма вакуумного рождения частиц, обусловленного параметрической зависимостью массы от времени (инерциальный механизм). Показано, что на основе такого механизма можно объяснить наблюдаемую плотность реликтового излучения за счет рождения массивных векторных бозонов в конформных космологических моделях.
11. Предложен новый вариант модели цветowych трубок, в котором рождение частиц при столкновениях тяжелых ионов объясняется совместным действием двух механизмов: полевого эффекта Швингера и геометрического механизма, обусловленного движением границ системы.
12. Разработано ковариантное обобщение метода неравновесного статистического оператора Д.Н. Зубарева, с помощью которого получены и исследованы релятивистские кинетические уравнения типа Власова, Блоха и Больцмана для стандартной модели Валечки ядерной материи.
13. Построено кинетическое описание обобщенной модели Намбу – Йона – Ласинио. Рассмотрены дисперсионные свойства и простейшие типы колебаний. Получено простое алгебраическое уравнение для температуры фазового перехода с восстановлением киральной симметрии.

Научная и прикладная значимость

- ◇ Результаты диссертации по оценке нелинейных вакуумных эффектов могут быть использованы при разработке и проведению экспериментов на встречных пучках мощных оптических лазеров. Один такой эксперимент запланирован в Rutherford Appleton Laboratory, UK на январь 2011г.
- ◇ Материалы диссертации по лазерному ускорению тяжелых ионов в вакууме были использованы при оценке вариантов модернизации ускорителя тяжелых ионов Нуклотрон Объединенного института ядерных исследований в Дубне.
- ◇ Результаты диссертации по моделированию процесса рождения кварк-глюонной плазмы могут быть использованы при обработке результатов экспериментов на RHIC при плотностях энергии $10^2 - 10^3$ ГэВ/фм³.

- ◇ Развитый в диссертации ковариантный подход к получению релятивистских кинетических уравнений обладает достаточной широтой и может быть использован при построении различных неравновесных моделей лазерной физики и физики высоких энергий.
- ◇ Полученные в диссертации результаты используются в учебном процессе физического факультета Саратовского государственного университета при чтении спецкурсов «Релятивистская кинетика» и «Физика элементарных частиц», при подготовке курсовых и дипломных работ студентов специализации «теоретическая физика».

Личный вклад. Все основные результаты диссертации получены лично автором или при его определяющем участии. Большинство работ выполнено совместно с профессором С.А. Смолянским при совместной постановке задач и обсуждении полученных результатов. В выполнении ряда работ принимали участие С. Шмидт (Исследовательский центр Jülich, Германия), Д. Блашке (Университет Вроцлава, Польша), Г. Репке (Университет Росток, Германия), В.Н. Первушин (ОИЯИ), М. Бониц (Университет Киля, Германия), Л.В. Бравина и Е.Е. Забродин (Университет Осло, Норвегия), С. Машник (Los Alamos National Laboratory, США), Дж. Маино (Университет Болоньи, Италия), К. Робертс (Argonne National Laboratory, США), Ю.С. Гангнус, С.В. Ерохин и А.В. Тараканов (Саратовский университет). При этом автору принадлежит разработка теоретических методов, численное моделирование и физическая интерпретация полученных результатов. Под руководством автора в работе участвовали аспиранты Д.В. Винник, Д.С. Фролов, В.В. Скоков, А.В. Филатов, студенты М.А. Купцов, В.А. Мизерный, А.В. Рейхель, А.В. Фризен, И.А. Егорова, Н.А. Тараканов, Д.С. Шкирманов. В работах, выполненных с этими соавторами, автору принадлежат постановка задач и разработка методов их решений.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на различных конференциях и семинарах, в том числе:

«Saratov Fall Meeting», International School for Junior Scientists and Students on Optics, Laser Physics and Biophotonics (СГУ, Саратов, 2003, 2005, 2006, 2007, 2008); International Workshop «Complex systems of charged particles and their interaction with electromagnetic radiation» (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 2005, 2006, 2007, 2008); «Kadanoff-Baym Equations: Progress and Perspectives for Many-Body Physics», Rostock University Ger-

many, September 20–24, 1999; «Progress in Nonequilibrium Green's functions», Dresden, August 19–23, 2002; «Kinetic Theory of Nonideal Plasmas», Kiel, September 27–29, 2004; Workshops of Extreme Light Infrastructure (ELI): Munich, November 13–14, 2005; Monastery Frauenworth, Germany, September 29th–October 2nd, 2008; Международный Балдинский семинар по проблемам физики высоких энергий: «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика» (ОИЯИ, Дубна, 1992, 1994, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008г.); International Conference on «Selected Problems of Modern Physics» (2003, 2008, ОИЯИ, Дубна); Международные конференции по проблемам ядерной спектроскопии и структуры атомного ядра (1997г., Обнинск; 1998г., Москва; 1999г., Дубна); Конференция по физике фундаментальных взаимодействий, 2–6 декабря 2002 г., ИТЭФ, г. Москва; Юбилейная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 100-летию со дня рождения А.И. Алиханова, 1–5 марта 2004г., ИТЭФ, Москва; Юбилейная научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященную 60-летию ИТЭФ, 5–10 декабря 2005 г., ИТЭФ, Москва; The XVIIth International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory, September 4–11, 2003, Самара – Саратов; Sixth International Seminar on Nuclear Physics, Highlights of Modern Nuclear Structure, S.Agata (Napoli), 18–22 maggio 1998; LXXXV Congresso nazionale della Societa Italiana di Fisica, Pavia, 20–24 Settembre 1999; 3-rd International Conference Catania Relativistic Ion Studies – CRIS 2000, Acicastello, 22–26 maggio 2000.

Отдельные этапы работы были поддержаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проект 03-02-16877), Министерства образования РФ (проект Е02-3.3-210) и 7-й Рамочной Программы Евросоюза в области технических и естественных наук (грант #224014 PHOTONICS4LIFE, FP7-ICT-2007-2).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 76 работ, в том числе: статьи в реферируемых журналах - 41 (из них 37 в журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК); сборники трудов международных конференций - 28, сборники трудов Всероссийских научных конференций - 2, научные сборники - 5.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, заключения и списка литературы, включающего 333 наименования. Общий объем диссертации – 292 страницы (в том числе 96 рисунков).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении дана общая характеристика диссертационной работы: предмет исследования, актуальность темы, анализ состояния проблемы к моменту начала исследований, цель и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, новизна полученных в диссертации результатов, их научное и практическое значение, апробация работы, публикации, личное участие автора, объем и структура диссертации, а также ее краткое содержание.

В первой главе развивается метод получения бесстолкновительных кинетических уравнений с источником, описывающим вакуумное рождение частиц в однородном нестационарном электрическом поле. В основу предлагаемого подхода положен известный метод диагонализации гамильтониана с помощью канонических преобразований Боголюбова, зависящих от времени¹³, в комбинации с осцилляторным представлением квантовой теории поля¹⁸.

В разделе 1.1 представлен анализ экспериментальных ситуаций, для которых предназначен развиваемый формализм. Условие квазиклассичности электрического поля, $E \gg 1/(\Delta t)^2$, где Δt – характерный масштаб усреднения, хорошо выполняется для действующих тераваттных оптических лазеров и строящихся рентгеновских лазеров на свободных электронах. Присутствие внешнего поля делает гамильтониан квантовой теории поля недиагональным в пространстве Фока. Чтобы в этой ситуации можно было говорить о частицах с обычным набором физических характеристик (энергия, импульс, спин), необходима диагонализация соответствующих операторов, например, на основе канонических преобразований Боголюбова.

При этом обычно ограничиваются рассмотрением асимптотических ($t \rightarrow +\infty$) величин, когда действие внешнего поля заканчивается и можно говорить о реальных («остаточных») частицах. В отличие от этого, используемый в диссертации подход ориентирован на описание динамики системы в течение всего времени изменения внешних условий. Квазичастицы, возникающие из вакуума при действии внешнего поля, могут практически полностью исчезать в асимптотике $t \rightarrow +\infty$, даже если их пиковая плотность макроскопически велика. Однако важным является то обстоятельство, что характерное время τ_{ex} существования такой достаточно плотной квазичастичной среды намного больше характерного времени элементарных реакций τ_{in} для таких частиц. Для оптических лазеров $\tau_{ex} \sim 10^{-13}$ с, тогда как характерное время элементарных процессов по электромагнитному каналу (например, рождения

¹⁸Pervushin V.N., Smirichinski V.I. // J. Phys. A. 1999. V.21. P.6191.

или аннигиляции пары) $\tau_{in} \sim 10^{-21}$ с. Поэтому такие квазичастицы могут участвовать во всех разрешенных правилами отбора элементарных реакциях. Продукты этих реакций могут быть зарегистрированы и служить косвенным подтверждением существования эффекта Швингера. В этом заключается основная особенность развиваемого в диссертации подхода, отличающего его от традиционных методов, ориентированных на асимптотику $t \rightarrow +\infty$ (А.И. Никишов, Н.Б. Нарожный, В.С. Попов, А.А. Гриб, С.Г. Мамаев, В.М. Мостепаненко).

Поскольку целью исследования является динамика многочастичной системы, наш подход методически относится к кинетической теории квантовопольевых систем. Основные применения такого формализма связаны с оценками результатов экспериментов в двух различных областях физики, на стыке которых формируется новое научное направление – релятивистская лазерная оптика. Эксперименты первого типа проводятся на оптических лазерах тера и петаваттного уровня мощности, позволяющих наблюдать недоступные ранее нелинейные вакуумные эффекты квантовой электродинамики. Другое направление представляют эксперименты по столкновениям релятивистских тяжелых ионов на ускорителях, которые лежат в основе экспериментальной физики высоких энергий.

В разделе 1.2 представлен вывод кинетических уравнений с источником для спинорных и скалярных частиц в электрическом поле, определяемым векторным потенциалом $A_\mu = (0, 0, 0, A(t))$, причем поле асимптотически выключается при $t \rightarrow \pm\infty$. В ограниченных участках пространства квазиоднородное поле может быть реализовано в волноводах или скрещенных пучках лазерного излучения. Уравнения Дирака и Клейна – Гордона допускают в этом случае разделение переменных и задача сводится к решению одномерного осцилляторного уравнения.

Основой кинетического описания является среднее по исходному ($t \rightarrow -\infty$) вакууму $f_r(\mathbf{p}, t) = \langle 0_{in} | a_{\mathbf{p}r}^+(t) a_{\mathbf{p}r}(t) | 0_{in} \rangle$, эта величина играет роль функции распределения частиц в импульсном пространстве. Гейзенберговские операторы рождения и уничтожения $a_{\mathbf{p}r}^+, a_{\mathbf{p}r}$ (r – спиновый индекс, $\mathbf{p}$ – импульс) диагонализуют гамильтониан, что позволяет говорить о физических частицах в любой момент действия поля. Зависимость этих операторов от времени определяется зависимостью от времени коэффициентов преобразования Боголюбова.

В разделе 1.3 показано, что кинетические уравнения во внешнем поле могут быть получены более экономным способом в осциллятором представ-

лении, где диагонализация гамильтониана достигается уже без промежуточных канонических преобразований. Основная идея состоит в том, чтобы в стандартных разложениях канонических полевых переменных заменить свободную энергию на энергию частицы в поле, подобно тому, как канонический импульс заряда в поле заменяется на кинематический. В таком подходе удастся описать более широкий набор полевых конфигураций, включая те, для которых уравнение Дирака не допускает разделения переменных. Сюда относится, в частности, важный случай однородного электрического поля произвольной поляризации, который дает возможность более адекватного моделирования лазерного поля. Получены кинетические уравнения для спинорных, скалярных и массивных векторных полей. В общем случае, за исключением скалярного поля, такие уравнения имеют достаточно сложную матричную структуру.

В разделе 1.4 изучаются общие свойства бесстолкновительного кинетического уравнения с источником, описывающим рождение пар полем

$$\frac{df(\mathbf{p}, t)}{dt} = \frac{1}{2} \Delta(\mathbf{p}, t) \int_{t_0}^t dt' \Delta(\mathbf{p}, t') [1 \pm 2f(\mathbf{p}, t')] \cos [2\theta(\mathbf{p}, t, t')], \quad (1)$$

$$\theta(\mathbf{p}, t, t') = \int_{t'}^t dt_1 \varepsilon(\mathbf{p}, t_1), \quad \varepsilon(\mathbf{p}, t) = \sqrt{m^2 + [\mathbf{p} - e\mathbf{A}(t)]^2}, \quad (2)$$

где ε - энергия заряда в поле, коэффициент $\Delta(\mathbf{p}, t)$ определяет скорость рождения пар. Явный вид Δ зависит от типа частиц, например, для спинорного поля $\Delta(\mathbf{p}, t) = eE(t)\varepsilon_{\perp}/\varepsilon^2$, где $\varepsilon_{\perp}$ - энергия поперечного (по отношению к полю) движения. Статистический фактор $1 \pm 2f$ обеспечивает относительное усиление эффекта для бозонов (плюс) и подавление для фермионов (минус).

Если пренебречь обратным влиянием плазмы на поле, то в простейшем случае заданного поля постоянного направления уравнение (1) для фиксированного импульса эквивалентно динамической системе

$$\dot{\mathbf{x}} = C(t)\mathbf{x}, \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} 1 \pm 2f \\ u \\ v \end{pmatrix}, \quad C(t) = \begin{pmatrix} 0 & \pm\Delta & 0 \\ \Delta & 0 & -2\varepsilon \\ 0 & 2\varepsilon & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

с нулевыми начальными условиями. С формальной точки зрения это консервативная негамильтонова система с интегралом движения $(1 \pm 2f)^2 \mp (u^2 + v^2) = \text{const}$, так что фазовые траектории для фермионов расположены на

эллипсоиде, а для бозонов – на двухполостном гиперboloиде. При ненулевой начальной плотности $f(t_0) = f_0$, действие поля приводит только к увеличению остаточной плотности бозонов, однако для фермионов существует неподвижная точка $f_0 = 1/2$, поэтому при $f_0 < 1/2$ остаточная плотность фермионов растет, а при $f_0 > 1/2$ – убывает.

Важным преимуществом развиваемого подхода является возможность вычисления импульсных распределений рождающихся частиц, которые оказываются существенно неравновесными и зависят от формы поля и времени его действия. В отличие от большинства феноменологических подходов, где предполагается, что частицы рождаются в покое, немарковский источник генерирует частицы с любыми импульсами, спектр которых затухает степенным образом и имеет эффективную ширину порядка массы, как для продольных, так и для поперечных импульсов. Характерна также зависимость формы спектра от статистики: если рождение бозонов с нулевым импульсом подавлено, то рождение фермионов с нулевым импульсом наиболее предпочтительно. Сразу после включения поля в распределении бозонов формируется долина в области нулевых продольных импульсов, а в распределении фермионов – холм. Эти распределения занимают конечные области импульсов и со временем смещаются в сторону больших значений продольных импульсов, бозонная долина заполняется, при этом фермионный холм стабилизируется (эффект насыщения). Если внешнее поле действует достаточно долго, то в импульсном спектре могут появиться осцилляции по продольному импульсу. Аналогичная ситуация возникает в случае периодического поля в моменты его перехода через ноль, когда в импульсном пространстве наблюдается картина сходящихся квазисферических волн, параметры которых определяются частотой внешнего поля.

Рассмотрены некоторые приближенные схемы решения кинетического уравнения: марковское приближение и приближение низкой плотности. Для переменных полей теория возмущений по слабому полю не работает, поскольку отношение соседних членов разложения зависит от времени.

В разделе 1.5 рассмотрена задача самосогласования кинетического уравнения с уравнением Максвелла, описывающим вторичное поле, создаваемое плазмой квазичастиц. Известно, что некоторые интегральные величины типа плотности тока содержат логарифмические расходимости, обусловленные недостаточной скоростью убывания решений системы (3) при больших импульсах. Стандартная процедура регуляризации оказывается неудобной при решении кинетического уравнения численными методами. Здесь предлагает-

ся модификация этой процедуры, позволяющая построить вычислительную схему для регуляризованного уравнения Максвелла.

Во второй главе изучаются нелинейные вакуумные эффекты в сильном лазерном поле с точки зрения их возможной экспериментальной проверки на тера и петаваттных лазерах оптического и рентгеновского диапазона.

В разделе 2.1 приведен краткий обзор экспериментальных возможностей в области нелинейной квантовой электродинамики, которые появились в последние годы в связи с ростом мощности лазеров.

В разделе 2.2 изучается вакуумное рождение электрон-позитронных пар в скрещенных пучках мощных оптических лазеров с интенсивностью излучения порядка 10^{20} Вт/см² в сравнении с результатами аналогичных расчетов, выполненных ранее для проектируемых рентгеновских лазеров¹⁹. Такие установки (проект Tesla, Desy, Гамбург) ранее предлагались на роль наиболее подходящего инструмента для проверки нелинейных эффектов. В случае гармонического поля плотность пар осциллирует с удвоенной частотой поля, достигая величины порядка 10^{20} см⁻³, и практически полностью исчезает после выключения поля. Средняя плотность пар за период $\langle n \rangle$ пропорциональна квадрату поля и не зависит от частоты ν , в то время как остаточная плотность n_r пропорциональна $(\nu/m)^2$. Для рассматриваемого случая $\langle n \rangle \sim 10^7/\lambda^3$, так что отношение $\langle n \rangle/n_r$ составляет $\approx 10^{11}$ для гармонического поля. Поэтому оказывается, что в расчете на куб длины волны оптический лазер генерирует гораздо больше пар, чем рентгеновский, при равной интенсивности излучения, рис.1. Традиционный взгляд на экспериментальную проверку эффекта Швингера предполагает увеличение остаточной плотности плазмы путем повышения частоты и интенсивности лазерного излучения, например, с помощью рентгеновских лазеров. Альтернативная точка зрения, развиваемая в диссертации, состоит в том, что возможно более простым способом окажется попытка воздействовать на плазму с помощью какого-то дополнительного фактора. Примером такого подхода может быть известный эксперимент на ускорителе SLAC (Стэнфорд, 1997), где пучок ультрарелятивистских (46 ГэВ) электронов пересекал фокус тераваттного лазера, в результате чего наблюдалось небольшое превышение количества позитронов над фоном.

В разделе 2.3 рассматривается двухфотонная аннигиляция пар в качестве возможного наблюдаемого признака эффекта Швингера. При достигнутых на сегодня интенсивностях оптических лазеров $\sim 10^{22}$ Вт/см² реальных

¹⁹Roberts C.D., Schmidt S.M., Vinnik D.V. // Phys. Rev. Lett. 2002. V.89. P.153901.

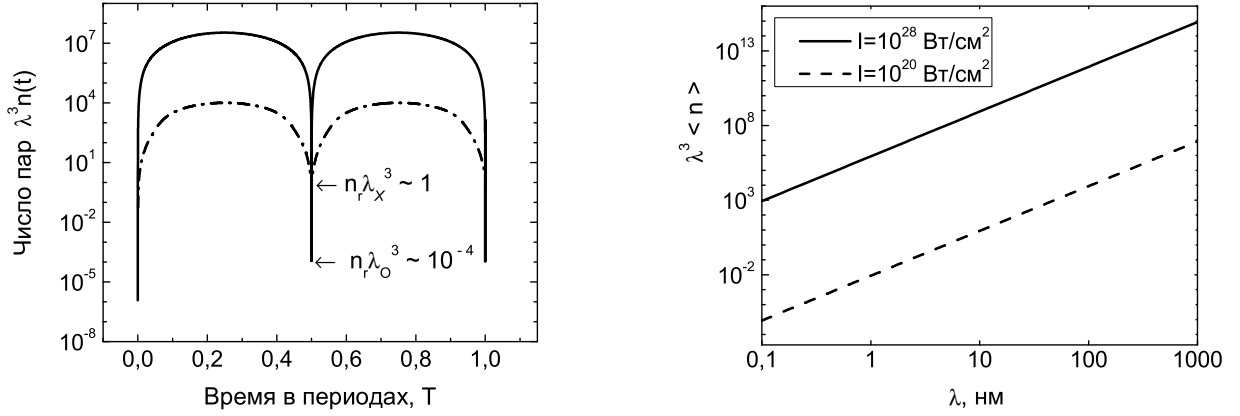


Рис. 1. Слева: зависимость от времени числа пар в объеме λ^3 для слабого периодического поля с амплитудой $E_m = 3 \cdot 10^{-5} E_c$, $\lambda = 795$ нм, соответствующего условиям лазера POLARIS (IOQ, Йена) (сплошная линия) в сравнении с близким к критическому полю $E_m = 0.24 E_{cr}$ проектируемого рентгеновского лазера TESLA при $\lambda = 0.15$ нм (DESY, Гамбург) (пунктир). Справа: зависимость среднего числа пар в объеме λ^3 от длины волны для различных интенсивностей лазерного поля

электрон-позитронных пар не возникает и можно рассчитывать только на регистрацию вторичных продуктов элементарных процессов в квазичастичной плазме. Получена оценка числа таких событий для наиболее мощных действующих оптических лазеров, которая составляет 5 – 10 событий на один лазерный импульс. Этот канал генерирует γ -кванты со средней энергией порядка ~ 1 МэВ, что означает трансформацию низкоэнергетических лазерных фотонов по частоте более чем на 5 порядков. Такие γ -кванты могут быть зарегистрированы счетчиками совпадений вне лазерного фокуса, что явилось бы надежным косвенным подтверждением динамического эффекта Швингера. Такой эксперимент планируется провести в скором времени в Rutherford Appleton Laboratory, UK.

В разделе 2.4 изучается эксперимент другого типа, основанный на совместном действии электромагнитного и слабого взаимодействия на временном масштабе 10^{-15} с. Рождение электрон-позитронных пар в подкритическом лазерном поле можно обнаружить только косвенными наблюдениями, поскольку реальных пар после прохождения лазерного импульса не остается. Однако ситуация может качественно измениться, если рождающиеся частицы являются нестабильными и успевают распадаться за время действия поля. Наиболее легкие частицы такого рода – мюоны и π -мезоны – намного тяжелее электрона, поэтому для их рождения потребуется лазерное излучение значительно большей интенсивности, но все же меньше швингеровского

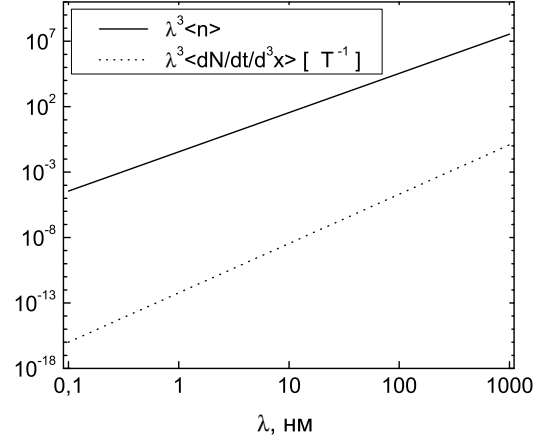
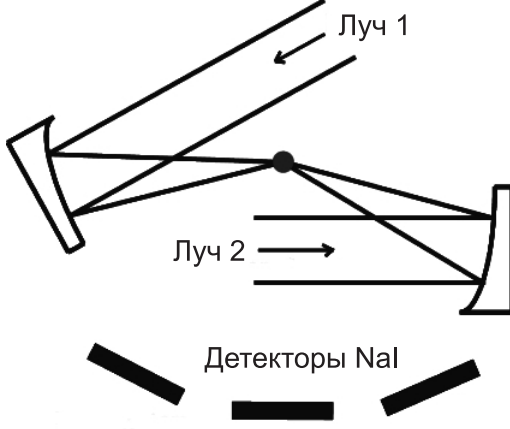


Рис. 2. Слева: схема эксперимента со встречными лазерными пучками на установке Astra Gemini (G. Gregori, Oxford, UK, 2010), дополненная счетчиками совпадений для регистрации аннигиляционных γ -квантов. Справа: зависимость скорости двухфотонной аннигиляции в объеме λ^3 от длины волны лазера при напряженности поля $E_m = 3 \cdot 10^{-5} E_c$ (пунктир), для сравнения приведено среднее число пар $\lambda^3 \langle n \rangle$

предела. Поскольку среднее за период поля значение плотности пар обратно пропорционально массе частиц, то соответствующие значения для мюонов и пионов можно оценить как $\langle n \rangle_\mu = \langle n \rangle_e / 207$ и $\langle n \rangle_\pi = \langle n \rangle_e / 273$. Для того, чтобы достичь тех же условий, что и для электронов, нужно увеличить интенсивность поля до $10^{25} - 10^{26}$ Вт/см², что соответствует прогнозам на ближайшее десятилетие.

Полученные оценки показывают, что рождение мюонов за счет распада $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ действительно возможно при подкритических значениях поля, когда еще значительно подавлено рождение свободных электронов. Для объяснения такого эффекта предлагается гипотеза о роли запутанных состояний квазичастичных пар в процессе их рождения и последующей реабсорбции классическим полем. Предполагается, что практически полное исчезновение пар квазичастиц при медленном (в масштабе комптоновского времени) выключении поля объясняется тем, что они рождаются в запутанных состояниях. Нестабильность пионов, имеющая стохастический характер, разрушает запутанные состояния и позволяет вторичным мюонам избежать поглощения полем. Такой механизм работает только в слабых полях, где рождающиеся пары могут рассматриваться как невзаимодействующие. При $E \sim E_{cr}$ скорость рождения достаточно велика, и запутанные состояния быстро разрушаются за счет многочастичных взаимодействий.

В разделе 2.5 изучается возможная экспериментальная схема наблю-

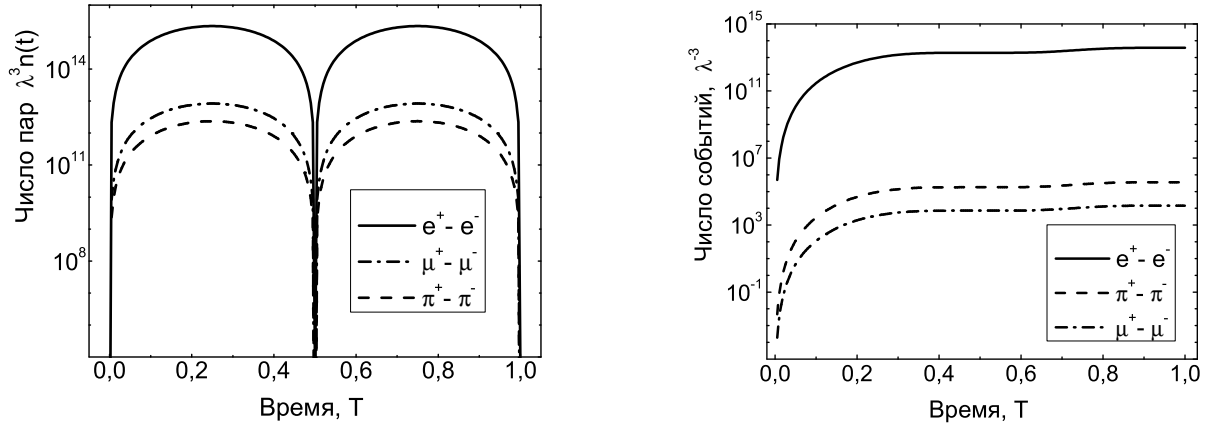


Рис. 3. Зависимость от времени плотности пар (слева) и числа аннигиляционных фотонов (справа) в расчете на λ^3 для периодического поля (T – период) при $E_m = 10^{15}$ В/см и $\lambda = 800$ нм

дения эффекта Швингера с помощью вспомогательного зондирующего лазерного луча, который фиксирует изменение эффективного показателя преломления среды в области фокуса двух встречных пучков силового лазера. Эксперименты с использованием зондирующего коротковолнового лазера активно обсуждаются в литературе^{20,21}. Поляризация вакуума в интенсивном лазерном поле придает ему свойства двулучепреломляющей среды, поэтому плоско-поляризованный зондирующий рентгеновский пучок, проходящий встречно лучу оптического лазера, становится эллиптическим. В отличие от схем, привязанных к поляризации вакуума, в диссертации рассматривается взаимодействие зондирующего импульса непосредственно с пульсирующей e^-e^+ – плазмой. В фокусе двух встречных расщепленных лучей силового лазера на короткое время образуется стоячая волна, в которой вблизи пучностей электрического поля начинает работать динамический механизм Швингера и формируется плазменная «решетка». Изменение показателя преломления этих областей размером порядка длины волны силового лазера можно зарегистрировать с помощью интерференции двух когерентных лучей пробного ультрафиолетового лазера, один из которых проходит через область плазмы. Показано, что такой эффект слишком мал для действующих лазеров с уровнем интенсивности излучения 10^{22} Вт/см², однако может стать наблюдаемым при повышении этого уровня на 2-3 порядка.

В разделе 2.6 рассматривается возможность регистрации высших гар-

²⁰Heinzl T., Liesfeld B., Amthor K.-U., Schwoerer H., Sauerbrey R., Wipf A. // Opt.Commun. 2006. V.267. P.318.

²¹Di Piazza A., Hatsagortsyan K.Z., Keitel C.H. // Phys. Rev. Lett. 2006. V.97. P.083603.

моник лазерного излучения, генерация которых обусловлена динамическим эффектом Швингера. Рожденные из вакуума электрон-позитронные пары, двигаясь с релятивистскими скоростями, генерируют вторичное электрическое поле сложного спектрального состава. Показано, что для гармонического внешнего поля наибольшую интенсивность имеет третья гармоника вторичного поля и ее величина растет с увеличением длины волны. Ожидаемое значение амплитуды третьей гармоники можно оценить величиной 10^6 В/см при интенсивности лазерного поля 10^{20} Вт/см². Рассмотрен также случай двухмодового поля с произвольным соотношением частот, для которого известен ряд наблюдаемых интерференционных эффектов.

В разделе 2.7 рассматривается процесс рождения пар классическим полем при наличии заряженных частиц в исходном состоянии. Ситуации, когда мощный лазерный пучок взаимодействует с плазмой или конденсированными средами представляют наибольший интерес для приложений. Выбор модели лазерного поля играет важную роль в для оценки вероятности вакуумного рождения пар. Известно, что пока оба полевых инварианта равны нулю $\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2 = 0$, $\mathbf{E}\mathbf{B} = 0$, рождение пар невозможно, поэтому в фокусе одного лазера такой процесс сильно подавлен. Для ослабления роли магнитной составляющей можно использовать либо встречные пучки, либо распространение электромагнитной волны в релятивистской бесстолкновительной плазме²². Получены численные решения системы (3) при некоторых ненулевых начальных условиях, показано, что процесс рождения электрон-позитронных пар в слабых полях $E \ll E_{cr}$ мало влияет на состояние плазмы в широком диапазоне ее плотностей ($10^{19} \div 10^{31}$ см⁻³). При достижении напряженности поля субкритических значений $E \lesssim E_{cr}$ начинает проявляться эффект аккумуляции и последующее формирование вторичной плазмы.

В разделе 2.8 рассматриваются некоторые теоретические вопросы, связанные с кинетическим описанием релятивистской плазмы: кинетическое уравнение для некантовой полностью ионизованной плазмы с учетом влияния сильного внешнего поля на процесс соударения, которое является релятивистским обобщением известного кинетического уравнения В.П.Силина для быстропеременных процессов в сильных полях; интегралы столкновений для релятивистской квантовой плазмы.

В разделе 2.9 изучается возможность использования мощных лазеров для дополнительного ускорения тяжелых ионов на выходе обычных ускорителей. Идея ускорения заряженных частиц с помощью лазерных полей²³

²²Bulanov S.S. // Phys. Rev. E. 2004. V.69. P.036408.

²³Shimoda K. // Appl. Opt. 1962. V.1. P.33.

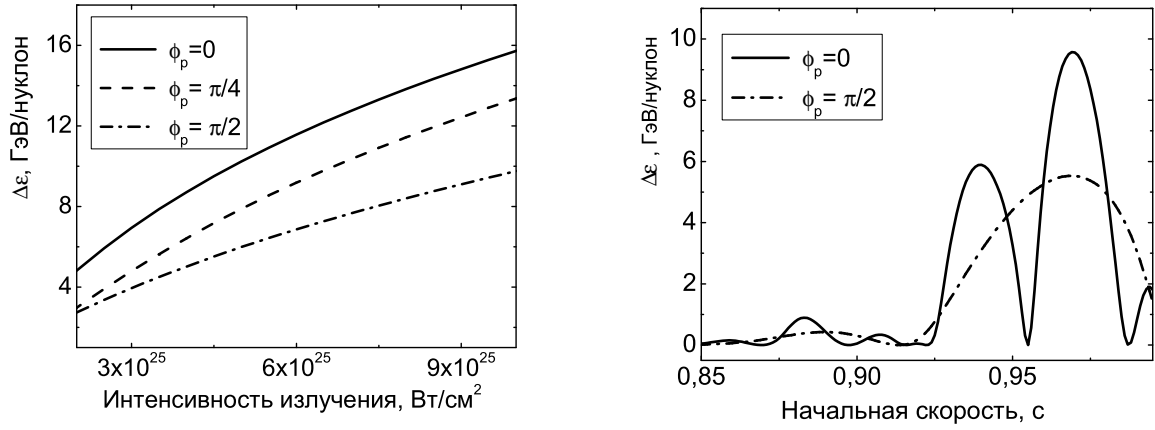


Рис. 4. Слева: приращение энергии $\Delta\epsilon$ иона Au^{79+} в зависимости от интенсивности излучения для различной поляризации. Справа: приращение энергии $\Delta\epsilon$ в зависимости от начальной скорости ионов в области ультрарелятивистских энергий. Параметр ϕ_p определяет поляризацию поля (линейная при $\phi_p = 0$ и круговая при $\phi_p = \pi/2$)

интенсивно исследуется на протяжении многих лет. Особое внимание уделяется методам ускорения, использующим взаимодействие плазмы с лазерным лучом, для которых отсутствует ограничение на допустимые градиенты поля, характерное для традиционных схем ускорения. Концепция ускорения в кильватерном поле, получила наиболее широкое признание и в настоящее время подошла вплотную к своей практической реализации. В качестве промежуточного шага была высказана идея использовать мощные оптические лазеры на выходе действующих ускорителей для повышения их эффективности вместо более дорогостоящей модернизации. Так, например, один из лучших ускорителей тяжелых ионов, установка Нуклотрон Объединенного института ядерных исследований в Дубне, может разгонять ионы золота до релятивистских энергий 4 ГэВ/нуклон, что немного меньше энергии, необходимой для образования кварк-глюонной плазмы. Поэтому в качестве одного из возможных вариантов его модернизации рассматривалось использование оптических лазеров.

В данной работе такая возможность проверена для различных (одно и двухлучевая) схем ускорения и показано, что оптические лазеры с интенсивностью излучения $\sim 10^{25} \text{ Вт}/\text{см}^2$ могут быть использованы для дополнительного ускорения релятивистских пучков тяжелых ионов, рис. 4. Наиболее эффективной является схема с двумя скрещенными пучками, однако в этом случае возможно влияние таких нелинейных эффектов, как вакуумное рождение пар и поляризация вакуума.

В разделе 2.10 построена квантовополевая модель фотопроводимости полупроводника по аналогии с механизмом рождения пар в квантовой электродинамике. В рамках осцилляторного представления получено бесстолкновительное кинетическое уравнение для квазичастиц и выполнены расчеты динамики носителей при фотостимуляции кремния и GaAs. Проведено сравнение со стандартным подходом, основанном на уравнениях Блоха для электрон-дырочной системы во внешнем поле. Существует очевидная физическая аналогия между эффектом Швингера в квантовой электродинамике и эффектом Ландау – Зенера в квантовой теории. В более широком смысле интересна аналогия между динамическим механизмом Швингера и неравновесной кинетикой носителей тока в полупроводниках. Количественная теория, учитывающая это обстоятельство, была бы, возможно, полезна при интерпретации экспериментов, постановка которых представляет трудности в одной из этих областей.

В третьей главе кинетический подход применяется для описания кварк-глюонной плазмы (КГП), возникающей при столкновении ультрарелятивистских тяжелых ионов и лежащей в центре внимания современной физики высоких энергий.

В разделе 3.1 приведен краткий обзор модели цветowych трубок, в которой предполагается, что в каждом из сталкивающихся ядер освобождаются цветовые заряды (деконфайнмент), которые порождают хромоэлектрические поля, «натянутые» между разлетающимися дископодобными остатками ядер. Эти струноподобные поля являются достаточно сильными для того, чтобы возникло вакуумное туннелирование партонов по механизму Швингера, после чего процессы столкновений приводят к термализации и к установлению локально равновесного состояния. Быстрое движение зарядов КГП индуцирует цветовое поле, оказывая в свою очередь влияние на процессы вакуумного рождения и аннигиляции партонов. В такой постановке задача оказывается близкой к задаче о рождении пар в лазерном поле и допускает использование формализма, развитого в первой главе.

В разделе 3.2 изучается абелева реализация модели цветowych трубок, в которой цветное глюонное поле моделируется обычным электрическим. Эта задача решалась численными методами для различных вариантов инициирующего импульса внешнего поля. Основные особенности динамики обусловлены существенно нелинейным характером самосогласованной системы уравнений. В первую очередь это отражается в нерегулярности динамического поведения системы, например, функция распределения теряет регулярность при

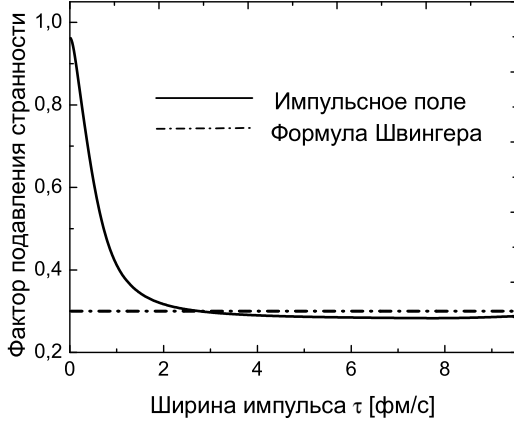


Рис. 5. Зависимость асимптотики ($t \gg \tau$) фактора подавления странности γ_s от длительности импульса поля, в сравнении с оценкой по формуле Швингера

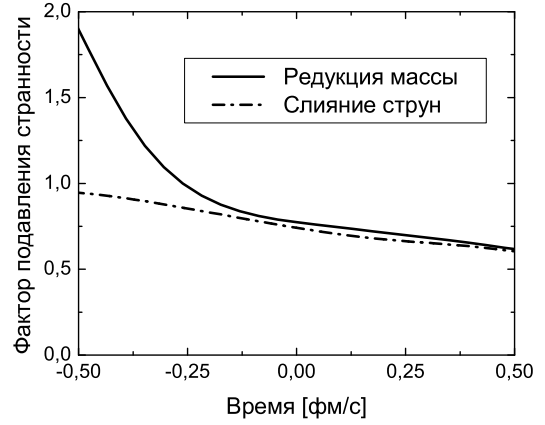


Рис. 6. Сравнение двух механизмов повышения γ_s : редукция массы кварка и увеличение константы связи ($t = 0$ соответствует центру импульса поля)

включении механизма обратной реакции. Потеря регулярности происходит как в распределении по импульсам, так и во временной развертке функции распределения. Моделирование процесса термализации плазмы выполнено в приближении времени релаксации.

В разделе 3.3 рассматривается рождение дилептонных пар как один из возможных косвенных признаков образования КГП в экспериментах по столкновениям тяжелых ионов. Пары лептонов рождаются при распаде виртуальных фотонов, образующихся при взаимодействии пары кварк-антикварк в КГП. Поскольку дилептоны не участвуют в сильном взаимодействии, они могут сохранять информацию о предравновесном состоянии КГП до момента их регистрации. Получены спектральные скорости рождения лептонных пар для различных наборов параметров.

В разделе 3.4 изучается повышенный выход странных кварков на времена порядка 1 фм/с , что рассматривается как один из возможных сигналов образования кварк-глюонной плазмы. Количественно этот эффект характеризуется отношением скоростей рождения странных и обычных кварков (фактор подавления странности γ_s). Микроскопические модели, использующие формулу Швингера, обычно недооценивают эту величину. Используемый в данной работе кинетический подход приводит к увеличению числа тяжелых кварков на малых временах ($\sim 1/m$), рис. 5, что можно трактовать как прямое следствие соотношения неопределенности для энергии и времени. Показано также, что уменьшение кварковых масс за счет восстановления

киральной симметрии является более эффективным механизмом увеличения γ_s , чем механизм слияния струн, рис. 6.

В разделе 3.5 рассматриваются особенности вакуумного рождения партонов в условиях буст-инвариантного продольного расширения кварк-глюонной плазмы, которое является основным элементом гидродинамической модели Дж. Бьеркена. Переход в новую координатную систему проявляется в возникновении сил неэлектромагнитного происхождения, поэтому источник в кинетическом уравнении не обращается в ноль при выключении электрического поля. Другими словами, вакуумное рождение частиц продолжается в сопутствующей системе и в отсутствие внешнего поля, хотя при этом исчезают осцилляции функции распределения. Это можно интерпретировать следующим образом: при малых временах хромоелектрическое поле является слабым и рождение частиц происходит в результате разлета плазмы, после чего включается полевой источник вакуумного рождения.

В разделе 3.6 развивается новый вариант модели цветowych трубок, в котором рождение частиц при столкновениях тяжелых ионов объясняется совместным действием двух механизмов: полевого эффекта Швингера и геометрического механизма, обусловленного движением границ. Новый элемент в предлагаемой модели основан на учете конечных продольных размеров цветовой трубки, границы которой быстро расширяются, что приводит к вакуумному рождению пар, которое можно рассматривать как динамический аналог классического эффекта Казимира.

В четвертой главе, изучается вакуумное рождение частиц, масса которых зависит от времени (инерциальный механизм). Такая зависимость возникает в различных теоретических моделях, наиболее известным примером такого рода является механизм Хиггса, за счет которого безмассовые частицы приобретают массу при спонтанном нарушении калибровочной симметрии и возникновении ненулевых вакуумных средних, зависящих от времени.

Раздел 4.1 содержит краткий обзор моделей с динамическими массами, в которых может быть реализован инерциальный механизм.

В разделе 4.2 представлен вывод кинетических уравнений с источником для действительного скалярного поля и спинорного поля со спином $1/2$ и переменной массой. В качестве приложения получены численные решения кинетических уравнений для двух модельных законов изменения массы: первый вариант качественно соответствует характеру изменения массы мезонов в модели Намбу – Йона – Ласинио при киральном фазовом переходе, второй вариант аналогичен известному потенциалу Соутера, который допуска-

ет аналитическое решение уравнения Дирака. Импульсные спектры частиц, генерируемых инерциальным механизмом, качественно отличаются от случая полевого рождения: максимальное число бозе-частиц рождается с нулевым значением импульса, в то время как рождение фермионов с $p = 0$ подавлено. Наиболее интересные особенности наблюдаются в поведении давления: в отличие от остальных наблюдаемых величин, давление не имеет определенной асимптотики при $t \gg \tau$, где сохраняются незатухающие осцилляции в окрестности нуля, причем в квазичастичном газе бозонов амплитуда осцилляций больше, чем в газе фермионов. Это объясняется тем, что давление не полностью определяется функцией распределения квазичастиц $f(\mathbf{p}, t)$, а зависит также от корреляторов типа $\langle 0 | a_p^\dagger a_p^\dagger | 0 \rangle$, описывающих эффекты вакуумной поляризации. Это означает неполную диагонализацию тензора энергии-импульса: его пространственные компоненты, усредненные по начальному вакуумному состоянию, включают вклад $\langle 0 | a_p^\dagger a_p^\dagger | 0 \rangle$. В итоге, когда процесс рождения частиц завершается ($\dot{n}(t) \rightarrow 0$), эффекты вакуумной поляризации не «выключаются» и продолжают влиять на некоторые наблюдаемые величины, например, на давление.

В разделе 4.3 изучается система, состоящая из σ и π -мезонов с учетом инерциального механизма рождения σ -мезонов за счет изменения их массы согласно модели Намбу – Йона – Ласинио. Показано, что такая неравновесная модель может привести к увеличению числа пионов в области малых импульсов по сравнению с квазиравновесной динамикой. Увеличение множественности пионов в области малых импульсов приводит к лучшему согласию с экспериментальными данными по столкновению релятивистских ионов.

В разделе 4.4 получена система кинетических уравнений для векторного поля с переменной массой. **В разделе 4.5** изучается, в качестве приложения, рождение векторных бозонов в конформных космологических моделях, где масса частиц меняется при фазовых переходах в процессе космологического расширения. Для оценки применимости инерциального механизма для описания рождения материи и радиации в ранней Вселенной, нужно определить, может ли плотность векторных бозонов достигать величины порядка плотности наблюдаемых реликтовых фотонов. Результаты вычислений показывают, что самосогласованное описание изменения массы, плотности материи и уравнения состояния может обеспечить необходимое значение плотности. По сравнению с предшествующими работами, в предлагаемой модели отсутствует такой существенный недостаток, как расходимость плотности продольных бозонов.

В разделе 4.6 техника осцилляторного представления используется для кинетического описания скалярных квантово-полевых моделей с самодействием в приближении самосогласованного фонового поля. В частности, рассмотрена полиномиальная модель ϕ^4 и синглетный сектор модели псевдоскалярных мезонов в квантовой хромодинамике. Появление параметра порядка в моделях со спонтанным нарушением симметрии математически представляется разделением полевых переменных на две части: классическое фоновое поле и квантовые флуктуации. Одним из интересных явлений при этом является резонансное усиление квантовых флуктуаций, которое можно интерпретировать как рождение частиц.

В пятой главе изучаются кинетические уравнения для различных моделей ядерной материи. **В разделе 5.1** приведен краткий обзор таких уравнений.

В разделе 5.2 получено ковариантное обобщение метода неравновесного статистического оператора Д.Н. Зубарева, ориентированное на описание кинетического этапа эволюции системы. Основным результатом являются записанные в ковариантной форме обобщенные интегралы столкновений первого и второго порядков по взаимодействию. Показано, что выбор так называемой контурной калибровки для функции Вигнера в сочетании с процедурой восстановления калибровочной свободы позволяет использовать полученные интегралы столкновений в калибровочных теориях.

В разделе 5.3 проводится сравнение двух различных методов получения бесстолкновительного кинетического уравнения (приближение среднего поля): один из них условно называется «квадрированием», а второй вариант – «прямым» методом на примере популярной модели Валечки квантовой адродинамики. Показано, что процедура квадрирования приводит к некоторым нефизическим вкладам, в то время как в прямом методе эти недостатки отсутствуют.

В разделе 5.4 в рамках квантовой адродинамики для барионной подсистемы ядерной материи получены аналоги кинетических уравнений Блоха и Больцмана – Юлинга – Уленбека. Такие уравнения выводятся при минимальном числе дополнительных предположений (теория возмущений по отношению средней энергии взаимодействия к средней кинетической энергии и предположении о марковском характере процесса) и учитывают все релятивистские квантовополевые эффекты, характерные для модели Валечки (барион-антибарионные состояния, спиновые и мезонные степени свободы). Это позволяет получать обобщения различного уровня сложности уравне-

ния типа Больцмана, используемого в ядерной физике при промежуточных энергиях.

В разделе 5.5 на основе модели Намбу – Йона – Ласинио выведена система уравнений для конденсатных фермионных масс в линейном приближении по малым отклонениям от равновесия. Рассмотрены простейшие типы колебаний. Получено простое алгебраическое уравнение для температуры фазового перехода с восстановлением киральной симметрии и кинетическое уравнение типа Власова для функции Вигнера фермионов.

Получено кинетическое уравнение для массивного заряженного векторного поля, квантованного при наличии связей. Учтены все эффекты взаимодействия спина со средним электромагнитным полем. Кинетическое уравнение содержит новые нелинейные слагаемые, описывающие эффекты самодействия, как следствие процедуры исключения нефизических степеней свободы.

В разделе 5.6 рассматривается влияние вида взаимодействия на температурное поведение кинетических коэффициентов на примере некоторых квантовополевых систем. Выведено кинетическое уравнение и вычислены коэффициенты вязкости и теплопроводности для системы с модельным взаимодействием ϕ^{2n} . Обсуждается влияние перенормируемости теории на кинетические коэффициенты. Сделаны размерные оценки вязкости ультрарелятивистского газа для некоторых видов взаимодействий.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы работы.

Основные выводы и результаты работы

В диссертации развит единый подход к описанию вакуумного рождения пар и последующей их неравновесной эволюции методами кинетической теории, пригодный как для задач лазерной физики, так и для физики высоких энергий. Выполнено теоретическое исследование вакуумного рождения пар и других нелинейных вакуумных эффектов под действием различных физических механизмов – сильного внешнего поля, параметрического изменения массы частиц или геометрических размеров системы. Разработан ковариантный метод получения интегралов столкновений для широкого класса моделей взаимодействия. На основе такого подхода получены следующие основные результаты:

1. Обоснована возможность косвенной регистрации эффекта Швингера в экспериментах на встречных пучках оптических лазеров с уровнем интенсивности $I \gtrsim 10^{22}$ Вт/см² по регистрации продуктов реакций квазичастиц, возникающих в течение действия лазерного импульса.

2. Получены количественные оценки наблюдаемых нелинейных эффектов, обусловленных неустойчивостью вакуума в сильных лазерных полях, например, выход мягких γ -квантов за счет одно и двухфотонной аннигиляции электрон-позитронных пар в фокусе встречных пучков тераваттных оптических лазеров класса Astra Gemini составит не менее 5–10 событий на лазерный импульс, что делает возможной постановку эксперимента в ближайшем будущем.
3. Установлено, что оптические лазеры более эффективны, чем рентгеновские, при постановке экспериментов по проверке эффекта Швингера в диапазоне напряженностей поля $\nu^2 \ll E \ll m^2$.
4. Предложен новый эксперимент по проверке эффекта Швингера, в котором вакуумное рождение нестабильных частиц (пионов), распад которых не контролируется полем, открывает возможность регистрации реальных мюонов уже при интенсивности поля $\sim 10^{27}$ Вт/см².
5. Получена оценка изменения эффективного показателя преломления в области фокуса двух встречных лазерных пучков, которое может быть зафиксировано интерференционным методом с помощью пробного коротковолнового лазера.
6. Найдены режимы вакуумного ускорения релятивистских тяжелых ионов типа Au⁷⁹⁺ в лазерном поле, которые обеспечивают приращение энергии ~ 10 ГэВ/нуклон при интенсивности поля $10^{25} - 10^{26}$ Вт/см², с одновременным уменьшением разброса ионов по энергии.
7. Изучен процесс рождения пар классическим полем при наличии частиц в исходном состоянии. Показано, что процесс вакуумного рождения в слабых полях $E \ll E_{cr}$ мало влияет на состояние плазмы в широком диапазоне ее плотностей ($10^{19} \div 10^{31}$ см⁻³). При достижении критических значений напряженности поля $E \lesssim E_{cr}$ начинает проявляться эффект аккумуляции и последующее формирование вторичной плазмы.
8. Построено самосогласованное кинетическое описание плазмы, возникающей в результате вакуумного рождения частиц в однородном нестационарном поле. Численно исследована система кинетического уравнения Власова с источником и перенормированного уравнения Максвелла для бозонов и фермионов. Обнаружены явные указания на стохастический характер временной зависимости функции распределения и нерегулярность импульсного распределения на больших временах. Рассмотрена термализация такой системы в приближении времени релаксации на ба-

зе двухкомпонентного локально-равновесного распределения частиц и античастиц.

9. Построена квантовополевая модель фотопроводимости полупроводника по аналогии с механизмом рождения пар в квантовой электродинамике. Получено бесстолкновительное кинетическое уравнение для квазичастиц и проведено сравнение со стандартным подходом, основанном на уравнениях Блоха для электрон-дырочной системы во внешнем электрическом поле.
10. Кинетический подход использован для описания кварк-глюонной плазмы, возникающей при столкновениях релятивистских тяжелых ионов на базе модели цветных трубок; изучено рождение дилептонных пар и повышенный выход странных кварков на временах порядка $1\text{ fm}/c$ как возможные косвенные признаки образования плазмы.
11. Построено кинетическое описание нового механизма вакуумного рождения частиц, обусловленного параметрической зависимостью массы от времени (инерциальный механизм). Показано, что на основе такого механизма можно объяснить наблюдаемую плотность реликтового излучения за счет рождения массивных векторных бозонов в конформных космологических моделях.
12. Исследована система σ и π -мезонов с учетом рождения σ -мезонов за счет изменения их массы. Показано, что такая неравновесная модель приводит к увеличению числа пионов в области малых импульсов по сравнению с квазиравновесной динамикой, что дает лучшее согласие с экспериментальными данными по столкновению релятивистских ядер.
13. Исследован новый вариант модели цветных трубок, в котором рождение частиц при столкновениях тяжелых ионов объясняется совместным действием двух механизмов: полевого эффекта Швингера и геометрического механизма, обусловленного движением границ трубки.
14. Разработано ковариантное обобщение метода неравновесного статистического оператора Д.Н. Зубарева, с помощью которого получены и исследованы релятивистские кинетические уравнения типа Власова, Блоха и Больцмана для стандартной модели Валечки ядерной материи.
15. Построено кинетическое описание обобщенной модели Намбу – Йона – Ласинио. Рассмотрены дисперсионные свойства и простейшие типы колебаний. Получено простое алгебраическое уравнение для температуры фазового перехода с восстановлением киральной симметрии.

Основные публикации по теме диссертации

1. Прозоркевич А.В., Смолянский С.А. Вывод релятивистских кинетических уравнений плазмы в сильном электромагнитном поле // ТМФ. 1975. Т.23, №3. С.409–417.
2. Прозоркевич А.В., Смолянский С.А. К теории квантовых релятивистских кинетических уравнений // ТМФ. 1976. Т.28, №2. С.262–266.
3. Прозоркевич А.В., Смолянский С.А. Ковариантный формализм в теории квантовых кинетических уравнений // ТМФ. 1977. Т.31, №1. С.118–124.
4. Гангнус Ю.С., Прозоркевич А.В., Смолянский С.А. О связи перенормируемости теории с поведением коэффициентов переноса // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т.26, №1. С.513–515.
5. Гангнус Ю.С., Прозоркевич А.В., Смолянский С.А. О поведении коэффициентов переноса при релятивистских температурах // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т.28, №6. С.376–378.
6. Гангнус Ю.С., Прозоркевич А.В., Смолянский С.А. О кинетических коэффициентах π -мезонного газа // ТМФ. 1978. Т.35, №1. С.68–75.
7. Гангнус Ю.С., Прозоркевич А.В., Смолянский С.А. Об уравнениях состояния релятивистских систем элементарных частиц // Вопросы теоретической и ядерной физики. Межвуз. научн. сб. Вып.7. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1980. С.86–103.
8. Kuptsov M.A., Prozorkevich A.V., Smolyanskii S.A., Toneev V.D. Kinetic equation for the quark condensate in the NJL type models // JINR Rapid Communications. 1992. Vol.56, N.5. P.51–56.
9. Kuptsov M.A., Prozorkevich A.V., Smolianski S.A., Toneev V.D. Kinetic equation in some models of the relativistic nuclear matter // Proc. of the National Conf. on Physics of Few-Body and Quark-Hadronic Systems, Kharkov. 1992. P.370.
10. Ерохин С.В., Прозоркевич А.В., Смолянский С.А., Тонеев В.Д. Обобщенное кинетическое уравнение и его применение к моделям релятивистской ядерной динамики // ТМФ. 1993. Vol.95, N.1. P.74 – 86.
11. Kuptsov M.A., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Toneev V.D. Concerning dispersion properties of a meson gas in the SU(2) NJL model: kinetic consideration // Proc. of the XI International Seminar on High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics», Sept. 1992. Dubna, JINR, 1994. P.587–596.
12. Прозоркевич А.В., Смолянский С.А. Кинетическое описание адронной материи (динамический подход) // Избранные вопросы ядерной физики.

- ОИЯИ, Дубна, 1995. С.127–135.
13. Maino G., Mashnik S.G., Smolyansky S.A., Tarakanov A.V., Prozorkevich A.V., Tocchi D. The Hartree-Fock approximation for relativistic kinetic equation in hadrodynamics // Proc. of the 3-rd International Symposium «Deuteron- 95», Dubna, July 4-7, 1995. JINR, Dubna, 1996. P.46–51.
 14. Прозоркевич А.В., Смолянский С.А., Тонеев В.Д. Кинетическое описание барионной подсистемы ядерной материи при промежуточных энергиях // Ядерная физика. 1996. Т.59, №5. С.804–807.
 15. Toneev V.D., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A. A generalized quantum kinetic equation for models of relativistic nuclear dynamics // Heavy Ion Phys. 1996. Vol.3, N.1-2. P.37–69.
 16. Smolyansky S.A., Tarakanov A.V., Prozorkevich A.V., Mashnik S.G., Maino G. A Vlasov-type kinetic equation in relativistic hadrodynamics // Critical phenomena and collective observables. Proc. of «CRIS – 96» Conference: Catania Relativistic Ion Studies, Acicastello, Italy, May 27-31, 1996. World Scientific, 1996. P.44–45.
 17. Mashnik S.G., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Maino G. Comparison of two form of Vlasov-type relativistic kinetic equations in hadrodynamics // Nuovo cim. A. 1996. Vol.109, N.12. P.1699-1708.
 18. Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Toneev V.D. Derivation of Boltzmann-Uehling-Ulenbeck type relativistic kinetic equation // Proc. of the XII International Seminar on High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics», Vol.II, Sept. 1996. Dubna, JINR, 1997. P.342–344.
 19. Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Mashnik S.G., Maino G. Recent advances in the theory of relativistic kinetic equations for hadrodynamics // Proc. of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, 19-24 maggio 1997 / Ed. by G.Reffo, A.Ventura, C.Grandi. SIF Proc., Vol.59, part I, Bologna, 1997. P.325–330.
 20. Schmidt S.M., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A. Creation of boson and fermion pairs in strong fields // Proc. «Workshop on Nonequilibrium Physics at Short Time Scales», April 27-30, 1998, Rostok / Ed. by K. Morawetz, P. Lipavsky, V.Spicka. Rostock University, Rostock, 1999. P.142–144.
 21. Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Schmidt S., Blaschke D., Ropke G. Relativistic quantum kinetic equation of the Vlasov type for system with internal degrees of freedom // Int. J. Mod. Phys. E. 1998. Vol.7, N.4. P.515-526.
 22. Маино Дж., Машник С.Г., Прозоркевич А.В., Смолянский С.А. Сравне-

ние различных форм релятивистского кинетического уравнения Власова в адродинамике // Известия РАН, сер. физич. 1998. Т.62, №5. С.1004–1010.

23. Schmidt S., Blaschke D., Ropke G., Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Toneev V.D. A quantum kinetic equation for particle production in the Schwinger mechanism // Int. J. Mod. Phys. E. 1998. Vol.7, N.4. P.709–722.
24. Mashnik S.G., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Maino G. Some problems of a dynamical approach to the description of the kinetic stage of nuclear reactions into the cascade – exciton model // Proc. of Sixth International Seminar on Nuclear Physics, Highlights of Modern Nuclear Structure, S. Agata, 18-22 May 1998, Italy / Ed. by A. Cavello. World Scientific, Singapore, 1999. P.125.
25. Schmidt S.M., Blaschke D., Ropke G., Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Toneev V.D. Non-markovian effects in strong field pair creation // Phys. Rev. D. 1999. Vol.59, N.9. P.094005.
26. Bloch J.C.R., Mizerny V.A., Prozorkevich A.V., Roberts C.D., Schmidt S.M., Smolyansky S.A., Vinnik D.V. Pair creation: back reactions and damping // Phys. Rev. D. 1999. Vol.60, N.11. P.116011.
27. Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Mashnik S.G., Maino G. A covariant generalization of the real-time Green's functions method in the theory of kinetic equations // Ann. Phys. 1999. Vol.277, N.1. P.193–218.
28. Maino G., Mashnik S.G., Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V. Dynamical symmetries in nuclear muon capture // Nuovo Cim. A. 1999. Vol.112, N.12. P.1489–1500.
29. Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Maino G., Mashnik S.G. A covariant generalization of the real-time Green's functions method in the theory of kinetic equations // LXXXV Congresso nazionale della Societa Italiana di Fisica, Pavia, 20-24 Settembre 1999. P.52.
30. Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Vinnik D.V., Toneev V.D., Blaschke D., Röpke G., Schmidt S. A quantum kinetic equation in light-cone variables for particle creation in strong fields // Proc. of XIV International Seminar on High Energy Physics Problems, «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics», Dubna, 17-22 August 1998 / Ed. by A. Baldin, V. Burov. JINR, Dubna, 2000. P.254–260.
31. Mizerny V.A., Prozorkevich A.V., Schmidt S., Toneev V.D., Vinnik D.V. Strong-field pair creation and back reaction // «Проблемы современной физики» (К 90-летию Саратовского государственного университета и 40-летию сотрудничества ОИЯИ–СГУ) / Под ред. А.Н. Сисакяна,

- Д.И. Трубецкова. ОИЯИ, Дубна, 2000. С.281–288.
32. Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Maino G., Mashnik S.G. A covariant generalization of real-time Green's functions method in the theory of kinetic equations // Proc. of the Conference «Kadanoff-Baym Equations - Progress and Perspectives for Many-Body Physics», Rostock, 20-24.09.1999 / Ed. by M. Bonitz. Singapore: World Scientific Publ., 2000. P.345–352.
 33. Smolyansky S.A., Mizerny V.A., Vinnik D.V., Prozorkevich A.V., Toneev V.D. Distribution function of particles and anti-particles created in strong fields // Proc. of the Conference «Kadanoff-Baym Equations-Progress and Perspectives for Many-Body Physics», Rostock, 20-24.09.1999 / Ed. by M. Bonitz. Singapore: World Scientific Publ., 2000. P.374–381.
 34. Prozorkevich A.V., Vinnik D.V., Schmidt S.M., Hecht M.B., Roberts C.D. Pair creation and plasma oscillations // Proc. of the Workshop «Quark Matter in Astro and Particle Physics», Germany, November 27 - 29, 2000. Eds. D. Blaschke, G. Baur, S.M. Schmidt. Rostock: University of Rostock, 2000. P.109–122.
 35. Smolyansky S., Prozorkevich A., Vinnik D., Reichel A. Kinetic description of particles creation in Kasner spacetime // Proc. of International Workshop «Hot Points in Astrophysics», JINR, Dubna, 22-26 August 2000. Dubna: JINR, 2000. P.364–370.
 36. Фролов Д.С., Смолянский С.А., Прозоркевич А.В., Маино Дж. Кинетическое описание систем со связями второго рода: модель Прока // Известия РАН. Серия физическая. 2000. Т.64, №11. С.2303–2307.
 37. Smolyansky S.A., Vinnik D.V., Mizerny V.A., Prozorkevich A.V., Toneev V.D. Thermalization of particles produced in strong fields // Proc. of XV International Seminar on High Energy Physics Problems, «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics», Sept. 25 - 29, 2000, Vol.2 / Eds. A. Baldin, V. Burov, A. Malakhov. JINR, Dubna, 2001. P.177–182.
 38. Smolyansky S., Mizerny V., Prozorkevich A., Vinnik D. The kinetic approach to parton production at the conditions of ultrarelativistic heavy ions collisions // Czech. J. Phys. 2001. Vol.51, Suppl.A. P.A283–A288.
 39. Винник Д.В., Мизерный В.А., Прозоркевич А.В., Смолянский С.А., Тонеев В.Д. Кинетическое описание вакуумного рождения частиц при столкновениях ультрарелятивистских ядер // Ядерная физика. 2001. Т.64, №4. С.836.
 40. Vinnik D.V., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Toneev V.D., Hecht M.B., Roberts C.D., Schmidt S.M. Plasma production and thermalisation in a strong field // Eur. Phys. J. C. 2001. Vol.22, N.2. P.341–349.

41. Vinnik D.V., Alkofer R., Schmidt S.M., Smolyansky S.A., Skokov V.V., Prozorkevich A.V. Coupled fermion and boson production in a strong background mean-field // *Few-Body Systems*. 2002. Vol.32, N.1-2. P.23–39.
42. Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Fuchs C., Zabrodin E.E. Vacuum particle creation in a non-stationary Casimir bag // *Proc. of XVII International Workshop «High Energy Physics and Quantum Field Theory»*, Samara – Saratov, Russia, 4-11 September, 2003 / Ed. by M. Dubinin, V. Savrin. M.: УИЦ ДО, 2003. P.420–426.
43. Reichel A.V., Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Tarakanov A.V., Bastrukov S.I. The role of vacuum effects in the magnetars magnetosphere formation // *Proc. of XVII International Workshop «High Energy Physics and Quantum Field Theory»*, Samara – Saratov, Russia, 4-11 September, 2003 / Ed. by M. Dubinin, V. Savrin. M.: УИЦ ДО, 2003. P.368–373.
44. Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Skokov V.V., Zabrodin E.E. Vacuum creation of quarks at the time scale of QGP thermalization and strangeness enhancement in heavy-ion collisions // *Phys. Lett. B*. 2004. Vol.583, N.1-2. P.103–110.
45. Prozorkevich A.V., Reichel A.V., Smolyansky S.A., Tarakanov A.V. The pair creation in the optical laser field // *Proc. of SPIE*. 2004. Vol.5476 P.68–72.
46. Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Fuchs C., Zabrodin E.E. The kinetic theory of expanding QGP // *Proc. of 4-th Conference on «Nuclear and Particle Physics, NUPPAC-03»*, 11-15 Oct. 2003, Fayoum, Egypt / Eds. M. Comsan, K. Hanna. Cairo: Cairo University, 2004. P.57–63.
47. Смолянский С.А., Прозоркевич А.В., Тараканов А.В. Исследование кинетических уравнений в теории вакуумного рождения частиц в сильных полях // *Вопросы прикладной физики*, вып.11 / Под ред. Ю. Гуляева, Н. Сеницына, В. Аникина. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2004. С.124–131.
48. Blaschke D.B., Prozorkevich A.V., Reichel A.V., Smolyansky S.A. Kinetic description of vacuum creation of massive vector bosons // *Проблемы калибровочных теорий* / Под ред. Б. Барбашова, В. Нестеренко. Дубна: ОИЯИ, 2004. С.115–126.
49. Blaschke D.B., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A. Electron - positron pair creation in the fields of power optical lasers // *Proc. of the XVII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics»*, Dubna, September 27 - October 2, 2004. Dubna: JINR, 2005. P.383–390.
50. Pervushin V.N., Skokov V.V., Reichel A.V., Smolyansky S.A., Prozorke-

- vich A.V. The kinetic description of vacuum particle creation in the oscillator representation // *Int. J. Mod. Phys, A*. 2005. Vol.20, N.24. P.5689–5704.
51. Blaschke D.B., Prozorkevich A.V., Reichel A.V., Smolyansky S.A. Kinetic description of vacuum creation of massive vector bosons // *Ядерная физика*. 2005. T.68, №6. C.1087–1094.
 52. Smolyansky S.A., Skokov V.V., Prozorkevich A.V. Kinetic theory of the quantum field systems with unstable vacuum // *Письма в ЭЧАЯ*. 2005. T.2, №5. C.50–60.
 53. Filatov A.V., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A. Pair creation by electromagnetic wave in a collisionless plasma // *Proc. of SPIE*. 2006. Vol.6165. P.616509.
 54. Tarakanov A.V., Tarakanov N.A., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A. Electron-positron pair creation by a multimode field of the optical laser // *Proc. of SPIE*. 2006. Vol.6165. P.61650A.
 55. Blaschke D.B., Prozorkevich A.V., Filatov A.V., Smolyansky S.A. Vacuum particle creation (inertial mechanism) // *Теоретическая физика*. 2005. T.6. C.36–60.
 56. Smolyansky S.A., Frisen A.V., Prozorkevich A.V., Bravina L.V., Zabrodin E.E. Non-perturbative dynamics of expanding flux tube in the theory of heavy ion collisions // *Proc. of 8-th International Workshop «Relativistic nuclear physics: from hundreds MeV to TeV»*, May 23 - 28, 2005. Dubna: JINR, 2005. P.183–188.
 57. Blaschke D.B., Prozorkevich A.V., Roberts C.D., Schmidt S.M., Smolyansky S.A. Pair production and optical lasers // *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol.96, N.14 P.140402.
 58. Blaschke D.B., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Tarakanov A.V. Observable manifestation of an electron-positron plasma created by the field of an optical laser // *Journal of Physics: Conference Series*. 2006. Vol.35. P.121–126.
 59. Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Bravina L.V., Zabrodin E.E. EOS of nonequilibrium parton plasma in an expanding flux tube // *Journal of Physics: Conference Series*. 2006. Vol.35. P.431–437.
 60. Frisen A.V., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Bravina L.V., Zabrodin E.E. Dynamical Casimir effect in an expanding flux tube // *Proc. of the XVIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics»*, Dubna, September 25-30, 2006. Dubna: JINR, 2008. P.75–80.
 61. Filatov A.V., Pervushin V.N., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A. Vacuum

- matter creation under action of the inertial mechanism // Proc. of the XVIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics», Dubna, September 25-30, 2006. Dubna: JINR, 2008. P.30–35.
62. Filatov A.V., Pervushin V.N., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A. Non-damping oscillation of the pressure of particles created due to their time dependent mass // Proc. of the XVIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics», Dubna, September 25-30, 2006. Dubna: JINR, 2008. P.36–41.
 63. Friesen A.V., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Bonitz M. Non-perturbative kinetics of electron – hole excitations in strong electric field // Proc. of SPIE. 2007. Vol.6537. P.653707.
 64. Blaschke D.B., Filatov A.V., Egorova I.A., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A. Observable effects caused by vacuum pair creation in the field of high-power optical lasers // Proc. of SPIE. 2007. Vol.6537. P.653708.
 65. Blaschke D.B., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Shkirmanov D.S., Chubaryan M. Laser acceleration of ion beams // ILIAS, Ion and Laser beam Interaction and Application Studies, Progress Report No 2 of the PHELIX theory group / Ed. by P. Mulser. Darmschadt: GSI, 2007. P.34–37.
 66. Smolyansky S.A., Prozorkevich A.V., Bonitz M. On the Interpretation of the Schwinger and Landau-Zener effects // Теоретическая физика. 2007. Т.8. С.95–100.
 67. Блашке Д.Б., Прозоркевич А.В., Смолянский С.А., Филатов А.В. Кинетическая теория рождения пионов в области малых импульсов из кваркового конденсата // Изв. ВУЗов, Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т.15, №6. С.38–44.
 68. Лавкин А.Г., Прозоркевич А.В., Смолянский С.А., Филатов А.В. Исследование изотропизации партонной плазмы при столкновениях тяжелых ионов // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. 2007. Сер. Физика. Т.7, вып.2. С.50–55.
 69. Блашке Д.Б., Прозоркевич А.В., Филатов А.В., Шкирманов Д.С. Лазерное ускорение пучков тяжелых ионов в вакууме // Изв. ВУЗов, Прикладная нелинейная динамика. 2008. Т.16, №1. С.124–134.
 70. Blaschke D.B., Filatov A.V., Prozorkevich A.V., Shkirmanov D.S. Heavy ions in a high-power laser beam // ILIAS, Ion and Laser beam Interaction and Application Studies, Progress Report N3 of the PHELIX theory group / Ed. by P. Mulser. Darmschadt: GSI, 2008. P.54–58.
 71. Filatov A.V., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Toneev V.D. Inertial

- mechanism: dynamical mass as a source of particle creation // ЭЧАЯ. 2008. Т.39, N.6. С.1721–1770.
72. Filatov A.V., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Blaschke D.B. Low momentum π -meson production from evolvable quark condensate // Physics of Particles and Nuclei. 2008. Vol.39, N.7. P.1116–1118.
 73. Egorova I.A., Filatov A.V., Prozorkevich A.V., Smolyansky S.A., Blaschke D.B. Laser acceleration of ion beams // Physics of Particles and Nuclei. 2008. Vol.39, N.7. P.1119–1121.
 74. Блашке Д., Дабровский М.П., Дмитриев В.В., Прозоркевич А.В., Смолянский С.А. Вакуумное рождение W- и Z- бозонов в ранней космологии как дополнительный источник реликтового излучения // Прикладная физика. 2009. №3. С.10–15.
 75. Blaschke D.B., Prozorkevich A.V., Röpke G., Roberts C.D., Schmidt S.M., Shkirmanov D.S., Smolyansky S.A. Dynamical Schwinger effect and high-intensity lasers. Realising nonperturbative QED // Eur. Phys. J. D. 2009. Vol.55, N.2. P.341–358.
 76. Gregori G., Blaschke D.B., Rajeev P.P., Chen H., Clarke R.J., Huffman T., Murphy C.D., Prozorkevich A.V., Roberts C.D., Röpke G., Schmidt S.M., Smolyansky S.A., Wilks S., Bingham R.. A proposal for testing subcritical vacuum pair production with high power lasers // High Energy Dens. Phys. 2010. Vol.6, N.2. P.166-170.