

УТВЕРЖДАЮ

Проректор  
Московского государственного  
университета имени М. В. Ломоносова,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

  
А. А. Федянин



20 сентября 2018 г.  
печать организации

**ОТЗЫВ**

ведущей организации о диссертации Шишмарева Алексея Александровича «Некоторые проблемы квантовой электродинамики сильного электрического поля, заданного потенциалами ступенчатого типа», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

#### **Актуальность темы исследования**

Диссертация А.А. Шишмарева посвящена исследованию явления рождения электрон-позитронных пар в присутствии сильных электрических полей, способных нарушать стабильность вакуума. Эффект рождения частиц сильными полями, электромагнитными или гравитационными, является одним из существенно квантовых явлений и способен, в определенных условиях, существенно влиять на классическую эволюцию системы из-за эффектов обратного влияния. Этот эффект учитывается в космологических моделях и ответственен, в том числе, за хокинговское испарение черных дыр. Электрические поля, способные порождать электрон-позитронные пары, могут существовать в эргосфере черных дыр и вблизи ряда экзотических астрофизических объектов, таких как кварковые звезды и космические струны. В литературе последних лет сообщается, что достаточно сильные электрические поля, вероятно, будут достигнуты в недалеком будущем благодаря прогрессу в лазерной технике. Заметен также растущий интерес в приложениях квантовой электродинамики сильного поля к физике наноструктур. Создание новых наноматериалов, таких как графен, топологические изоляторы или полуметаллы Вейля, наглядно продемонстрировало необходимость изучения влияния эффекта рождения частиц на физические аспекты этих систем. Это дает достаточную мотивацию для исследования явлений, связанных с рождением электрон-позитронных пар электрическим полем. Принимая во внимание многочисленные и разнообразные перспективы применения упомянутых материалов и неугасающий интерес к их использованию в различных отраслях человеческой деятельности; в частности, можно особо упомянуть перспективы использования графена в качестве материала для создания квантовых компьютеров. Из вышесказанного можно заключить, что тема исследования является актуальной.

#### **Научная новизна исследования**

Для исследования нелинейных эффектов сильного поля необходимо применять непerturbативные методы, к числу которых относится используемый в диссертации А.А. Шишмарева метод точных решений уравнения Дирака во внешнем поле. В рамках формализма специальной квантовой электродинамики с внешними электрическими полями, заданными потенциальными ступенями разных типов, А.А. Шишмаревым впервые получены следующие результаты:

1. В рамках квантовой электродинамики с точным учетом классического сильного электрического поля, зависящего от времени, получен явный вид матрицы плотности,

редуцированной в процессе измерения числа рожденных из вакуума пар, электронов или позитронов.

2. Как мера квантовой запутанности электронной и позитронной подсистем и как мера потери информации при редукции по одной из этих подсистем вычислена энтропия фон Неймана для подсистем электронов и позитронов полной квантовой системы, находившейся в начальный момент времени в вакуумном состоянии или состоянии термодинамического равновесия. Вычислена энтропия фон Неймана для матрицы плотности системы с начальным вакуумным условием, редуцированной в процессе измерения рожденных из вакуума пар, электронов или позитронов.

3. Исследовано рождение частиц неоднородным постоянным пиковым электрическим полем, состоящим из экспоненциально возрастающей левой и экспоненциально убывающей правой части, каждая из которых допускает нахождение аналитического решения соответствующего уравнения Дирака. Исследованы три специальных конфигурации такого поля: случай плавно меняющегося поля, случай острого пика и существенно асимметричная конфигурация.

4. Для квантовой электродинамики с неоднородными постоянными полями, заданными потенциальными ступенями, найдено условие унитарной эквивалентности начального и конечного фоковских пространств. Продемонстрировано, что начальное и конечное фоковские пространства унитарно эквивалентны, если число частиц, рождаемых рассматриваемым электрическим полем из вакуума, конечно.

5. Исследована эволюция начального вакуумного состояния под действием неоднородного постоянного электрического поля, заданного потенциальной ступенью. Получен явный вид полной матрицы плотности системы и редуцированных матриц электронной и позитронной подсистем. Вычислена энтропия фон Неймана, соответствующая таким редуцированным матрицам плотности.

#### **Степень обоснованности и достоверности результатов**

Основные результаты диссертационной работы Шипмарева А.А. опубликованы в 3 статьях в рецензируемых международных журналах, а также докладывались на международных конференциях и семинарах. Достоверность полученных результатов объясняется их внутренней самосогласованностью, совпадением в частных случаях с уже известными результатами, а также подтверждается использованием соответствующих методологических приемов, научной литературы.

#### **Теоретическое и практическое значение диссертации**

Важно отметить, что подход к вычислению энтропии и квантовой запутанности многочастичных состояний, возникающих под действием электрического поля из вакуума, предложен впервые. Также впервые получено условие унитарности для эволюции электрон-позитронного поля в постоянном неоднородном электрическом поле неизменного направления; этот результат служит дополнительным подтверждением самосогласованности использованной теории и верной интерпретации начальных и финальных состояний в ее рамках. Впервые исследованы эффекты рождения пар в постоянном неоднородном пиковом поле. Эти результаты являются вкладом в развитие непертурбативных методов, позволяющих рассматривать квантовые эффекты сильного поля, и будут полезны для исследования влияния конечности области электрического поля на рождение пар. Результаты, относящиеся к вычислению энтропии фон Неймана для различных редуцированных матриц плотности, будут полезны в теории квантовой информации и квантовых вычислений.

#### **Структура и основное содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации — 113 печатных листов. Библиографический список содержит 89 наименований.

Во введении после краткого исторического обзора обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, описана научная новизна работы и использованные методы исследования, аргументирована практическая и теоретическая

ценность проведенных исследований, а также приведены сведения об общей структуре и содержании работы.

Первая глава диссертации посвящена изучению вопросов квантовой электродинамики с зависящими от времени однородными электрическими полями, заданными потенциальными степенями. Проводится краткий общий обзор формализма квантовой электродинамики с внешним полем, зависящим от времени, и вводятся необходимые для дальнейшего изложения понятия и обозначения. Приводится явный вид общей матрицы плотности исследуемой системы для различных начальных условий – вакуумного 1.2.5 и равновесного 1.2.8, а также редуцированных матриц плотности для электронной и позитронной подсистем. Принимается во внимание тот факт, что любое измерение, проводимое классическим инструментом в системе, вызывает декогеренцию, что, в свою очередь, влечет за собой соответствующую деформацию общей матрицы плотности системы. Используя матрицу плотности 1.2.4 с вакуумным начальным условием в качестве отправной точки, автор при помощи унитарного оператора эволюции, связывающего наборы начальное и финальное пространства Фока системы, строит явный ее вид в терминах векторов финальных состояний системы. Далее, он применяет принцип редукции фон Неймана для построения явного вида матриц плотности, редуцированных измерением дифференциального среднего числа частиц, электронов или позитронов. Вычисляется соответствующая редуцированным матрицам плотности 1.2.15 энтропия фон Неймана 1.3.13 для вакуумного и равновесного начальных состояний. Энтропия фон Неймана также вычисляется для матрицы плотности с начальным вакуумным условием 1.2.21, редуцированной в процессе измерения числа частиц. Оказывается, что в этом случае она совпадает с энтропией 1.3.13; из этого заключается, что для вакуумного начального состояния редукция по одной из подсистем приводит к такой же потере информации, что и измерение дифференциальных чисел частиц, электронов или позитронов в системе. После этого общее рассмотрение иллюстрируется на примере специальной регуляризации однородного поля – так называемого  $T$ -постоянного поля.

Вторая глава начинается кратким обзором недавно сформулированного формализма квантовой электродинамики с постоянными неоднородными электрическими полями, заданными потенциальными степенями. В рамках этого формализма исследуются характеристики вакуумной нестабильности и вычисляются дифференциальные и интегральные числа рожденных из вакуума пар в присутствии специального пикового электрического поля 2.2.7. Специальная подстановка 2.2.16 позволяет свести соответствующее уравнение Дирака 2.2.15 к вырожденному гипергеометрическому уравнению 2.2.18, фундаментальный набор решений которого хорошо известен. Найденные дифференциальные и интегральные числа рожденных частиц анализируются для трех конфигураций поля: медленно меняющегося поля, острого пика и существенно асимметричной полевой конфигурации. Исследуется вопрос унитарной эквивалентности начального и финального пространств Фока в рамках рассматриваемой теории. Изучается деформация начального вакуумного состояния Дираковского поля под действием постоянного неоднородного электрического поля, конструируется общая матрица плотности, соответствующая такой системе, и редуцированные матрицы плотности для электронной и позитронной подсистем. Вычисляется соответствующая редуцированным матрицам плотности энтропия фон Неймана. Далее в качестве конкретного примера поля, деформирующего вакуум, рассматривается постоянное электрическое поле, заключенное между пластинами плоского конденсатора, разнесенными на некое конечное расстояние  $L$ .

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, а также предложены дальнейшие возможные направления исследований.

#### **Основные достоинства и недостатки по содержанию диссертации**

Диссертация Шишмарева А.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение нескольких теоретических задач, связанных с эффектом рождения частиц в рамках квантовой электродинамики с нестабильным вакуумом и имеющих существенное значение для развития упомянутой области. Диссертация написана

литературным языком, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе соискателя в науку.

Вместе с тем, работа не лишена некоторых недочетов и упущений. Так, несмотря на то, что в целом диссертация написана достаточно хорошо, в тексте имеется небольшое количество опечаток и мелких неточностей. В качестве замечаний можно также отметить следующее:

1. Обзорная часть работы разбита, фактически, на две части, по одной для каждой из двух глав. Такая структура может затруднить понимание, где заканчивается обзор и начинаются оригинальные результаты.

2. Не ясно, с какой целью в тексте диссертации для обозначения операторов, относящихся к начальным и конечным состояниям, были сохранены английские обозначения in- и out-.

3. Каждую из глав следовало начинать с формулировки решаемых в ней задач для облегчения чтения работы.

Эти замечания, тем не менее, не снижают общей положительной оценки работы, представляющей собой законченное исследование, выполненное на высоком уровне и свидетельствующее о квалификации и подготовленности автора.

#### **Заключение**

На основании всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Тема диссертации Шишмарева А.А. является актуальной и важной. Выполненная работа соответствует специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

2. Основные научные результаты диссертационной работы являются новыми и имеют существенную научную и практическую ценность.

3. Результаты диссертации опубликованы в высокорейтинговых международных рецензируемых журналах и докладывались на международных конференциях и семинарах; их достоверность объясняется их внутренней самосогласованностью и совпадением в частных случаях с уже известными результатами.

4. Автореферат диссертации отражает ее содержание полно и правильно.

На этих основаниях можно заключить, что диссертационная работа Шишмарева Алексея Александровича «Некоторые проблемы квантовой электродинамики сильного электрического поля, заданного потенциалами ступенчатого типа» удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика. Диссертация и отзыв рассмотрены, а отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры теоретической физики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, протокол № 6 от 15 сентября 2018 г.

Отзыв составил:



профессор кафедры теоретической физики физического факультета  
доктор физико-математических наук (01.04.02 – Теоретическая физика), профессор  
Студеникин Александр Иванович

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский государственный университет  
имени М. В. Ломоносова», 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1;  
телефон: 8 (495) 939-10-00

e-mail: [info@rector.msu.ru](mailto:info@rector.msu.ru), сайт: [www.msu.ru](http://www.msu.ru)

Дата: 20 сентября 2018 г.