

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
"КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи

Попов Федор Калинович

**Нестационарные явления во внешних сильных
полях**

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

2017

Работа выполнена в ФГБУ "ГНЦ РФ — Институт Теоретической и Экспериментальной Физики" НИЦ "Курчатовский Институт", г. Москва

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук Ахмедов Эмиль Тофик оглы
ведущий научный сотрудник
ФГБУ "ГНЦ РФ — ИТЭФ" НИЦ "КИ", г. Москва

Официальные оппоненты:

чл. корр. РАН, доктор физ.-мат. наук Арсеев Петр Иварович
главный научный сотрудник
ФИАН РАН, г. Москва

чл. корр. РАН, доктор физ.-мат. наук Горбунов Дмитрий Сергеевич
ведущий научный сотрудник
ИЯИ РАН, г. Москва

Ведущая организация: Математический институт имени В. А. Стеклова

Защита состоится "21" марта 2017 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.201.002.01 ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ" НИЦ "КИ" по адресу: 117218, Москва, ул. Б. Черемушинская, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ" НИЦ "КИ", а также на сайте института www.itep.ru

Автореферат разослан "17" февраля 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук

В.В.Васильев

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Одной из важных задач современной теоретической физики является построение теории квантовой гравитации. Первым шагом к пониманию физики квантовой гравитации является рассмотрение гравитации как внешнего классического поля, которое деформирует обычную квантовую теорию поля. Данный подход уже принес некоторые плодотворные результаты. В частности, в 1974 году Стивен Хокинг получил, что если рассматривать квантовую теорию черных дыр, то последние ведут себя как термодинамический объект. Для них можно ввести понятие температуры и энтропии. Также в 1951 году Джулиан Швингер показал, что в сильном электрическом поле возможно рождение частиц. Также вопрос изучения поведения квантовой теории поля на фоне внешнего гравитационного поля возникает и при обсуждении пространства де-Ситтера. К примеру, является интересным вопрос о стабильности пространства при учете квантовых флуктуаций. Все три рассмотренных сюжета получили развитие во многих работах физиков 20-го и 21-го столетия.

В большинстве случаев описанные выше эффекты были рассмотрены в рамках гауссовой теории поля. Настоящая работа посвящена исследованию влияния петлевых поправок к данным эффектам. Такой подход позволит

заглянуть глубже в детали фундаментальных устройств квантовой теории поля и может пролить свет на некоторые современные проблемы теоретической физики.

Цели и задачи диссертационного исследования

Представленная диссертационная работа посвящена исследованию свойств квантовой теории поля на фоне внешних сильных гравитационных и электромагнитных полей. В работе решаются такие вопросы как:

- изучение теории взаимодействующего скалярного поля в пространстве де-Ситтера;
- анализ петлевых поправок к скалярной квантовой электродинамике на фоне внешнего постоянного электрического поля или на фоне электрического пульса;
- изучение массивной теории скалярного поля на фоне гравитационного коллапса и вывод эффекта Хокинга для данной теории;
- суммирование лидирующих инфракрасных расходимостей и вкладов при помощи уравнения Дайсона-Швингера и вывод некоторого аналога кинетического уравнения при помощи взятия инфракрасного предела в уравнении Дайсона-Швингера.

Научная новизна

Результаты, представленные к защите, являются оригинальными и получены в ходе научной работы автора диссертации. В частности, впервые было

проведено изучение поведения петлевых поправок в квантовой теории скалярного поля в пространстве де-Ситтера. Кинетическое уравнение, которое суммирует лидирующие инфракрасные вклады в пространстве де-Ситтера, и решения данного уравнения также ранее не были получены и исследованы. Петлевые поправки в скалярной квантовой электродинамике на фоне внешнего постоянного электрического поля также ранее не рассматривались за пределами приближения внешнего поля. Суммирование лидирующих вкладов во всех петлях в скалярной квантовой электродинамике на фоне внешнего поля также было проведено впервые. Был обобщен результат Хокинга для термального потока для случая массивных полей, также было получено, что поток получает секулярно растущие квантовые поправки при рассмотрении взаимодействующей теории. По излагаемому материалу опубликована серия статей в ведущих реферируемых журналах, результаты также многократно докладывались на международных конференциях.

Практическая и научная ценность

Исследования, представленные в диссертационной работе, носят теоретический характер. Результаты могут иметь применение в исследованиях по общей теории относительности, квантовой гравитации и физике конденсированного состояния. Также результаты позволяют лучше понять свойства квантовой теории поля на фоне внешнего поля и могут быть применены для дальнейших теоретических исследований данной области.

Результаты, выносимые на защиту диссертации

- Показано, что в расширяющейся Пуанкаре карте в теории скалярного поля с взаимодействием вида $\lambda\phi^4$ возникают секулярно растущие

петлевые поправки.

- Просуммированы лидирующие секулярные вклады в $\lambda\phi^4$ теории в пространстве де-Ситтера при помощи уравнения Дайсона-Швингера. Обсуждена связь этих наблюдений с наличием и нарушением инвариантности относительно группы изометрий пространства де-Ситтера.
- Проанализированы решения полученных уравнений. Показано, что в случае маленьких начальных заселенностей уровней для точных гармоник имеется стационарное решение. В случае больших начальных заселенностей уровней решение оказывается сингулярным.
- Показано, что в скалярной электродинамике на фоне сильных электрических полей также возникают секулярно растущие петлевые поправки.
- При помощи уравнений Дайсона-Швингера были просуммированы лидирующие секулярные вклады на фоне сильных электрических полей для фотонного пропагатора, и были получены решения данных уравнений.
- Были учтены поправки к току, который возникает в результате эффекта Швингера. Показано, что хотя в постоянном электрическом поле на древесном уровне ток получается равен нулю, он оказывается отличным от нуля при учете петлевых поправок. Эти поправки к току секулярно растут и нарушают инвариантность относительно трансляций и сдвигов по времени.
- Выведено излучение Хокинга из первых принципов для случая массивного скалярного поля.

- Показано, что к древесному вкладу в излучение Хокинга также имеются секулярно растущие петлевые вклады, которые модифицируют спектр излучения.

Апробация диссертации и публикации

Результаты диссертации докладывались на семинарах: ИТЭФ, Московского Физико-Технического Института (Долгопрудный, Россия), Физического Института Российской Академии Наук (Москва, Россия), Института Ядерных Исследований Российской Академии Наук (Москва, Россия), Математического Факультета Высшей Школы Экономики (Москва, Россия), Института Альберта Эйнштейна (Потсдам, Германия) и на следующих международных и отечественных конференциях: Workshop on Aspects of Non-Associative and Non-Commutative Geometries in String (Стамбул, Турция, 2012), 2nd Workshop on Aspects of Non-Associative and Non-Commutative Geometries in String Theory (Стамбул, Турция, 2013), Synthesis of integrabilities in the context of duality between the string theory and gauge theories (Москва, Россия, 2013), 52st International school of subnuclear physics (Эриче, Италия, 2014), 42th Winter School ИТЭФ (Москва, Россия, 2014), Молодежная конференция ИТЭФ (Москва, Россия, 2014), 43th Winter School ИТЭФ (Москва, Россия, 2015), 53rd International school of subnuclear physics (Эриче, Италия, 2015), Quantum fields and IR issues in de Sitter space-time (Натал, Бразилия, 2015), Молодежная конференция по физике высоких энергий, квантовой теории поля, математической физике и космологии (Долгопрудный, Россия, 2016), The International School “Advanced Methods of Modern Theoretical Physics: Integrable and Stochastic Systems” (Дубна, Россия, 2016).

По материалам работы опубликовано 4 статьи в ведущих международ-

ных реферируемых журналах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения (Глава 1), три главы основного текста (Главы 2-4), заключения (Глава 5). Общий объем диссертации составляет 127 страниц, включая 11 рисунков. Список литературы содержит 99 ссылок.

Содержание диссертации

Во **Введении** формулируется рассматриваемый круг задач, дана общая характеристика диссертационной работы и краткий обзор применяемых методов.

В **разд. 1.1** объясняется, почему важно рассматривать системы во внешних полях. Также на основе общефизических соображений выводится кинетическое уравнение, что дает в дальнейшем возможность интерпретировать уравнения, полученные при суммировании лидирующих инфракрасных расходимостей или вкладов.

В **разд. 1.2** схематически выводится и обсуждается диаграммная техника Келдыша-Швингера. Объясняется, почему в нестационарной ситуации невозможно использовать обычную диаграммную технику Фейнмана. Также обсуждается физический смысл запаздывающего, опережающего и Келдышевского пропагаторов, возникающих в диаграммной технике Келдыша-Швингера. К примеру, опережающей и запаздывающий пропагаторы $D^{R,A}$ несут информацию о спектре частиц, а пропагатор Келдыша D^K – о заселенности уровней.

В **разд. 1.3** на основе формализма функционального интеграла выводится диаграммная техника Келдыша-Швингера. При помощи развитого

формализма выводятся уравнения, которым удовлетворяют пропагаторы в свободной теории поля.

В **разд. 1.4** обсуждаются петлевые поправки к теории скалярного поля с взаимодействием $\lambda\phi^4$ на фоне пространственно-однородного гравитационного поля. Показано, что однопетлевые поправки перенормируют массу поля, а при учете двухпетлевых поправок могут возникнуть секулярно растущие вклады.

В **разд. 1.5** объясняется, как могут быть просуммированы лидирующие секулярно растущие вклады на примере взаимодействующего скалярного поля в пространстве Минковского. Вывод проделывается при помощи уравнения Дайсона-Швингера и операторного метода.

В **разд. 1.6** на примере скалярного поля в плоском пространстве-времени объясняется, что секулярно растущие петлевые вклады могут появиться из-за того, что было выбрано неправильно основное состояние системы.

В **главе 2** подробно обсуждается поведение теории скалярного поля на фоне пространства де-Ситтера. Объясняется, почему изучение данного вопроса важно для понимания физики квантовой гравитации и космологии.

В **разд. 2.1** вводится понятие пространства де-Ситтера, расширяющейся и сжимающейся Пуанкаре карты. Обсуждаются основные характеристики пространства де-Ситтера: метрика, кривизна, группа изометрий, удобные системы координат. Вводится понятие инвариантного расстояния, которое является аналогом интервала в плоском пространстве-времени для пространства де-Ситтера, и его связь с геодезическим расстоянием. При помощи конформного преобразования удастся построить диаграмму Пенроуза и понять причинную структуру для двумерного пространства де-Ситтера.

В **разд. 2.2** изучается поведение скалярного поля в пространстве де-Ситтера. Выводится уравнение Клейна-Гордона, которое является уравне-

нием движения для свободного скалярного поля. Обсуждаются решения полученных уравнений в глобальном пространстве де-Ситтера, сжимающейся и расширяющейся Пуанкаре картах. Обсуждаются гармоники, которые диагонализуют гамильтониан свободного скалярного поля в расширяющейся Пуанкаре карте в бесконечном прошлом — ин-гармоники или гармоники Банча-Девиса. Также вводятся понятия Евклидового вакуума, альфа-вакуумов.

В **разд. 2.3** обсуждается поведение корреляционных функций. Показано, что выбор Евклидовых и альфа гармоник соответствует выбору вакуума, который инвариантен относительно группы изометрий пространства де-Ситтера. К примеру, полученная корреляционная функция зависит только от инвариантного расстояния между точками, но не от самих точек. Также обсуждаются возможности разрешения возникающих сингулярностей у корреляционных функций.

В **разд. 2.4** подробно рассматриваются петлевые поправки к двухточечной корреляционной функции для гармоник Банча-Девиса в расширяющейся Пуанкаре карте. Показано, что петлевые поправки к корреляционной функции инвариантны относительно полной группы изометрий пространства де-Ситтера. Также обсуждается, что данный результат верен только для выбора вакуума Банча-Девиса.

В **разд. 2.5** обсуждаются петлевые поправки при выборе любого начального состояния. Показано, что петлевые поправки к вершине, опережающему и запаздывающему пропагаторам подавлены. Объясняется, почему в сжимающейся Пуанкаре карте петлевые поправки ведут к инфракрасной расходимости, а в расширяющейся Пуанкаре карте — к секулярно растущим вкладам.

В **разд. 2.6** удастся вывести кинетическое уравнение как инфракрасный

предел уравнения Дайсона-Швингера. Решения данного уравнения зависят от начальных условий, поэтому производится анализ двух случаев: случаи маленьких и больших начальных заселенностей уровней. В первом случае система выходит на стационарное решение. Во втором случае решение оказывается сингулярным, что означает сильное влияние скалярного поля на внешнее пространство-время и нарушение группы изометрий пространства квантовыми флуктуациями.

В **главе 3** обсуждаются петлевые поправки к скалярной квантовой электродинамике на фоне внешнего постоянного электрического поля.

В **разд. 3.1** объясняется важность рассмотрения петлевых поправок к квантовой электродинамике с точки зрения проблем, возникающих в квантовой гравитации.

В **разд. 3.2** проводится стандартный вывод классического эффекта Швингера на основе формализма функционального интеграла.

В **разд. 3.3** обсуждается поведение свободной скалярной квантовой электродинамики на фоне внешнего электромагнитного поля, то есть не учитывается взаимодействие квантов скалярного поля с фотонами, но непертурбативным образом учитывается наличие внешнего поля. Объясняется, почему гармоники для скалярного поля меняются, а гармоники и пропагаторы для электромагнитного поля остаются неизменными.

В **разд. 3.4** рассматривается поведение скалярной квантовой электродинамики на фоне внешнего постоянного электрического поля и пульса в темпоральной калибровке $A_1 = A_1(t)$. Показано, что в случае пульса на древесном уровне возникает ток $J_1 \propto e^2 (A_1(t) - A_1(-\infty))$. После анализа однопетлевых поправок было выяснено, что момент включения взаимодействия t_0 невозможно увести в бесконечное прошлое, потому что возникают инфракрасные расходимости в пропагаторе Келдыша фотонов $\Delta_1 G_{\mu\nu}(t) \propto$

$e^2(t - t_0)$. Аналогичное вычисление для пропагатора Келдыша свободного поля показывает, что последний получает конечные поправки и, следовательно, может считаться древесным. Проводится анализ петлевых поправок к вершине, и производится суммирование секулярно растущих петлевых вкладов при помощи уравнения Дайсона-Швингера.

В **разд. 3.5** проводятся вычисления, аналогичные проведенным в **разд. 3.4**, но для случая, когда была выбрана пространственная калибровка для внешнего электромагнитного поля $A_0 = A_0(x)$. Данное вычисление показывает, что хотя гамильтониан может быть диагонализирован, но его спектр оказывается неограниченным снизу, что ведет к секулярно растущим вкладам. Показано, что ответы, полученные в **разд. 3.5** и **разд. 3.4**, согласуются друг с другом.

В **разд. 3.6** учитываются петлевые вклады к пропагаторам скалярного поля для вычисления возникающего тока. Показано, что хотя ток на древесном уровне на фоне внешнего постоянного электрического поля равен нулю, при учете петлевых поправок ток оказывается отличным от нуля.

В **главе 4** проводится анализ петлевых поправок к эффекту Хокинга.

В **разд. 4.1** обсуждается постановка задачи, и почему данная задача важна с точки зрения проблем современной теоретической физики. Также проводится качественный анализ гравитационного коллапса.

В **разд. 4.2** подробно описывается гравитационное поле, которое возникает в результате гравитационного коллапса тонкой оболочки. Обсуждается, как можно связать координаты под и над оболочкой, что необходимо для анализа эффекта Хокинга.

В **разд. 4.3** проводится анализ уравнения Клейна-Гордона для случая метрики гравитационного коллапса. Находятся ин-гармоники, которые диагонализуют гамильтониан до начала гравитационного коллапса. Также пу-

тем решения уравнения Клейна-Гордона удастся найти поведение ин-гармоник в бесконечном будущем в непосредственной близости к горизонту.

В **разд. 4.4** выводится эффект Хокинга. При помощи гармоник, полученных в **разд. 4.3**, считается поток $J = \int_{S_2} d\phi d \cos \theta \langle : T_t^r : \rangle$ и показывается, что он равен термальному с температурой $T = \frac{1}{4\pi r_g}$.

В **разд. 4.5** анализируются петлевые поправки к пропагатору Келдыша во взаимодействующей теории поля; показано, что они секулярно растут со временем. Это означает, что классический ответ может сильно продеформироваться под действием квантовых поправок.

В **Заключении** работы сформулированы основные результаты диссертации, выносимые на защиту.

Публикации по теме диссертации

1. E. T. Akhmedov, F. K. Popov, V. M. Slepukhin. Infrared dynamics of the massive ϕ^4 theory on de Sitter space. *Phys. Rev. D*, 88, 024021 (2013).
2. E.T.Akhmedov, N.Astrakhantsev, F.K.Popov. Secularly growing loop corrections in strong electric fields. *JHEP* 09 (2014) 071.
3. E.T. Akhmedov, F.K. Popov. A few more comments on secularly growing loop corrections in strong electric fields. *JHEP* 1509 (2015) 085
4. Emil T. Akhmedov, Hadi Godazgar, Fedor K. Popov. Hawking radiation and secularly growing loop corrections. *Phys. Rev. D* 93, 024029 (2016)