

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Трунин Дмитрий Алексеевич

Нестационарные квантовые системы с некинетическим поведением петлевых поправок

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена на кафедре теоретической физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Ахмедов Эмиль Тофик оглы,

доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой теоретической физики МФТИ, ведущий научный сотрудник Лаборатории физики высоких энергий МФТИ.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук

Защита состоится 30.06.2022 в 11:00 на заседании диссертационного совета ЛФИ 01.04.02.008 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к.ф.-м.н.

Кузьмичев Павел Константинович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Поведение квантовых систем в сильных внешних полях (в частности, рождение частиц) — важный раздел современной квантовой теории поля, включающий в себя множество любопытных явлений. Первый пример такого явления — спонтанное рождение электрон-позитронных пар в сильных электрических полях — был теоретически открыт Джулианом Швингером еще в 1951 году [1]. Впоследствии эффект Швингера был дополнен не менее знаменитыми эффектами Хокинга [2–4] и Унру [5–7], а также динамическим эффектом Казимира [8–11]. С одной стороны, все перечисленные эффекты не имеют классических аналогов и отражают наиболее фундаментальные особенности квантовой теории поля. С другой стороны, изучение этих особенностей может подсказать путь к построению более фундаментальной теории, объединяющей квантовые эффекты с классической теорией гравитации [12–14]. По этой причине интерес к указанным эффектам не угасает даже спустя десятки лет после их теоретического открытия.

Стандартный взгляд на вышеупомянутые знаменитые эффекты основан на квазиклассическом (древесном) приближении, в котором считается, что взаимодействие между квантовыми полями приводит к пренебрежимо малым поправкам. В частности, этот подход подробно изложен в учебниках [15–17]. Тем не менее, в недавних работах А. М. Полякова и Э. Т. Ахмедова было показано, что в ряде важных нестационарных систем квазиклассический подход приводит к неверным результатам, поскольку включение сколь угодно малого взаимодействия генерирует существенные петлевые поправки, которые на больших временах эволюции становятся сравнимы с древесными выражениями. В частности, подобное поведение петлевых поправок наблюдается в расширяющейся Вселенной [18–28] и сильных электрических полях [29–31], а также на фоне ма-

теории, коллапсирующей в черную дыру [32]. Во всех перечисленных системах поправки к заселенности квантовых уровней n_{kl} и аномальному квантовому среднему $\varkappa_{kl}$ секулярно растут и остаются конечными даже на очень больших временах эволюции, $t \rightarrow \infty$; другими словами, в m -ом порядке теории возмущений по малой константе связи λ поправки к квантовым средним выглядят как $n_{kl}^{(m)} \sim \lambda^m t^{a_m}$ и $\varkappa_{kl}^{(m)} \sim \lambda^m t^{b_m}$ с некоторыми не зависящими от времени степенями $0 < a_m \leq m$ и/или $0 < b_m \leq m$. Очевидно, что в этом случае перейти к свободной теории с помощью наивного предела $\lambda \rightarrow 0$ нельзя. Чтобы понять, как в действительности ведут себя квантовые средние и наблюдаемые величины (например, поток тензора энергии-импульса) в подобных слабо взаимодействующих нестационарных системах, необходимо просуммировать петлевые вклады из всех порядков теории возмущений.

Один из известных способов выполнить подобное суммирование — выписать систему уравнений Дайсона — Швингера с помощью нестационарной диаграммной техники Швингера — Келдыша, а затем свести эту систему к аналогу кинетического уравнения, выделяя лидирующие секулярно растущие вклады и пренебрегая поправками к многоточечным корреляционным функциям. В частности, указанный способ хорошо работает для тяжелых полей в пространстве де Ситтера [21–26] и заряженных частиц на фоне сильного электрического поля [30, 31]. К сожалению, работает он далеко не всегда, поскольку в некоторых нестационарных ситуациях систему уравнений Дайсона — Швингера не удастся свести к аналогу кинетического уравнения. Основным препятствием на пути такого сведения, как правило, стоит секулярный рост многоточечных корреляционных функций. К примеру, подобная проблема возникает для легких полей в пространстве де Ситтера: чем меньше становится масса поля, тем более высокие корреляционные функции необходимо включать в самосогласованную систему уравнений Дайсона — Швингера [27, 28]. К настоящему моменту решить такую систему удалось только для $O(N)$ -симметричной теории в пределе большого числа полей $N \rightarrow \infty$ и только для состояния Банча — Дэвиса [33–36]. Анало-

гичные проблемы также возникают и для динамического эффекта Казимира с двумерным безмассовым скалярным полем [37]. В этом случае n -петлевая поправка к практически любой многоточечной корреляционной функции растет со средним временем как $(\lambda T)^n$, где T — среднее время внешних точек; это не только не позволяет замкнуть систему уравнений Дайсона — Швингера на каком-то конечном числе внешних точек, но и в принципе делает невозможным получение уравнения кинетического типа.

В то же время, описание динамики взаимодействующих квантовых систем с некинетическим поведением петлевых поправок имеет большое теоретическое и прикладное значение. С одной стороны, понимание процессов в подобных квантовых системах поможет уточнить теоретические модели ранней Вселенной и разработать более полное описание динамического эффекта Казимира. С другой стороны, можно надеяться, что теоретические предсказания можно будет проверить на практике, поскольку существующие эксперименты по измерению динамического эффекта Казимира фактически проводятся в слабо нелинейных системах [38–42]. При этом понять, как изменяется состояние таких квантовых систем, и вычислить для них наблюдаемые величины вроде числа родившихся частиц и потока тензора энергии-импульса, можно только разработав альтернативный подход к решению нестационарных уравнений Дайсона — Швингера. Следовательно, такой подход позволит глубже заглянуть в детали фундаментального устройства квантовой теории поля и поможет пролить свет на некоторые современные проблемы теоретической физики.

Цели и задачи диссертационного исследования

В диссертации рассмотрен ряд нестационарных систем, в которых эволюцию квантовых средних нельзя описать с помощью аналога кинетического уравнения. А именно, в работе рассматриваются следующие вопросы:

- Разработка способа суммирования поправок в нестационарных системах с

некинетическим поведением петлевых поправок к корреляционным функциям и квантовым средним.

- Вычисление пересуммированных корреляционных функций, квантовых средних и средней энергии возбуждений в простейшем примере нестационарной квантовой теории поля — нестационарной квантовой механике.
- Изучение нелинейного скалярного динамического эффекта Казимира на фоне резонансной полости и полупрозрачного зеркала.
- Изучение сильных скалярных полей на примере $(0 + 1)$ и $(1 + 1)$ -мерной модели Юкавы.

Научная новизна

Все основные результаты диссертации являются оригинальными и впервые получены в ходе научной работы автора диссертации. В частности, в диссертации впервые обсуждается секулярный рост петлевых поправок к корреляционным функциям в нестационарной $O(N)$ -симметричной квантовой механике и нелинейном динамическом эффекте Казимира на фоне резонансной полости и полупрозрачного зеркала. Несмотря на то, что динамический эффект Казимира и его “игрушечные” квантовомеханические модели многократно обсуждались в литературе [8–10, 43–53], в подавляющем большинстве работ нелинейность теории и связанное с ней изменение квантового состояния считались пренебрежимо малыми. Более того, в указанной квантовомеханической системе и нелинейном динамическом эффекте Казимира до сих пор не удавалось просуммировать секулярно растущие петлевые поправки, поскольку в этих системах уравнения Дайсона — Швингера не сводятся к аналогу кинетического уравнения [37]. Таким образом, суммирование лидирующих секулярно растущих поправок в указанных системах в диссертации проведено впервые, причем в случае квантовой механики суммирование выполнено двумя независимыми способами. Динамика

корреляционных функций и квантовых состояний на фоне сильных скалярных полей с точки зрения нестационарной квантовой теории поля также ранее не рассматривалась. По этой причине выражения для многоточечных корреляционных функций в $(0 + 1)$ -мерной теории Юкавы и скалярного тока в $(1 + 1)$ -мерной теории Юкавы, полученные в диссертационной работе, а также доказательство отсутствия секулярного роста петлевых поправок к корреляционным функциям $(1 + 1)$ -мерной теории Юкавы на фоне сильного, но медленно изменяющегося скалярного поля, также можно отнести к числу новых результатов.

Практическая и научная ценность

Исследования, представленные в диссертационной работе, носят теоретический характер. Тем не менее, полученные результаты могут иметь применение в исследованиях по физике конденсированного состояния и квантовой оптике. В частности, они указывают на важность учета нелинейностей в экспериментах по проверке динамического эффекта Казимира с помощью сверхпроводящих квантовых контуров [38–42]. Также результаты диссертации и разработанные в ней подходы позволяют лучше понять свойства взаимодействующей нестационарной квантовой теории поля на фоне сильных внешних полей и могут быть применены для дальнейших теоретических исследований этой области.

Результаты, выносимые на защиту диссертации

- Просуммированы лидирующие секулярно растущие вклады в корреляционные функции и квантовые средние в нестационарной квантовой механике — системе N связанных осцилляторов с переменной частотой и $O(N)$ -симметричным квартичным взаимодействием.
- Суммирование выполнено двумя способами: с помощью эффективного гамильтониана, позволяющего оценить квантовые средние в пределе сла-

бых отклонений от стационарности, и с помощью диаграммной техники Швингера — Келдыша в пределе $N \gg 1$.

- Показано, что при сильных отклонениях от стационарности (например, при резонансной накачке энергии) вклад петлевых поправок можно интерпретировать как $\mathcal{O}(1)$ дополнительных степеней свободы, входящих в выражения для средней энергии и числа возбуждений осцилляторов.
- Показано, что в скалярном динамическом эффекте Казимира с двумерным безмассовым полем на фоне резонансной полости (двух идеально отражающих зеркал) и полупрозрачного зеркала (дельта-функционального барьера) возникают секулярно растущие петлевые поправки, причем двухпетлевые поправки квадратично растут вместе со временем эволюции.
- Установлено, что секулярно растущие поправки возникают за счет нарушения конформной инвариантности членом взаимодействия и нарушения закона сохранения энергии из-за неоднородности движения зеркал.
- Показано, что секулярно растущие петлевые поправки могут играть важную роль в том числе в экспериментах по моделированию динамического эффекта Казимира с помощью сверхпроводящих квантовых контуров.
- Рассмотрена $(0 + 1)$ и $(1 + 1)$ -мерная теория Юкавы на фоне линейно растущего скалярного поля $\phi_{cl} = Et$.
- Для $(0 + 1)$ -мерной теории корреляционные функции полей вычислены точно — в этой теории многоточечные функции просто распадаются на произведение одноточечных корреляторов.
- Для $(1 + 1)$ -мерной теории вычислены точные моды и древесный скалярный ток, а также петлевые поправки к корреляционным функциям. Показано, что на указанном фоне корреляционные функции ограничены даже в пределе бесконечно большого времени эволюции.

- Показано, что выражение для древесного скалярного тока можно обобщить на произвольные сильные скалярные поля, если эти поля достаточно медленно изменяются. Для этого необходимо рассмотреть эффективное действие теории.

Апробация диссертации и публикации

Исследования, вошедшие в диссертацию, отмечены стипендией им. А.Д. Сахарова (2021) и многократно обсуждались на семинарах ведущих российских институтов, а также на ряде отечественных и международных конференций. В частности, результаты диссертации докладывались на **общем собрании** Отделения Физических Наук Российской Академии Наук (Москва, 2021), **семинарах** “Theory of Condensed Matter” (ЛТФ ОИЯИ, Дубна, 2021), семинаре по квантовой теории поля теоретического отделения ФИАН (Москва, 2021), семинаре теоретической группы Лаборатории Физики Высоких Энергий МФТИ (Долгопрудный, 2021), семинаре “Непертурбативные методы в квантовой теории поля” (ИТЭФ и ИТФ им. Ландау, Москва, 2021), а также на следующих **конференциях**: XVII DIAS-TH Winter School “Supersymmetry and Integrability” (Дубна, 2022), 61-ой, 62-ой и 64-ой Всероссийской научной конференции МФТИ (Долгопрудный, 2018, 2019 и 2021), Молодежной конференции по теоретической и экспериментальной физике МКТЭФ-2018, МКТЭФ-2019, МКТЭФ-2020 и МКТЭФ-2021 (Москва, 2018, 2019, 2020 и 2021), IX и X межинститутской молодежной конференции “Физика элементарных частиц и космология” (Москва, 2020 и 2021), XXVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов” (Москва, 2021), школе “Летний струнный семинар 2021” (Долгопрудный, 2021), школах Moscow International School of Physics 2019 и 2020 (Вороново, 2019 и 2020) и 57th International School of Subnuclear Physics (Эриче, 2019).

По материалам диссертации опубликовано 5 статей в международных рефе-

рируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в диссертации, были получены диссертантом лично либо при его непосредственном участии. Во всех опубликованных работах диссертант совместно с соавторами участвовал в постановке исследовательских задач, выборе методов их решения, интерпретации результатов и формулировке выводов. В работах [I,V], на которых основана глава 2, диссертант был единственным соавтором; в работе [IV], на которой частично основана глава 3, диссертант был ведущим соавтором.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения (Глава 1), трех глав основного текста (Главы 2–4), заключения (Глава 5) и двух приложений (А и В). Общий объем диссертации составляет 152 страницы, включая 19 рисунков. Список литературы содержит 156 ссылок.

Содержание диссертации

В главе 1 (**введении**) обсуждаются основные подходы к описанию нестационарных квантовых систем в сильных внешних полях; обоснована актуальность диссертационной работы; сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований; представлены выносимые на защиту научные положения.

В разделе 1.1 рассматривается стандартный подход к описанию квантовых систем в сильных внешних полях, в котором поправки за счет взаимодействия между квантовыми полями (нелинейности теории) считаются пренебрежимо малыми. Выводится выражение для числа частиц, рождающихся в свободной теории при переходе между областями, в которых гамильтониан можно считать

постоянным и диагонализировать некоторым выбором базиса мод. Обосновывается важность учета взаимодействий между квантовыми полями. Приводятся максимально общие выражения для квантовых средних и числа родившихся частиц во взаимодействующей теории, которые в дальнейшем используются в основной части диссертации.

В **разделе 1.2** схематически выводится диаграммная техника Швингера — Келдыша для нестационарной теории массивного скалярного поля с квартичным взаимодействием. Обсуждается сокращение вакуумных пузырей в этой диаграммной технике. Показывается, что в стационарной ситуации техника Швингера — Келдыша переходит в стандартную технику Фейнмана.

В **разделе 1.3** обсуждается физический смысл пропагаторов в диаграммной технике Швингера — Келдыша. Демонстрируется, что точный келдышевский пропагатор содержит информацию о состоянии системы в произвольный момент времени, тогда как древесный опережающий и запаздывающий пропагатор определяют спектр частиц. Показывается, что петлевые поправки к запаздывающему и опережающему пропагаторам всегда остаются конечными в пределе $t \gg \Delta t$, где t — среднее время внешних точек корреляционной функции, а Δt — всевозможные разности этих времен. Иными словами, петлевые поправки к запаздывающему и опережающему пропагатору в указанном пределе подавлены по сравнению с поправками к келдышевскому пропагатору, которые могут неограниченно расти вместе со средним временем t .

В **разделе 1.4** диаграммная техника Швингера — Келдыша заново выводится с помощью формализма функционального интеграла. С помощью келдышевского поворота вводятся “классическая” и “квантовая” компонента поля, устанавливается связь между пропагаторами в “ $\pm$ ” и KRA обозначениях.

В **разделе 1.5** обсуждается один из подходов к суммированию секулярно растущих петлевых поправок, основанный на сведении системы уравнений Дайсона — Швингера к аналогу кинетического уравнения. Приводятся примеры нестационарных систем, в которых указанный метод можно и нельзя использо-

вать. Обосновывается необходимость разработки альтернативных методов суммирования секулярно растущих петлевых поправок.

В **главе 2** обсуждается простейший пример нестационарной квантовой теории поля — система N связанных квантовомеханических осцилляторов с одинаковой частотой, изменяющейся во времени по некоторому закону, и $O(N)$ -симметричным квартичным взаимодействием. Поскольку данная система может служить “игрушечной” моделью динамического эффекта Казимира и легких полей в пространстве де Ситтера, ее изучение помогает лучше понять динамику полей в указанных сложных ситуациях.

В **разделе 2.1** вводятся обозначения и кратко обсуждаются основные подходы, которые в дальнейшем используются в этой главе. Кроме того, в данном разделе вводится понятие среднего числа возбуждений, аналогичное среднему числу родившихся частиц в квантовых теориях более высокой размерности, а также обсуждается связь среднего числа и энергии возбуждений.

В **разделе 2.2** система связанных осцилляторов обсуждается с точки зрения $(0 + 1)$ -мерной квантовой теории поля — выписываются моды, решающие уравнения движения, и вычисляются коэффициенты Боголюбова в предположении, что частота осцилляторов слабо изменяется около некоторого постоянного значения. В частности, показано, что в резонансном случае боголюбовские коэффициенты экспоненциально растут вместе с продолжительностью колебаний.

В **разделе 2.3** вычисляется эффективный гамильтониан модели в пределе малой константы связи $\lambda \rightarrow 0$, большого времени эволюции $t \rightarrow \infty$ и постоянного произведения $\lambda t = \text{const}$. Вычислены поправки к частоте и коэффициентам боголюбова, связанные с квадратичной частью члена взаимодействия. При дополнительном условии слабых отклонений от стационарности приближенно найдены проэволюционировавшая заселенность уровней, аномальное квантовое среднее и среднее число возбуждений. Рассмотрены случаи как большого числа осцилляторов ($N \gg 1$), так и одиночного осциллятора ($N = 1$).

В **разделе 2.4** результаты предыдущего раздела обобщены на произвольные отклонения от стационарности с помощью диаграммной техники Швингера — Келдыша. Вычислены лидирующие пересуммированные корреляционные функции и вершины в пределе $N \rightarrow \infty$. Кроме того, оценена сублидирующая поправка к келдышевскому пропагатору и квантовым средним, пропорциональная $1/N$. Показано, что эту поправку можно интерпретировать как $\mathcal{O}(1)$ дополнительных степеней свободы, изменяющих выражения для средней энергии и числа возбуждений системы.

В **главе 3** обсуждаются петлевые поправки в нелинейном динамическом эффекте Казимира с двумерным безмассовым скалярным полем.

В **разделе 3.1** перечисляются основные модели, которые будут рассмотрены в этой главе, и кратко обсуждаются основные результаты.

В **разделе 3.2** обсуждается физическая картина динамического эффекта Казимира со скалярным безмассовым полем. Рассмотрен вывод этого эффекта как приближенной модели электромагнитного поля на фоне релятивистского зеркала или джозефсоновского метаматериала — квантового контура со вставками сверхпроводящих интерферометров. Оценены такие физические параметры теории, как характерный масштаб энергий, на котором зеркало можно считать идеально отражающим, и характерная константа связи теории с квартичным взаимодействием. Кроме того, обсуждается, как энергия скалярного поля в резонансной полости (энергия Казимира) изменяется в нестационарном случае.

В **разделе 3.3** вычисляются двухпетлевые поправки к корреляционным функциям и квантовым средним скалярного поля на фоне резонансной полости — двух идеально отражающих зеркал. Кратко обсуждается геометрический способ построения мод и связь двухпетлевых поправок с нарушениями конформной инвариантности и закона сохранения энергии. Рассматриваются случаи одновременных и синхронизированных “сломанных” траекторий зеркал, а также случай резонансных осцилляций с деструктивной интерференцией. Во всех перечисленных случаях, исключая случай синхронизированных траекто-

рий, петлевые поправки к квантовым средним квадратично растут со временем эволюции и не сводятся к диагональному виду. Кроме того, в пределе бесконечно удаленных зеркал воспроизведен случай одиночного идеального зеркала.

В разделе 3.4 рассматривается случай одиночного полупрозрачного зеркала, смоделированного дельта-функциональным потенциалом. Обсуждается вывод мод скалярного поля на фоне такого зеркала и приближение, в котором упрощаются коэффициенты прохождения и отражения. Оцениваются петлевые поправки к квантовым средним, показывается, что эти поправки квадратично растут вместе со временем эволюции.

В разделе 3.5 петлевые поправки к корреляционным функциям суммируются в приближении слабых отклонений от стационарности, то есть при условии малой закачки энергии в систему. Рассматривается случай нелинейной резонансной полости с нелинейностями вида $\lambda\phi^4$ и $\lambda(\partial_x\phi)^4$; последний случай отвечает эффективной теории, возникающей в джозефсоновском метаматериале. С помощью метода, аналогичного методу главы 2, показывается, что лидирующие секулярно растущие петлевые поправки собираются в осциллирующую функцию, амплитуда которой сравнима с древесным вкладом, а частота определяется константой связи теории. Оценивается время, на котором петлевые поправки могут проявиться в экспериментах по проверке динамического эффекта Казимира с помощью джозефсоновского метаматериала.

В главе 4 рассматривается нестационарная теория Юкавы в $(0+1)$ и $(1+1)$ -мерном пространстве на фоне линейно растущего со временем классического скалярного поля.

В разделе 4.1 вводятся обозначения новой главы и кратко обсуждаются основные результаты.

В разделе 4.2 обсуждается $(0+1)$ -мерный случай на фоне произвольного классического скалярного поля (впрочем, в одномерном случае классические уравнения движения решает только линейно растущее во времени поле). Показывается, что скалярный ток и фермионные корреляционные функции в этом

случае тривиальны. Вычисляются бозонные корреляционные функции и доказывается, что вне зависимости от состояния теории точные корреляционные функции расщепляются на произведение одноточечных.

В разделе 4.3 рассматривается $(1 + 1)$ -мерный случай на фоне линейно растущего во времени скалярного поля. Находятся точные моды с правильным ультрафиолетовым поведением. Вычисляется скалярный ток и петлевые поправки к корреляционным функциям бозонов и фермионов. Устанавливается, что для обоих типов функций петлевые поправки отличны от нуля, однако ограничены даже для бесконечно большого времени эволюции. Это поведение петлевых поправок существенно отличает скалярное поле от сильного электрического или гравитационного поля.

В разделе 4.4 вычисляется эффективное действие теории и обсуждаются его перенормировки. Показывается, что минимум эффективного потенциала лежит в $\phi \neq 0$. С помощью результатов этого раздела выражение для скалярного тока обобщается на произвольные сильные ($\phi \gg 1$), но медленно изменяющиеся ($|\dot{\phi}| \ll \lambda\phi^2$) поля. Примечательно, что в отличие от сильных электрических и гравитационных полей, эффективное действие скалярного поля не содержит мнимой части.

В главе 5 (заключении) сформулированы основные результаты диссертации, выносимые на защиту.

Публикации автора по теме диссертации

- I. D. A. Trunin. Comments on the Adiabatic Theorem // Int. J. Mod. Phys. A **33**, no. 24, 1850140 (2018).
- II. E. T. Akhmedov, E. N. Lanina, D. A. Trunin. Quantization in background scalar fields // Phys. Rev. D **101**, 025005 (2020).
- III. E. N. Lanina, D. A. Trunin, E. T. Akhmedov. On the Decay of a Strong Scalar Field in QM and QFT // Phys. Atom. Nuclei **83**, 1660 (2020).
- IV. L. A. Akopyan, D. A. Trunin. Dynamical Casimir effect in nonlinear vibrating cavities // Phys. Rev. D **103**, 065005 (2021).
- V. D. A. Trunin. Particle creation in nonstationary large N quantum mechanics // Phys. Rev. D **104**, 045001 (2021).

Список литературы

- [1] J. S. Schwinger, “On gauge invariance and vacuum polarization,” *Phys. Rev.* **82**, 664 (1951).
- [2] S. W. Hawking, “Black hole explosions?” *Nature* **248**, 30 (1974).
- [3] S. W. Hawking, “Particle Creation by Black Holes,” *Commun. Math. Phys.* **43**, 199 (1975) [Erratum: *Commun. Math. Phys.* **46**, 206 (1976)]
- [4] S. W. Hawking, “Breakdown of Predictability in Gravitational Collapse,” *Phys. Rev. D* **14**, 2460 (1976)
- [5] W. G. Unruh, “Notes on black hole evaporation,” *Phys. Rev. D* **14**, 870 (1976).
- [6] S. A. Fulling, “Nonuniqueness of canonical field quantization in Riemannian space-time,” *Phys. Rev. D* **7**, 2850 (1973).
- [7] P. C. W. Davies, “Scalar particle production in Schwarzschild and Rindler metrics,” *J. Phys. A* **8**, 609 (1975).
- [8] G. T. Moore, “Quantum Theory of the Electromagnetic Field in a Variable-Length One-Dimensional Cavity,” *J. Math. Phys.* **11**, 2679 (1970).
- [9] P. C. W. Davies, S. A. Fulling, “Radiation from a moving mirror in two-dimensional space-time: conformal anomaly,” *Proc. Roy. Soc. Lond. A* **348**, 393 (1976).
- [10] P. C. W. Davies, S. A. Fulling, “Radiation from Moving Mirrors and from Black Holes,” *Proc. Roy. Soc. Lond. A* **356**, 237 (1977).
- [11] B. S. DeWitt, “Quantum Field Theory in Curved Space-Time,” *Phys. Rept.* **19**, 295 (1975).
- [12] J. Preskill, “Do black holes destroy information?,” [hep-th/9209058](#).

- [13] D. Harlow, “Jerusalem Lectures on Black Holes and Quantum Information,” *Rev. Mod. Phys.* **88**, 015002 (2016).
- [14] A. Almheiri, T. Hartman, J. Maldacena, E. Shaghoulian, A. Tajdini, “The entropy of Hawking radiation,” *Rev. Mod. Phys.* **93**, 35002 (2021).
- [15] N. D. Birrell, P. C. W. Davies, *Quantum Fields in Curved Space* (Cambridge, England: Cambridge University Press, 1984).
- [16] S. A. Fulling, *Aspects of Quantum Field Theory in Curved Space-Time* (Cambridge, England: Cambridge University Press, 1989).
- [17] А. А. Гриб, С. Г. Мамаев, В. М. Мостепаненко, *Квантовые эффекты в интенсивных внешних полях* (М.: Атомиздат, 1988); А. А. Гриб, С. Г. Мамаев, В. М. Мостепаненко, *Вакуумные квантовые эффекты в сильных полях* (М.: Энергоатомиздат, 1988).
- [18] D. Krotov, A. M. Polyakov, “Infrared Sensitivity of Unstable Vacua,” *Nucl. Phys. B* **849**, 410 (2011).
- [19] A. M. Polyakov, “Infrared instability of the de Sitter space,” arXiv:1209.4135.
- [20] E. T. Akhmedov, “Curved space equilibration versus flat space thermalization: A short review,” *Mod. Phys. Lett. A* **36**, 2130020 (2021).
- [21] E. T. Akhmedov, “Lecture notes on interacting quantum fields in de Sitter space,” *Int. J. Mod. Phys. D* **23**, 1430001 (2014).
- [22] E. T. Akhmedov, “IR divergences and kinetic equation in de Sitter space. Poincare patch: Principal series,” *J. High Energy Phys.* **01** (2012) 66.
- [23] E. T. Akhmedov, P. Burda, “Solution of the Dyson–Schwinger equation on de Sitter background in IR limit,” *Phys. Rev. D* **86**, 044031 (2012).

- [24] E. T. Akhmedov, “Physical meaning and consequences of the loop infrared divergences in global de Sitter space,” *Phys. Rev. D* **87**, 044049 (2013).
- [25] 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).
- [26] E. T. Akhmedov, F. Bascone, “Quantum heating as an alternative of reheating,” *Phys. Rev. D* **97**, no.4, 045013 (2018).
- [27] E. T. Akhmedov, U. Moschella, K. E. Pavlenko, F. K. Popov, “Infrared dynamics of massive scalars from the complementary series in de Sitter space,” *Phys. Rev. D* **96**, no. 2, 025002 (2017).
- [28] E. T. Akhmedov, U. Moschella, F. K. Popov, “Characters of different secular effects in various patches of de Sitter space,” *Phys. Rev. D* **99**, no. 8, 086009 (2019).
- [29] E. T. Akhmedov, E. T. Musaev, “Comments on QED with background electric fields,” *New J. Phys.* **11**, 103048 (2009).
- [30] E. T. Akhmedov, N. Astrakhantsev, F. K. Popov, “Secularly growing loop corrections in strong electric fields,” *J. High Energy Phys.* **09** (2014) 71.
- [31] E. T. Akhmedov, F. K. Popov, “A few more comments on secularly growing loop corrections in strong electric fields,” *J. High Energy Phys.* **09** (2015) 85.
- [32] E. T. Akhmedov, H. Godazgar, F. K. Popov, “Hawking radiation and secularly growing loop corrections,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 2, 024029 (2016).
- [33] R. Parentani, J. Serreau, “Physical momentum representation of scalar field correlators in de Sitter space,” *Phys. Rev. D* **87**, 045020 (2013).
- [34] F. Gautier, J. Serreau, “Infrared dynamics in de Sitter space from Schwinger-Dyson equations,” *Phys. Lett. B* **727**, 541 (2013).

- [35] F. Gautier, J. Serreau, “Scalar field correlator in de Sitter space at next-to-leading order in a $1/N$ expansion,” *Phys. Rev. D* **92**, no.10, 105035 (2015).
- [36] D. López Nacir, F. D. Mazzitelli, L. G. Trombetta, “Long distance behavior of $O(N)$ -model correlators in de Sitter space and the resummation of secular terms,” *J. High Energy Phys.* **10** (2018) 16.
- [37] E. T. Akhmedov, S. O. Alexeev, “Dynamical Casimir effect and loop corrections,” *Phys. Rev. D* **96**, no. 6, 065001 (2017); S. Alexeev, “Secularly growing loop corrections to the dynamical Casimir effect,” arXiv:1707.02838.
- [38] P. D. Nation, J. R. Johansson, M. P. Blencowe, F. Nori, “Stimulating Uncertainty: Amplifying the Quantum Vacuum with Superconducting Circuits,” *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1 (2012).
- [39] J. R. Johansson, G. Johansson, C. M. Wilson, F. Nori, “Dynamical Casimir Effect in a Superconducting Coplanar Waveguide,” *Phys. Rev. Lett.* **103**, 147003 (2009).
- [40] J. R. Johansson, G. Johansson, C. M. Wilson, F. Nori, “Dynamical Casimir effect in superconducting microwave circuits,” *Phys. Rev. A* **82**, no. 5, 052509 (2010).
- [41] C. M. Wilson, G. Johansson, A. Pourkabirian, M. Simoen, J. R. Johansson, T. Duty, F. Nori, P. Delsing, “Observation of the dynamical Casimir effect in a superconducting circuit,” *Nature* **479**, 376 (2011).
- [42] P. Lähteenmäki, G. S. Paraoanu, J. Hassel, P. J. Hakonen, “Dynamical Casimir effect in a Josephson metamaterial,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **110**, 4234 (2013).
- [43] A. Lambrecht, M. T. Jaekel, S. Reynaud, “Motion induced radiation from a vibrating cavity,” *Phys. Rev. Lett.* **77**, 615 (1996).

- [44] C. K. Law, “Effective Hamiltonian for the radiation in a cavity with a moving mirror and a time-varying dielectric medium,” *Phys. Rev. A* **49**, 433 (1994).
- [45] C. K. Law, “Interaction between a moving mirror and radiation pressure: A Hamiltonian formulation,” *Phys. Rev. A* **51**, 2537 (1995).
- [46] D. A. R. Dalvit, F. D. Mazzitelli, “Renormalization group approach to the dynamical Casimir effect,” *Phys. Rev. A* **57**, 2113 (1998).
- [47] D. A. R. Dalvit, F. D. Mazzitelli, “Creation of photons in an oscillating cavity with two moving mirrors,” *Phys. Rev. A* **59**, 3049 (1999).
- [48] V. V. Dodonov, A. B. Klimov, D. E. Nikonov, “Quantum phenomena in nonstationary media,” *Phys. Rev. A* **47**, 4422 (1993).
- [49] V. V. Dodonov, A. B. Klimov, “Generation and detection of photons in a cavity with a resonantly oscillating boundary,” *Phys. Rev. A* **53**, 2664 (1996).
- [50] V. V. Dodonov, V. I. Man’ko, V. N. Rudenko, “Efficiency of a gravitational detector with interference of quantum states,” *Pis’ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **36**, 53 (1982) [*JETP Lett.* **36**, 63 (1982)].
- [51] V. V. Dodonov, O. V. Man’ko, V. I. Man’ko, “Quantum nonstationary oscillator: Models and applications,” *J. Russ. Laser Res.* **16**, 1 (1995).
- [52] I. M. de Sousa, A. V. Dodonov, “Microscopic toy model for the cavity dynamical Casimir effect,” *J. Phys. A* **48**, no.24, 245302 (2015).
- [53] V. V. Dodonov, “Fifty Years of the Dynamical Casimir Effect,” *Physics* **2**, no. 1, 67 (2020).

Трунин Дмитрий Алексеевич

Нестационарные квантовые системы с некинетическим поведением петлевых поправок

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж ____ экз.

Типография _____