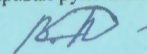


На правах рукописи



Абакумова Виктория Александровна

**КАЛИБРОВОЧНЫЕ ТЕОРИИ С ВЫСШИМИ ПРОИЗВОДНЫМИ
И НЕСВОБОДНО-ПОРОЖДЕННЫМИ СИММЕТРИЯМИ**

1.3.3. Теоретическая физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Ляхович Семен Леонидович

Официальные оппоненты:

Барвинский Андрей Олегович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, лаборатория теории фундаментальных взаимодействий, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник

Кетов Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, Токийский Столичный Университет (Tokyo Metropolitan University), лаборатория теоретической физики высоких энергий, ассоциированный профессор

Мастеров Иван Викторович, кандидат физико-математических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение математики и информатики, доцент

Защита состоится 26 октября 2023 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.3.01», созданного на базе физического факультета и Сибирского физико-технического института имени академика В. Д. Кузнецова федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (главный корпус СФТИ ТГУ, аудитория 211).

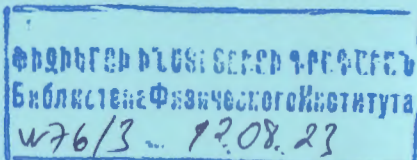
С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/e6a0ac15-b626-4b1e-80d7-d9bc94576ec5>

Автореферат разослан « 14 » июля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Панченко Елена Юрьевна



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Калибровочные теории составляют основу современной теоретической физики высоких энергий, а также играют важную роль во многих областях математической физики. Общий формализм калибровочных теорий хорошо разработан [1] и применим для систематического решения различных задач квантовой теории поля, включая квантование калибровочных систем, а также построение совместных взаимодействий, однако он имеет ограничения на класс допустимых моделей. Данная диссертация посвящена обобщению этого формализма на случай двух классов калибровочных теорий поля, а именно теорий с высшими производными и теорий с несвободно-порождённой калибровочной симметрией.

Теории с высшими производными, лагранжианы которых содержат вторые и более высокие производные полей по времени, составляют важный класс моделей современной теоретической физики. Расширения с высшими производными известны для широкого класса моделей физики высоких энергий, включая электродинамику Подольского, теорию Янга-Миллса, конформные и другие модифицированные теории гравитации. Во многих случаях, теории с высшими производными обладают более широкой симметрией и лучшими свойствами сходимости как на классическом, так и на квантовом уровне по сравнению с их аналогами без высших производных. Также включение высших производных обсуждается как один из возможных путей к построению перенормируемой квантовой теории гравитации.

Известная трудность теорий с высшими производными состоит в неустойчивости их динамики, проявляющейся при построении канонического гамильтонова формализма [2], в котором все высшие производные полей рассматриваются как новые независимые переменные. Как известно, если лагранжиан теории содержит высшие производные, соответствующий гамильтониан представляет собой, вообще говоря, неограниченную функцию переменных фазового пространства. На квантовом уровне неустойчивость проявляется в наличии духовых полюсов в пропагаторе и приводит к неограниченному снизу спектру энергии. Проблема устойчивости наиболее актуальна на уровне взаимодействий. В частности, в нелинейной теории могут возникать коллапсирующие траектории, даже если соответствующая свободная теория является устойчивой, по причине отсутствия ограниченной сохраняющейся величины на взаимодействующем уровне. В случае калибровочных теорий с высшими производными допустимые взаимодействия ограничены как условием устойчивости, так и требованием калибровочной инвариантности.

Теории с несвободно-порождённой калибровочной симметрией характеризуются тем, что их калибровочные параметры не являются произвольными функциями пространства-времени, а подчинены системе дифференциальных уравнений. Отличительной чертой рассматриваемого класса моделей является существование функций пополнения, зависящих от полей и их производных, которые обращаются в нуль на уравнениях движения, но при этом не являются их дифференциальными следствиями [3]. Связи на калибровочные параметры и функции пополнения представляют собой существенные компоненты калибровочной алгебры, вклад которых должен учитываться при квантовании теории,

а также её деформации при включении взаимодействий. Однако, общий формализм калибровочных теорий, включая БРСТ/БВ/БФВ-методы, не учитывает существование данных структур. Наиболее известным примером несвободно-порождённой калибровочной симметрии является диффеоморфизм, сохраняющий объём в модели унимодулярной гравитации. Также к примерам теорий с несвободно-порождённой калибровочной симметрией относятся различные аналоги линеаризованной унимодулярной гравитации для полей высших спинов [4, 5], калибровочные параметры которых ограничены условием бездивергентности.

Дуальные формулировки, представляющие собой различные теоретико-полевые реализации неприводимого представления одной и той же массы и спина, в настоящее время широко изучаются. Одним из возможных способов построения дуальных формулировок являются преобразования тензорных полей путём дуализации Ходжа по различным подмножествам индексов в калибровке светового конуса с последующим восстановлением соответствующих тензоров в d измерениях. Таким образом, например, получаются альтернативные описания неприводимого представления безмассового спина 2 в терминах тензоров третьего ранга с симметрией, описываемой диаграммой Юнга типа «крюк», которые однако совместны только в пространстве размерности $d \geq 5$. Другой возможный способ построения дуальных формулировок состоит в том, что дуальные поля могут быть связаны друг с другом дифференциальными соотношениями типа напряжённостей и их потенциалов, которые необратимы на локальном уровне даже при фиксации калибровки. Например, известно дуальное описание линеаризованной гравитации в терминах тензора Фирца с симметрией типа «крюк» [6], который можно рассматривать как напряжённость поля с метрикой в качестве его потенциала. Существует дуальное описание гравитации в терминах тензора Ланцоша [7], представляющего собой тензор третьего ранга с симметрией типа «крюк», рассматриваемый как потенциал для тензора Вейля. Также существует формулировка гравитации в виде теории поля в плоском пространстве-времени с числом измерений больше четырёх, функцию вложения которой можно рассматривать в качестве потенциала для метрики. Теория Редже-Тейтельбойма, вообще говоря, не эквивалентна общей теории относительности, так как допускает и другие решения, помимо эйнштейновских. Однако позднее стали известны модификации этой модели, эквивалентные общей теории относительности Эйнштейна после частичной фиксации калибровки либо при переопределении метрики [8].

Несмотря на то, что по определению все дуальные формулировки эквивалентны на классическом уровне, их деформации, в том числе при включении взаимодействия в свободную теорию, необязательно эквивалентны. Так, например, минимальное электромагнитное взаимодействие дираковских спинов с векторным потенциалом электромагнитного поля не может быть локально переформулировано в терминах напряжённости поля, подчинённого уравнениям Максвелла. Наборы безмассовых полей спина 1 не допускают взаимодействия Янга Миллса, если они описываются в терминах тензоров напряжённости, а не потенциалов. Также известно, что дуальное описание безмассового спина 2 [9] не допускает включения совместных взаимодействий [10]. Можно также упомянуть киральную формулировку для полей высших спинов [11], допускающую

другие вершины взаимодействия по сравнению с описаниями в термных симметричных тензорах. Таким образом, интерес к изучению дуальных формулировок во многом обусловлен тем, что их неэквивалентность на взаимодействующем уровне открывает возможности для нахождения ранее неизвестных вершин взаимодействия.

Степень разработанности темы исследования. Устойчивость динамики с высшими производными изучалась на протяжении нескольких десятилетий. В частности, было показано, что устойчивость некоторых теорий с высшими производными может быть связана с ограниченностью канонической энергии вследствие наличия сильных связей второго рода как, например, в моделях $f(R)$ -гравитации. В работе [12] было продемонстрировано, что широкий класс теорий с высшими производными допускает альтернативные ограниченные сохраняющиеся величины, стабилизирующие динамику. Наличие в теории энергии, отличной от канонической, предполагает существование альтернативной гамильтоновой формулировки, что означает мультигамильтоновость теории. Процедура построения альтернативных гамильтоновых формулировок заключается в выборе наиболее общего закона сохранения в качестве гамильтониана теории и нахождении соответствующих скобок Пуассона. Таким образом, теория является устойчивой, если она допускает ограниченный интеграл движения. Отметим, что рассматриваемые ранее на предмет мультигамильтоновости теории, например, в работах [13, 14] относились к классу механических. Таким образом, несмотря на то, что предпринимались попытки преодоления проблемы устойчивости в конкретных (механических) моделях, её общего и систематического решения до сих пор не было предложено. Что касается устойчивости взаимодействий в различных конкретных моделях, в работах [12, 15] были разработаны методы включения взаимодействий, применимые к теориям с высшими производными, устойчивым на свободном уровне. Согласно методу собственной деформации [15], деформация сохраняющихся величин, связанных с симметриями лагранжева якоря, концепция которого была впервые предложена в работе [16] для БРСТ-квантования необязательно лагранжевой динамики, позволяет согласованно включать взаимодействия, причём если лагранжев якорь связывает симметрию с ограниченной сохраняющейся величиной, система при включении взаимодействия остаётся устойчивой. В данной диссертации предлагается более простая схема включения взаимодействий, не обращающаяся явным образом к концепции лагранжева якоря.

Несмотря на то, что конкретные модели с несвободно-порождённой калибровочной симметрией известны в течение продолжительного времени, общая теория для данного класса калибровочных систем начала развиваться относительно недавно. В работе [3] описана общая структура несвободно-порождённой калибровочной симметрии в лагранжевом формализме и разработано обобщение метода Фаддеева-Попова, учитывающее связи на калибровочные параметры. В работе [17] для рассматриваемого класса систем построен БВ-БРСТ формализм. Однако то, как несвободно-порождённая калибровочная симметрия проявляется на гамильтоновом уровне по-прежнему оставалось неясным. Даже в столь хорошо изученной конкретной модели, как унимодулярная гравитация, не было известно, каким образом уравнения на калибровочные параметры могут быть объяснены с точки зрения алгебры гамильтоновых связей.

Идея о включении дополнительных полей в действие с целью получения калибровочно-инвариантной теории, эквивалентной исходной, впервые предложенная Штюкельбергом в работе [18] по-прежнему остаётся актуальной. Так, например, широко применяется так называемый «трюк Штюкельберга», заключающийся в разделении действия на калибровочно-инвариантную и неинвариантную части, которое однако является произвольным. На идее Штюкельберга также основан метод конверсии связей первого рода в связи второго рода в гамильтоновом формализме [19], который, в отличие от «трюка Штюкельберга», представляет собой систематическую процедуру. В работе [20] была предложена систематическая итеративная процедура включения полей Штюкельберга в лагранжевом формализме, которая исходит из пополнения системы лагранжевых уравнений всеми возможными следствиями более низких порядков, т. е. построения инволютивного замыкания. Инволютивное замыкание может содержать также следствия более высокого порядка, которые, вообще говоря, могут быть приводимыми. В случае пополнения исходных лагранжевых уравнений приводимыми следствиями, метод включения полей Штюкельберга [20] нуждается в модификации. Представляет интерес тот факт, что включение полей Штюкельберга в приводимом случае может служить инструментом для построения дуальных формулировок рассматриваемых теорий, так как при определённых условиях все физические степени свободы могут быть представлены полями Штюкельберга, в то время как исходные поля могут быть полностью откалиброваны. Получаемые таким образом дуальные формулировки не будут иметь ограничений на размерность пространства-времени.

Цели и задачи исследования. Целью диссертации является разработка новых методов исследования калибровочных теорий с высшими производными и несвободно-порождёнными симметриями.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. разработка процедуры нахождения законов сохранения, неканонически связанных с симметриями системы, а также общих методов построения устойчивых взаимодействий в теориях поля с высшими производными;
2. нахождение законов сохранения и построение мультигамильтоновой формулировки расширенной теории Черна-Саймонса с высшими производными;
3. нахождение с помощью предложенных методов новых устойчивых вершин взаимодействия в расширенной теории Черна-Саймонса с заряженным скалярным полем с высшими производными;
4. разработка гамильтонова формализма со связями, а также соответствующего гамильтонова БВФ-БРСТ формализма, учитывающих особенности несвободно-порождённой калибровочной алгебры;
5. нахождение связи между несвободно-порождённой калибровочной симметрией и альтернативной формой приводимой калибровочной симметрии без связей на калибровочные параметры;
6. исследование несвободно-порождённой калибровочной симметрии гамильтоновыми методами в конкретных моделях;
7. разработка метода включения полей Штюкельберга в теориях с приводимой калибровочной симметрией;

8. разработка процедуры построения дуальных формулировок с высшими производными в терминах потенциалов исходных полей, а также нахождения соответствующего действия Штюкельберга;
9. построение с помощью предложенных методов дуальных формулировок массивных полей спина 1 и 2, а также безмассового спина 2.

Научная новизна. Все основные результаты диссертации являются новыми и получены впервые. Так, например, впервые продемонстрирована мультигамильтоновость ряда полевых теорий с высшими производными. Также была разработана общая процедура включения устойчивых взаимодействий между двумя теориями с высшими производными, одна из которых является калибровочной. Найдены новые вершины взаимодействий в расширенной теории Черна-Саймонса с заряженным скалярным полем с высшими производными, совместные с требованиями устойчивости, в том числе и на гамильтоновом уровне. Был разработан гамильтонов формализм со связями для систем общего вида с несвободно-порождённой калибровочной симметрией, в том числе были впервые получены общие гамильтоновы правила построения как калибровочных преобразований, так и уравнений, ограничивающих калибровочные параметры. Также было разработано обобщение гамильтонова БВФ-БРСТ формализма с учётом особенностей несвободно-порождённой калибровочной алгебры. Впервые установлена связь между несвободно-порождённой калибровочной симметрией и альтернативной ей приводимой симметрией более высокого порядка с точки зрения гамильтонова формализма со связями, а также связь между соответствующими этим двум формам калибровочной симметрии БРСТ комплексами. Получены ранее неизвестные аналоги космологической постоянной в теориях безмассовых полей высших спинов, а также предложена систематическая процедура получения данных глобальных сохраняющихся величин исходя из уравнений на калибровочные параметры. Также общая итеративная процедура включения полей Штюкельберга впервые обобщена на случай приводимой калибровочной симметрии. С помощью предложенного в работе метода построения дуальных формулировок получены неизвестные ранее дуализации массивных представлений спина 1 и 2, а также безмассового спина 2.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты диссертации представляют интерес для специалистов в области квантовой теории поля и математической физики. Теоретическая значимость результатов обусловлена тем, что разработанные в диссертации методы для исследования теорий с высшими производными и несвободно-порождёнными симметриями, а также построения нового типа дуальных формулировок с высшими производными либо не имеют альтернативы, либо дают преимущества по сравнению с ранее использовавшимися подходами.

Практическая значимость обусловлена применением предложенных методов для ряда актуальных теорий поля с высшими производными и несвободно-порождёнными симметриями. Также были построены ранее неизвестные дуальные формулировки для полей различных спинов, совместные в пространстве любой размерности и перспективные с точки зрения включения взаимодействий. Результаты, полученные в работе, являются общими и впоследствии могут быть применены к широкому классу физически значимых

теоретико-полевых моделей.

Методология и методы исследования. В ходе работы над диссертацией был разработан комплекс новых ковариантных и гамильтоновых методов исследования структуры калибровочной алгебры, в том числе позволяющих находить вершины, контролировать совместность и устойчивость взаимодействий в теориях с высшими производными. Также в работе общий формализм калибровочных теорий обобщается на случай систем с несвободно-порождённой калибровочной симметрией. Построение нового типа дуальных формулировок с высшими производными связано с использованием общей ковариантной процедуры включения полей Штюкельберга, опирающейся на метод инволютивного замыкания системы полевых уравнений.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

1. Процедура построения устойчивых взаимодействий в теории с высшими производными двух полей, волновые операторы которых представляют собой полиномы от некоторого другого дифференциального оператора первого или второго порядка.
2. Процедура построения мультигамильтоновых формулировок для теорий поля с высшими производными. Устойчивость теорий с высшими производными в гамильтоновом формализме, связанная с наличием ограниченного представителя семейства гамильтонианов. Построение мультигамильтоновой формулировки расширенной теории Черна-Саймонса.
3. Построение устойчивых взаимодействий в расширенной теории Черна-Саймонса с заряженным скалярным полем с высшими производными.
4. Гамильтонова формулировка со связями любого конечного поколения для теорий поля общего вида с несвободно-порождённой калибровочной симметрией, в том числе общая гамильтонова процедура получения дифференциальных уравнений, ограничивающих калибровочные параметры. Обобщение гамильтонового БФВ-БРСТ формализма для теорий поля с несвободно-порождённой калибровочной симметрией.
5. Систематический способ получения глобальных сохраняющихся величин, значения которых определяются асимптотиками полей и их производных, исходя из уравнений связей на калибровочные параметры. Построение аналогов космологической постоянной, являющейся простейшим примером глобальной сохраняющейся величины, для безмассовых полей высших спинов с несвободно-порождённой калибровочной симметрией.
6. Связь несвободно-порождённой калибровочной симметрии с альтернативным описанием той же системы в терминах приводимой симметрии с параметрами, не ограниченными связями, с точки зрения гамильтонова формализма, а также связь между соответствующими БРСТ комплексами, неэквивалентность которых обусловлена различным статусом глобальных сохраняющихся величин по отношению к различным вариантам БРСТ симметрии.
7. Общая ковариантная процедура включения полей Штюкельберга с приводимой калибровочной симметрией, опирающаяся на метод инволютивного замыкания системы полевых уравнений.

8. Метод построения дуальных формулировок в терминах потенциалов исходных полей для свободных теорий поля, инволютивное замыкание которых содержит топологическую подсистему. Систематическая процедура построения порождающего действия, содержащего как исходные поля, так и их потенциалы, из которого различные дуальные формулировки получаются соответствующей фиксацией калибровки.
9. Дуальные описания с высшими производными для массивных полей спина 1 и 2, а также для безмассового спина 2.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов обеспечивается их внутренней самосогласованностью, совпадением в частных случаях с уже известными результатами, а также применением современных методов исследования калибровочных теорий поля.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации докладывались на 24-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВКНСФ-24) (г. Томск, 2018 г.), международной летней школе по теоретической физике JOINT FAR/ANSEF-ICTP and RDP-VW summer school in theoretical physics (г. Ереван, Армения, 2018 г.), международной школе Trans-Siberian School on High Energy Physics (г. Томск, 2019 г.), международной конференции The XXIII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2019) (г. Дубна, 2019 г.), международной конференции The XXIV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2020) (г. Дубна, 2020 г.), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов 2020» (г. Москва, 2020 г.), международной конференции The XXV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2021) (г. Алматы, Казахстан, 2021 г.), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2022» (г. Москва, 2022 г.), Московской международной школе физики MISP 2022 (г. Дубна, 2022 г.), VII Всероссийском молодёжном научном форуме «Наука будущего наука молодых» (г. Новосибирск, 2022 г.), международной конференции The XXVI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2022) (г. Дубна, 2022 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 14 статей в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (из них 8 статей в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Science, 3 статьи в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science, 1 статья в переводной версии российского научного журнала, входящей в Web of Science), 3 статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Объём диссертации составляет 139 страниц. Список литературы включает 170 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится общая характеристика диссертационной работы: актуальность темы исследования, степень её разработанности, цели и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, методология и методы исследования.

В первой главе рассматривается проблема устойчивости теорий с высшими производными, волновые операторы которых представляют собой полиномы конечного порядка от некоторого другого самосопряжённого оператора первого или второго порядка.

В разделе 1.1 разрабатывается процедура нахождения законов сохранения, неканонически связанных с симметриями системы, а также общие методы построения устойчивых взаимодействий в теориях поля с высшими производными рассматриваемого типа. Основная идея состоит в том, что имеется два набора полей, волновые операторы M и \mathcal{M} которых представляют собой полиномы от некоторых первичных операторов W и \mathcal{W} , которые предполагаются Пуанкаре-инвариантными. Первичный оператор W также предполагается калибровочно-инвариантным. Первичные теории допускают ковариантную вершину взаимодействия, совместную с требованием калибровочной инвариантности. Для свободных теорий производного типа, описываемых операторами M и \mathcal{M} , находится семейство сохраняющихся тензоров, каждый из которых связан с симметрией относительно пространственно-временных трансляций. Некоторые из представителей этого семейства могут иметь ограниченную снизу 00 компоненту, другие же, включая канонический тензор энергии-импульса, оказываются неограниченными. Задача состоит в нахождении взаимодействий между теориями производного типа, обобщающих взаимодействия между первичными моделями, таким образом, что некоторый ограниченный представитель семейства тензоров энергии-импульса свободной теории продолжает сохраняться на уровне взаимодействий. Построенные таким образом устойчивые вершины взаимодействия с необходимостью нелагранжевы.

В разделе 1.2 рассматривается расширенная теория Черна-Саймонса с высшими производными, представляющая собой класс теорий векторного поля $A = A_\mu dx^\mu$ в трёхмерном пространстве Минковского, описываемый функционалом действия

$$S[A] = \frac{1}{2} * A \wedge (m^2 \alpha_0 A + m \alpha_a * dA + \alpha_2 * d * dA + \alpha_3 m^{-1} * d * d * dA + \dots), \quad (1)$$

где $*$ – оператор Ходжа, d – дифференциал де Рама, m – постоянная с размерностью массы, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ – безразмерные постоянные вещественные параметры. Показано, что расширенная теория Черна-Саймонса n -го порядка допускает $(n-1)$ параметрическое семейство сохраняющихся величин, что в гамильтоновом формализме соответствует $(n-1)$ -параметрическому семейству гамильтонианов, то есть рассматриваемая теория является мультигамильтоновой. Наличие ограниченных законов сохранения, обеспечивающих устойчивость модели, связано с унитарностью представления группы Пуанкаре, описываемого действием (1): для унитарных представлений ограниченные законы сохранения существуют, в то время как в случае неунитарных представлений они не ограничены снизу всегда. Среди альтернативных законов сохранения могут содержаться ограниченные снизу, в то время как каноническая энергия теории не

ограничена снизу всегда. Гамильтонова формулировка со связями для теории (1) строится стандартным образом. Сначала с помощью введения дополнительных переменных, поглощающих высшие производные исходных переменных, система приводится к форме первого порядка, включающей уравнения эволюционного типа и связи. Далее в качестве гамильтониана рассматриваемой теории выбирается сумма её наиболее общей ограниченной сохраняющейся величины и слагаемых, пропорциональных связям. Затем находятся соответствующие полученному гамильтониану невырожденные скобки Пуассона, которые однозначно восстанавливаются из вида гамильтониана с точностью до естественного произвола, связанного с наличием калибровочной симметрии. Симплектическая форма, ассоциированная с найденными скобками Пуассона, определяет семейство действий первого порядка, приводящих к одним и тем же классическим уравнениям движения. Устойчивость расширенной теории Черна-Саймонса в гамильтоновом формализме связана с наличием ограниченного представителя семейства гамильтонианов.

В разделе 1.3 найдены новые устойчивые взаимодействия в расширенной теории Черна-Саймонса с заряженным скалярным полем, первичными операторами которых являются оператор Черна-Саймонса $*d$ и оператор Д'Аламбера, соответственно, как в лагранжевом, так и в гамильтоновом формализме.

Вторая глава посвящена разработке гамильтоновых методов исследования теорий с несвободно-порождённой калибровочной симметрией, калибровочные параметры которых не являются произвольными функциями пространственно-временных координат, а подчинены дифференциальным уравнениям,

$$\delta_\epsilon \phi^i = \Gamma^i_\alpha(\phi) \epsilon^\alpha, \quad \delta_\epsilon S(\phi) = 0 \Leftrightarrow \Gamma^\alpha_\alpha \epsilon^\alpha = 0. \quad (2)$$

В разделе 2.1 рассматриваются основные особенности лагранжевого описания несвободно-порождённой калибровочной алгебры, необходимые для дальнейшего построения её гамильтонова аналога. Несвободно-порождённая калибровочная симметрия (2) порождается модифицированными тождествами Нётер,

$$\partial_i S(\phi) \Gamma^i_\alpha(\phi) + \tau_\alpha(\phi) \Gamma^\alpha_\alpha(\phi) = 0, \quad (3)$$

которые содержат кроме исходных лагранжевых уравнений $\partial_i S(\phi) = 0$ и калибровочных генераторов $\Gamma^i_\alpha(\phi)$ два дополнительных ингредиента: операторы связей на калибровочные параметры $\Gamma^\alpha_\alpha(\phi)$, представляющие собой дифференциальные операторы с конечномерным ядром, $u_\alpha \Gamma^\alpha_\alpha = 0$ а также функции пополнения

$$\mathcal{T}_\alpha(\phi, \Lambda) \equiv \tau_\alpha(\phi) - u_\alpha(\Lambda) \equiv 0, \quad u_\alpha(\Lambda) = \Lambda_{\mathcal{T}} u^{\mathcal{T}}_\alpha, \quad (4)$$

которые не сводятся к линейной комбинации лагранжевых уравнений и содержат модулярные параметры $\Lambda_{\mathcal{T}}$. Функции пополнения и их дифференциальные следствия могут быть разрешены относительно модулярных параметров $\Lambda_{\mathcal{T}} = J_{\mathcal{T}}(\phi)$, так что существуют так называемые глобальные сохраняющиеся величины $J_{\mathcal{T}}$, конкретные значения которых определяются асимптотиками полей и их производных.

В разделе 2.2 приводится систематическое гамильтоново описание несвободно-порождённой калибровочной симметрии общего вида, допускающее связи произвольного конечного поколения. Ключевую роль в нахождении несвободно-порождённой калибровочной симметрии некоторого функционала действия играет нахождение

модифицированных тождеств Нётер (3). Как только тождества найдены, коэффициенты при уравнениях соответствуют калибровочным генераторам, в то время как операторы Γ^a_α определяют уравнения на калибровочные параметры. Гамильтоново действие, благодаря его канонической структуре, очень удобно для получения модифицированных тождеств с помощью применения алгоритма Дирака-Бергманна для нахождения связей в предположении, что в системе имеются только связи первого рода. Как известно, в локальной теории поля алгоритм Дирака-Бергманна должен обрываться за конечное количество итераций. Завершение алгоритма соответствует модифицированному тождеству Нётер (3). Роль функций пополнения играют вторичные связи всех поколений, которые содержат модулярные параметры, которые определяются асимптотиками полей и могут явно зависеть от пространственно-временных координат x . Таким образом, явная зависимость от времени связей высших порядков может возникать даже в случае, если исходное действие трансляционно-инвариантно.

В разделе 2.3 предлагается обобщение гамильтонова БФВ-БРСТ формализма на случай несвободно-порождённой калибровочной симметрии, специфика которого состоит в том, что, во-первых, неминимальный сектор асимметричен по отношению к минимальному, в отличие от стандартного БФВ формализма, а во-вторых, вторичные связи, являющиеся частью БРСТ генератора, могут явно зависеть от времени, даже если исходное действие явно от времени не зависит.

В разделе 2.4 изучается связь между несвободно-порождённой калибровочной симметрией (2) и альтернативной ей формой приводимой калибровочной симметрии, параметры которой не ограничены связями,

$$\Gamma^a_\alpha(\phi)c^\alpha = 0 \Leftrightarrow \exists \rho^a_\alpha(\phi) : c^\alpha = \rho^a_\alpha(\phi)\varepsilon^A, \quad \forall \varepsilon^A. \quad (5)$$

Так, в подразделе 2.4.1 показано, что модифицированные тождества Нётер (3) могут быть приведены к тождествам Нётер

$$\partial_i S(\phi) R^i_A(\phi) \equiv 0, \quad R^i_A(\phi) = \Gamma^i_\alpha(\phi) \rho^a_\alpha(\phi), \quad (6)$$

которые в общем случае приводимы и содержат производные более высокого порядка по времени, и продемонстрировано, что функционал действия, инвариантный относительно преобразований несвободно-порождённой калибровочной симметрии (2), инвариантен также относительно приводимой калибровочной симметрии более высокого порядка,

$$\delta_\varepsilon \phi^i = R^i_A(\phi) \varepsilon^A, \quad \delta_\varepsilon S(\phi) \equiv 0, \quad \forall \varepsilon^A. \quad (7)$$

Подраздел 2.4.2 посвящён нахождению связи между двумя рассматриваемыми формами калибровочной симметрии с точки зрения гамильтонова формализма со связями. Чтобы получить приводимые калибровочные преобразования, необходимо рассмотреть набор вторичных связей, представляющих собой дифференциальные следствия первичных, в отличие от зависящих от модулярных параметров неприводимых связей, соответствующих несвободно-порождённой калибровочной симметрии. Вследствие второй теоремы Нётер, порядок производных по времени калибровочных параметров в преобразованиях приводимой калибровочной симметрии совпадает с порядком соответствующих тождеств Нётер.

Как приводимой, так и несвободно-порождённой калибровочной симметрии, описывающим одну и ту же систему, соответствуют БРСТ комплексы, связь между

которыми является предметом изучения в подразделе 2.4.3. Для систем, в которых отсутствуют третичные связи, а структурные функции представляют собой постоянные, продемонстрировано, что эти БРСТ комплексы связаны между собой в общем случае нелокальным каноническим преобразованием с локальной порождающей функцией. Показано, что рассматриваемые БРСТ комплексы неэквивалентны, что обусловлено различным статусом глобальных сохраняющихся величин по отношению к различным вариантам БРСТ симметрии. С точки зрения БРСТ комплекса, соответствующего несвободно-порождённой калибровочной симметрии, независимые вторичные связи, являющиеся гамильтоновым аналогом функций пополнения, представляют собой тривиальные величины и не являются физическими наблюдаемыми. Глобальные сохраняющиеся величины, задаваемые на уравнениях движения модулярными параметрами, БРСТ тривиальны и для них невозможны ни квантовые флуктуации, ни квантовые переходы. Таким образом, этот комплекс лучше подходит для изучения динамики с фиксированными модулярными параметрами. Тривиальными величинами с точки зрения БРСТ комплекса, основанного на приводимой калибровочной симметрии, являются приводимые вторичные связи. Этот комплекс лучше подходит для рассмотрения не фиксированных модулярных параметров, классическая динамика которых не сводится к поверхности глобальных сохраняющихся величин. В этом случае принципиально возможна постановка вопроса о спектре глобальных сохраняющихся величин, их квантовых флуктуаций и переходов. Выбор между этими двумя неэквивалентными БРСТ комплексами зависит от физической интерпретации и не может быть мотивирован формальными преимуществами или недостатками какого-либо из этих двух формализмов, так как они оба являются самосогласованными.

В разделе 2.5 общий формализм, разработанный в предыдущих разделах, проиллюстрирован на примере модели линеаризованной унимодулярной гравитации и максвеллоподобной теории симметричного тензорного поля. Также в этом разделе была рассмотрена калибровочная теория поля бесследового безмассового спина s , для которой, в частности, было продемонстрировано, что длина последовательности связей линейно растёт с увеличением спина, количество модулярных параметров также возрастает с увеличением s .

В третьей главе рассматривается процедура построения нового типа дуальных формулировок с высшими производными в терминах потенциалов исходных полей.

В разделе 3.1 рассматривается общая итеративная процедура включения полей Штюкельберга в случае приводимой калибровочной симметрии, основанная на инволютивном замыкании системы полевых уравнений, под которым понимается пополнение исходных лагранжевых уравнений $\partial_i S(\phi) = 0$ всеми возможными их следствиями более низких порядков $\tau_\alpha(\phi) = 0$. Пополнение исходной системы следствиями более высоких порядков не нарушает инволютивности. Приводимая симметрия Штюкельберга соответствует наличию инволютивного замыкания приводимых следствий и для неё, в отличие от неприводимого случая, отсутствует связь между полями Штюкельберга и калибровочными параметрами. Даже если исходное действие не обладает калибровочной симметрией, инволютивное замыкание

$$\partial_i S(\phi) = 0, \quad \tau_\alpha(\phi) = 0, \quad (8)$$

представляющее собой нелагранжеву систему, имеет нетривиальную калибровочную алгебру. Основная идея включения полей Штюкельберга состоит в том, чтобы придать этой калибровочной алгебре лагранжеву форму с помощью введения дополнительных полей. Поля Штюкельберга ξ^α вводятся таким образом, чтобы лагранжевы уравнения Штюкельберга в нулевом порядке по полям Штюкельберга воспроизводили рассматриваемую инволютивную систему, а соответствующие тождества Нётер – тождества между уравнениями, входящими в инволютивное замыкание. Таким образом определяется нулевой порядок по полям Штюкельберга генераторов калибровочной симметрии и первый порядок действия Штюкельберга. Второй порядок по ξ в действии Штюкельберга и первый порядок по ξ в калибровочных преобразованиях может быть найден из тождеств Нётер в первом порядке по ξ с использованием известных выражений предыдущего порядка. Таким образом, все порядки по полям Штюкельберга в действии и калибровочных генераторах могут быть найдены с помощью описанной итеративной процедуры.

В разделе 3.2 приводится общая схема построения дуальных формулировок для линейных теорий, инволютивное замыкание которых содержит топологическую подсистему, не имеющую физических степеней свободы. В качестве примеров топологических подсистем можно упомянуть уравнение Нордстрёма в теории гравитации Эйнштейна. Уравнения, описывающие массивный спин два в терминах симметричного тензора $h^{\mu\nu}$, допускают дифференциальные следствия $\partial_\nu h^{\mu\nu} = 0$, также представляющие собой топологическую подсистему. Предлагается систематический способ нахождения полной калибровочной симметрии топологической подсистемы, которая в общем случае оказывается приводимой. На свободном уровне общее решение топологической подсистемы представляет собой чистую калибровку,

$$\phi^i = \rho^i_A \omega^A, \quad (9)$$

где ϕ^i – исходные поля, ρ^i_A – калибровочные генераторы, являющиеся локальными дифференциальными операторами, ω^A – калибровочные параметры. Подстановка этого общего решения в остальные уравнения инволютивно-замкнутой системы, не приводит к потере или добавлению какой-либо информации о её динамике. Получающаяся таким образом система уравнений на поля ω^A , по построению, эквивалентна исходной системе уравнений. Поля ω^A могут рассматриваться в качестве потенциалов полей ϕ^i , уравнения на ω^A дуальны исходной системе уравнений движения. Дуальные уравнения в общем случае нелагранжевы.

В разделе 3.3 для полученных дуальных формулировок строится действие Штюкельберга, содержащее как исходные поля, так и их потенциалы. Процедура построения этого порождающего действия исходит из инволютивного замыкания исходной системы лагранжевых уравнений, в которое помимо следствий τ_α , составляющих топологическую подсистему, вводятся также дополнительные следствия T_A , получающиеся калибровочной вариацией исходного действия по отношению к калибровочным преобразованиям топологической подсистемы. Поля Штюкельберга вводятся ко всем следствиям, содержащимся в инволютивном замыкании

$$\partial_i S(\phi) = 0, \quad \tau_\alpha(\phi) = 0, \quad T_A(\phi) = 0. \quad (10)$$

Потенциалы ω^A исходных полей ϕ^i возникают в качестве полей Штюкельберга, ассоциированных с дополнительными следствиями T_A . Калибровочная симметрия порождающей теории может быть зафиксирована различными способами. Так, например, можно наложить калибровочные условия, исключающие все калибровочные поля и воспроизводящие исходную теорию. Альтернативный набор калибровочных условий исключает ϕ^i , а также поля Штюкельберга к следствиям τ_α , составляющим топологическую подсистему, и воспроизводит дуальную теорию в терминах потенциалов ω^A .

В разделе 3.4 с помощью предложенных процедур дуализации построены ранее неизвестные описания массивных полей спина 1 и 2, а также безмассового спина 2, на примере которых также продемонстрировано, что различные представления одной и той же массы и спина могут быть получены из единого действия Штюкельберга соответствующей фиксацией калибровки.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Предложена процедура построения устойчивых взаимодействий в теории с высшими производными двух полей, волновые операторы которых представляют собой полиномы от некоторого другого дифференциального оператора первого или второго порядка. Показано, что устойчивые взаимодействия в теориях рассматриваемого типа с необходимостью нелагранжевы.
2. Мультигамильтоновость полевых теорий с высшими производными продемонстрирована на примере расширенной теории Черна-Саймонса. Показано, что устойчивость теорий с высшими производными в гамильтоновом формализме связана с наличием ограниченного представителя семейства гамильтонианов.
3. Построены вершины взаимодействия расширенной теории Черна-Саймонса с заряженным скалярным полем с высшими производными. Найден диапазон значений постоянных взаимодействия, обеспечивающий устойчивость нелинейной теории.
4. Построена гамильтонова формулировка со связями любого конечного поколения для теорий поля общего вида с несвободно-порождённой калибровочной симметрией. Предложена общая гамильтонова процедура получения дифференциальных уравнений, ограничивающих калибровочные параметры. Разработано обобщение гамильтонового БФВ-ВРСТ формализма для теорий поля с несвободно-порождённой калибровочной симметрией.
5. В теориях с несвободно-порождённой калибровочной симметрией предложен систематический способ получения глобальных сохраняющихся величин, значения которых определяются асимптотиками полей и их производных, исходя из уравнений связей на калибровочные параметры. Найден аналог космологической постоянной, являющейся простейшим примером глобальной сохраняющейся величины, для безмассовых полей высших спинов с несвободно-порождённой калибровочной симметрией.
6. Установлена связь несвободно-порождённой калибровочной симметрии с альтернативным описанием той же системы в терминах приводимой симметрии с параметрами, не ограниченными связями, с точки зрения гамильтонова формализма. Показано, что неэквивалентность соответствующих двум этим формам симметрии

БРСТ комплексов обусловлена различным статусом глобальных сохраняющихся величин по отношению к различным вариантам БРСТ симметрии. Выбор подходящего описания осуществляется в зависимости от физической постановки задачи.

7. Развита общая итеративная ковариантная процедура включения полей Штюкельберга с приводимой калибровочной симметрией, опирающаяся на метод инволютивного замыкания системы полевых уравнений, представляющая собой ковариантный аналог гамильтонового метода конверсии связей второго рода в связи первого рода.
8. Предложен метод построения дуальных формулировок в терминах потенциалов исходных полей для свободных теорий поля, инволютивное замыкание которых содержит топологическую подсистему. Предложена систематическая процедура построения порождающего действия, содержащего как исходные поля, так и их потенциалы, основанная на методе включения полей Штюкельберга с приводимой калибровочной симметрией. Получаемое действие Штюкельберга позволяет переключаться между дуальными формулировками наложением соответствующих калибровочных условий, исключающих из уравнений движения либо поля, либо их потенциалы.
9. С помощью предложенных процедур дуализации показано, что массивный спин 1 может быть описан антисимметричным тензором второго ранга, массивный спин 2 тензором четвёртого ранга с симметрией, описываемой диаграммой Юнга типа «окно», безмассовый спин 2 – тензором третьего ранга с симметрией типа «крюк». Несмотря на то, что полученные дуальные уравнения содержат высшие производные, описываемые ими теории устойчивы, так как допускают ограниченные законы сохранения.

Дальнейшие исследования могут быть посвящены построению дуальных формулировок нелинейных теорий. Так как метод включения полей Штюкельберга применим и в нелинейном случае, полученные с его помощью дуализации перспективны с точки зрения изучения проблем взаимодействия полей различных спинов.

В приложении приводится формула для ковариантного подсчёта числа степеней свободы, используемая в работе для проверки полученных результатов, в частности корректности предложенных дуальных формулировок.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору Ляховичу Семену Леонидовичу за постановку задач и помощь в создании этой работы, Капарулину Дмитрию Сергеевичу, Каратаевой Инне Юрьевне и Шарапову Алексею Анатольевичу за помощь в работе и плодотворные обсуждения, а также всем сотрудникам кафедр квантовой теории поля и теоретической физики ТГУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Henneaux M. Quantization of gauge systems / M. Henneaux, C. Teitelboim. – Princeton University Press, 1992. – 520 p.
2. Gitman D. M. Hamilton formulation of a theory with high derivatives / D. M. Gitman, S. L. Lyakhovich, I. V. Tyutin // Soviet Physics Journal. – 1983. – Vol. 26. – P. 730–734.
3. Kaparulin D. S. A note on unfree gauge symmetry / D. S. Kaparulin, S. L. Lyakhovich // Nuclear Physics B. – 2019. – Vol. 947. – P. 114735.
4. Skvortsov E. D. Transverse invariant higher spin fields / E. D. Skvortsov, M. A. Vasiliev // Physics Letters B. – 2008. – Vol. 664, is. 4–5. – P. 301–306.
5. Campoleoni A. Maxwell-like Lagrangians for higher spins / A. Campoleoni, D. Francia // Journal of High Energy Physics. – 2013. – Vol. 03. – P. 168.
6. Tóth G. Z. Energy-momentum tensor and duality symmetry of linearized gravity in the Fierz formalism // Classical and Quantum Gravity. – 2022. – Vol. 39. – P. 075003.
7. Lanczos C. Lagrangian multiplier and Riemannian spaces // Reviews of Modern Physics. – 1949. Vol. 21, is. 3. P. 497–502.
8. Пастон С. А. Каноническая формулировка вложенной теории гравитации, эквивалентная общей теории относительности Эйнштейна / С. А. Пастон, В. А. Франке // Теоретическая и математическая физика. – 2007. – Т. 153, № 2. – С. 271–288.
9. Curtright T. Generalized gauge fields // Physics Letters B. – 1985. – Vol. 165, is. 4–6. – P. 304–308.
10. Bekaert X. Consistent deformations of dual formulations of linearized gravity: A No go result / X. Bekaert, N. Boulanger, M. Henneaux // Physical Review D. – 2003. – Vol. 67, is. 4. – P. 044010.
11. Krasnov K. Actions for self-dual Higher Spin Gravities / K. Krasnov, E. Skvortsov, T. Tran // Journal of High Energy Physics. – 2021. – Vol. 08. – P. 076.
12. Kaparulin D. S. Classical and quantum stability of higher-derivative dynamics / D. S. Kaparulin, S. L. Lyakhovich, A. A. Sharapov // European Physical Journal C. – 2014. – Vol. 74, is. 10. – P. 3072.
13. Bolonek K. Hamiltonian structures for Pais-Uhlenbeck oscillator / K. Bolonek, P. Kosinski // Acta Physica Polonica B. – 2005. – Vol. 36. – P. 2115.
14. Masterov I. An alternative Hamiltonian formulation for the Pais-Uhlenbeck oscillator // Nuclear Physics B. – 2016. – Vol. 902. – P. 95–114.
15. Kaparulin D. S. Stable interactions via proper deformations / D. S. Kaparulin, S. L. Lyakhovich, A. A. Sharapov // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. – 2016. – Vol. 49, № 15. – P. 155204.
16. Kazinski P. O. Lagrange structure and quantization / P. O. Kazinski, S. L. Lyakhovich, A. A. Sharapov // Journal of High Energy Physics. – 2005. – Vol. 07. – P. 076.
17. Kaparulin D. S. Unfree gauge symmetry in the BV formalism / D. S. Kaparulin, S. L. Lyakhovich // European Physical Journal C. – 2019. – Vol. 79, is. 8. – P. 718.

18. Stueckelberg E. C. G. Interaction energy in electrodynamics and in the field theory of nuclear forces // *Helvetica Physica Acta*. – 1938. – Vol. 11. – P. 225–244.
19. Batalin I. A. Operator quantization of dynamical systems with irreducible first and second class constraints / I. A. Batalin, E. S. Fradkin // *Physics Letters B*. 1980. Vol. 180, is. 1–2. – P. 157–162.
20. Lyakhovich S. L. General method for including Stueckelberg fields // *European Physical Journal C*. 2021. Vol. 81, is. 5. P. 472.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

- 1*. **Абакумова В. А.** Ограниченный гамильтониан в расширенной теории Черна-Саймонса четвертого порядка / В. А. Абакумова, Д. С. Капарулин, С. Л. Ляхович // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2017. Т. 60, № 12. С. 40–47. 0.48/0.16 а.л.
в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:
Abakumova V. A. Bounded Hamiltonian in the fourth-order extension of the Chern-Simons theory / V. A. Abakumova, D. S. Kaparulin, S. L. Lyakhovich // *Russian Physics Journal*. 2018. Vol. 60, № 12. P. 2095–2104. DOI: 10.1007/s11182-018-1331-8.
- 2*. **Абакумова В. А.** Multi-Hamiltonian formulations and stability of higher-derivative extensions of 3d Chern-Simons / V. A. Abakumova, D. S. Kaparulin, S. L. Lyakhovich // *European Physical Journal C*. – 2018. – Vol. 78, is. 2. – Article number 115. – 12 p. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-018-5601-y> (access date: 17.05.2023). – DOI: 10.1140/epjc/s10052-018-5601-y. – 0.73/0.24 а.л. (*Web of Science*).
- 3*. **Абакумова В. А.** Устойчивые взаимодействия между расширенной теорией Черна-Саймонса и заряженным скалярным полем: гамильтонов формализм / В. А. Абакумова, Д. С. Капарулин, С. Л. Ляхович // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2019. Т. 62, № 1. С. 13–21. 0.55/0.18 а.л.
в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:
Abakumova V. A. Stable interactions between the extended Chern-Simons theory and a charged scalar field with higher derivatives: Hamiltonian formalism / V. A. Abakumova, D. S. Kaparulin, S. L. Lyakhovich // *Russian Physics Journal*. – 2019. – Vol. 62, № 1. – P. 12–22. DOI: 10.1007/s11182-019-01677-0.
- 4*. **Абакумова В. А.** Stable interactions in higher derivative field theories of derived type / V. A. Abakumova, D. S. Kaparulin, S. L. Lyakhovich // *Physical Review D*. – 2019. – Vol. 99, is. 4. – Article number 045020. – 15 p. – URL: <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.99.045020> (access date: 17.05.2023). – DOI: 10.1103/PhysRevD.99.045020. – 0.91/0.3 а.л. (*Web of Science*).

- 5*. **Абакумова В. А.** Unfree gauge symmetry in Hamiltonian formalism / V. A. Abakumova, I. Yu. Karataeva, S. L. Lyakhovich // *Physics Letters B*. – 2020. – Vol. 802. – Article number 135208. – 7 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269320300125?via%3Dihub> (access date: 17.05.2023). – DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135208. – 0.42/0.14 а.л. (*Web of Science*).
- 6*. **Абакумова В. А.** Hamiltonian constraints and unfree gauge symmetry / V. A. Abakumova, S. L. Lyakhovich // *Physical Review D*. – 2020. – Vol. 102, is. 12. – Article number 125003. – 16 p. – URL: <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.102.125003> (access date: 17.05.2023). – DOI: 10.1103/PhysRevD.102.125003. – 0.97/0.48 а.л. (*Web of Science*).
- 7*. **Абакумова В. А.** Гамильтонов формализм со связями для теорий поля с несвободно-порождённой калибровочной симметрией общего вида / В. А. Абакумова, С. Л. Ляхович // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*. – 2021. – № 1. – Номер статьи 2111503. – 5 с. – URL: <http://uzmu.phys.msu.ru/abstract/2021/1/2111503> (дата обращения: 17.05.2023). – 0.3/0.15 а.л.
- 8*. **Абакумова В. А.** Reducible Stueckelberg symmetry and dualities / V. A. Abakumova, S. L. Lyakhovich // *Physics Letters B*. – 2021. – Vol. 820. – Article number 136552. – 6 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269321004925?via%3Dihub> (access date: 17.05.2023). – DOI: 10.1016/j.physletb.2021.136552. – 0.36/0.18 а.л. (*Web of Science*).
- 9*. **Абакумова В. А.** Reducible gauge symmetry versus unfree gauge symmetry in Hamiltonian formalism / V. A. Abakumova, I. Yu. Karataeva, S. L. Lyakhovich // *Nuclear Physics B*. – 2021. – Vol. 973. – Article number 115577. – 30 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0550321321002741?via%3Dihub> (access date: 17.05.2023). – DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2021.115577. – 1.82/0.61 а.л. (*Web of Science*).
- 10*. **Абакумова В. А.** Дуальные формулировки в теориях с приводимой симметрией Штюкельберга / В. А. Абакумова, С. Л. Ляхович // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*. – 2022. – № 4. – Номер статьи 2241506. – 5 с. – URL: <http://uzmu.phys.msu.ru/abstract/2022/4/2241506> (дата обращения: 17.05.2023). – 0.3/0.15 а.л.
- 11*. **Абакумова В.** Gauge symmetry of linearised Nordström gravity and the dual spin two field theory / V. Abakumova, D. Frolovsky, H.-C. Herbig, S. Lyakhovich // *European Physical Journal C*. – 2022. – Vol. 82, is. 9. – Article number 780. – 10 p. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-022-10734-x> (access date: 17.05.2023). – DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10734-x. – 0.6/0.15 а.л. (*Web of Science*).
- 12*. **Абакумова В.** Global conserved quantities and unfree gauge symmetry / V. Abakumova, S. Lyakhovich // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. – 2022. – Vol. 19, № 5. – P. 451–453. – DOI: 10.1134/S1547477122050028. – 0.18/0.09 а.л. (*Scopus*).
- 13*. **Абакумова В. А.** Дуальная формулировка теории безмассового спина два / В. А. Абакумова, С. Л. Ляхович // *Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук*. – 2023. – Т. 50, № 3. – С. 48–52. –

0.3/0.15 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Abakumova V. A. Dual formulation for the massless spin two theory / V. A. Abakumova, S. L. Lyakhovich // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute.* – 2023. – Vol. 50, № 3. – P. 108–110. – DOI: 10.3103/S1068335623030028.

14*. **Abakumova V. A.** Dualisation of free fields / V. A. Abakumova, S. L. Lyakhovich // *Annals of Physics.* – 2023. – Vol. 453. – Article number 169322. – 21 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003491623001082?via%3Dihub> (access date: 17.05.2023). DOI: 10.1016/j.aop.2023.169322. 1.27/0.64 а.л. (*Web of Science*).

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus:

15*. **Abakumova V. A.** Conservation laws and stability of higher derivative extended Chern-Simons / V. A. Abakumova, D. S. Kaparulin, S. L. Lyakhovich // *Journal of Physics: Conference Series.* 2019. Vol. 1337: Trans-Siberian School on High Energy Physics. Tomsk, Russia, April 01–05, 2019. – Article number 012001. – 7 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1337/1/012001> (access date: 17.05.2023). – DOI: 10.1088/1742-6596/1337/1/012001. – 0.42/0.14 а.л.

16*. **Abakumova V. A.** Stable interactions between higher derivative extended Chern-Simons and charged scalar field / V. A. Abakumova, D. S. Kaparulin, S. L. Lyakhovich // *AIP Conference Proceedings.* 2019. Vol. 2163, is. 1: The XXIII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2019). Dubna, Russia, April 15–19, 2019. – Article number 090001. – 5 p. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2163/1/090001/770368/Stable-interactions-between-higher-derivative> (access date: 17.05.2023). – DOI: 10.1063/1.5130123. – 0.3/0.1 а.л.

17*. **Abakumova V. A.** Hamiltonian BFV-BRST quantization for the systems with unfree gauge symmetry / V. A. Abakumova, S. L. Lyakhovich // *AIP Conference Proceedings.* 2021. Vol. 2377, is. 1: The XXIV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2020). Almaty, Kazakhstan, November 09–13, 2020. – Article number 090001. – 5 p. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2377/1/090001/658132/Hamiltonian-BFV-BRST-quantization-for-the-systems> (access date: 17.05.2023). – DOI: 10.1063/5.0063632. – 0.3/0.15 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.

Отпечатано на участке цифровой печати

Издательства Томского государственного университета

Заказ № 7528 от «11» июля 2023 г. Тираж 100 экз.

г. Томск Московский тр.8, тел. 53-15-28, publish.tsu.ru