

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Федорука Сергея Алексеевича на диссертацию Ушакова Кирилла Александровича на тему «Анализ мультичастичных обобщений теорий высших спинов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.3 — «Теоретическая физика».

В диссертации К. А. Ушакова исследуются актуальные задачи активно развивающейся в настоящее время теории высших спинов. При этом особое внимание в работе уделяется детальному изучению свойств модулей мультичастичного расширения теории высших спинов с группой Кокстера B_2 .

В рамках современной математической и теоретической физики теории высших спинов исследуют взаимодействия полей с любым спином и соответствующие им расширенные калибровочные симметрии. Исследования в этой области во многом мотивированы поиском фундаментальных подходов к квантовой гравитации, а также изучением взаимосвязей с теориями струн и M -теорией. Наличие этой взаимосвязи объясняется чертой, общей для обеих теорий — как высших спинов, так и струн, — которая заключается в бесконечном числе физических состояний в их спектрах. Однако существует и принципиальное различие: в большинстве моделей высших спинов все физические поля безмассовые, тогда как в струнных теориях с натяжением большинство полей описывает массивные состояния. Естественная гипотеза о связи между этими фундаментальными теориями состоит в том, что струнные теории представляют собой определенные фазы со спонтанно нарушенной симметрией в рамках моделей высших спинов. Одним из возможных инструментов реализации такого механизма в теории высших спинов является многочастичное расширение уравнений Васильева, основанное на универсальной обертывающей алгебре высших спинов и алгебрах Чередника, ассоциированных с конечными группами Кокстера. Такое расширение включает более широкий набор полей и содержит дополнительные константы связи, необходимые для реализации механизма возникновения массивных состояний при нарушении симметрии. Поэтому особое значение имеет понимание структуры таких расширенных теорий высших спинов, спектра возникающих полей и динамического содержания соответствующих развернутых уравнений. Изучению этих **важных и актуальных** вопросов посвящена рассматриваемая диссертационная работа.

В диссертации К. А. Ушакова представлены исследования в двух взаимодействующих направлениях. Первое состоит в анализе развернутых систем стандартной теории высших спинов и ее кокстеровского расширения, ассоциированного с группой B_2 . Второе связано с подробным исследованием представлений состояний в данном мультичастичном расширении. Такой анализ необходим для того, чтобы определить, в какой мере расширения Кокстера можно рассматривать как содержательные обобщения стандартной теории высших спинов, в частности в четырехмерном пространстве-времени. Поэтому тема диссертации является **актуальной** и соответствует современным направлениям исследований в теоретической физике. Это дополняет **важность и актуальность исследований**, выполненных в диссертации.

Диссертационная работа К. А. Ушакова состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Полный объем работы составляет 165 страниц. Диссертация не содержит таблиц и рисунков; список литературы включает 151 наименование.

Во введении представлена актуальность диссертационного исследования, рассмотрен обзор работ по теме диссертации и указаны цель и задачи исследования. В этом разделе также сформулирована научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, а также используемые в работе методы и понятия.

В главе 1 проведен анализ развернутых систем для симметричных безмассовых полей в пространствах Минковского произвольной размерности и четырехмерном пространстве анти-де Ситтера. Основными инструментами в диссертационном исследовании являются когомологии оператора σ_- . В этой главе дано альтернативное доказательство Первой теоремы о массовой оболочке, устанавливающей эквивалентность развернутой формулировки теории высших спинов и теории (Фанга)-Фронсдала.

Глава 2 посвящена исследованию структуры и групповых свойств модулей в теории высших спинов, расширенной конечной группой Кокстера. Здесь введен способ разделения модулей на распутываемые и запутанные. Для произвольной конечной группы Кокстера сформулирован и доказан необходимый и достаточный критерий распутываемости в классе линейных преобразований осцилляторов, позволяющий определить тип представления по матрицам отражений, ассоциированным с каждым полем.

Подробно рассматривается модель, связанная с группой B_2 . Соответствующие представления реализуются в терминах модулей Фока и классифицируются по наличию комплексно-эквивалентного унитарного модуля старшего или младшего веса. Для запутанных модулей показано, что, несмотря на от-

существование унитарного комплексно-эквивалентного модуля младшего или старшего веса, существует нелокальное преобразование, сводящее определяющее модуль уравнение к уравнению на тензорный квадрат стандартного твистованно-присоединенного модуля высших спинов, обладающего унитарным комплексно-эквивалентным модулем. Также предложен механизм редукции к унитарному подсектору линеаризованной теории.

В главе 3 с помощью техники кохомологий σ_- исследуется динамическое содержание B_2 -теории, а именно содержание развернутых уравнений для поля один-формы со значениями в тензорном квадрате стандартного присоединенного модуля и для поля ноль-формы со значениями в тензорном произведении твистованно-присоединенного и присоединенного модулей. Существенную роль в анализе играет алгебра Хау $\mathfrak{sl}(2) \oplus \mathfrak{sl}(2)$, коммутирующая с алгеброй анти-де Ситтера $\mathfrak{so}(3, 2)$.

Показано, что сектор один-форм содержит бесконечное число копий симметричных безмассовых полей спина $s \geq 1$ и частично-безмассовых полей всех допустимых глубин, организованных в неприводимые бесконечномерные представления $\mathfrak{sl}(2) \oplus \mathfrak{sl}(2)$. Для случая поля ноль-формы найдено динамическое содержание развернутых уравнений и обнаружена более сложная представленческая структура пространства полей относительно алгебры $\mathfrak{sl}(2) \oplus \mathfrak{sl}(2)$. Отдельно анализируется линейная вершина, связывающая секторы один-форм и ноль-форм. На примерах полей младших спинов показано, что ее динамическое содержание зависит от веса поля один-формы относительно одной из двух компонент алгебры $\mathfrak{sl}(2) \oplus \mathfrak{sl}(2)$. Указано, что в унитарно-редуцированной системе все частично-безмассовые поля являются нединамическими.

В заключении систематизированы полученные результаты и сформулированы перспективы дальнейших исследований. В приложениях представлены детали вычислений, используемых в тексте диссертации, и приведено описание соглашений и обозначений.

Автореферат полно и корректно отражает содержание диссертации.

Научные положения и выводы, сделанные в диссертации, сформулированы четко и понятно. Автор продемонстрировал высокий уровень математической культуры при получении результатов, выносимых на защиту. В диссертации используются общие положения и принципы теоретической физики и многократно проверенные в научной литературе методы квантовой теории поля. Результаты диссертации были опубликованы в высокорейтинговых журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, что предполагает тщательную процедуру рецензирования ведущими специалистами в данной тематике. Полученные результаты неоднократно докладывались на научных семинарах, российских и

международных конференциях и в частных случаях совпадают с результатами других авторов. Таким образом, **обоснованность и достоверность** положений и выводов диссертации не вызывает сомнений.

В диссертации получен ряд важных **новых результатов**. А именно, через фоковскую реализацию, автоморфизмы и преобразования Боголюбова впервые систематически исследованы свойства модулей кокстеровски-расширенной теории высших спинов и с использованием σ -когомологического анализа проведено детальное рассмотрение динамического содержания найденных развернутых уравнений, ранее не рассматривавшихся в литературе. Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований по реализации спонтанного нарушения симметрии в теории высших спинов и установлению связи моделей высших спинов со струнными теориями. В частности, рассмотренная в диссертации переформулировка B_2 -системы в терминах удвоенного набора набора осцилляторов и модулей Фока должна быть полезна при изучении других развернутых систем.

Методы, разработанные при решении задач диссертации, и полученные результаты несомненно найдут использование в исследованиях, проводимых в Физическом институте им. П. Н. Лебедева, Объединенном институте ядерных исследований, Институте физики высоких энергий им. А. А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт», Институте ядерных исследований РАН, а также в других российских научных организациях, что подтверждает **научную и практическую ценность** диссертации.

При общей высокой оценке диссертационной работы стоит отметить следующие **замечания**:

1. В разделе 1.4 проанализированы σ -когомологии и проведено когомологическое доказательство эквивалентности развернутой формулировки теории высших спинов и теории (Фанга)-Фронсдала с использованием коммутирующих спинорных переменных в пространстве AdS_4 . Было бы полезно провести аналогичное рассмотрение для четырехмерного плоского пространства Минковского, что обогатило бы содержание диссертации.
2. Было бы интересным получить описание $su(2, 2)$ -модулей, широко используемых в главе 2, с помощью твисторов, на которых $SU(2, 2)$ -симметрия реализована линейными преобразованиями.

Вместе с тем, указанные замечания не снижают научное значение полученных результатов. Их можно рассматривать как пожелания для дальнейшей работы.

На основании изложенного считаю, что диссертация Ушакова Кирилла Александровича «Анализ мультичастичных обобщений теорий высших спинов» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена научная задача, имеющая значение для развития теоретической и математической физики, содержит новые научные результаты и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Ушаков Кирилл Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.3 — «Теоретическая физика».

Официальный оппонент:

Федорук Сергей Алексеевич,
доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.02 - теоретическая физика,
начальник сектора Суперсимметрии
Научного отдела Современной математической физики
Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова
Международной межправительственной организации
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)
Адрес: 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6
тел.: 8-496-216-57-48
e-mail: fedoruk@theor.jinr.ru

«21» сентября 2026 г.

С. А. Федорук

Подпись сотрудника ЛТФ ОИЯИ Федорука С.А. заверяю:
Ученый секретарь ЛТФ

А. В. Андреев

Список основных работ Федорука С. А. по тематике защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Krykhtin V. A. On BRST Lagrangian description of partially massless bosonic fields // European Physical Journal C. — 2026. — Vol. 86, no. 5. — P. 544.
2. Buchbinder I. L., Fedoruk S. A. Continuous spin superparticle in 4D, $N=1$ curved superspace // Nuclear Physics B. — 2025. — Vol. 1019. — P. 117135.
3. Buchbinder I. L., Fedoruk S. A. Continuous spin superparticle model // Physics Letters B. — 2025. — Vol. 868. — P. 139810.
4. Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Krykhtin V. A. On BRST Lagrangian formulation for massive higher-spin fields in 4D Minkowski space // Natural Science Review. — 2025. — Vol. 2, no. 3. — P. 100301.
5. Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Podoinitsyn M. A. On the realization of infinite (continuous) spin field representations in AdS_4 space // Physics Letters B. — 2025. — Vol. 861. — P. 139226.
6. Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Krykhtin V. A. On BRST Lagrangian formulation of massless higher spin fields // Russian Physics Journal. — 2024. — Vol. 67, no. 11. — P. 1806–1818.
7. Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Krykhtin V. A. BRST construction for infinite spin field on AdS_4 // European Physical Journal Plus. — 2024. — Vol. 139, no. 7. — P. 621.
8. Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Krykhtin V. A. Infinite (continuous) spin particle in constant curvature space // Physics Letters B. — 2024. — Vol. 853. — P. 138689.
9. Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Krykhtin V. A. Lagrangian formulation for free 6D infinite spin field // Nuclear Physics B. — 2023. — Vol. 996. — P. 116365.
10. Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P. Light-front description of infinite spin fields in six-dimensional Minkowski space // European Physical Journal C. — 2022. — Vol. 82, no. 8. — P. 733.
11. Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Krykhtin V. A. On the off-shell superfield Lagrangian formulation of 4D, $N=1$ supersymmetric infinite spin theory // Physics Letters B. — 2022. — Vol. 829. — P. 137139.