«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Физического института
им. П.Н. Лебедева РАН
член-корреспондент РАН, профессор,
д.ф.-м.н. _____ Н.Н. Колачевский

« 15 » мая 2024 г.

Отзыв

Ведущей организации федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук на диссертационную работу Губарева Кирилла Алексеевича «Симметрии пространства решений уравнений 11-мерной супергравитации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

Теория струн и М-теория представляют особый интерес в современной теоретической физике. Они являются перспективными кандидатами на построение стройной квантовой теории гравитации и единого описания всех известных фундаментальных взаимодействий. Более того теория струн и М-теория широко применяются в качестве инструмента для исследования в различных областях физики и математики. Так например с их помощью исследуются пространства (супер)конформных квантовых теорий в рамках голографического соответствия, также они открывают новый взгляд на интегрируемость в двумерных и трехмерных системах, позволяют находить инварианты многообразий и инварианты узлов. При решении большинства обозначенных выше задач исключительно полезным оказываются использование симметрий теории струн и М-теории, в частности суперсимметрии и различных дуальностей (T, S и U). Отдельное место здесь занимают так называемые расширенные теории поля (двойная и исключительная), позволяющие сделать скрытые T- и U-дуальности явными. Эти теории являются мощными инструментами для описания объектов М-теории и теории струн, исследования пространства вакуумов этих теорий, исследования потоковых компактификаций. Работы, посвященные теории струн и М-теории, расширенным теориям поля и их приложениям, активно публикуются в международных научных журналах и являются актуальными и активно развивающимися

направлениями современной теоретической физики. Задачи рассматриваемые в диссертации К.А. Губарева и представленные результаты полностью соответствуют тенденциям развития этих фундаментальных направлений.

Диссертационная работа К.А. Губарева посвящена исследованию пространства вакуумов М-теории. В работе развивается потоковая формулировка для ковариантного подхода исключительной теории, а также выводятся её тождества Бьянки, которые позволяют наиболее полно проклассифицировать объекты М-теории. В рамках исключительной теории поля предлагается метод построения поливекторных деформаций решений супергравитации, которые тесно связаны со свойствами интегрируемости двумерных и трехмерных сигма-моделей, что представляет новый взгляд на исследование последних. Также приведенный гравитационные деформации представляют особый интерес с точки зрения голографического соответствия, так как дуальны добавлению операторов и вакуумных средних на стороне дуальных квантовых теорий поля. Наконец развитый формализм построения деформаций в рамках расширенных теорий поля позволяет получать обобщение 10-мерной и 11-мерной супергравитации, первая из которых обеспечивает каппа-инвариантность суперструны Грина–Шварца, а вторая предположительно должна обеспечивать каппа-инвариантность супермембраны Грина–Шварца.

Диссертация К.А. Губарева состоит из Введения, четырёх глав, Заключения и списка литературы. Во Введении обоснована актуальность темы исследований, её научная новизна, описаны цели и задачи диссертационной работы, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены статьи по материалам диссертации и выступления на семинарах и конференциях, подтверждающие апробацию полученных результатов.

В первой главе обсуждаются два наиболее распространенных подхода к описанию суперструн: с суперсимметрией на мировом объеме струны (подход Рамона–Невё–Шварца), и с суперсимметрией в объемлющем пространстве (подход Грина–Шварца). В то время как для первого достаточными условиями согласованности являются уравнения 10-мерной супергравитации, гарантирующие сокращение Вейлевской аномалии, для второго подхода эти условия ослабляются до уравнений обобщенной 10-мерной супергравитации, гарантирующих каппа-инвариантность суперструны. Также существенная часть главы посвящена T- и S- дуальностям, которые являются скрытыми симметриями теории струн и супергравитации, а также рассмотрению двойной теории поля позволяющей сделать T-дуальность явной симметрией.

Вторая глава посвящена М-теории и методам описания её вакуумов. В главе формулируются основные понятия М-теории, а также приводятся действия для её фундаментальных объектов – М2- и М5-бран. Необходимая для них каппа-инвариантность гарантируется выполнением уравнений 11-мерной супергравитации. Отмечается, что важную роль при исследовании пространства вакуумов М-теории играет использование её скрытой симметрии – U-дуальности, и исключительных теории поля, как подходов позволяющих сделать U-дуальность явной. Для исключительных теорий поля кратко приводится общий алгоритм их построения при помощи расширенного пространства, после чего этот алгоритм детально рассматривается для построения SL(5) исключительной теории поля в потоковой формулировке. Также для неё выводятся тождества Бьянки, при помощи которых проводится классификация объектов М-теории. Глава завершается кратким обзором исключительной теории поля $E_{6(6)}$.

Третья глава посвящена построению и исследованию поливекторных деформаций решений супергравитации. Для начала рассматриваются известные би-векторные деформации Янга-Бакстера решений 10-мерной супергравитации и их реализация в рамках двойной теории поля. Затем этот формализм обобщается на случай исключительных теорий поля для построения три- и шесть-векторных деформаций решений 11-мерной супергравитации. Из потоковой формулировки исключительных теорий поля выводятся достаточные условия для генерации решений 11-мерной супергравитации, которые оказываются условиями унимодулярности и обобщением классического уравнения Янга–Бакстера на три- и шесть-векторные параметры деформаций. Также в главе приведены нетривиальные примеры таких деформаций для фона $AdS_5 \times S^5$.

В четвертой главе рассматривается 10-мерная обобщенная супергравитация и аналогичное обобщение для 11-мерной супергравитации. В начале главы обсуждается что, впервые фон не решающий супергравитацию, но обеспечивающий каппа-инвариантность супермембраны был получен при исследовании деформаций $AdS_5 \times S^5$. Затем приводится общий способ построения решений обобщенной 10-мерной супергравитации, путем осуществления неунимодулярных деформаций Янга–Бакстера решений супергравитации. Предлагается метод построения обобщенных уравнений путем использования таких деформаций в потоковой формулировке двойной теории поля. Этот метод обобщается на исключительную теорию поля SL(5), и с его помощью строится обобщение уравнений 11-мерной супергравитации и примеры решений. Тем не менее исследование каппа-инвариантности супермембраны на таких решениях остается открытым вопросом.

В Заключении кратко описываются полученные результаты, положения выносимые на защиту и обозначаются наиболее интересные и перспективные направления для дальнейших исследований по теме диссертации. Результаты, полученные в работе, вносят

существенный вклад в описание и понимание структуры пространства вакуумов теории струн и М-теории. Таким образом, полученные в диссертационном исследовании результаты находят широкое применение, как в данной области теоретической физики, так и во многих других областях теоретической и математической физики.

В целом, рассматриваемая диссертация представляет собой законченную научную работу, выполненную по актуальной тематике. Результаты полученные в диссертации, представляют существенный интерес в контексте исследования пространства вакуумов М-теории. Также важно отметить, что с вычислительной стороны диссертантом использовано множество современных дифференциально-алгебраических методов исследований, а также символьных вычислений, на основе пакета Cadabra (файлы имеют публичный доступ).

Результаты работы являются новыми и находятся в полном соответствии с результатами полученными другими авторами. По материалам диссертации автором опубликовано 7 статей, в том числе в журналах первого квартиля, и в сборниках трудов конференций. Результаты исследований докладывались автором на многочисленных семинарах и конференциях. Все работы выполнены при непосредственном участии диссертанта, и его вклад в эти работы является определяющим. Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации и опубликованным статьям, и в полной мере отражает основные положения диссертации.

К оформлению работы практически нет замечаний, кроме следующих трёх: (1) аббревиатура ИДА во Введении расшифровывается только во второй части диссертации; (2) в автореферате указано, что соискатель имеет 8 статей, вместо 7 перечисленных; (3) в списке публикаций автора в диссертации последняя работа в УФН не имеет точной ссылки. Существенное замечание (скорее научный вопрос) состоит в следующем: в работе достаточно часто используется условие проекции (1.60), возникающее в рамках обобщённой геометрии и введённое другими авторами. Однако его геометрический смысл остаётся неясным. С одной стороны, оно выглядит искусственным условием ad hoc — с целью иметь возможность вернуться в 10d « физическое» пространство, а с другой стороны, похоже на условия калибровки в стандартных калибровочных теориях или на уравнения движения в частных производных, полученное варьированием «вспомогательного» поля (похожая структура имеется в гравитации Джакива-Тейтельбойма). Было бы замечательно, если бы автор диссертации уделил обсуждению этого условия проекции какое-то место в своей работе. В остальном данная диссертационная работа представляет прекрасно сбалансированный научный продукт, как содержательно, так и стилистически — помимо основного содержания диссертации можно

отметить ясную структуру диссертационной работы, наличие идейной связанности излагаемого материала, а также исчерпывающий обзор литературы.

Результаты диссертационной работы были доложены, обсуждены и одобрены на семинаре Лаборатории квантовой теории поля Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма Физического института им. П.Н. Лебедева РАН 9 февраля 2024 года.

Диссертационная работа К.А. Губарева является научной квалификационной работой и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Правительством Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Губарев Кирилл Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 - теоретическая физика.

дата 14 мая 2024 г.

подпись _____ / Алкалаев Константин Борисович

доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.02 - теоретическая физика
ведущий научный сотрудник, заместитель руководителя
Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
Москва, Ленинский проспект 53, ФИАН, ОТФ, 119991
тел.: 89037639804
e-mail: alkalaev@lpi.ru

Даю согласие на обработку моих персональных данных любым законодательно разрешенным способом.

Подпись К.Б. Алкалаева удостоверяю:

Ученый секретарь
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,
кандидат физико-математических наук А.В. Колобов

14 мая 2024 г.