

Отзыв

официального оппонента доктора физико-математических наук,
профессора Арефьевой Ирины Ярославны о диссертационной работе
Э.Т. Мусаева «Ковариантный подход к изучению дуальностей в
теории суперструн и в М-теории»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Одной из важнейших задач современной теоретической физики, связанной с физикой высоких энергий, является построение квантовой теории гравитации. Основная проблема здесь в том, что теория Эйнштейна не перенормируема в четырёхмерном пространстве времени. Одним из способов преодоления трудностей, связанных с ультрафиолетовыми расходимостями в квантовой гравитации, является введение струн и рассмотрения теории гравитации как эффективной низкоэнергетической теории струн, точнее специального сектора суперструн. В свою очередь, в теории суперструн мы сталкиваемся с проблемой построения теории ковариантной теории суперструн в произвольном вакууме (бэграунде). Такая задача связана с необходимостью компактификации струны до реалистического 4-х мерного случая, прояснение этого вопроса также необходимо для космологических применений. Можно пойти дальше и рассмотреть супермембраны — это гипотетические объекты, про которые можно предположить, что они существуют в многомерной теории, называемой М-теорией, и в низкоэнергетическом пределе приводят к супергравитации. (Супер)мембраны — это обобщение (супер)струн и они представляют собой двумерные поверхности (в отличие от одномерных струн). Как и в теории суперструн, колебания супер мембран соответствуют разным частицам, при этом при отсутствии суперсимметрии, колебания соответствуют только бозонам, а не фермионам. Хотя сама М-теория не является законченной теорией, отдельные вопросы, связанные с ее низкоэнергетическим пределом, а также конфигурации типа бран, возникающие в суперструнах, являются предметом многочисленных исследований в современной литературе. Попросту говоря, изучаются специальные конфигурации (решения) 11 мерной (и ниже) супергравитации, имеющие специальные свойства относительно суперпреобразований. В контексте этого направления и выполнена диссертационная работа Э.Т.Мусаева. Более конкретно, диссертация Э.Т.Мусаева посвящена изучению симметрий U-дуальностей в теории струн и в М-теории, а также исследованию различных бран в 11-мерной супергравитации, связанных преобразованиями дуальности, а также их размерных редукций.

Такие симметрии и соответствующие преобразования решений уравнений супергравитации представляют большой интерес для современной математической физики. С точки зрения теоретической физики, некоторые из построенных решений полезны в контексте голографического соответствия (обобщения AdS/CFT дуальности) и выступают в роли генератора новых решений, соответствующих новым квантовым теориям поля. Интересно, что при этом возникают параметрические семейства теорий, которым, возможно, в конкретных случаях удастся придать непосредственный физический смысл.

Диссертация состоит из Введения, шести глав, Заключения и списка используемой литературы.

Во Введении обоснована актуальность диссертационного исследования, научная новизна исследования, рассмотрен исторический контекст, теоретическая и практическая значимость, описана методология исследования, степень достоверности и апробация работы, перечислены основные результаты, выносимые на защиту.

Во первой главе описываются свойства производящего функционала струны в формализме RNS по отношению к преобразованиям T-дуальности, выводятся правила Бушера, задающие преобразования фоновых полей, демонстрируется инвариантность классических уравнений

движения струны, вводится понятие обобщенной метрики и обобщенного импульса для замкнутой струны на торическом фоне. Также в первой главе обсуждаются обобщенные симметрии двумерной сигма-модели: неабелевы и пуассон-лиевы T-дуальности. Обсуждается их реализация в терминах симметрий классического дубля Дринфельда.

Вторая глава посвящена U-дуальностям в M-теории. Обсуждается их реализация как симметрий $\frac{1}{2}$ BPS состояний алгебры суперсимметрии в размерности 11 и связь ее центральных зарядов с зарядами фундаментальных бран M-теории. Для низкоэнергетического приближения M-теории, 11-мерной супергравитацией, показана реализация симметрий U-дуальности в виде симметрий Крэммера-Джулиа при редукции на тор. Описывается конструкция калиброванной супергравитации, где подгруппа полной глобальной группы Крэммера-Джулиа выступает в роли группы локальной калибровочной симметрии, тензорные иерархии, приводится явный вид скалярного потенциала.

В главе три представлен построенный Э.Т. Мусаевым формализм исключительной теории поля для групп $SL(5)$, $SO(5,5)$ и E_6 , для последней представлена полностью суперсимметричная формулировка. Предложенный формализм на уровне теории поля реализует существенно струнные симметрии T- и U-дуальности. Особенностью формализма является специальным образом расширенное пространство, часть координат которого соответствует модам намоток $\frac{1}{2}$ BPS бран в случае торической редукции. При этом размерной редукции не предполагается, и формализм описывает произвольные полевые конфигурации, в том числе, негеометрические фоновые пространства, недоступные описанию в терминах стандартной супергравитации. Вводится понятие обобщенной производной Ли, задающей инфинитезимальные координатные преобразования на расширенном пространстве, и условие проекции, обеспечивающее их самосогласованность. Также в главе три строится кинетический лагранжиан для всех тензорных полей теории, действие для скалярных полей, включающее производные вдоль направлений расширенного пространства. Продемонстрировано, что определенные решения условия проекции воспроизводят действие 11-мерной супергравитации и 10-мерной супергравитации типа II.

В главе четыре построены размерные редукции типа Шерка-Шварца для расширенного пространства и для скалярного сектора исключительных теорий. Показано, что в таком случае в точности воспроизводится скалярный потенциал соответствующих максимальных калиброванных супергравитаций. Также в четвертой главе построена расширенная двойная теория поля с группой симметрии $O(8,8)$, соответствующая расширенной симметрии NS-NS сектора трехмерной супергравитации. Демонстрируется, что обобщенная редукция Шерка-Шварца такой теории воспроизводит, в частности, редукцию шестимерной AdS супергравитации на трехмерную сферу.

В пятой главе рассматриваются альтернативные решения условия проекции в приложении к описанию фоновых пространств, генерируемых $\frac{1}{2}$ BPS бранами теории струн и M-теории. Такие решения допускают зависимость от дуальных координат расширенного пространства, при этом соответствующие полевые конфигурации не являются решениями уравнений супергравитации, но решают уравнений двойной или исключительной теории поля. В стандартном подходе двумерной сигма модели такая локализация в обобщенном пространстве для 5-бран NS-сектора возникает после учета инстантонных поправок на мировом листе струны. Также в этой главе Э.Т. Мусаевым построено эффективное действие для таких бран, полностью ковариантное относительно T-дуальности и включающее кинетический член и вклад Весса-Зумино, отвечающий за взаимодействие с фоновыми полями NS-NS и R-R сектора. Для Dp-бран построено ковариантное действие Весса-Зумино. Предложена интерпретация результата как описание полной орбиты T-дуальности NS5-браны или Dp-браны как единого объекта, взаимодействующего магнитно с NS-NS калибровочным полями и с R-R полями соответственно.

Шестая глава посвящена обобщенным дуальностям М-теории. В частности в этой главе Э.Т. Мусаевы предложено обобщение неабелевой Т-дуальности для решений уравнений 11-мерной супергравитации, на которых задана структура группового многообразия. Демонстрируется, что предложенные преобразования неабелевой U-дуальности по построению генерируют решения из решений, для 5-мерных групповых многообразий найдены явные примеры. Также в этой главе обсуждаются нambu-лиевы U-дуальности 11-мерных решений, реализуемые как симметрии соответствующей исключительной алгебры Дринфельда. В частности, найдены примеры поливекторных деформаций фоновых решений, реализуемых групповыми многообразиями. Такие преобразования являются обобщением янг-бакстеровых бивекторных деформаций, которые сохраняют интегрируемость двумерной сигма-модели.

В заключении сформулированы положения, выносимые на защиту и наиболее актуальные задачи, продолжающие исследования по тематике диссертации.

Есть к работе некоторые замечания:

- 1) сам термин “ковариантная формулировка супергравитации”, используемый в диссертации, сам по себе без указания группы не имеет смысла. Обычно используемый термин включает указание конкретной группы. Например, $O(N,N)$ ковариантная формулировка и т.п.
- 2) Часть дуальных координат расширенного пространства называется модами намотки, при этом специально отмечается, что фоновое пространство не обязательно является тором или вообще содержит какие-то циклы. Это вносит некоторую путаницу.
- 3) При обсуждении возможных решений уравнения проекции остается неясным, допустимы ли полевые конфигурации, зависящие одновременно от координаты и ей дуальной. Если такие запрещены, то следовало бы это упомянуть.
- 4) В Главе 5.3.1 рассматривается NS5B-брана и перед этим упоминается, что действие для NS5A-браны содержит самодуальную 3-форму. При этом, из текста остается неясной причина, по которой не строится ковариантное действие для орбиты NS5A-браны

Эти замечания, однако, не снижают научной ценности и масштаба проделанной работы.

Работы Э.Т.Мусаева получили признание коллег, на его работы имеется около восьмисот ссылок, наибольшее признание получили работы, посвященные связи калиброванной супергравитация и редукции Шерка-Шварца, а также работы, посвященные $SL(5)$ и $SO(5,5)$ исключительным теориям поля, а также экзотическим бранам в исключительных теориях поля с группой дуальности $SL(5)$.

Положения, выносимые Э.Т.Мусаевым на защиту, являются обоснованными, новыми и актуальными и могут быть квалифицированы как научное достижение в данной области. Они неоднократно докладывались на международных конференциях и семинарах и опубликованы в рецензируемых научных журналах, в том числе, в журналах первого квартиля. Представленная диссертация является законченным научным исследованием. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Подводя итог, можно отметить, что диссертационная работа Э.Т.Мусаева «Ковариантный подход к изучению дуальностей в теории суперструн и в М-теории», удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор заслуживает

присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3-теоретическая физика.

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник
Математического института им. В.А.Стеклова РАН
доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, проф.

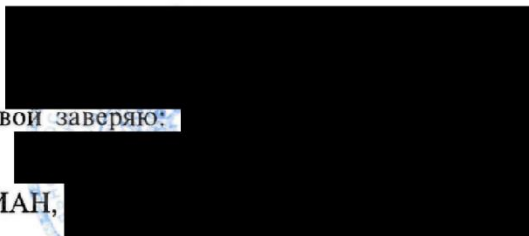
И.Я. Арефьева

28 февраля 2024г



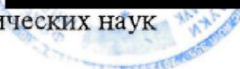
119991, г. Москва, ул. Губкина, д. 8, МИАН,
Тел. +7(495) 9848141
e-mail: arefeva@mi-ras.ru

Подпись И.Я. Арефьевой заверяю:



Ученый секретарь МИАН,

кандидат физико-математических наук С.А. Полицарпов



Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

- 1) Irina Ya. Aref'eva, Ali Hajilou, Kristina Rannu, Pavel Slepov, "Magnetic catalysis in holographic model with two types of anisotropy for heavy quarks" // Eur. Phys. J. C, Part. Fields — 2023 — 83, 1143, 28 pp.
- 2) D. S. Ageev, I. Ya. Aref'eva, A. I. Belokon, A. V. Ermakov, V. V. Pushkarev, T. A. Rusalev, "Infrared regularization and finite size dynamics of entanglement entropy in Schwarzschild black hole" // Phys. Rev. D, 108 — 2023 — 46005, 22 pp
- 3) Ageev Dmitry S., Aref'eva Irina Ya. Thermal density matrix breaks down the Page curve // Eur.Phys. J. Plus. — 2022. — Vol. 137, no. 10. — 1188 P.
- 4) Irina Ya. Aref'eva, Kristina Rannu, Pavel Slepov, Holographic anisotropic model for light quarks with confinement-deconfinement phase transition // JHEP— 2021.— No 90.
- 5) Irina Ya. Aref'eva, Kristina Rannu, Pavel Slepov, Holographic Anisotropic Model for Heavy Quarks in Anisotropic Hot Dense QGP with External Magnetic Field // JHEP— 2021. — No 161.
- 6) Irina Ya. Aref'eva, Alexander Patrushev, Pavel Slepov, Holographic entanglement entropy in anisotropic background with confinement-deconfinement phase transition // JHEP — 2020.— No 43.
- 7) Aref'eva Irina, Volovich Igor. Spontaneous symmetry breaking in fermionic random matrix model // JHEP. — 2019. — Vol. 10. — 114 P..
- 8) Irina Aref'eva et al. Replica-nondiagonal solutions in the SYK model // JHEP. — 2019. — Vol. 07. — 113 P.
- 9) Aref'eva Irina Ya., Golubtsova Anastasia A., Policastro Giuseppe. Exact holographic RG flows and the $A_1 \times A_1$ Toda chain // JHEP. — 2019. — Vol. 05. — 117 P.