

Отзыв

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Юнга Алексея Викторовича 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».

Теория струн вместе с ее непertурбативной формулировкой, М-теорией, является главным кандидатом на согласованное описание квантовой гравитации и в целом на описание физики при энергиях, сравнимых с планковской массой. Самосогласованность квантового описания предполагает, что сигма-модель, живущая на мировой поверхности струны должна быть конформно инвариантна. Это требование сводится к тому, что фоновые поля струнной сигма-модели должны удовлетворять уравнениям 10-мерной супергравитации, соответствующие решения обычно называются вакуумами струны.

Замечательным эффектом с далеко идущими следствиями оказывается то, что пространство вакуумов как теории струн, так и М-теории является сильно вырожденным: существуют преобразования фоновых полей (дуальности), которые не меняют физики и оставляют инвариантными классические уравнения движения. В качестве особенно интересных следствий можно отметить генерирование новых решений абелевыми и неабелевыми Т-дуальностями, возникающими в теориях струны на пространствах с компактными циклическими измерениями. Такие решения голографически дуальны новым калибровочным теориям. Представляет интерес также построение эффективного действия для 5-бран NS-сектора из Дирихле бран и построение некоммутативных теорий на бранах.

Диссертация Э.Т. Мусаева посвящена изучению симметрий Т- и U-дуальности в теории струн и М-теории, построению теоретико-полевого формализма, естественным образом включающего эти струнные симметрии, и его приложению к задачам размерной редукции в присутствии геометрических и негеометрических флаксов и описания динамики NS 5-бран. Таким образом, тема диссертации является актуальной и представляет интерес в контексте современных задач физики и математики.

Диссертация состоит из Введения, шести глав, Заключения и списка литературы, который содержит 271 наименование.

Во Введении обосновывается актуальность выбранной тематики, ее научная новизна, дается обзор литературы по данной тематике, теоретическая и практическая значимость работы, описываются методы исследования и перечисляются основные положения, выносимые на защиту.

В первой части диссертации, включающей две главы, вводятся основные понятия, используемые в диссертации. В первой главе описываются Т-дуальности. Для абелевой Т-

дуальности вводится понятие дуальных координат таргет пространства струнной сигма-модели, которые представляют собой множители Лагранжа, возникающие при калибровании изометрий, отвечающих циклическим направлениям. Таким образом возникает двойной набор координат, в терминах которых действие T-дуальности можно записать ковариантным образом. При этом вводится понятие обобщенной метрики и обобщенного импульса для замкнутой струны на торе, в терминах которых уравнения движения записываются в виде, ковариантном относительно группы T-дуальности. Также в этой главе описываются неабелевы дуальности, возникающие на пространствах с некоммутирующими изометриями. Более того, пуассон-лиевы дуальности можно определить даже в случае, когда законы сохранения нетеровских токов модифицируются.

Во второй главе рассматриваются симметрии U-дуальности, возникающие при унификации симметрий T- и S-дуальности, дается их интерпретация в терминах M-теории и ее низкоэнергетического приближения, 11-мерной супергравитации. Представленная диссертация в большей своей части посвящена изучению свойств решений 10- и 11-мерной супергравитации, а также фундаментальных объектов теории струн и M-теории при преобразованиях T- и U-дуальности.

В третьей главе описывается построенный Э.Т. Мусаевым ковариантный формализм исключительных теорий поля для групп $SL(5)$, $SO(5,5)$, E6. Особенностью построенных теорий является специальным образом конструируемое расширенное пространство, инфинитезимальные координатные преобразования которого задают действие локальных дуальностей. Например, T-дуальности могут быть заданы на удвоенном пространстве, включающем исходные и дуальные координаты, описывающие как импульсы, так и намотки струны. В случае U-дуальности размерность расширенного пространства становится еще больше, так как необходимо учитывать еще и намотки бран. Исключительные теории поля формулируются на таких расширенных пространствах.

Построенный формализм предоставляет теоретико-полевое описание динамики фоновых пространств теории струн и M-теории, в котором симметрии дуальности реализованы геометрическим образом. При этом, обычные абелевы U-дуальности оказываются изометриями максимально симметричных решений уравнений исключительной теории поля. Самосогласованность алгебры преобразований дуальности требует введения так называемого условия проекции, эффективно редуцирующего размерность полного пространства-времени до 11 или 10. В диссертации построены полные лагранжианы упомянутых теорий, включая кинетические слагаемые для тензорных и скалярных полей и топологическое действие типа Черна-Саймонса. Продемонстрировано, что для определенных решений условия проекции теория воспроизводит 11-мерную супергравитацию и 10-мерную супергравитацию типа IIB.

Четвертая глава посвящена построению размерных редукций исключительных теорий поля на обобщенно параллелизуемые пространства в терминах твистовых матриц Шерка-Шварца, принимающих значения в группе дуальности и зависящих от всех координат расширенного пространства. В этой главе обсуждается особенность таких редукций, состоящая в том, что самосогласованность теории требует более слабого,

алгебраического, условия, чем дифференциальное условие проекции. В диссертации показано, что обобщенные редукции Шерка-Шварца исключительных теорий поля правильно воспроизводят скалярный потенциал максимальных калиброванных супергравитаций. Показано, что все компоненты тензора погружения выражаются через твистовые матрицы и их производных. При этом, зависимость от дуальных координат оказывается существенной для воспроизводства компонент, соответствующих негеометрическим флаксам.

В пятой главе рассматривается динамика 5-бран NS-сектора, принадлежащих орбите NS5-браны, Dp-бран и орбиты KK6-монополя M-теории. В диссертации Э.Т. Мусаевым предложен метод обобщенных векторов Киллинга, задающих ориентацию браны в расширенном пространстве, и сформулирован набор условий, эквивалентных условию проекции в исключительных теориях поля. В этой главе формулируется общее ковариантное действие, описывающее 5-браны, принадлежащие орбите NS5-браны при преобразовании T-дуальности, включающее кинетическое действие и действие Весса-Зумино. Для Dp-бран построено ковариантное действие Весса-Зумино и предложена интерпретация D-бран разных размерностей, как разных ориентаций одного 10-мерного объекта. Также в пятой главе представлены решения двойной и исключительной теорий поля с группой симметрии $SL(5)$ в терминах обобщенной метрики, найдены обобщенные флаксы. Особенностью найденных решений является зависимость от дуальных координат, которая интерпретируется как обратная реакция инстантонов на мировом листе струны на ее фоновую геометрию.

Шестая глава посвящена обсуждению неабелевых симметрий теории струн и M-теории в терминах преобразований фоновых полей 10- и 11-мерной супергравитации соответственно. В диссертации предложены правила преобразования полей для неабелевой U-дуальности, основанные на ковариантном формализме исключительных теорий. Алгоритм состоит из специального сдвига 3-формы, вводящего зависимость от дуальных координат, и внешнего автоморфизма соответствующей группы дуальности, переводящий их в геометрические координаты. Показано, что для 4-мерных фоновых групповых многообразий такого автоформизма не существует. Для пятимерных фоновых групповых многообразий найдены примеры неабелево U-дуальных решений.

В заключении сформулированы положения, выносимые на защиту, а также предложены некоторые направления будущих исследований по тематике диссертации.

Результаты, полученные автором, были доложены на многих семинарах и конференциях в России и за рубежом. Все результаты представлены в статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, в том числе, в журналах первого квартала. Все работы выполнены при непосредственном участии диссертанта, и его вклад в эти работы является определяющим.

Научная новизна результатов, представленных в диссертации, состоит в формулировке нового теоретико-полевого подхода, в котором специальные струнные симметрии U-дуальности реализованы в терминах геометрии особого расширенного пространства. На

его основе найдена новая симметрия решений уравнений 11-мерной супергравитации – неабелева U-дуальность. Научные положения, сформулированные в диссертации, являются обоснованными. Результаты диссертации получили международное признание и активно цитируются в литературе. Сама диссертация является законченным исследованием в актуальной области теоретической физики, выполненным на высоком научном уровне.

При чтении диссертации у меня возникли замечания:

1. В Главе 5 автор рассматривает случаи, в которых фоновое пространство струны не является решением уравнений супергравитации. Непонятно могут ли такие пространства играть роль струнных вакуумов. Является ли струнная сигма-модель при этом конформно инвариантной?
2. Также в работе присутствуют опечатки, например в Главе 5.1.1 дана неправильная связь между струнной константой связи g_s и дилатоном. Следует определять ее без знака минус $g_s = e^{\phi}$.

Эти замечания, однако, не снижают ценности полученных результатов и не умаляют высокой оценки диссертации.

Диссертационная работа безусловно удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Правительством Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации и опубликованным статьям.

Диссертант Э.Т. Мусаев несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Официальный оппонент,
заведующий сектором теоретической физики высоких энергий
Петербургского института ядерной физики
НИЦ Курчатовский институт,
доктор физико-математических наук, профессор



А.В. Юнг

188300, Россия, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1,
НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ
Тел. +7(81371)46096
e-mail: yung_av@pnpi.nrcki.ru

Подпись А.В. Юнга заверяю:

Ученый секретарь Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
кандидат физико-математических наук

С.И. Воробьев

дата 25.01.2024

Список основных работ оппонента по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Yung A. NS three-form flux deformation for the critical non-Abelian vortex string // Phys. Rev.D. — 2022. — Vol. 106, no. 10. — 106019 P. — 2209.08118.
2. Ievlev E., Yung A. Critical non-Abelian vortices and holography for little string theory // Phys. Rev. D. — 2021. — Vol. 104, no. 11. — 114033 P. — 2110.08546.
3. Yung A. Flux compactification for the critical non-Abelian vortex and quark masses // Phys. Rev.D. — 2021. — Vol. 104, no. 2. — 025007 P. — 2105.02645.
4. Ievlev E., Shifman M., Yung A. String baryon in four-dimensional $N=2$ supersymmetric QCD from the 2D-4D correspondence // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102, no. 5. — 054026 P. — 2006.12054.
5. Gorsky A., Ievlev E., Yung A. Dynamics of non-Abelian strings in the theory interpolating from $N=2$ to $N=1$ supersymmetric QCD // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 101, no. 1. — 014013 P. — 1911.08328.
6. Ireson Edwin, Shifman Mikhail, Yung Alexei. Composite Non-Abelian Strings with Grassmannian Models on the World Sheet // Phys. Rev. Research. — 2019. — Vol. 1. — 023002 P. — 1905.09946.
7. Shifman M., Yung A. Quantizing a solitonic string // JHEP. — 2019. — Vol. 12. — 050 P. — 1905.06890.

8. Ireson Edwin, Shifman Mikhail, Yung Alexei. Heterotically deformed sigma models on the world sheet of semilocal strings in supersymmetric QED // Phys. Rev. D. — 2019. — Vol. 99, no. 8. — 085011 P. — 1812.04577