

На правах рукописи

Орлов Дмитрий Георгиевич

ИНТЕГРИРУЕМЫЕ МОДЕЛИ ГИПЕРБРАН В СУПЕРГРАВИТАЦИИ,
СИНГУЛЯРНОСТИ И ЕДИНСТВЕННОСТЬ

Специальность 01.04.02 - теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2005

Работа выполнена на кафедре теоретической физики физическо-го факультета Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Д.В. Гальцов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
В.Д. Иващук
кандидат физико-математических наук
С.А. Шаракин

Ведущая организация: Российский Университет Дружбы Народов,
г.Москва

Защита состоится "6" октября 2005 г. в _____ час. на Специализированном Совете К.501.001.17 при Московском Государственном Университете им. М.В.Ломоносова (119992, г. Москва, Воробьевы горы, физический факультет, ауд. _____).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан " ____ " сентября 2005г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета К.501.001.17
д.ф.-м.н.

П.А. Поляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию некоторых классов решений супергравитационных теорий, находящихся в центре внимания в теории суперструн.

Актуальность проблемы обусловлена существенным развитием в последние годы теории фундаментальных физических взаимодействий на основе суперструнных представлений. Одним из важных аспектов этой теории является построение классических решений эффективных полевых теорий, описывающих протяженные объекты – гипербраны – в пространствах различных размерностей. В настоящее время известно достаточно много классов классических p -бранных решений, однако остается неясным, насколько известные решения исчерпывают все возможные конфигурации подобного типа. Поэтому разработка новых методов интегрирования, а также получение и классификации солитонных решений в супрегравитационных теориях и струнных моделях представляет значительный интерес для дальнейшего продвижения к окончательной формулировке M -теории.

Кроме известных p -бранных решений, мировой объем которых имеет Лоренцеву сигнатуру, в последние годы активно изучаются пространственно-подобные гипербраны (S -браны), все касательные направления к которым являются пространственно подобными векторами. S -браны описывают в струнной теории реакцию пространства-времени на процесс распада нестабильных D -бран или аннигиляции пар D -бран- D -антибран. Как оказалось, такие решения имеют интересные применения в космологии. Одним из важных моментов является исследование сингулярностей этих решений, их интерпретация, а также возможность получения несингулярных решений. Следует отметить что в существующей литературе вопрос о сингулярностях пространств содержащих гипербраны различного типа изучен недостаточно. Настоящая работа представляет шаг вперед в этом направлении.

Целью диссертационного исследования было построение гипер-

бранных решений в многомерных теориях супергравитации, которые представляют интерес при исследовании непертурбативных аспектов теории суперструн. Несмотря на существование обширной литературы по данной тематике, до сих пор отсутствует полная классификация солитонов в теории струн, не сформулированы теоремы единственности. Известен ряд точных решений, описывающих гипербраны в супергравитации, которые содержат дополнительные параметры, не имеющие ясного смысла в теории струн. В данной работе удалось прояснить статус этих решений, выявить наличие в них голых сингулярностей, получить некоторые новые решения для статических гипербран дионного типа, а также асимптотически неплоских решений с асимптотикой линейного дилатона. Также были изучены зависящие от времени решения (пространственно-подобные гипербраны) не обладающие свойством изотропии мирового объема, и построены анизотропные космологические модели на основе компактификации таких решений.

Научная новизна. В работе развит новый подход к построению и анализу гипербран, основанный на изучении особых точек в общих решениях уравнений супергравитации. Это позволило выявить некоторые новые решения, обладающие регулярным горизонтом событий и удовлетворяющие условию космической цензуры, а также сформулировать теоремы единственности для классов решений, представляющих наибольший интерес. Исследование пространственно-подобных гипербран с неплоским пространством мирового объема, позволило построить новые анизотропные космологические модели, обладающие периодом ускоренного расширения (эффективная темная энергия).

Научная и практическая ценность работы. В данной диссертационной работе содержится ряд результатов, обладающих несомненной научной новизной, и имеющих существенное значение для понимания протяженных решений (решений гипербран) струнных теорий, а также космологических моделей, строящихся на их основе.

Результаты могут быть использованы в НИИЯФ МГУ, ИЯИ, ЛТФ ОИ-

ЯИ, ФИАН, ИТЭФ, МИАН, ТГУ и других научных центрах.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на конференции Ломоносов-2005 (Москва, 2005г.), на конференции прошедшей в ФИАНе (Москва, 2005г.) и на XII-ой Российской Гравитационной конференции (Казань, 2005г.), а также на семинарах кафедры теоретической физики МГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, одного приложения, заключения и списка цитируемой литературы. Текст диссертации набран в издательской системе \LaTeX .

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе I “Введение” обсуждаются новые представления сложившиеся в последние годы в теории суперструн, а также дается обоснование выбранной темы исследований и коротко формулируется содержание диссертации. Существенную роль в понимании непертурбативных свойств суперструнных теорий сыграла их связь с эффективными теориями супергравитаций, в которых предполагаемые дуальные симметрии естественно возникают как результат размерной редукции. При этом особо важную роль играют классические решения многомерных теорий супергравитации, называемые p -бранами. Эти решения описывают многомерные протяженные объекты обладающие внутренним натяжением и зарядами по отношению к антисимметричным формам различных рангов. При определенном соотношении между этими параметрами, представляющем собой обобщенное условие Богомольного, эти объекты обладают остаточной суперсимметрией, что предохраняет их от разрушения за счет квантовых поправок. Такие BPS p -браны могут быть построены в одиннадцатимерной супергравита-

ции и они порождают целую иерархию солитонов в более низких измерениях путем калуце–клейновской (КК) редукции.

Помимо BPS решений представляют значительный интерес и так называемые черные p -браны, обобщающие черные дыры на случай протяженных многомерных конфигураций. Эти p -браны квантово–механически нестабильны, однако они представляют интерес при анализе тепловых состояний в теории поля, ассоциированной с ними в рамках AdS/CFT соответствия и его обобщений. Известен рецепт построения черных p -бран из BPS–насыщающих решений, его обоснованием является симметрия соответствующей сигма–модели, получаемой путем размерной редукции.

В последнее время большое внимание уделялось анализу общих решений уравнений супергравитации, для классов метрик, отвечающих гипербранам, при этом оказалось, что такие решения даже после наложения необходимых граничных условий содержат большее число свободных параметров, чем можно ожидать на основании теории струн. Предпринимались попытки физической интерпретации подобных решений как тахионных, однако проведенный в настоящей диссертации анализ показывает, что подобная интерпретация вызывает сомнения ввиду наличия голых сингулярностей. В связи с этим была поставлена задача независимого исследования общих решений в произвольной калибровке и анализ всех особых точек.

Кроме времени-подобных гипербран в последнее время большой интерес вызывают пространственно подобные браны (S-браны). В квантовой теории S-браны представляют собой гиперповерхности, на которых оканчиваются концы открытых струн, отвечающих граничному условию Дирихле во временном направлении. Другая отправная точка - рассмотрение тахионного конденсата, динамика которого приводит к образованию, а затем распаду браны. Интерес к пространственноподобным решениям возник по двум причинам. С одной стороны казалось возможным их использование для формулировки dS/CFT соответствия, подобно тому как возникло AdS/CFT соответствие в случае p -бран. Однако асимптотики де Ситтера в известных S-бранных решениях найдено не было, такая асимптотика возникает лишь для геометрически близких объектов – евклидовых гипербран в теориях II-A* (II-B*), получаемых из струнных теорий II-A (II-B) с помо-

щью T-дуальности по временной координате. С другой стороны компактификацией внешнего по отношению к S-бране пространства можно получить космологические модели, обладающие фазой ускоренного расширения (инфляции). Инфляционная фаза является следствием динамики скалярных полей системы, как существующих в исходной системе, так и возникающих в результате компактификации.

Во второй главе "Гипербраны с цилиндрическим внешним пространством" строится решение p-браны для системы с дилатоном, объединенным с полем формы, описываемой действием:

$$S = \int d^d x \sqrt{-g} \left(R - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{2 q!} e^{a\phi} F_{[q]}^2 \right), \quad (1)$$

соответствующим бозону сектору различных супергравитационных теорий. Метрика выбрана в виде:

$$ds^2 = -e^{2B} dt^2 + e^{2D} (dx_1^2 + \dots + dx_p^2) + e^{2A} dr^2 + e^{2C} d\Sigma_{k,\sigma}^2 + e^{2E} (dy_1^2 + \dots + dy_{q-k}^2), \quad (2)$$

где метрические функции зависят от радиальной координаты r , она представляет прямое произведение мирового объема D-браны, заданного $p + 1$ - мерным пространством, и ортогонального $- q$ - мерного пространства $\Sigma_{k,\sigma} \times \mathbb{R}_{q-k}$.

В частях 2.1-2.3 строится общее решения рассматриваемой системы, которое обладает большим числом параметров, чем известные решения. В части 2.4 анализируются особые точки решения. В этих точках изучается поведение скаляров кривизны (Риччи и Кречмана), а так же рассматриваются уравнения геодезических. Для построения регулярного решения (выполнения требования космической цензуры) накладывается условие существования регулярного горизонта событий, изучается вопрос перехода к BPS решению. В части 2.5 строится решение с плоской асимптотикой, обобщающие известные решения для случая делокализованных бран. В части 2.6 исследуется решение с асимптотикой линейного дилатона (LDB). Для каждого типа решения вычисляется ADM масса, температура и энтропия гипербраны и проверяется выполнение термодинамического соотношения. Ставится вопрос единственности решения.

В главе III “Д-Инстантоны” исследуется особый случай гипербраных решений, изучаемых во второй главе – инстантонов ($p = -1$). В этом случае динамика системы отличается от общего решения для р-бран и требует отдельного анализа. В части 3.1 получается общее решения, рассматривается вопрос построения дуального решения для эвклидизированного действия и проводится анализ особых точек решения. В части 3.2 исследуется решение с плоской асимптотикой и изучается связь с существующими решениями. В части 3.3 строится решение с асимптотикой линейного дилатона (LDB). В части 3.4 исследуется действие для построенных решений, рассматривается вопрос получения конечного действия в случае LDB решения.

Глава IV “Специальные дионные решения” посвящена изучению дионных решений для системы с автодуальным полем формы. Решение полученное во второй главе обладает дискретной S-дуальностью:

$$g_{\mu\nu} \rightarrow g_{\mu\nu}, \quad F \rightarrow e^{-a\phi} * F, \quad \phi \rightarrow -\phi, \quad (3)$$

что позволяло получать электрически заряженные гипербраны из магнитных решений. В четных размерностях $d = 2n$ уравнение движения для поля формы и тождества Бьянки можно разрешить, выбирая поле формы автодуальным:

$$F_{[n]} = b_1 vol_n + b_2 e^{-a\phi} * vol_n, \quad (4)$$

$$\text{где } vol_n = vol(\Sigma_{k,\sigma}) \wedge dz_1 \wedge \dots \wedge dz_{n-k}.$$

Анализ системы уравнений для метрических функций и поля дилатона показывает, что аналитические решения существуют только для трех значений дилатонной константы связи $a = 0$, $a^2 = n - 1$, $a^2 = 3(n - 1)$. Для первых двух случаев решение можно получить методом сведения к системе уравнений Лиувилля, в третьем случае исследование системы проводится методом цепочек Тоды. В части 4.1 даны общие определения и описание исследуемой модели. В части 4.2 рассматривается получение дионного решения методом Лиувилля для первых двух случаев константы связи: $a = 0$, $a^2 = n - 1$. В части 4.3 строится общее решение методом цепочек Тоды. Кроме решений, полученных в предыдущей части, система имеет аналитическое решение для случая константы связи $a^2 = 3(n - 1)$, исследуется вопрос о существовании экстремального предела для этого решения.

Для всех значений константы связи строится асимптотически плоское регулярное на горизонте решение. В части 4.4 рассматриваются возможные положения особых точек общего решения с учетом выполнения условия космической цензуры. Строится второй класс решений – с асимптотикой линейного дилатона для случаев константы связи $a = 0$, $a^2 = n - 1$. В части 4.5 сделан расчет квазилокальной массы, энтропии и температуры для всех полученных решений. Исследуется выполнение первого закона термодинамики. В части 4.6 построенные решения сравниваются с решениями, полученными другими авторами. Исследуется вопрос существования изотропных неэкстремальных решений, которые были рассмотрены в других работах.

В главе V “Анизотропная S -брана и анизотропная космология” исследуется решение для пространственной браны и строится космологическая модель методом размерной редукции полученного решения. Действие системы совпадает с действием модели рассматриваемой во второй главе (1), и мы используем похожий анзац для метрики:

$$ds^2 = -e^{2A} dt^2 + \sum_{i=0}^p e^{2B_i} dx_i^2 + e^{2C} d\Sigma_{k,\sigma}^2 + e^{2E} (dz_1^2 + \dots + dz_{q-k}^2), \quad (5)$$

но в данной модели метрические функции зависят от времениподобной координаты t , а пространство браны полностью анизотропное и опирается на пространственноподобные координаты $\{x_i\}$.

В части 5.1.1 строится наиболее общее решение для анизотропной (кривой) пространственной гипербраны. В частях 5.1.2-5.1.4 производится анализ положения особых точек решения и связь полученного решения с решениями, рассматриваемыми другими авторами. В части 5.2 компактифицировав q измерений ортогональных к бране и положив размерность браны $p + 1 = 3$, построим анизотропную космологическую модель. В части 5.2.1 и 5.2.2 производится анализ полученных космологических моделей. В части 5.2.3 исследуется влияние параметров решения на инфляционную фазу и динамику анизотропии пространства.

В главе VI “Система EYM с квадратичными поправками к кривизне” исследуется система Эйнштейна-Янга-Миллса (калибровочная группа $SU(2)$) с полем дилатона и квадратичными поправками по кривизне

(член Гаусса-Боннэ) в четырехмерии.

Действие системы записывается в виде:

$$S = \frac{1}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} [-R + 2\partial_\mu \phi \partial^\mu \phi + \lambda e^{-2\phi} (\alpha R_{GB} - \beta \text{Tr} \mathbf{F}^2)], \quad (6)$$

где $R_{GB} = R_{\alpha\beta\gamma\delta} R^{\alpha\beta\gamma\delta} - 4R_{\alpha\beta} R^{\alpha\beta} + R^2$.

В связи с существенной нелинейностью уравнений движения, можно определить лишь число параметров, которые задают динамику системы. В качестве точки разложения выбрано положение регулярного горизонта. Дальнейший анализ системы проводится численными методами. На внешнее решение наложено требование перехода к плоскому пространству на пространственной бесконечности, при этом калибровочная функция должна принимать конечное значение. При интегрировании под горизонтом решение входит в сингулярность, но сингулярность слабее ранее известной центральной сингулярности для решения без однопетлевой поправки. В приложении описан способ, позволяющий пройти сингулярность методом интегрирования по параметру вдоль кривой. После прохождения этой особой точки решение достигает конечной сингулярности. В отличие от работ, рассматривающих данную модель в случае калибровочной группы $U(1)$, при уменьшении радиуса горизонта в системе наблюдается несколько слабых сингулярностей (точек поворота), между которыми происходит осциллирование решения, перед достижением конечной сингулярности.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

В приложение описан метод численного интегрирования по параметру вдоль кривой решения для прохождения точек, обладающих слабой сингулярностью.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Развита метод получения и интерпретации гипербранных решений на основе анализа особых точек в общем решении системы в произвольной калибровке. Это позволило классифицировать решения по особым

точкам независимо от выбора той или иной системы координат и прояснить физический смысл решений с дополнительными параметрами.

2. Получено наиболее общее статическое решение уравнений Эйнштейна, уравнений поля антисимметричной поля формы и дилатона, описывающих p -браны, делокализованные в части пространственных измерений. Исследована геометрия поперечного пространства и определены классы решений не содержащих голых сингулярностей.
3. Доказана теорема единственности для таких решений, сформулированная следующим образом: не существует решений без голых сингулярностей отличных от стандартных асимптотически-плоских p -бран, либо черных p -бран асимптотически переходящий в линейный дилатонный фон. Эта асимптотика обладают половиной суперсимметрий исходной теории в рамках моделей, допускающих $1/2$ - суперсимметричные асимптотически плоские решения.
4. Построено наиболее общее асимптотически плоское дионное гипербранное решение с регулярным горизонтом событий. Показано, что дионное решение, получаемое на основе сведения системы уравнений к цепочке Тоды (константа связи $a^2 = 3(n - 1)$), не имеет экстремального предела, в то время как решения известные как несуперсимметричные гипербраны с полной Лоренцевой симметрией мирового объема содержат голые сингулярности. Построены новые гипербранные решения дионного типа, которые асимптотически переходят в линейный дилатонный фон. Показано, что эти решения удовлетворяют стандартной термодинамики на заданном фоне. Сформулирована теорема единственности для дионов аналогичная указанной выше.
5. Построено новое решение, описывающее D -инстантон с цилиндрической симметрией. Решение имеет конечное действие при компактификации пространства делокализации на тор. Построено также новое решение для инстантона на фоне линейного дилатона, обладающее конечным действием.
6. Построено решение для анизотропной пространственно-подобной ги-

пербраны. Показано, что анизотропные космологические модели на основе компактификации указанного выше решения, содержат период ускоренного расширения (эффективная темная энергия). Проведен анализ инфляционной фазы и поведение параметра сдвига для разных типов компактификаций.

7. Построено внутреннее решение под горизонтом событий для черной дыры Эйнштейна Янга-Миллса с полем дилатона и квадратичными поправками по кривизне (член Гаусса-Боннэ) в четырехмерии. Обнаружены новые ветви решений с несколькими точками поворота между горизонтом и конечной сингулярностью.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Список литературы

- [1] D. G. Orlov D. V. Gal'tsov and S. E. Klevtsov, «Cylindrical d-instantons» // *Grav. Cosm.*, v.11, p.127–131, 2005.
- [2] С. Е. Клевцов, Д. В. Гальцов, Д. Г. Орлов, «*D-инстантоны и супергравитационные доменные стены, пересмотр*» // в: «Сборнике тезисов Международной конференции по теоретической физике», стр.15, ФИАН, Москва, 2005.
- [3] Д. Г. Орлов, «*Пересекающиеся S-браны и анизотропные модели темной энергии*» // в: «Сборнике тезисов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам (Ломоносов-2005)» «Секция физика» Т.2, стр.106, Издательство физического факультета МГУ, Москва, 2005.
- [4] Д. Г. Орлов, «*Построение дионных гипербран методом цепочек Тоды*» // в: «Сборнике тезисов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам (Ломоносов-2005)» «Секция физика» Т.2, стр.107, Издательство физического факультета МГУ, Москва, 2005.

- [5] Д. Г. Орлов, «Анизотропные S -браны в супергравитации» // в: «Сборнике тезисов докладов XII-ой Российской Гравитационной конференции», стр.152, КГПУ, Казань, 2005.
- [6] D. V. Gal'tsov and D. G. Orlov, «Liouville and Toda dyonic branes: regularity and bps limit» // *Grav. Cosm.*, v.12, p.251-258, 2005.