

2-99-39

На правах рукописи  
УДК 539.12.01

Э-818

**ЭРРЕРА АГИЛАР**  
Альфредо

**СИММЕТРИИ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ  
В ТЕОРИИ ГЕТЕРОТИЧЕСКОЙ СТРУНЫ**

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1999

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований

### Научные руководители:

кандидат физ.-мат. наук О.В. Кечкин  
кандидат физ.-мат. наук Н.В. Махалдиани

### Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук профессор В.И. Денисов  
кандидат физ.-мат. наук В.Д. Иващук

### Ведущая организация:


Российский университет дружбы народов, г. Москва

Защита состоится "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1999 года на заседании диссертационного совета K047.01.01 Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1999 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

  
А.Е. Дорохов

**Актуальность темы.** В последние годы резко возрос интерес к исследованиям в рамках теории струн. Первоначально струнные модели использовались в связи с гипотезой дуальности в физике адронных резонансов, однако впоследствии роль истинной теории сильных взаимодействий закрепились за квантовой хромодинамикой. При этом теория (супер)струн трансформировалась в последовательную квантовую теорию всех фундаментальных физических взаимодействий, включая гравитацию.

Исследование низкоэнергетического сектора теории суперструн является необходимым с точки зрения феноменологии, т.е. установления связи между выводами теории и фактами наблюдаемого мира. При этом часть выводов, полученных в контексте низкоэнергетического приближения, сохраняет свое значение во всех порядках теории возмущений. Последнее обстоятельство достигается при помощи использования аппарата суперсимметрии (теоремы о неперенормировках), и означает возможность выхода в непертурбативную область.

Наличие гравитона в безмассовом секторе суперструнных теорий и их согласованность на квантовом уровне означают существование квантовой теории гравитации в рамках теории суперструн. Результаты, получаемые в низкоэнергетическом пределе, сохраняют свое значение вплоть до достижения планковских энергий. Их изучение проливает свет на ряд вопросов физики черных дыр (проблема потери информации), и ранней космологии (инфляционный режим).

С математической точки зрения изучение получаемых в низкоэнергетическом пределе теории суперструн гравитационных моделей вызывает большой интерес в связи с наличием у них широких классов нетривиальных симметрий. Эти симметрии связывают между собой различные классические решения и даже, как считается, сохраняют свое значение на квантовом уровне (как, например, обстоит дело с S-дуальностью, т.е. дуальностью между секторами 'сильной' и 'слабой' константы связи). Использование преобразований симметрии позволяет, не решая сложные нелинейные динамические уравнения, получать важные для приложений классы точных решений. В применении к уже найденным решениям связанный с теорией симметрий подход позволяет установить степень их общности.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Развитие разнообразных методов, основанных на использовании преобразований симметрии, представляется наиболее естественным и последовательным как с точки зрения решения частных проблем теории суперструн, так и в долгосрочной перспективе. Применение этих методов позволяет исследовать низкоэнергетический предел теории суперструн, а в ряде специальных случаев выйти за рамки теории возмущений.

**Цель работы.** Целью диссертации является разработка и использование основанных на теории симметрий методов для исследования низкоэнергетического предела бозонного сектора теории гетеротической струны.

**Научная новизна и практическая ценность.** В диссертации детально изучена группа симметрии низкоэнергетического предела бозонного сектора теории гетеротической струны, скомпактифицированной на тор. Построены широкие классы частицеподобных точных решений, инвариантных относительно соответствующих преобразований симметрии. Основным достоинством развитых методов является возможность построения и анализа точных решений для критической (десятимерное пространство-время, 16 абелевых векторных полей) и некритической (соответствующие характеристики произвольны) низкоэнергетических моделей.

**На защиту выдвигаются следующие результаты.**

– разработан формализм матричных потенциалов Эрнста, построено связанное с ним киральное (сигма-модельное) представление теории. Установлена тесная формальная аналогия с классическим представлением при помощи (комплексных) потенциалов Эрнста для редуцированной на три измерения теории Эйнштейна-Максвелла.

– получен класс экстремальных точных решений, обобщающий на случай теории гетеротической струны класс экстремальных решений Израэля-Вильсона-Переша. Показано, что в случае четырехмерной теории с шестью векторными полями воспроизводится полученный ранее Бергшоевым, Каллош и Ортингом класс экстремальных решений для  $D=N=4$  супергравитации.

– произведено разложение полной группы лагранжевых симметрий теории (так-называемой  $U$ -дуальности) на калибровочный (т.е. изме-

няющий заданные полевые асимптотики) и некалибровочный (т.е. сохраняющий эти асимптотики) секторы.

– построено представление, в рамках которого преобразования из некалибровочного сектора оказываются линейными. Показано, что в рамках этого представления  $S$ -дуальность выступает в роли линейного дискретного преобразования.

– для свободной от векторных полей модели, соответствующей сектору безмассовых полей бозонной струны, исследована последующая редукция на два измерения. Построено новое киральное (не сигма-модельное) представление, матрица нулевой кривизны которого обобщает матрицу Белинского-Захарова для Общей Теории Относительности. Установлено дискретное преобразование типа преобразования Крамера и Нойгебауэра, связывающее сигма-модельное и не-сигма-модельное представления.

– для бозонной струны в пяти измерениях получен класс точных решений, связанный с двумя произвольными решениями уравнения Эрнста для Общей Теории Относительности. Показано, что соответствующие потенциалам решения Керра полевые конфигурации обладают горизонтом.

**Апробация работы.** Материалы, представленные в диссертации, докладывались на следующих конференциях и семинарах: XV-ая международная конференция “Общая Теория Относительности и Гравитация”, г. Пуна, Индия, 16–20 декабря 1997г.; международная весенняя школа “Непertурбативные вопросы теории струн и суперсимметричные калибровочные теории”, г. Триест, Италия, 23–31 марта 1998 г.; научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Боголюбова ОИЯИ (Дубна); Российского университета дружбы народов (Москва); и институтов IF-UNAM, CINVESTAV (Мехико, Мексика); IFM-UMSNH (Морелия, Мексика); IF-UBAC (Гванахвато, Мексика); BUAP (Пуэбла, Мексика).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-10].

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации 94 страниц машинописного текста, включая один рисунок и список литературы из 105 наименований.

Во введении излагается предмет исследования и дается краткое описание содержания диссертации.

В первой главе задан общий контекст, в рамках которого возникают модели струнной гравитации, изученные в работе.

Глава состоит из двух разделов. Раздел 1.1 посвящен историческому описанию теории суперструн и ее современному истолкованию как  $M$ -теории. В разделе 1.2 изложены основные свойства бозонного сектора низкоэнергетической эффективной теории поля гетеротической струны, тороидально скомпактифицированной на три измерения. В частности, представлена ее  $O(d+1, d+n+1)$ -симметричная киральная матричная формулировка.

Во второй главе построен новый матричный формализм, на основе которого получены новые точные решения трехмерной эффективной теории поля гетеротической струны.

Глава состоит из трех разделов. В разделе 2.1 построена новая киральная (сигма-модельная) матрица теории [1].

В разделе 2.2 развита формулировка теории в терминах двух матричных потенциалов Эрнста  $\mathcal{X}$  и  $\mathcal{A}$ , размерности  $(d+1) \times (d+1)$  и  $(d+1) \times n$  соответственно, тесно связанных с ранее выведенной киральной матрицей [1]–[2]. Установлена связь между эффективной трехмерной теорией поля гетеротической струны и стационарной теорией Эйнштейна–Маквелла. Более того, показано, что данный матричный формализм содержит стационарную теорию Эйнштейна–Маквелла в качестве частного случая [3].

В разделе 2.3 изложен алгоритм, позволяющий получить семейство стационарных экстремальных решений, обобщающих класс решений Израэля–Вильсона–Переша теории Эйнштейна–Маквелла на случай рассмотренной теории [4]–[5]. Построенные нами решения описывают семейство вращающихся аксиально симметричных и переходящих на пространственной асимптотике в пространство–время Тауб–НУТ источников с электрическими и магнитными зарядами [6]–[7]. Показано, что заряды построенного решения оказываются сбалансированными, то есть силы притяжения полностью компенсируются силами отталкивания. Также показано, что гиромагнитные соотношения соответствующих вращающихся полевых конфигураций принимают произвольные значения. Выделен подкласс вращающихся решений типа черных дыр

с электрическими и магнитными зарядами при условии зануления НУТ зарядов.

В параграфе 2.3.1. рассмотрен частный случай, соответствующий бозонному сектору теории  $N = D = 4$  супергравитации и показано, что найденные нами решения воспроизводят полученный ранее суперсимметричный класс стационарных решений типа дионов.

В третьей главе тщательно исследована группа лагранжевых преобразований симметрии ( $U$ -дуальность) трехмерной эффективной теории поля гетеротической струны.

Глава содержит четыре раздела. В разделе 3.1 установлено действие полной группы симметрий на потенциалы Эрнста [1]. Далее произведено разложение  $U$ -дуальности на калибровочный и некалибровочный секторы преобразований. После фиксации калибровки (соответствующей асимптотически тривиальным потенциалам), выделены все конечные преобразования, сохраняющие асимптотики и построено представление теории, линеаризующее некалибровочный сектор. Показано, что преобразования этого сектора образуют подгруппу “заряжающих симметрий” (эти преобразования генерируют заряженные решения из незаряженных) [3].

В разделе 3.2 введена новая пара матричных потенциалов, линейно преобразующихся под действием заряжающих симметрий, как для стационарной теории Эйнштейна–Маквелла, так и для низкоэнергетического предела теории гетеротической струны. На основе этих двух потенциалов построен единый  $(d+1) \times (d+1)$ -матричный потенциал, линейно преобразующийся под действием  $SO(d+1) \times SO(d+n+1)$  группы симметрий. Этот факт позволяет устанавливать структуру подгруппы заряжающих симметрий. Далее, на основе этого единого линеаризующего потенциала построен общий инвариант группы заряжающих симметрий.

В разделе 3.3 исследованы полевые конфигурации между которыми существует линейная зависимость. Показано, что эти поля также являются инвариантными относительно группы заряжающих симметрий. При условии зануления соответствующего инварианта, выделен подкласс полевых конфигураций, совпадающий с классом решений Израэля–Вильсона–Переша для рассмотренной модели струнной гравитации.

В разделе 3.4 сформулирована наиболее общая техника генерации новых решений на основе заряжающих симметрий. Показано, что на

чина с теории Калуцы-Клейна можно получить все безмассовые поля теории бозонной струны и, далее, всей теории гетеротической струны.

В четвертой главе рассмотрен ряд упрощенных моделей струнной гравитации, возникающих в рамках эффективной теории поля гетеротической струны.

Глава состоит из трех разделов. В разделе 4.1 рассмотрена теория без векторных полей, описывающая также набор безмассовых мод бозонной струны [8]. Показано, что на языке матричного потенциала Эрнста группа симметрий теории приобретает матричнозначную  $SL(2, \mathbb{R})$  форму. Установлено, что их три подгруппы являются матричными обобщениями соответствующих калибровочного и конформного преобразований, а также преобразования Элерса. Далее построено матричное скалярно-векторное лагранжево представление теории. При исследовании последующей редукции на два измерения введен эрмитов матричный потенциал Эрнста, определяющий новое киральное (не сигма-модельное) представление теории. На основе действительной и мнимой частей этого потенциала построена матрица нулевой кривизны, обобщающая матрицу Белинского-Захарова Общей Теории Относительности. Установлено дискретное матричное преобразование типа преобразования Крамера-Нойгебауэра, связывающее сигма-модельное представление с представлением в терминах исходных струнных полей.

В разделе 4.2 рассмотрена пятимерная модель без векторных полей, допускающая два коммутирующих вектора Киллинга. Сформулировано кэлэрово представление теории на языке двух вакуумных потенциалов Эрнста [9]. Показано, что дискретное преобразование, существующее между этими потенциалами позволяет устанавливать альтернативное представление теории в терминах  $2 \times 2$ -матриц. После наложения условия аксиальной симметрии приведены три сигма-модельные и три не сигма-модельные представления теории. Установлены соответствующие преобразования типа Крамера-Нойгебауэра между ними. Далее получен пятимерный интервал, явно зависящий от потенциалов Эрнста. Построен класс пятимерных решений типа черных дыр на основе двух независимых решений Кэрра для Общей Теории Относительности. Показано, что среди них имеются дипольные конфигурации, скрытые под горизонтом.

Раздел 4.3 посвящен изучению четырехмерной теории Эйнштейна-Максвелла с дилатоном и аксионом (ЭМДА). Эта теория также допус-

кает кэлэрово представление при наличии одного и двух векторов Киллинга. В рамках этой теории впервые выведена совокупность комплексных потенциалов, линейно преобразующихся под действием группы заряжающих симметрий [10]. Эти потенциалы позволяют элегантно образом описывать асимптотически плоские полевые конфигурации. С их же помощью построен общий инвариант группы заряжающих преобразований симметрии.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации, которые выносятся на защиту.

В приложении А построены линеаризующие потенциалы Эрнста для стационарной теории ЭМДА.

В приложении В изучается структура алгебры заряжающих симметрий эффективной трехмерной теории гетеротической струны.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. A. Herrera-Aguilar and O. Kechkin, "Matrix Ernst Potentials and Orthogonal Symmetry of Low Energy Heterotic String Theory Reduced to Three Dimensions" *Int.J.Mod.Phys. A13* (1998) 393–402.
2. A. Herrera-Aguilar and O. Kechkin, in *Abstracts of Plenary Lectures and Contributed Papers of GR15* (IUCAA, Pune, 1997) p. 254.
3. A. Herrera-Aguilar and O. Kechkin, "Charging Symmetries and Linearizing Potentials for Heterotic String in Three Dimensions", hep-th/9811189.
4. A. Herrera-Aguilar and O. Kechkin, "IWP Solutions in Low Energy Heterotic String Theory", preprint NPI-MSU 98-22/523.
5. A. Herrera-Aguilar and O. Kechkin, "Israel–Wilson–Perjés Solutions in Heterotic String Theory", hep-th/9806154.
6. A. Herrera-Aguilar and O. Kechkin, "IWP Solutions for Heterotic String in Five Dimensions", *Mod.Phys.Lett. A13* (1998) 1979–1986.
7. A. Herrera-Aguilar and O. Kechkin, "Multi-dimensional IWP Solutions for Heterotic String Theory", hep-th/9806154.
8. A. Herrera-Aguilar and O. Kechkin, " $O(d, d)$ -symmetry and Ernst Formulation of Einstein–Kalb–Ramond Theory", *Mod.Phys.Lett. A13* (1997) 1573–1582.
9. A. Herrera-Aguilar and O. Kechkin, "Double Ernst Solution in Einstein–Kalb–Ramond Theory", *Mod.Phys.Lett. A13* (1997) 1629–1636.
10. A. Herrera-Aguilar and O. Kechkin, "Charging Symmetries and Linearizing Potentials for Einstein–Maxwell–Dilaton–Axion Theory", *Mod.Phys.Lett. A13* (1998) 1907–1914.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 февраля 1999 года