



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

96-53  
На правах рукописи

Цокур Виктор Анатольевич

**Нелинейные  $\sigma$ -модели  
и спонтанное нарушение суперсимметрии  
в моделях расширенных супергравитаций**

01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Протвино 1996

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Ю. М. Зиновьев.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Д.И.Казаков (ОИЯИ, г. Дубна), доктор физико-математических наук Н.В.Красников (ИЯИ, г. Москва).

Ведущая организация – ХФТИ (г. Харьков).

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” 1996 г. в  
\_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д034.02.01 при Институте  
физики высоких энергий по адресу: 142284, г. Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” 1996 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д034.02.01

Ю.Г.Рябов

© Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт физики высоких энергий, 1996

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В настоящее время модели супергравитации рассматриваются в качестве кандидатов на роль теории, описывающей физику за пределами Стандартной модели. Теоретические ограничения на массы суперчастиц сверху таковы, что экспериментальная проверка предсказаний теорий, основанных на суперсимметрии, будет возможна вскоре после запуска новых коллайдеров на  $TeV$ -энергии. В связи с этим велик интерес к моделям, предсказывающим определенные свойства суперчастиц, допускающие проверку на эксперименте.

Одновременно с решением некоторых проблем Стандартной модели модели  $N = 1$  супергравитации имеют и ряд нерешенных вопросов, в первую очередь феноменологических. Попытки их решения ведут, в частности, к естественным обобщениям таких моделей – моделям с расширенной суперсимметрией. Такие модели, в особенности модели  $N = 2$  супергравитации, активно исследуются в последнее время. Среди актуальных задач – построение моделей, допускающих частичный суперхиггс-эффект, решение проблемы генерации масс частиц Стандартной модели в моделях расширенных супергравитаций, исследование возможностей одновременного нарушения калибровочной симметрии и суперсимметрии.

Кроме того, большой интерес вызывает исследование преобразований дуальности моделей расширенных супергравитаций. При этом, как правило, изучаются вопросы, возникающие при рассмотрении моделей супергравитации, как низко энергетического предела струнных моделей. Но исследование дуальных версий моделей расширенных супергравитаций актуально и в связи с изучением возможности построения реалистической модели, особенно для  $N > 2$  супергравитаций, поскольку произвол, связанный с выбором геометрии нелинейных  $\sigma$ -моделей в этом случае отсутствует.

Все перечисленные выше проблемы делают актуальным исследование моделей расширенных супергравитаций.

## **Цель диссертационной работы:**

- Вывод членов, мягко нарушающих суперсимметрию, гарантирующих расщепление по массам во всех супермультиплетах материи, из двух типов моделей  $N = 1$  супергравитации.
- Построение и изучение моделей  $N = 2$  супергравитации, основанных на несимметрических кватернионных многообразиях, и исследование возможности решения проблемы генерации масс фермионов в таких моделях.
- Исследование возможности одновременного нарушения калибровочной симметрии и суперсимметрии в моделях  $N = 2$  супергравитации.
- Исследование возможностей спонтанного нарушения суперсимметрии в моделях  $N = 3$  и  $N = 4$  супергравитаций с материей.
- Изучение дуальных версий моделей расширенных супергравитаций и связи между выбором дуальной версии и возможностью нарушения суперсимметрии.

## **Научная новизна и практическая ценность:**

1. Было исследовано спонтанное нарушение суперсимметрии в модели  $N = 1$  супергравитации, в которой часть скалярных полей описывает нелинейную  $\sigma$ -модель с геометрией  $SO(2, m)/SO(2) \otimes SO(m)$  и часть полей взаимодействует с супергравитацией "минимальным" образом, и был получен результирующий спектр масс.
2. Впервые построены модели  $N = 2$  супергравитации, в которых скалярные поля из гипермультиплетов параметризуют несимметрические кватернионные многообразия, рассмотрено включение калибровочного взаимодействия и спонтанное нарушение суперсимметрии и исследован результирующий спектр масс.
3. Предложен механизм одновременного нарушения суперсимметрии и калибровочной симметрии, использующий свойства бесконечномерных алгебр Каца–Муди. Действие такого механизма продемонстрировано для модели  $N = 2$  супергравитации.
4. Впервые построены модели взаимодействия  $N = 3$  и  $N = 4$  супергравитаций с материей, допускающие спонтанное нарушение суперсимметрии с исчезающей космологической постоянной и с соответственно тремя и четырьмя произвольными массовыми масштабами, т.е. с возможностью частичного суперхиггса-эффекта.
5. Исследованы дуальные версии моделей  $N = 3$  и  $N = 4$  супергравитаций, построен лагранжиан, описывающий семейства дуальных версий и содержащий все ранее известные модели в качестве частных случаев. Исследована связь между выбором дуальной версии и возможностью спонтанного нарушения суперсимметрии.

На основе построенных моделей можно рассматривать конкретные феноменологические модели в  $N = 1$  и  $N = 2$  супергравитации, выбирая конкретные калибровочные группы и механизм нарушения калибровочной симметрии. При этом в

рассмотренной модели  $N = 1$  супергравитации гарантируется, что после нарушения суперсимметрии все суперпартнера "стандартных" частиц приобретут массы порядка масштаба нарушения суперсимметрии, а "стандартные" частицы останутся безмассовыми.

Кроме того, представляет интерес исследование конкретной феноменологической модели  $N = 2$  супергравитации, основанной на несимметрическом кватернионном многообразии. При этом имеется возможность получить после нарушения суперсимметрии в лагранжиане модели члены, описывающие юкавское взаимодействие, которые отсутствуют во всех ранее изученных моделях  $N = 2$  супергравитации и которые необходимы для генерации масс фермионов после нарушения калибровочной симметрии. Если калибровочной группой модели является единая группа  $G$  типа  $SU(5)$  или  $O(10)$ , при нарушении  $G \rightarrow SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$  удобно воспользоваться предложенным механизмом нарушения, использующим свойства бесконечномерных алгебр Каца–Муди.

**Апробация работы.** Результаты, содержащиеся в диссертации, опубликованы в работах [1-7] и докладывались и обсуждались на семинарах ОТФ ИФВЭ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Объем диссертации 120 страниц, включая одну таблицу. Список литературы включает 82 наименования.

## Краткое содержание диссертации

**Во введении** обсуждаются основные известные результаты из области построения феноменологических моделей  $N = 1$  и расширенных супергравитаций, обосновывается актуальность темы и формулируются нерешенные проблемы в этой области, которые исследуются в диссертации. Обсуждаются недостатки феноменологических моделей  $N = 1$  супергравитации и, в связи с возможностью устранения этих недостатков обосновывается необходимость построения и изучения моделей расширенных супергравитаций.

Такие модели изучены сравнительно слабо, что связано, во-первых, с отсутствием удобного формализма для описания теории с расширенной суперсимметрией и, во-вторых, с возникающими новыми проблемами с точки зрения феноменологии. Первая проблема состоит в том, что модели с ненарушенной расширенной суперсимметрией являются вектороподобными и потому любая реалистическая модель должна допускать частичный суперхиггс-эффект, т.е. нарушение суперсимметрии  $N > 1 \rightarrow N = 1$ . При этом зеркальные фермионы должны отщепляться по массе от обычных фермионных полей. Условие допустимости частичного суперхиггс-эффекта является очень жестким требованием. Вторая проблема касается механизма генерации масс фермионов. Сложность состоит в том, что юкавские члены, описывающие взаимодействие полей Хиггса с фермионами, как правило, не появляются в моделях расширенных супергравитаций.

Кроме того, в этой главе дается краткое введение в круг физических проблем, затронутых в диссертации. Излагается структура диссертации и объясняются используемые в работе обозначения.

**В первой главе** содержится построение и изучение двух моделей  $N = 1$  супергравитации, в которых часть скалярных полей параметризует нелинейную  $\sigma$ -модель с геометрией, либо  $SO(2, m)/SO(2) \otimes SO(m)$ , либо  $SU(1, m)/SU(m) \otimes U(1)$  и часть скалярных полей взаимодействует с супергравитацией "минимальным" образом. Рассматривается спонтанное нарушение суперсимметрии и включение калибровочного взаимодействия в общем виде, без конкретизации калибровочной группы.

Обе рассматриваемые модели являются обобщениями no-scale скрытого сектора с геометрией  $SU(1, 1)/U(1)$  и в обоих случаях удается получить спонтанное нарушение суперсимметрии с исчезающей космологической постоянной. Показано, что даже для no-scale-моделей добиться плоского потенциала удается лишь фиксируя "руками" свободный параметр теории  $\kappa$ , связанный с кривизной многообразия нелинейной  $\sigma$ -модели. Тем не менее таким образом определенная симметрия модели сводит функциональный произвол к однопараметрическому, а значение параметра  $\kappa$  фиксируется, если рассматривать  $N = 1$  супергравитацию как низко энергетический предел моделей суперструн или расширенных супергравитаций.

Вследствие того что потенциал модели имеет плоские направления в минимуме, соответствующие, в частности, дилатону, масштаб нарушения суперсимметрии, т.е. масса гравитино, является произвольным параметром модели. За счет выбора специального вида суперпотенциала и кинетической калибровочной функции – функции скалярных полей, стоящей при кинетическом члене векторных полей – в случае модели с ортогональной геометрией удается передать спонтанное нарушение суперсимметрии из скрытого сектора в наблюдаемый таким образом, что массы порядка масштаба нарушения суперсимметрии приобретают суперпартнеры "стандартных" частиц – кварков, лептонов и калибровочных полей, – а сами частицы Стандартной модели остаются на этом этапе безмассовыми и приобретают массы порядка масштаба нарушения калибровочной симметрии уже на следующем этапе нарушения  $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1) \rightarrow SU(3) \otimes U(1)_{em}$ .

В случае модели с унитарной геометрией не удается добиться того, чтобы после нарушения суперсимметрии все суперчастицы стали массивными с массами порядка нарушения суперсимметрии. Суперпартнеры полей Хиггса остаются безмассовыми на первом этапе и приобретают массу лишь после нарушения калибровочной симметрии. Этот результат, по-видимому, определяется геометрией модели и не зависит от используемого механизма нарушения суперсимметрии. Таким образом, расщепление масс в хиггсовом секторе этой модели имеет порядок масштаба нарушения калибровочной симметрии и может оказаться, что этого недостаточно для построения реалистической модели.

**Вторая глава** содержит описание моделей  $N = 2$  супергравитации, в которых скалярные поля из гипермультиплетов параметризуют несимметрические кватернионные многообразия. В первом разделе этой главы приводится разработанная Алексеевским классификация несимметрических кватернионных многообразий и

основные результаты переформулируются в виде, удобном для построения соответствующих  $\sigma$ -моделей. Здесь же для двух классов таких многообразий в явном виде приводятся алгебры изометрий, которые в то же время являются алгебрами групп глобальных симметрий соответствующих бозонных лагранжианов.

Знание глобальных симметрий моделей дает возможность провести явное построение моделей. Показано, что общей частью всех рассматриваемых моделей является хорошо известная модель, скалярные поля из гипермультиплетов которой параметризуют симметрическое кватернионное многообразие вида  $SO(4, 4)/SO(4) \otimes O(4)$ . Стартуя с  $\sigma$ -модели вида  $SO(4, m)/SO(4) \otimes SO(m)$  удается обобщить эту модель до случая несимметрических кватернионных многообразий обоих классов.

Во втором разделе главы II рассматривается включение калибровочного взаимодействия в исследуемых моделях для произвольной калибровочной группы, являющейся подгруппой группы глобальных симметрий. Пользуясь механизмом спонтанного нарушения суперсимметрии, известным для моделей с ортогональной геометрией, удается нарушить суперсимметрию с двумя произвольными массовыми масштабами, т.е. с возможностью частичного суперхиггс-эффекта, и с исчезающей космологической постоянной. Причем, в отличие от моделей  $N = 1$  супергравитации, космологическая постоянная исчезает не в результате тонкой подстройки параметров модели, а вследствие симметрии модели – как результат выбора вида калибровочного взаимодействия в скрытом секторе.

В этом же разделе исследуется спектр масс моделей обоих классов. В одном случае нарушение суперсимметрии ведет практически к тем же результатам, что и для обычной кватернионной модели с геометрией  $SO(4, m)/SO(4) \otimes SO(m)$ . Массы приобретают только поля из векторных мультиплетов, а поля из гипермультиплетов, в частности суперпартнеры夸克ов и лептонов, остаются безмассовыми на этом этапе. Кроме того, в этом случае, как и во всех известных случаях, основанных на симметрических кватернионных многообразиях, после нарушения суперсимметрии не возникают юкавские члены, содержащие поля из гипермультиплетов и необходимые для возможности генерации масс фермионов. По-видимому, такие модели не могут служить основой для построения реалистических моделей.

Во втором случае следствия нарушения суперсимметрии гораздо интереснее. Во-первых, в отличие от предыдущего случая часть скалярных полей из гипермультиплетов приобретают массы порядка нарушения суперсимметрии, т.е. нарушение суперсимметрии передается в сектор夸克ов и лептонов. Во-вторых, в этом случае возникают юкавские связи требуемого вида, т.е. на основе таких моделей можно пытаться строить реалистические модели, рассматривая конкретную калибровочную группу и механизм ее нарушения.

Интересный результат может быть получен при качественном анализе спектра масс моделей во втором случае. Коэффициент, стоящий при юкавских связях, имеет вид  $(M_1 + M_2)/M_{Pl}$ , где  $M_{1,2}$  – масштабы нарушения первой ( $N = 2 \rightarrow N = 1$ ) и второй ( $N = 1 \rightarrow N = 0$ ) суперсимметрий, а  $M_{Pl}$  – масса Планка. Поскольку  $M_{Pl} \sim 10^{17}$  ГэВ, то, во-первых, масштаб нарушения первой суперсимметрии должен быть

гораздо больше, чем второй, поскольку масштаб нарушения второй суперсимметрии предполагается не больше  $\sim 1$  ТэВ, и, во-вторых, получаем  $M_1 \sim 10^{15}$  ГэВ, что близко к предполагаемому масштабу Теории Большого Объединения.

**В третьей главе** исследуется механизм одновременного нарушения суперсимметрии и калибровочной симметрии, основанный на свойствах бесконечномерных алгебр Каца–Муди. Необходимость изучения такого механизма связана с тем, что в моделях расширенных супергравитаций скалярные поля, претендующие на роль частиц Хиггса, приобретают очень большие массы ( $\sim 10^{15}$  ГэВ в описанной выше модели), и потому механизм нарушения калибровочной симметрии за счет радиационных поправок может не работать в таких моделях.

В первом разделе главы III приводятся коммутационные соотношения для алгебр Каца–Муди и рассматривается модель с бесконечномерной калибровочной группой, содержащая векторные и скалярные поля. Показывается, что для нарушения калибровочной симметрии (и, следовательно, приобретения масс векторными полями) в такой модели не требуется ни введения скалярных полей с неоднородным законом преобразования, как в механизме Хиггса, ни введения нелинейностей по скалярным полям, как в случае нелинейных  $\sigma$ -моделей.

Во втором разделе рассматривается включение калибровочного взаимодействия с бесконечномерной калибровочной группой в модели с глобальной  $N = 2$  суперсимметрией. Исследуется спектр масс модели без нарушения суперсимметрии, когда все поля модели формируют массивные и безмассовые  $N = 2$  супермультиплеты.

В третьем разделе предыдущая глобально-суперсимметрическая модель обобщается на случай  $N = 2$  супергравитации и помимо нарушения калибровочной симметрии рассматривается спонтанное нарушение суперсимметрии с двумя произвольными массивными масштабами и естественным образом исчезающей космологической постоянной. Результирующий спектр масс приводится в виде таблицы.

Помимо одновременного нарушения суперсимметрии и калибровочной симметрии в рассматриваемой модели наблюдается еще один интересный эффект. В модели имеется три массивных масштаба: два масштаба  $M_{1,2}$  нарушения  $N = 2$  суперсимметрии и масштаб  $M_G$  нарушения калибровочной симметрии (если возникновение бесконечномерной калибровочной симметрии получать как результат компактификации из пяти измерений, то этот массивный масштаб обратно пропорционален радиусу компактификации) и в случае близости масштабов нарушения калибровочной симметрии и первой суперсимметрии в модели появляется ряд "легких" частиц с массами  $|M_1 - M_G|$ . В моделях с конечномерной калибровочной группой такие частицы приобретали массы порядка нарушения первой суперсимметрии и не было возможности "опустить" их значения. В рассмотренной же модели в случае, если бесконечномерная калибровочная группа соответствует группе Большого Объединения и масштаб нарушения этой симметрии близок к масштабу нарушения первой суперсимметрии (что как раз и предсказывается, например, в модели, описанной во второй главе), возможен обратный механизм Хиггса и результирующие "легкие" частицы могут играть роль в низкоэнергетической феноменологии,

например, как поля Хиггса при нарушении  $SU(2) \otimes U(1) \rightarrow U(1)_{em}$  с помощью механизма нарушения за счет радиационных поправок.

**В четвертой главе** рассматриваются дуальные версии моделей  $N = 3$  и  $N = 4$  супергравитаций и исследуется связь между выбором дуальной версии и возможностью спонтанного нарушения суперсимметрии.

В первом разделе этой главы исследуются модели  $N = 3$  супергравитации. Проводится анализ известных результатов в этой области и показывается, что лишь для дуальной версии "обычного" скрытого сектора с геометрией  $SU(3, 3)/SU(3) \otimes SU(3) \otimes U(1)$  удается осуществить спонтанное нарушение суперсимметрии с тремя произвольными массовыми масштабами, т.е. с возможностью частичного суперхиггс-эффекта  $N = 3 \rightarrow N = 1$ , и с естественным образом исчезающей космологической постоянной. Строится модель, обобщающая такой скрытый сектор на случай взаимодействия с материей. К сожалению, в построенной модели не удается перенести нарушение суперсимметрии из скрытого сектора в наблюдаемый; поля в наблюдаемом секторе остаются безмассовыми и расщепления масс между суперпартнерами не возникает.

Во втором разделе аналогичное построение производится для случая  $N = 4$  супергравитации. Также на основе дуальной версии скрытого сектора с геометрией  $SO(6, 6)/SO(6) \otimes SO(6)$  строится обобщение на случай взаимодействия с материей, допускающее спонтанное нарушение суперсимметрии с четырьмя произвольными масштабами и с исчезающей космологической постоянной. Так же, как и в случае  $N = 4$  супергравитации, нарушение суперсимметрии в построенной модели не передается из скрытого сектора в наблюдаемый.

В третьем разделе приводится построение лагранжианов, описывающих семейства дуальных версий моделей с фиксированной геометрией скалярных полей  $SU(3, m)/SU(m) \otimes SU(3) \otimes U(1)$  для случая  $N = 3$  супергравитации и  $SO(6, m)/SO(m) \otimes SO(6)$  для случая  $N = 4$  супергравитации, содержащих в качестве частных случаев все ранее известные модели, в том числе и построенные в предыдущих двух разделах. Показано, что выбор дуальной версии определяет глобальные симметрии лагранжиана, т.е. и возможный вид калибровочного взаимодействия, что, в свою очередь, определяет возможность спонтанного нарушения суперсимметрии.

**В приложении А** приводится вариант скрытого сектора для модели с ортогональной геометрией, рассмотренной в главе I. **В приложениях Б и В** приведены точные выражения для некоторых генераторов, используемых в главах II и III.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Построены и исследованы модели  $N = 1$  супергравитации с геометрией скалярных полей  $SU(1, m)/SU(m) \otimes U(1)$  и  $SO(2, m)/SO(m) \otimes SO(2)$ . Показано, что в случае ортогональной геометрии после нарушения суперсимметрии генерируется необходимый спектр масс и мягко нарушающий члены.
2. Построены и исследованы модели  $N = 2$  супергравитации, в которых скалярные поля из гипермультиплетов параметризуют несимметрические кватернионные многообразия. Показано, что для одного из двух классов таких моделей

нарушение суперсимметрии ведет к появлению юкавских членов, отсутствующих во всех рассматривавшихся ранее моделях расширенных супергравитаций и существенных для генерации масс фермионов.

3. Построены и исследованы модели  $N = 2$  супергравитации с бесконечномерной калибровочной группой. Используя специфические свойства алгебр Каца–Муди, удалось получить одновременное нарушение суперсимметрии и калибровочной симметрии в таких моделях.
4. Для  $N = 3$  и  $N = 4$  супергравитаций построены семейства лагранжианов, описывающие дуальные версии известных моделей и содержащие в качестве частных случаев все исследованные в литературе модели. Изучены дуальные версии, допускающие частичный суперхиггс-эффект с естественным образом исчезающей космологической постоянной, и продемонстрирована связь между выбором дуальной версии и возможностью спонтанного нарушения суперсимметрии.

## Список литературы

- [1] Цокур В.А. Спонтанное нарушение симметрии в  $N = 1$  супергравитации: ЯФ, 1994, т.57, с.939.
- [2] Tsokur V.A. and Zinoviev Yu.M. Spontaneous Supersymmetry Breaking in  $N = 3$  Supergravity with Matter: IHEP preprint 94-114, Protvino, 1994; ЯФ, в печати.
- [3] Tsokur V.A. and Zinoviev Yu.M. Spontaneous Supersymmetry Breaking in  $N = 4$  Supergravity with Matter: IHEP preprint 94-115, Protvino, 1994; ЯФ, в печати.
- [4] Tsokur V.A. and Zinoviev Yu.M. Dual Versions of Extended Supergravities: IHEP preprint 94-129, Protvino, 1994; to be published Phys. Lett.
- [5] Tsokur V.A. and Zinoviev Yu.M.  $N = 2$  supergravity models, based on the non-symmetric quaternionic manifolds. I. Symmetries and Lagrangians: IHEP preprint 96-22, Protvino, 1996; submitted to Int. J. Mod. Phys. A.
- [6] Tsokur V.A. and Zinoviev Yu.M.  $N = 2$  supergravity models, based on the non-symmetric quaternionic manifolds. I. Gauge interactions, IHEP preprint 96-23, Protvino, 1996; submitted to Int. J. Mod. Phys. A.
- [7] Tsokur V.A. and Zinoviev Yu.M.  $N = 2$  supergravity models with gauge Kac-Moody groups: IHEP preprint 96-32, Protvino, 1996; submitted to *Nucl. Phys.*

*Рукопись поступила 4 июля 1996 г.*

В.А.Цокур.

Нелинейные  $\sigma$ -модели и спонтанное нарушение суперсимметрии в моделях расширенных супергравитаций.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

Редактор М.Л.Фоломешкина.

---

Подписано к печати 09.07.96. Формат 60 × 84/8.

Офсетная печать. Печ.л. 1,00. Уч.-изд.л. 0,77. Тираж 100. Заказ 708.

Индекс 3649. ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

---

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 96-53, И Ф В Э, 1996

---