

K - 642

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-97-47

На правах рукописи
УДК 530.145

КОНДРАШУК
Игорь Николаевич

**КОНЕЧНЫЕ СУПЕРСИММЕТРИЧНЫЕ ТЕОРИИ
И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ К ЗАДАЧЕ
ОБЪЕДИНЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ**

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1997

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию ренормгруппового поведения многозарядных $N = 1$ суперсимметричных теорий в трёх и четырёх пространственно-временных измерениях; построению реалистических конечных суперсимметричных теорий объединения сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий, согласующихся с низкоэнергетической феноменологией; исследованию низкоэнергетических многохиггсовских потенциалов, развитию методов минимизации этих потенциалов и созданию аналитических методов решения систем нелинейных алгебраических уравнений, связанных с задачей минимизации скалярного потенциала в многохиггсовских моделях.

Актуальность проблемы. Современная теоретическая физика в целом, и квантовая теория поля в частности, пронизаны идеями различных симметрий. Одной из таких симметрий является суперсимметрия. Суперсимметрия, предположительно, представляет собой фундаментальную симметрию природы, которая связывает между собой бозонные и фермионные поля. Первоначально она была введена исключительно как чисто теоретическое расширение Пуанкаре-симметрии наблюдаемого мира через добавление к генераторам группы Пуанкаре грассмановых генераторов.

Квантово-полевой анализ суперсимметричных теорий показал, что они имеют более гладкое поведение в ультрафиолетовой области по сравнению с аналогичными несуперсимметричными теориями. Этот эффект обусловлен взаимным сокращением расходящихся вкладов от фермионных и бозонных полей, находящихся в одном супермультиплете. Для четырёхмерных суперсимметричных теорий это сокращение вылилось в так называемые "теоремы о неперенормировке". Теорема о неперенормировке для $N = 1$ теорий гарантирует отсутствие квантовых поправок к суперпотенциалу. Это означает, что ренормгрупповые β -функции юкавских зарядов определяются исключительно аномальными размерностями киральных суперполей. В $N = 2$ суперсимметричной теории Янга-Миллса кали-

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Д.И. Казаков

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Е.А. Иванов

(ЛТФ ОИЯИ)

доктор физико-математических наук

М.И. Высоцкий

(ИТЭФ)

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт Ядерных Исследований РАН

Защита состоится " " 1997 г.

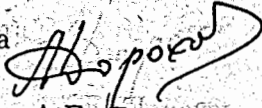
на заседании специализированного Совета К-047.01.01 по адресу: 141980, Дубна Московской обл., ЛТФ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1997 г.

Ученый секретарь специализированного Совета

доктор физико-математических наук


А.Е. Дорохов

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

бровочная β -функция не модифицируется квантовыми поправками за рамками однопетлевого приближения. $N = 4$ суперсимметричная теория обладает свойством ультрафиолетовой конечности во всех порядках теории возмущений.

Таким образом, ультрафиолетовое поведение суперсимметричных теорий заметно улучшается с расширением суперсимметрии вплоть до полной конечности $N = 4$ суперсимметричных теорий. Тем не менее, ренормгрупповое поведение калибровочных и юкавских зарядов в $N = 1$ суперсимметричной теории имеет довольно сложный вид. Соответствующие ренормгрупповые функции могут быть найдены по теории возмущений в рамках стандартной процедуры вычислений в какой-либо схеме вычитаний. Теория при этом может обладать нетривиальным набором фиксированных точек в пространстве зарядов, в которых β -функции зарядов обращаются в ноль.

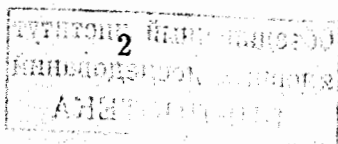
Фиксированная точка может быть эффектом пертурбативного подхода и исчезать в высших порядках теории возмущений, а может быть обусловлена какой-либо глобальной симметрией теории, которая гарантирует её существование во всех порядках теории возмущений. В частности, наличие такой фиксированной точки в пространстве зарядов $N = 1$ суперсимметричной теории может быть обусловлено ультрафиолетовыми свойствами расширенной суперсимметрии теории в данной точке. В этом случае физический интерес представляет изучение свойств устойчивости этих точек. В диссертации показано, что $N = 2$ суперсимметричная точка в пространстве зарядов трёхмерной $N = 1$ суперсимметричной теории Черна-Саймонса проявляется как инфракрасная стабильная точка.

Однако, фиксированная точка в пространстве зарядов $N = 1$ теории, существующая во всех порядках теории возмущений, может быть не связана с какой-либо глобальной симметрией, гарантирующей равенство β -функций зарядов теории нулю во всех порядках теории возмущений. Такая ситуация имеет место в $(3+1)$ измерениях, где помимо конечных $N = 2$ и $N = 4$ суперсимметричных теорий существует целый класс $N = 1$ теорий, также конечных во

всех порядках теории возмущений. Конечность достигается в них через подстройку юкавских зарядов в каждом порядке теории возмущений как полиномиальных функций калибровочного заряда.

В отличие от теорий с расширенной суперсимметрией, в $N = 1$ теориях нет зеркальных партнёров обычных частиц. Это делает конечные $N = 1$ теории реальными кандидатами на роль суперсимметричной теории великого объединения сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий. В настоящее время гипотеза объединения этих взаимодействий получила мощное подтверждение в рамках Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели (МССМ), которая является минимально возможным суперсимметричным расширением Стандартной Модели. С аккуратным учётом всех пороговых эффектов показано, что калибровочные заряды МССМ, продолженные в соответствии с уравнениями ренормгруппы по шкале энергий вверх, сливаются в одной точке. Это объединение также не противоречит всем существующим экспериментальным ограничениям. Такое слияние наводит на мысль, что МССМ является низкоэнергетическим осколком другой, более симметричной теории. Заметим, что суперсимметрия при этом должна быть нарушена мягко, чтобы мы не сталкивались с "проблемой иерархий", обычной для несуперсимметричных ТВО. Хотя вариантов суперсимметричного объединения было предложено очень много, конечные $N = 1$ теории с мягким нарушением суперсимметрии выделены в первую очередь равенством нулю β -функций зарядов (как "жёстких", так и "мягких") и аномальных размерностей масс. Кроме того, условие конечности жёстко фиксирует число поколений материи. При этом явно выделяется группа $SU(5)$, где число поколений безальтернативно равно трём.

Целью работы являлось исследование ренормгруппового поведения многозарядных $N = 1$ суперсимметричных теорий в трёх и четырёх пространственно-временных измерениях, поиск фиксированных точек в пространстве зарядов теории и исследование их устойчивости, построение в точках, существующих во всех порядках теории возмущений, реалистических конечных ТВО с мягким



нарушением суперсимметрии, а также создание методов минимизации многохиггсовских потенциалов.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

- Впервые выполнена перенормировка и изучено ренормгрупповое поведение $N = 1$ суперсимметричной неабелевой теории Черна–Саймонса с материей в $(2+1)$ измерениях. Все ренормгрупповые функции вычислены в лидирующем двухпетлевом приближении как в суперполевым формализме, так и в компонентах суперполей. Все фиксированные точки теории найдены и тип их устойчивости исследован.
- Проведён последовательный анализ конечной суперсимметричной $SU(5)$ теории великого объединения с мягким нарушением суперсимметрии. Показано, что модель редуцируется к Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели на энергиях ниже масштаба объединения взаимодействий и согласуется с существующими экспериментальными ограничениями.
- Предложен метод минимизации скалярного потенциала в моделях с расширенным хиггсовским сектором в присутствии членов мягко нарушающих суперсимметрию. Метод позволяет находить минимум скалярного потенциала типа потенциала Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели с произвольным числом хиггсовских дублетов, не делая априорных предположений о форме минимума.

Практическая ценность. Проведённый в диссертации ренормгрупповой анализ трёхмерной суперсимметричной теории Черна–Саймонса может быть использован для описания критических явлений методами квантовой теории поля. При этом фиксированные точки ассоциируются с критическими (трикритическими) точками, в окрестности которых происходит фазовый переход. Предложенная конечная суперсимметричная ТВО может быть использована как "поставщик" осмысленных граничных условий на пространство параметров МССМ в точке слияния её калибровочных зарядов. Эти

граничные условия могут быть использованы в общей процедуре фитирования пространства свободных параметров МССМ к существующим теоретическим и экспериментальным ограничениям. Это фитирование производится группой профессора де Бура (университет г. Карлсруэ, Германия). Предложенный в третьей главе метод минимизации скалярных потенциалов может быть использован для анализа нарушения электрослабой симметрии в многохиггсовских системах и в попытках объяснить наблюдаемый спектр кварков иерархией вакуумных средних хиггсовских полей.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, на конференции "Физика высоких энергий и квантовая теория поля" (Сочи, 1992), на летней школе "Физика высоких энергий и космология" (Триест, 1996), на конференции "Кварки-96" (Ярославль, 1996), на конференции посвящённой памяти А.Д. Сахарова (Москва, 1996), на конференции "Ренормгруппа-96" (Дубна, 1996).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано восемь работ [1-8].

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и приложения. Работа содержит 98 страниц, включая 2 рисунка и библиографический список литературы из 80 названий.

Содержание работы

Во **введении** очерчен круг исследуемых проблем, обрисованы квантово-полевые аспекты суперсимметричных теорий, подчеркнута важность суперсимметричного подхода к задаче объединения взаимодействий и выделены преимущества конечных $N = 1$ суперсимметричных моделей по сравнению с прочими суперсимметричными теориями объединения.

В первой главе исследуется ренормгрупповое поведение $N = 1$ суперсимметричной неабелевой теории Черна–Саймонса с материей в $(2+1)$ измерениях. Действие для теории имеет вид

$$S = \int d^3x d^2\theta \left[-\frac{1}{4} (D^\alpha \Gamma_a^\beta) D_\beta \Gamma_a^\alpha - \frac{1}{6} g f^{abc} (D^\alpha \Gamma_a^\beta) \Gamma_a^b \Gamma_a^c \right. \\ \left. - \frac{1}{24} g^2 f^{abc} f^{ade} \Gamma_b^\alpha \Gamma_c^\beta \Gamma_d^\alpha \Gamma_e^\beta \right. \\ \left. - \frac{1}{2} (D^\alpha \bar{\Phi}_j + ig \bar{\Phi}_k T_{kj}^\alpha \Gamma_a^\alpha) (D_\alpha \Phi_j - ig \Gamma_a^\alpha T_{jl}^b \Phi_l) \right. \\ \left. - m \bar{\Phi}_j \Phi_j + \frac{1}{4} \eta_0 (\bar{\Phi}_j \Phi_j)^2 + \frac{1}{4} \eta_1 (\bar{\Phi}_j T_{jk}^a \Phi_k)^2 \right], \quad (1)$$

в котором Γ_a^α является вещественным (майорановским) спинорным калибровочным суперполем Черна–Саймонса, минимально взаимодействующим с комплексным киральным суперполем материи Φ_j . Для случая произвольной калибровочной группы и произвольного представления суперполей материи получены общие выражения для калибровочно инвариантных ренормгрупповых функций в лидирующем двухпетлевом приближении. Показано, что в этом общем случае $N = 2$ теория проявляется как фиксированная точка в пространстве зарядов $N = 1$ теории (1), расширенной до уровня, необходимого для её согласованной перенормируемости. С помощью этих общих выражений для ренормгрупповых функций найдены все фиксированные точки в специальных случаях, когда суперполя материи расположены в фундаментальном представлении калибровочных групп $SU(n)$, $Sp(n)$, и $SO(n)$. Устойчивость этих фиксированных точек исследована. Оказалось, что фиксированная точка

$$\eta_0 = 0, \quad \eta_1 = g^2, \quad m = 0,$$

соответствующая $N = 2$ суперсимметрии, является инфракрасной стабильной точкой. Этот результат суперполевого расчёта подтвержден компонентными вычислениями в несуперсимметричной теории с независимыми зарядами самодействия материи, где также найдены все фиксированные точки и исследована их устойчивость. Обсуждаются фиксированные точки, представляющие физический интерес.

Содержание первой главы опубликовано в работах [2-3].

Во второй главе кратко описан метод построения конечных (то есть не требующих бесконечной ультрафиолетовой перенормировки зарядов и масс) $N = 1$ суперсимметричных теорий, предложенный Ермушевым, Казаковым и Тарасовым в середине 80-х. На основе этого метода конструируется конечная суперсимметричная $SU(5)$ теория великого объединения сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий с мягким нарушением суперсимметрии. По своему мультиплетному составу она отличается от минимальной суперсимметричной $SU(5)$ теории великого объединения расширенностью хиггсовского сектора. Уникальность группы $SU(5)$ заключается в том, что требование ультрафиолетовой конечности однозначно фиксирует, что число поколений материи равно трём. Юкавские матрицы суперпотенциала единой теории выбираются в максимально простом виде в пределах произвола, допускаемого условием конечности теории. Выполнена редукция этой ТВО к Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели. Спонтанное нарушение единой симметрии происходит в результате приобретения суперполем материи в присоединённом представлении группы $SU(5)$ ненулевого вакуумного среднего. Для выделения лёгкой хиггсовской пары МССМ потребовано сверхточное сокращение массовых параметров, которое в конечной теории является более осмысленным по сравнению с другими ТВО вследствие неизменности массовых параметров между шкалой спонтанного нарушения единой симметрии M_{GUT} и шкалой спонтанного нарушения супергравитации M_P . Показано, что рассмотренная конечная ТВО с мягким нарушением суперсимметрии выбрасывает следующие граничные условия для МССМ в точке объединения взаимодействий:

- все три калибровочных заряда МССМ равны калибровочному заряду единой теории g_{GUT} .
- массы трёх калибрино МССМ равны массе калибрино единой теории M_5 .
- "мягкие" заряды три-скалярного и би-скалярного взаимодействия МССМ равны $-M_5$, а массы скаляров в членах мягкого

нарушения суперсимметрии равны $\frac{1}{\sqrt{3}}M_5$.

- юкавские заряды равны g_{GUT} , размазанному по поколениям с весовыми единичными векторами n_i и \bar{n}_i , так что

$$y_i^U = n_i y^U, \quad y_i^D = \bar{n}_i y^D, \quad y_i^E = \bar{n}_i y^E, \\ y^U = \frac{4}{\sqrt{15}} g_{GUT}, \quad y^D = y^E = \frac{2}{\sqrt{5}} g_{GUT};$$

вектора n_i и \bar{n}_i задаются в хиггсовском секторе единой теории,

- источником кваркового смешивания является унитарная матрица K_{ij} ,
- массовый параметр МССМ μ представляет собой сумму массовых параметров единой теории.

Все эти величины (g_{GUT} , M_5 , n_i , \bar{n}_i , K_{ij} , μ), не фиксируются условием конечности, являясь свободными параметрами теории.

Обсуждается согласованность рассмотренной модели с существующими экспериментальными ограничениями.

Содержание второй главы опубликовано в работах [1,6,7].

Третья глава посвящена анализу многохиггсовских потенциалов в суперсимметричных расширениях Стандартной Модели с мягким нарушением суперсимметрии. Рассматривается обобщение хиггсовского потенциала Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели на случай произвольного числа хиггсовских дублетов. Предлагается метод, который позволяет найти минимум этого потенциала точно, не делая априорных предположений о форме минимума. Метод использует калибровочную инвариантность теории и редуцирует задачу к поиску минимума скалярного хиггсовского потенциала МССМ. С помощью этого метода доказывалась стабильность низкоэнергетического потенциала конечной модели в D -плоских направлениях и выполнена редукция последней к МССМ. В заключение главы предлагается аналитический метод решения систем нелинейных алгебраических уравнений, связанных с задачей

минимизации скалярного потенциала. Ключевым моментом в методе является то, что нелинейность входит в систему как одна нетривиальная комбинация, что позволяет нам сразу зафиксировать её из условия обнуления детерминанта системы.

Содержание третьей главы опубликовано в работах [4-8].

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации, выносимые на защиту.

В **приложении** приведены формулы трёхмерной $N = 1$ суперсимметрии, которые использовались при суперполевыми расчётах.

Основные результаты диссертации, выносимые на защиту:

1. Выполнена перенормировка $N = 1$ суперсимметричной неабелевой теории Черна–Саймонса с материей в $(2+1)$ измерениях в двухпетлевом приближении для $SU(n)$, $Sp(n)$, и $SO(n)$ калибровочных групп в предположении, что поля материи находятся в фундаментальном представлении этих групп. Ренормгрупповое поведение модели изучено и все фиксированные точки найдены. Эти результаты получены с использованием явного $N = 1$ суперполевого формализма. Устойчивость всех фиксированных точек исследована. Показано, что $N = 2$ суперсимметричная точка является инфракрасной стабильной точкой. Этот результат суперполевого расчёта подтвержден компонентными вычислениями в несуперсимметричной теории, где также найдены все фиксированные точки и исследована их устойчивость.
2. Изучены общие аспекты перенормируемости трёхмерных $N = 1$ суперсимметричных теорий Черна–Саймонса с материей. Показано, что число членов в согласованно перенормируемом лагранжиане зависит от калибровочной группы и представления киральных суперполей материи. Для случая произвольной группы и произвольного представления полей материи показано, что расширенная $N = 2$ суперсимметрия проявляется

как фиксированная точка в пространстве зарядов $N = 1$ теории.

3. На основе конечной $N = 1$ суперсимметричной $SU(5)$ теории с мягким нарушением суперсимметрии сконструирована теория великого объединения сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. Модель согласуется с существующими экспериментальными ограничениями в области низких энергий. Выполнена редукция этой ТВО к Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели.
4. Предложен метод минимизации скалярного потенциала в моделях с расширенным хиггсовским сектором в присутствии членов мягко нарушающих суперсимметрию. Метод использует калибровочную инвариантность теории относительно группы симметрии Стандартной Модели и позволяет находить минимум скалярного потенциала типа потенциала Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели с произвольным числом хиггсовских дублетов, не делая априорных предположений о форме минимума. С помощью этого метода доказана стабильность низкоэнергетического хиггсовского потенциала конечной модели в D -плоских направлениях и выполнена редукция последней к МССМ.
5. Предложен аналитический метод решения систем нелинейных алгебраических уравнений, связанных с задачей минимизации скалярного потенциала, который возникает из $N = 1$ суперсимметричных теорий с расширенным хиггсовским сектором.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

- [1] D.I. Kazakov, I.N. Kondrashuk,
Low-energy predictions of SUSY GUT's: the minimal model versus finite model,
Int. J. Mod. Phys. A7, p.3869-3883 (1992)
- [2] L.V. Avdeev, D.I. Kazakov, I.N. Kondrashuk,
Renormalizations in supersymmetric and nonsupersymmetric non-abelian Chern-Simons field theories with matter,
Nucl. Phys. B391, p.333-357 (1993)
- [3] L.V. Avdeev, D.I. Kazakov, I.N. Kondrashuk,
RG analysis of supersymmetric non-abelian Chern-Simons field theories with matter,
ЯФ, т.56, с.207-215 (1993)
- [4] I.N. Kondrashuk,
Minimization of the scalar Higgs potential in the finite supersymmetric theory of grand unification,
Int. J. Mod. Phys. A11, 989-1006 (1996)
- [5] И.Н. Кондрашук,
О нарушении электрослабой симметрии в Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели,
Письма в ЖЭТФ, т.62, с.465-469 (1995)
- [6] D.I. Kazakov, M.Yu. Kalmykov, I.N. Kondrashuk,
A.V. Gladyshev,
Softly broken finite supersymmetric Grand Unified Theory,
Nucl. Phys. B471, p.389-408 (1996)

[7] I.N. Kondrashuk,
Reduction of the finite grand unification theory to the Minimal Supersymmetric Standard Model,
ЖЭТФ, т.111, с.401-409 (1997)

[8] И.Н. Кондрашук,
Минимизация скалярного потенциала в многохиггсовских моделях,
Препринт ОИЯИ Р2-96-460, 9с., направлено в ЖЭТФ

Рукопись поступила в издательский отдел
17 февраля 1997 года.