

2-98-133

На правах рукописи
УДК 539.12.01

Г-522

ГЛАДЫШЕВ
Алексей Валерьевич

НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ
СУПЕРСИММЕТРИЧНЫХ ТЕОРИЙ
ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Общая характеристика работы

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Д.И.Казakov

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

К.А.Тер-Мартirosян
(РНИИ ИТЭФ)

доктор физико-математических наук

Н.В.Красников
(ИЯИ РАН)

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

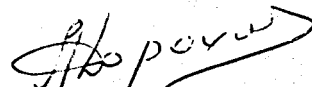
Научно-исследовательский институт ядерной физики
МГУ им.М.В.Ломоносова

Защита состоится "_____" _____ 1998 г.
на заседании диссертационного совета К.047.01.01 по адресу:
141980, Московская обл., г.Дубна, ЛТФ ОИЯИ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "_____" _____ 1998 г.

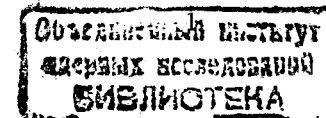
Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук


А.Е.Дорохов

Диссертация посвящена исследованию суперсимметричных расширений Стандартной модели и теорий Великого объединения.

Актуальность проблемы. Построение единой теории фундаментальных взаимодействий было мечтой нескольких поколений физиков. Первый опыт "объединения" принадлежит Максвеллу, показавшему, что электричество и магнетизм в действительности являются проявлением одного электромагнитного взаимодействия. Четверть века назад Вайнберг, Салам и Глэшоу построили единую теорию электрослабых взаимодействий. Появилась теория сильного взаимодействия — квантовая хромодинамика. Сегодня мы еще ближе подошли к созданию единой теории: мы имеем Стандартную модель, которая описывает как качественно, так и количественно, практически все явления, относящиеся к сильным, слабым и электромагнитным взаимодействиям.

Тем не менее, и она не лишена недостатков: в модели имеется слишком много свободных параметров, объединение сильных и электрослабых взаимодействий является лишь формальным, до сих пор пока нет экспериментального подтверждения существования скалярных хиггсовских частиц, и не известно, являются ли они фундаментальными или составными, нет ясного понимания происхождения наблюдаемого спектра масс частиц, не до конца ясно как включить в объединенную теорию гравитацию. Можно добавить к вышеперечисленным недостаткам Стандартной модели и то, что нет естественного объединения полей материи и переносчиков взаимодействий.



Ответы на все эти вопросы, скорее всего, следует искать за пределами Стандартной модели. В последние годы значительное развитие получили квантовополевые модели, обладающие симметрией, связывающей между собой поля с различной статистикой, так называемой суперсимметрией. Суперсимметричные теории обладают рядом интересных особенностей, в частности, в теориях с ненарушенной суперсимметрией происходит "чудесное" сокращение ультрафиолетовых расходимостей.

Наиболее простой моделью, соединяющей в себе привлекательные черты Стандартной модели и суперсимметрии является Минимальная суперсимметричная стандартная модель (МССМ). Построить эту модель довольно просто: для каждой частицы Стандартной модели добавим суперпартнера с теми же квантовыми числами, и добавим также второй дублет хиггсовских скалярных полей.

Лагранжиан Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели имеет вид, состоящий из членов, описывающих калибровочные взаимодействия, юкавские взаимодействия и членов, нарушающих суперсимметрию:

$$L = L_{gauge} + L_{Yukawa} + L_{breaking}$$

где L_{gauge} и L_{Yukawa} имеют вид:

$$L_{gauge} = \frac{1}{4} \sum_{SU(3), SU(2), U(1)} [\text{Tr} W^\alpha W_\alpha + \text{Tr} \bar{W}^{\dot{\alpha}} \bar{W}_{\dot{\alpha}}] + \sum_{Matter} \Phi_i^\dagger e^{g_3 \hat{G} + g_2 \hat{V} + g_1 \hat{V}'} \Phi_i,$$

$$L_{Yukawa} = h_{\alpha\beta}^u \hat{Q}_\alpha \hat{U}_\beta^c \hat{H}_2 + h_{\alpha\beta}^d \hat{Q}_\alpha \hat{D}_\beta^c \hat{H}_1 + h_{\alpha\beta}^l \hat{L}_\alpha \hat{l}_\beta^c \hat{H}_1 + \mu \hat{H}_1 \hat{H}_2.$$

$$-L_{breaking} = m_0^2 \sum_{scalars} |\varphi_i|^2 + \left[\frac{1}{2} m_{1/2} \sum_{gauginos} \lambda_\alpha \lambda_\alpha + A m_0 (h_{\alpha\beta}^u Q_\alpha U_\beta^c H_2 + h_{\alpha\beta}^d Q_\alpha D_\beta^c H_1 + h_{\alpha\beta}^l L_\alpha l_\beta^c H_1) - B m_0 \mu H_1 H_2 + h.c. \right].$$

где m_0 — масса скалярных частиц, а $m_{1/2}$ — масса спинорных частиц на шкале объединения, A и B — соответственно трилинейный и билинейный параметры мягкого нарушения суперсимметрии.

Однако, пока не получено экспериментальных данных, подтверждающих существование суперпартнеров. Тем не менее, Минимальная суперсимметричная стандартная модель привлекательна тем, что в рамках этой модели можно построить наиболее самосогласованные теории Великого объединения: несмотря на значительное увеличение числа частиц, в модели почти не появляется новых свободных параметров; наконец, в рамках модели удается предсказать значения некоторых параметров, в частности массы хиггсовских частиц и суперпартнеров.

Целью работы являлось изучение низкоэнергетических предсказаний Минимальной суперсимметричной стандартной модели, в частности расчет масс хиггсовских частиц и суперпартнеров, определение фундаментальных параметров суперсимметрии, а также изучение возможности обнаружения суперсимметрии на эксперименте.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

- В рамках метода эффективного потенциала рассчитаны однопетлевые поправки к массам нейтральных хиггсовских бозонов в МССМ с учетом вкладов всех частиц МССМ;
- Построена реалистическая конечная суперсимметричная теория Великого объединения, исследован вопрос о мягком нарушении суперсимметрии в рамках данной модели;
- На основе анализа экспериментальных данных и различных теоретических ограничений определены разрешенные области пространства параметров суперсимметричного расширения Стандартной модели с мягким нарушением суперсимметрии;
- Рассмотрена возможность обнаружения суперсимметрии на эксперименте, а также дана интерпретация аномальных событий с большими Q^2 , обнаруженных на ускорителе HERA в рамках суперсимметричного расширения Стандартной модели с нарушенной R -четностью.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова ОИЯИ, на рабочих совещаниях "Квантовая теория поля и физика высоких энергий" (Звенигород, 1994, 1995), международной конференции "Кварки-96" (Ярославль, 1996) и международной конференции "Неускорительная новая физика" (Дубна, 1997).

Публикации. По материалам исследований, представленных в диссертации опубликовано 9 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Объем работы составляет 125 страниц, включая 32 иллюстрации и библиографический список из 96 наименований.

Содержание работы

Во введении рассмотрены основные принципы построения Минимальной суперсимметричной стандартной модели.

В первой главе рассмотрен однопетлевой эффективный потенциал хиггсовских полей МССМ и приведены результаты предсказания масс нейтральных хиггсовских бозонов. Приведены явные аналитические формулы для однопетлевых радиационных поправок к массам нейтральных хиггсовских бозонов, полученные методом эффективного потенциала. Проведено сравнение результатов, полученных используемым методом с явным вычислением однопетлевых фейнмановских диаграмм и показано, что используемое приближение является достаточно хорошим для оценки массы легчайшего хиггсовского бозона h . Для доминирующих поправок, пропорциональных массе t -кварка, проведено суммирование ведущих логарифмов методом ренормгруппы. Показано, что ренормгрупповое суммирование вносит некоторые изменения в предсказания для масс хиггсовских бозонов.

Вторая глава посвящена конечной суперсимметричной теории

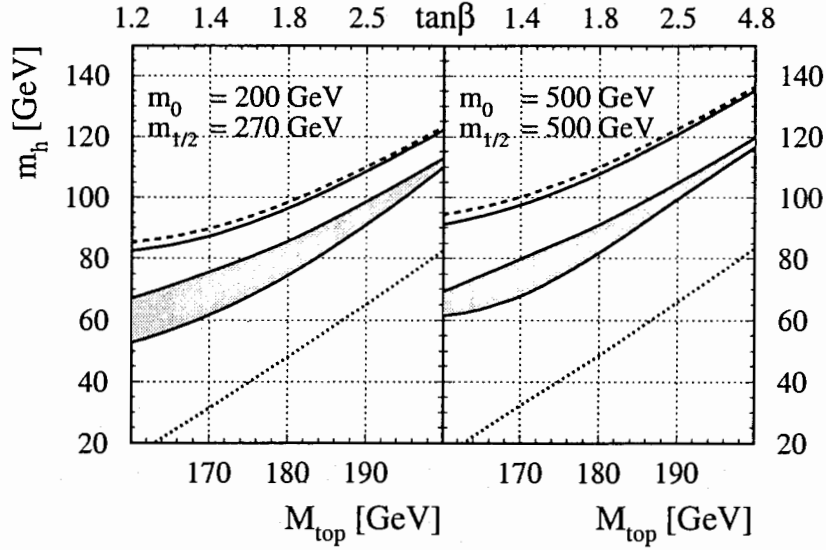


Рис. 1: Масса легчайшего CP -четного хиггсовского бозона как функция массы t -кварка в борновском приближении (штриховые линии), с учетом всех однопетлевых радиационных поправок (пунктирные линии, $\mu > 0$) для двух различных значений массовых параметров m_0 и $m_{1/2}$. Учет двухпетлевых вкладов в значительной степени уменьшает величину однопетлевых поправок, что показано заштрихованной областью (верхняя ее граница соответствует $\mu > 0$, нижняя — $\mu < 0$). Жирная линия под пунктирной соответствует учету вкладов только третьего поколения частиц, который, очевидно, является доминирующим.

Великого объединения на группе $SU(5)$. Условие конечности теории позволяет связать значения юкавских и калибровочных констант связи, и дает, таким образом, возможность делать некоторые предсказания относительно спектра масс кварков и лептонов, иерархия которых определяется иерархией вакуумных средних хиггсовских полей. Рассмотрено мягкое нарушение суперсимметрии в рамках конечной $SU(5)$ модели и показано, что

условия конечности для членов мягкого нарушения суперсимметрии автоматически приводят к их универсальности на масштабе объединения. Граничные условия для параметров мягкого нарушения суперсимметрии также оказываются связанными между собой:

$$m_0^2 = \frac{1}{3}m_{1/2}^2; \quad A_U = A_D = A_L = -m_{1/2}; \quad B \equiv B_\Phi = -m_{1/2}.$$

Выполнена редукция конечной модели к МССМ. Проведено сравнение предсказаний модели с некоторыми теоретическими и экспериментальными ограничениями.

Третья глава диссертации посвящена анализу Минимальной суперсимметричной стандартной модели с различными ограничениями, накладываемыми на пространство параметров (так называемой Constrained MSSM). Эти ограничения включают в себя объединение калибровочных и юкавских констант связи при высоких энергиях, радиационное нарушение электрослабой симметрии, экспериментальное ограничение на массы суперчастиц и хиггсовского бозона, требование нейтральности легчайшей суперчастицы, ограничения следующие из анализа распада $b \rightarrow s\gamma$. Рассмотрены различные области пространства параметров, на основе χ^2 -анализа получены предсказания наиболее вероятных значений параметров суперсимметрии и масс суперпартнеров. Также показано, что последние экспериментальные данные по ненаблюдению чарджино и хиггсовского бозона исключают большие области в пространстве параметров:

- Для сценария с малым $\tan \beta$ масса хиггсовского бозона меньше 88 (80) ГэВ при $\mu > 0$ ($\mu < 0$). Области пространства

Значения параметров и масс в ГэВ		
	малый $\tan \beta$	большой $\tan \beta$
$m_0, m_{1/2}$	200, 400	1000, 1000
$\mu(M_Z), \tan \beta$	-755, 1.65	-985, 30
$Y_t(m_t), A_t(M_Z)$	0.008, -633	0.006, -1322
$\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0$	174, 342	443, 836
$\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0$	779, 785	1025, 1040
$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm$	342, 784	835, 1040
$\tilde{g}, \tilde{q}, \tilde{l}$	943, 855, 325	2195, 2155, 1140
h, H	73, 1014	113, 1257
A, H^\pm	1010, 1014	1257, 1260

параметров, исключаемые на этом основании показаны на рис.3 для различных знаков μ . Экспериментальное ограничение на массу хиггсовского бозона 77 ГэВ (при большой массе m_A , что соответствуем МССМ, (см. таблицу) исключает решение с $\mu < 0$ для этого сценария и оставляет только возможность $\mu > 0$.

- Для случая большого $\tan \beta$ ограничения на массу чарджино, многопетлевые расчеты процесса $b \rightarrow s\gamma$, а также данные ALEPH и CLEO оставляют разрешенной лишь небольшую область пространства параметров ($m_0 > 500, m_{1/2} > 700$ GeV) (см. рис.2); при этом массы скварков оказываются больше 1 ТэВ. Масса хиггсовского бозона оказывается на 15 ГэВ больше и он недоступен наблюдению на LEP II.

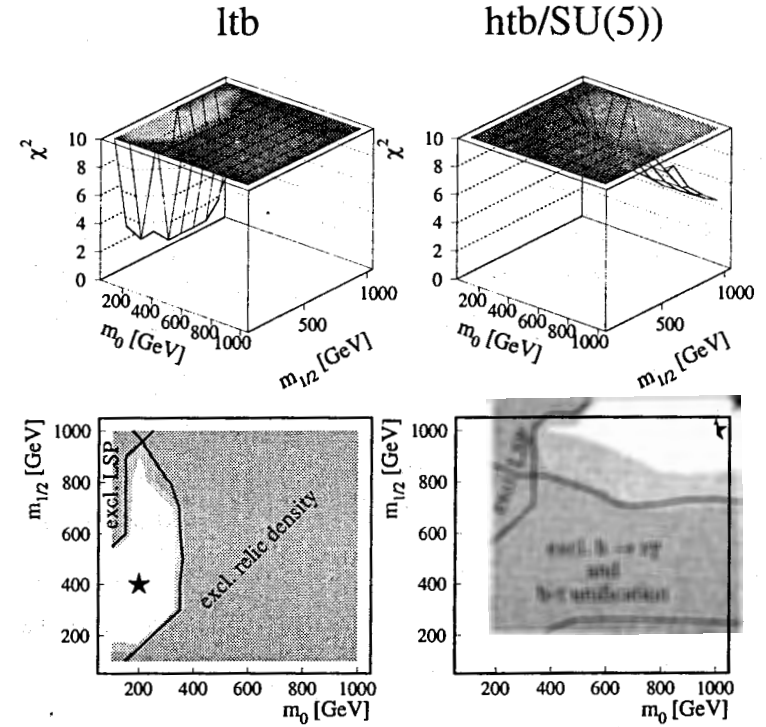


Рис. 2: Распределение χ^2 для сценариев с малым и большим $\tan \beta$. Звездочками указаны оптимальные значения параметров. Показаны также области пространства параметров, исключаемые различными ограничениями.

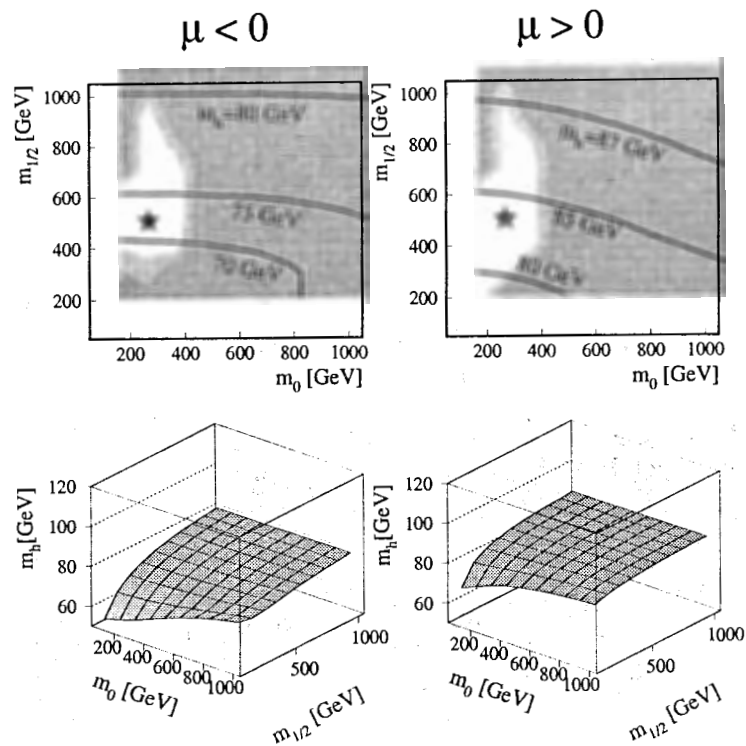


Рис. 3: Масса легчайшего хиггсовского бозона (сплошные линии) на плоскости $(m_0, m_{1/2})$ (верхняя часть рисунка) и для различных знаков μ (нижняя часть рисунка) в случае малого $\tan \beta$ ($\tan \beta = 1.65$).

В четвертой главе рассмотрены два примера применения пакета аналитических и численных вычислений CompHEP для расчета процессов в рамках суперсимметричных расширений Стандартной модели. Рассмотрена возможность экспериментального обнаружения чарджино (суперпартнера заряженного хиггсовского бозона и W -бозона) на коллайдере LEP. Проанализированы две возможные моды распада чарджино. Предложен ряд обрезающих по кинематическим переменным для эффективного выделения сигнала и подавления фона. Дан анализ недавно экспериментально обнаруженных в $e\mu$ -столкновениях на ускорителе HERA аномальных событий с очень большими Q^2 как следствия суперсимметричного расширения Стандартной модели с нарушенной R -четностью. Показано, что существующие установки — LEP и TEVATRON являются взаимодополняющими в поиске суперсимметрии с нарушенной R -четностью.

В заключении перечислены основные результаты, выносимые на защиту.

В приложения вынесены различные громоздкие формулы.

Основные результаты диссертации, выносимые на защиту

- В рамках Минимальной суперсимметричной стандартной модели методом эффективного потенциала получены явные аналитические формулы для однопетлевых поправок к массам нейтральных хиггсовских бозонов с учетом вкладов всех частиц МССМ.

- Методом ренормгруппы просуммированы во всех петлях поправки к массам хиггсовских бозонов в МССМ, пропорциональные юкавской константе t -кварка.
- Построена конечная суперсимметричная $SU(5)$ теория Великого объединения. Рассмотрено мягкое нарушение в модели и показано, что конечность членов мягкого нарушения суперсимметрии автоматически приводит к их универсальности на шкале объединения M_{GUT} . Проведено сравнение предсказаний модели с различными экспериментальными и теоретическими ограничениями.
- Исследовано пространство параметров Минимальной суперсимметричной стандартной модели в рамках сценария Великого объединения. Рассмотрены различные ограничения на параметры модели, определены разрешенные области в пространстве параметров, а также наиболее вероятные значения параметров.
- Рассмотрена возможность экспериментального наблюдения суперпартнера заряженного хиггсовского бозона и W -бозона — чарджино на ускорителе LEP. Рассмотрены процессы рождения и распада чарджино, предложен ряд обрезаний по кинематическим переменным для эффективного выделения сигнала и подавления фона.
- Предложена интерпретация аномальных событий с очень большими значениями переданных импульсов, обнаруженных на ускорителе HERA, как проявления суперсимметрии

с нарушенной R -четностью. Рассмотрена возможность наблюдения последней на установках LEP и TEVATRON, и показано, что эти два ускорителя являются взаимодополняющими при поиске суперсимметрии с нарушенной R -четностью.

Публикации по материалам диссертации

1. A.V. Gladyshev, D.I. Kazakov, W. de Boer, G. Burkart, R. Ehret, *MSSM predictions of the neutral Higgs boson masses and LEP II production cross sections*, Nucl. Phys. **B498** (1997) 3–27.
2. A.V. Gladyshev, D.I. Kazakov, *Renormalization group improved radiative corrections to the supersymmetric Higgs boson masses*, Mod. Phys. Lett. **A10** (1995) 3129–3137.
3. D.I. Kazakov, M.Yu. Kalmykov, I.N. Kondrashuk, A.V. Gladyshev, *Softly Broken Finite Supersymmetric Grand Unified Theory*, Nucl. Phys. **B471** (1996) 389–408.
4. A.V. Gladyshev, D.I. Kazakov, M.Yu. Kalmykov, I.N. Kondrashuk, *Finite $SU(5)$ SUSY GUT*, Proceedings of the International Seminar "Quarks-96", Yaroslavl', Russia.
5. W. de Boer, G. Burkart, R. Ehret, W. Oberschulte-Beckmann, U. Schwickerath, V. Bednyakov, A.V. Gladyshev, D.I. Kazakov, S.G. Kovalenko, *Constrained Minimal Supersymmetry and Discovery Potential at a Linear Collider*, In: e^+e^- Collisions

- at TeV Energies: The Physics Potential, Part D, edited by P.M.Zerwas, DESY 96-123D, 377-384.
6. W. de Boer, R. Ehret, J. Lautenbacher, A.V. Gladyshev, D.I. Kazakov, *Updated Combined Fit of Low Energy Constraints to Minimal Supersymmetry*, IEKP-KA-97-15.
 7. A.S. Belyaev, A.V. Gladyshev, A.V. Semenov, *Minimal Supersymmetric Standard Model within CompHEP Software Package*, IFT-P-075-97.
 8. A.S. Belyaev, A.V. Gladyshev, *Possibility of Chargino Search at LEP II*, JINR E2-97-76.
 9. A.S. Belyaev, A.V. Gladyshev, *Could we learn more about HERA high Q^2 anomaly from LEP200 and TEVATRON ?*, hep-ph/9704343.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 мая 1998 года.