

На правах рукописи

Танйылдызы Шюкрю Ханиф

Редкие распады мезонов и бозоны Хиггса в
рамках суперсимметричных расширений
Стандартной модели

Специальность 01.04.02 —
«Теоретическая физика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2015

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор
Казаков Дмитрий Игоревич

кандидат физико-математических наук, с.н.с
Бедняков Александр Вадимович

Официальные оппоненты: **Дубинин Михаил Николаевич**,
доктор физико-математических наук,
НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова,
ведущий научный сотрудник

Демидов Сергей Владимирович,
кандидат физико-математических наук,
ФГБУН Институт ядерных исследований РАН,
научный сотрудник

Ведущая организация: Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", ФГБУ ГНЦ - Институт физики высоких энергий

Защита состоится “_____” _____ г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 на базе Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований по адресу: 141980, г. Дубна, Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Объединенного института ядерных исследований (http://wwwinfo.jinr.ru/announce_disser.htm).

Автореферат разослан “_____” _____ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 720.001.01, д.ф.-м.н.

Арбузов Андрей Борисович

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Целью данной работы является изучение свойств ряда суперсимметричных расширений Стандартной модели с целью ее обнаружения в процессах с участием бозонов Хиггса и редких распадах.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить зависимость сечения рождения бозонов Хиггса на Большом адронном коллайдере (БАК) в рамках Минимальной суперсимметричной модели (МССМ) и исследовать возможность его усиления по сравнению с предсказаниями Стандартной модели (СМ). Учитывая известные ограничения, найти область пространства параметров модели, в которой происходит заметное увеличение сечения.
2. Создать универсальный пакет на Mathematica, Peng4BSM@LO, который позволит в рамках произвольной перенормируемой теории, выходящей за пределы СМ, вычислять вклады в коэффициенты Вильсона эффективных операторов, описывающих переходы между фермионами СМ одинакового заряда, принадлежащих разным поколениям (так называемые FCNC). Провести вычисление коэффициентов Вильсона в ряде моделей за пределами СМ.
3. Провести всесторонний анализ суперсимметричных расширений СМ дополнительными “неголоморфными” членами, мягко-нарушающими суперсимметрию. Получить ограничения пространство параметров и изучить феноменологические следствия характерных сценариев в рамках таких моделей.
4. Исследовать пространство параметров МССМ в предположении возможности нестрогого объединения констант юкавского взаимодействия для тау-лептона, боттом- и топ-кварка на шкале Теории Великого Объединения (ТВО). Учесть возможную неуниверсальность в массах суперпартнеров калибровочных бозонов (гейджино), мотивированной расширенной группой калибровочной симметрии $G = SU(4)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R$.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В рамках МССМ показано, что за счет виртуальных поправок от суперпартнеров тяжелых кварков можно получить усиление сечения рождения тяжелых бозонов Хиггса при глюонном слиянии. На конкретном

примере продемонстрировано, что для относительно лёгкого топ скварка и умеренно тяжёлого дополнительного нейтрального бозона Хиггса H_0 возможно получить существенное повышение вероятности его рождения в ограниченном пространстве параметров. Рассмотрен вопрос, связанный с потенциальной вырожденностью топ кварка с его легчайшим суперпартнером в рамках рассматриваемого сценария. Изучены ограничения на сечение рождения пары легких топ скварков, которые также могут представлять интерес в связи с поисками суперсимметрии на БАК.

2. Разработан новый пакет `Peng4BSM@LO`, написанный для системы компьютерной алгебры `Mathematica`. Код позволяет вычислять вклады Новой физики от однопетлевых диаграмм типа “пингвин” в коэффициенты функции операторов, нарушающих “аромат” в нейтральном токе. Пакет тщательно протестирован и может служить основой для исследования не только суперсимметричных расширений, но и других перенормируемых расширений СМ.
3. Изучены следствия добавления “неголоморфных”, мягко нарушающих суперсимметрию членов в лагранжиан МССМ. Рассмотрены редкие распады B -мезонов и ограничения, связанные с ненаблюдением суперпартнеров на БАК. Обнаружено, что в то время как легчайший хиггсовский бозон и тяжелые скалярные суперпартнеры фермионов СМ оказываются не очень чувствительными к новым параметрам, влияние на спектр и свойства более тяжелых бозонов Хиггса и легчайших сфермионов оказывается существенным. Продемонстрировано, как дополнительный параметр смешивания μ' для суперпартнеров бозонов Хиггса (хиггсино) влияет на спектр суперчастиц для двух характерных точек в пространстве параметров модели. Показано также, что новые параметры существенно обогащают феноменологию и позволяют получить массу топ скварка в районе 180 ГэВ при массе легчайшего хиггса равной 125 ГэВ.
4. Исследованы феноменологические следствия МССМ с частичным (квази-) объединением юкавских констант и неуниверсальностью в массах суперпартнеров калибровочных бозонов (гейджино), мотивированные группой калибровочной симметрий $G = SU(4)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ на шкале ТВО. Найдены решения, позволяющие удовлетворить известным ограничениям на количество темной материи (ТМ) во Вселенной. Кроме того, предсказываются сравнительно большие сечения рассеяния нейтралино на нуклонах, что позволяет обнаружить их в экспериментах по прямому детектированию темной материи. В добавок к этому поведен

сравнительный анализ генераторов спектра ISAJET и SoftSusy и найдено качественное согласие между предсказанием, полученными на их основе.

Научная новизна:

1. Проведен всесторонний анализ возможности усиления сечения рождения тяжёлого бозона Хиггса не только за счет модификации констант юкавского взаимодействия связи в рамках МССМ, но и за счет дополнительных вкладов от виртуальных скварков.
2. Создан универсальный программный пакет Peng4BSM@LO, работающий совместно с генераторами правил Фейнмана FeynRules/SARAH и диаграмм Фейнмана FeynArts, который вычисляет вклады в Вильсоновские коэффициенты конкретных эффективных операторов, возникающие из однопетлевых вкладов типа “пингвин”.
3. Исследованы феноменологические следствия добавления неголоморфных членов, мягко нарушающих суперсимметрию - $(\mu', A'_t, A'_b A'_\tau)$, к лагранжиану МССМ и продемонстрирована высокая чувствительность предсказаний к новым параметрам. Впервые показано, что в отличие от МССМ, в рамках указанного расширения удастся получить легкий скалярный топ-кварк без необходимости значительной тонкой настройки (fine-tuning).
4. Впервые проведен анализ квази-Юкавского объединения в рамках суперсимметричных моделей с учетом неуниверсальности в массах гейджино. Сделано тщательное сравнение программ ISAJET и SoftSusy/SuperIsoRelic для генерации масс суперчастиц и вычисления ряда наблюдаемых, связанных со свойствами темной материи.

Практическая значимость работ, составляющих основу диссертации, состоит в возможности использования полученных результатов в качестве отправной точки для дальнейших исследований специфических свойств как суперсимметричных, так и несуперсимметричных расширений СМ.

Достоверность полученных в диссертации результатов достигается за счёт использования строгих и апробированных методов суперсимметричных моделей, их применения к изучению бозонов хиггса, редких распадов, тёмной материи и пространства параметров суперсимметрии.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- The XXth International Workshop, High Energy Physics and Quantum Field Theory, September 24 - October 1, 2011, Sochi, Russia.
- The XXI International Workshop, High Energy Physics and Quantum Field Theory, June 23 – June 30, 2013, Saint Petersburg Area, Russia.
- Университет “Ege”, кафедра физики, в зале им. “Dr. Harun Egrifes”, 11 июля 2013, в 11:00, Izmir, Turkiye.
- Summer School “Theory Challenges for LHC Physics” and Workshop “Calculations for Modern and Future Colliders”, July 20 - July 30, 2015, Dubna, Moscow region, Russia.

Личный вклад соискателя в результаты является определяющим. Автор, работая с сотрудниками ОИЯИ, самостоятельно выполнил теоретические исследования редких распадов мезонов и бозонов Хиггса в рамках разных суперсимметричных расширений Стандартной модели, также разработал алгоритмы для автоматизации вычислений однопетлевых вершинных диаграмм и подготовил компьютерные коды для эффективного использования операторов и вильсонских коэффициентов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных изданиях, все изданы в журналах рекомендованных ВАК. Ещё 2 работы как просидинги изданы в виде трудов конференций.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации **135** страниц текста с **31** рисунком и **7** таблицами. Список литературы содержит **270** наименования.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются основные цели и задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая ценность диссертации, указываются сведения, касающиеся апробации работы, публикациях, а также дается краткий обзор основного содержания диссертации.

Первая глава имеет обзорный характер и содержит обзор научной литературы по изучаемым проблемам. Кроме того, в первой главе дается описание Стандартной модели, её проблем, как экспериментального, так и

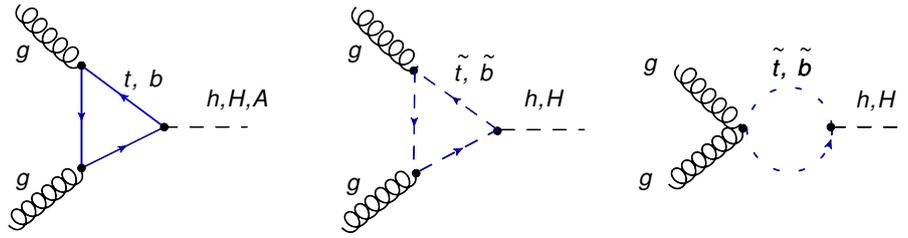


Рис. 1: Диаграммы, дающие вклад в рождение бозона Хиггса при глюонном слиянии в лидирующем порядке теории возмущений.

теоретического характера. Также дан критический обзор минимального суперсимметричного расширения СМ (МССМ) и различных ограничений, касающихся свойств бозонов Хиггса, редких распадов и тёмной материи.

Во **второй главе** изучен процесс рождения тяжёлого бозона Хиггса в результате глюонного слияния. Актуальность исследования свойств бозонов Хиггса и Новой физики во многом связана с вводом в эксплуатацию Большого адронного коллайдера. Известно, что вероятность рождения тяжёлых частиц подавлена их массами, поэтому ожидается, что в первую очередь будут найдены лёгкие частицы. Тем не менее, иногда вероятность рождения тяжелых частиц может быть повышена за счет некоторых факторов. Именно это может происходить в случае тяжелого бозона Хиггса в рамках МССМ [1, 2].

В рамках СМ рождение бозона Хиггса на адронном коллайдере в основном проходит при слиянии двух глюонов [3]. Так как хиггсовский бозон не несет цветового заряда, соответствующий процесс описывается однопетлевой треугольной диаграммой (см. Рис. 1), которая и дает основной вклад. Это также верно для глюонного слияния в МССМ, однако в некоторых случаях ассоциативное рождение с двумя дополнительными b-кварками (струями) является более благоприятным [1].

Поскольку мы говорим о новых частицах в петлевых диаграммах, их вклад зависит от масс, т.е. чем меньше масса, тем больше вклад. Кроме этого, вклад от скварков пропорционален массе соответствующих кварков, так что только третье поколение играет существенную роль. Для численного анализа вклада от виртуальных частиц необходимо знать значения масс скварков и их матрицу смешивания. Были рассмотрены два сценария для их вычисления. В первом случае в рамках МССМ с универсальными “мягко”-нарушающими суперсимметрию параметрами (m_0 , $m_{1/2}$, A_0 и $\tan \beta$) находились спектр масс и матрицы смешивания для различных точек в пространстве параметров. Путем сканирования последнего были найдены области, когда вклад от скварков в сечение дает значительное усиление. Оказалось, что для этого требуется сравнительно лёгкие топ-скварки, которые предсказываются при очень боль-

ших и отрицательных значениях параметра A_t , подразумевающих отрицательное A_0 . Найденные области в пространстве универсальных параметров были проверены на совместность с различными ограничениями на редкие процессы $B \rightarrow X_s \gamma$ [4], $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ [5, 6], $g - 2$ мюона [7] и на реликтовую плотность тёмной материи (DM) [8]. Кроме того, учитывались точные данным электрослабой физики для M_W и $\sin^2 \theta_{eff}$ [9], а также результаты прямых поисков бозонов Хиггса и суперпартнёров. Обнаружилось, что рассматриваемые универсальные сценарии с большим отрицательным A_0 не совместимы с ограничением для $b \rightarrow s \gamma$. Чтобы обойти эту проблему и иметь сечение рождения на уровне нескольких pb, был рассмотрен второй сценарий с нарушением универсальности в хиггсовском секторе (так называемая неуниверсальная Хиггсовская модель (NUHM) [10]). Выбрав в качестве независимых переменных параметр смещения Хиггса, μ , и массу CP-нечетного тяжелого бозон Хиггса, m_A , удается удовлетворить всем ограничениям и получить заметное усиление сигнала. Стоит заметить, что характерной особенностью рассматриваемых сценариев является предсказание относительно легкого топ-скварка.

Наш общий вывод состоит в том, что для сравнительного лёгкого t-скварка и умеренно тяжёлого H_0 возможно получить существенное повышение вероятности рождения последнего не только за счет $\tan \beta$, но и за счет виртуальных скварков в ограниченном пространстве параметров. При этом получается относительно высокое сечение парного рождения топ скварков, что также может представлять интерес в связи с прямыми поисками суперсимметрии.

В **третьей главе** рассматривается проблема автоматизированного вычисления коэффициентов Вильсона для операторов, меняющих аромат в нейтральном токе (FCNC). Процессы, связанные с переходами между фермионами одного заряда, но разных поколений (ароматов), традиционно привлекают большой интерес и с теоретической и экспериментальной точки зрения. Такие переходы отсутствуют в СМ на древесном уровне и, соответственно, они подавлены по сравнению с аналогичными переходами с участием заряженных частиц. В связи с этим, они могут быть использованы в качестве превосходящего зонда Новой физики, так как Новая физика может значительно изменить предсказания СМ. На данный момент экспериментально нет никаких существенных отклонений от СМ. Соответственно, эти редкие процессы накладывают очень важные ограничения на Физику за пределами Стандартной модели. Типичными примерами являются распады $b \rightarrow s \gamma$ [11, 12, 13] и $B_s \rightarrow \mu \mu$ [14, 15, 16], которые используются при исследовании различных суперсимметричных расширений Стандартной модели. Из-за того, что новые частицы предсказанные физикой за пределами Стандартной модели, как

правило гораздо тяжелее, чем “стандартные”, соответствующий вклад в амплитуду для рассматриваемых процессов может быть включен в коэффициенты Вильсона операторов, входящих в эффективный гамильтониан слабого взаимодействия [17].

Для того, чтобы рассчитать коэффициенты Вильсона для конкретного FCNC-процесса в суперсимметричных или моделях с двумя дублетами хиггсовских бозонов, можно использовать различные коды, доступные в литературе, например, `SuperIso` [18, 19, 20], `SUSY_FLAVOUR` [21, 22] или `SPheno_v3` [23] (см. еще [24]).

Для выполнения аналогичных расчетов в рамках диссертационного исследования был создан пакет `Peng4BSM@LO` на `Mathematica`, который может быть использован вместе с `FeynArts` [25, 26, 27, 28] и `FeynCalc` [29]. Однако, в отличие от вышеупомянутых кодов, предлагаемый подход дает возможность получить выражение для коэффициентов Вильсона практически в любой перенормируемой модели, выходящей за пределы СМ. Правила Фейнмана для рассматриваемых моделей могут быть получены в формате `FeynArts` с помощью таких кодов, как `FeynRules` [30, 31, 32], `LanHEP` [33, 34] и `SARAH` [35, 36, 37, 38]. Следует, однако, подчеркнуть, что изучаемые перенормируемые расширения не должны содержать FCNC-операторы на древесном уровне.

В четвертой главе изучается расширение МССМ так называемыми “неголоморфными” мягко нарушающими суперсимметрию слагаемыми. В связи с тем, что в экспериментах ATLAS [39] и CMS [40] не видят указаний на существование суперсимметрии, минимальные суперсимметричные модели во многом утрачивают свою привлекательность. Обнаруженный бозон Хиггса с массой 125 ГэВ при описании в рамках МССМ требует довольно тяжёлый стоп, что в свою очередь приводит к проблеме тонкой настройки в МССМ. Кроме того, результаты ЛHCб для редких распадов В-мезонов существенно ограничивают пространство параметров простейших суперсимметричных моделей. В связи с этим, становятся все более популярными неминимальные суперсимметричные расширения СМ, например, такие как NMSSM (следующая за минимальной суперсимметричная стандартная модель) [41] или модели с нарушением R-чётности [42].

Существует, однако, возможность расширить МССМ гораздо более простым способом, добавив неголоморфные (НГ) члены в секторе мягкого нарушения суперсимметрии (МНС) [43]. В рамках текущей работы новые слагаемые добавляются к лагранжиану МССМ и выглядят следующим образом:

$$\mathcal{L}'_{soft} = \mu' \tilde{H}_u \cdot \tilde{H}_d + \tilde{Q} H_d^\dagger A'_u \tilde{U} + \tilde{Q} H_u^\dagger A'_d \tilde{D} + \tilde{L} H_u^\dagger A'_e \tilde{E} + \text{h.c.} \quad (1)$$

где μ' - член смешивания для хиггсино, $A'_{u,d,e}$ - неголоморфные трилинейные скалярные константы связи. Обозначения сходны с теми, что используются в обычном (голоморфном) суперсимметричном лагранжиане, однако, μ' и $A'_{u,d,e}$ независимые параметры НГМССМ. Стоит отметить, что рассматриваемое расширение не предполагает добавление каких бы то новых частиц к спектру МССМ, а лишь добавляет указанные взаимодействия к уже имеющимся.

Дополнительные члены в формуле (1) приводят к новым вкладам в массовые матрицы для суперсимметричных частиц. Например, массовая матрица скалярных партнеров фермионов как в МССМ, так и в НГМССМ имеет вид

$$M_{\tilde{f}}^2 = \begin{pmatrix} m_{\tilde{f}_L \tilde{f}_L^*} & X_{\tilde{f}} \\ X_{\tilde{f}}^* & m_{\tilde{f}_R \tilde{f}_R^*} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

записанная в базисе $(\tilde{f}_L, \tilde{f}_R)$ и $(\tilde{f}_L^*, \tilde{f}_R^*)$, где $\tilde{f} = \tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{e}$ выражают верхние скварки, нижние скварки и с-лептоны, соответственно. Однако, матричные элементы (2) в НГМССМ можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} m_{\tilde{u}_L \tilde{u}_L^*} &= -\frac{1}{24}(-3g_2^2 + g_1^2)(-v_u^2 + v_d^2) + \frac{1}{2}(2m_q^2 + v_u^2 Y_u^\dagger Y_u), \\ m_{\tilde{u}_R \tilde{u}_R^*} &= \frac{1}{2}(2m_u^2 + v_u^2 Y_u Y_u^\dagger) + \frac{1}{6}g_1^2(-v_u^2 + v_d^2), \\ X_{\tilde{u}} &= -\frac{1}{\sqrt{2}}[v_d(\mu Y_u^\dagger + A_u'^\dagger) - v_u A_u^\dagger], \\ \hline m_{\tilde{d}_L \tilde{d}_L^*} &= -\frac{1}{24}(3g_2^2 + g_1^2)(-v_u^2 + v_d^2) + \frac{1}{2}(2m_q^2 + v_d^2 Y_d^\dagger Y_d), \\ m_{\tilde{d}_R \tilde{d}_R^*} &= \frac{1}{2}(2m_d^2 + v_d^2 Y_d Y_d^\dagger) + \frac{1}{12}g_1^2(-v_d^2 + v_u^2), \\ X_{\tilde{d}} &= -\frac{1}{\sqrt{2}}[v_u(\mu Y_d^\dagger + A_d'^\dagger) - v_d A_d^\dagger], \\ \hline m_{\tilde{e}_L \tilde{e}_L^*} &= \frac{1}{2}v_d^2 Y_e^\dagger Y_e + \frac{1}{8}(-g_2^2 + g_1^2)(-v_u^2 + v_d^2) + m_l^2, \\ m_{\tilde{e}_R \tilde{e}_R^*} &= \frac{1}{2}v_d^2 Y_e Y_e^\dagger + \frac{1}{4}g_1^2(-v_d^2 + v_u^2) + m_e^2, \\ X_{\tilde{e}} &= \frac{1}{\sqrt{2}}[-v_u(\mu Y_e^\dagger + A_e'^\dagger) + v_d A_e^\dagger]. \end{aligned} \quad (3)$$

Указанные выражения помимо параметров МССМ - калибровочных констант $g_{1,2}$, юкавских матриц $Y_{u,d,e}$ и вакуумных средних $v_{u,d}$ хиггсовских дублетов содержат слагаемые, возникающие благодаря (1).

Легко заметить, что неголоморфные члены не дают вклад в диагональные элементы указанных матриц, а модифицируют лишь смешивание. При

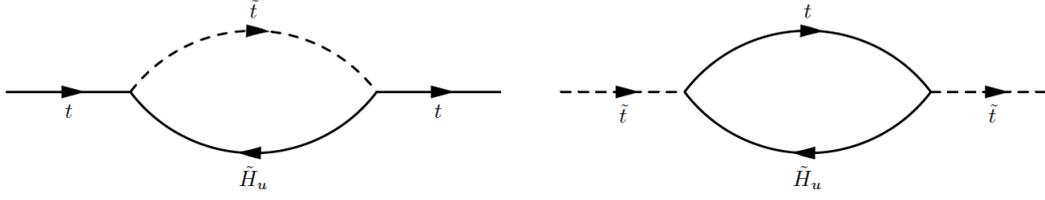


Рис. 2: Диаграммы с виртуальным хиггсино, дающие вклад в собственную энергию топ кварка и его суперпарнеров.

этом, параметр μ' не появляется в массах скалярных суперчастиц на древесном уровне, так как он вводится в лагранжиан как смешивание хиггсино. Тем не менее, благодаря юкавскому взаимодействию, зависимость от него может возникнуть на уровне одной петли через диаграммы, представленные на Рис.2 для случая t-кварка и t-скварка. Подобного рода рассуждения справедливы и для хиггсовского сектора. На древесном уровне соответствующие массы не модифицируются и различие с МССМ возникает только при учете радиационных поправок. В тоже время этого оказывается достаточно, чтобы удовлетворить ограничениям, связанным с наблюдаемым значением массы хиггса без необходимости очень тонкой подстройки.

В отличие от скалярных частиц параметр μ' входит в массовые матрицы для нейтралино и чарджино уже в древесном приближении:

$$M_{\tilde{\chi}^0} = \begin{pmatrix} M_1 & 0 & -\frac{1}{2}g_1 v_d & \frac{1}{2}g_1 v_u \\ 0 & M_2 & \frac{1}{2}g_2 v_d & -\frac{1}{2}g_2 v_u \\ -\frac{1}{2}g_1 v_d & \frac{1}{2}g_2 v_d & 0 & -\mu + \mu' \\ \frac{1}{2}g_1 v_u & -\frac{1}{2}g_2 v_u & -\mu + \mu' & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

и

$$M_{\tilde{\chi}^\pm} = \begin{pmatrix} M_2 & \frac{1}{\sqrt{2}}g_2 v_u \\ \frac{1}{\sqrt{2}}g_2 v_d & -\mu' + \mu \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $M_{\tilde{\chi}^0}$ - матрица для нейтралино в базисе $(\tilde{B}, \tilde{W}^0, \tilde{H}_d^0, \tilde{H}_u^0)$ и $(\tilde{B}, \tilde{W}^0, \tilde{H}_d^0, \tilde{H}_u^0)$, а $M_{\tilde{\chi}^\pm}$ - матрица для чарджино в базисе $(\tilde{W}^-, \tilde{H}_d^-)$ и $(\tilde{W}^+, \tilde{H}_u^+)$.

Из указанных выражений (4,5) легко можно сделать вывод о сильной зависимости соответствующих масс от нового параметра μ' . Например, при условии $\mu' \approx \mu$ учет неголоморфных членов может привести к почти безмассовой легчайшей суперсимметричной частице (ЛСЧ) - хиггсино. Все указанные обстоятельства во многом определяет феноменологию, обсуждаемую в данной главе на примере двух характерных точек, исключенных в рамках обычной МССМ. Особое внимание уделяется тщательному анализу влияния дополнительных параметров на спектр частиц.

В **пятой главе** рассматривается еще один сценарий, связанный с возможностью неполного объединения юкавских констант $t - b - \tau$ на шкале $M_{\text{GUT}} \sim 2 \times 10^{16}$ ГэВ. Мотивирован он в суперсимметричных ТВО, основанных на калибровочной группе $G = SU(4)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ (модель 4-2-2) и содержащих дополнительные хиггсовские поля. В простейшем случае благодаря смешиванию с новыми скалярными степенями свободы отклонение от точного объединения Юкавских взаимодействий на шкале ТВО может быть описано следующим образом [44]:

$$y_t : y_b : y_\tau = |1 + C| : |1 - C| : |1 + 3C| \quad (6)$$

где C количественно задает отклонение и может быть ограничено $C \lesssim 0.2$ (6). Модель 4-2-2 имеет очень много преимуществ относительно других высоко-энергетических теорий [45]. Дискретная левая-правая симметрия (ЛП-симметрия) уменьшает количество константа связи от трёх до двум с помощью $g_L = g_R$. Кроме этого, эта симметрия гарантирует равенство масс гейджино групп $SU(2)_L$ и $SU(2)_R$ на шкале M_{GUT} . В добавок к этому, ЛП-симметрия требует существования правого нейтрино.

В этой главе диссертации в рамках МССМ анализируются низкоэнергетические следствия соотношения (6) и возможной неуниверсальностью масс гейджино $M_{1,2,3}$ на шкале M_{GUT} , диктуемой асимптотическим соотношением [46]:

$$M_1 = \frac{3}{5}M_2 + \frac{2}{5}M_3 \quad , \quad (7)$$

которое следует в предположении ЛП-симметрии на шкале ТВО и того факта, что $U(1)_Y$ выражается в модели 4-2-2 как

$$Y = \sqrt{\frac{3}{5}}I_{3R} + \sqrt{\frac{2}{5}}(B - L). \quad (8)$$

Здесь M_1 , M_2 и M_3 являются асимптотическими массами гейджино групп $U(1)_Y$, $SU(2)_L$ и $SU(3)_c$, а I_{3R} и $(B - L)$ являются диагональными операторами групп $SU(2)_R$ и $SU(4)_c$, соответственно. С помощью двух независимых кодов `ISAJET` и `SoftSUSY/SuperISO Relic` проведено сравнительное сканирование пространства параметров на совместность с известными ограничениями на редкие распады и прямые поиски суперсимметричных частиц. Особое внимание уделено решению проблемы темной материи во Вселенной и возможности получения наблюдаемого значения реликтовой плотности частиц ТМ - нейтралино. Выделены характерные каналы (ко)аннигиляции нейтралино в зависимости от соотношения компонент нейтральных гейджино и хиггсино.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Показано, что для относительно лёгкого скалярного топ-кварка и умеренно тяжёлого хиггсовского бозона H_0 возможно получить существенное повышение вероятности рождения последнего в ограниченной области пространства параметров. Одновременно с этим предсказывается сравнительно большое сечение рождения пары топ скварков, что может представлять интерес в связи с прямыми поисками суперсимметрии.
2. Разработан пакет `Peng4BSM @ LO` для автоматизированного расчета коэффициентов Вильсона для ряда эффективных операторов, меняющих аромат в нейтральном токе (FCNC). Код использует общую лоренцеву структуру рассматриваемых диаграмм типа "пингвин" и не привязан к какой-либо конкретной модели, что позволяет применять его не только к суперсимметричным, но и несуперсимметричным расширениям СМ.
3. Исследована феноменология МССМ расширенной так называемыми "неголоморфными" мягко нарушающими суперсимметрию слагаемыми. Для двух характерных точек в пространстве параметров МССМ изучены ограничения на величину новых параметров, входящих в неголоморфный лагранжиан. Продемонстрировано, что в определенной области параметров можно получить легкий топ-скварк без необходимости тонкой подстройки. При этом, масса последнего сравнима с массой топ-кварка, что существенно усложняет его поиск в коллайдерных экспериментах.
4. С помощью двух независимых кодов `ISAJET` и `SoftSusy` проведен анализ пространства параметров МССМ с учетом теоретических ограничений, накладываемых на параметры модели предположением о существовании суперсимметричной ТВО с калибровочной группой $G = SU(4)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ на шкале $M_{\text{GUT}} \sim 2 \times 10^{16}$ ГэВ. Изучены возможные каналы (ко)аннигиляции темной материи и выделены области, удовлетворяющие экспериментальным ограничениям на ее количество и предсказывающие обнаружение последней в экспериментах по ее прямому детектированию.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. *Bednyakov A. V., Kazakov D. I., Tanyildizi S. H.* SUSY Enhancement of Heavy Higgs Production // Int. J. Mod. Phys. — 2011. — Т. A26. — С. 4187–4202. — arXiv: 1106.4385 [hep-ph].
- A2. *Bednyakov A. V., Tanyildizi S. H.* A Mathematica Package for Calculation of One-Loop Penguins in FCNC Processes // Int. J. Mod. Phys. — 2014. — Т. 26, № 04. — С. 1550042. — arXiv: 1311.5546 [hep-ph].
- A3. *Un C. S.* [и др.] Generalized Soft Breaking Leverage for the MSSM // Phys. Rev. — 2015. — Т. D91, № 10. — С. 105033. — arXiv: 1412.1440 [hep-ph].
- A4. *Shafi Q., Tanyildizi S. H., Un C. S.* Neutralino Dark Matter and Other LHC Predictions from Quasi Yukawa Unification // Nucl. Phys. — 2015. — Т. B. — arXiv: 1503.04196 [hep-ph].
- A5. *Bednyakov A. V., Kazakov D. I., Tanyildizi S. H.* SUSY enhancement of heavy Higgs production // PoS. — 2011. — Т. QFTHEP2011. — С. 066.
- A6. *Tanyildizi S. H., Bednyakov A. V.* The Mathematica package for calculation of one-loop penguin diagrams for FCNC processes // PoS. — 2013. — Т. QFTHEP2013. — С. 088.

Список литературы

1. *Djouadi A.* The Anatomy of electro-weak symmetry breaking. II. The Higgs bosons in the minimal supersymmetric model // Phys. Rept. — 2008. — Т. 459. — С. 1–241. — arXiv: hep-ph/0503173 [hep-ph].
2. *Dittmaier S.* [и др.] Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 1. Inclusive Observables. — arXiv: 1101.0593 [hep-ph].
3. *Georgi H. M.* [и др.] Higgs Bosons from Two Gluon Annihilation in Proton Proton Collisions // Phys. Rev. Lett. — 1978. — Т. 40. — С. 692.
4. *Barberio E.* [и др.] Averages of b -hadron and c -hadron Properties at the End of 2007. — arXiv: 0808.1297 [hep-ex].
5. *Aaltonen T.* [и др.] Search for $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $B_d^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ decays with $2fb^{-1}$ of $p\bar{p}$ collisions // Phys. Rev. Lett. — 2008. — Т. 100. — С. 101802. — arXiv: 0712.1708 [hep-ex].
6. *Abazov V. M.* [и др.] Search for the rare decay $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ // Phys. Lett. — 2010. — Т. B693. — С. 539–544. — arXiv: 1006.3469 [hep-ex].
7. *Stockinger D.* The Muon Magnetic Moment and Supersymmetry // J. Phys. — 2007. — Т. G34. — R45–R92. — arXiv: hep-ph/0609168 [hep-ph].

8. *Komatsu E.* [и др.] Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation // *Astrophys. J. Suppl.* — 2009. — Т. 180. — С. 330—376. — arXiv: 0803.0547 [astro-ph].
9. *Heinemeyer S., Hollik W., Weiglein G.* Electroweak precision observables in the minimal supersymmetric standard model // *Phys. Rept.* — 2006. — Т. 425. — С. 265—368. — arXiv: hep-ph/0412214 [hep-ph].
10. *Ellis J. R., Olive K. A., Santoso Y.* The MSSM parameter space with nonuniversal Higgs masses // *Phys. Lett.* — 2002. — Т. B539. — С. 107—118. — arXiv: hep-ph/0204192 [hep-ph].
11. *Lees J. P.* [и др.] Precision Measurement of the $B \rightarrow X_s \gamma$ Photon Energy Spectrum, Branching Fraction, and Direct CP Asymmetry $A_{CP}(B \rightarrow X_{s+d} \gamma)$ // *Phys. Rev. Lett.* — 2012. — Т. 109. — С. 191801. — arXiv: 1207.2690 [hep-ex].
12. *Lees J. P.* [и др.] Measurement of $B(B \rightarrow X_s \gamma)$, the $B \rightarrow X_s \gamma$ photon energy spectrum, and the direct CP asymmetry in $B \rightarrow X_{s+d} \gamma$ decays // *Phys. Rev.* — 2012. — Т. D86. — С. 112008. — arXiv: 1207.5772 [hep-ex].
13. *Hermann T., Misiak M., Steinhäuser M.* $\bar{B} \rightarrow X_s \gamma$ in the Two Higgs Doublet Model up to Next-to-Next-to-Leading Order in QCD // *JHEP.* — 2012. — Т. 11. — С. 036. — arXiv: 1208.2788 [hep-ph].
14. *Lees J. P.* [и др.] Search for $B \rightarrow K^{(*)} \nu \bar{\nu}$ and invisible quarkonium decays // *Phys. Rev.* — 2013. — Т. D87, № 11. — С. 112005. — arXiv: 1303.7465 [hep-ex].
15. *Aaij R.* [и др.] Measurement of the $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ branching fraction and search for $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decays at the LHCb experiment // *Phys. Rev. Lett.* — 2013. — Т. 111. — С. 101805. — arXiv: 1307.5024 [hep-ex].
16. *Chatrchyan S.* [и др.] Measurement of the $B(s)$ to $\mu^+ \mu^-$ branching fraction and search for B_0 to $\mu^+ \mu^-$ with the CMS Experiment // *Phys. Rev. Lett.* — 2013. — Т. 111. — С. 101804. — arXiv: 1307.5025 [hep-ex].
17. *Buras A. J.* Weak Hamiltonian, CP violation and rare decays // Probing the standard model of particle interactions. Proceedings, Summer School in Theoretical Physics, NATO Advanced Study Institute, 68th session, Les Houches, France, July 28-September 5, 1997. Pt. 1, 2. — 1998. — С. 281—539. — arXiv: hep-ph/9806471 [hep-ph]. — URL: <http://alice.cern.ch/format/showfull?sysnb=0282793>.
18. *Mahmoudi F.* SuperIso v2.3: A Program for calculating flavor physics observables in Supersymmetry // *Comput. Phys. Commun.* — 2009. — Т. 180. — С. 1579—1613. — arXiv: 0808.3144 [hep-ph].
19. *Mahmoudi F.* SuperIso v3.0, flavor physics observables calculations: Extension to NMSSM // *Comput. Phys. Commun.* — 2009. — Т. 180. — С. 1718—1719.

20. *Arbey A., Mahmoudi F.* SuperIso Relic v3.0: A program for calculating relic density and flavour physics observables: Extension to NMSSM // *Comput. Phys. Commun.* — 2011. — T. 182. — C. 1582–1583.
21. *Rosiek J.* [и др.] SUSY_FLAVOR: A Computational Tool for FCNC and CP-violating Processes in the MSSM // *Comput. Phys. Commun.* — 2010. — T. 181. — C. 2180–2205. — arXiv: 1003.4260 [hep-ph].
22. *Crivellin A.* [и др.] SUSY_FLAVOR v2: A Computational tool for FCNC and CP-violating processes in the MSSM // *Comput. Phys. Commun.* — 2013. — T. 184. — C. 1004–1032. — arXiv: 1203.5023 [hep-ph].
23. *Porod W., Staub F.* SPheno 3.1: Extensions including flavour, CP-phases and models beyond the MSSM // *Comput. Phys. Commun.* — 2012. — T. 183. — C. 2458–2469. — arXiv: 1104.1573 [hep-ph].
24. *Mahmoudi F.* [и др.] Flavour Les Houches Accord: Interfacing Flavour related Codes // *Comput. Phys. Commun.* — 2012. — T. 183. — C. 285–298. — arXiv: 1008.0762 [hep-ph].
25. *Eck H.* FeynArts 2.0 - Development of a Generic Feynman Diagram Generator // Thesis, Würzburg. — 1995.
26. *Hahn T.* Generating Feynman diagrams and amplitudes with FeynArts 3 // *Comput. Phys. Commun.* — 2001. — T. 140. — C. 418–431. — arXiv: hep-ph/0012260 [hep-ph].
27. *Hahn T., Schappacher C.* The Implementation of the minimal supersymmetric standard model in FeynArts and FormCalc // *Comput. Phys. Commun.* — 2002. — T. 143. — C. 54–68. — arXiv: hep-ph/0105349 [hep-ph].
28. *Fritzsche T.* [и др.] The Implementation of the Renormalized Complex MSSM in FeynArts and FormCalc // *Comput. Phys. Commun.* — 2014. — T. 185. — C. 1529–1545. — arXiv: 1309.1692 [hep-ph].
29. *Mertig R., Bohm M., Denner A.* FEYN CALC: Computer algebraic calculation of Feynman amplitudes // *Comput. Phys. Commun.* — 1991. — T. 64. — C. 345–359.
30. *Christensen N. D., Duhr C.* FeynRules - Feynman rules made easy // *Comput. Phys. Commun.* — 2009. — T. 180. — C. 1614–1641. — arXiv: 0806.4194 [hep-ph].
31. *Christensen N. D.* [и др.] A Comprehensive approach to new physics simulations // *Eur. Phys. J.* — 2011. — T. C71. — C. 1541. — arXiv: 0906.2474 [hep-ph].
32. *Alloul A.* [и др.] FeynRules 2.0 - A complete toolbox for tree-level phenomenology // *Comput. Phys. Commun.* — 2014. — T. 185. — C. 2250–2300. — arXiv: 1310.1921 [hep-ph].
33. *Semenov A.* LanHEP: A Package for the automatic generation of Feynman rules in field theory. Version 3.0 // *Comput. Phys. Commun.* — 2009. — T. 180. — C. 431–454. — arXiv: 0805.0555 [hep-ph].

34. *Semenov A.* LanHEP - a package for automatic generation of Feynman rules from the Lagrangian. Updated version 3.1. — arXiv: 1005.1909 [hep-ph].
35. *Staub F.* SARAH. — arXiv: 0806.0538 [hep-ph].
36. *Staub F.* From Superpotential to Model Files for FeynArts and CalcHep/CompHep // Comput. Phys. Commun. — 2010. — T. 181. — C. 1077–1086. — arXiv: 0909.2863 [hep-ph].
37. *Staub F.* SARAH 3.2: Dirac Gauginos, UFO output, and more // Comput. Phys. Commun. — 2013. — T. 184. — arXiv: 1207.0906 [hep-ph]. — [Comput. Phys. Commun.184,1792(2013)].
38. *Staub F.* SARAH 4 : A tool for (not only SUSY) model builders // Comput. Phys. Commun. — 2014. — T. 185. — C. 1773–1790. — arXiv: 1309.7223 [hep-ph].
39. *Aad G.* [и др.] Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC // Phys. Lett. — 2012. — T. B716. — C. 1–29. — arXiv: 1207.7214 [hep-ex].
40. *Chatrchyan S.* [и др.] Observation of a new boson with mass near 125 GeV in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV // JHEP. — 2013. — T. 06. — C. 081. — arXiv: 1303.4571 [hep-ex].
41. *Fayet P.* Supergauge Invariant Extension of the Higgs Mechanism and a Model for the electron and Its Neutrino // Nucl. Phys. — 1975. — T. B90. — C. 104–124.
42. *Hall L. J., Suzuki M.* Explicit R-Parity Breaking in Supersymmetric Models // Nucl. Phys. — 1984. — T. B231. — C. 419.
43. *Jack I., Jones D. R. T.* Nonstandard soft supersymmetry breaking // Phys. Lett. — 1999. — T. B457. — C. 101–108. — arXiv: hep-ph/9903365 [hep-ph].
44. *Dar S.* [и др.] Sparticle Spectroscopy with Neutralino Dark matter from t-b-tau Quasi-Yukawa Unification // Phys. Rev. — 2011. — T. D84. — C. 085015. — arXiv: 1105.5122 [hep-ph].
45. *Lazarides G., Shafi Q.* Comments on 'Monopole Charges in Unified Gauge Theories' // Nucl. Phys. — 1981. — T. B189. — C. 393.
46. *Gogoladze I., Khalid R., Shafi Q.* Yukawa Unification and Neutralino Dark Matter in $SU(4)(c) \times SU(2)(L) \times SU(2)(R)$ // Phys. Rev. — 2009. — T. D79. — C. 115004. — arXiv: 0903.5204 [hep-ph].