

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д. В. СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи

УДК 539.12.01

Сукачев Алексей Игоревич

СМЕШИВАНИЕ НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ
В МИНИМАЛЬНОЙ СУПЕРСИММЕТРИЧНОЙ
СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ С НАРУШЕНИЕМ
CP-ИНВАРИАНТНОСТИ

01.04.23 — физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2009

Работа выполнена на кафедре общей ядерной физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

М.Н. Дубинин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

А.А. Пивоваров (ИЯИ РАН), г. Москва

кандидат физико-математических наук

Н.В. Никитин (НИИЯФ МГУ), г. Москва

Ведущая организация:

Государственный научный центр Российской Федерации — Институт физики высоких энергий, г. Протвино.

Защита диссертации состоится 4 декабря 2009 г. в 15 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова (119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 5, “19 корпус НИИЯФ МГУ”) в ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына.

Автореферат разослан 23 октября 2009 г.

Ученый секретарь

Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций

доктор физико-математических наук, профессор

С.И. Страхова

I. Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Окончательное подтверждение Стандартной Модели (далее — *СМ*) либо обнаружение возможных малых эффектов, не укладывающихся в ее рамки, является приоритетной задачей современной физики высоких энергий. Одним из важнейших направлений поиска считается открытие и исследование свойств скалярного бозона Хиггса — единственной частицы, предсказываемой *СМ*, но до сих пор не найденной в эксперименте. Именно скалярный сектор *СМ* связан с наибольшим числом трудностей, с которыми сталкивается Стандартная Модель, например: проблемой калибровочных иерархий, количеством поколений фундаментальных фермионов, вопросами бариогенезиса и т.д. Без выявления характеристик скалярных бозонов невозможно и корректное объяснение механизма генерации масс фундаментальных частиц (далее — *механизм Хиггса*). Наконец, хиггсовский потенциал *СМ* является *СР*-четным, а возможности построения моделей нарушения *СР*-инвариантности на основе единственного скалярного *SU(2)*-дублета представляются весьма ограниченными и связанными только лишь с комплексностью матричных элементов ККМ-матрицы¹. При этом само происхождение этой матрицы объясняется механизмом Хиггса, а наличие *СР*-нарушающей фазы — числом поколений фундаментальных фермионов.

Попытки решения проблем *СМ* приводят к выходу за ее рамки и рассмотрению эффектов “новой физики” при энергиях существенно выше 100 ГэВ², доступных прямой экспериментальной проверке сегодня. Большим числом интересных теоретико-полевых и феноменологических свойств обладает минимальная суперсимметричная стандартная модель (далее — *МССМ*), позволяющая решить или хотя бы указать на способы разрешения многих сложностей, с которым сталкивается *СМ*, и гарантирующая существование, по крайней мере, одного легкого нейтрального бозона Хиггса с массой меньше 135 ГэВ.

Как известно, двухдублетный хиггсовский сектор *МССМ* содержит три нейтральных скаляра и два заряженных. В рамках сценариев *МССМ* с сильным *СР*-нарушением дополнительные квадратные диаграммы с обменами заряженными бозонами Хиггса

¹*ККМ-матрица* — матрица Кабиббо-Кобаяши-Маскава, описывающая смешивание кварков различных поколений в секторе заряженных слабых токов.

²Здесь и далее используется естественная система единиц: $\hbar = c = 1$.

могли бы вносить заметные вклады в величину расщепления масс Δm_{LS} и в параметры смешивания систем нейтральных мезонов. В этой связи особенно интересны приложения МССМ к рассмотрению проблемы нарушения CP -инвариантности в процессах смешивания нейтральных K^0 -, B_d^0 - и B_s^0 -мезонов как основных и, на данный момент, единственных систем, в которых нарушение CP -симметрии наблюдается экспериментально. На основе подобного рассмотрения можно было бы получить определенные ограничения на пространство параметров МССМ из сравнения предсказанных теоретических значений с экспериментальными данными.

Системы нейтральных мезонов представляют значительный научный интерес, активно исследуются на существующих В-фабриках (BaBar (SLAC) и Belle (КЕК)) и будут также изучаться на коллайдерах нового поколения, в частности входящем в строй ускорителе LHC (CERN). Возможные ограничения на пространство параметров МССМ, в том числе на массу заряженного скаляра, могли бы служить ориентирами для дальнейших экспериментальных исследований по указанной тематике, и одновременно задавать определенный масштаб наблюдаемых, на котором вероятно обнаружение эффектов “новой физики”.

Цели диссертационной работы

Основными целями настоящей работы являются:

1. Получение аналитических выражений для вкладов диаграмм МССМ с обменом заряженными скалярами в основные наблюдаемые параметры смешивания систем $K^0 - \bar{K}^0$, $D^0 - \bar{D}^0$, $B_d^0 - \bar{B}_d^0$ и $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ мезонов — расщепление масс Δm_{LS} и величину косвенного нарушения CP -инвариантности — как в рамках четырехфермионного приближения, так и в рамках точного расчета;
2. Численный анализ полученных выражений с позиции управляющих параметров выбранного сценария МССМ — величин m_{H^\pm} и $\text{tg}\beta$ — и определение иерархии слагаемых во вкладах от диаграмм с обменами заряженными скалярами;
3. Исследование возможности ограничения пространства параметров МССМ на основании сравнения полученных численных результатов с экспериментальными данными с учетом как погрешностей эксперимента, так и возможно больших теоретических неопределенностей.

Основные новые результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Получены выражения для вкладов диаграмм МССМ в величины расщепления масс (Δm_{LS}^K) и косвенного нарушения CP -инвариантности $|\varepsilon_K|$ в системе нейтральных каонов на основе рассмотрения квадратных диаграмм, содержащих вершины юкавского взаимодействия кварков с заряженными бозонами Хиггса. Показано, что вклады от обменов заряженными скалярами являются малыми по сравнению со вкладами СМ в широкой области пространства параметров МССМ и уменьшаются с ростом отношения вакуумных средних скалярных дублетов модели ($\text{tg}\beta$) и массы заряженного бозона Хиггса (m_{H^\pm}).
2. Найдены упрощенные выражения для вкладов диаграмм МССМ с обменами заряженными скалярами в рамках четырехфермионного приближения. Установлен их общий предельный случай с результатами точного расчета. Получена характерная степенная зависимость МССМ от отношения вакуумных средних скалярных дублетов модели ($\text{tg}\beta$) для двух областей плоскости ($\text{tg}\beta$, m_{H^\pm}), уточняющая результаты более ранних исследований по данной тематике.
3. В диссертации впервые получены полные выражения для *всех* аналогов функций Высоцкого—Инами—Лима (СМ), возникающих при интегрировании диаграмм с обменами заряженными бозонами Хиггса по петлевому импульсу, через безразмерные параметры ξ_i , представляющие собой отношения квадратов масс виртуальных частиц на внутренних линиях диаграмм. Доказано наличие общего предела с результатами четырехфермионного приближения при фиксации параметра обрезания в интегралах последнего.
4. На основании численного анализа наблюдаемых с использованием метода Битюкова-Красникова произведена оценка возможных ограничений пространства параметров МССМ в ее проекции на плоскость ($\text{tg}\beta$, m_{H^\pm}) в рамках четырехфермионного приближения и точного расчета. Выделена область малых значений $\text{tg}\beta \sim 5-10$, где обнаружение вкладов “новой физики” возможно с различимостью $\kappa > 86\%$ и статистической достоверностью $\zeta > 1.05\sigma$ при умеренных ($m_{H^\pm} < 325$ ГэВ), и с $\kappa > 97.5\%$ и $\zeta > 2\sigma$ — при малых ($m_{H^\pm} < 150$ ГэВ) значениях массы заряженного скаляра. Предложены два способа нормировки полученных численных

результатов с подстановкой в конечные выражения “токовых”, либо “конституэнтных” масс виртуальных кварков. Показана предпочтительность первого типа нормировок.

5. Проведено обобщение результатов по вкладам диаграмм МССМ в величины основных наблюдаемых, полученных для систем нейтральных каонов, на системы нейтральных $B_{d,s}$ - и D -мезонов. Для систем D^0 -мезонов обосновано применение четырехфермионного приближения. На основании исследования систем B_s^0 -мезонов впервые установлено наличие серьезных отклонений ($> 1.5\sigma$) от результатов СМ в области больших $\text{tg}\beta > 40$ при малых значениях массы заряженного скаляра $m_{H^\pm} < 150$ ГэВ. Осуществлена приближенная оценка вкладов в исследуемые наблюдаемые от обменов суперпартнерами частиц СМ в рамках режима отщепления их масс.

Практическая ценность работы

Полученные в работе ограничения на пространство параметров МССМ с CP -нарушением задают ориентиры как для последующих экспериментальных исследований систем нейтральных мезонов, так и для теоретического анализа различных феноменологических сценариев МССМ. Результаты работы позволяют выделить наиболее предпочтительные для дальнейшего изучения феноменологические сценарии, включая малоизученные модели с сильным CP -нарушением. Накопление статистики действующих В-фабрик и ввод в эксплуатацию коллайдера ЛHC (в первую очередь, детектора LHCb) позволит на основании проведенного в настоящей работе анализа еще более сузить область допустимых значений регулирующих параметров выбранной модели, в том числе и массы заряженного бозона Хиггса.

Рассмотренная в работе модель МССМ с CP -нарушением допускает существование легкого заряженного скаляра с массой менее 80 ГэВ, не противоречащее экспериментальным ограничениям на массу заряженного бозона Хиггса в пределе CP -сохранения. Проведенный анализ численных данных подтверждает такую возможность, указывая новые направления для экспериментальных и теоретических исследований сценариев МССМ с сильным нарушением CP -инвариантности.

Развитый в работе формализм расчета квадратных диаграмм может быть без труда обобщен для проведения вычислений в других системах, в частности исследования

процессов типа $b \rightarrow s + \gamma$, а также для анализа полулептонных распадов нейтральных мезонов, представляющих значительный интерес в контексте поиска проявлений “новой физики” за рамками СМ.

Личный вклад автора

Основные результаты, представленные к защите, получены самим автором.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались: 1). На международной конференции “Ломоносов-2005” (МГУ, 2005 г.); 2). На международном научном семинаре “Interplay of collider and flavor physics” (ЦЕРН, 2007 г.); 3). В рамках IX межвузовской научной школы молодых специалистов “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине” (НИИЯФ МГУ, 2008 г.); 4). На международной конференции “Ломоносовские чтения” (МГУ, 2009 г.); а также на семинарах Отдела теоретической физики высоких энергий НИИЯФ МГУ.

Публикации

Материалы диссертации изложены в семи публикациях. Основные результаты, представленные к защите, опубликованы в четырех статьях, перечень которых приведен в конце автореферата.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений общим объемом 179 страниц (в том числе 37 страниц приложений), включая 28 таблиц, 19 рисунков и список цитированной литературы из 153 наименований.

II. Содержание работы

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы, анализируется актуальность темы проводимого исследования, а также дается краткое описание содержания глав диссертации.

В первой главе диссертационной работы осуществляется подробный разбор тематики диссертации и производится литературный обзор работ других авторов по выбранному направлению исследования. Первая глава состоит из четырех разделов.

В разделе 1 гл. I дается краткое изложение развития выбранной проблематики. В § 1.1 перечислены основные трудности, возникающие перед СМ; показано, что большинство указанных сложностей прямо или косвенно связано со скалярным сектором Стандартной Модели, с одной стороны, и с феноменом нарушения CP -инвариантности в системах нейтральных мезонов — с другой.

В § 1.2 дается краткая справка по основным этапам изучения систем нейтральных K - и $B_{d,s}$ -мезонов, начиная с фундаментальной работы Л.Д. Ландау, предложившего ввести понятие комбинированной CP -четности, и опытов В. Фитча и Р. Терлея с коллегами, впервые обнаруживших ее нарушение в переходах нейтральных каонов, и кончая последними экспериментальными данными по расщеплению масс и нарушению CP -инвариантности в осцилляциях B -мезонов. В рамках СМ нарушение CP -симметрии объясняется существованием одной неустранимой фазы в ККМ-матрице шести кварков. Более глубокое физическое понимание природы CP -нарушения остается, однако, спрятанным за проблемами наличия именно трех поколений фундаментальных фермионов и отсутствием нейтральных токов с изменением аромата (далее — $FCNC$). Помимо ККМ-матрицы в СМ может существовать еще лишь один источник (“сильного”) CP -нарушения, связанный с возможным наличием так называемого $\bar{\theta}$ -члена в лагранжиане сильных взаимодействий. Верхнее экспериментальное ограничение на $\bar{\theta} < 10^{-10}$ из значения электрического дипольного момента нейтрона делает эту величину исчезающе малой. Иных источников CP -нарушения в СМ нет, но они появляются в ее расширениях.

§ 1.3 посвящен обзору наиболее популярного в настоящее время расширения СМ — минимальной суперсимметричной стандартной модели. Использование МССМ мотивируется способностью данной теории естественным образом объяснить ряд сложностей, с которыми сталкивается СМ. Кроме того, наличие двух дублетов скалярных частиц приводит к намного более богатому спектру бозонов Хиггса, а также позволяет ввести в рассмотрение значительное число новых источников CP -нарушения, которые могут проявляться, в том числе, и в качестве малых поправок к уже измеренным с низкой степенью точности наблюдаемым. Хотя число свободных параметров МССМ, являющихся источниками нарушения CP -инвариантности, велико, при разумном предположении об универсальности параметров мягкого нарушения суперсимметрии $m_0, m_{1/2}$ и A выделяются только две новые физические CP -нечетные фазы: одна в трилинейных константах

связи A , а другая — в членах, содержащих массу калибрино $m_{1/2}$. Если такая “ограниченная” версия МССМ с CP -нарушением действительно имеет место быть в Природе, то процессы рождения и распадов суперсимметричных частиц на высокоэнергетических коллайдерах могут дать достаточно информации об этих новых CP -нарушающих параметрах. При этом важнейшую косвенную информацию можно получить через суперсимметричные радиационные эффекты в хиггсовском секторе и наблюдаемые для систем нейтральных мезонов.

Раздел 2 гл. I содержит краткую информацию об исследуемых в работе системах нейтральных псевдоскалярных мезонов: $K^0(\bar{s}d) - \bar{K}^0(sd)$, $D^0(\bar{u}c) - \bar{D}^0(u\bar{c})$, $B_d^0(\bar{b}d) - \bar{B}_d^0(b\bar{d})$ и $B_s^0(\bar{b}s) - \bar{B}_s^0(b\bar{s})$.

В § 2.1 введен формализм, используемый для определения величины нарушения CP -инвариантности в распадах нейтральных и заряженных мезонов. § 2.2 представляет формализм, применяемый в настоящей работе для анализа процессов перемешивания нейтральных мезонов в вакууме. Основными характеристиками смешивания в рассматриваемых системах являются: разность масс между физическими состояниями нейтральных мезонов Δm_{LS} и величина “косвенного” нарушения CP -инвариантности ε , имеющая смысл малого угла поворота между нефизическими состояниями, обладающими определенной CP -четностью и физическими (массовыми) состояниями, не являющимися собственными состояниями оператора CP -преобразований. В § 2.3 дается классификация эффектов CP -нарушения в распадах и смешивании, а также в интерференции этих процессов.

В разделе 2 для каждой из систем нейтральных мезонов представлены экспериментальные значения указанных наблюдаемых, а также производных от них величин, имеющих самостоятельный физический смысл, таких как зарядовая асимметрия полупентонных распадов для $B_{d,s}$ -мезонов: $A_{LS}^B \approx 1 - |q/p|^2$, причем $\frac{q}{p} = |(1 - \varepsilon_{B_{d,s}}^2)/(1 + \varepsilon_{B_{d,s}}^2)|$. На основе количественных соотношений между основными характеристиками систем обосновано качественное различие в их поведении в процессах смешивания. В § 2.4 рассмотрены два различных набора наблюдаемых для системы нейтральных каонов; устанавливается связь между ними, вводится калибровка Ву—Янга. §§ 2.5 и 2.6 посвящены характеристикам смешивания в системах D^0 - и $B_{d,s}^0$ -мезонов соответственно.

В настоящей работе исследуется минимальная суперсимметричная стандартная мо-

дель с юкавским сектором типа II и явным нарушением CP -инвариантности в хиггсовском потенциале. Подробная информация о выбранной модели и простейших следствиях из нее излагается в **разделе 3** гл. I.

Параграф 3.1 дает классификацию двухдублетных моделей, частным случаем которых является МССМ, по структуре ее юкавского сектора. Выбор именно II-го типа продиктован тем, что, с одной стороны, взаимодействия фундаментальных скаляров и фермионов не сводятся к виду СМ (особенность МССМ с юкавским сектором I-го типа), а, с другой стороны, позволяют избежать нежелательных FCNC-процессов, характерных для двухдублетных моделей III-го типа.

В § 3.2 дается подробное изложение основных особенностей скалярного сектора модели. Приведена наиболее общая эрмитова форма перенормируемого $SU(2) \otimes U(1)$ -инвариантного потенциала МССМ $U(\Phi_1, \Phi_2)$ на масштабе энергий порядка m_t , содержащего параметры $\lambda_{5,6,7}$ и μ_{12} , становящиеся существенно комплексными после учета больших радиационных поправок в вершинах самодействия скаляров за счет треугольных и квадратных однопетлевых диаграмм с обменами скалярными кварками. Эти поправки зависят от четырех параметров: факторов трилинейного взаимодействия “скалярные кварки—бозоны Хиггса” $A_{t,b}$, параметра хиггсовского суперполя μ , масштаба суперсимметрии M_{SUSY} и универсальной фазы $\varphi = \arg(\mu A_{t,b})$. В параграфе рассмотрена процедура вычисления указанных радиационных поправок методом эффективного потенциала в пределе “отщепления” (“decoupling limit”) суперпартнеров частиц Стандартной Модели.

В § 3.3 разд. 3 исследован спектр возможных масс скалярных частиц исследуемой модели. Показано, что в рамках феноменологического сценария с сильным перемешиванием состояний, обладающих определенной CP -четностью (CPX -сценарий), возможно существование заряженных бозонов Хиггса с малыми массами вплоть до 40—50 ГэВ, не противоречащих имеющимся на сегодняшний день прямым экспериментальным ограничениям на m_{H^\pm} (с учетом их зависимости от выбранного феноменологического сценария).

В **разделе 4** главы I формулируются основные цели диссертационной работы и анализируются ее важнейшие отличия от работ других исследователей по выбранной тематике.

Во **второй главе** диссертации изложены результаты аналитических вычислений для вкладов диаграмм с обменами заряженными бозонами Хиггса в величины введенных в разд. 2 гл. I наблюдаемых. В качестве “шаблона” для расчетов используется механизм Глэшоу—Илиопулоса—Майани (далее — *ГИМ-механизм*) компенсации вкладов от диаграмм с виртуальными кварками разных поколений на внутренних фермионных линиях, характерный для СМ. Вычисления проводятся для всех систем нейтральных мезонов как на основе четырехфермионного приближения (см. ниже), так и с применением точного расчета.

В **разделе 1** дается краткий обзор ГИМ-механизма для квадратных WW -диаграмм с обменами заряженными векторными бозонами в системе нейтральных каонов. Записаны результаты для величины расщепления масс Δm_{LS}^{K-WW} физических состояний K^0 -мезонов и косвенного нарушения CP -инвариантности ε_K^{WW} . Все результаты выражены через амплитуду A , которая представлена в виде суммы трех слагаемых, отвечающих $-cc$ - и $-tt$ -квадратным диаграммам, а также перекрестным $-ct$ -диаграммам и зависит от значений функций $I_1(\xi_{1,2})$ и $I_2(\xi_2, \xi_3)$ (функции Высоцкого—Инами—Лима), где $\xi_1 = (\frac{m_c}{m_W})^2$, $\xi_2 = (\frac{m_t}{m_W})^2$, $\xi_3 = (\frac{m_t}{m_c})^2$. Выражение, учитывающее малые поправки от функций $I_1(\xi_1)$ и $I_2(\xi_2, \xi_3)$, приведено в настоящей работе впервые.

Раздел 2 посвящен вычислению вкладов от HW - и HH -диаграмм с обменом заряженными скалярными бозонами в суммарную величину расщепления масс в системе нейтральных каонов Δm_{LS}^K .

В § 2.1 вычисления производятся в т.н. четырехфермионном приближении, в рамках которого $m_{W,H}^2 \gg k^2$, и осуществляется замена пропагаторов промежуточных скалярных и векторных бозонов на размерные факторы: $G_F = g^2\sqrt{2}/8m_W^2$ — для слабого фермиевского взаимодействия, и $C_H = \frac{4\sqrt{2}m_W^2}{v^2m_{H^\pm}^2}$ — для юкавского взаимодействия (где $v = 246$ ГэВ — вакуумное среднее СМ), в результате чего происходит переход от квадратных диаграмм точного расчета к однопетлевым четырехфермионного приближения. Последовательно вычисляются все интегралы I_{ij} по внутреннему петлевому импульсу k . Показано, что интегралы диаграмм с обменами заряженными скалярами расходятся в ультрафиолетовом пределе $k \rightarrow +\infty$, что связано с частичным (для HW -диаграмм) или полным (для HH -диаграмм) нарушением ГИМ-механизма. Конечный результат получается при фиксации предела интегрирования на величине параметра

обрезания, полагаемого равным квадрату массы заряженного скаляра $m_{H^\pm}^2$. Полученные значения интегралов используются для записи конечного выражения для вкладов HW - и HH -диаграмм в величину расщепления масс нейтральных каонов. Примечательной является резкая зависимость конечных величин не только от m_{H^\pm} , но и от отношения вакуумных средних скалярных дублетов модели $\text{tg}\beta = \frac{v_2}{v_1}$. В рассматриваемом диапазоне значений регулирующих параметров МССМ: $5 < \text{tg}\beta < 50$ и $50 \text{ ГэВ} < m_{H^\pm} < 1000 \text{ ГэВ}$ — обнаружена иерархия вкладов от отдельных слагаемых в конечном выражении для амплитуды, что позволяет записать ее в более простом виде, хорошо аппроксимирующем точную формулу и приводящем к характерной зависимости вида $\Delta m_{LS} \sim (\text{tg}^{-4}\beta + \text{tg}^{-2}\beta)$.

В § 2.2 осуществляются точные расчеты квадратных диаграмм без использования приближения $m_{W,H}^2 \gg k^2$. Вычисления смешанных HW -диаграмм ведутся в калибровке 'т-Хоофта—Фейнмана; следствием этого становится необходимость учета вкладов от обменов нефизическими скалярами G^\pm . Результатом последовательного расчета сходящихся петлевых интегралов становится набор функций $J_{ij}(\xi_k)$, учитывающих немалые отношения масс ξ_k виртуальных бозонов и фермионов на внутренних линиях диаграммы и являющихся аналогами функций Высоцкого—Инами—Лима СМ. При помощи полученных функций записывается конечный ответ для расщепления масс в системе нейтральных каонов при точном расчете. В рамках дополнительного анализа, проведенного в § 2.2, показано наличие общих предельных случаев интегралов точного расчета и четырехфермионного приближения, которое подтверждает корректность применения последнего. Детали вычислений петлевых интегралов как в рамках четырехфермионного приближения, так и для случая точного расчета, а также анализ наличия выколотых точек в выражениях для аналогов функций Высоцкого—Инами—Лима приведены в приложении А.

Важную роль для численного анализа полученных выражений играют пертурбативные (η_i) и непертурбативные (B^j и B_S^k) КХД-поправки на обмен глюонами на малых расстояниях и к вычислению адронных матричных элементов в мезонных обкладках при низких энергиях, а также нефакторизуемые вклады от обменов на больших расстояниях. В § 2.3 производится классификация и детальный анализ всех отмеченных КХД-поправок, возникающих при рассмотрении смешивания в различных системах нейтральных мезонов, и выписываются значения для соответствующих им факторов

в конечных выражениях для амплитуд диаграмм с обменом заряженными бозонами Хиггса. Приведены численные оценки пертурбативных КХД-поправок; непертурбативные факторы B^j оцениваются при помощи правил сумм при конечных энергиях. Дается оценка вкладов от больших расстояний и ненулевых значений передаваемого внешнего импульса p_i . Показано, что корректное выражение для величины расщепления масс в определенной системе нейтральных мезонов имеет вид: $\Delta m_{LS} = \Delta m_{LS}^{LD} + B \cdot \Delta m_{LS}^{SD}(\eta_i)$, где первое слагаемое в правой части равенства отвечает вкладам на больших расстояниях, а второе — вкладам на малых расстояниях с учетом рассмотренных в параграфе КХД-поправок.

В разделе 3 результаты, полученные в §§ 2.1 и 2.2 для расщепления масс нейтральных каонов, применяются к системам D^0 - и $B_{d,s}^0$ -мезонов и обобщаются на другие наблюдаемые, предварительно введенные в разд. 2 гл. I.

Одной из последних является величина косвенного (т.е. в смешивании) нарушения CP -инвариантности ε_K , которая определяется через отношение мнимых и действительных частей амплитуд соответствующих квадратных диаграмм. В § 3.1 данная наблюдаемая вычисляется как точно, так и в однопетлевом (четырёхфермионном) приближении. Также показано, что, в отличие от ε_K , величина прямого (в распадах) CP -нарушения ε'_K является существенно модельнозависимой, так как константы трилинейного взаимодействия скалярных и векторных бозонов, которые будут давать ощутимый вклад в значение этой наблюдаемой, зависят от особенностей смешивания в секторе “скалярные кварки — бозоны Хиггса”, которые, в свою очередь, сильно варьируются в зависимости от выбираемого феноменологического сценария. Производится качественный анализ наблюдаемой $\xi_{eps} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$.

В § 3.2 производится обобщение полученных ранее результатов для расщепления масс в системах нейтральных каонов на величину разности масс для систем B_d^0 - и B_s^0 -мезонов. Полученные в § 2.1 и § 2.2 выражения сохраняют свою форму с точностью до замены масс кварков и матричных элементов ККМ-матрицы. Также в этом параграфе представлена формула для основной характеристики нарушения CP -инвариантности в смешивании B -мезонов — величины зарядовой асимметрии $A_{SL}^{B_{d,s}}$ — которая выражается через стандартные наблюдаемые $\varepsilon_{B_{d,s}}$.

Параграф 3.3 посвящен вычислению величины расщепления масс D^0 -мезонов. Показано, что для этой системы использование четырехфермионного приближения является

вполне корректным, так как наибольшая из фермионных масс на внутренних виртуальных линиях квадратной диаграммы — m_b — значительно меньше массы промежуточных векторных и заряженных скалярных бозонов в выбранном диапазоне значений последнего ($50 \text{ ГэВ} < m_{H^\pm} < 1000 \text{ ГэВ}$). Использование иного, по сравнению с рассмотренными ранее системами нейтральных мезонов, унитарного треугольника позволяет существенно упростить конечные выражения для Δm_{LS}^D благодаря иерархии масс кварков и матричных элементов ККМ-матрицы. Также показано, что для D^0 -мезонов принципиально важным является учет обменов заряженными скалярами на больших расстояниях, приводящий к увеличению полученного в рамках теории возмущений значения почти на порядок.

Краткие итоги гл. II отражены в **разделе 4**.

В **третьей главе** производится подробный численный анализ всех рассчитанных наблюдаемых, на основании которого оцениваются возможные ограничения на пространство параметров МССМ.

Количественный анализ петлевых интегралов и достаточно громоздких выражений для наблюдаемых в смешивании нейтральных мезонов немислим без применения компьютерных программ. В **разделе 1** дана краткая характеристика написанной автором кроссплатформенной программы на языке С. Приведены сведения по ее входному (`input.txt`) и выходным (`output*.txt`) файлам. В **разделе 2** анализируется вопрос нормировки входных данных для сравнения теоретических и экспериментальных результатов в разрезе бегущих масс кварков. Рассматриваются две альтернативы: нормировка на “теорию”, при которой в конечные выражения подставляются “токовые” массы кварков, а нормировка вкладов от больших расстояний производится в “точке” СМ; и нормировка на “эксперимент”, оперирующая “конституэнтными” массами кварков, и ориентирующаяся непосредственно на опытные данные. На основании сравнения теоретических неопределенностей в определении вкладов на больших расстояниях и величин пертурбативных и непертурбативных КХД-поправок предпочтение отдается нормировке на “теорию” и, следовательно, токовым массам кварков.

В **разделе 3** производится последовательный численный анализ основных наблюдаемых для системы нейтральных каонов.

Параграф 3.1 включает в себя информацию по четырехфермионному приближению. Представлены подробные таблицы значений наблюдаемых Δm_{LS}^K и ε_K в зависимости от регулирующих параметров МССМ (m_{H^\pm} и $\text{tg}\beta$). Также представлены графические отображения табличных данных на плоскость $(m_{H^\pm}, \text{tg}\beta)$. На основании проведенного анализа выделяется область малых значений $\text{tg}\beta < 15$, в которой почти по всему рассматриваемому спектру масс заряженных скаляров вклады от диаграмм МССМ велики и превосходят одно стандартное отклонение от результата СМ при выбранном значении относительной экспериментальной погрешности. На основании метода Битюкова-Красникова, изложенного в приложении В, выделены области пространства параметров МССМ, в котором обнаружение вкладов “новой физики” возможно с хорошей различимостью κ и достоверностью ζ .

В § 3.2 аналогичное рассмотрение производится для результатов точного расчета, полученных в § 2.2 гл. II. Для них характерно существенно иное, отличное от четырехфермионного приближения, поведение вкладов от обменов заряженными скалярами при $m_{H^\pm} \rightarrow +\infty$. В целом, ограничения, получаемые на регулирующие параметры МССМ, при точном расчете оказываются чуть менее строгими, чем для четырехфермионного приближения.

Раздел 4 посвящен численному анализу систем D^0 -мезонов. В отличие от других пар нейтральных мезонов, в случае D^0 ограничения идут не из области малых, а из области больших значений $\text{tg}\beta > 30$ и малых значений массы заряженного бозона Хиггса. Использовать полученные ограничения для последующего анализа представляется, однако, затруднительным из-за существенных поправок на обмены скалярными и векторными бозонами на больших расстояниях, которые могут давать поправку, на порядок превышающую рассчитанные значения.

В **разделе 5** численно анализируются системы нейтральных B_d - и B_s -мезонов, причем как в рамках точного расчета (§§ 5.2 и 5.3), так и с использованием четырехфермионного приближения (§ 5.1). Показано, что помимо характерной области малых значений $\text{tg}\beta$, в которой вклады от HW - и HH -диаграмм становятся ощутимыми, существует область больших значений $\text{tg}\beta > 30$, в которой доминируют отрицательные по величине вклады от диаграмм с обменами заряженными скалярами, также выходящие за пределы одного стандартного отклонения от результата СМ. В области $\text{tg}\beta > 40$ и

$m_{H^\pm} < 125$ ГэВ вклады МССМ становятся хорошо различимыми на фоне результатов СМ (достоверность обнаружения $\zeta > \sqrt{2}\sigma$ при различимости $\kappa > 92\%$).

В заключительном **6-м разделе** главы III подводятся итоги численного анализа для всех систем нейтральных мезонов и устанавливаются общие ограничения на регулирующие параметры m_{H^\pm} и $\text{tg}\beta$ минимальной суперсимметричной стандартной модели.

Заключение содержит развернутое изложение основных результатов, полученных в диссертационной работе.

В **Приложении А** приводятся детали расчетов петлевых интегралов по внутреннему импульсу k_μ как в рамках четырехфермионного приближения, так и в рамках точного расчета. Показано, что интегралы диаграмм с обменами заряженными скалярами расходятся в ультрафиолетовом пределе $k \rightarrow +\infty$ в случае четырехфермионного приближения, что связано с частичным (для HW -диаграмм) или полным (для HH -диаграмм) нарушением ГИМ-механизма, и сходятся — в рамках точного. Также в настоящем приложении производится анализ резонансного поведения интегралов точного расчета. Указаны способы переопределения правил Фейнмана для фермионных пропагаторов, устраняющие выколотые точки при $m_{H^\pm} \rightarrow m_t$ за счет учета малой ширины Γ_t , включая приближение Брейта-Вигнера, а также приближения, сохраняющие калибровочную инвариантность. Предельные значения аналогов функций Высоцкого—Инами—Лима в этих точках рассчитываются с использованием правила Лопиталья.

Приложение В посвящено краткому изложению метода Битюкова-Красникова, при помощи которого возможно отделение вкладов “новой физики” (и, в частности, МССМ) от результатов, получаемых для тех же наблюдаемых в рамках СМ. Рассмотрены общие принципы применяемого метода и выделены основные экспериментальные характеристики — различимость κ и статистическая достоверность ζ — по которым проводится отмеченное отделение.

Парциальные вклады диаграмм МССМ в величину расщепления масс нейтральных K -мезонов в рамках точного расчета и четырехфермионного приближения для разных типов нейтральных мезонов представлены в **Приложении С**. В данном приложении также проводится приближенная оценка вкладов в наблюдаемые смешивания в системах нейтральных мезонов от диаграмм с обменами суперпартнерами частиц СМ.

*III. Основные результаты диссертации опубликованы в
следующих работах:*

1. *Дубинин М.Н., Сукачев А.И.* “Смешивание нейтральных K - и B -мезонов в рамках минимальной суперсимметричной модели”. // Вестник Моск. ун-та. Физ., Астрон., 2008. №4. С. 31.
2. *Дубинин М.Н., Сукачев А.И.* “Переходы $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$ и $B^0 \rightarrow \bar{B}^0$ в МССМ с нарушением CP -инвариантности в хиггсовском секторе”. // ЯФ, 2008. 71, №2. С. 395.
Сукачев А.И. “Эффекты минимальной суперсимметричной модели в смешивании нейтральных мезонов”. // Труды IX межвузовской научной школы молодых специалистов “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине”, 2008. С. 204.
3. *Сукачев А.И.* “Расщепление масс нейтральных $B_{d,s}^0$ -мезонов в рамках минимальной суперсимметричной стандартной модели” // Вестник Моск. ун-та. Физ., Астрон., 2009. №3. С. 35;
Дубинин М.Н., Сукачев А.И. “Смешивание нейтральных K^0 -, B^0 - и D^0 -мезонов в рамках МССМ с явным нарушением CP -инвариантности // Препринт НИИЯФ МГУ, №2009-1/845. 2009. 123 стр.
4. *Сукачев А.И.* “Эффекты минимальной суперсимметричной стандартной модели в смешивании нейтральных K^0 -мезонов” // Вестник Моск. ун-та. Физ., Астрон., 2009. №4. С. 17;
Дубинин М.Н., Сукачев А.И. “Смешивание нейтральных мезонов в рамках МССМ с явным нарушением CP -инвариантности” // Труды научной конференции “Ломоносовские чтения” (секция физики), изд. МГУ. 2009. С. 158.

СУКАЧЕВ Алексей Игоревич

**СМЕШИВАНИЕ НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ
В МИНИМАЛЬНОЙ СУПЕРСИММЕТРИЧНОЙ
СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ С НАРУШЕНИЕМ
CP-ИНВАРИАНТНОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

Работа поступила в ОНТИ 08.10.2009

Тираж 100 экз. Заказ № Т-276

Отпечатано в типографии КДУ

тел./факс: (495) 939-57-32. E-mail: press@kdu.ru