

На правах рукописи

УДК 539.12.017; 539.128.2

КОЗЛОВ
Геннадий Алексеевич

АДРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ И ЗА ЕЕ
ПРЕДЕЛАМИ

Специальность: 01.04.23 - физика высоких энергий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва - 2008

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

профессор

Прохоров Лев Васильевич

(Научно-исследовательский институт физики имени В.А. Фока физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург)

доктор физико-математических наук,

профессор

Поликарпов Михаил Игоревич

(Институт теоретической и экспериментальной физики, г. Москва)

доктор физико-математических наук

Дубинин Михаил Николаевич

(Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова)

Ведущая организация:

Институт ядерных исследований РАН, Москва.

Защита диссертации состоится " **19** " **09** 2008 г. на заседании совета Д 501.001.77 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан " **04** " **08** 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук, профессор

С.И. Страхова

Актуальность темы .

Современные представления о структуре фундаментальных взаимодействий опираются на стандартную модель (СМ) сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий, являющуюся успешной теоретической схемой, согласованной с экспериментальными данными. Окончательный триумф СМ будет достигнут в связи с открытием, предсказанного в рамках СМ, массивного скалярного бозона Хиггса, ответственного за нарушение $SU(2)$ -симметрии. Оценки минимальной массы бозона Хиггса на уровне 114.4 ГэВ, по результатам экспериментов LEP2 в ЦЕРНе, было воспринято как еще одно подтверждение успеха СМ.

Очевидно, что новая поисковая физика элементарных частиц, направленная на исследование структуры материи в области ТэВ-ных энергий (особенно на Тэватроне и в будущем на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРНе) не может более опираться на стандартные представления, связанные с симметрией $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. В частности, одна из наиболее остро стоящих проблем связана с выяснением структуры хорошо известной пустыни энергетических масштабов, где по сути отсутствуют новые (фундаментальные) частицы с массами, лежащими в области от ~ 0.2 ТэВ до 10^{12} ТэВ. Возникает существенная необходимость изменения представлений о природе фундаментальных взаимодействий, выход за пределы СМ путем расширения симметрии, где калибровочная группа СМ является подгруппой новой расширенной минимальной группы. Унификация сил взаимодействия с помощью включения суперсимметрии является существенной парадигмой как результат LEP1 и LEP2 прецизионных измерений. Простейшей группой теории великого объединения является группа $SU(5)$, но лишь расширенные симметрии, связанные с группой E_6 , возникающей в теории струн, могут являться хорошими кандидатами на объяснение появления, например, новых калибровочных Z' -бозонов на масштабе 1 ТэВ. В этих расширенных моделях, предполагающих многоступенчатое нарушение симметрии до симметрии СМ, возможно появление новых частиц в скалярном, фермионном и калибровочном секторах с массами порядка 1 ТэВ. Все это стимулирует многочисленные попытки выхода за рамки представлений СМ и в поисках новых тяжелых кварков (например, в следующих поколениях после третьего), связанных кварк-антикварковых состояний, содержащих тяжелые кварки, расширенного сектора бозонов Хиггса, включая частицы с различными СР-четностями, заряженными и даже двукратно заряженными скалярными частицами, дополнительных калибровочных бозонов $W^{\pm'}$, Z' и т.д.

Наиболее перспективными моделями за пределами СМ, претендующими на раскрытие спектра новых частиц при энергиях 1-10 ТэВ являются суперсимметрия, E_6 , $SO(10)$, модель Хиггса с двумя дублетами и так называемая модель "малого Хиггса". Это далеко не полный перечень всех расширенных моделей. Модель "малого Хиггса" подпитывается старой идеей иметь достаточно легкий Хиггс-бозон. Таким образом, последний можно представить в виде псевдо-голдстоуновского бозона с нарушенной глобальной симметрией. Бозон Хиггса становится массивным на уровне электрослабого масштаба за счет радиационных поправок. Здесь новая физика входит в теорию с характерным масштабом $\Lambda \simeq 4\pi f$, где $f \sim O(1)$ ТэВ. Эта новая физика содержит дополнительные заряженные и нейтральные поля, которые вносят дополнительный вклад в

петлевых вычислениях, особенно в распадах бозонов Хиггса на фотоны или глюоны. Потенциально важным моментом является эффект смешивания между нейтральными компонентами двух дублетов хиггсовского поля. Этот эффект смешивания может привести к существенным изменениям констант связи поля Хиггса с W , Z -бозонами и топ-кварком. Любая из моделей "малого Хиггса" содержит тяжелые кварки T и новые дополнительные калибровочные бозоны W_H с массами $\sim f$ для обеспечения сокращения квадратичной расходимости массы Хиггса вследствие вкладов топ-кварков и W - бозонов. Эти новые тяжелые состояния смешиваются с полями других частиц на уровне v^2/f^2 ($v \simeq 246$ ГэВ). Полезность расширенных моделей состоит в том, что СМ естественным образом может быть в них включена при условии, что конкретные расширенные модели, обладающие достаточной симметрией, обеспечивают сокращение квадратичных расходимостей к хиггс-массовому параметру на однопетлевом уровне.

С другой стороны, отметим перспективные модели за пределами СМ (например, расширенные до новой калибровочной группы $U'(1)$), в которых существуют новые симметрии и новые частицы в скалярном, псевдоскалярном и векторном секторах уже при сравнительно низких энергиях. В этих моделях константы взаимодействия ожидаются существенно меньшими, чем в СМ. Тем не менее фундаментальные свойства этих легких частиц, взаимодействия с полями других частиц представляют несомненный интерес в современной физике масштабов до 1 ГэВ.

Между тем, теоретический базис, объясняющий "область" рождения частиц-источника частиц, его пространственных размеров и времени жизни остается пока не до конца выясненным. Уже давно было осознано, что в моделях, описывающих рождение частиц, например, феноменологическая модель бозе-эйнштейновской корреляции многих частиц, модель больших множественностей, присутствуют проблемы, не позволяющие рассматривать их как достаточно согласованные. Хорошо известны важность бозе-эйнштейновской корреляций и их экспериментальный и теоретический статус. Как основной недостаток отмеченных выше моделей следует отметить проблемы внутренней самосогласованности, параметризации функций распределения, содержащих свободные параметры, вопрос о влиянии эффекта когерентности системы адронизации на функции бозе-эйнштейновской корреляции.

Безусловно возникают естественные проблемы объяснения возможности существования составных объектов, связанных из тяжелых кварков и антикварков, проблемы идентификации новых калибровочных бозонов и состояний бозонов Хиггса из сложной структуры мультидублетных состояний. Эти и другие свойства расширенных моделей подводят нас к вполне обоснованному пониманию, что модели данного класса могут быть прообразами будущей фундаментальной теории при больших масштабах энергий.

Попытки построения фундаментальной теории, выходящей за рамки представления СМ весьма интенсивны, но к настоящему времени теория далека от своего завершения. Поэтому представляется актуальным изучение внутренней структуры и свойств таких моделей, получение феноменологических следствий, выявление противоречий или непротиворечий современным экспериментальным данным, поиск характерных мод распадов и взаимных переходов, которые могли бы проявляться в будущих экспериментах.

Основная цель диссертации состоит в исследовании общих свойств расширенных (калибровочных) моделей, их применении к физике адронов в легком и тяжелом секторах, скалярных частиц и калибровочных бозонов, изучении природы дуальности

при удержании заряженных частиц на больших расстояниях, и выяснение механизма многочастичной корреляции при множественном рождении тождественных частиц при высоких энергиях.

Научная новизна и практическая значимость. В диссертации предложен новый подход к исследованию общих свойств адронов (связанных состояний кварка и антикварка) как в легком, так и тяжелом секторах, включая новые (экзотические) состояния, физики скалярных бозонов Хиггса в СМ и ее расширении с учетом двух дублетов поля Хиггса, физики дополнительных калибровочных симметрий, их феноменологии и возможных проявлениях в низкоэнергетических процессах и при высоких энергиях. Разработан новый подход для исследования редких двухлептонных распадов легких адронов, содержащих странные кварки. Обнаружены новые эффекты, связанные с существенной ролью вещественной части амплитуды лептонных распадов π -, η -, K_L -мезонов. Новая схема исследования процессов лептонных распадов K_L -мезонов может быть обобщена на другие редкие моды распадов K_L -мезонов и открывает, таким образом, новые перспективы в этой области физики. Впервые установлена особая роль вкладов за счет учета странных кварков в вершинной функции связанного состояния.

Природа фундаментальной (теоретической) массы скалярного бозона Хиггса, определяемой лишь константой самодействия в эффективном лагранжиане, остается важнейшей из нерешенных проблем теории элементарных частиц. С точки зрения физики промежуточных энергий представляется актуальным поиск скалярных частиц, χ - бозонов, в легком секторе с соответствующими легкими состояниями калибровочных бозонов, отвечающих дополнительной калибровочной группе $U'(1)$ в расширенной калибровочной группе $SU(3) \times SU(2) \times U(1) \times U'(1)$. В диссертации предложен новый подход поиска легких гипотетических скалярных частиц, слабо-связанных с основными фундаментальными полями ($g'_1 \ll g_1$), на примере распадов легких адронов. Модель основана на важной роли КХД аномалии в дивергенции аксиального тока. Основная особенность взаимодействия легкого скалярного бозона состоит не во взаимодействии с кварками легких адронов, а с глюонами. Получены ограничения сверху на константы взаимодействия χ - бозона с кварками в зависимости от, например, синглет-октетного угла смешивания в системе $\eta - \eta'$. Это является особенно привлекательным и актуальным для современных экспериментов по низкоэнергетической экзотической физике. В частности, результаты, полученные в диссертации, положены в основу интерпретации данных по верхнему пределу на массы частиц на установке WASA-Celsius при энергиях до 1 ГэВ.

Для исследования важной проблемы физики заряженных частиц на больших расстояниях-удерживание кварков (конфайнмент)- в рамках дуальной модели с максимальной абелевой проекцией сформулирован новый подход, основанный на векторных дуальных потенциалах. Впервые получены точные аналитические выражения для функций распространения скалярного поля ("поля Хиггса") и дуального калибровочного поля, взаимодействующего с "полем Хиггса". Получены дополнительные ограничения на постоянную натяжения струны в эффективном потенциале, ответственным за удерживание кварков, и произведена оценка величины этой константы. Получены точные решения релятивистских вихревых уравнений.

Исследованы новые возможности оценки массы Хиггс-бозона в СМ при достаточно больших значениях бегущей юкавской константы связи в зависимости от предельного масштаба Λ новой физики.

В диссертации открыто новое направление, лежащее на стыке теории квантованных полей при конечной температуре и теории хаотического движения частиц - построена модель квантового распределения бозе - и ферми-частиц на основе квантовой эволюции (типа Ланжевена), описывающей изменения во времени (и в пространстве) функций состояний или операторов рождения и уничтожения частиц, испытывающих возмущения в результате стохастических взаимодействий, и подвергающихся беспорядочному воздействию со стороны окружающих частиц в конечномерном термализованном 4-х мерном пространстве-времени. Впервые исследована природа внешних возмущений (в эволюции), различающихся по своему функциональному воздействию на систему частиц, находящихся в состоянии равновесия:

а) возмущения 1-го рода, т.н. динамические воздействия, создаваемые внешними полями, которые могут оставаться постоянными во времени или меняться произвольным образом;

б) возмущения 2-го рода, например, возникающие вследствие "теплового воздействия", невозможно описать простым изменением гамильтониана системы. Такие возмущения возникают при наложении на систему извне некоторого типа неоднородностей. Для учета этого выбрана определенная форма функции неоднородностей. Предложен новый механизм учета эффекта термостата, который есть не что иное, как ансамбль (квантовых) осцилляторов гармонически связанных с частицами, испытывающими воздействие внешних сил. Наиболее общий вид уравнения эволюции, предложенный в диссертации, выглядит следующим образом: $\partial_t f(t) = O[f(t)]$, где $O[f(t)]$ -оператор внешних возмущений, нелинейный функционал от функции (оператора) $f(t)$.

Сформулированы общие принципы построения функций распределения и многочастичных корреляционных функций Бозе-Эйнштейна с учетом средней множественности рожденных частиц. Впервые показано, как этот метод может быть обобщен на статистику Ферми-Дирака. Впервые получено аналитическое выражение для двух-частичной корреляционной функции Бозе-Эйнштейна, в которой найдены ранее не известные дополнительные вклады, несущие в себе информацию о произвольных источниках, и имеющие принципиальное значение в связи с интерпретацией современных данных по 2-частичным корреляциям тождественных частиц (эксперименты на LEP (DELPHI, ALEPH, OPAL, L3), RHIC (STAR, PHENIX), Tevatron (CDF, D0)).

Как следствие, в диссертации впервые получены строгие ограничения снизу на пространственно-временную область эмиссии тождественных частиц. Впервые представлен метод оценки средней множественности и функции хаотичности по вычисленной (или, в принципе, полученной из эксперимента) двух-частичной бозе-эйнштейновской корреляционной функции. Модель может быть непосредственно применена к теории кварк-глюонной плазмы, где реальные полевые операторы, описывающие поля кварков, глюонов и легких адронов, связаны с найденными в диссертации операторами как решениями квантового эволюционного уравнения. Данный метод впервые применяется к теории деконфайнмента при критической температуре $T_c \simeq 160$ ГэВ перехода из фазы адронного состояния в конечное "пространство" невзаимодейст-

вующих кварков и глюонов. Произведены оценки пространственно-временных областей "существования" бозе (глюонов)- и ферми (кварков)- частиц.

Природа масс новых частиц в расширенных (относительно СМ) моделях (например, массы бозонов Хиггса в двухдублетной модели Хиггса, массы новых калибровочных бозонов Z' и $W^{\pm'}$, массы суперсимметричных кварков, особенно стоп-кварков, ответственных за "приращение" массы легчайшего бозона Хиггса) остается одной из неясных проблем современной физики частиц. В диссертации проведено исследование взаимодействий, осуществляемых дополнительными калибровочными бозонами Z' , в теории четырехфермионного взаимодействия. Впервые найденные правила сумм для масс хиггсовских бозонов и новых калибровочных бозонов, позволили установить с помощью экспериментальных данных CDF (Тэватрон, США) жесткие ограничения на верхний предел по массам суперсимметричных топ-кварков, дать оценку снизу на массу легчайшего СР-четного бозона Хиггса, а также установить нижнюю границу на сумму масс двух СР-четных бозонов Хиггса в расширенной E_6 -суперструнной модели.

Проведено исследование распадов бозонов Хиггса, индуцированных однопетлевыми промежуточными состояниями заряженных и нейтральных полей. Основными мотивами для более детального исследования этой ветви физики в диссертации являются следующие предпосылки:

- а) несмотря на то, что бозон Хиггса является основным интригующим объектом в современной физике элементарных частиц, его свойства еще не достаточно полно исследованы в сравнении с предсказаниями СМ и ограничениями, накладываемыми опытными данными;
- б) спектр взаимодействий бозона Хиггса с необходимостью должен быть расширен по сравнению с теми взаимодействиями, которыми оперирует СМ;
- в) хотя новые (возможно фундаментальные) состояния в расширенных моделях могут оказаться слишком "тяжелыми", чтобы быть обнаруженными в экспериментах на адронных коллайдерах или линейных ускорителях, квантовые петлевые поправки, возникающие за счет этих новых состояний, могут быть первичной полезной сигнатурой в проявлении новой физики;
- г) распады бозонов Хиггса, инспирированные петлями, например, фермионных полей, естественным образом зависят от констант взаимодействия этих бозонов с полями тяжелых кварков и калибровочных бозонов, которые хорошо определены во многих расширенных моделях, например, Минимальной Суперсимметричной СМ, E_6 -суперструнной модели и т.д.

Впервые построены модели для исследования редких мод распадов $Z'(Z_2)$ -бозонов на кварк-антикварковые связанные состояния с эмиссией бозонов Хиггса, радиационных распадов Z' , распадов Z_2 -бозонов на Z_1 и бозоны Хиггса; взаимных переходов новых калибровочных бозонов, бозонов Хиггса и кварковых состояний; распадов СР-четных бозонов Хиггса на два гамма-кванта, два глюона, распадов СР-нечетных бозонов Хиггса на лептонные пары, два гамма-кванта или два глюона с эмиссией СР-четных бозонов Хиггса.

Предложены и исследованы новые возможности лабораторного наблюдения кваркониев, содержащих тяжелые кварки (сравнимые по массе с топ-кварком), включая кварки четвертого поколения *up*- и *down*- типов. Произведено обоснование критерия возможности существования таких тяжелых связанных состояний. Изучены редкие моды распадов тяжелых кваркониев с рождением бозонов Хиггса и калибровочных бозонов; произведено сравнение с наиболее вероятными модами распадов тяжелых кварков. Для сравнения, представлены результаты идентификации бозонов Хиггса по их радиационным распадам с относительно стабильными тяжелыми кваркониями. В частности, полученные в диссертации результаты вошли в пакет экспериментальных исследований на Большом Адронном Коллайдере. Проведено исследование эффектов адронизации тяжелых состояний кварков и антикварков в фазе деконфайнмента. Вычислены коэффициенты подавления при рождении $\bar{b}b$ и $\bar{c}c$ векторных связанных состояний с учетом эффектов деконфайнмента.

На защиту выносятся следующие результаты

1. Разработан новый подход для исследования редких двухлептонных распадов легких адронов, содержащих странные кварки. Основой метода для конкретных вычислений служит корректная формулировка ковариантного одновременного подхода к проблеме двух тел в квантовой теории поля. Выделена существенная роль вещественной части амплитуды лептонных распадов η и K_L мезонов в модели полюсной доминантности с учетом промежуточных легких псевдоскалярных состояний. Впервые установлена особая роль вкладов за счет учета странных кварков в вершинной функции связанного состояния.

2. Впервые (при помощи формализма двухточечных функций Уайтмана) исследована и классифицирована модель скалярного поля дипольного типа, в которой получено выражение для массы скалярного легкого экзотического χ -бозона при конечной температуре. Продемонстрирована лидирующая роль связи χ -бозона с глюонами, индуцированная тяжелыми кварками в промежуточных состояниях. Проведены новые исследования рождения χ -бозонов в радиационных распадах ω - и η - мезонов, а также получены ограничения на константы связи χ -бозона с кварками.

3. Разработан новый подход (на основе векторных дуальных потенциалов), позволяющий исследовать проблему удерживания двух цветных зарядов на больших расстояния. В рамках этого формализма впервые получено решение для дуального калибровочного поля, которое определяется дивергенцией тензора напряженности струны Дирака и дивергенцией скалярного поля (поля Хиггса), а также найдены функции распространения скалярного и дуального калибровочного полей. Найдено новое выражение для профиля электрического поля в вихревом потоке. Получено дополнительное ограничение на постоянную натяжения струны.

4. Впервые проведено детальное исследование квантовых корреляций тождественных элементарных частиц. Получено новое уравнение эволюции частиц (типа уравнения Ланжевена) в квантово-полевоом подходе. Модель объясняет процесс эволюции операторов частиц, испытывающих возмущения в результате стохастических взаимодействий с окружающими частицами в конечномерном пространстве-времени при конечной температуре. Впервые получены в аналитическом виде выражения для двухчастич-

ной функции корреляции Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака для тождественных частиц с новыми ранее не известными слагаемыми в результате учета произвольного хаотического источника и в зависимости от массы частицы и температуры области рождения частиц. Получено математически строгое подтверждение того факта, что при малых значениях разницы между импульсами двух частиц, возникает интерференционный пик вероятности, ширина которого определяется пространственно-временными характеристиками источника рождения частиц. Впервые получены ограничения на минимальные размеры пространственно-временного распределения источника рождения частиц в зависимости от максимального значения двухчастичной функции корреляции, средней множественности и абсолютной температуры окружающей среды. Численные оценки, выполненные на основе полученных формул для двухчастичной функции корреляции в случае π - и K - мезонов, объясняют данные экспериментов на LEP и HERA. Разработанная модель является универсальной и может быть использована при исследованиях многочастичных корреляций в широком диапазоне масс частиц, рожденных при столкновениях, как лептонов, адронов, так и тяжелых ионов. Получены феноменологические следствия модели применительно к проблеме свободного равновесного состояния кварков и глюонов в замкнутом объеме - кварк-глюонной плазме.

5. Проведены новые исследования по установлению ограничений на массы бозона Хиггса в зависимости от масштаба новой физики Λ , при этом найдена функциональная зависимость массы топ-кварка от Λ . Установлено, что включение в теорию фермионов в рамках расширенных моделей или фермионов четвертого поколения, не приводит к существенному изменению полученных результатов. Разработан новый подход для исследования проблемы неустойчивости (слабого) вакуума. Найдены условия для существования устойчивого вакуума при достаточно больших значениях скалярных полей, превышающих значения их вакуумного ожидания. Положение нового стабильного вакуума смещается экспоненциальным образом с увеличением масштаба поля Хиггса.

6. Разработан новый подход для исследования общих свойств тяжелых калибровочных бозонов Z' в рамках модели 4-х фермионного взаимодействия. Впервые проведены исследования распадов Z' -бозонов на адроны и бозоны Хиггса, что позволило оценить константы связи Z' -бозонов с полями других частиц. Проведены новые исследования радиационных распадов Z' с эмиссией стандартных Z -бозонов, а также распадов CP-нечетных хиггсовских бозонов с эмиссией CP-четных легких бозонов Хиггса. Впервые получены массовые правила сумм бозонов Хиггса в рамках расширенной модели Хиггса с двумя дублетами, где отражен учет вклада нового калибровочного бозона Z' . Получены новые ограничения на принципиальные параметры новой физики, исходя из данных коллаборации CDF по поиску отклонений от предсказаний SM при рождении электронов и мюонов с учетом вкладов от новых калибровочных бозонов Z' . Проведены новые исследования бозонов Хиггса в CP-четном и CP-нечетном секторах по их распадам на лептонные пары и двухфотонные или двухглюонные состояния и легкий CP-четный бозон Хиггса, соответственно, а также в распадах собственных массовых состояний Z_2 -бозона на Z_1 -бозон при эмиссии бозона Хиггса.

7. Разработан новый подход к исследованию проблемы тяжелых кварк-антикварковых состояний, содержащих кварки новых поколений, в частности кварки четвертого поколения. Впервые в аналитической форме получено условие на критерий существования таких состояний. Вычислены эффективные сечения рождения тяжелых кварк-

антикварковых состояний. Впервые выполнено исследование рождения этих состояний в распадах CP- четных легких бозонов Хиггса.

8. Разработан новый подход для исследования эффектов адронизации тяжелых состояний кварков и антикварков в фазе деконфайнмента. Найдены новые механизмы, удерживающие тяжелые кварки в связанном состоянии с учетом сильной юкавской константы связи в расширенной модели Хиггса с двумя дублетами. Получены критерии на собственное время жизни тяжелых кваркониев.

Получен коэффициент искажения фазы деконфайнмента в кварк-глюонной плазме. Найден аналитический вид коэффициента искажения с учетом полного и частичного деконфайнмента. Вычисления проведены для c - и b - кварковых состояний в случае векторных и псевдоскалярных мезонов.

Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на семинарах в Лаборатории теоретической физики и в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (Дубна), в институте теоретической физики им. Юкавы (Киото), в Национальной ускорительной лаборатории им Э. Ферми (США), Токийском университете, университетах Тцукубы, Ниигаты, Кочи, Кобе, исследовательском центре ядерных проблем университета в Осаке, в университетах Милана, Пизы, Неаполя, Падуи, Флоренции, Триеста, Афин, Варшавы, Братиславы, институтах ядерной физики в Кракове и Орсэ, в Национальной ускорительной лаборатории в Сакле, Технических университетах в Берлине и Вене, в институте физики высоких энергий Академии наук Австрии (Вена), а также на Международной конференции по теории связанных состояний и протяженных объектов, Каруизава (Япония) 1992; Международных конференциях по структуре адронов в Словакии, 1988, 1990, 1992; Международном симпозиуме по слабым и электромагнитным взаимодействиям, Осака, 1995; Международной конференции по интегралам и путям, Флоренция, 1998; Международной Боголюбовской конференции, Киев, 1999, 2004; III Международной Сахаровской конференции по физике, Москва, 2002; Международной конференции по физике на ATLAS, Афины, 2003; Международной конференции по физике высоких энергий (Рочестерская конференция), Пекин, 2004; VI-й Международной конференции по конфайнменту кварков, Сардиния, 2004; Международной конференции по физике тяжелых кварков, Брукхэйвен (США), 2006; VII-й Международной конференции по конфайнменту кварков, Понта Дельгада, 2006.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 36 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 8 глав и заключения. Диссертация содержит 261 страниц машинописного текста, 21 рисунок, 9 таблиц. Список литературы включает 264 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Во введении дан обзор развития теории электрослабых и сильных взаимодействий элементарных частиц, начиная с 1940-х годов до настоящего времени, в основном в

тех направлениях, которые стали основой новых исследований в диссертации. Обсуждаются современные вопросы теории связанного состояния элементарных частиц как в легком, так и в тяжелом секторах, ее внутренних и нерешенных проблемах, применение теории к низкоэнергетическим процессам и в физике высоких энергий. Обоснована принципиальная возможность и необходимость расширения СМ для исследования эффектов новой физики при масштабах энергии $\sim O(1 \text{ ТэВ})$. Сформулирована цель работы, обоснована актуальность проведенных в диссертации исследований, и изложено ее краткое содержание.

2. В первой главе представлены результаты, касающиеся общих свойств моделей связанных состояний кварков и антикварков как в легком, так и в тяжелом секторах. Получены новые результаты, касающиеся общих свойств редких распадов легких адронов (π, η, K_L), исследованы их феноменологические свойства и ненаблюдаемые виртуальные состояния. Обнаружены новые эффекты, отражающие существенную роль вещественной части амплитуды лептонных распадов π, η, K_L -мезонов. Новая схема исследований процессов лептонных распадов K_L -мезонов может быть применена ко многим редким модам распадов K_L -мезонов и открывает, таким образом, новые теоретические перспективы в этой области физики. Рассмотрены следствия применительно к проблеме σ -мезона. Исследованы ранее не известные свойства легких адронов, содержащих странные кварки.

Процесс распада K_L - мезона на два лептона наиболее важен в смысле исследования физики промежуточных состояний, так как вклады на малых масштабах, на которых, как предполагается, абсорбтивные компоненты, связанные с двухфотонным промежуточным состоянием, определяют в основном сам процесс распада. Таким образом, на "долю" вклада от вещественной части амплитуды распада остается довольно узкая щель. Метод вычислений основан на одновременном формализме в квантовой теории поля, где основным элементом является вычисление переходного формфактора в виде функции от вершинного оператора, описывающего связанное состояние кварка и антикварка. Исследовано ядро уравнения связанного состояния. Получено условие стабильности связанного состояния.

Модель основана на взаимодействии между кварком и антикварком с гамильтонианом взаимодействия, выбранным в следующем виде

$$H_{int}(x) = g : \bar{\psi}_q(x) \hat{O} \psi_q(x) P(x) : .$$

В этой формуле спинорное поле $\psi_q(x)$ соответствует полю составляющего кварка, а $P(x)$ отвечает связанному кварк-антикварковому состоянию; \hat{O} - набор матриц, описывающих спиновые состояния кваркония, например, $i \gamma_5, i \gamma_\mu, i \gamma_\mu \gamma_5$.

Одной из целей настоящей главы является получение уравнения для вершинной функции относительного движения кварка и антикварка. Метод основан на специальной релятивистской формулировке теории возмущения, в которой все составляющие объекты находятся на массовой поверхности в начальном, промежуточном и конечном состояниях и имеют положительные энергии. Это является вполне достижимым в предположении о виртуальном состоянии дополнительной скалярной частицы с 4-импульсом λt в вершине, описываемой полями кварка и антикварка, и причем таким образом, чтобы полный 4-импульс связанного состояния кварка и антикварка не сохранялся. Здесь ве-

личина λ является 4 - вектором со следующими свойствами: $\lambda^2 = 1$, $\lambda^0 = (\vec{\lambda}^2 + 1)^{1/2} > 0$, где τ - одномерный инвариантный параметр.

Проведено исследование вкладов в вершинную функцию странных кварков. Получено лоренц-инвариантное обобщение ядра взаимодействия в уравнении для связанного состояния в легком кварковом секторе. Найдено условие стабильности для связанного состояния и определены параметры в модели с составными кварками.

Прецизионное изучение лептонных распадов $\eta \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$ позволило получить ранее неизвестную вещественную часть амплитуды. Исследованы лептон-антилептонные моды распадов η - мезонов в двух петлях с учетом релятивистского относительного движения кварков разных сортов в вершинной функции. Вычисленные вероятности распадов находятся в хорошем согласии с опытными данными. Получено хорошее согласие теоретической оценки относительной вероятности распада (брэнчинга) одного из наиболее важных электрослабых распадов $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$ с данными BNL $BR(K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (7.0 \pm 0.5) \times 10^{-9}$ и КЕК $BR(K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (7.9 \pm 0.9) \times 10^{-9}$. Предсказанная масса сигма-мезона, $m_\sigma = 522$ МэВ, соответствует низколежащему состоянию $\sigma(600)$ в легком скалярном нонете в области 0.5 ГэВ - 1.0 ГэВ, и находится в хорошем согласии с другими теоретическими оценками.

3. Во второй главе рассматриваются модели, содержащие экзотические бозонные состояния в векторном и скалярном секторах. Впервые проведено исследование распределения кварков в легких адронах и построена модель для рождения легких экзотических бозонных состояний в распадах легких векторных мезонов. Построена модель скалярного поля дипольного духа в том числе и с учетом конечной температуры. Легкие векторные состояния возникают в контексте моделей, расширенных до новой калибровочной группы $U'(1)$. Модель основана на существенном вкладе КХД аномалии в дивергенции аксиального тока для объяснения свойств распада $\eta \rightarrow \pi^0 \chi$, где константы взаимодействия нового скалярного χ -бозона с полями кварков, g'_1 , малы по сравнению с константами взаимодействия $g_{1,2}$, принятыми в СМ, $g'_1 \ll g_{1,2}$. В модели явным образом выделена лидирующая роль связи χ -бозон - глюоны, индуцированной тяжелыми виртуальными кварками через известный след тензора энергии-импульса

$$\Theta_\mu^\mu(x) = -\frac{b \alpha_s}{8 \pi} \tilde{G}_{\mu\nu}^a(x) G^{a\mu\nu}(x) + M_{ud}(x),$$

где $M_{ud}(x) = k_d \bar{d}(x) \hat{m}_d d(x) + k_u \bar{u}(x) \hat{m}_u u(x)$, $G_{\mu\nu}^a(\tilde{G}_{\mu\nu}^a)$ - тензор напряженности калибровочного поля (ему дуальный), k_d, k_u -модельно-зависимые коэффициенты, $d(x)$ и $u(x)$ -поля кварков down- и up-типов, \hat{m}_d и \hat{m}_u - параметры масс кварков d и u ; b - суть первый коэффициент в $\beta(\alpha_s)$ -функции. При этом амплитуда процесса $\eta \rightarrow \pi^0 \chi$ имеет вид

$$M^a(q_\mu) = \langle \pi^0(q_\mu) | H^a | P \rangle,$$

где H^a - часть гамильтониана, нарушающая $SU(3) \times SU(3)$ симметрию

$$H^a = c_0 u^0 + c_3 u^3 + c_8 u^8,$$

$$u^a(x) = \bar{q}(x) \lambda^a q(x),$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{6}} \sum_{q:u,d,s} m_q, \quad c_3 = \frac{m_u - m_d}{2}, \quad c_8 = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left(\sum_{q:u,d} m_q - 2m_s \right).$$

Впервые получены ограничения сверху на константы взаимодействия χ - бозона с кварками в зависимости от угла θ смешивания $\eta - \eta'$: $k_q < 0.7$ и $k_q < 0.6$ при $\theta = -20^\circ$ и $\theta = -10^\circ$, соответственно, когда $\epsilon = 0.27$, а также $k_q < 0.4$ и $k_q < 0.3$ при $\theta = -20^\circ$ и $\theta = -10^\circ$, соответственно, когда $\epsilon = 0.51$, где $\epsilon = (m_d - m_u)/(m_d + m_u)$. Примером оценки относительной ширины распада $\eta \rightarrow \pi^0 \chi$, $BR(\eta \rightarrow \pi^0 \chi)$, является величина $O(10^{-5})$ при изменении массы m_χ от 100 МэВ до 400 МэВ. При этом χ - бозон может быть зарегистрирован по двухпионному распаду с шириной $\Gamma(\chi \rightarrow \pi\pi) \sim 1 - 2$ эВ.

Найден масштабный асимптотический закон вида $M^{-1/2}$ (M - масса связанного состояния) для переходных формфакторов лептонных распадов D, D_s, B, B_s - мезонов, а также состояния $T(\bar{q}Q)$ с массой $O(100$ ГэВ).

Впервые исследуемая мода распада $\omega \rightarrow \gamma\chi$ обладает относительной вероятностью возможной для прецизионных измерений в опытах с редкими распадами легких адронов. Представленный в диссертации анализ показывает, что наилучший результат для брэнчинга распада $\omega \rightarrow \gamma\chi$ можно достичь на уровне $10^{-9} \div 10^{-7}$ в случае релятивистского подхода к проблеме, и $10^{-11} \div 10^{-9}$ при использовании волновой функции в начале координат.

Таким образом, радиационные распады легких векторных мезонов позволяют дать оценку порога рождения легких скалярных χ - бозонов.

Сформулирована и построена модель, в которой скалярное "глюонное" поле дипольного "духа" $\chi(z)$ в пространстве \mathfrak{R}^D размерности D удовлетворяет дифференциальному уравнению четвертого порядка и, взаимодействуя с полем кварка $Q(z)$, приводит к корректному и нетривиальному результату в смысле Фурье-преобразования потенциала взаимодействия, возрастающего с увеличением расстояния между кварками (в комплексном пространстве Шварца $S'(\mathfrak{R}_D)$) во всей области существования аналитической функции r^λ при всех значениях $\lambda \neq -D, -D - 2, \dots$. Физическая идея модели может быть использована в исследованиях нового типа взаимодействий, осуществляемых скалярными частицами χ в физике тяжелых кварк-антикварковых состояний.

Получены новые формулы, объясняющие уменьшение физической массы χ -бозона в случаях специальных соотношений между размерностью пространства D и показателем h степени уравнения движения для поля χ при фиксированном значении константы самодействия λ . Модель является действительной при значениях массы скалярного поля дипольного типа, удовлетворяющих соотношению $m_0^2 > \lambda \Delta(z)$ с двухточечной функцией Уайтмана $\Delta(z)$.

При выборе пространственно-временной зависимости $D = 2(h - 1)$, масса поля уменьшается с увеличением $\lambda \Delta(z)$ при положительной λ . Физическая масса χ - бозона стремится к параметру m_0 при фиксированной λ в случаях, когда $D > 2(h - 1)$ на больших расстояниях $\sqrt{z^2}$, и $D < 2(h - 1)$ при малых $\sqrt{z^2}$.

Впервые получено выражение для массы χ -бозона при условии конечной температуры. Показано, что симметрия может восстанавливаться при температуре $T_0 \simeq T_c[1 - \lambda \Delta/(2m_0^2)]$, меньшей, чем температура фазового перехода T_c с существенной зависимостью от величины (и знака) константы самодействия λ . Проблема реальной оценки как m_χ^2 , так и dm_χ^2/dT еще раз подчеркивает необходимость независимого исследования константы самодействия λ .

Суммируя вышеизложенное, отметим, что поиски скалярных объектов типа χ в распадах легких адронов являются фундаментальной проблемой низкоэнергетической физики для определения квантовых чисел новых бозонов, если они будут обнаружены на новых ускорителях частиц.

Полученные результаты изменили ранее принятую схему поиска экзотических легких скалярных состояний в экспериментах на средние энергии посредством регистрации конечных пар лептонов или гамма-квантов. Предложенный в диссертации новый подход исследования легких скалярных частиц в распадах легких адронов является весьма актуальным в свете поиска новых частиц на ускорительных фабриках, например, η -мезонов.

4. Третья глава посвящена классической проблеме удерживания кварков на больших расстояниях в рамках дуальной хиггсовской модели. В данной главе получила новое развитие идея о том, что вакуум в теории Янга-Миллса может быть реализован посредством конденсата пар монополей и антимнополей. Построена модель, в которой фундаментальными переменными являются дуальные векторные потенциалы, связанные минимальным образом с полями монополей (бозонов Хиггса). Последние, удовлетворяющие уравнениям дипольного типа, классифицируются с помощью обобщенных функций Уайтмана. Распределение удерживающего потока (в "тонкой трубке"), формируемого между двумя тяжелыми цветовыми зарядами, понимается в том смысле, что абелевы монополи вытесняются из области, занимаемой "тонкой трубкой", и абелев электрический поток сжимается в струну (дуальный эффект Мейсснера). Соответствующий лагранжиан дуальной модели записывается в виде

$$L = 2 Tr \left[-\frac{1}{4} \hat{F}_{\mu\nu} \hat{F}^{\mu\nu} + \frac{1}{2} (D_\mu \hat{B}_i)^2 \right] - W(\hat{B}_i),$$

где

$$\begin{aligned} \hat{F}_{\mu\nu} &= \partial_\mu \hat{C}_\nu - \partial_\nu \hat{C}_\mu - i g [\hat{C}_\mu, \hat{C}_\nu], \\ D_\mu \hat{B}_i &= \partial_\mu \hat{B}_i - i g [\hat{C}_\mu, \hat{B}_i], \end{aligned}$$

\hat{C}_μ и \hat{B}_i -матрицы полей, $\hat{F}_{\mu\nu}$ - абелев тензор напряженности, \hat{C}_μ - векторный потенциал, дуальный к векторному потенциалу в стандартной модели. Поле Хиггса имеет свое вакуумное ожидание \hat{B}_0 , при котором потенциал $W(\hat{B}_i)$ имеет минимальное значение. Именно \hat{B}_0 отвечает за цветной ток монополя, удерживающий электрический цветовой поток. Взаимодействие между тяжелыми кварком Q и антикварком \bar{Q} обеспечивается полем \hat{C}_μ через тензор напряженности струны Дирака $\tilde{G}_{\mu\nu}$. Связанное состояние $Q\bar{Q}$ появляется при замене $\hat{F}_{\mu\nu} \rightarrow \lambda^8 G_{\mu\nu}$, где $G_{\mu\nu} = \partial_\mu \hat{C}_\nu - \partial_\nu \hat{C}_\mu + \tilde{G}_{\mu\nu}$. Впервые получено решение для дуального калибровочного поля C_μ , которое определяется дивергенцией тензора напряженности струны Дирака $\partial^\nu \tilde{G}_{\mu\nu}$, сдвинутой на дивергенцию скалярного поля Хиггса

$$C_\mu(x) = \frac{1}{3 m^2} \partial^\nu \tilde{G}_{\mu\nu}(x) - \frac{4}{m} \partial_\mu b(x),$$

где m - масса дуального поля $C_\mu(x)$. Установлено, что дуальные калибровочные поля приобрели свою массу благодаря взаимодействию с полями скалярных частиц. Получены ранее неизвестные аналитические выражения для функций распространения

скалярного поля Хиггса и дуального калибровочного поля в $S'(\mathfrak{R}_4)$. Вычислен в аналитическом виде потенциал взаимодействия (между двумя тяжелыми зарядами), возрастающий с расстоянием линейным образом и дополненный ранее неизвестной логарифмической поправкой. В рамках дуальной модели найдено выражение для r - профиля электрического поля в вихревом потоке

$$E_z(r) = \sqrt{\frac{\pi m}{2 k r}} \left(k m - \frac{1}{2 r} \right) \exp(-k m r),$$

где k -модельная константа $\sim O(1)$. Получены дополнительные ограничения на постоянную натяжения струны.

5. В четвертой главе построена модель температурно-зависимой эволюции и распространения тождественных частиц, рожденных при высоких энергиях в хаотически распределенном окружении других частиц. Как развитие этих представлений, предложена новая схема эволюции полевой степени свободы, описываемой (составными) операторами рождения b^+ и уничтожения b , удовлетворяющими следующим уравнениям эволюции

$$\begin{aligned} -i \partial_\tau b^+(\vec{k}, \tau) &= F^+(\vec{k}, \tau) - A^+(\vec{k}, \tau) + P, \\ i \partial_\tau b(\vec{k}, \tau) &= F(\vec{k}, \tau) - A(\vec{k}, \tau) + P, \end{aligned}$$

где взаимодействия с окружающими полями на квантовом уровне определяются операторами типа $A(\vec{k}, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(\vec{k}, \tau' - \tau) b(\vec{k}, \tau') d\tau'$ с ядром взаимодействия K , и равновесие может быть нарушено оператором $F(\vec{k}, \tau)$ и постоянно действующей силой P . С помощью полученных решений этих эволюционных уравнений в 4-мерном импульсном пространстве Минковского $\mathfrak{R}_4(M)$ построены двухчастичные функции корреляции $C_2(Q = k - k')$ (прежде всего для тождественных частиц) и вычислены двухчастичные функции распределения типа $W(k_\mu) = \langle N \rangle \langle b^+(k_\mu) b(k_\mu) \rangle_T$, $W(k_\mu, k'_\mu) = \langle N(N' - 1) \rangle \langle b^+(k_\mu) b^+(k'_\mu) b(k_\mu) b(k'_\mu) \rangle_T$, при конечной температуре T , где $\langle N \rangle$ -средняя множественность частиц при данной энергии. Получены аналитические выражения для двухчастичной бозе-эйнштейновской корреляции (БЭК) тождественных частиц. Впервые получены дополнительные слагаемые в бозе-эйнштейновской корреляционной функции, причем эти слагаемые имеют свое происхождение в результате учета произвольного источника в конечном пространстве-времени. В диссертации получила подтверждение гипотеза о том, что характер двухчастичной БЭК тождественных частиц, определяется масштабом пространственно-временной области, являющейся источником этих частиц. Получено математически строгое подтверждение того факта, что при "сближении" 4-импульсов k_μ и k'_μ , соответствующих двум частицам, возможно возникновение интерференционного пика вероятности, ширина которого определяется пространственно-временными характеристиками источника тождественных частиц.

Впервые получены ограничения на размеры области стохастического многочастичного распределения в зависимости от массы частицы. При достаточно точных измерениях парных корреляций появляется возможность получить детальные сведения о пространственно-временном распределении области генерации частиц, что позволит в свою очередь, используя формулы, полученные в диссертации, оценить такие важные характеристики, как: радиус корреляции, параметры когерентности и хаотичности, среднюю множественность частиц, температуру области рождения частиц. Модель построена таким образом, что формулы, отражающие основные результаты, записаны в

терминах стохастического ядра взаимодействия $K(k_\mu)$ (в $S(\mathfrak{R}_4)$), которое является основным входящим элементом в теорию. В этом контексте модель является полуфеноменологической в том смысле, что первичные принципы переносятся в феноменологию. Полученная теоретическая функция для двухчастичной корреляции $C_2(Q)$ в случае бозе-частиц находится в хорошем согласии с данными коллабораций ALEPH, DELPHI и OPAL (LEP), а также ZEUS (DESY) в кинематически допустимой области изменения передачи импульса Q . Экспериментальное поведение этой функции корреляции воспроизводится с хорошей точностью. Впервые получены ограничения на минимальные размеры пространственно - временного распределения источника рождения частиц в зависимости от максимального значения двухчастичной функции корреляции $C_2(Q)$, средней множественности, абсолютной температуры окружающей среды и массы адронов. Найдены новые термодинамические свойства области рождения частиц, и предложена новая схема оценки статистического распределения и средней множественности частиц.

Развитый метод является основой для перспективных исследований и вычислений трех и более частичных функций корреляции, а также для обобщения в случае рождения различных типов частиц, включая резонансное рождение и взаимодействия в конечных состояниях.

6. В пятой главе в рамках СМ исследуется ренормализационно-групповое уравнение для бегущей константы связи бозона Хиггса λ как функции от переменной $\epsilon = g_t^2/g_1^2$, где g_t и g_1 - юкавская и калибровочная константы взаимодействия, соответственно. Разработан новый подход в исследовании функциональной зависимости $x(\epsilon) = \lambda(\epsilon)/g_1^2$ при больших значениях ϵ . Как результат, получены ограничения на массы бозона Хиггса m_χ и топ-кварка m_t в зависимости от параметра новой физики Λ . При минимальном масштабе $\Lambda=1$ ТэВ для масс хиггсовского бозона и топ-кварка получены следующие значения: $m_\chi=120$ ГэВ и $m_t \simeq 180$ ГэВ. Впервые найдена функциональная зависимость ϵ от изменения масштаба Λ и массы топ-кварка. Получено ограничение сверху на массу $m_\chi < 300$ ГэВ при изменении Λ от масштаба Планка до 1 ТэВ. Включение в теорию фермионов четвертого поколения или фермионов в рамках E_6 модели приводит к незначительному изменению результатов без появления новых эффектов.

Проведено исследование вопросов, касающихся проблем связи бозонов Хиггса и тяжелых кварков, соотношений между их массами и объединяющей эти проблемы задаче о стабильности вакуума в СМ. Даны оценки на массу бозона Хиггса m_χ (160 ГэВ), принимая во внимание суммарный анализ данных Стандартной Модели в плоскости масс топ-кварка m_t и m_χ -бозона, и с учетом стабильности вакуума в плоскости (m_t, m_χ) . Однако, при определенных значениях масс тяжелых кварков и m_χ -бозона физический вакуум может стать метастабильным с временем жизни, превышающим возраст Вселенной, и именно эти вопросы неустойчивого вакуума требуют прояснения с учетом ограничений, накладываемых на масштаб новой физики Λ .

Проведено исследование стабильности вакуума. С физической точки зрения вопрос о стабильности вакуума в теории электрослабых взаимодействий зависит от схемы вычисления эффективного потенциала. В диссертации рассматривается эффективный потенциал в однопетлевом представлении. Решена задача о нестабильности слабого вакуума. В рамках однопетлевого приближения найдены условия, при которых эффектив-

ный потенциал с полями бозона Хиггса χ

$$V_{eff}(\chi) = -\frac{1}{2} m_0^2 \chi^2 + \frac{1}{4} g_0^2 \chi^4 + V_1(\chi)$$

не ограничен снизу и, тем самым, найдены условия для существования устойчивого вакуума при достаточно больших значениях полей χ , превышающих обычное вакуумное ожидание $\langle \chi \rangle \simeq 246$ ГэВ, которое уже является состоянием метастабильного вакуума. Такая возможность появляется при условии, что

$$V_1(\chi \gg \langle \chi \rangle) \sim \frac{1}{64 \pi^2} (G + 9 g_0^4) \chi^4 \ln \frac{g_0^2 \chi^2}{M^2},$$

где G -комбинация известных калибровочных и юкавских констант, M -ренормализационный масштаб. Получены ограничения на массу бозона Хиггса χ снизу, например, $m_\chi \geq 110$ ГэВ при $g_0^2 \sim 0.025$ и $m_t = 175$ ГэВ. Верхний предел для m_χ ограничен следующим образом

$$m_\chi < \left\{ \frac{1}{\kappa} \left[\frac{1}{2} + \left(\frac{2}{\kappa} \right)^{1/2} \pi \left(1 + \frac{\kappa}{16 \pi^2} (1 + 14 g_0^2) \right) \right] \right\}^{1/2} \langle \chi \rangle,$$

$\kappa = m_0^2/m_\chi^2$ и, например, $m_\chi < 549$ ГэВ при $m_t = 175$ ГэВ и $\kappa \sim O(1)$.

Установлено, что при учете кварков четвертого поколения, также как и дополнительных тяжелых калибровочных бозонов, в эффективном потенциале с участием бозонов Хиггса, условие стабильности вакуума (типа Вайнберга- Линде) более неприменимо, поэтому изменяются ограничения на массы скалярных бозонов в сторону их уменьшения.

7. В шестой главе проведено исследование общих свойств дополнительных тяжелых калибровочных бозонов на основе новых калибровочных симметрий. Предложена новая параметризация взаимодействий, отражающих вклады дополнительных нейтральных Z' - бозонов, в виде эффективного лагранжиана

$$L = -\frac{g^2}{M_{Z'}} \left(\frac{\cot \phi}{2} \right)^2 \left(\sum_{l:e,\mu} \bar{l}_L \gamma_\mu l_L \right) \left(\sum_{q:u,d,s,c,\dots} \bar{q}_L \gamma^\mu q_L \right),$$

где ϕ -угол смешивания в секторе $A_\mu - Z_{1\mu} - Z_{2\mu}$ в $SU(2)_h \times SU(2)_l$ (индексы h и l относятся к тяжелым и легким фермионам, соответственно) эффективной расширенной модели слабого взаимодействия. Этот лагранжиан соответствует дополнительным вкладам в результате обмена промежуточным Z' - бозоном в модели 4-х фермионного взаимодействия. Массивность Z' - бозона (предполагается, что $M_{Z'} \gg m_W$), как основного переносчика взаимодействия, определяет конечность радиуса взаимодействия. Рассмотренные на примере вышеприведенного лагранжиана общие свойства дополнительных вкладов новой физики, реализованные через новые тяжелые калибровочные бозоны, задают направления поисков конкретных механизмов в различных расширениях СМ.

Получены новые результаты в исследованиях распадов Z' -бозонов в расширенной модели E_6 , содержащей новую калибровочную группу $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times U(1)'$. Предлагаются новые возможности экспериментального наблюдения Z' - бозонов по их распадам на адронные связанные состояния, содержащие тяжелые кварки и бозоны

Хиггса, которые идентифицируются по основным модам распадов на два фотона, глюонные струи или $\bar{b}b$ - пару. Полученные в диссертации новые аналитические выражения для ширин распадов Z' -бозонов позволяют сделать оценки на константы связи Z' -бозонов с полями других частиц. В частности, впервые даны ограничения на векторную и аксиальную константы связи Z' -бозонов с кварками

$$g'_V = \xi_V^2 \cdot \frac{m_Z^2 G_F}{2\sqrt{2}} (1 - 4|e_Q| \sin^2 \theta_W)^2, \quad g'_A = \xi_A^2 \cdot \frac{m_Z^2 G_F}{2\sqrt{2}},$$

где

$$\xi_{V,A} = (a_{V,A} + b_{V,A} \cdot \Delta_Q) \cdot (2\alpha)^{-1},$$

$$a_V = \begin{cases} 3.21 \\ 3.12 \end{cases}, \quad b_V = \begin{cases} 8.67 \\ -4.79 \end{cases}, \quad a_A = \begin{cases} -3.15 \\ 0.15 \end{cases}, \quad b_A = \begin{cases} 3.30 \\ -3.30 \end{cases},$$

и верхние числа соответствуют *up*-кваркам, а нижние- *down*-кваркам, $0 \leq \Delta_Q \leq 1$, $\alpha = \sqrt{(5/3)\omega} \cdot \sin \theta_W$, $\omega \sim O(1)$. Установлено, что матричные элементы переходов Z' -бозонов в тяжелые векторные адроны (J/Ψ , Υ и даже "топоний" $T(\bar{t}t)$) с эмиссией хиггсовского бозона очень чувствительны к выбору новых векторных g'_V и аксиальных g'_A констант взаимодействий. Данная схема является актуальной в виду того, что появление нового калибровочного бозона является дополнительным источником рождения хиггсовского бозона. Получены новые ограничения на вероятность распадов собственных массовых состояний Z_2 на тяжелые кварконии со спином $s = 1$ и эмиссией бозонов Хиггса. Проведено сравнение с лептонными модами распада, а также с распадами на пару кварк-антикварк в тяжелом секторе.

Выполнены исследования радиационных распадов Z' -бозонов с рождением Z . Впервые определена нижняя граница вероятности распада $R(Z' \rightarrow Z\gamma/\mu^+\mu^-) > 1.4 \times 10^{-5} \cot^2 \phi$ и получена оценка на угол смешивания $Z'-Z$, $|\xi| < 5 \times 10^{-2}$, с учетом дополнительного угла смешивания ϕ расширенной калибровочной группы $SU(2)_h \times SU(2)_l$. Впервые получено аналитическое выражение для отношения двух масштабов u/v нарушения исходной симметрии в модели $SU(2)_h \times SU(2)_l$, что приводит к следующей оценке $1.16 \leq (u/v) \leq 2.98$. Здесь u определяет масштаб, при котором группа $SU(2)_h \times SU(2)_l$ нарушается до диагональной подгруппы $SU(2)_L$, $v = 246$ ГэВ.

Полученные новые результаты позволяют сделать заключение о косвенном наблюдении Z' -бозонов не только в каналах их распадов на лептонные пары, но также и нахождении резонансов в фотонном спектре радиационного распада Z' . Расширенная модель $SU(2)_h \times SU(2)_l$ допускает усиление связи фермионов третьего поколения с расширенным калибровочным сектором.

В качестве нормировочных впервые приведены сравнения с исследованными в диссертации распадами $Z' \rightarrow \tau^+\tau^-$ и $Z' \rightarrow \bar{b}b$, $Z' \rightarrow \bar{t}t$ с использованием экспериментальных данных, полученных на LEP.

8. В седьмой главе проведено исследование эффектов новой физики, допускающей отклонения от стандартных представлений рождения электронов и мюонов в рамках расширенной модели электрослабых взаимодействий $SU(2)_h \times SU(2)_l$ с учетом тяжелых (третье поколение) и легких фермионов. При этом используются данные коллаборации CDF (Tevatron, США) при энергии $\sqrt{s} = 1.8$ ТэВ.

Впервые получены массовые правила сумм Хиггс-бозонов в минимальном суперсимметричном расширении СМ с учетом вклада от Z' - бозона. В однопетлевом приближении получено соотношение между массами легких и тяжелых CP -четных бозонов Хиггса, m_h и M_H , соответственно, массой CP -нечетного Хиггс-бозона M_A и массой Z' - бозона $M_{Z'}$ в виде следующего правила сумм

$$M_{Z'} = \frac{m_h^2 - M_A^2 + \delta_{ZZ'} - \Delta}{M_{Z'} + M_H} + M_H,$$

где Δ - однопетлевая поправка, связанная с вкладом от суперсимметричных топ-кварков. Исследование нижнего предела массы Z' -бозона проведено на основе расширенной модели $SU(2)_h \times SU(2)_l$, где состояния Z - и Z' - бозонов переопределялись через нейтральные собственные массовые состояния Z_1 и Z_2 посредством 2×2 матрицы

$$\begin{pmatrix} Z \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\cos^3 \phi \sin \phi \\ \frac{\cos^3 \phi \sin \phi}{x \cos \phi} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{pmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} Z_1^\mu &= \cos \theta (\cos \phi W_{3h}^\mu + \sin \phi W_{3l}^\mu) - \sin \theta X^\mu, \\ Z_2^\mu &= -\sin \phi W_{3h}^\mu + \cos \phi W_{3l}^\mu \end{aligned}$$

и $x = u^2/v^2$. Новым в диссертации является совместный анализ эффективного кварк-лептонного контактного взаимодействия с неизвестным пороговым масштабом Λ_{ij} ($i, j = L, R$) и правилами сумм масс хиггсовских бозонов. Исходя из опытных данных коллаборации CDF, получены и проанализированы ограничения, которые накладываются экспериментами на нижнюю границу масштаба Λ , что позволяет оценить порог массы Z' -бозона

$$M_{Z'} = \sqrt{\alpha} \Lambda \cot \phi / (2 \sin \theta)$$

в зависимости от угла смешивания ϕ .

Используя полученные правила сумм масс бозонов Хиггса, впервые получены ограничения на верхний предел произведения масс суперсимметричных топ-кварков, а также ограничения снизу на массу легкого CP - четного бозона Хиггса. Также впервые получены ограничения снизу на массы двух тяжелых бозонов Хиггса в минимальной E_6 суперструнной теории, содержащей дополнительные поля в скалярном и калибровочном секторах.

Разработан новый подход по исследованию общих свойств двухфотонных, лептонных и распадов на глюоны CP - четных (h, H) и CP - нечетных (A) бозонов Хиггса в 2-х дублетной модели Хиггса. Особое внимание уделяется распадам CP - нечетного бозона Хиггса (A) на два гамма-кванта или глюона с эмиссией CP - четного легкого бозона Хиггса h : $A \rightarrow \gamma\gamma h$, $A \rightarrow ggh$. Вычислены вероятности распадов $h(H) \rightarrow gg$, $h(H) \rightarrow \gamma\gamma$, $A \rightarrow \bar{l}l$, $A \rightarrow ggh$, $A \rightarrow \gamma\gamma h$ с учетом эффектов влияния кварков четвертого поколения. Показано, что коэффициент усиления этого эффекта составляет ~ 8 в широком диапазоне масс кварков (115 ГэВ - 800 ГэВ).

Дана оценка перспективы исследования отмеченных выше распадов бозонов Хиггса в экспериментах на Тэватроне и Большом адронном коллайдере.

9. В восьмой главе разработан новый подход к исследованию тяжелых кварк-антикварковых состояний, включая кварки четвертого поколения *up*- и *down*- типов. Модель базируется на основе расширенной группы

$$SU(3)_4 \times SU(3)_h \times SU(3)_l \times U(1)_{Y4} \times U(1)_{Yh} \times U(1)_{Yl} \times SU(2)_L \\ \rightarrow SU(3)_{QCD} \times U(1)_{EM},$$

где группы $SU(3)_4 \times U(1)_{Y4}$, $SU(3)_h \times U(1)_{Yh}$ и $SU(3)_l \times U(1)_{Yl}$ связаны с четвертым, третьим и двумя первыми поколениями, соответственно. В локальной системе, содержащей тяжелые кварк Q и антикварк \bar{Q} с массами порядка $\sim O(100 \text{ ГэВ})$, полагается, что по мере сближения двух дираковских частиц $Q(x)$ и $\bar{Q}(x')$, одна из частиц, например, $\bar{Q}(x)$ взаимодействует эффективно со скалярным полем $\chi(x)$, окружающим также другую частицу $Q(x)$, причем это взаимодействие описывается членом $\lambda \bar{Q} Q \chi$. Оператор числа бозонов (Хиггса) собственного поля χ на поверхности σ записывается в виде

$$N[\sigma] = \frac{2}{i} \int_{\sigma} (\chi^+[x, \sigma])^* \partial_{\mu} \chi^+[x, \sigma] d\sigma_{\mu}.$$

Собственное поле изменяется в пространстве как $\exp(-\mu r)/r$ и эффективный радиус его действия $\sim 1/\mu$. Предполагается, что бозоны Хиггса, излученные источником, поглощаются в точке r . Поскольку это явление происходит в течение промежутка времени $\tau \simeq r/a$ (a - скорость частицы), то неопределенность энергии выражается стандартным образом $\Delta E = (h a/r) < h c/r$ (c - скорость света). Отсюда условие возможности излучения N бозонов Хиггса определяется следующим выражением $N \mu h c < \Delta E < h c/r$ или $N < 1/(r \mu)$. Таким образом, вероятность наблюдения N бозонов Хиггса весьма мала при больших значениях μ . Однако, область, в которой существует вероятность появления хотя бы одной скалярной частицы с массой μ ($N = 1$), определяется неравенством $r < 1/\mu$, т.е. область, занимаемая собственным полем χ , равна $1/\mu$. Эффективный потенциал взаимодействия между двумя дираковскими частицами посредством скалярного поля есть $(1/r)\lambda \exp(-\mu r)$, $r = |\vec{x} - \vec{x}'|$. Таким образом, собственные поля являются промежуточными для взаимодействия полями, которые могут одновременно привести и к трудностям с расходимостями. Построена модель с потенциалом взаимодействия между Q и \bar{Q} следующего вида

$$V_{eff}(r) \sim -\frac{C_F}{r} \alpha_s(m_Q) - \frac{\lambda(m_Q, \xi_{\chi Q})}{r} \exp(-m_{\chi} r),$$

где первое слагаемое - вклад, определяемый квантовой хромодинамикой с бегущей константой $\alpha_s(m_Q)$ ($C_F = 4/3$), а второй член есть проявление собственно хиггсовского обмена между кварком и антикварком с константой взаимодействия

$$\lambda(m_Q, \xi_{\chi Q}) = \frac{m_Q^2}{4 \pi v^2} \xi_{\chi Q}^2,$$

где $v = 246 \text{ ГэВ}$ а фактор $\xi_{\chi Q} \geq 1$ отражает возможное отклонение от стандартной модели во взаимодействиях между бозонами Хиггса с кварками.

Впервые проведены исследования по критерию существования тяжелых кварк-антикварковых связанных состояний, $(\Gamma_{tot}/\epsilon_{bound}) < 1$ (Γ_{tot} и ϵ_{bound} - полная ширина

распада и энергия связи, соответственно) с потенциалом взаимодействия, приведенным выше. Получены ограничения на нижнюю границу массы тяжелых кварков m_Q как функции $\alpha_s(m_Q)$ и $\xi_{\chi Q}$, а также верхний предел на массу χ - бозона m_χ .

Представлены новые результаты вычисления ширин распадов тяжелых кваркониев $T(\bar{U}U) \rightarrow hZ$, $T(\bar{D}D) \rightarrow hZ$, а также тяжелых *up*- и *down* - кварков $U \rightarrow DW^+$, $U \rightarrow bW^+$, $D \rightarrow tW^+$.

Для сравнения с потенциальным методом в этой главе проведено исследование конформных свойств КХД для оценки ширин распадов $T(\bar{U}U) \rightarrow hZ$ с учетом флуктуации глюонного поля. Впервые получено, что эффекты непертурбативных флуктуаций глюонного поля в ширине распада $T(\bar{U}U) \rightarrow hZ$ являются пренебрежимо малыми. Получено эффективное сечение рождения тяжелого $T(\bar{Q}Q)$ - состояния с учетом обмена посредством хиггсовского бозона юкавского типа и проведено сравнение с сечением рождения, обусловленного лишь эффектами сильного взаимодействия КХД. Проведено исследование рождения тяжелых кварк-антикварковых состояний в распадах CP -четных бозонов Хиггса h и H , например, $h \rightarrow \Upsilon(\bar{b}b)\gamma$, $H \rightarrow \Upsilon(\bar{b}b)\gamma$, $H \rightarrow T(\bar{t}t)\gamma$. В связи с этим изучены перспективы исследования редких радиационных мод распадов бозонов Хиггса в будущих экспериментах с детекторами ATLAS и CMS (на Большом адронном коллайдере), что позволит выяснить дополнительные ограничения на параметры расширенных моделей Хиггса.

В заключение Главы 8 проведено исследование эффектов адронизации тяжелых состояний кварков и антикварков в фазе деконфайнмента. Построена модель для исследования рождения тяжелых кварк-антикварковых пар в неустойчивом состоянии деконфайнмента, и, в частности, вычислен коэффициент искажения фазы деконфайнмента в кварк-глюонной плазме. Получен аналитический вид коэффициента искажения с учетом полного и частичного деконфайнмента, т.е. отклонения от единицы вероятности рождения $(\bar{Q}Q)$ связанного состояния вследствие эффекта деконфайнмента (в кварк-глюонной плазме). Вычисления проведены для c - и b - кварковых состояний в среде в случае векторных и псевдоскалярных мезонов.

Установлено, что будет маловероятен для наблюдения эффект искажения и подавления связанных состояний $\bar{c}c$ и $\bar{b}b$, если масштаб времени существования "кварк-глюонной плазмы" z_{QGP} будет меньше, чем время жизни связанного состояния z_V , т.е. $z_{QGP} \leq 0.32$ ферми и $z_{QGP} \leq 0.20$ ферми для J/Ψ - и Υ - частиц, соответственно.

В заключении дана сводка основных результатов, полученных в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Г.А. Козлов, К вопросу о рождении связанных релятивистских лептонных состояний в распадах легких мезонов, ЯФ **48**, 265 (1988).
2. G.A. Kozlov, The next step in leptonic decays of eta and K_L bound states, Int. Journ. Mod. Phys. A **7**, 1935 (1992).
3. G.A. Kozlov, Theoretical understanding of large-distance quark forces and QCD effects in quarkonia, IL Nuovo Cim. A **105**, 139 (1992).
4. G.A. Kozlov, Zero-relative energy reduction formalism for heavy-light quark bound state, in Proc. of Diquarks II, Torino, Italy, 1992, p. 186.

5. G.A. Kozlov, A light scalar-HLQBS interplay and HLQBS weak decay test, *IL Nuovo Cim. A* **106**, 1247 (1993).
6. G.A. Kozlov, A model of quantum scalar dipole-type X exotic-boson field at finite temperature, *IL Nuovo Cim. A* **107**, 819 (1994).
7. G.A. Kozlov, Does the fundamental light scalar really exist?, *IL Nuovo Cim. A* **107**, 1739 (1994).
8. G.A. Kozlov, Once more on the electroweak vacuum instability issue, in Yamada Conf. XL IV Proc. of the IV Intern. Symp. on weak and electromagnetic interactions in nuclei, Osaka (1995) p. 107, ed. by H. Ejiri, T. Kishimoto and T. Sato, World Scientific, Singapore.
9. G.A. Kozlov, Instability of weak vacuum, *IL Nuovo Cim. A* **108**, 669 (1995).
10. G.A. Kozlov and Yu.I. Ivanshin, Once more on the role of the bound-state wave function in the leptonic decays of light hadrons, *IL Nuovo Cim. A* **108**, 843 (1995).
11. G.A. Kozlov, Some additional comments on search for a hypothetical light singlet scalar boson, *IL Nuovo Cim. A* **109**, 1207 (1996).
12. G.A. Kozlov, New remarks on search for a hypothetical light scalar boson, *Chinese Journ. of Phys.* **34**, 920 (1996).
13. G.A. Kozlov, Rare radiative decays of the ω , *Hadr. Journ.* **19**, 437 (1996).
14. G.A. Kozlov, Higgs boson coupling behavior at large top quark coupling in the standard model, *Phys. Rev. D* **55**, 5804 (1997).
15. G.A. Kozlov, Does the QGP fire ball really exist ?, *IL Nuovo Cim. A* **111**, 191 (1998).
16. G.A. Kozlov, Deconfined phase via correlation functions: some new trends, *Phys. Rev. C* **58**, 1188 (1998).
17. G.A. Kozlov, Path integral and a deconfined phase: the formal outlook for the multi-TeV quark-gluon plasma, in Proc. of the sixth Intern. Conf. on "Path integrals from peV to TeV. 50 years after Feynman's paper", Florence, Italy, 1998, World Scientific (1999) p. 295, eds. R. Casalbuoni et al.
18. G.A. Kozlov, Remarks on the reduced normal-ordering procedure and σ -meson mass, *IL Nuovo Cim. A* **112**, 307 (1999).
19. G.A. Kozlov, Rare decays of an extra vector boson, *IL Nuovo Cim. A* **112**, 1103 (1999).
20. Г.А. Козлов, Эмиссия бозонов Хиггса в редких распадах дополнительных векторных бозонов, *ЯФ* **63**, 2197 (2000).
21. G.A. Kozlov, New extra gauge boson and unifying couplings, *Ukr. Journ. Phys.* **45**, 591 (2000).

22. G.A. Kozlov, The disorder deviation in the deconfined phase, *Journ. of Mathem. Phys.* **42**, 4749 (2001).
23. G.A. Kozlov, The effective dipole-type field approach and the dual Higgs model, in *Proc. of the 2nd Intern. Symp. on "Quantum theory and symmetries"*, Krakow, Poland, World Scientific (2002) p. 449 (ed. by Kapuscik and Horzela).
24. G.A. Kozlov and M. Baldicchi, The effective dipole-type field approach and the dual Higgs model, *New Journ. of Phys.* **4**, 16 (2002).
25. G.A. Kozlov, The Bose-Einstein distribution functions and multiparticle production at high energies, *New Journ. of Phys.* **4**, 23 (2002).
26. G.A. Kozlov, T. Morii, Higgs mass sum rule in the light of searching for Z' boson at the Tevatron, *Phys. Lett. B* **545**, 127 (2002).
27. G.A. Kozlov, T. Morii, Search for new Higgs physics at the Fermilab Tevatron, *Phys. Rev. D* **67**, 055001 (2003).
28. G.A. Kozlov, O.V. Utyuzh and G. Wilk, The Bose-Einstein correlation function $C_2(Q)$ from a Quantum Field Theory point of view, *Phys. Rev. C* **68**, 024901 (2003).
29. G.A. Kozlov, O.V. Utyuzh and G. Wilk, The Bose-Einstein correlations from a Quantum Field Theory perspective, *Ukr. J. Phys.* **48**, 1313 (2003).
30. G.A. Kozlov, A.N. Sissakian, J.I. Khubua, G. Arabidze, G. Khorauli and T. Morii, Production of (super)heavy quarkonia and new Higgs physics at hadron colliders, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **30**, 1201 (2004).
31. Г.А. Козлов, Конечно-температурные функции распределения Бозе-Эйнштейна для тождественных частиц, *ЯФ* **67**, 63 (2004).
32. G.A. Kozlov, "Deconfined phase via multiparticle correlations", in *Proceedings of 32nd ICHEP, Beijing, China, 16-22.08.2004*, ed. by H. Chen et al., v. I, p. 369 (World Scientific, Singapore).
33. G.A. Kozlov, Radiative decay of Z' boson, *Phys. Rev. D* **72**, 075015 (2005).
34. G.A. Kozlov, New features of two-particle correlations, *Phys. of Part. and Nucl.* **36**, s58 (2005).
35. G.A. Kozlov, Theory and phenomenology of heavy quarkonia and new Higgs physics, *Proc. "Quark confinement and the hadron spectrum VI"*, 6th Conference on Quark Confinement and the Hadron Spectrum, Villasimius, Italy, 21-25 September 2004 (AIP Conference Proceedings, v. 756, p.378, 2005).
36. G.A. Kozlov, The flux-tube phase transition, *Proc. "Quark confinement and the hadron spectrum VII"*, 7th Conference on Quark Confinement and the Hadron Spectrum, Ponta Delgada, Azores, 1-7 September 2006 (AIP Conference Proceedings, v. 892, p.391, 2007).