



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи

Криворученко Михаил Иванович

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ АДРОНОВ В ЯДЕРНОЙ МАТЕРИИ

Специальность 01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в ФГБУ «ГНЦ РФ - Институт Теоретической и Экспериментальной Физики» НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Официальные оппоненты

Хриплович Иосиф Бенционович

член-корреспондент РАН, доктор физ.-мат. наук,
профессор Санкт-Петербургского государственного университета

Копелиович Борис Зиновьевич

доктор физ.-мат. наук, научный сотрудник Департамента физики
Технического Университета Федерико Санта-Мария, Валпараисо, Чили

Лохтин Игорь Петрович

доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского
института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Ведущая организация

ФГБУ «ГНЦ РФ - Институт физики высоких энергий» НИЦ «Курчатовский институт», г. Протвино

Защита диссертации состоится 22 декабря 2015 г. в 11-00 на заседании диссертационного совета Д.201.002.01 в конференц-зале ИТЭФ по адресу:

г. Москва, ул. Б. Черемушкинская, д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ и на сайте www.itep.ru.

Автореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук В. В. Васильев

Общая характеристика работы

Изучение процессов рассеяния, реакций и распадов, связанных с наличием среды, позволяет получить ценную информацию о фундаментальных взаимодействиях и свойствах элементарных частиц. В сильных взаимодействиях роль среды играет ядерная материя при плотности насыщения (обычные ядра) и сверхвысокой плотности (столкновения тяжелых ионов, нейтронные звезды). Для изучения динамики адронов в ядерной материи требуется знание коллективных свойств ядерной материи.

Актуальность темы исследований

При увеличении плотности ядерной материи происходит фазовый переход в кварковую материю. Высокотемпературная кварк-глюонная плазма существовала в Ранней Вселенной. В столкновениях тяжелых ионов создаются условия для образования кварк-глюонной плазмы. Холодная кварковая материя может существовать в сердцевине нейтронных звезд.

Свойства кварковой материи интенсивно изучались с середины 70-х годов в рамках теории возмущений и на основе феноменологических моделей. В последнее десятилетие имел место заметный прогресс в решеточных калибровочных теориях, где были исследованы, в том числе, коллективные свойства кварк-глюонной плазмы при близком к нулю химическом потенциале.

Холодная кварковая материя не поддается анализу с использованием стандартных методов решеточной КХД в силу того, что фермионный детерминант при отличном от нуля химическом потенциале положителен не для всех конфигураций калибровочного поля. Исключением является цветовая группа $SU(2)$ с четным числом сортов кварков. В этой теории свойства холодной кварковой материи удастся исследовать исходя из первых принципов.

Пертурбативные аспекты взаимодействий в кварковой материи изучены достаточно хорошо. В 1991 г. было указано на существование эффекта сверхпроводимости в $SU(2)$ цветовой кварковой материи [1,2]. Данный эффект является по своей природе непертурбативным. В последнее десятилетие сверхпроводимость в

кварковой материи исследовалась в различных версиях модели Намбу-Иона-Лазинио (НИЛ), холодная $SU(2)$ цветовая кварковая материя успешно моделируется на решетках.

Описание парных корреляций в $SU(3)$ кварковой материи сопряжено с необходимостью учета конфинмента. В цветовой группе $SU(3)$ волновая функция БКШ содержит примесь цветных состояний. Бесцветная компонента может быть выделена в рамках проекционной теории БКШ. Данное обобщение теории БКШ широко используется в ядерной физике, где при описании спаривания нуклонов возникает необходимость проектирования волновой функции БКШ на состояния с определенным числом частиц, угловым моментом и изоспином. В случае цветовой группы $SU(3)$ технические трудности, возникающие при проекции на бесцветные состояния, преодолены только частично.

В течение последнего десятилетия имел место замечательный прогресс в наблюдательной астрофизике в отношении нейтронных звезд, включая измерение масс и радиусов, температуры и скорости остывания, особенностей спектра рентгеновского излучения и др. В настоящее время не существует единственной общепринятой модели нейтронных звезд. Высказываются предположения о существовании компактных объектов, таких как, кварковые или странные звезды. Ситуация, которая сложилась в физике релятивистских звезд, представляет большой интерес для теоретиков, стимулируя изучение ядерной материи при плотности, превышающей плотность насыщения, а также фазовых переходов.

Повышенный интерес к уравнению состояния ядерной материи вызван также ограничениями, полученными в лабораторных исследованиях из данных по коллективному потоку и подпороговому рождению каонов в столкновениях тяжелых ионов.

При увеличении плотности становится энергетически выгодным рождение дибарионов в ядерной среде. Дибарионы модифицируют уравнение состояния ядерной материи и оказывают влияние на свойства нейтронных звезд. Наиболее интересны узкие экзотические дибарионы, которые не связаны сильными взаимодействиями с каналом NN . Большой интерес вызвало указание Джаффе (1977 г.) на возможность существования H дигиперона, стабильного относительно сильных

распадов. Многочисленные поиски H дигиперона, а также других дибарионных резонансов в различных реакциях, не дали убедительных результатов. Недавно в реакции $pn \rightarrow NN\pi\pi$ был обнаружен дибарионный резонанс с квантовыми числами $IJ^P = 03^+$ (Коллаборация CELSIUS/WASA и др., 2009 – 2013 гг.). Масса и ширина резонанса равны $M = 2.37$ ГэВ и $\Gamma = 70$ МэВ. б q -примитивы, которые надежно отождествляются в нуклон-нуклонном рассеянии, в ядерной среде могут покидать унитарный разрез, превращаясь в дибарионные резонансы.

Проблема описания свойств адронов в ядерной материи давно привлекает большое внимание. Уже в семидесятые годы уменьшение массы нуклонов в ядерной среде было положено в основу в модели Валечки (Walecka) в рамках теории среднего поля. В настоящее время этот эффект рассматривается как следствие частичного восстановления киральной симметрии. Изменение свойств мезонов обсуждается в рамках эффективной теории поля (quantum hadrodynamics) и в правилах сумм КХД при конечной плотности. Модель НИЛ также указывает на уменьшение массы нуклонов при конечной плотности и температуре. Ядерная среда подавляет нейтрон-антинейтронные осцилляции, существование которых предсказывается в теориях Великого объединения.

Цель исследований, которые проводились в последнее время, состояла в определении сдвига массы и уширения адронов в ядерной материи. Постановка задачи аналогична постановке задачи в спектроскопии атомов, где сдвиги уровней электронов и уширение спектральных линий в газах хорошо изучены как экспериментально, так и теоретически.

Одним из наиболее эффективных способов изучения модификации свойств векторных мезонов в ядерной среде является изучение распределений дилептонных пар, которые возникают в столкновениях тяжелых ионов в результате распада векторных мезонов. Лептоны практически не взаимодействуют со средой, в отличие, например, от пионов. Использование дилептонов для изучения свойств кварк-глюонной плазмы предлагалось Э. Шурыком в 1978 году.

Современные исследования дилептонных спектров мотивировались также необходимостью проверки гипотезы «скейлинга Брауна-Ро», согласно которой масса векторных мезонов уменьшается в ядерной среде аналогично массе нуклонов.

Спектр теоретических моделей, описывающих поведение векторных мезонов в ядерном веществе, чрезвычайно широк, а предсказания моделей разнонаправлены. В частности, знак сдвига массы векторных мезонов модельно зависим. В настоящее время этот вопрос решен в результате анализа дилептонных спектров в столкновениях тяжелых ионов.

Транспортные модели обеспечивают солидную феноменологическую основу для динамического описания сложных ядерных процессов. Квантовые эффекты когерентности и нелокальности, однако, выходят за рамки этих моделей. Проблема внутренней согласованности приближений остается предметом обсуждений, стимулируя дальнейшее развитие транспортных моделей. Особенностью транспортных моделей является использование траекторий, по которым распространяются частицы или их волновые пакеты. Рассеяние классических частиц может быть описано с помощью стандартных компьютерных программ для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. В то же время эволюция волновых функций многих частиц представляет собой теоретико-полевою задачу с бесконечным числом степеней свободы, которая не решается ни аналитически, ни численно. Любое моделирование многочастичной квантовой динамики, так или иначе, опирается на траектории как на тот, по-видимому, единственный элемент, который позволяет получить доступ к приближенному численному моделированию квантовой эволюции сложных систем.

Понятие фазовой траектории естественно возникает в формализме деформационного квантования через преобразование Вигнера операторов канонических координат и импульсов в представлении Гейзенберга. Эти траектории подчиняются квантовому аналогу уравнений Гамильтона (T. A. Osborn, F. H. Molzahn, 1995) и играют роль характеристик [19], с помощью которых находятся зависящие от времени вейлевские символы операторов. В классическом пределе квантовые характеристики превращаются в классические траектории. Знание всех квантовых траекторий эквивалентно знанию квантовой динамики. Квазиклассическое разложение квантовых траекторий позволяет учитывать квантовые эффекты, включая нелокальность и когерентность. Данный формализм, как можно надеяться, найдет применение в задачах квантового транспорта.

Поиск сигналов, связанных с модификацией свойств адронов при высокой плотности, является одной из основных задач при измерении каонных наблюдаемых в реакциях с тяжелыми ионами. Транспортные модели указывают на возможность наблюдения модификации свойств каонов в ходе таких реакций. Эта картина дополнена измерением рождения каонов в протон-ядерных реакциях.

В литературе обсуждаются нестандартные механизмы безнейтринного двойного бета ($0\nu\beta\beta$) распада. Все механизмы распада основаны на взаимодействиях, нарушающих сохранение полного лептонного числа (LNV). Ядерная среда может влиять на LNV процессы в сторону их усиления.

Актуальность исследований обусловлена современными достижениями теоретической и экспериментальной физики, потребностью в теоретической интерпретации новых экспериментальных данных.

Цель исследований

Цель исследований состоит в получении новой информации о свойствах фундаментальных взаимодействий, исходя из анализа существующих экспериментальных данных о поведении элементарных частиц в ядерной среде и коллективных свойствах ядерной материи.

Используемые методы и подходы

Экспериментальной основой изучения модификации свойств адронов служат опыты по рассеянию частиц на ядрах, столкновению тяжелых ионов, лабораторные исследования структуры ядер, астрофизические данные о нейтронных звездах.

Теоретической основой служат методы квантовой теории поля, диаграммная техника для бозе- и ферми-систем, методы статистической физики, в сильных взаимодействиях широко используются феноменологические подходы.

В диссертационной работе применяются: формализм Горькова, теория БКШ, проекционная теория БКШ, модель Валечки (RMF), метод оптического потенциала, транспортная модель RQMD/QMD, метод деформационного квантования.

Научная новизна

Результаты исследований, представленных в диссертационной работе, опубликованы в работах [1] – [22].

Работы [1,2] положили начало исследованию сверхпроводимости и сверхтекучести холодной кварковой материи для $SU(2)$ цветовой группы.

Впервые найдена одномерная рекурсия, позволяющая вычислять нормировку волновых функций в проекционной теории БКШ. В терминах нормировочной функции получены явные выражения для матричных элементов составных операторов.

Показано, что существование «примитивов» связано с КДД полюсами. Найдена и изучена точно решаемая модель бозе-конденсации дибарионных резонансов. Предложено дибарионное расширение модели RMF и систематически исследованы свойства ядерной материи с учетом бозе-конденсации дибарионов. Получены новые ограничения на параметры дибарионов из лабораторных и астрофизических данных.

В терминах столкновительного уширения дано объяснение подавлению нулевых резонансов в реакциях фотопоглощения на ядрах. В когерентном рождении резонансов на ядрах найдена двухкомпонентная формула Брейта-Вигнера, учитывающая интерференцию процессов распада резонансов внутри и вне ядра.

Развиты модели $eVMD$ и NRD для описания элементарных реакций. Феноменологические параметры были определены нормировкой на экспериментальные данные. $eVMD$ и NRD использовались в транспортной модели $RQMD/QMD$ для описания дилептонного спектра в столкновениях тяжелых ионов. Из сравнения с данными DLS (Bevalac) и HADES (Darmstadt) получены новые выводы о модификации свойств векторных мезонов в ядерной материи. Получено объяснение модификации дилептонной парциальной ширины распада $\phi(1020)$ -мезона в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ионов.

Показано, что квантовый фазовый поток не является каноническим, но сохраняет скобку Мoyalа. С использованием квазиклассического разложения по степеням постоянной Планка задача квантового транспорта в рамках деформационного квантования сведена к решению системы ОДУ.

Показано, что среднее скалярное поле ядра, связанное с возможным существованием экзотического скалярного взаимодействия вне Стандартной модели, способно генерировать майорановскую массу нейтрино, что отражается на скорости безнейтринного двойного бета-распада.

Все перечисленные результаты являются новыми. Результаты исследований удовлетворяют требованиям новизны, принятым в ведущих международных рецензируемых физических журналах.

Основные положения, составляющие предмет защиты

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, формулируются следующим образом:

- (i) В цветовой группе $SU(2)$ холодная кварковая материя обладает свойством сверхпроводимости/сверхтекучести, имеет место спаривание кварков.
- (ii) Существование примитивов связано с существованием полюсов Кастильехо-Далица-Дайсона (КДД полюсов).
- (iii) В параметрическом пространстве константы связи – масса дибариона найдена область значений, которая не противоречит лабораторным данным о свойствах симметричной ядерной материи при плотности насыщения и астрофизическим данным о массах нейтронных звезд.
- (iv) Подавление нуклонных резонансов в реакциях фотопоглощения на ядрах и модификация лептонной парциальной ширины распада ϕ -мезона в столкновениях ультррелятивистских тяжелых ионов описываются в рамках принятых феноменологических схем. В модификации свойств адронов существенную роль играет эффект столкновительного уширения.
- (v) Моделирование рождения дилептонов в столкновениях тяжелых ионов с использованием транспортной модели RQMD/QMD/Tubingen/ITEP и анализ экспериментальных данных коллабораций DLS (Bevalac) и HADES (Darmstadt) показывают, что при плотности насыщения вектор-

ные мезоны в ядерном веществе испытывают заметное уширения, в то время как их масса существенно не изменяется.

- (vi) В нерелятивистской квантовой механике в любом порядке квазиклассического разложения по степеням постоянной Планка задача квантового транспорта сводится к решению конечной системы ОДУ. Вероятностное распределение начальных условий ОДУ определяется функцией Вигнера.
- (vii) Ограничения на массы нейтрино и данные по безнейтринному двойному бета-распаду позволяют ограничить масштаб нарушающего лептонное число экзотического скалярного взаимодействия $\Lambda_{LNV} \geq 2$ ТэВ. Чувствительность к масштабу порядка нескольких тераэлектронвольт обусловлена существованием среднего поля ядра.

Научная и практическая значимость результатов

Научная значимость диссертационной работы определяется ролью, которую играет ядерная среда в модификации свойств элементарных частиц и их фундаментальных взаимодействий. Особый интерес представляют те процессы в ядерной среде, в которых проявляются свойства взаимодействий, недоступные для изучения в вакууме.

Основные положения диссертации содержат новую информацию о фундаментальных взаимодействиях.

Свойства холодной кварковой материи для цветовой группы $SU(2)$ в настоящее время интенсивно обсуждаются в литературе. Данная проблема была впервые сформулирована, и в ее решении были получены первые результаты в работах диссертанта. Был предсказан и позже подтвержден в решеточной КХД и модели Полякова-Намбу-Иона-Лазинио (ПНИЛ) эффект спаривания кварков и свойство сверхпроводимости/сверхтекучести холодной кварковой материи.

Установленная связь примитивов с КДД полюсами имеет теоретическое значение. Полученные ограничения на параметры дибарионов позволяют сузить спектр возможностей для их экспериментального поиска. Вычисления дилептонных ширин распада легких мезонов использовались экспериментаторами для

оценки перспективы регистрации этих редких распадов. Предсказания дилептонных ширин далее нашли экспериментальное подтверждение (Коллаборация KLOE и др.).

Разработан комплекс программ для вычисления элементарных реакций рассеяния и распада мезонов и нуклонных резонансов, которые включены в транспортную модель RQMD/QMD, описывающую рождение дилептонов в столкновения тяжелых ионов. Выражение для дилептонной ширины распада Δ -изобары, полученное в работе [13], используется в генераторе дилептонных событий коллаборации NADES.

Квазиклассическое разложение в рамках деформационного квантования открывает новые возможности для моделирования квантового транспорта. Сведение задачи к системе ОДУ позволяет использовать эффективные стандартные численные программы для решения систем ОДУ.

Ограничение на масштаб экзотического скалярного взаимодействия позволяет ограничить круг моделей, обобщающих Стандартную модель.

Основная часть проведенных исследований ориентирована на эксперимент и наблюдательную астрофизику. Новые технологии, которые здесь создаются, могут быть переданы в промышленность и смежные области экспериментальной физики и астрофизики.

Апробация результатов

Вошедшие в диссертацию результаты работ [1] – [22] докладывались на семинарах Теоретического отдела Института теоретической и экспериментальной физики, Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова, Физического факультета Университета г. Пиза (Италия), Института теоретической физики Университета г. Тюбингена и ряда других научных центров и университетов. Результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались на международных конференциях, школах, совещаниях и семинарах: «10-ом Международном семинаре по проблемам в физике высоких энергий: перспективы ядерной физики при проме-

жуточных энергиях» (г. Триест, 1991), «Международной конференции по мезонам и ядрам при промежуточных энергиях» (1994, Дубна), «3-ей Международной конференции по нуклон-антинуклонной физике» (г. Москва, 1995), «13-ом Международном семинаре по проблемам в релятивистской ядерной физике и квантовой хромодинамике» (г. Дубна, 1996), «Совещании по КХД при конечной барионной плотности: Сложные системы со сложным действием» (г. Белефелд, 1998), «3-ей Международной Сахаровской конференции по физике» (г. Москва, 2002), «10-й Международной конференции по структуре барионов» (г. Палайзеу, Франция, 2004), «12-й Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц» (г. Москва, 2006), «13-ом Ежегодном семинаре по нелинейным явлениям в сложных системах: Хаос, фракталы, фазовые переходы, самоорганизация» (г. Минск, 2006), «Международной летней школе по коллективным явлениям и фазовым переходам в ядерных системах» (г. Предеал, Румыния, 2006), «Весенней сессии Немецкого физического общества» (г. Дармштадт, 2004, 2008, 2011), «Международной школе ядерной физики: 30-й курс: Столкновения тяжелых ионов от кулоновского барьера до кварк-глюонной плазмы» (г. Эриче, Сицилия, 2008), «4-ом Международном совещании: критическая точка и начало деконфайнмента» (г. Дармштадт, 2007), «Совещании NADES 2008» (г. Дармштадт, 2008), «Международной школе ядерной физики: 35-й курс: Физика нейтрино, настоящее и будущее» (г. Эриче, Сицилия, 2013), «24-й Международной конференции по теории транспорта» (г. Таормина, Сицилия, 2015) и других научных форумах.

Личный вклад диссертанта в проведенные исследования

В публикациях [1] - [10], [12] - [15], [19] - [22] диссертантом проделана большая часть технической работы. В работе [11] ему принадлежит основной результат Главы 2. Публикации [16] - [18], связанные с моделированием столкновений тяжелых ионов, являются результатом сотрудничества большого коллектива. В каждой из этих работ вклад диссертанта был значительным, в некоторых вопросах определяющим. Диссертанту принадлежит идея цветовой сверхпроводимости, получившая оформление в публикациях [1,2], а также идея столкновительного уши-

рения нуклонных резонансов в ядерной среде, позволившая описать экспериментальные данные Фраскати по фотопоглощению [10].

Содержание работы

Основные результаты

1. Показано (1991 г.), что холодная кварковая материя в $SU(2)$ цветовой группе обладает свойством сверхпроводимости/сверхтекучести.

Свойства сверхпроводящей фазы кварковой материи изучены в рамках КХД мотивированной модели типа НИЛ. В релятивистской версии формализма Горькова найдены нормальная и аномальная функции Грина, исследована их зависимость от плотности и температуры вещества, найдены законы дисперсии квазичастиц в кварковой материи. Показано, что конденсат с одним сортом кварков может находиться в двух состояниях, соответствующих различным проекциям спина куперовских пар. Даны оценки параметров порядка и построены выражения для спиновой плотности сверхпроводящей кварковой материи.

При высокой плотности сверхпроводимость кварковой материи в $SU(2)$ цветовой группе может быть описана в рамках КХД. Основные особенности $SU(2)$ сверхпроводимости присутствуют в простой, точно решаемой, КХД мотивированной модели, рассмотренной в диссертационной работе.

Данная область теоретической физики активно развивается. В настоящее время принято считать, что кварковая материя при высокой плотности и низкой температуре находится в «кваркониевой» фазе. Ее отличие от сверхпроводящей фазы, рассмотренной в работах [1,2], состоит в том, что спектр элементарных возбуждений над ферми-сферой определяется не кварками, а бесцветными состояниями. К общим особенностям обеих фаз относятся: эффект спаривания, существование в энергетическом спектре щели, сверхпроводимость и сверхтекучесть, что находит подтверждение в решеточных моделях КХД (S. Hands et al., 2006 г.) и модели Полякова-Намбу-Иона-Лазинио (T. Brauner et al., 2009 г.).

В $SU(3)$ цветовой группе пары кварков несут открытый цвет. В этом случае описание цветовой сверхпроводимости в согласии с требованиями конфайнмента

возможно в рамках проекционной теории БКШ, которая стандартно применяется в ядерной физике для выделения состояний с требуемой симметрией из «деформированных» пробных волновых функций. К таким симметриям относится симметрия $U(1)$ группы, связанная с числом протонов и нейтронов в ядре, симметрия $SU(2)$ группы, связанная с определенным угловым моментом ядра и/или определенным изоспином. В случае $SU(3)$ цветовой группы следует проектировать на состояния с нулевым цветом. Проекция позволяет исключить состояния, несущие открытый цвет, из вариационной задачи. Данный формализм технически более сложен в сравнении со стандартной теорией, поэтому прогресс в аналитических методах проекционной БКШ представляет большой интерес.

Предложен новый способ вычисления нормировки волновых функций проекционной БКШ с определенным числом фермионов с помощью одномерной рекурсии. Найдены аналитические выражения для среднего значения гамильтониана и недиагональных матричных элементов одно-, двух- и четырех-частичных операторов. На точно решаемом примере проведено сравнение предсказаний стандартной БКШ, проекционной БКШ с вариацией после проекции, проекционной БКШ с проекцией после вариации и точного численного решения. Предложенная рекурсивная схема не ограничивается рамками теории сверхпроводимости, она находит приложения в смежных областях.

Для $SU(2)$ цветовой группы в силу бесцветности куперовских пар и конденсата проекционная теория БКШ не приводит к новым результатам в сравнении с результатами, изложенными в диссертационной работе.

2. При увеличении плотности ядерной материи становится энергетически выгодным рождение дибарионов. Дибарионы образуют бозе-конденсат в ядерной материи, что влияет на уравнение состояния (EoS) вещества и устойчивость нейтронных звезд.

В эксперименте дибарионы могут проявлять себя как двухнуклонные резонансы, либо как примитивы. Примитивы - полюса P матрицы, которые являются нулями D функции на унитарном разрезе и которые не являются полюсами S матрицы. КДД полюса согласно Дайсону ассоциируются со связанными состояниями и резонансами. В диссертации показано, что в общем случае КДД полюса соответ-

ствуют связанным состояниям, резонансам и примитивам. Примитивы и соответствующие им КДД полюса возникают в системах, где доминирует отталкивание. В рассмотренной модели, которая является версией модели Составного кваркового мешка (QCB model), в 3S_1 и 1S_0 нуклонных каналах КДД полюса возникают при $M = 3203$ и 2916 МэВ, соответственно. Они связаны с примитивами с массой $M = 2047$ и 2006 МэВ. Сигнатурой примитива является пересечение фазы нулевого уровня (по модулю π) с отрицательным наклоном.

3. Найдена и изучена точно решаемая модель бозе-конденсации дибарионных резонансов в ядерном веществе. Показано, что для широкого класса сингулярных потенциалов нулевого радиуса свойства одномерных ферми-систем могут быть определены точно (численно), не прибегая к теории возмущений. Задача решается с помощью Бете-анзаца путем сшивки волновой функции системы в различных областях интегрируемости. В термодинамическом пределе исследовано поведение ферми-системы с резонансом в двух-фермионном канале, при этом принцип Паули и составной характер резонанса учитываются точно. Найденное решение показывает усиление функции распределения фермионов вблизи поверхности Ферми при приближении к критической плотности, что в приближении идеального газа соответствует бозе-конденсации дибарионов. Образование узких резонансов сопровождается резким смягчением уравнения состояния.

Точно решаемая модель качественно подтверждает физическую картину поведения бинарной смеси нуклонов и узких дибарионных резонансов в приближении идеального газа.

Предложено теоретико-полевое обобщение модели релятивистского среднего поля (RMF, модель Валечки), учитывающее возможное существование дибарионов. В рамках предложенной модели подробно изучены свойства ядерной материи с бозе-конденсатом дибарионов. Константы взаимодействия нуклонов с σ - и ω -мезонами определяются из свойств ядерной материи при плотности насыщения, константы связи дибарионов берутся из кварковых моделей. Гетерофазное состояние вещества, состоящего из смеси нуклонов и дибарионов, может существовать при плотности выше ядерной ниже плотности фазового перехода в кварковую материю. Данный сценарий реализуется, если дибарионный конденсат устойчив по

отношению к сжатию. Если конденсат неустойчив, рождение дибарионов осуществляется механизмом, инициирующим фазовый переход в кварковую материю. Даны оценки масс дибарионов и констант связи, соответствующих различным сценариям, с учетом лабораторных данных (плотность насыщения, энергия связи, коэффициенты асимметрии и несжимаемости ядерной материи).

В релятивистском приближении Хартри (RHA) в рамках дибарионного расширения модели Валечки изучены свойства ядерной материи с бозе-конденсатом дибарионов. Построены нормальные и аномальные функции Грина элементарных возбуждений в ядерной материи с примесью дибарионов с учетом смешивания, обусловленного существованием конденсата, найдены законы дисперсии элементарных возбуждений и уравнение состояния ядерной материи. Результаты RHA сравниваются с результатами RMF.

В рамках RMF и RHA изучено влияние дибарионов на структуру нейтронных звезд. Из условия существования массивных нейтронных звезд получены ограничения на константы связи скалярных и векторных мезонов с дибарионами. Эти ограничения существенно зависят от масс дибарионов. Более мягкое уравнение состояния RHA приводит к более сильным ограничениям на константы связи в сравнении с более жестким уравнением состояния RMF. Показано, что легкие дибарионы образуют бозе-конденсат, устойчивый к сжатию. Таким образом, возможность существования смешанной фазы нуклонов и дибарионов при плотности ниже плотности фазового перехода в кварковую материю не исключена.

4. Предложено объяснение подавлению нуклонных резонансов в реакциях фотопоглощения на ядрах в области резонансов $D_{13}(1520)$ и $F_{15}(1680)$. Показано, что основными эффектами, искажающими спектральную функцию резонансов в ядерной среде, являются ферми-движение, эффект Паули, приводящий к частичной блокировке каналов распада и уменьшению ширины, и столкновительное уширение нуклонных резонансов. Одно лишь ферми-движение не может объяснить подавление резонансов. Столкновительное уширение является наиболее важным эффектом. Таким образом, показано, что свойства нуклонных резонансов модифицируются в среде. Экспериментально обнаруженному эффекту подавления резонансов дано теоретическое объяснение.

Распространение резонансов в ядрах описано в терминах оптического псевдопотенциала для N^* -ядерного взаимодействия, зависящего от средней плотности ядра и N^*N амплитуды рассеяния вперед. В этом случае столкновительное уширение зависит от полного N^*N сечения рассеяния. Аппроксимируя экспериментальные данные фоторождения, определены нижние пределы N^*N сечения для $P_{33}(1232)$, $D_{13}(1520)$, $F_{15}(1680)$, и $D_{33}(1700)$ резонансов, которые вносят существенный вклад в полное сечение ниже 1.2 ГэВ. Оценки не нарушают унитарного предела, а в случае N взаимодействия с изобарой согласуются с экспериментальными данными.

5. Резонансы, рожденные в процессах взаимодействия элементарных частиц с ядрами, распадаются внутри или вне ядра. Соответственно, в сечениях могут наблюдаться две резонансные структуры, соответствующие таким распадам. Широкая компонента возникает из-за столкновительного уширения и распада резонанса в ядре, узкая компонента соответствует распаду резонанса вне ядра. В формализме когерентного рождения резонансов, при котором ядро возвращается в основное состояние, возможно корректное описание интерференции амплитуд, соответствующим этим процессам. Полная амплитуда представляется в виде когерентной суперпозиции, описывающей распад внутри ядра с модифицированными параметрами резонанса и распад вне ядра со свободными параметрами резонанса.

Показано, что для конечного ядра амплитуда рождения резонанса не имеет полюса, соответствующего параметрам резонанса в бесконечной среде. Несмотря на то, что модифицированный пропагатор резонанса в соответствующей компоненте амплитуды присутствует, вычет в фиктивном полюсе равен нулю. Аналитические свойства амплитуды рождения резонанса для конечного ядра, следовательно, не изменяются. Существует единственный полюс, связанный с резонансом в вакууме. При стремлении радиуса ядра к бесконечности быстро осциллирующие экспоненты можно отбросить, в результате выживает единственное слагаемое с параметрами резонанса в ядерной среде. Это слагаемое имеет вид амплитуды Брейта-Вигнера. Данные выводы получены в формализме эйконального рассеяния. При высоких энергиях двухкомпонентная формула амплитуды Брейта-Вигнера не модифицируется. Определены наиболее благоприятные кинематические условия,

при которых двухкомпонентная структура оказывается максимально выраженной (промежуточные энергии) и даны численные оценки дифференциального сечения в модельной задаче когерентного рождения ρ -мезона на ядре с распадом на дилептонную пару.

6. В столкновениях тяжелых ионов дилептоны рождаются в результате мезонных распадов и распадов нуклонных резонансов. В рамках эффективной мезонной теории проведен расчет полных и дифференциальных дилептонных ширин распада нестранных мезонов с массой ниже массы $\phi(1020)$ -мезона, которые рождаются при кинетической энергии $T_{\text{LAB}} < 2$ ГэВ/нуклон. Помимо прямых каналов распада и некоторых Далиц распадов, которые известны в литературе, систематически изучены распады, дающие вклад в спектр дилептонов вдали от ρ - и ω -мезонных пиков. К ним относятся Далиц распады, как, например, $\eta' \rightarrow \gamma \ell^+ \ell^-$ и $f_0 \rightarrow \gamma \ell^+ \ell^-$, а также большинство распадов с четырьмя частицами в конечном состоянии. Многие из этих процессов дают небольшой вклад в дилептонные ширины, однако, есть исключения. В распадах ρ^0 -мезонов главный вклад в фон ниже 350 МэВ возникает от распада $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$. Распады $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ и $\rho^0 \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ увеличивают выход дилептонов с инвариантной массой больше 100 МэВ примерно на 30% в сравнении с прямым каналом $\rho^0 \rightarrow e^+ e^-$. В случае f_0 -мезона вероятность распада $f_0 \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ в интервале 100-400 МэВ на один-три порядка больше, чем доминирующая мода $f_0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$. В большинстве других случаев четырех-частичные распады не доминируют в рождение дилептонов и, таким образом, пренебрежение этими каналами распадов представляется оправданным.

Рассчитанные значения парциальных ширин использовались для моделирования рождения дилептонов в столкновениях тяжелых ионов с использованием транспортной модели QMD/RQMD Тюбингена/ИТЭФ, а также экспериментаторами (Коллаборация KLOE и др.) для поиска дилептонных мод мезонных распадов.

7. Для дилептонных инвариантных масс в несколько сотен МэВ важный вклад, как показывают транспортные расчеты, дает распад изобары $\Delta(1232) \rightarrow N e^+ e^-$. Впервые получены релятивистские, кинематически полные, феноменологические выражения для дилептонных полных и дифференциальных ширин распада $\Delta(1232)$, а также нуклонных резонансов с произвольным спином и четностью. В

модели обобщенной векторной доминантности (eVMD) переходные форм-факторы нуклонных резонансов определены нормировкой на экспериментальные данные по фоторождению, электророждению и известные ширины распада резонансов на нуклон и векторный мезон. В тех случаях, когда экспериментальные данные отсутствуют, использовались предсказания кварковых моделей. Асимптотика форм-факторов в модели eVMD удовлетворяет правилам кваркового счета. Даны численные оценки полных и парциальных ширин распада для нуклонных резонансов с массой меньше 2 ГэВ.

Построенная модель используется для моделирования рождения дилептонов в столкновениях тяжелых ионов в транспортной модели QMD/RQMD Тюбингена/ИТЭФ.

8. С целью проверки моделей, предназначенных для описания дилептонных спектров в столкновениях тяжелых ионов, рассмотрена задача о рождении дилептонов в протон-протонных столкновениях при энергиях 1-5 ГэВ. Предсказания сравниваются с данными коллаборации DLS (Bevalac). Подпороговое рождение векторных мезонов и их вклад в сечение описаны в рамках eVMD. Эта модель позволяет единым образом описать ширины распадов нуклонных резонансов на нуклон и векторный мезон или фотон и данные по электророждению нуклонных резонансов. Дилептонные моды распадов описаны в рамках релятивистской, кинематически полной схемы. Полученные дилептонные спектры в протон-протонных столкновениях хорошо согласуются с экспериментом при энергиях $T = 1.27 - 1.85$ ГэВ. При энергии $T = 1.04$ ГэВ существует некоторое превышение расчетного выхода дилептонов над экспериментом. При энергии $T = 2.09$ ГэВ имеется недооценка в окрестности ω -мезонного пика. При энергии $T = 4.88$ ГэВ имеется недооценка выхода дилептонов в области ниже ρ -мезонного пика ($M \approx 400 - 700$ МэВ).

Показано, что в рамках наивной модели VMD не удастся единым образом описать фотонные ширины и ширины распада нуклонных резонансов на нуклон и векторный мезон. Данное несоответствие устраняется в модели eVMD без введения новых параметров с учетом правил кваркового счета, что может рассматриваться

как экспериментальное подтверждение правил кваркового счета для переходных форм-факторов в секторе нуклонных резонансов.

Получено описание рождения ω -мезонов в нуклон-нуклонных столкновениях вблизи порога в рамках модели eVMD, которая успешно описывает мезонные и радиационные распады нуклонных резонансов. Указано на выделенную роль резонанса $N^*(1535)$, обусловленную большой шириной распада $N^*(1535)$ по каналу $N\omega$ в области, где ω -мезон рождается под порогом. С точки зрения данных по электро- и фоторождению нуклонных резонансов сильная связь $N^*(1535)$ является предпочтительной.

Вблизи порога рождение ω -мезона вне массовой поверхности оказывается доминирующим. Эта часть сечения, однако, не учитывается экспериментально, поскольку отождествляется с фоном. Для сравнения с экспериментом фон, возникающий из-за рождения ω -мезона вне массовой поверхности, вычитается, выделяется экспериментально измеряемая полюсная часть. В результате данные коллабораций SATURNE и COSY-TOF воспроизводятся, начиная с энергий, близких к порогу, вплоть до энергий, намного выше порога без корректировки старых и без введения новых параметров. При энергиях вблизи порога полное сечение, включающее фоновый вклад, на порядок больше полюсной части.

В согласии с eVMD измеренное сечение рождения ω -мезонов в протон-протонных столкновениях свидетельствует в пользу сценария сильной связи $N\omega$. Если рождение ω вне массовой поверхности велико, число дилептонов, образующихся в нуклон-нуклонных столкновениях, должно заметно превышать оценки, полученные исходя из предположения о пренебрежимо малом вкладе подпорогового рождения ω -мезонов.

9. В транспортную модель QMD/RQMD, разработанную ранее в Тюбингене, включены процессы, связанные с рождением дилептонов в столкновениях тяжелых ионов. К этим процессам относятся дополнительные каналы рождения и распада нуклонных резонансов и легких нестранных мезонов.

Проведено моделирование рождения дилептонов в столкновениях тяжелых ионов в области энергий 1 – 5 ГэВ/нуклон. Рассмотрены различные сценарии по-

ведения спектральных функций векторных мезонов в ядерной среде. Сравнение с экспериментальными данными коллабораций DLS (Bevalac) и HADES (Darmstadt) позволило выявить реалистичные сценарии.

Найдены спектральные функции ρ - и ω -мезонов и уширение нуклонных резонансов при конечной плотности барионов в схеме, основанной на модели e VMD и резонансной модели NRD неупругих мезон-нуклонных и NN столкновений. Исследовано влияние модификации свойств векторных мезонов на дилептонный спектр в столкновениях тяжелых ионов. Спектр дилептонов моделируется для реакции $C + C$ при 2.0 ГэВ/нуклон и сравнивается с данными коллаборации HADES. Динамика столкновений описывается в транспортной модели QMD/RQMD Тюбингена/ИТЭФ. С экспериментальными данными сравниваются феномено-логические сценарии столкновительного уширения и уменьшения массы векторных мезонов в ядерном веществе (скейлинг Брауна-Ро). Самосогласованный расчет спектральных функций векторных мезонов, учитывающий уширение нуклонных резонансов в ядерной среде, обеспечивает хорошее описание экспериментальных данных в области масс $0.45 \leq M \leq 0.75$ ГэВ. Расчеты несколько недооценивают выход дилептонов в области $m_\pi \leq M \leq 0.4$ ГэВ. Расчеты и сравнение с данными коллабораций DLS и HADES говорят в пользу значительного уширения векторных мезонов. Из анализа данных HADES следует, кроме того, что массы векторных мезонов в ядерном веществе при плотности насыщения существенно не изменяются.

10. Доказана возможность сведения квантово-механической задачи эволюции квантовых систем к статистико-механической задаче построения ансамбля квантовых характеристик и полей Якоби. В любом фиксированном порядке разложения по постоянной Планка задача сводится к решению конечной системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Размерность системы ОДУ зависит от порядка разложения. После построения квантовых характеристик физические наблюдаемые находятся без дальнейшего обращения к динамике. Метод квантовых характеристик может использоваться для расчета взаимодействия сложных квантовых систем – атомов, молекул, ядер и служить теоретической основой для

построения схем квантового транспорта с использованием численного моделирования на базе ОДУ.

11. В столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ионов среди рождающихся частиц пионы доминируют по множественности как самые легкие. В первом приближении образовавшуюся материю (файербол) можно рассматривать как пионный газ с температурой $T \sim 200$ МэВ. Коллаборации NA50, NA49 и PHENIX наблюдали модификацию парциальной ширины дилептонной моды распада $\phi(1020)$ -мезона. Основной модой распада ϕ является распад $\phi \rightarrow KK$. Изучены свойства К-мезонов в горячей пионной материи. Собственная энергия К-мезонов при малой температуре вычисляется в рамках киральной теории возмущений. При больших температурах используется феноменологический подход, учитывается доминирующий вклад векторных K^* -мезонов в собственную энергию К-мезонов. Найдены значения сдвига массы, среднего векторного потенциала и ширины К-мезонов в пионной материи. Дана оценка отношения парциальных ширин распада $\phi(1020)$ -мезона на пару KK и дилептонную пару в пионной среде, которая согласуется с экспериментальными данными.

12. Рассмотрен механизм двойного безнейтринного бета-распада ($0\nu\beta\beta$), связанный с обменом майорановским нейтрино в присутствии нестандартного, нарушающего сохранение полного лептонного числа (LNV) взаимодействия нейтрино с ядерной средой. После параметризации этого взаимодействия операторами низшей размерности, найдена массовая матрица майорановских нейтрино и матрица смешивания в ядерной среде, определяющая параметр $m_{\beta\beta}$, которому пропорциональна вероятность $0\nu\beta\beta$ распада. Экспериментальные ограничения на эффективную майорановскую массу $m_{\beta\beta}$ совместно с космологическими ограничениями и ограничениями из бета-распада трития позволяют получить ограничения на масштаб LNV взаимодействий нейтрино со скалярным током: > 2.2 ТэВ.

Улучшающиеся космологические ограничения и ограничения на массу нейтрино из β распада в будущем могут вступить в конфликт с возможным наблюдением $0\nu\beta\beta$ распада. Если это произойдет, для объяснения потребуется новая физика. В частности, противоречие может быть обусловлено новым эффективным LNV взаимодействием, усиленным в $0\nu\beta\beta$ распаде за счет среднего поля ядра. В том

случае, если доминирующим механизмом $0\nu\beta\beta$ распада является обмен майорановским нейтрино, представленный сценарий обеспечит объяснение кажущейся несовместимости экспериментов.

Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, семи глав основного текста, содержащих 27 разделов, 14 таблиц и 82 рисунков, Заключения, двух приложений и списка цитируемой литературы из 383 наименований. Объем диссертации составляет 411 страниц.

Свойства ядерной материи при плотности насыщения и сверхвысокой плотности обсуждаются в Главах 1 и 2. Модификация свойств адронов в ядерной материи, ядрах и столкновениях тяжелых ионов обсуждаются в Главах 2, 3, 4, 6. Техника, развитая в Главах 2, 3, 4, 6 для описания поведения адронов в ядерном веществе, применяется для анализа эффекта генерации майорановской массы нейтрино в ядрах в Главе 7. В Главе 5 в формализме деформационного квантования разработана схема транспорта в рамках квазиклассического разложения для численного моделирования рассеяния сложных систем, в том числе столкновений тяжелых ионов.

Содержание глав и разделов

В Главе 1 рассматривается цветовая сверхпроводимость для цветовой группы $SU(2)$ и приложения проекционной теории БКШ для описания спаривания нуклонов в ядрах в изовекторном канале.

Цветовая сверхпроводимость описывается в релятивистской версии теоретико-полевого формализма Горького с КХД-мотивированным контактным взаимодействием кварков типа НИЛ. Для одного сорта кварков найдены два типа решений уравнений Горького-Дайсона, которые соответствуют различным проекциям спина куперовских пар. Спаривание происходит в триплетном по спину бесцветном канале. Соответственно, конденсат куперовских пар является бесцветным, что согласуется с требованиями конфайнмента. Конденсация куперовских пар в состоянии со спином $J = 1$ приводит к спонтанному нарушению вращательной симметрии основного состояния. Дана оценка щели в спектре элементарных возбужде-

ний, найдены законы дисперсии квазичастиц, распределение кварков по импульсам, спиновая плотность кварков, критическая температура фазового перехода в сверхпроводящее состояние.

Обобщение стандартной теории БКШ на цветовую группу $SU(3)$ возможно в рамках проекционной теории БКШ. Показано, что проекция по числу фермионов полностью определяется одномерной рекурсивной формулой для нормировочного фактора спроектированных состояний. Показано, что среднее значение гамильтониана и матричные элементы одно-, двух- и четырех-частичных операторов выражаются через нормировочный фактор $Q(N)$, зависящий от числа частиц N . Функция $Q(N)$ вычисляется с помощью одномерной рекурсии по N , в которой параметры волновой функции БКШ остаются неизменными. На численном примере для одной и двух оболочек проведено сравнение особенностей решений стандартной БКШ, проекционной БКШ с проекцией после вариации, проекционной БКШ с вариацией после проекции с точным решением.

Детальное обсуждение феномена бозе-конденсации дибарионов в ядерной материи дано в Главе 2. В Введении обсуждается физика бозе-конденсации дибарионов на простом качественном уровне. Диссертант рассматривает два типа объектов, которые могут отождествляться с дибарионами, – резонансы и «примитивы» (согласно терминологии Джаффе и Лоу). В первых разделах Главы 2 показано, что примитивам соответствует новый тип КДД полюсов, и определена локализация этих полюсов и массы примитивов в упругом нуклон-нуклонном рассеянии в рамках одной из версий QCB модели. В качестве иллюстрации дано описание фаз нуклон-нуклонного рассеяния в 1S_0 и 3S_1 каналах.

В разделе 2.4 рассмотрена точно-решаемая модель бозе-конденсации дибарионов при нулевой температуре. Получены условия квантования систем произвольного числа N бозонов и фермионов с периодическими граничными условиями и рассмотрен термодинамический предел. Задача допускает точное (численное) решение при любой плотности для сингулярных потенциалов нулевого радиуса. Рассмотрен потенциал, приводящий к резонансу в двух-фермионном канале. В критической точке по плотности вещества поведение системы качественно согласуется

с картиной бозе-конденсации дибарионных резонансов в модели идеального газа нуклонов и дибарионных резонансов.

В разделе **2.5** построено расширение модели Валечки (MFT), включающее дибарионный сектор. Модель анализируется аналитически и численно. Определена критическая плотность бозе-конденсации дибарионов как функция их массы и констант связи с σ - и ω -мезонами и построены уравнения состояния ядерной материи. В разделе **2.6** бозе-конденсация дибарионов рассматривается за рамками теории среднего поля в релятивистском приближении Хартри (RHA). Найден класс уравнений состояния, описывающий свойства ядерной материи при плотности насыщения, с учетом возможного существования дибарионов. Свободные параметры определяются нормировкой на лабораторные данные. Найдены функции Грина элементарных возбуждений с учетом бозе-конденсации дибарионов и исследованы условия устойчивости гетерофазных состояний. Доказана термодинамическая самосогласованность дибарионного расширения RMF. В разделе **2.8** сравниваются модели MFT и RHA, найдена эффективная масса нуклонов как функция плотности, коэффициент несжимаемости и асимметрии ядерной материи, построены кривые насыщения ядерной материи с учетом и без учета дибарионов, найдена критическая плотность образования конденсата как функция констант связи. Существование массивных нейтронных звезд накладывает ограничения на константы связи векторных и скалярных мезонов с дибарионами. В разрешенной области параметрического пространства бозе-конденсат легких дибарионов оказывается устойчивым к сжатию, что свидетельствует о стабильности гетерофазного состояния ядерной материи с бозе-конденсатом легких дибарионов. В конечном итоге из астрофизических данных на массы нейтронных звезд получены ограничения на константы связи и массы дибарионов для MFT и RHA.

Рождение резонансов на ядрах дает возможность изучения модификации свойств адронов в ядерной среде. В начале девяностых экспериментаторы в Фраскати обнаружили эффект подавления нуклонных резонансов в реакциях фотопоглощения на ядрах. В разделе **3.1** проанализированы данные фотопоглощения на уране, которые указывают на отсутствие резонансов с массой выше $P_{33}(1232)$ в сечении фотопоглощения. Ферми движение, столкновительное уширение и Паули

блокировка искажают форму спектральной функции резонансов в ядерной среде. Показано, что движение Ферми и столкновительное уширение играют основную роль. Из данных по фотопоглощению на уране дана оценка полных сечений рассеяния резонансов $P_{33}(1232)$, $D_{13}(1520)$, $F_{15}(1680)$, и $D_{33}(1700)$ на свободных нуклонах. В разделе 3.2 показано, что распределение по массе продуктов распада резонансов, рожденных в столкновении с ядром, имеет двухкомпонентную структуру, соответствующую распаду резонанса вне и внутри ядра. Первая (узкая) компонента имеет Брейт-Вигнеровскую форму, определяемую вакуумными значениями массы и ширины резонанса. Вторая (широкая) компонента соответствует взаимодействию резонанса с ядерной средой. Она может быть описана амплитудой Брейта-Вигнера с параметрами, зависящими от сечения взаимодействия резонанса с нуклонами и ядерной плотности.

В Главе 4 изучается рождение дилептонов в столкновениях тяжелых ионов с целью определения сдвига массы и уширения векторных мезонов в ядерном веществе. Анализ экспериментальных данных представляет собой отдельную задачу, связанную с необходимостью выделения полезного сигнала из сложного фона. Для этой цели используются транспортные модели. В них закладывается информация о сечениях элементарных реакций и ширинах распадов мезонов и нуклонных резонансов. Первая часть главы посвящена изучению элементарных реакций, играющих главную роль в рождении дилептонов. Разработана модель, позволяющая описывать широкий спектр элементарных процессов. В секторе нуклонных резонансов она представляет собой обобщение модели векторной доминантности (eVMD – extended vector meson dominance), учитывающее правила кваркового счета для переходных форм-факторов нуклонных резонансов. Рождение мезонов в нуклон-нуклонных столкновениях описывается двухступенчатым механизмом, предполагая, что на начальном этапе рождается нуклонный резонанс, который затем распадается на мезоны и нуклон (NRD – nucleon resonance dominance). Типичная схема реакции $NN \rightarrow NR$, $R \rightarrow NM$, где M - мезон. Неизвестные параметры модели фиксируются из экспериментальных данных по сечениям и ширинам. Разработанная модель eVMD + NRD сопоставляется с экспериментальными данными по рождению дилептонов в протон-протонных соударениях (Коллаборация DLS),

с данными по околопороговому рождению ω -мезонов. В заключение вычисляются дилептонные спектры, представленные данными коллабораций DLS и HADES, для столкновений тяжелых ионов.

В разделе 4.1 в рамках эффективной мезонной теории найдены радиационные и дилептонные дифференциальные и полные ширины распада легких нестранных мезонов с массой ниже массы $\phi(1020)$ -мезона ($M = \rho, \omega, \phi, \eta, \eta', \pi, f_0$) в конечные состояния, содержащие наряду с электрон-позитронными парами один фотон, один мезон и два мезона. Полученные результаты использовались для моделирования спектра дилептонов в столкновениях нуклонов и тяжелых ионов, а также для экспериментальных поисков дилептонных мод распада легких нестранных мезонов.

Дилептонные моды распада нуклонных резонансов детально изучаются в разделе 4.2. Получены релятивистские, кинематически полные, феноменологические выражения для ширин $R \rightarrow N\ell^+\ell^-$ распада нуклонных резонансов с произвольным спином и четностью. Ширины и спектры $\ell^+\ell^-$ в распадах нуклонных резонансов с массой ниже 2 ГэВ оцениваются с помощью eVMD. Модель обеспечивает единое описание фото- и электророждения R , распадов $R \rightarrow NM$ и $R \rightarrow N\ell^+\ell^-$.

В разделе 4.3 дано описание спектра дилептонных пар в pp столкновениях при энергиях $T_{\text{LAB}} = 1 - 5$ ГэВ. Вычисления основаны на модели eVMD + NRD. Проводится сравнение с результатами коллаборации DLS (Bevalac). Важную роль играет прямой канал распада $\omega \rightarrow e^+e^-$. Впервые получено описание распадов $R \rightarrow N\gamma$ и $R \rightarrow N\rho(\omega)$ в рамках единой модели (eVMD).

В разделе 4.4 с целью дальнейшего тестирования модели eVMD + NRD дано вычисление сечения рождения ω -мезона в pp столкновениях вблизи порога. Показано, что $N^*(1535)$ резонанс играет в реакции выделенную роль. В результате сильной $N\omega$ связи этот резонанс дает вклад на порядок больший, чем экспериментально измеренный пиковый вклад ω . После вычитания гладкого теоретического фона, возникающего из-за рождения ω вне массовой поверхности, экспериментальные данные точно воспроизведены во всем диапазоне энергий от 5 МэВ до нескольких ГэВ выше порога. Обсуждается сценарий слабой связи $N^*(1535)\omega$. В по-

следнем случае вклад вне массовой поверхности существенно уменьшается, однако, описание экспериментального сечения выше порога оказывается хуже.

Транспортные модели играют роль связующего звена между теоретическими построениями и данными экспериментов. Они необходимы для интерпретации экспериментальных данных. В разделе **4.5** описана транспортная модель (Релятивистской) Квантовой молекулярной динамики (QMD/RQMD), которая использовалась длительное время группой тяжелых ионов в Университете Тюбингена для моделирования столкновений тяжелых ионов. Диссертант включил в модель QMD/RQMD дилептонный сектор. Эта модель тестируется на предмет воспроизведения набора экспериментальных данных, далее применяется для описания дилептонных спектров.

В разделе **4.6** построена феноменологическая модель, описывающая модификацию массы векторных мезонов в ядерном веществе. В согласии с выводами Главы **3** учитывается уширение нуклонных резонансов в самосогласованном подходе. Систематически рассмотрены различные сценарии модификации свойств векторных мезонов в ядерном веществе. Из описания дилептонных спектров коллаборации NADES получен вывод о значительном уширении векторных мезонов в ядерном веществе при относительно слабом смещении их пика относительно вакуумного значения.

В Главе **5** предложена схема квантового транспорта, позволяющая в любом фиксированном порядке разложения по постоянной Планка свести задачу эволюции квантовых систем к решению конечной системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ).

В разделе **5.1** правило соответствия Вигнера-Вейля формулируется в естественных терминах \star -произведения и \star -функций. В транспортных моделях траекториям принадлежит выделенная роль. В формализме деформационного квантования траектории частиц в фазовом пространстве (Osborn and Molzahn, 1995) возникают как символы Вейля операторов координат и импульсов в представлении Гайзенберга. В разделе **5.2** впервые показано, что такие траектории обладают свойствами характеристик, с помощью которых решаются системы уравнений в частных производных, таких, как уравнение Лиувилля. В диссертационной работе они на-

зываются «квантовыми характеристиками». Показано, что фазовый поток, образованный квантовыми характеристиками, сохраняет скобку Мойла. В разделах 5.3 и 5.4 описано разложение \star -функций и квантовых характеристик в ряд по степеням постоянной Планка. В разделе 5.5 обсуждаются численные схемы усреднения по функции Вигнера. Формулировка задачи рассеяния в терминах функции Вигнера рассмотрена в разделе 5.6.

Модификация дилептонной ширины ϕ -мезона в ультррелятивистских столкновениях тяжелых ионов рассмотрена в Главе 6. Дано вычисление собственно-энергетического оператора каонов (основная мода распада ϕ -мезона) в пионной материи при температуре до 200 МэВ в однопетлевом приближении киральной теории возмущений. Результаты обобщаются на высокие температуры, характерные для энергий RHIC, с использованием экспериментальных данных о фазах πK рассеяния. Модификация ширины каонов в среде приводит к увеличению скорости распада $\phi \rightarrow KK$. Увеличение парциальной ширины распада ϕ -мезона на электрон-позитронные пары, обнаруженное коллаборациями NA50, NA49 и PHENIX, интерпретируется как результат перерасеяния вторичных каонов внутри термализованной пионной материи.

В Главе 7 рассмотрена задача о генерации майорановской массы нейтрино в ядерном веществе за счет экзотического скалярного взаимодействия, нарушающего сохранение полного лептонного числа. Скалярное взаимодействие между майорановским нейтрино и нуклонами изменяет майорановскую массу нейтрино в среднем поле ядра, что отражается на вероятности $0\nu\beta\beta$ распада. Представлен феноменологически полный набор скалярных токов майорановских нейтрино, включающих производные не выше первого порядка, и построена матрица смешивания нейтрино в ядерной среде. Получены ограничения на масштаб четырех-фермионного взаимодействия из данных по $0\nu\beta\beta$ распаду, одиночному бета-распаду и из астрофизических данных.

Новая физика на масштабе 1 ТэВ может генерировать майорановскую массу нейтрино порядка 1 эВ, что представляет интерес для экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада ядер.

Заключение

В диссертационной работе предсказаны и изучены новые физические эффекты: спаривание кварков и сверхпроводимость в холодной кварковой материи для цветовой группы $SU(2)$, бозе-конденсация дибарионов в ядерной материи, столкновительное уширение адронов, двухкомпонентная структура амплитуды Брейта-Вигнера в когерентном рождении резонансов на ядрах, генерация майорановской массы нейтрино в ядерном веществе за счет среднего скалярного поля ядра.

Развиты модели элементарных реакций рассеяния и распада легких нестранных мезонов, нуклонов и нуклонных резонансов, играющих основную роль в описании дилептонных спектров в столкновениях тяжелых ионов. К ним относятся модель обобщенной векторной доминантности ($eVMD$), модель доминантности нуклонных резонансов в мезон-нуклонных и нуклон-нуклонных соударениях (NRD).

С целью описания коллективных свойств ядерной материи предложено и детально исследовано расширение модели Валечки за счет включения дибарионного сектора, развита самосогласованная схема для описания модификации свойств векторных мезонов в ядерной материи, разработана транспортная модель QMD/RQMD для описания дилептонных спектров в столкновениях тяжелых ионов.

В рамках деформационного квантования развита строгая математическая схема квантового транспорта, позволяющая в любом порядке разложения по степеням постоянной Планка свести задачу эволюции к решению конечной системы ОДУ.

На основе сравнения с экспериментальными данными проведено тестирование моделей, описывающих рождение нуклонных резонансов на ядрах, рождение дилептонов в протон-протонных столкновениях, рождение ω -мезонов вблизи порога, модификацию ширины и массы векторных мезонов в ядре (данные коллабораций DLS и HADES). Получена физическая интерпретация данных коллабораций NA50, NA49, PHENIX о модификации дилептонной парциальной ширины ϕ -мезона в горячей пионной материи.

Результаты, представленные в диссертационной работе, позволяют наметить перспективы дальнейших исследований.

Регистрация длительной мягкой нейтринной вспышки, сопровождающей конверсию нейтронных звезд в кварковые звезды (Б. В. Мартемьянов, 1994) или наблюдения второго узкого нейтринного пика при вспышке сверхновых (I. Sagert et al., 2009) подтвердили бы существование кварковых (гибридных) звезд. Нейтринные вспышки такого типа обладают яркой сигнатурой, их дальнейшее теоретическое изучение заслуживает внимания. Помимо нейтринного излучения, возникающего при образовании кварковых звезд, интерес представляет моделирование сбоев вращения пульсаров, которые содержат информацию об их внутреннем строении, а также скорости остывания нейтронных и кварковых звезд.

Можно ожидать дальнейшего прогресса в развитии решеточных методов КХД в изучении холодной барионной материи для группы $SU(2)$. Результаты решеточных моделей дополняются развитием феноменологических схем.

Теоретические исследования сверхпроводимости для цветовой группы $SU(3)$ в настоящее время ограничены техническими трудностями, связанными с использованием проекционной теории БКШ. Большую ценность представляет развитие новых математических методов и технических приемов, способных обеспечить прогресс на этом пути.

В настоящее время экспериментальный статус дибарионов не достаточно определен. В фазовом анализе рассеяния нуклонов в некоторых каналах существуют указания на резонансный характер поведения амплитуд. Отдельного упоминания заслуживает резонанс $I(J^P) = 0(3^+)$ с массой 2.37 ГэВ и шириной 70 МэВ, обнаруженный недавно на установках CELSIUS/WASA, а также COSY-TOF и WASA@COSY. Требуется новые эксперименты для подтверждения существования дибарионных резонансов.

Существование примитивов в нуклон-нуклонном взаимодействии не вызывает сомнений, однако, их роль в динамике не является окончательно установленной. Изучения ядерной материи при сверхвысокой плотности и сопоставление результатов с данными астрофизических наблюдений, а также лабораторные опыты по

рассеянию протонов с высоким энергетическим разрешением, доступным для современных ускорителей, могли бы пролить свет на сценарии, связанные с возможным взаимопревращением примитивов и резонансов под действием возмущений и в ядерной среде. Данная проблема затрагивает основные концепции нуклон-нуклонного взаимодействия, ядерной физики и имеет фундаментальное значение.

Двухкомпонентная формула Брейта-Вигера в когерентном рождении резонансов на ядрах, полученная в Главе 3 диссертации, теоретически детально обоснована. Можно ожидать, что ее проверка заинтересует экспериментаторов.

В теоретических схемах, используемых при моделировании столкновений тяжелых ионов, существует достаточно много неопределенностей. Эта область представляет собой обширное поле исследований для теоретиков. Для описания рождения дилептонных пар представляет интерес детальное моделирование элементарных реакций и транспорта.

С точки зрения квантового транспорта актуальным является изучение конкретных задач рассеяния, имея в виду, в том числе, смежные области (квантовая химия).

Значение исследований модификации свойств элементарных частиц в ядерной материи ярко проявляется в процессах безнейтринного двойного бета-распада, где удается получить ограничения на параметры фундаментальных взаимодействий вне Стандартной модели, сравнимые по чувствительности с экспериментами на ЛНС. Экспериментальное обнаружение безнейтринного двойного бета-распада открыло бы новую эру в физике элементарных частиц. Методы, развитые для описания модификации свойств элементарных частиц в ядерной материи, в таком случае найдут новую область для приложений.

Список работ, включенных в диссертацию

- [1] L. A. Kondratyuk, M. M. Giannini and M. I. Krivoruchenko,
The SU(2) color superconductivity,
Phys. Lett. B **269**, 139-143 (1991).
- [2] L. A. Kondratyuk and M. I. Krivoruchenko,
Superconducting quark matter in SU(2) colour group,
Z. Phys. A **344**, 99-115 (1992).
- [3] A. A. Raduta, M. I. Krivoruchenko, and Amand Faessler,
**Exact results for the particle-number-projected BCS approach
with isovector proton-neutron pairing,**
Phys. Rev. C **85**, 054314 (2012), 15 pages.
- [4] M. I. Krivoruchenko,
Remarks on the origin of Castillejo-Dalitz-Dyson poles,
Phys. Rev. C **82**, 018201 (2010), 4 pages.
- [5] A. J. Buchmann, A. Faessler and M. I. Krivoruchenko,
**Dibaryon condensate in nuclear matter:
Exact analysis in one-dimensional models,**
Ann. Phys. (N.Y.) **254**, 109-129 (1997).
- [6] A. Faessler, A. J. Buchmann, M. I. Krivoruchenko and B. V. Martemyanov,
**Nuclear matter with a Bose condensate of dibaryons
in relativistic mean-field theory,**
Phys. Lett. B **391**, 255-260 (1997).
- [7] A. Faessler, A. J. Buchmann and M. I. Krivoruchenko,
**Nuclear matter with a Bose condensate of dibaryons
in a relativistic Hartree approximation,**
Phys. Rev. C **57**, 1458 (1998), 6 pages.
- [8] A. Faessler, A. J. Buchmann, M. I. Krivoruchenko and B. V. Martemyanov,
Dibaryons in nuclear matter,
J. Phys. G **24**, 791-820 (1998).
- [9] A. Faessler, A. J. Buchmann and M. I. Krivoruchenko,

**Constraints on the sigma- and omega-meson coupling constants
with dibaryons,**

Phys. Rev. C **56**, 1576 (1997), 6 pages.

- [10] L. A. Kondratyuk, M. I. Krivoruchenko, N. Bianchi, E. De Sanctis
and V. Muccifora,
Suppression of nucleon resonances in the total photoabsorption on nuclei,
Nucl. Phys. A **579**, 453-471 (1994).
- [11] K. G. Boreskov, L. A. Kondratyuk, M. I. Krivoruchenko and J. H. Koch,
**Resonance production on nuclei at high energies: Nuclear-medium effects and
space-time picture,**
Nucl. Phys. A **619**, 295-320 (1997).
- [12] A. Faessler, C. Fuchs and M. I. Krivoruchenko,
Dilepton spectra from decays of light unflavored mesons,
Phys. Rev. C **61**, 035206 (2000), 23 pages.
- [13] M. I. Krivoruchenko and A. Faessler,
Remarks on Δ radiative and Dalitz decays,
Phys. Rev. D **65**, 017502 (2001), 2 pages.
- [14] M. I. Krivoruchenko, B. V. Martemyanov, A. Faessler and C. Fuchs,
**Electromagnetic Transition Form Factors
and Dilepton Decay Rates of Nucleon Resonances,**
Ann. Phys. (N.Y.) **296**, 299-346 (2002).
- [15] A. Faessler, C. Fuchs, M. Krivoruchenko and B. Martemyanov,
Dilepton production in proton–proton collisions at BEVALAC energies,
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **29**, 603–624 (2003).
- [16] C. Fuchs, M. I. Krivoruchenko, H. L. Yadav, A. Faessler, B. V. Martemyanov and
K. Shekhter,
Off-shell omega production in proton-proton collisions near threshold,
Phys. Rev. C **67**, 025202 (2003), 11 pages.
- [17] K. Shekhter, C. Fuchs, A. Faessler, M. Krivoruchenko and B. Martemyanov,
Dilepton production in heavy-ion collisions at intermediate energies,
Phys. Rev. C **68**, 014904 (2003), 22 pages.

- [18] E. Santini, M. D. Cozma, Amand Faessler, C. Fuchs, M. I. Krivoruchenko, B. Martemyanov,
Dilepton production in heavy-ion collisions with in-medium spectral functions of vector mesons,
Phys. Rev. C **78**, 034910 (2008), 21 pages.
- [19] M. I. Krivoruchenko, C. Fuchs, A. Faessler,
Semiclassical expansion of quantum characteristics for many-body potential scattering problem,
Annalen Phys. **16**, 587-614 (2007).
- [20] M. I. Krivoruchenko, B. V. Martemyanov, C. Fuchs,
Comment on 'Dynamics of nuclear fluid. VIII. Time-dependent Hartree-Fock approximation from a classical point of view',
Phys. Rev. C **76**, 059801 (2007), 2 pages.
- [21] B. V. Martemyanov, A. Faessler, C. Fuchs, M. I. Krivoruchenko,
Medium Modifications of Kaons in Pion Matter,
Phys. Rev. Lett. **93**, 052301 (2004), 4 pages.
- [22] S. Kovalenko, M. I. Krivoruchenko, F. Simkovic,
Neutrino propagation in nuclear medium and neutrinoless double-beta decay,
Phys. Rev. Lett. **112**, 142503 (2014), 5 pages.