

ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ им. Н. Н. БОГОЛЮБОВА

В 2011 г. в лаборатории проводились исследования по четырем темам первого приоритета: «Теория элементарных частиц», «Современная математическая физика: гравитация, суперсимметрия», «Структура и динамика атомных ядер», «Теория конденсированных сред и новые материалы». Важной со-

ставляющей в деятельности лаборатории является теоретическая поддержка экспериментальных исследований в ОИЯИ и в других исследовательских центрах с участием ОИЯИ (ЦЕРН, GSI, BNL, FNAL и др.). Особое внимание уделялось привлечению к работе молодых исследователей, студентов и аспирантов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теория элементарных частиц

Развита суперсимметричная версия метода унитарных разрезов для формфакторов операторов из мультиплета тензора энергии-импульса. На древесном и однопетлевом уровне проверено соотношение между суперформфактором и суперимпульсом, равным нулю, и логарифмической производной от суперамплитуды по константе связи. Получено явное $N = 4$ ковариантное выражение для n -точечного MHV-формфактора на древесном и однопетлевом уровне. Сформулирован анзац для двухпетлевого MHV-формфактора в планарном пределе. Рассмотрены различные мягкие и коллинеарные предельные случаи в MHV-секторе в древесном и однопетлевом случае [1].

Изучен чисто лептонный распад $B_s \rightarrow \mu\mu$ в Стандартной модели (СМ). Показано, что он может иметь большие вклады от суперсимметрии, в особенности при большом β , будучи пропорциональным β^6 . Продемонстрировано, что в комбинации с ограничением, следующим из количества реликтовой темной материи, экспериментальный верхний предел на $\text{BR}(B_s \rightarrow \mu\mu)$ не ограничивает пространство параметров сильнее, чем прямые наблюдения и настоящий предел на бозон Хиггса. Наблюдаются также области пространства параметров с отрицательной интерференцией, где величина $\text{BR}(B_s \rightarrow \mu\mu)$ в три раза меньше, чем в СМ, даже при больших значениях β [2].

В рамках дисперсионного подхода в КХД выполнено исследование инклюзивного распада тау-

лептона в адроны. Показано, что эффекты, обусловленные адронизацией, играют существенную роль в теоретическом анализе этого процесса. Используемый подход позволяет описать экспериментальные данные по распаду тау-лептона как по векторному, так и по аксиально-векторному каналу. Близость оценок масштабного параметра КХД, полученных для двух вышеупомянутых каналов распада, свидетельствует о самосогласованности разработанного подхода [3].

Простая формула для полного сечения $\sigma^{\nu N}$ глуконепругого рассеяния нейтрино сверхвысоких энергий на изоскалярной нуклонной мишени представлена для нейтральных и заряженных токов. Показано, что полное сечение пропорционально структурной функции $F_2^{\nu N}(M_V^2/s, M_V^2)$, где M_V является массой промежуточного бозона, а s — квадратом энергии в системе центра масс. Коэффициент перед $F_2^{\nu N}$ зависит от поведения асимптотики при очень малых значениях переменной Бьеркена x . Так, он содержит дополнительный $\ln(s)$, если $F_2^{\nu N}$ пропорциональна степени $\ln(1/x)$. Точность приближенной формулы продемонстрирована для различных асимптотик $F_2^{\nu N}$ [4].

Вклад двойных логарифмов в сечения полуинклюзивного рождения адронов в модифицированной схеме минимальных вычитаний рассчитан в рамках размерной регуляризации. Полный дважды логарифмический вклад в коэффициентную функцию для инклюзивного образования адронов в электрон-позитронной аннигиляции получен в этой схеме

впервые. Наш результат согласуется со всеми вычислениями, проведенными в этой же схеме в первых трех порядках теории возмущений [5].

Разработанный ранее теоретико-полевой подход к нейтринным осцилляциям применен к описанию хорошо известных неожиданных результатов эксперимента OPERA, указывающих на распространение сверхсветовых сигналов. Утверждается, что данные могут быть объяснены за счет эффектов конечного размера нейтринных волновых пакетов без радикальных изменений теории [6, 7].

Совместные эффекты новейших многопетлевых КХД-вычислений с модификациями теории возмущений и вкладами высших твистов исследуются путем сравнения с высокоточными данными по правилу сумм Бьеркена для спиновозависимых структурных функций. Обнаружены указания на асимптотическую природу ряда теории возмущений и дуальность с эффектами высших твистов в четырехпетлевом приближении. В частности, вклады третьей и четвертой петель сравнимы друг с другом и с точностью эксперимента, в то время как вклад высшего твиста сопоставим с нулем [8].

Получены оценки для электророждения псевдоскалярных мезонов. Сечения и асимметрии вычисляются в подходе, основанном на факторизации жестких партонных подпроцессов и мягких обобщенных партонных распределений (ОПР). Учтен вклад поперечных ОПР, входящих в комбинации с мезонными волновыми функциями твиста 3. Результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными [9, 10].

Изучены геометрическая структура и перенормировочные свойства вакуумных средних от вильсоновских интегралов по путям, описывающих факторизованные вклады мягких глюонов в неинтегрированных партонных функциях распределения (TMD PDF). Получены однопетлевые уравнения ренорм-группы и уравнения эволюции по быстроте для кварковых TMD PDF. Показано, что использование путей на световом конусе в операторном определении TMD PDF согласовано с уравнениями ДГЛАП в коллинеарном пределе и позволяет однозначно учитывать эффекты, связанные с нечетностью относительно обращения времени (например, односпиновые асимметрии) в физических калибровках. Развитый подход использован также для анализа двухчастичных угловых корреляций по псевдобыстроте и азимутальным углам, полученных на LHC коллаборацией CMS [11].

Вычислены полные и дифференциальные сечения процессов e^+e^- -аннигиляции в $\pi^0\omega$, $\pi^0\gamma$ и $\pi(1300)\gamma$ в рамках расширенной модели Намбу–Йона-Лазинио. Были учтены промежуточные векторные мезоны ρ , ω и ϕ и их первые радиально возбужденные состояния [12, 13].

Найдены сечения фоторождения мезонов и их первых радиально возбужденных состояний в e^+e^- -столкновениях. Полученные теоретические

предсказания будут полезны для экспериментов, проводимых на e^+e^- -коллайдерах ВЭПП-2000 (Новосибирск) и ВЕРС-II (Пекин) [14].

Дана новая реалистическая оценка вклада механизма рассеяния света на свете за счет обмена легкими псевдоскалярными мезонами в аномальный магнитный момент мюона [15].

При исследовании заполнения сферы Ферми квазичастицами кварков (для широкого набора эффективных модельных гамильтонианов) обнаружена новая ветвь для динамической массы кварка как функции химического потенциала. Продемонстрировано отсутствие скачка плотности кваркового ансамбля, послужившее в свое время одним из существенных обоснований экспериментальной программы по обнаружению фазового перехода восстановления киральной инвариантности. Определены термодинамические характеристики кваркового ансамбля, и выявлена картина, характерная для фазового перехода газ–жидкость, аналогичная фазовому переходу в ядерной материи. Показано, что правдоподобным сценарием (частичного) восстановления киральной симметрии является смешанная (неоднородная) фаза вакуума и барионной материи. Построено описание поверхности раздела двух сред (газа и жидкости), и найден коэффициент поверхностного натяжения. Изучены некоторые свойства капель кварковой жидкости, в целом напоминающих ядро [16].

Были изучены электромагнитные свойства экзотического $X(3872)$ -мезона в предположении, что данный мезон является четырехкварковым состоянием. С этой целью был использован квантово-полевой подход для описания процессов с участием адронов, состоящих из кварков, учитывающий конфайнмент кварков с помощью введения инфракрасного обрезания в выражениях для физических амплитуд. Взаимодействие с электромагнитным полем в нелокальном лагранжиане, описывающем эффективное взаимодействие мезона $X(3872)$ с соответствующим четырехкварковым током, было введено с помощью формализма P -экспоненты. Был вычислен матричный элемент распада $X \rightarrow \gamma + J/\psi$, и доказана его калибровочная инвариантность. Затем были вычислены ширина распада и продольные/поперечные составляющие в этом распаде. Для разумных значений параметра, характеризующего размер $X(3872)$ -мезона, было найдено согласие с имеющимися экспериментальными данными [17].

В рамках подхода, основанного на уравнениях Дайсона–Швингера в КХД, были вычислены эффективные константы $g_{D^*D\pi}$ и $g_{B^*B\pi}$. Из связи данных констант с константами лептонных распадов тяжелых мезонов были найдены их численные значения: $g_{D^*D\pi} = 15,9 + 2,1 - 1,0$ и $g_{B^*B\pi} = 30,0 + 3,2 - 1,4$. Было также показано, что в случае c -кварка поправки порядка Λ_{QCD}/m_c не являются пренебрежимыми, в отличие от случая b -кварка [18].

Рассмотрен эффективный лагранжиан для полей Янга–Миллса, инвариантный относительно стандартных пространственно-временных и калибровочных $SU(3)$ преобразований. Показано, что ненулевой глюонный конденсат ведет к появлению набора из двенадцати вырожденных минимумов эффективного потенциала. Минимумы связаны между собой преобразованиями четности и ассоциированными с алгеброй $su(3)$ отражениями группы Вейля. Вырожденные дискретные глобальные минимумы потенциала означают существование решений уравнений движения в форме кинка, интерполирующего между различными минимумами эффективного потенциала. Рассмотрен вклад кварков в эффективное действие для однородных абелевых глюонных полей в присутствии сильных однородных электромагнитных полей. Исследована структура экстремумов потенциала как функции углов между хромоматричным, хромоматричным и электромагнитным полями. В работе электромагнитное поле рассматривается как внешнее, а глюонное представлено доменно-структурированными глюонными конфигурациями, связанными с вакуумом КХД в фазе конфайнмента. На качественном уровне данное исследование может быть рассмотрено как упрощенное исследование влияния сильных электромагнитных полей, возникающих в релятивистских столкновениях тяжелых ионов, на свойства вакуума КХД. Заключается, что сильные электромагнитные поля могут служить катализатором деконфайнмента в адронной материи [19].

Современная математическая физика

Исследован простейший класс аффинных теорий гравитации в многомерных пространствах с симметричной связностью. Для этой цели использовалась редукция этих моделей к двумерной дилатон-векторной гравитации. Отличительным свойством таких моделей является присутствие массивного тахионного векторного поля (вектона), взаимодействующего существенно нелинейно с дилатонной гравитацией. Показано, что вектонное поле может быть последовательно заменено новым скалярным полем (скаляроном), обладающим эффективной массой и связанным с дилатонной гравитацией нестандартным образом. Большое внимание было уделено изучению статических решений, обладающих горизонтами, путем использования локального обобщения координат Szekeres–Kruskal. Для анализа простейших моделей, имеющих три или два интеграла движения, предложено использовать понятие «топологического портрета», которое дает единое качественное описание статических и космологических решений в рассматриваемых моделях [20].

Исследованы новые космологические модели, содержащие векторные поля. Эти поля, имеющие геометрическую природу, возникают одновременно

и при цилиндрической размерной редукции, и в «аффинной» модификации гравитации, рассматривавшейся Эйнштейном и Эддингтоном. В конечном виде эти поля описываются эффективной дилатон-скалярной гравитацией с потенциалом четвертой степени. Это свидетельствует о том, что в аффинной теории гравитации процедура размерной редукции оказывается более сложной по сравнению с эйнштейновской ОТО. Для описания неабелева сектора теории предложена изотропная однородная $SU(2)$ теория Янга–Миллса с лагранжианом, нелинейно зависящим от инварианта. Такие лагранжианы могут, в принципе, порождаться в результате поляризации вакуума в пределе сильных полей. При определенных условиях рассматриваемая полевая модель может описывать инфляцию в режиме «медленного скапывания» [21].

Построены новые сферически-симметричные асимптотически плоские чернотырные решения в $N = 2$ супергравитации с помощью алгоритма интегрирования соответствующих уравнений Лакса, который был разработан в предыдущих работах авторов. Основная цель данного исследования — классификация черных дыр в соответствии с H^* -орбитами, на которые разбивается пространство возможных операторов Лакса. Причем H^* является группой изотропии скалярного многообразия, возникающего при времениподобной редукции супергравитации из размерности $D = 4$ в $D = 3$. Важным результатом этих исследований является новая тензорная классификация регулярных нильпотентных орбит во всех изотропных симметричных специальных геометриях [22].

В рамках квантовой теории поля на не плоском фоне изучались физические следствия конических сингулярностей у конфигурационных многообразий. В частности, показано, что «изоляция» конической сингулярности путем введения дополнительных граничных условий на поверхности, окружающей сингулярность, «улучшает» физические следствия, порождаемые такой особенностью. Например, полная вакуумная энергия физических полей на многообразии с конической сингулярностью оказывается в данном подходе конечной [23].

Выполнен сравнительный анализ различных методов поиска экзопланет. Показано, что гравитационное линзирование является одним из наиболее эффективных методов обнаружения легких экзопланет вблизи снеговой линии (в этом случае температура поверхности планеты лежит в интервале 0–1000 К) [24].

Сформулированы фундаментальные концепции, симметрии и динамические уравнения единой геометрической теории микро- и макромира. Для решения фундаментальных проблем общая квантовая механика предлагает радикальный пересмотр привычных фундаментальных концепций в физике и дает новое понимание сильных взаимодействий.

В истории физики не было аналогичного пересмотра оснований этой науки [25].

Построены $N = 4$ суперконформные модели с $D(2, 1; \alpha)$ группой симметрии для многочастичных систем. Модели полностью определяются препотенциалами F и U , удовлетворяющими уравнениям WDVV и уравнению типа Киллинга соответственно. Исследованы решения, инвариантные относительно перестановок частиц. Модели, основанные на деформированных корневых системах алгебр A_n и BCD_n , существуют при любых значениях параметра α . Наиболее интересный случай трансляционно-инвариантных механик с произвольным числом частиц отвечает значению $\alpha = -1/2(\text{osp}(4-2))$ [26].

Построено новое $N = 2$ суперсимметричное действие, описывающее движение массивной частицы вблизи горизонта экстремальной черной дыры Керра. Гамильтониан и суперзаряды содержат правильное число фермионов (два фермиона на каждую частицу) [27].

Показано, что теории суперструн на $AdS_3 \times S^3$ и $AdS_5 \times S^5$ пространствах в рамках обобщенной редукции Полмайера обладают скрытыми $N = (4, 4)$ и $N = (8, 8)$ суперсимметриями на мировом листе. Характерная черта соответствующих преобразований — присутствие нелокальных членов [28].

Метод нелинейных реализаций применяется для построения моделей галилеевой конформной механики. Выведены новые конформно-инвариантные действия в пространстве-времени произвольной размерности $D = d + 1$ (без центральных зарядов), а также в размерности $D = 2 + 1$ с одним «экзотическим» центральным зарядом [29].

Получены полные системы взаимно ортогональных примитивных идемпотентов для алгебр Бирман–Мураками–Венцеля и Брауэра. Для классических алгебр Ли g_N типа B, C и D построен evaluation-гоморфизм как отображение из алгебры отражения $B(g_N)$ в универсальную обертывающую алгебру $U(g_N)$ [30].

Структура и динамика атомных ядер

Развит схематический микроскопический метод, позволяющий рассчитывать вероятности $M1$ -переходов между симметричными состояниями и состояниями смешанной симметрии в ядрах, мягких относительно γ -деформации. Метод основан на комбинированном ПСФ–МВБ бозонном представлении самого коллективного изоскалярного бозона. Все прочие бозонные моды с более высокими энергиями возбуждения, включая бозон смешанной симметрии, описывались в рамках ПСФ. Вероятности $M1$ -переходов были рассчитаны в четно-четных ядрах $^{124-134}\text{Xe}$. Теоретические значения отношений $(M1; 1_{\text{ms}}^+ \rightarrow 2_2^+) / (M1; 1_{\text{ms}}^+ \rightarrow 0_1^+)$ хорошо согласуются с экспериментальными данными [31].

Метод моментов функции Вигнера обобщен на спиновые степени свободы ядра. В модели со

средним полем в виде гармонического осциллятора со спин-орбитальным слагаемым и остаточным квадруполь-квадрупольным взаимодействием на основе зависящих от времени уравнений Хартри–Фока получены уравнения движения для зависящих от спина коллективных переменных. Уравнения решены в пределе малой амплитуды колебаний. Обнаружены две изоскалярные и две изовекторные ветви колебаний при малых энергиях возбуждения, а также 5 изоскалярных и 5 изовекторных мод колебаний высокой частоты. Три низколежащих состояния интерпретируются как новые типы колебательных мод ядра, где, например, нуклоны со спином «вверх» колеблются относительно нуклонов со спином «вниз» [32].

Исследовано влияние температуры на неупругое рассеяние нейтрино низких энергий на четно-четных ядрах в условиях коллапса звезды. В рамках теплового ПСФ, построенного в формализме термополевой динамики, рассчитан вклад разрешенных и первого порядка запрета переходов в сечение процесса. Рассчитано распределение силы GT_0 -переходов в ядре ^{54}Fe при разных температурах. Тепловое заселение возбужденных состояний значительно увеличивает сечение процесса при низких энергиях нейтрино. Показано, что этот рост связан с вкладом процессов, в которых энергия нейтрино увеличивается, в то время как при $E_{\nu'} \geq 15$ МэВ в рассеянии доминируют процессы с уменьшением энергии нейтрино [33].

Энергии низколежащих одноквазичастичных состояний в цепочках изотонов с $N = 147-155$ рассчитаны в рамках трех подходов: двухцентровой микро-макромодели, квазичастично-фононной модели, самосогласованного метода Хартри–Фока–Боголюбова с силами Скирма. Качественные результаты всех трех подходов оказались весьма близки. Энергии исследованных одноквазичастичных состояний плавно меняются от ядра к ядру, если их деформации в основном состоянии близки. Изменение деформации под влиянием протонных оболочек вызывает перестановку одноквазичастичных уровней. Однако, чтобы описать одновременно экспериментальные спектры в изотопах $N = 149$ и 151 , приходится сильно варьировать теоретические параметры [34].

Заново проанализирован процесс резонансного безнейтринного двойного захвата электронов ($0\nu e e$) ядром. Рассмотрены случаи, в которых оба участвующих атома практически вырождены по массе. Найдены новые $0\nu e e$ -переходы с изменением четности на основные и возбужденные состояния дочернего атома/ядра. Установлены правила отбора для $0\nu e e$ -переходов, и получено выражение для соответствующего ядерного матричного элемента. По имеющимся данным о массах атомов, возбужденных уровнях атомов и ядер отобраны наиболее перспективные кандидаты для обнаружения $0\nu e e$ -перехода. Для некоторых переходов время полураспада может оказаться

порядка 10^{22} лет в унитарном пределе, если предположить эффективную массу майорановского нейтрино равной 1 эВ. Для ядра ^{152}Gd чувствительность соответствующего эксперимента может быть сравнима с чувствительностью экспериментов по $0\nu\beta\beta$ -распаду [35].

Исследовано заселение ротационных полос в сверхтяжелых ядрах, рождающихся в реакциях слияние-испарение $^{206,208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{252,254}\text{No}$ и $^{204}\text{Hg}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{250}\text{Fm}$, и их влияние на выживаемость ядра-продукта. Расчеты проведены в статистическом и квантово-диффузионном подходах. Детально изучена зависимость барьеров деления в ядрах с установившейся структурой оболочек от углового момента. Зависимость от углового момента относительных интенсивностей $E2$ -переходов между вращательными состояниями, входных спиновых распределений остаточного ядра и других наблюдаемых определяется главным образом парциальными вероятностями захвата и выживания. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом. Таким образом, при низких и умеренных значениях углового момента центробежные силы не препятствуют синтезу сверхтяжелых ядер [36].

В процессе численных расчетов уравнение Шрёдингера часто сводят к системе связанных уравнений для радиальной переменной. Некоторые общие свойства такой системы обуславливают трудности при численном решении системы в тех областях радиальной переменной, где движение в некоторых каналах запрещено в классическом пределе. Предложен модифицированный метод переменной фазы, в котором связанные уравнения преобразуются к виду, содержащему свободные решения только как логарифмические производные, т.е. в комбинациях, минимизирующих изменения абсолютных значений. Новая система менее склонна к возникновению и развитию численных нестабильностей. Метод работает как для связанных состояний, так и для состояний непрерывного спектра. Метод использован для расчета лежащего в непрерывном спектре низкоэнергетического монополярного состояния гало-ядра ^6He [37].

Рассмотрена возможность описания ядер как систем α -частиц с использованием двумерного интегродифференциального уравнения, описывающего систему A -бозонов. Предполагалось, что в системе доминируют двухчастичные силы, что позволило разложить волновую функцию A -частиц по фаддеевским компонентам. Последние, в свою очередь, могут быть разложены по потенциальным гармоникам. В результате получается либо бесконечная система связанных дифференциальных уравнений по гиперрадиусу r , либо, в случае проектирования на пространство координат r_{ij} , одно двумерное интегродифференциальное уравнение, учитывающее двухчастичные корреляции точно. Формализм может быть легко использован для систем вплоть до $A \sim 20$. Численные проблемы, возникающие при

больших A , преодолеваются посредством преобразования интегродифференциального уравнения при $A \rightarrow \infty$ в новое уравнение, ядро которого имеет простую аналитическую форму. Представлены результаты демонстрационных расчетов для некоторых α -кластерных ядер [38].

Предложен новый механизм резонансного межатомного взаимодействия в высших парциальных волнах в бозонных квантовых газах. Механизм основан на эффекте резонансного d -волнового рассеяния в ультрахолодных столкновениях в волноводах с непроницаемыми стенками. Наблюдаемый d -волновой резонанс (ДВР) представляет собой резонанс формы, образующийся благодаря центробежному барьеру и удерживающей ловушке. Получено масштабное соотношение для положения ДВР. Изменением частоты ловушки резонансное ультрахолодное рассеяние можно перестраивать из s -волнового в d -волновое и наоборот. Этот эффект может быть использован для приготовления ультрахолодных атомных газов, взаимодействующих в высших парциальных волнах [39].

Исследована пространственно-временная эволюция электромагнитных полей, формирующихся в столкновениях тяжелых ионов релятивистских энергий. Использовался транспортный код, основанный на струнной динамике адронов и соответствующий кинетическим уравнениям Каданова–Бейма, который рассматривает ядерные столкновения, используя понятие квазичастиц с ненулевой шириной. Детально проанализирована пространственно-временная структура полей в нецентральных столкновениях $\text{Au} + \text{Au}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Наиболее интенсивные магнитные поля, ориентированные перпендикулярно к плоскости реакции, формируются в течение времени, за которое лоренцевски сжатые ядра проходят сквозь друг друга ($t \leq 0,2$ Фм/с). Электрическое поле, также резко неоднородное, имеет минимум в центре области перекрывания сталкивающихся ядер. Оно мало, и им можно пренебречь при временах $t \geq 0,2$ Фм/с. Расчеты не выявили заметного влияния электромагнитных полей на разделение электрического заряда относительно плоскости реакции [40].

В рамках ковариантного подхода Бете–Солпитера сконструировано релятивистское комплексное сепарабельное ядро, предназначенное для описания нейтрон-протонного взаимодействия. Рассматривались несвязанные парциальные волны с полным угловым моментом $J = 0, 1$. Неупругость описывалась в энергетическом интервале до 3 ГэВ феноменологически — заменой реальных параметров ранее построенного мультигрангового сепарабельного потенциала комплексными. Обнаруженное отклонение теоретической кривой для параметров неупругости от экспериментальной в парциально-волновом состоянии $^3\text{P}_0^+$ интерпретировано как проявление широких дибарионных резонансов [41].

Проанализировано испускание пар нейтрино–антинейтрино электронами в поле поляризованной ультраинтенсивной электромагнитной (например, лазерной) волны. Разработан метод, позволяющий просуммировать все парциальные гармоники и учесть нелинейные электродинамические эффекты, равно как и особенности рождения нейтрино. Выявлена нетривиальная асимметрия вероятностей рождения электронных и $\mu + \tau$ -нейтрино, зависящая от энергии фотонов волнового поля и его интенсивности [42].

Теория конденсированных сред и новые материалы

Теоретические исследования по теме «Теория конденсированных сред и новые материалы» в 2011 г. продолжались в рамках следующих проектов:

- физические свойства комплексных материалов и наноструктур;
- математические проблемы многочастичных систем.

Вычислен спектр спиновых возбуждений в модели Гейзенберга в ферромагнитном и парамагнитном состояниях на основе метода проектирования для двухвременных функций Грина. Показано, что этот метод эквивалентен диаграммной технике для спиновых операторов в ведущих порядках по взаимодействию [43].

Развита микроскопическая теория динамической спиновой восприимчивости (ДСВ) в сверхпроводящем состоянии в рамках t - J -модели. Она основана на точном представлении для ДСВ, полученном с применением проекционной техники Мори для функции релаксации в терминах операторов Хаббарда. В приближении обобщенного среднего поля рассчитана статическая спиновая восприимчивость, тогда как собственная энергия вычислена в приближении связанных мод. Спектр спиновых возбуждений изучен в однородной фазе слабо и оптимально допированных областей. При низких температурах ДСВ имеет резонансную моду при антиферромагнитном волновом векторе $Q = (1, 1)$ вследствие сильного подавления затухания спиновых возбуждений. Это объясняется вовлечением спиновых возбуждений в процесс затухания в дополнение к частично-дырочному континууму, обычно рассматриваемому в приближении случайных фаз. Спиновая щель в спектре спиновых возбуждений при Q играет ключевую роль в ограничении затухания по сравнению со сверхпроводящей щелью, которая приводит к наблюдению резонанса даже выше T_c в слабо допированной области. Получено хорошее согласие с экспериментами по неупругому рассеянию нейтронов в $YBa_2Cu_3O_y$ [44].

Магнитный переориентационный фазовый переход (МПФП) в двух подрешеточных ферромагнитных монослоях со спинами A и B в подрешетках A

и B соответственно изучен с помощью двухвременных функций Грина. Получено, что МПФП в подрешетках A и B осуществляется при различных температурах. На этом основании предположено, что рассмотренная модель подтверждает возможность существования двух магнитных фаз в ферромагнитных системах [45].

Разработан эффективный подход для вычисления транспортных коэффициентов при описании процессов переноса в твердых телах. Обобщенные кинетические уравнения выведены на основе метода неравновесного статистического оператора Зубарева. В рамках этого подхода рассмотрены процессы электронного транспорта в упорядоченных и неупорядоченных металлических системах. Основное внимание уделялось описанию электро- и теплопроводности в переходных металлах и их неупорядоченных сплавах. Для описания электронной подсистемы и взаимодействия электронов с фононами использовались приближение сильносвязанных электронов и модифицированное приближение сильносвязанных электронов. Существенно, что в рамках единого подхода изучено поведение электропроводности при низких и высоких температурах. Выяснены роль деформации поверхности Ферми и сильного рассеяния электронов за счет высокой концентрации примесей. Проведено тщательное сравнение данного подхода с другими существующими методами, и показаны преимущества разработанного метода [46].

Кривые малоуглового рассеяния от детерминированных фракталов изучены и проанализированы в импульсном пространстве. Показано, что во фрактальной области кривая $I(q)q^D$, где D и $I(q)$ — фрактальная размерность и интенсивность рассеяния соответственно, приблизительно логарифмически периодическая с периодом, равным логарифму масштабного фактора, что является следствием самоподобия фрактала. Число периодов кривой $I(q)q^D$ совпадает с номером фрактальной итерации. В противоположность стандартным методам представленный анализ позволяет найти из данных рассеяния не только фрактальную размерность и границы фрактальной области, но и номер фрактальной итерации, масштабный фактор, а также число структурных единиц, составляющих фрактал [47].

Проанализирована возможность реализации спинового сверхизлучения ансамблем магнитных нанокластеров. Известными препятствиями для осуществления такого когерентного излучения магнитными нанокластерами являются их большая магнитная анизотропия, сильная дефазировка дипольного взаимодействия и существенная неоднородность их размеров. Разработана микроскопическая теория, которая детально описывает спиновую динамику нанокластеров. Показано, что, несмотря на существующие трудности, имеется принципиальная возможность создания условий, при которых магнитные нанокластеры будут сильно сверхизлучать [48].

Рассмотрены оптические решетки, в каждом узле которых имеется двухъямный потенциал. Предполагается, что решетка находится в состоянии изолятора. Порядок и беспорядок определяются по отношению к смещению атомов в двухъямном потенциале. Показано, что в таких решетках в дополнение к полностью упорядоченному и разупорядоченному состоянию может существовать смешанное промежуточное состояние, когда в упорядоченной решетке находятся разупорядоченные области мезоскопических размеров [49].

Предложена новая концепция квантовой турбулентности в сверхтекучих жидкостях конечного размера, таких как бозонные атомы в ловушке. Данное явление изучено на примере конденсации Бозе–Эйнштейна атомов ^{87}Rb . В проведенном эксперименте переход к режиму квантовой турбулентности характеризуется образованием переплетающихся вихревых линий, которые контролируются амплитудой и продолжительностью возбуждений, порождаемых полем внешних осцилляций. Для описания экспериментальных результатов предложена простая модель. Переход от нетурбулентного к турбулентному режиму является постепенным, но происходит достаточно резко, чтобы можно было определить критическую линию, разделяющую оба режима [50].

Двумерная направленная стохастическая модель песочной кучи изучается аналитически с помощью направленных абелевых алгебр, недавно введенных Алкаразом и Риттенбергом. Выведены некоторые точные выражения для вероятностей всевозможных процессов осыпания, участвующих при передаче произвольного числа частиц к некоторому узлу в стационарном состоянии. Предложено описание эволюции в виртуальном времени направленных лавин на двумерных решетках. Ввиду неразрешимости общей задачи алгебраический подход применен для решения частных случаев направленных детерминистических лавин и тривиальных стохастических лавин, описывающих простое случайное блуждание двух частиц. В общем случае квадратичной направленной алгебры точно определены максимально возможные значения потока частиц и числа заполнения («высоты») каждого узла в любой момент виртуального времени [51].

Рассмотрены размерные эффекты на наномасштабе. На ряде примеров показано, что явления изменения ряда макроскопических характеристик происходят на масштабах от 200 до 40 Å. Показано, что для обычных систем критические изменения происходят на размерах порядка 50 Å. Для магнитных систем эта величина варьируется в интервале от 60 до 200 Å. Продемонстрировано, что метод малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей дает метрологическую поддержку на масштабах от 100 до 10 Å [52].

Показано, что известная полуфеноменологическая спин-фермионная модель, предложенная Шан-

каром для описания низкоэнергетической физики допированного антиферромагнетика, не учитывает сильные электронные корреляции, характерные для этой системы в области слабого допирования. На основе микроскопической t – J -модели сильнокоррелированных электронов построено эффективное действие для слабо допированного антиферромагнетика, в котором такие корреляции учитываются в полном объеме. Физически полученное действие описывает высокотемпературный сверхпроводник ниже критической по допированию точки как сильнокоррелированную электронную жидкость в отличие от стандартной ферми-жидкости Ландау, которая реализуется выше данной критической точки [53].

Предсказан гистерезис резонансного типа, обусловленный параметрическим резонансом в системе связанных джозефсоновских переходов. В отличие от известного гистерезиса Мак-Камбера и Стюарта величина данного гистерезиса обратно пропорциональна параметру Мак-Камбера и зависит также от параметра связи и граничных условий. Исследования временной зависимости электрического заряда на сверхпроводящих слоях позволило объяснить происхождение гистерезиса различной зарядовой динамикой при нарастании и убывании базового тока. Обнаружено влияние длины продольной плазменной волны на величину заряда на сверхпроводящем слое. Указано на сильную зависимость амплитуды зарядовых осцилляций при резонансе от величины диссипации в системе [54].

Внутренние джозефсоновские переходы в высокотемпературных сверхпроводниках имеют хорошие перспективы использования в различных электронных устройствах (в частности для квантовых стандартов электрического напряжения), работающих при относительно высоких напряжениях и в широком диапазоне частот. Исследован параметрический резонанс в системе внутренних джозефсоновских переходов и рождение продольной плазменной волны. Изучены зарядовые осцилляции на сверхпроводящих слоях при различных значениях базового тока. Показано, что характеристики резонанса могут быть использованы для определения параметров системы [55].

Проведено математическое моделирование статических распределений магнитного потока в длинных джозефсоновских контактах (ДК) с учетом второй гармоники в разложении джозефсоновского тока и последовательное сравнение результатов с традиционной моделью. Для анализа устойчивости каждому конкретному распределению магнитного потока в контакте ставится в соответствие спектральная задача Штурма–Лиувилля, обращение минимального собственного значения которой в ноль отвечает бифуркации распределения по одному из параметров задачи. Численное решение соответствующей нелинейной краевой задачи проведено при помощи непрерывного аналога метода Ньютона

с использованием сплайн-коллокационной схемы для линеаризованных задач на каждой ньютоновской итерации. Найдены основные распределения магнитного потока, и исследована их устойчивость при изменении параметров модели. Приведено сравнение полученных результатов с результатами традиционной модели для ДК типа сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник [56].

Уменьшение прозрачности барьера в структуре сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник приводит к отклонению джозефсоновского соотношения ток–фаза от синусоидальной формы. Знак второй гармоники является важным для многих применений, в частности, в структурах типа SNINS или SFIFS, где N — нормальный металл, F — ферромагнетик. Изучено статическое распределение магнитного потока в длинных джозефсоновских переходах с учетом высших гармоник в фурье-разложении джозефсоновского тока. Анализ устойчивости основывался на численном решении спектральной задачи Штурма–Лиувилля для каждого распределения. Обращение минимального собственного значения в ноль отвечает бифуркации распределения по одному из параметров задачи. Найдены решения, которые отсутствуют в традиционной модели. Исследовалось влияние второй гармоники на устойчивость основных распределений магнитного потока [57].

Доказана детерминантная формула для обобщенной функции Грина, полностью асимметричного процесса с исключениями, описывающая переходы между положениями частиц в различные моменты времени. Вычислена корреляционная функция токов, показано, что она асимптотически сходится к процессу Эйри-2 [58].

ДУБНЕНСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (DIAS-TN)

В рамках DIAS-TN в 2011 г. были проведены три школы и рабочее совещание (Research Workshop):

- 9-я Зимняя школа по теоретической физике (30 января – 6 февраля);
- 15-е рабочее совещание «Теория нуклеации и ее применения» (1–30 апреля);
- Гельмгольцевская международная школа «Теория ядра и астрофизические приложения» (24 июля – 2 августа);

КОНФЕРЕНЦИИ, СОВЕЩАНИЯ, СОТРУДНИЧЕСТВО

В 2011 г. лабораторией были организованы и проведены следующие международные конференции и совещания:

- международная конференция «Классические и квантовые интегрируемые системы» (24–27 января, Протвино);

Доказана теорема о вероятности P_{ret} возврата в соседнюю точку квадратной решетки для случайного блуждания с исключенными петлями. Из этой теоремы следует доказательство известной гипотезы о том, что средняя высота в двумерной модели критической самоорганизации равна $25/8$ и $P_{\text{ret}} = 5/16$ [59].

На основе предсказаний конформной теории поля для модели Поттса выведена асимптотика вероятности посещения удаленной точки двумерной решетки случайным блужданием с исключенными петлями [60].

Впервые точно доказано равенство суперконформных индексов в трехмерных теориях с $U(1)$ -калибровочной группой, связанных зеркальной симметрией. Показано, что статистические суммы суперсимметричных моделей теорий поля на трехмерном многообразии S^3 могут быть получены предельным переходом от суперконформных индексов четырехмерных теорий на пространстве $S^3 \times S^1$. Показано, что суперконформные индексы четырехмерных $N = 4$ супер-янг-миллсовских теорий в определенном пределе сводятся к мере для полиномов Макдональда и, соответственно, точно вычисляются [61].

Предложена схема построения q -дифференциальных операторов на квантовой матричной алгебре. Подробно изучен случай алгебры уравнения отражений $GL(n)$ типа. В этом случае в алгебре односторонних векторных полей выделена подалгебра присоединенных векторных полей, касательных к квантовым аналогам орбит коприсоединенного действия групп $GL(n)$, и получены явные формулы для ограничения соответствующих q -дифференциальных операторов на орбиты [62].

- Гельмгольцевская международная школа «КХД на решетке, структура адронов и адронная материя» (5–17 сентября).

Регулярно проводились семинары для студентов и аспирантов, поддерживался сайт DIAS-TN, продолжалась видеозапись лекций.

- совещание, посвященное 100-летию открытия атомного ядра (10–11 марта, Дубна);
- международная конференция «Симметрии и спин» (2–9 мая, Прага);
- совместное АЦТФ – ЛТФ ОИЯИ совещание по теоретической физике (15–20 мая, Дубна);

- 15-я Международная конференция «Методы симметрии в физике» памяти академика А. Н. Сисакяна (12–16 июля, Ереван);
- международное совещание «Суперсимметрии и квантовые симметрии» (18–23 июля, Дубна);
- 7-я Международная конференция «Квантовая теория и симметрии» (7–13 августа, Прага);
- 14-е рабочее совещание по физике спина при высоких энергиях (20–24 сентября, Дубна);
- международная конференция «Последние достижения в квантовой теории поля» (4–7 октября, Дубна);
- международное совещание «Боголюбовские чтения» (11–15 октября, Дубна);
- 4-е Всероссийское совещание «Прецизионная физика и фундаментальные физические константы» (5–9 декабря, Дубна);
- круглый стол Италия–Россия (10–18 декабря, Дубна).

Международное сотрудничество ЛТФ в 2011 г. было поддержано грантами полномочных представителей правительств Болгарии, Венгрии, Словакии, Польши, Румынии, Чехии и дирекции ОИЯИ. Сотрудничество с теоретиками Германии проходило при поддержке программы «Гейзенберг–Ландау», с теоретиками Польши — программы «Боголюбов–Инфельд», с теоретиками Чехии — программы «Блохинцев–Вотруба» и с теоретиками Румынии — программы «Цицейка–Марков».

Ряд исследований был выполнен совместно с зарубежными учеными в рамках соглашений ОИЯИ–INFN, ОИЯИ–IN2P3 и по проектам, поддержанным грантами РФФИ–DFG, РФФИ–CNRS. Продолжает действовать соглашение о сотрудничестве с теоретическим отделом ЦЕРН, Азиатско-тихоокеанским центром теоретической физики (Республика Корея), Институтом теоретической физики АН КНР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bork L. V., Kazakov D. I., Vartanov G. S. // JHEP. 2011. V. 1110. P. 133.
2. Beskidt C. et al. // Phys. Lett. B. 2011. V. 705. P. 493.
3. Nesterenko A. V. arXiv:1106.4006, arXiv:1110. 2011.
4. Illarionov A. Yu., Kniehl B. A., Kotikov A. V. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. 231802.
5. Albino S. et al. // Nucl. Phys. B. 2011. V. 851. P. 86–103.
6. Naumov D. V., Naumov V. A. // J. Phys. G. 2010. V. 37. 105014.
7. Naumov D. V., Naumov V. A. arXiv:1110.0989. 2011.
8. Khandramai V. L. et al. // Phys. Lett. B. 2012. V. 706. P. 340.
9. Goloskokov S. V., Kroll P. // Eur. Phys. J. 2011. V. 112.
10. Goloskokov S. V. arXiv:1112.2813. 2011.
11. Cherednikov I. O., Stefanis N. G. // Intern. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 2011. V. 4. P. 135.
12. Ahmadov A. I., Kuraev E. A., Volkov M. K. // Intern. J. Mod. Phys. A. 2011. V. 26. P. 3337.
13. Arbuzov A. B., Kuraev E. A., Volkov M. K. // Phys. Rev. C. 2011. V. 83. 048201. Eur. J. Phys. A. 2011. V. 49. P. 103.
14. Arbuzov A. B., Volkov M. K. // Phys. Rev. C. 2011. V. 84. 058201.
15. Dorokhov A. E., Radzhabov A. E., Zhevlakov A. S. // Eur. Phys. J. C. 2011. V. 71. P. 1702.
16. Molodtsov S. V., Zinovjev G. M. // Phys. Rev. D. 2011. V. 84. 036011; Eur. Phys. Lett. 2011. V. 93. P. 11001.
17. Dubnicka S. et al. // Phys. Rev. D. 2011. V. 84. 014006.
18. El-Bennich B., Ivanov M. A., Roberts C. D. // Phys. Rev. C. 2011. V. 83. 025205.
19. Nedelko S. N., Galilo B. V. // Phys. Rev. D. 2011. V. 84. 094017; Part. Nucl., Lett. 2011. V. 8. P. 118.
20. Filippov A. T. arXiv:1112.3023. 2011.
21. Davydov E. A. arXiv:1112.3289. 2011.
22. Fre P., Sorin A. S., Trigiante M. arXiv:1103.0848. 2011.
23. Nesterenko V. V., Pirozhenko I. G. // Class. Quantum Grav. 2011. V. 28. 175020.
24. Zakharov A. F. // Physics-Uspekhi. 2011. V. 50. P. 10.
25. Pestov I. B. // Phys. At. Nucl. 2011. V. 74. P. 1084.
26. Krivonos S., Lechtenfeld O. // JHEP. 2011. V. 1102. P. 042.
27. Bellucci S., Krivonos S., Sutulin A. // Phys. Rev. D. 2011. V. 84. 065033.
28. Goykhman M., Ivanov E. // JHEP. 2011. V. 1109. P. 078.
29. Fedoruk S., Ivanov E., Lukierski J. // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. 085013.
30. Isaev A. P., Molev A. I., Ogievetsky O. V. // Intern. Math. Research Notices. 2011. doi: 10.1093/imrn/rnr126.
31. Jolos R. V. et al. // Phys. Rev. C. 2011. V. 84. 014315.
32. Balbutsev E. B., Molodtsova I. V., Schuck P. // Nucl. Phys. A. 2011. V. 872. P. 42.
33. Dzhioev A. A. et al. // Phys. At. Nucl. 2011. V. 74. P. 1162.
34. Adamian G. G. et al. // Phys. Rev. C. 2011. V. 84. 024324.
35. Krivoruchenko M. I. et al. // Nucl. Phys. A. 2011. V. 85. P. 140.
36. Zubov A. S. et al. // Phys. Rev. C. 2011. V. 84. 044320.
37. Ershov S. N., Vaagen J. S., Zhukov M. V. // Phys. Rev. C. 2011. V. 84. 064308.
38. Sofianos S. A., Adam R. M., Belyaev V. B. // Phys. Rev. C. 2011. V. 84. 064304.
39. Giannakeas P., Melezhik V. S., Schmelcher P. // Phys. Rev. A. 2011. V. 84. 023618.
40. Voronyuk V. et al. // Phys. Rev. C. 2011. V. 83. 054911.
41. Bondarenko S. G., Burov V. V., Rogochaya E. P. // Phys. Lett. B. 2011. V. 705. P. 264.
42. Titov A. I. et al. // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. 053008.
43. Plakida N. M. // Theor. Math. Phys. 2011. V. 168 (3). P. 1303.
44. Vladimirov A. A., Ihle D., Plakida N. M. // Phys. Rev. B. 2011. V. 83. 024411.
45. Ilkovič V., Kecer J. // phys. stat. solidi b. 2012. V. 249. P. 181.

46. *Kuzemsky A. L.* // Intern. J. Mod. Phys. B. 2011. V. 25. P. 3071.
47. *Cherny A. Yu. et al.* // Phys. Rev. E. 2011. V. 84. 036203.
48. *Yukalov V. I., Yukalova E. P.* // Laser Phys. Lett. 2011. V. 8. P. 804.
49. *Yukalov V. I., Yukalova E. P.* // Laser Phys. 2011. V. 21. P. 1448.
50. *Shiozaki R. F. et al.* // Laser Phys. Lett. 2011. V. 8. P. 393.
51. *Aneva B. L., Brankov J. G.* // Theor. Math. Phys. 2011. V. 169 (3). P. 1751.
52. *Kuklin A. I. et al.* // Rom. J. Phys. 2011. V. 56 (1–2). P. 134.
53. *Ferraz A., Kochetov E. A.* // Nucl. Phys. B. 2011. V. 853. P. 710.
54. *Shukrinov Yu. M., Gaafar M. A.* // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. 094514.
55. *Shukrinov Y., Seidel P.* // Elektronika. 2011. V. 6. P. 52.
56. *Atanasova P. Kh. et al.* // Math. Models and Computer Simulations. 2011. V. 3. P. 388.
57. *Atanasova P. Kh. et al.* // Lecture Notes in Computer Sci. V. 6046. Springer, 2011. P. 347.
58. *Povolotsky A. M., Priezhev V. B., Schutz G. M.* // J. Stat. Phys. 2011. V. 142 (4). P. 754.
59. *Poghosyan V. S., Priezhev V. B., Ruelle P.* // J. Stat. Mech. 2011. V. 10. 10004.
60. *Poghosyan V. S., Priezhev V. B.* // Acta Polytechnica. 2011. V. 51 (1). P. 59.
61. *Krattenthaler C., Spiridonov V. P., Vartanov G. S.* // J. High Energy Phys. 2011. V. 6. P. 008;
Dolan F. A. H., Spiridonov V. P., Vartanov G. S. // Phys. Lett. B. 2011. V. 704. P. 234.
62. *Gurevich D., Pyatov P. N., Saponov P. A.* // J. Geometry and Phys. 2011. V. 61. P. 1485.