

# ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. Н. Н. БОГОЛЮБОВА

В 2009 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 составляющей в деятельности лаборатории является теоретическая поддержка экспериментальных исследований с участием ОИЯИ. Особое внимание уделялось привлечению к работе молодых исследователей, студентов и аспирантов.

## ТЕОРИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Исследования по теме «Поля и частицы» проводились по следующим проектам:

- стандартная модель и ее расширения;
- КХД партонные распределения для современных и будущих коллайдеров;
- физика тяжелых и экзотических адронов;
- смешанная фаза в столкновениях тяжелых ионов.

Возможность наблюдения двух глюино была исследована в рамках минимального суперсимметричного расширения стандартной модели. В определенном режиме параметров легчайшие стабильные нейтралы играют роль частиц холодной темной материи и позволяют объяснить избыток излучения в Галактике, обнаруженный в эксперименте EGRET. Отбор событий опирается на процессы, в которых продукты распада глюино содержат пару  $b\bar{b}$ , одну или две пары  $l\bar{l}$  и нейтралы. Показано, что эти процессы могут дать возможность обнаружения глюино на LHC [1].

Киральная теория возмущений в двухфлейворном секторе позволяет анализировать функции Грина в КХД в пределе, когда масса странного кварка намного больше внешних импульсов и масс легких кварков. В этом пределе низкоэнергетические константы зависят от массы тяжелого кварка. В предыдущей работе такая зависимость установлена для констант, которые возникают в порядке  $p^4$ , на двух-

петлевом уровне точности. Аналогичные соотношения найдены для ряда констант, которые возникают в порядке  $p^6$  [2]. Было рассмотрено 28 констант, которые входят в функции Грина, построенные из векторных и аксиальных токов в киральном пределе, и установлена их зависимость от масс тяжелых кварков на двухпетлевом уровне точности.

Были изучены полуплептонные распады тяжелых барионов с двумя тяжелыми кварками в рамках релятивистской кварковой модели [3]. Выполнен полный анализ переходных формфакторов при конечных массах тяжелых кварков и рассмотрен предел, когда их массы устремляются к бесконечности. Продемонстрировано, что в этом пределе выполняются все соотношения, вытекающие из симметрии, которая возникает в этом пределе. Также вычислены ширины распадов в полной теории и проведено сравнение с результатами предела тяжелых кварков.

В работе [4] проанализированы данные процесса глубоконеупругого рассеяния для структурной функции  $F_2$  и ее наклона  $\partial \ln(F_2)/\partial \ln 1/x$  в области малых значений переменной Бьеркена  $x$ . Используя приближение ведущего твиста операторного разложения Вильсона, показано что бессельподобное поведение структурной функции  $F_2$ , полученное при плоских начальных условиях в ДГЛАП-эволюции, ведет к хорошему согласию с экспериментальными данными, полученными на ускорителе

HERA в DESY, при значениях квадрата переданного импульса  $Q^2$ , больших чем  $2,5 \text{ ГэВ}^2$ . Согласно с данными при меньших значениях  $Q^2$  существенно улучшается при использовании «замороженной» и аналитической версий константы связи сильного взаимодействия. Таким образом, аналитическая версия константы связи сильного взаимодействия может быть использована, в частности, как удобная феноменологическая модель для физических процессов с малым значением квадрата поперечного импульса.

Предложен самосогласованный подход для факторизации амплитуд рассеяния эксклюзивных процессов вне рамок приближения ведущего твиста. Проведено сравнение предлагаемого подхода с известным подходом, который формулируется ковариантным образом в координатном представлении. Доказана эквивалентность этих двух подходов. В рамках предлагаемого метода впервые вычислен импакт-фактор перехода виртуального фотона в поперечный  $\rho$ -мезон с точностью до вкладов твиста 3 [5].

Детально изучены ренормгрупповые свойства зависящих от поперечного импульса партонных функций распределения в светоподобной калибровке с дополнительным условием Мандельштама–Лайбрандта. Получено выражение для поперечного калибровочного поля на бесконечности, играющего решающую роль в описании конечных и начальных взаимодействий в светоподобной калибровке. Для этой калибровки в лидирующем порядке по константе связи вычислена аномальная размерность и проведено сравнение с результатами, полученными в других возможных калибровках. Показано, что аномальная размерность функции распределения не содержит в рассмотренном случае дополнительных

вкладов от быстрой расходимостей, связанных с вильсоновскими линиями, содержащими углы или пересечения [6].

Предложен эффективный лагранжиан для взаимодействия нейтрального пиона с глюонами с константой взаимодействия, фиксируемой из низкоэнергетической теоремы. С использованием модели инстантонной жидкости вычислен вклад глюонной компоненты в переходный формфактор пиона. Найденный вклад оказался достаточно большим и может иметь отношение к объяснению аномального поведения формфактора при больших виртуальностях одного из фотонов, недавно обнаруженного коллаборацией BaBar [7].

Для уточнения теоретической оценки массивных поправок на ширину распадов легких псевдоскалярных мезонов было использовано представление Меллина–Барнса для амплитуды. Выполнено полное пересуммирование рядов по степеням масс лептонов и мезонов. Учет эффекта массивных поправок оказался достаточно важным для распадов  $\eta$  и мезонов. Основываясь на полученных результатах дана новая оценка адронного вклада  $\eta'$  процесса рассеяния света на свете в аномальный магнитный момент мюона. Также даны обновленные предсказания для лептонных распадов мезонов с учетом новых данных коллаборации BaBar для переходных формфакторов псевдоскалярных мезонов [8].

Изучено заполнение сферы Ферми кварками, являющимися квазичастицами модельного гамильтониана с четырехфермионным взаимодействием, найдено давление вакуума и продемонстрировано наличие почти вырожденного с вакуумом заполненного состояния [9].

## СОВРЕМЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Исследования по теме были сосредоточены на следующих направлениях:

- суперсимметрия и суперструны;
- квантовые группы и интегрируемые системы;
- квантовая гравитация и космология.

Развит метод фонового поля для изучения классических и квантовых аспектов  $N = 3$ ,  $d = 3$  теорий Черна–Саймонса и материи в  $N = 3$  гармоническом суперпространстве. Одним из прямых следствий этого подхода является доказательство теоремы неперенормировки, из которой вытекает ультрафиолетовая конечность соответствующей суперполевой диаграммной теории возмущений. Выведены также общие суперполевые пропагаторы для гипермультиплета и калибровочного мультиплета на черн-саймоновском фоне. Вычислены ведущие су-

перграфы с двумя и четырьмя внешними линиями. В отличие от несуперсимметричной теории ведущая квантовая поправка к действию массивного гипермультиплета дается действием теории супер Янга–Миллса, а не теории Черна–Саймонса. Масса гипермультиплета индуцируется константным триплетом центральных зарядов в  $N = 3$ ,  $d = 3$  супералгебре Пуанкаре [10].

Новая модель суперконформной механики с симметрией  $OSp(4|2)$  получена путем калибрования  $U(1)$  изометрий некоторой суперполевой модели. Эта механика представляет собой одночастичный вариант новой  $N = 4$  суперсимметричной модели Калоджеро. Классические и квантовые генераторы супералгебры  $osp(4|2)$  построены на физических состояниях. В противоположность другим реализациям

$N = 4$  суперконформных алгебр, генераторы супертрансляций линейны по нечетным переменным подобно  $N = 2$  случаю. Бозонный сектор компонентного действия соответствует стандартной одночастичной конформной механике с добавленным  $SU(2)/U(1)$ -членом Весса–Зумино, приводящим к «размытой» сфере после квантования. Коэффициент при конформном потенциале оказывается квантованным [11].

Проведена  $su(2)$  гамильтонова редукция общего  $su(2)$ -инвариантного действия для самодействующего супермультиплета  $(4, 4, 0)$ . В результате переоткрыта  $N = 4$  суперсимметричная механика со спиновыми степенями свободы. Это наблюдение подчеркивает выделенную роль «корневого» супермультиплета в  $N = 4$  суперсимметричной механике [12].

Развит новый суперполевой подход к  $N = 4$  суперсимметричной механике, основанный на концепции бигармонического суперпространства (би-СП). Это расширение ( $N = 4, d = 1$ ) суперпространства двумя наборами гармонических переменных, связанными с двумя  $SU(2)$ -факторами группы  $SO(4)$ , определяющей  $R$ -симметрию  $N = 4, d = 1$  супералгебры Пуанкаре. В этом бигармоническом суперпространстве есть три аналитических подпространства: два грасмановой размерности 2 и одно размерности 3. Они замкнуты относительно действия бесконечномерной «большой»  $N = 4$  суперконформной группы, а также конечномерной суперконформной группы  $D(2,1;\alpha)$ . Главное достоинство подхода би-СП состоит в том, что он дает возможность рассматривать  $N = 4$  супермультиплеты с конечным числом компонент вне массовой оболочки на равных основаниях с «зеркальными» аналогами этих супермультиплетов. Показано, как все эти мультиплеты и их суперконформные свойства описываются в подходе би-СП. Также определяются непропагирующие калибровочные мультиплеты, которые могут быть использованы для калибрования различных изометрий суперполевых действий в би-СП. Представлен пример нетривиальной модели  $N = 4$  механики с семимерным пространством отображения, полученной калиброванием  $U(1)$  изометрии в сумме свободных действий мультиплета  $(4, 4, 0)$  и его зеркального варианта [13].

Изучены общие свойства специального класса двумерных теорий дилатонной гравитации с мультиэкспоненциальными потенциалами. В частности показано, как могут быть просто получены квазиволновые решения обобщенных систем Тоды–Лиувилля. В дилатонной гравитации эти решения описывают нелинейные волны, связанные с гравитационным полем, а также стационарные состояния и космологические модели. Большое внимание уделено упрощению аналитической структуры решений уравнений Тоды с целью лучшего понимания реалистических теорий, редуцированных к размерностям  $1+1$  и  $1+0$  или  $0+1$  [14].

Завершено доказательство интегрируемости систем Лакса на псевдоримановых симметрических многообразиях  $G/H^*$ . Показано, что сферически-симметричные решения, описывающие черные дыры в супергравитации, соответствуют геодезическим на таких многообразиях. Доказана интегрируемость (по Лиувиллю) таких дифференциальных систем и явно предложен алгоритм их интегрирования. Показано, что этот алгоритм может быть обобщен на общие недиагонализуемые лаксовы матрицы, не обязательно связанные с симметрическими пространствами [15].

Изучены уравнения, описывающие потоки, задаваемые полями Янга–Миллса на редуцируемом симметрическом пространстве  $G/H$ . На несимметрическом фактор-пространстве  $G/H$  можно ввести геометрические потоки, отождествляемые с кручением спиновой связности. Получены решения уравнений Янга–Миллса, которые описывают (в зависимости от граничных условий и кручения) инстантоны, цепочки из пар инстантон–антиинстантон или модификации калибровочных расслоений [16].

Исследованы модели модифицированной гравитации, которые удовлетворяют одновременно как локальным, так и космологическим тестам. Показано, что некоторые варианты таких чрезвычайно нелинейных моделей имеют решения, описывающие мультивселенные де Ситтера. Характерно, что эти вселенные возникают парами, причем одна из них стабильна, а вторая нестабильна. Явно показано, что при некоторых значениях параметров можно найти несколько пространств де Ситтера. В этом случае одно из этих пространств может соответствовать эпохе инфляции, в то время как остальные пространства можно использовать для описания эпохи доминирования темной энергии. С помощью де-ситтеровских решений построены мультивселенные де Ситтера, которые могут возникать на (пред)инфляционной фазе. Изучена их термодинамика и проведено сравнение их свободных энергий [17].

В последнее время такие методы математической физики, как техника теплового ядра и метод спектральных дзета-функций, были успешно применены к расчету вакуумных эффектов в нанофизике. В частности, были детально изучены казимировские силы отталкивания между металлом и диэлектриком, погруженными в жидкость. Поверхностные возбуждения (моды) в такой трехслойной системе моделировались диэлектрическими функциями, гарантирующими отталкивание. Было показано, что поверхностные моды играют решающую роль в этом явлении на малых расстояниях. Для простой плазменной модели, описывающей диэлектрическую восприимчивость, вклад поверхностных мод найден для всех расстояний между взаимодействующими макротелами [18].

Доказано, что набор элементов Юциса–Мерфи для общей алгебры Бирман–Мураками–Венция обра-

зует максимальную коммутативную подалгебру. На основе этого результата реконструирована теория представлений для всей башни алгебр Бирман–Мураками–Венцля [19].

Найдены новые неторические лагранжевы слоения гладкой квадрики, индуцируемые псевдоторической структурой. Предложен новый метод построения торических и неторических лагранжевых слоений торических многообразий Фано [20].

## СТРУКТУРА И ДИНАМИКА АТОМНЫХ ЯДЕР

В 2009 г. исследования велись в рамках четырех проектов:

- структурные особенности ядер, удаленных от линии стабильности;
- взаимодействия ядер и их свойства при низких энергиях возбуждения;
- экзотические малочастичные системы;
- ядерная структура и динамика при релятивистских энергиях.

С целью изучения  $E0$ -переходных плотностей в так называемых мягких ядрах предложен подход, в котором наряду с микроскопическим методом генераторной координаты используются собственные функции коллективных возбуждений феноменологического гамильтониана Бора. Эффективный оператор  $E0$ -плотности представлен в виде разложения по степеням оператора коллективного импульса, где учтено только первое слагаемое. Переходная плотность  $0_{g.s.}^+ \rightarrow 0_2^+$  рассчитана для ядра  $^{150}\text{Nd}$  с собственными функциями приближенного решения гамильтониана Бора, соответствующего  $X(5)$ -симметрии. В поведении  $E0$ -переходной плотности как функции радиуса наряду со стандартными максимумом и минимумом вблизи поверхности ядра видны осцилляции в его внутренней области, которые могут быть обнаружены в экспериментах по рассеянию электронов на ядрах при высоком разрешении [22].

Метод моментов функции Вигнера (ММФВ) усовершенствован за счет корректного учета сверхтекучих парных корреляций, не нарушающего уравнения непрерывности. В качестве примера ММФВ применен для анализа спектра квадрупольных возбуждений разной энергии и изотопической структуры в деформированных ядрах в модели «гармонический осциллятор со спариванием и квадруполь-квадрупольными силами». Аналитические выражения, полученные в слегка упрощенной версии модели, хорошо воспроизводят экспериментально наблюдаемую зависимость от деформации энергии и  $B(M1)$ -фактора ножнич-

Исследована структура кокасательного расщепления для квантовых линейных групп серий  $GL_q(n)$  и  $SL_q(n)$ . Получены явные формулы для двух различных выражений оператора эволюции  $q$ -деформированного изотропного волчка Алексева–Фаддеева. Соответствие между двумя выражениями для оператора эволюции задается модулярным функциональным уравнением для  $t$ -функции Римана [21].

ной моды возбуждения. Продемонстрирована исключительная важность парных корреляций [23].

Исследовано влияние температуры и плотности звездного вещества на скорость захвата электронов ядрами с  $A \sim 80$ . Температурные эффекты трактовались в рамках формализма, основанного на термополевой динамике. На примере ядра  $^{80}\text{Ge}$  рассчитаны и проанализированы распределения силы разрешенных и первого порядка запрета  $p \rightarrow n$ -переходов. Выяснен механизм тепловой деблокировки переходов Гамова–Теллера в нейтронно-избыточных ядрах. Показано, что температура слабо влияет на полную силу переходов первого порядка запрета. Скорость электронного захвата рассчитана при значениях температуры и плотности вещества, отвечающих поздней стадии звездной эволюции [24].

В рамках перенормированного приближения случайной фазы (ППСФ) и обычного ПСФ выполнены самосогласованные расчеты ядерных матричных элементов безнейтринного двойного бета-распада ( $0\nu\beta\beta$ ) для ядер  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ,  $^{128}\text{Te}$ ,  $^{130}\text{Te}$  и  $^{136}\text{Xe}$ . Впервые спаривательное и остаточное взаимодействия, равно как и двухнуклонные корреляции на малых расстояниях (КМР), были построены и учтены на основе одного и того же современного реалистического  $NN$ -потенциала — зарядово-зависящего боннского потенциала и аргоннского потенциала V18. КМР были рассчитаны последовательным образом методом связанных кластеров. Изучено влияние конечного размера нуклонов (КРН). Обнаружено, что эффекты КМР и КРН в равной степени уменьшают величину ядерного матричного элемента ( $0\nu\beta\beta$ )-распада [25].

Исследованы реакции, вызванные столкновениями пучков радиоактивных ядер с ядерными мишенями. Сформулирована микроскопическая четырехчастичная модель развала ядер с двухнейтронным гало, учитывающая особенности структуры каждого ядра. Модель основана на методе искаженных волн и описывает различные сечения и распределения фраг-

ментов развала. Проведен последовательный анализ структуры возбуждений непрерывного спектра ядер с двухнейтронным гало [26].

Исследованы возможности синтеза новых сверхтяжелых ядер с  $Z \geq 114$  в реакциях полного слияния с использованием актиноидных мишеней и пучков ядер тяжелее  $^{48}\text{Ca}$ . В настоящее время некоторые теоретические модели предсказывают остров стабильности при  $Z = 114$  или 126 и  $N = 184$ . С использованием предсказаний этих моделей для масс сверхтяжелых ядер и модель двойной ядерной системы для описания процесса слияния рассчитаны сечения образования испарительных остатков в столкновениях ядер  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{50}\text{Ti}$ ,  $^{54}\text{Cr}$ ,  $^{58}\text{Fe}$ ,  $^{64}\text{Ni}$  с мишенями  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Cf}$ . Полученная зависимость вероятности выживания сверхтяжелых испарительных остатков от  $Z$  указывает, что следующее после  $^{208}\text{Pb}$  дважды магическое ядро должно иметь  $Z \geq 120$  [27].

В рамках модели, объединяющей концепцию двойной ядерной системы с усовершенствованной статистической моделью, проанализировано, почему не наблюдаются события квазиделения в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{144}\text{Sm}$ , а также почему эти события перестают проявляться в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{154}\text{Sm}$  при энергиях столкновения  $E_{\text{с.м.}} \geq 154$  МэВ. Наблюдаемый выход фрагментов деления был представлен в виде суммы вкладов событий слияния-деления, квазиделения и быстрого деления. Недостаточное число событий квазиделения объяснен перекрытием по массам угловых распределений фрагментов от событий квазиделения и слияния-деления. Сравнительный анализ реакций трех пар ядер пучков (Cr, Fe и Ni) и мишеней (Sm, Pu и U), ведущих к возможному синтезу нуклида  $^A Z = ^{302}120$ , показал, что реакция  $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$  наиболее перспективна в этом отношении, так как отличается более низким внутренним барьером слияния и более высоким — квазиделения [28].

Исследована возможность существования связанных состояний у трехчастичных систем, состоящих из двух нуклонов и  $\varphi$ -мезона. Численные расчеты проводились на основании дифференциальных уравнений Фаддеева. Установлено, что при использовании уже апробированного потенциала  $\varphi N$ -взаимодействия и выборе в качестве  $NN$ -взаимодействий потенциалов Малфлье–Тьона I–III, системы  $\varphi nn$  и  $\varphi np$  оказываются связанными с энергиями  $E_{\varphi nn} = -21,8$  МэВ и  $E_{\varphi np} = -37,9$  МэВ соответственно. Полученные результаты указывают также на существование кластеров, образованных  $\varphi$ -мезоном и большим числом нуклонов [29].

Гиперсфероидальные координаты (предложенные А. В. Матвеевко в 1983 г.) использованы для того чтобы ввести три новых адиабатических базиса в гиперрадиальном адиабатическом подходе. Функции, входящие в эти базисы, обладают лучшими асимптотическими свойствами, нежели в базисах, воз-

никающих в обычном двухцентровом адиабатическом подходе. Преимущества нового подхода продемонстрированы на примере реакции  $d\mu + t \rightarrow t\mu + d$  [30].

Доказан ряд новых оценок изменения спектральных подпространств эрмитова гамильтониана под действием  $J$ -самосопряженных потенциалов. Найдены условия, гарантирующие подобие полного гамильтониана самосопряженному оператору и тем самым вещественность его спектра. Установлена точная априорная оценка на поворот спектрального подпространства, отвечающего спектральному подмножеству, выпуклая оболочка которого не пересекается с остальным спектром. Эта оценка может рассматриваться как аналог известной  $\tan 2\Theta$ -теоремы Дэвиса–Кахана для случая  $J$ -самосопряженных возмущений. Кроме того, установлены точные оценки на норму релассированных операторных уравнений Риккати [31].

Предложен новый, основанный на методах теории случайных матриц, статистический подход к анализу экспериментальных данных, полученных в ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях. Впервые с использованием статистического критерия Дайсона–Мехта для обнаружения корреляций в системе вторичных частиц в высокоэнергичных столкновениях проанализированы данные реакции  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  при энергии 4,2 А ГэВ/с. Результаты нового подхода хорошо согласуются с результатами стандартного анализа, основанного на методе спектра эффективных масс и двухпарной корреляционной функции, которые часто используются в физике высоких энергий. Новый метод свободен от нежелательных фоновых вкладов [32].

Рассчитанный микроскопически оптический потенциал (ОП) использован для анализа упругого рассеяния  $^8\text{He} + p$ . Прямая и обменная части вещественной составляющей ОП были рассчитаны процедурой свертки с зависящим от плотности МЗУ эффективным взаимодействием, основанным на парижском  $NN$ -потенциале. Мнимая составляющая ОП рассчитывалась в высокоэнергетическом приближении. Учен спин-орбитальный вклад в ОП. В расчетах использовались три модели распределения плотности нейтронов и протонов в  $^8\text{He}$ . Проведено сравнение с имеющимися экспериментальными данными при энергиях пучка 15,7, 26,25, 32, 66 и 73 МэВ/нуклон. Неоднозначность подгонок глубин разных компонент ОП устранялась введением дополнительного критерия — выбора правильного поведения объемных интегралов с ростом энергии. Обнаружено, что важную роль, особенно при самых низких энергиях пучка, играет поверхностное поглощение [33].

В рамках ковариантного и калибровочноинвариантного диаграммного подхода исследованы вклады низколежащих нуклонных резонан-

сов  $P_{33}(1232)$ ,  $P_{11}(1440)$ ,  $D_{13}(1520)$  и  $S_{11}(1535)$  в спектры инвариантной массы электрон-позитронных пар, рождающихся в эксклавивных процессах  $pp \rightarrow ppe^+e^-$  и  $pn \rightarrow pne^+e^-$ . В однобозонном приближении использовались эффективные нуклон-мезонные взаимодействия, включающие как обмен  $\pi$ -,  $\eta$ -,  $\sigma$ -,  $\omega$ - и  $\rho$ -мезонами, так и возбуждения и распады упомянутых низколежащих нуклонных резонансов. Общий вклад таких резонансов доминирует. Однако тормозное излучение все же существенно в  $pp$ - и в особенности в  $pn$ -столкновениях при энергиях пучка 1–2 ГэВ в определенных областях фазового пространства [34].

Впервые рассчитана интенсивность рождения мюонных пар  $\mu^+\mu^-$ -релятивистскими электронами

с энергиями 1–10 ГэВ от плазменного кильватерного лазерного ускорителя. Появление таких электронных пучков вполне реально в ближайшем будущем. Мюоны образуются главным образом во взаимодействиях вторичных тормозных гамма-квантов в толстой мишени из ядер с большим зарядом. Показано, что электронный импульс в 20 пКл с энергией в 1 (10) ГэВ может образовать порядка 100 (5000) мюонных пар. Мюоны, полученные на таком «настольном» ускорителе, могут быть использованы в различных задачах физики электромагнитных и слабых взаимодействий. Это исследование — важный шаг к изучению более сложных фундаментальных процессов, индуцированных электронами, управляемыми лазерными пучками [35].

## ТЕОРИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Исследования в области теории конденсированного состояния вещества проводились в рамках следующих проектов:

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

Исследования в области комплексных материалов проводились по следующим направлениям: исследование спиновой динамики новых материалов в рамках  $t$ – $J$ -модели, теоретическое описание холодных атомов в оптических решетках и исследование транспортных характеристик прямозонных полупроводников.

В рамках  $t$ – $J$ -модели была развита теория функции релаксации для динамической спиновой восприимчивости. Обобщенное приближение среднего поля, сохраняющее правило сумм, позволило считать спин-спиновую корреляционную функцию произвольного порядка, «скачущую» намагниченность, универсальную статическую восприимчивость и длину антиферромагнитных корреляций в широком интервале значений дырочного легирования и температур. Обнаружено хорошее согласие с известными данными при точной диагонализации. Корреляционная длина находится в разумном согласии с экспериментами по нейтронному рассеянию в  $\text{La}_{2-\delta}\text{Sr}_\delta\text{CuO}_4$ . За рамками среднеполевой теории рассчитана собственная энергия в приближении связанных мод. Спиновая динамика для произвольной частоты и произвольного волнового вектора была исследована при различных температурах и степенях дырочного легирования. При слабом легировании, как и в модели Гейзенберга, было обнаружено спин-волновое поведение, в то время как при высокой степени легирования происходит быстрое затухание,

обусловленное дырочными прыжками. Обнаруженная релаксационная динамика находится в согласии как с экспериментальными результатами, так и с данными при точной диагонализации [36].

В приближении среднего поля исследован полный необратимый адиабатический транспорт конденсата Бозе–Эйнштейна между двумя потенциальными ямами, разделенными барьером. Разработан эффективный и универсальный транспортный протокол, являющийся обобщением метода Ландау–Ценера. Перенос конденсата осуществляется путем временного мониторинга проницаемости барьера и энергий ям. Предложенный протокол хорошо работает в широком диапазоне как отталкивающего, так и притягивающего взаимодействия в конденсате. При этом нелинейные эффекты, возникающие из-за взаимодействия, не только не препятствуют транспорту, но даже помогают ему. Предложенный протокол приводит к новой транспортной динамике и более удобному переключению транспорта [37].

На основе модели Либа и Линигера были исследованы сверхтекучие свойства одномерного бозе-газа в кольцевой ловушке. Несмотря на то, что одномерный бозе-газ имеет неклассический вращательный момент инерции и имеет место квантование скоростей, метастабильность токов существенно зависит от силы взаимодействия в газе: с ростом взаимодействия токи разрушаются быстрее. Показано, что в термодинамическом пределе критическая скорость Ландау равна нулю, что связано с первым сверхпроводящим токовым состоянием, которое имеет нулевую энергию и конечную вероятность возбуждения. Скорость диссипации энергии тока в кольце была рассчитана в присутствии слабых дефектов. Последняя величина может быть измерена на экспериментально наблюдаемых временных масштабах [38].

Теоретически исследован эффект влияния поля деформаций дислокационной стенки краевого типа на холловскую подвижность в эпитаксиальном GaN  $n$ -типа на основе потенциала деформации в приближении времени релаксации. Обнаружено, что данный канал рассеяния может играть важную роль в низкотемпературном транспорте при определенном наборе модельных параметров. Экспериментальные данные были успешно фитированы с учетом описанного механизма рассеяния наряду с учетом ионизированных примесей и заряженных дислокаций [39].

Найден электронный спектр двустеночных зигзагоподобных и кресельных нанотрубок. Рассчитано влияние кривизны нанотрубок на электронный спектр. Обнаружена разница в концентрации носителей заряда на внутренней и внешней оболочках, которая объясняется различием в положении уровней Ферми из-за разной гибридизации  $\pi$ -орбиталей. Изучен эффект сдвига и вращения внутренней трубки относительно внешней. Обнаружено, что кресельные двустеночные нанотрубки при сдвиге и вращении внутренней трубки стабильно проявляют полуметаллические свойства. Предсказано смещение вектора Ферми по направлению к большому волновым векторам с уменьшением радиуса кресельных нанотрубок [40].

Была показана важность проведения экспериментов по измерению распределения электронов по энергиям в процессе электронной эмиссии с графеновых нанолитов. Теоретический анализ показывает, что в многослойном графене зонная структура определяющим образом влияет на указанное распределение. Обнаружены два главных пика, связанных с зоной проводимости и валентной зоной, и дополнительно к ним — несколько субпиков. Их положение зависит от числа слоев и силы взаимодействия между соседними слоями. Обнаружение субпиков в экспериментах по электронной эмиссии с углеродных нанолитов явилось бы указанием на квантово-размерный эффект в данном материале [41].

## ДУБНЕНСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (DIAS-TH)

В рамках DIAS-TH в истекшем году были проведены три школы и рабочее совещание: 7-я зимняя школа по теоретической физике (25 января – 5 февраля); 13-е рабочее совещание «Теория нуклеации и ее применения» (1–30 апреля); международная школа «Вычисления для современных и будущих коллайдеров» (10–20 июля) — с Объединением им. Г. Гельмгольца (Германия); летняя школа по современной математической физике

Решены некоторые математические проблемы систем многих частиц. Была предложена модель случайного блуждания *semi-vicious walkers model*, которая является средней между общими асимметричными простыми эксклюзивными процессами и моделью случайных блужданий *vicious walkers model*, имеющей оба процесса как предельные случаи. Для данной модели были рассчитаны асимптотики вероятности выживания  $m$  частиц. Масштабная функция, описывающая переход от одного предельного случая к другому, также была получена. Флуктуационно-диссипативная теорема позволила интерпретировать результат как производящую функцию тока частиц в полностью асимметричном простом эксклюзивном процессе. Таким образом, было получено распределение тока частиц в асимптотическом пределе больших времен при фиксированном числе частиц. Результаты применялись как для больших отклонений, так и в диффузионном масштабе. В итоге было получено новое универсальное распределение со скошенной негауссовской формой [42].

Детальный асимптотический анализ корреляционных функций для модели связанного двухкомпонентного дерева на двумерной решетке был представлен для случая, когда каждый компонент включает в себя три пути, соединяющие соседей на двух фиксированных узлах решетки на большом удалении. Известный результат для корреляций на плоскости был обобщен на случай верхней полуплоскости при использовании закрытых и открытых граничных условий. Для некоторых специальных случаев были найдены асимптотики корреляционных функций в зависимости от расстояния от границы решетки до некоторого фиксированного узла на решетке [43].

Была рассмотрена проблема нахождения интегралов движения для квантовых эллиптических систем типа Калоджеро–Мозера с произвольным числом частиц, расширенная путем введения спин-обменного взаимодействия [44].

(20–29 июля) — с Объединением им. Г. Гельмгольца (Германия).

Регулярно проводились семинары для студентов и аспирантов, прочитаны курсы лекций и обзорные лекции по актуальным проблемам современной физики (П. Фре, М. Лашкевич, Д. Воскресенский); поддерживался сайт DIAS-TH (<http://theor.jinr.ru/~diastp/diasth/>), продолжалась видеозапись лекций.

В конференц-зале ЛТФ установлен стационарный проектор. Парк персональных компьютеров лаборатории пополнился тремя новыми ПК. Для обновления ПК прошлых лет приобретено несколько десятков комплектов памяти. Введен в эксплуатацию

новый высокопроизводительный лазерный принтер и цветное лазерное МФУ. Покрытие сетью беспроводной связи увеличилось с вводом в строй двух новых точек доступа.

## КОНФЕРЕНЦИИ, СОВЕЩАНИЯ, СОТРУДНИЧЕСТВО

В 2009 г. кроме школ, проводившихся в рамках DIAS-ТН, лаборатория участвовала в организации 13 международных конференций и рабочих совещаний, проходивших в Дубне, Черногловке и Праге:

- совместного АЦТФ–ЛТФ ОИЯИ совещания «Современные проблемы физики черных дыр» (25–30 мая, Дубна);
- совместного АЦТФ–ЛТФ ОИЯИ совещания «Современные проблемы ядерной физики-2009» (25–30 мая, Дубна);
- международного совещания «Конформная теория поля, интегрируемые системы и лиувиллевская гравитация» (27 июня – 2 июля, Черногловка, Россия);
- 18-го Международного коллоквиума «Интегрируемые системы и квантовые симметрии» (18–20 июня, Прага, Чешская Республика);
- международной конференции «Структура ядра и смежные проблемы» (30 июня – 4 июля, Дубна);
- 13-й Международной конференции «Методы симметрии в физике, памяти профессора Ю. Ф. Смирнова» (6–9 июля, Дубна);
- международной конференции «Симметрии и спин» (26 июля – 2 августа, Прага, Чешская Республика);
- международного совещания «Суперсимметрии и квантовые симметрии» (29 июля – 3 августа, Дубна);
- международной Боголюбовской конференции «Проблемы теоретической и математической физики» (к 100-летию со дня рождения

Н. Н. Боголюбова (1909–1992)) (21–27 августа, Дубна);

- 13-го рабочего совещания по физике спина при высоких энергиях (1–5 сентября, Дубна);
- заседания круглого стола «Поиск смешанной фазы сильно взаимодействующей материи на ускорительном комплексе NICA: физика на NICA (“Белая книга”))» (8–13 сентября, Дубна);
- Всероссийского совещания по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам (1–4 декабря, Дубна);
- круглого стола Италия–Россия «Усилия в фундаментальных исследованиях и перспективы научно-технологических приложений и развития бизнеса» (18–19 декабря, Дубна).

Международное сотрудничество ЛТФ в 2009 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, поддержанными грантами INTAS, РФФИ–DFG, РФФИ–CNRS. Продолжает действовать соглашение о сотрудничестве с теоретическим отделом ЦЕРН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bednyakov V. A. et al.* // Phys. At. Nucl. 2009. V. 72. P. 1.
2. *Gasser J. et al.* // Phys. Lett. B. 2009. V. 675. P. 49–53.
3. *Faessler A. et al.* // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. P. 034025.
4. *Cvetic G. et al.* // Phys. Lett. B. 2009. V. 679. P. 350–354.
5. *Anikin I. V. et al.* // Nucl. Phys. B. 2010. V. 828. P. 1; Phys. Lett. B. 2010. V. 682. P. 413; Acta Phys. Polon. B. 2009. V. 40. P. 2131.
6. *Cherednikov O., Stefanis N. G.* // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. P. 054008.

7. *Kochelev N. I., Vento V.* hep-ph/0912.2172; Phys. Rev. D (to be published).
8. *Dorokhov A. E., Ivanov M. A., Kovalenko S. G.* // Phys. Lett. B. 2009. V. 677. P. 145.
9. *Molodtsov S. V., Sissakian A. N., Zinovjev G. M.* // Europhys. Lett. 2009. V. 87. P. 61001.
10. *Buchbinder I. L. et al.* // JHEP. 2009. V. 0910. P. 075.
11. *Fedoruk S., Ivanov E., Lechtenfeld O.* // JHEP. 2009. V. 0908. P. 081.
12. *Krivosos S., Lechtenfeld O.* // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. P. 045019.



13. *Ivanov E., Niederle J.* // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. P. 065027.
14. *de Alfaro V., Filippov A. T.* hep-th/0902.4445.
15. *Fre P., Sorin A. S.* hep-th/0903.3771.
16. *Ivanova T.A. et al.* // Lett. Math. Phys. 2009. V. 89. P. 231.
17. *Cognola G. et al.* // Phys. Rev. 2009. V. 79. P. 044001.
18. *Pirozhenko I., Lambrecht A.* // Phys. Rev. A. 2009. V. 80. P. 042510.
19. *Isaev A. P., Ogievetsky O. V.* hep-th/0912.4010.
20. *Тюрин Н.А.* // Тр. МИ РАН им. В. А. Стеклова. М., 2009. С. 264; ТМФ. 2009. Т. 158, № 1. С. 3–22.
21. *Isaev A., Pyatov P.* // Commun. Math. Phys. 2009. V. 288. P. 1137–1179.
22. *Shirikova N. Yu. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2009. V. 41. P. 393.
23. *Бальбуцев Е. Б.* // ЯФ. 2009. Т. 72. С. 1.
24. *Джиоев А. А. и др.* // ЯФ. 2009. Т. 72. С. 1373.
25. *Simkovic F. et al.* // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. P. 055501.
26. *Ershov S. N., Danilin B. V.* // Phys. At. Nucl. 2009. V. 72. P. 1704.
27. *Adamian G. G., Antonenko N. V., Sargsyan V. V.* // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. P. 054608;  
*Adamian G. G., Antonenko N. V., Scheid W.* // Eur. J. Phys. A. 2009. V. 41. P. 235; Acta Phys. Pol. B. 2009. V. 40. P. 737.
28. *Nasirov A. K.* // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. P. 024606.
29. *Belyaev V. B., Sandhas W., Shlyk I. I.* // Few-Body Syst. 2009. V. 45. P. 91.
30. *Matveenko A. V., Alt E. O., Fukuda H.* // J. Phys. B. 2009. V. 42. P. 165003.
31. *Albeverio S., Motovilov A. K., Shkalikov A. A.* // Int. Eq. Operator Th. 2009. V. 64. P. 455.
32. *Nazmitdinov R. G. et al.* // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. P. 054905.
33. *Lukyanov V. K. et al.* // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. P. 024609.
34. *Kaptari L. P., Kämpfer B.* // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. P. 064003.
35. *Titov A. I., Kämpfer B., Takabe H.* // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2009. V. 12. P. 111301.
36. *Vladimirov A. A., Ihle D., Plakida N. M.* // Phys. Rev. B. 2009. V. 80. P. 104425.
37. *Nesterenko V. O. et al.* // J. Phys. B. 2009. V. 42. P. 235303.
38. *Cherny A. Yu., Caux J.-S., Brand J.* // Phys. Rev. A. 2009. V. 80. P. 043604.
39. *Krasavin S. E.* // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 126104.
40. *Pudlak M., Pincak R.* // Eur. Phys. J. B. 2009. V. 67. P. 565.
41. *Katkov V. L., Osipov V. A.* // JETP Lett. 2009. V. 90. P. 304.
42. *Dorlas T. C., Povolotsky A. M., Priezzhev V. B.* // J. Stat. Phys. 2009. V. 135. P. 483.
43. *Grigorev S. Y., Poghosyan V. S., Priezzhev V. B.* // J. Stat. Mech. 2009. V. 2009. P. 09008.
44. *Dittrich J., Inozemtsev V. I.* // Regular and Chaotic Dynamics. 2009. V. 14. P. 218.