

ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. Н. Н. БОГОЛЮБОВА

В 2004 г. в лаборатории проводились исследования по четырем темам первого приоритета: «Поля и частицы», «Современная математическая физика», «Теория ядра», «Теория конденсированных сред». Важной составляющей в деятельности лаборатории является теоретическая поддержка эксперименталь-

ных исследований с участием ОИЯИ. Особое внимание уделялось привлечению к работе молодых исследователей, студентов и аспирантов. Для этой цели в 2004 г. была открыта новая научно-образовательная тема «Дубненская международная школа современной теоретической физики» (DIAS-TH).

ПОЛЯ И ЧАСТИЦЫ

Исследования по теме «Поля и частицы» охватывали широкий круг проблем *квантовой теории поля* (КТП) и *феноменологии физики частиц*.

Феноменологические исследования включали стандартную модель фундаментальных взаимодействий и ее расширения, а также физику адронов при низких и высоких энергиях и были сконцентрированы на следующих направлениях:

- непертурбативные методы и КХД-феноменология;
- исследования стандартной модели и ее расширений.

В 2004 г. был достигнут значительный прогресс в нескольких направлениях. Ниже представлены некоторые результаты, полученные в ЛТФ по этой теме.

Вычислены трехпетлевые поправки к универсальной аномальной размерности для операторов Вильсона твиста-2 в $N = 4$ суперсимметричной модели Янга–Миллса. В первых трех порядках теории возмущений собственные значения матрицы аномальной размерности выражаются через универсальную функцию, аргумент которой сдвинут на целое число. Сингулярности при $j \rightarrow 1$ трехпетлевых поправок к универсальной аномальной размерности совпадают с величинами, полученными ранее из анализа БФКЛ-уравнения в следующем за ведущим порядке. Асим-

птотика при больших значениях спина j находится в согласии с оценками, основанными на интерполяции между режимами слабой и сильной связи в рамках соответствия *AdS/CFT* [1].

Развитие теоретико-полевых аналитических методов, пригодных для изучения инфракрасного поведения функций Грина в КХД, имеет большое значение для понимания проблемы конфайнмента кварков. Инфракрасное поведение глюонного и духового пропагаторов исследовано в рамках уравнений так называемой точной ренормгруппы, которая открывает новые возможности исследования КХД вне рамок теории возмущений. Поведение глюонного и духового пропагаторов в инфракрасной области, чувствительное к физике конфайнмента функций Грина, исследовано в этом подходе. Показано, что глюонный пропагатор подавлен в инфракрасном пределе, тогда как сингулярность духового пропагатора усилена. Полученные в работе асимптотики поддерживают сценарий конфайнмента Куго–Ожимы и согласуются с результатами уравнений Дайсона–Швингера и недавними расчетами в КХД на решетке [2].

Предложен критерий существования тяжелого кваркония, обусловленный обменом хиггсовским бозоном, с учетом кварков четвертого поколения. Проведены вычисления переходов между тяжелыми квар-

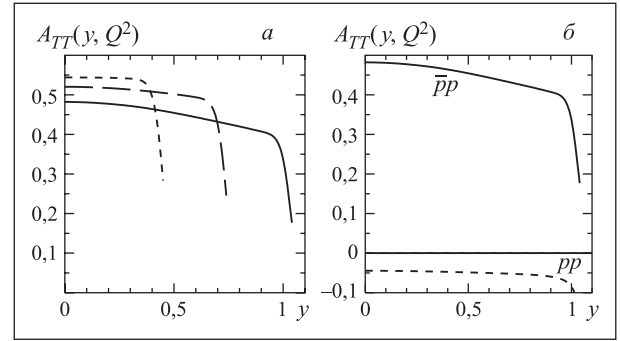
кониями и бозонами Хиггса с эмиссией калибровочных бозонов, важные для будущих экспериментов на LHC [3].

Величина сечений образования чармония на легких адронах имеет большое значение для интерпретации столкновений тяжелых ионов, интенсивно изучаемых в экспериментах на RHIC. Много внимания уделяется исследованию этих сечений и потому, что подавление образования чармония может служить сигнатурой кварк-глюонной плазмы. Вычислены амплитуды и сечения процессов диссоциации чарма $J/\psi + \pi \rightarrow D\bar{D}, D^*\bar{D}, D\bar{D}^*, D^*\bar{D}^*$ в рамках релятивистской кварковой модели. Учтены вклады как обменной кварковой диаграммы, так и резонансной диаграммы. Показано, что доминирующими являются $D^*\bar{D}$ - и $D^a st\bar{D}^*$ -каналы. Сумма всех четырех каналов приводит к максимальному значению сечения 2,3 мб, которое достигается при $\sqrt{s} \approx 4,1$ ГэВ [4].

Показано, что проблема распределения темной материи в нашей Галактике может быть решена в рамках минимальной суперсимметричной стандартной модели. Суперсимметрия предлагает замечательного кандидата на роль темной материи, и, предполагая, что темная материя состоит из суперсимметричных слабо взаимодействующих массивных частиц (WIMP — weakly interactive massive particles), можно воспроизвести профиль распределения плотности темной материи и одновременно описать кривую вращения Галактики. Учет последних астрофизических данных коллаборации EGRET (Energetic Gamma Rays Telescope) по потоку рассеянных галактических гамма-лучей ограничивает массу WIMP в области 50–100 ГэВ, в то время как их угловое распределение используется для описания структуры гало. Полная масса гало оценивается $3 \cdot 10^{12} M_\odot$. Сигнал от аннигиляции частиц темной материи оказывается совместным с суперсимметрией и, учитывая вышесказанное, позволяет предположить, что данные EGRET, в которых наблюдается превышение сигнала над теоретическими предсказаниями, действительно есть сигнал от аннигиляции частиц темной материи [5].

Процесс Дрелла–Яна до сих пор является наиболее чистым и надежным способом доступа к распределению поперечного спина кварков (transversity) нуклона $h_1^q(x)$. Попытки изучения $h_1^q(x)$ посредством этого процесса предпринимаются на RHIC. Предварительные расчеты указывают, однако, что на RHIC доступ к $h_1^q(x)$ очень затруднен, так как двойная спиновая асимметрия A_{TT} пропорциональна произведению распределений поперечных спинов кварка и антикварка. Последние, однако, весьма малы, даже если они равны верхнему пределу Соффера. Эта проблема может быть преодолена путем использования антипротонного пучка. Амбициозная программа поляризации антипротонного пучка предложена недавно в эксперименте PAX в GSI. Группой Бохум–

Дубна выполнены количественные расчеты A_{TT} для кинематики эксперимента PAX на основе предсказаний для распределений поперечных спинов в киральной кварк-солитонной модели (рисунок, а).



а) Асимметрия $A_{TT}(y, M^2)$ в эксперименте PAX как функция быстроты y для $Q^2 = 5$ ГэВ² (сплошная линия), 9 ГэВ² (штриховая линия) и 16 ГэВ² (пунктирная линия) для $s = 45$ ГэВ². б) Сравнение асимметрии $A_{TT}(y, M^2)$ из протон-антипротонного (сплошная линия) и протон-протонного (пунктирная линия) столкновений для $Q^2 = 5$ ГэВ²

Преимущество использования антипротонов очевидно из рисунка, б. Соответствующая асимметрия в протон-протонных столкновениях оказывается на порядок меньшей. Даже если это преимущество сдвигается малой величиной антипротонной поляризации 5–10 %, число событий, а следовательно, и точность измерения оказывается гораздо выше [6].

В связи с возросшим вниманием к адронной спектроскопии представляет интерес наблюдение экзотических состояний в жестких реакциях, где применение КХД наиболее надежно. Исследовалось жесткое электророждение экзотических гибридных кварк-глюонных мезонов. Показано, что в случае их продольной поляризации этот процесс имеет вклад от амплитуды ведущего твиста, что связано с глюонами из струны, порождаемой нелокальным кварк-антикварковым источником. Соответствующее сечение всего на порядок меньше, чем доминирующее сечение образования ρ -мезона, что открывает возможность изучения гибридных мезонов в экспериментах COMPASS, HERMES и CLAS [7].

Предложена новая модель экзотического пятикваркового состояния Θ^+ . Эта модель основана на корреляциях трикварка и дикварка в адроне за счет сильных флуктуаций глюонного поля — инстантонов. Показано, что в модели Θ^+ -пентакварка, как связанного состояния трикварка и дикварка с относительным орбитальным моментом $L = 1$, его малая масса и ширина имеют естественное объяснение [8].

Получены общие формулы для поляризационной матрицы плотности лептонов, рождающихся в νN - и $\bar{\nu} N$ -столкновениях. Формализм применяется для наиболее важных частных случаев: квазиупругого, глубоконеупругого и резонансного рас-

сеяния [9]. Развито обобщение популярной модели Рейна–Сегала, описывающей резонансное нейтринорождение одиночных пионов, которое учитывает массу и спин лептона в конечном состоянии. С применением двух моделей векторных электромагнитных формфакторов протона и нейтрона проведен численный анализ сечения рождения и вектора поляризации τ -лептонов, генерируемых в квазиупругих взаимодействиях ν_τ и $\bar{\nu}_\tau$ с нуклонами. В рамках простой эвристической модели индуцированных скалярного и тензорного формфакторов исследованы эффекты аксиального и векторного токов второго рода, нарушающих G -четность [10].

Исследовано также влияние условий положительной определенности матрицы плотности на поляризацию τ -лептонов, что важно в связи с довольно бедными данными по нарушающим четность структурным функциям глубоконеупругого рассеяния при малых Q^2 [11].

Рассмотрены различные методы извлечения поляризованных партонных плотностей из мировых данных по поляризованному глубоконеупругому рассеянию. Учет вклада высших твистов $h^N(x)/Q^2$ в спиновые структурные функции протона и нейтрона g_1 показал, что этот вклад существен при КХД-анализе имеющихся экспериментальных данных. В рамках различных подходов исследована роль высших твистов при определении поляризованных партонных плотностей [12].

Рассмотрен процесс поляризованного полуинклюзивного глубоконеупругого рассеяния (ГНР). Предложен новый теоретический метод обработки экспериментальных данных по полуинклюзивному ГНР, позволяющий напрямую извлекать моменты от поляризованных валентных кварковых распределений и моменты от разности поляризованных распределений легких морских кварков в следующем за лидирующим порядке КХД. Метод был протестирован на симуляциях Монте-Карло [13].

Дана оценка лидирующего вклада адронной части вакуумной поляризации фотона в аномальный магнитный момент мюона: $a_\mu^{hvp,1} = 623(40) \cdot 10^{-10}$ и τ -лептона: $a_\tau^{hvp,1} = 3,1(0,2) \cdot 10^{-6}$. Расчеты основаны на использовании векторной функции Адлера, найденной в ковариантной киральной кварковой модели с инстантонным взаимодействием между кварками. Эта функция описывает переход от асимптотически свободной области высоких энергий к адронизованному режиму конститuentных кварков. Расчеты функции Адлера и корреляторов векторного и аксиально-векторного токов, выполненные в инстантонной модели, хорошо согласуются с данными по адронным распадам τ -лептона, полученными в ЦЕРН коллаборациями ALEPH и OPAL [14].

Обработка данных группы CLEO по формфактору $\gamma^* \gamma \rightarrow \pi^0$ -перехода в подходе правил сумм КХД на световом конусе в $O(\alpha_s)$ -приближении показала,

что только пионные амплитуды распределения БМС, полученные ранее из правил сумм КХД с нелокальными конденсатами, лежат внутри 1σ -области, в то время как все остальные известные модели исключены по крайней мере на уровне 2σ или более. Эти выводы подкрепляются также данными группы E791 по дифракционному образованию двух струй в $\pi + A$ -взаимодействии [15].

Анализ электромагнитного формфактора пиона с учетом $O(\alpha_s^2)$ -вкладов в аналитической теории возмущений КХД показал, что тот же БМС-«пучок» пионных амплитуд распределений приводит к результатам, очень близким к полученным на основе асимптотической амплитуды распределения и к данным группы JLab F(pi) [16]. Эта близость показывает, что двугорбая структура амплитуды распределения гораздо менее существенна по сравнению с ее поведением в концевых точках: сильное подавление БМС-амплитуды в концевых точках как раз и приводит к согласию с данными группы CLEO.

Для квазипериферической кинематики были вычислены спиральные амплитуды калибровочных процессов для $\gamma\gamma$ -, γe - и $e^\pm e^-$ -коллайдеров. В такой постановке эксперимента КЭД-процессы имеют большие сечения и обеспечивают хорошие условия для изучения предсказаний стандартной модели, а также проявлений новой физики. Упомянутые выше процессы были использованы в качестве калибровки светимости коллайдеров. Точность полученных результатов с учетом радиационных поправок $\sim 0,1\%$ [17].

С помощью суммирования вкладов фейнмановских амплитуд во всех порядках теории возмущений проанализировано множественное рождение лептонных пар в столкновениях тяжелых ионов. Подтверждено распределение Пуассона в пространстве прицельного параметра [18].

Исследован многолептонный обмен между ионами и компонентами рожденных пар, а именно проведены вычисления для случая, когда каждым ионом испускаются два фотона. Обнаружены некоторые неожиданные явления и прежде всего ненулевая мнимая часть амплитуды и усиление дважды логарифмических вкладов для случая образования пар на большие углы. Исследованы также дважды логарифмические асимптотики упругих и неупругих формфакторов кварков в КЭД и КХД [19].

В рамках эффективной киральной кварковой модели исследован спектр дикварков в условиях холодной и сверхплотной кварковой материи, находящейся в состоянии цветной сверхпроводимости 2SC-типа, т. е. когда кварки только двух ароматов образуют дикварковый конденсат. Обнаружено, что число безмассовых бозонов, возникающих в результате динамического нарушения цветной симметрии сильного взаимодействия, меньше предсказываемого теоремой Голдстоуна, но согласуется с теоремой Нильсена–Чадха. Причина данного, не исследован-

ного ранее феномена заключается в том, что равновесная кварковая среда, для которой только барионный химпотенциал отличен от нуля, не является автоматически нейтральной по цвету и электрическому заряду [20].

Развитый ранее ренормгрупповой алгоритм в математической физике обобщен для краевых задач с нелокальными (интегральными) уравнениями, а также для моделей с нелокальными вкладами, имею-

щими вид линейных функционалов от решения, что проиллюстрировано примерами [21].

Квазипотенциальный подход в квантовой теории поля применен для определения релятивистских факторов, суммирующих пороговые сингулярности в квантовой хромодинамике. Предложено новое модельное выражение для $R(s)$, в котором пороговые сингулярности суммируются в основной потенциальный вклад [22].

СОВРЕМЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Исследования по теме были сосредоточены на следующих направлениях:

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

Ниже приведены некоторые из полученных в 2004 г. результатов по теме.

Впервые построена $SO(4) \times SU(2)$ -инвариантная Q -деформация евклидовых $N=(1, 1)$ калибровочных теорий в рамках формулировки в гармоническом суперпространстве. Эта деформация сохраняет киральность и грасманову гармоническую аналитичность, но нарушает $N=(1, 1)$ суперсимметрию до $N=(1, 0)$. Найден явный вид $N=(1, 0)$ суперсимметричного действия для калибровочных групп $U(1)$ и $U(n > 1)$, как в суперполево, так и в компонентной формах, и выведено соответствующее преобразование Сайберга–Уиттена к недеформированному $N=(1, 1)$ калибровочному мультиплету [23].

Построено множество $N = 8, d = 1$ супермультиплетов с конечными наборами компонентных полей как прямых сумм $N = 4, d = 1$ суперполей, подчиненных соответствующим связям. Показано, как эти мультиплеты описываются в $N = 8, d = 1$ суперпространстве, в котором вся суперсимметрия допускает явную реализацию. Представлены примеры инвариантных суперполевых действий для рассматриваемых мультиплетов, в том числе несколько $N = 8$ суперконформно-инвариантных действий. Полученные результаты составляют основу для построения новых моделей $N = 8$ суперсимметричной квантовой механики [24].

Структуры, связанные с решеточной интегрируемой иерархией Тоды, возникают во многих областях теоретической физики, а ее различные возможные суперсимметризации могут быть важны для современных суперсимметричных теорий. В этой связи в последние годы были построены интегрируемые суперсимметричные обобщения с различным числом суперсимметрий открытой и периодической реше-

точной иерархии Тоды, а также изучены их бездисперсионные (квазиклассические) пределы. В работах [25] предложена новая скобочная операция на пространстве градуированных операторов с инволюцией, использованная для построения соответствующих представлений Лакса (в том числе со спектральным параметром).

В силу исключительной сложности теории струн и отсутствия достаточных математических средств для явных вычислений на струнном уровне важной задачей представляется выявление связей между теорией струн и обычными локальными теориями поля. С помощью твисторного подхода было показано, что топологические струны типа В во взвешенных проективных пространствах эквивалентны голоморфной теории Черна–Саймонса на тех же пространствах и в конечном счете эквивалентны полевым моделям в четырех измерениях, являющимся автодуальными редукциями $N = 4$ суперсимметричной теории Янга–Миллса [26].

С использованием подходящего расширения алгебр Темперли–Либа разработана единая формулировка для семейства моделей одномерных флуктуирующих поверхностей и для семейства открытых $X X Z$ -цепочек спина $1/2$. Проведен детальный сравнительный анализ комбинаторных свойств стационарных распределений для этих моделей при трех типах граничных условий, и на этой основе построены явные выражения для различных стационарных весов. Показано, что построенные веса являются решениями билинейных рекуррентных соотношений (так называемых соотношений шестиугольника Паскаля), которые также дают решения для дискретного уравнения Хироты [27].

Предложены новые типы интегральных преобразований для функций многих комплексных переменных. Они естественным образом связаны с парой корневых систем и соответствующими эллиптическими бета-интегралами. Как следствие, выведен совершенно новый многократный интеграл бета-типа

для корневой системы A_n . Найден простой способ доказательства всех известных эллиптических бета-интегралов типа I. Эллиптический аналог многопараметрической формулы суммирования Макдональда, построенный Варнааром, обобщен на римановские поверхности произвольного рода. Описаны пуассоновские алгебры для самодуальных обобщенных задач на собственные значения для двух трехдиагональных матриц. Эти результаты должны иметь важные приложения в классических и квантовых интегрируемых многочастичных системах [28].

В рамках теории поля с некоммутативными координатами были рассмотрены мультиинстантонные решения. Было предложено рассматривать трансляционные модули инстантонов также некоммутативными. Это позволило обойти трудности построения явных несингулярных инстантонных конфигураций с топологическим зарядом больше единицы [29].

Исследовано взаимодействие многомерных вращающихся черных дыр и бран в пространстве-времени с большими внешними измерениями. Показано, что за счет такого взаимодействия черная дыра теряет часть своего углового момента до тех пор, пока не достигнет некоторого конечного стационарного состояния. В этом состоянии остаются

лишь те компоненты углового момента, которые связаны с векторами Киллинга, соответствующими вращениям, сохраняющим положение браны. Характерное время, за которое черная дыра с гравитационным радиусом r_0 достигает этого конечного состояния, есть $N \sim r_0^{p-1}/G\sigma$, где G — многомерная гравитационная постоянная, σ — натяжение браны, а p — число внешних измерений [30].

Существуют два альтернативных подхода к построению квантовой механики частицы, совместимой с общей теорией относительности. В первом подходе в рамках квантовой теории скалярного поля строится одночастичное подпространство в пространстве Фока. Во втором подходе проводится квантование геодезической динамики в римановском пространстве-времени. Здесь был получен неожиданный результат: в случае произвольной размерности n пространства-времени эти два подхода приводят к различным константам минимального взаимодействия скалярного поля с внешним гравитационным полем, и только для $n = 4$ (размерность нашей Вселенной) такого различия нет. Этот результат, несомненно, представляет интерес для исследований, направленных на построение и изучение многомерных космологических моделей с использованием d -бран [31].

ТЕОРИЯ ЯДРА

Исследования по теме «Теория ядра» в 2004 г. велись в рамках четырех проектов:

- теория ядерных возбуждений;
- динамика и структурные эффекты в ядерных и мезоскопических системах;
- физика малочастичных систем;
- релятивистская ядерная динамика.

В исследованиях по *теории структуры ядра* получены следующие основные результаты.

На основе Q -фононного представления волновых функций низколежащих коллективных состояний проанализированы свойства нижайших двухфононных дипольных состояний и вероятностей $E1$ -переходов между слабовозбужденными уровнями в сферических ядрах. Получены несколько интересных соотношений между различными приведенными матричными элементами $E1$ -оператора. Эти соотношения на качественном уровне объясняют корреляции, обнаруженные в экспериментальных вероятностях $E1$ -переходов [32].

Кластерная модель использована для описания внезапного обрыва полос супердеформированных ираст-состояний в ядрах $^{190,192,194}\text{Hg}$ и $^{192,194,196}\text{Pb}$.

Предполагалось, что сильнодеформированное состояние имеет кластерную природу и образуется за счет коллективного движения по координате зарядовой асимметрии. Как следует из нашего анализа, обрыв супердеформированной полосы происходит из-за пересечения с ближайшей нормально деформированной полосой, состояния которой имеют большую ширину [33].

В подходе, объединяющем квазичастично-фононную модель ядра и формализм термополевой динамики, исследована температурная зависимость средней ширины гигантского дипольного резонанса. Численные расчеты выполнены для компаунд-ядер ^{120}Sn и ^{208}Pb до температур ~ 3 МэВ. Обнаружено, что ширина растет с ростом температуры, следуя экспериментально наблюдаемой тенденции. Причина этого роста — в сильной связи коллективных дипольных вибраций с состояниями типа частица-дырка-дырка очень низких энергий, которые возникают в спектрах ядер только при ненулевой температуре [34].

Обнаружено, что средние значения моментов инерции ираст-состояний с большими спинами, для

которых влияние парных корреляций предполагается незначительным, заметно отклоняются от твердотельных значений. Удалось объяснить главные черты поведения моментов инерции и оболочечных поправок к энергии связи в зависимости от числа нейтронов в ядре на языке полуклассической теории периодических орбит и сгущений уровней в одночастичных спектрах во вращающемся потенциале Вудса–Саксона. Показано, что оболочечные энергии основных состояний ядер, ядерные деформации и отклонения моментов инерции от твердотельных значений обязаны своим возникновением одним и тем же периодическим орбитам [35].

Кроме того, новые результаты были получены в теоретических исследованиях *ядерных реакций*.

Для реакций горячего слияния ядер пучка ^{48}Ca с активидной мишенью исследована зависимость сечений образования сверхтяжелых ядер $Z = 108\text{--}118$ от соотношения чисел протонов и нейтронов в ядре-мишени. Показано, что использование самых тяжелых из доступных изотопов актинидов может привести к уменьшению сечений. Предложены наиболее оптимальные реакции для синтеза сверхтяжелых. Получение сверхтяжелых элементов с меньшим числом нейтронов позволило бы провести дополнительную идентификацию этих ядер, так как их альфа-распадные цепочки кончаются в области известных ядер [36].

Исследована общая структура произвольного двухчастичного оператора для частиц со спином $1/2$ в нерелятивистской динамике. Двухчастичный оператор, удовлетворяющий требованиям основных симметрий и инвариантный относительно галилеевского преобразования системы координат, распадается на две части — четную и нечетную относительно операции отражения пространства. Проведено разложение коэффициентных функций, которые могут быть использованы как на, так и вне массовой поверхности, по парциальным волнам. Для зависящих от спина потенциалов общего вида построено представление в терминах переданного импульса и разложение по угловому моменту [37].

Получено выражение для комплексного потенциала рассеяния ядра на ядре, которое воспроизводит амплитуду высокоэнергетического рассеяния теории Глаубера–Ситенко. Кроме того, потенциал двойной свертки для реальной части рассчитан с учетом обменного слагаемого. Эти потенциалы использованы для построения микроскопических оптических потенциалов ядро–ядро. Метод успешно применен для расчета полного сечения реакции, в которой сталкиваются легкие экзотические ядра $^{6,8}\text{He} + ^{28}\text{Si}$. Результаты сравниваются с данными, недавно полученными в ЛЯР им. Г. Н. Флерова [38].

Разнообразные задачи были рассмотрены в рамках проекта «Физика малочастичных систем». Получены следующие результаты.

Свойства небольших слабосвязанных кластеров атомов гелия вызывают большой интерес, в частности, в связи с неослабевающим вниманием к бозеконденсации ультрахолодных газов. Проведены усовершенствованные расчеты длины рассеяния в столкновениях атомов ^4He и ^3He с двухатомными молекулами $^4\text{He}_2$. Использовались сетки существенно более плотные, нежели в предыдущих расчетах этой величины, что позволило улучшить точность примерно на 10%. Проведенное исследование основано на использовании версии дифференциальных уравнений Фаддеева для потенциалов с твердой сердцевиной [39].

Предложен новый адиабатический метод описания системы трех заряженных частиц в континууме. Подход основан на кулоновском преобразовании Фурье исходного трехчастичного гамильтониана, позволяющем развить схему, альтернативную методу Борна–Оппенгеймера. Преобразованный гамильтониан и волновые функции разлагаются по малому параметру, равному отношению масс легкой и тяжелой частиц. В качестве примера рассмотрена система *ppe* в непрерывном спектре. Волновая функция этой системы сравнивалась с феноменологической волновой функцией, используемой для описания одной из реакций идущего в центре Солнца *pp*-цикла, а именно реакции $p + p + e \rightarrow d + \nu$ [40].

На основании динамической модели DMT и унитарной изобарной модели MAID проведен новый анализ парциальных волн в реакциях фото- и электророжения пионов на нуклонах, когда полная энергия изменяется от порога до 2 ГэВ. Кроме того, совместно с данными, полученными недавно в JLab при $Q^2 = 1$ (ГэВ/с) 2 , проведен анализ прежних экспериментальных результатов по реакциям фото- и электророжения пионов из глобальной базы данных. Для наиболее важных нуклонных резонансов извлечена новая Q^2 -зависимость для электромагнитных спиральных амплитуд. Показано, что при сравнении новых амплитуд с результатами кварковых моделей вклады пионных степеней свободы должны быть вычтены из резонансных электромагнитных амплитуд [41].

Разработан метод решения нестационарной задачи о кулоновском развале на две квантовые частицы при рассеянии на заряженной мишени. Впервые выполнен «прямой» расчет сечений стряхивания мюонов при замедлении мезоатомов гелия в дейтерии. В этом подходе рассчитаны также сечения стряхивания и возбуждения при столкновениях атомного иона гелия ($n < 4$) с протоном [42].

Перечислим основные результаты проекта «Релятивистская ядерная динамика».

Развита трехжидкостная гидродинамическая модель, имитирующая ядро-ядерные столкновения в области энергий от нескольких ГэВ до 200 А·ГэВ. В дополнение к двум барионным жидкостям модель рассматривает эволюцию третьей, запаздываю-

шей безбарионной жидкости, созданной замедляющейся барионной материей. Рассмотрены различные уравнения состояния, включая уравнения с фазовым переходом деконфайнмента. Получено разумное описание экспериментальных спектров протонных бистротов, их зависимости от центральности столкновений и энергии пучка [43].

Показано, что сечения рождения Θ^+ -пентакварка в различных процессах уменьшаются с энергией быстрее сечения рождения обычных трехкварковых гиперонов. Поэтому для рождения и экспериментального исследования Θ^+ -пентакварка более предпочтительна пороговая область начальных энергий в несколько ГэВ или меньше [44].

В рамках эффективной мезон-нуклонной теории правило Окубо–Цвейга–Иизуки было проанализировано для процессов рождения векторных мезонов в околороговых нуклон-нуклонных столкновениях $pp \rightarrow ppV$, $pn \rightarrow pnV$ и $pn \rightarrow dV$ (где $V = \omega, \phi$). Показано, что можно определить набор эффективных параметров так, чтобы наилучшим образом объяснить имеющиеся экспериментальные данные об угловых распределениях и энергетической зависимо-

сти полных сечений без непосредственного нарушения правила ОЦИ. Детально исследована и сопоставлена с экспериментом роль изоспиновых эффектов [45].

В области теории металлических кластеров получен следующий результат.

Инфракрасные квадрупольные возбуждения валентных электронов в легких деформированных натриевых кластерах исследованы в приближении локальной плотности с зависимостью от времени. Эти возбуждения однозначно соотносятся с определенными электрон-дырочными возбуждениями и тем самым обеспечивают возможность прямого анализа одноэлектронных спектров вблизи поверхности Ферми. Большинство возбуждений определяются деформацией кластера и могут служить чувствительным инструментом изучения деформации среднего поля. Показано, что некоторые двухфотонные процессы, например рамановское рассеяние, стимулированная накачка эмиссии и некоторые другие, могут быть использованы для возбуждения инфракрасных электронных мод в металлических кластерах [46].

ТЕОРИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Исследования по теме «Теория конденсированных сред» были продолжены в рамках следующих проектов:

- сильно коррелированные системы;
- динамические системы: хаос, интегрируемость и самоорганизация;
- неупорядоченные структуры: стекла, топологические дефекты, наноструктуры и джозефсоновские переходы;
- мезоскопические и когерентные явления в квантовых системах.

Основные результаты в области *теории сильно-коррелированных систем* были получены при исследовании электронного спектра и магнитных свойств материалов с сильными электронными корреляциями, таких как оксиды переходных металлов. Был получен ряд новых важных результатов, среди которых отметим следующие.

Рассмотрена модель кристалла с валентными связями в рамках эффективного спин-орбитального гамильтониана для трехкратно орбитально-вырожденной системы со спинами 1/2 на решетке пироклора. Показано, что орбитальные степени свободы могут модулировать спиновый обмен, снимая таким образом вырождение бесконечного порядка для основного состояния системы спинов в решетке пироклора. Теория объясняет геликоидальную

спин-синглетную структуру, которая наблюдается в В-шпинели $MgTi_2O_4$. Для экспериментального наблюдения орбитального упорядочения в таких фазах предлагается использовать резонансную рентгеновскую спектроскопию [47].

Предложен новый метод, основанный на динамической теории среднего поля, для расчета оптических и транспортных свойств материалов с сильной электронной корреляцией. Метод использован для расчета оптических свойств в соединениях Se , CrO_2 , $LaTiO_3$. При этом была решена старая проблема о физической природе перехода $\alpha \rightarrow \gamma$ в церии. Обнаружено, что оптические свойства церия при фазовом переходе лучше описываются моделью Кондо, чем моделью перехода Мотта. Была рассчитана полная температурная зависимость оптического спектра [48].

Разработана теория антиферромагнитного сверхобмена для трехмерной системы спинов 1/2 для объяснения конкуренции «вертикальных» и «горизонтальных» магнитных связей в оксиде марганца Sr_2GaMn_{5+x} . В рамках этой теории было дано простое объяснение перехода между двумя магнитными структурами, наблюдаемыми в экспериментах по рассеянию нейтронов, при химическом замещении атомов в соединении $Sr_2GaMn(O,F)_6$ [49].

В исследованиях по проекту «Динамические системы: хаос, интегрируемость и самоорганизация» методом анзаца Бете получено решение общего стохастического процесса нулевого ранга в дискретном времени с параллельной динамикой. Модель зависит от двух параметров: p — вероятности одночастичного скачка и q — параметра деформации, ответственного за дальнедействующее взаимодействие между частицами. В частном случае $q = 0$ получается известная модель траффика Нейгла–Шрекенберга. Вычислено наибольшее собственное значение уравнения для производящей функции расстояния, пройденного всеми частицами. Для $q = 0$ точный результат получен для произвольного размера решетки и числа частиц в системе. В общем случае $|q| < 1$ модель рассмотрена в скейлинговом пределе и ответ получен в универсальной форме Кардара–Паризи–Жанга. Решение описывает фазовый переход в пределе $p \rightarrow 1$ при $q < 0$ [50].

Получено нормализационное равенство для полностью асимметричного случайного марковского процесса с условием исключения на бесконечной прямой и на кольце. Вычислена сумма условных вероятностей по всем начальным и конечным конфигурациям частиц. Метод вывода нормализационного равенства применим для вычисления корреляционных функций асимметричного случайного процесса [51].

При исследовании *неупорядоченных структур* получены следующие результаты.

В рамках калибровочной теории исследовано влияние пентагональных дефектов на электронную структуру наконечников углеродных нанохорнов. Обнаружено, что увеличение плотности электронных состояний вблизи наконечника прямо связано с существованием локализованного электронного состояния на уровне Ферми (нулевая мода) [52].

ДУБНЕНСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (DIAS-TN)

В 2004 г. успешно стартовал новый научно-образовательный проект DIAS-TN. Основная цель проекта — создание и реализация всех образовательных программ ЛТФ для студентов, аспирантов и молодых исследователей; курсы лекций и обзорные доклады по новым направлениям современной физики, ориентированные на поддержку и формирование экспериментальных программ ОИЯИ.

В рамках проекта DIAS-TN в 2004 г. были проведены четыре международных школы и рабочее совещание (Research Workshop): 2-я зимняя школа по

Показано, что трансформационные свойства слэив-частичного параметра порядка относительно действия глобальной $SU(2)$ -группы накладывают определенные ограничения на вид фазовой диаграммы для t - J -модели [53].

С использованием одноплакетного приближения в модели сильнодемпфированных двумерных массивов джозефсоновских контактов (2D-JJA) объяснена явно выраженная ступенчатая структура температурной зависимости восприимчивости от переменного тока, экспериментально обнаруженная в искусственно изготовленных 2D-JJA нешунтированных соединениях $Nb-AIO_x-Nb$, в предположении, что ступени прямо связаны с геометрическими свойствами плакетки [54].

Исследования по проекту «Мезоскопические и когерентные явления в квантовых системах» были сосредоточены на основных квантовых эффектах для конечных (мезоскопических) систем.

Основная часть работы посвящена всестороннему описанию когерентного излучения ядерными спинами. Развита теория ядерного спинового сверхизлучения и рассмотрены экспериментальные наблюдения этого явления. Проанализирована увлекательная проблема того, как когерентность возникает из начально некогерентных квантовых флуктуаций. Рассмотрены основные типы когерентного излучения ядерными спинами: свободная ядерная индукция, коллективная индукция, мазерная генерация, чистое сверхизлучение, триггерное сверхизлучение, пульсирующее сверхизлучение, прерывистое сверхизлучение и индуцированная эмиссия. Изучено влияние электрон-ядерных сверхтонких взаимодействий и роль магнитной анизотропии. Исследованы условия реализации спинового сверхизлучения магнитными молекулами [55].

теоретической физике (30 января — 7 февраля) при поддержке РФФИ; летняя школа по современной математической физике (4–18 июля) организована совместно с ИТЭФ (Москва) при поддержке РФФИ, программы «Гейзенберг–Ландау» и гранта полномочного представителя Украины; школа по избранным проблемам теории ядра (20–29 июля) организована совместно с УНЦ ОИЯИ при поддержке РФФИ и программ «Гейзенберг–Ландау» и «Блохинцев–Вотруба»; летняя школа и рабочее совещание «Актуальные проблемы астрофизики и кос-

мологии» (2–13 августа) — при поддержке РФФИ, программы «Гейзенберг–Ландау» и общества Гельмгольца (Германия); рабочее совещание «Теория нуклеации и ее применения» (1–31 октября) — при поддержке РФФИ, программы «Гейзенберг–Ландау» и ЮНЕСКО (региональное бюро по науке в Европе).

Кроме того, были прочитаны два курса лекций: по квантовой хромодинамике в Лаборатории физики частиц — О. В. Теряев; «Современные проблемы квантовой теории поля плотной кварк-ядерной материи» в УНЦ ОИЯИ — Д. Блашке.

Создан сайт DIAS-TH (<http://thsun1.jinr.ru/dias/>).

РАЗВИТИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Стек сетевых коммутаторов расширен установкой 48-портового Gigabit Ethernet-коммутатора, что позволило перевести все Linux-серверы на Gigabit Ethernet и дало возможность подключать ПК на скорости Gigabit. Обновлено аппаратное обеспечение серверов THEOR, THROXY и UNAMP. Пользовательские директории, электронная почта, WWW-сервер перенесены с THSUN1 на THEOR. Органи-

зован доступ к электронной почте через WWW — <https://theor.jinr.ru/mail/>. По гранту РФФИ приобретены два двухпроцессорных сервера на 64-разрядных процессорах AMD Opteron. Серверы оснащены 8 и 6 Гбайт оперативной памяти. Для установки на рабочих местах приобретено 19 персональных компьютеров на базе Pentium 4. Приобретен цветной лазерный принтер HP Color LaserJet 2550.

КОНФЕРЕНЦИИ, СОВЕЩАНИЯ, СОТРУДНИЧЕСТВО

В 2004 г. кроме школ, проводившихся в рамках DIAS-TH, лаборатория участвовала в организации шести международных конференций и рабочих совещаний, проходивших в Дубне, Москве и Праге.

Со 2 по 6 сентября в Москве и Дубне проходила международная конференция «Проблемы теоретической и математической физики», посвященная 95-летию со дня рождения Николая Николаевича Боголюбова. Она была организована ОИЯИ и Российской академией наук при поддержке РФФИ и ЮНЕСКО-ROSTE (региональное бюро по науке в Европе).

Конференция открылась 2 сентября в Математическом институте им. В. А. Стеклова и 3 сентября продолжила работу в Дубне в Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова. В ней участвовало более 120 ученых из 15 стран. Тематика докладов, представленных на конференции, была связана с современными проблемами математики и нелинейной механики, квантовой теории поля и теории элементарных частиц, статистической физики и кинетики — именно с теми областями науки, в которые Н. Н. Боголюбов внес выдающийся вклад.

В 2004 г. лаборатория участвовала в организации традиционного XVI Международного Балдинского семинара по проблемам физики высоких энергий (27 сентября — 2 октября, Дубна) и трех конференций, проходивших в Праге: «Квантовые группы

и интегрируемые системы» (17–19 июня), «Методы симметрии в физике» (21–24 июня), «Симметрии и спин» (5–10 июля).

Международное сотрудничество ЛТФ в 2004 г. было поддержано грантами полномочных представителей Болгарии, Венгрии, Словакии, Польши, Румынии, Чехии и ОИЯИ. Сотрудничество с теоретиками Германии проходило при поддержке программы «Гейзенберг–Ландау», с теоретиками Польши — по программе «Боголюбов–Инфельд», с теоретиками Чехии — по программе «Блохинцев–Вотруба» и с теоретиками Румынии — по программе «Цицейка–Марков».

Ряд исследований был выполнен совместно с зарубежными учеными в рамках соглашений ОИЯИ–INFN, ОИЯИ–IN2P3 и по проектам, поддержанным грантами INTAS, РФФИ–DFG, РФФИ–CNRS.

Продолжают действовать соглашения о сотрудничестве с теоретическим отделом ЦЕРН и МЦТФ (Триест).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kotikov A. V. *et al.* // Phys. Lett. B. 2004. V. 595. P. 521–529.
2. Pawłowski J. M. *et al.* // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 152002.
3. Kozlov G. A. *et al.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2004. V. 30. P. 1201–1218.

4. *Ivanov M.A., Korner J.G., Santorelli P.* // Phys. Rev. D. 2004. V. 70. P. 014005.
5. *de Boer W. et al.* // astro-ph/0408272.
6. *Efremov A.V., Goeke K., Schweitzer P.* // Eur. Phys. J. C. 2004. V. 35. P. 207.
7. *Anikin I.V. et al.* // Phys. Rev. D. 2004. V. 70. P. 011501.
8. *Kochelev N.I., Lee H.-J., Vento V.* // Phys. Lett. B. 2004. V. 594. P. 87.
9. *Kuzmin K.S., Lyubushkin V.V., Naumov V.A.* // Mod. Phys. Lett. A. 2004. V. 19. P. 2815–2829.
10. *Kuzmin K.S., Lyubushkin V.V., Naumov V.A.* // Talks at the 3rd Intern. Workshop on Neutrino–Nucleus Interactions in the Few-GeV Region «NuInt04», Gran Sasso, 17–21 March, 2004; Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (in press); Mod. Phys. Lett. A. 2004. V. 19. P. 2919–2928.
11. *Bourrely C., Soffer J., Teryaev O.V.* // Phys. Rev. D. 2004. V. 69. P. 114019.
12. *Leader E., Sidorov A.V., Stamenov D.B.* // Part. Nucl., Lett. 2004. V. 1, No. 5(122). P. 7.
13. *Sissakian A.N., Shevchenko O.Yu., Ivanov O.N.* // Phys. Rev. D. 2004. V. 70. P. 074032.
14. *Dorokhov A.E.* // Ibid. P. 094011.
15. *Bakulev A.P., Mikhailov S.V., Stefanis N.G.* // Phys. Lett. B. 2004. V. 578. P. 91.
16. *Bakulev A.P. et al.* // Phys. Rev. D. 2004. V. 70. P. 033014.
17. *Bartos E. et al.* // Nucl. Phys. B. 2004. V. 676. P. 481.
18. *Бартош Э., Геворкян С.Р., Кураев Э.А.* // ЯФ. 2004. Т. 67. С. 1945.
19. *Bartos E., Kuraev E.A., Cherednikov I.O.* // Phys. Lett. B. 2004. V. 593. P. 115.
20. *Blaschke D. et al.* // Phys. Rev. D. 2004. V. 70 P. 014006.
21. *Шурков Д.В., Ковалев В.Ф.* Препринт ОИЯИ Р5-2004-29. Дубна, 2004; J. Phys. A (submitted).
22. *Solovtsov I.L., Solovtsova O.P., Chernichenko Yu.D.* // Part. Nucl., Lett. (in press).
23. *Ferrara S. et al.* // hep-th/0405049; Nucl. Phys. B. 2005. V. 704. P. 154–180.
24. *Bellucci S. et al.* // Nucl. Phys. B. 2004. V. 699. P. 226–252.
25. *Gribanov V.V., Kadyshesky V.G., Sorin A.S.* // Discrete Dynamics in Nature and Society. 2004. V. 1. P. 113; Czech. J. Phys. 2004. V. 54. P. 1289.
26. *Popov A.D., Wolf M.* // JHEP. 2004. 0409. 007.
27. *Pyatov P.* // J. Stat. Mech.: Theor. Exp. 2004. P. 090003; math-ph/0406025.
28. *Spiridonov V.P., Zhedanov A.S.* // J. Phys. A: Math. Gen. 2004. V. 37. P. 10429–10443.
29. *Ivanova T.A., Lechtenfeld O., Mueller-Ebhardt H.* // Mod. Phys. Lett. A. 2004. V. 19. P. 2419–2430.
30. *Frolov V.P., Fursaev D.V., Stojkovic D.* // Class. Quant. Grav. 2004. V. 21. P. 3483–3498; JHEP. 2004. 0406. 057.
31. *Тагиров Э.А.* // Тр. юбилейной конф. физического факультета Казанского гос. ун-та. 2004. С. 33; Phys. Rev. Lett. (submitted).
32. *Jolos R.V., Shirikova N.Yu., Voronov V.V.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. P. 054303.
33. *Adamian G.G. et al.* // Ibid. 2004. V. 69. P. 054310.
34. *Storozhenko A.N. et al.* // Ibid. P. 064320.
35. *Deleplanque M.A. et al.* // Ibid. P. 044309.
36. *Adamian G.G., Antonenko N.V., Scheid W.* // Ibid. P. 044601.
37. *Ershov S.N.* // Ibid. V. 70. P. 054604.
38. *Lukyanov V.K., Zemlyanaya E.V., Slowiński* // ЯФ. 2004. Т. 67. С. 1306.
39. *Kolganova E.A., Motovilov A.K., Sandhas W.* // Phys. Rev. A. 2004. V. 70. P. 052711.
40. *Belyaev V.B., Levin S.B., Yakovlev S.L.* // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2004. V. 37. P. 1369.
41. *Laveissiere G. et al. (JLab Hall A collab.)* // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. P. 045203.
42. *Melezhik V.S., Cohen J.S., Hu C.-Y.* // Phys. Rev. A. 2004. V. 69. P. 032709.
43. *Русских В.Н. и др.* // ЯФ. 2004. Т. 67. С. 195.
44. *Titov A.I. et al.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. P. 042202.
45. *Kaptari L.P., Kämpfer B., Semikh S.S.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2004. V. 30. P. 1115.
46. *Nesterenko V.O. et al.* // Phys. Rev. A. 2004. V. 70. P. 023205.
47. *Di Matteo S. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 077208.
48. *Oudovenko V.S. et al.* // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 125112.
49. *Pomjakushin V. et al.* // J. Magnetism Magnetic Materials. 2004. V. 272–276. P. 820.
50. *Povolotsky A.M.* // Phys. Rev. E. 2004. V. 69. P. 061109.
51. *Dorlas T.C., Priezzhev V.B.* // JSTAT. 2004. P. 11002.
52. *Kolesnikov D.V., Osipov V.A.* // JETP Lett. 2004. V. 79. P. 532.
53. *Kochetov E.A., Ferraz A.* // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 052508-1.
54. *Sergeenkov S., Araujo-Moreira F.M.* // JETP Lett. 2004. V. 80. P. 580.
55. *Yukalov V.I., Yukalova E.P.* // Part. Nucl. 2004. V. 35. P. 348.