

ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. Н. Н. БОГОЛЮБОВА

В 2007 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 экспериментальных исследований, проводимых в Объединенном институте. Особое внимание уделялось привлечению к работе молодых исследователей, студентов и аспирантов.

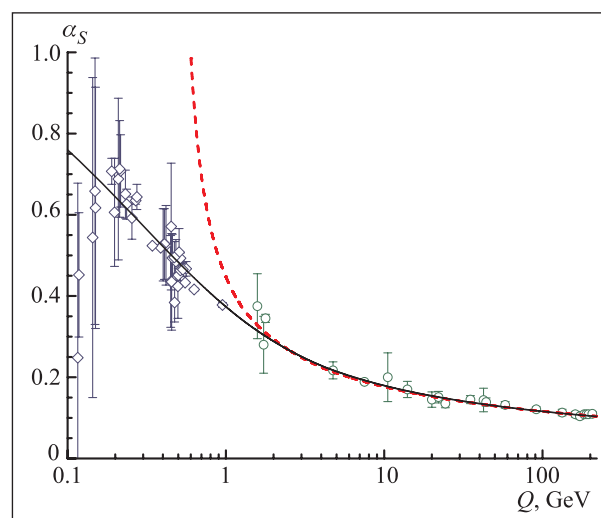
ПОЛЯ И ЧАСТИЦЫ

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.

Ниже представлены некоторые результаты, полученные в ЛТФ по этой теме.

Проведено исследование функции связи сильного взаимодействия $\alpha_s(Q^2)$ в области энергий ниже 1 ГэВ. При этом использовалась комбинация трехмерного формализма Бете–Солпитера (БС) для кварк-антикварковой системы и аналитической теории возмущений (АТВ). Объединенный подход БС + АТВ позволяет извлечь значения $\alpha_s(Q^2)$ в интервале переданного импульса Q от 200 МэВ до 1 ГэВ. Для S - и P -состояний извлеченные значения $\alpha_s(Q^2)$ согласуются с функцией связи АТВ, нормированной на среднемировое значение $\alpha_s(M_Z^2) \approx 0,118$, см. рисунок. Это дает основание надеяться, что аналитическая модификация пертурбативной КХД в низкоэнергетической области может привести к теоретически самосогласованному и феноменологически успешному описанию адронных явлений в области энергий от нескольких сотен МэВ до нескольких сотен ГэВ [1].



Извлеченные в рамках подхода БС + АТВ данные по функции связи КХД (\diamond) и данные по $\alpha_s(Q^2)$ из области высоких энергий (\circ). Трехпетлевая функция связи АТВ и пертурбативная $\alpha_s(Q^2)$, нормированные на массу Z_0 -бозона, показаны сплошной и пунктирной линиями соответственно

Исследована справедливость предсказаний асимптотического анзаца Бете в высоких порядках теории возмущений. Исследование было проведено на основе сравнения предсказаний ан-

заца Бете и высокоэнергетических ограничений Балицкого–Фадиной–Кураева–Липатова (БФКЛ) для амплитуд рассеяния в $N = 4$ суперсимметричной модели Янга–Миллса. Показано, что анзац Бете нарушает ограничения БФКЛ для 4-петлевой аномальной размерности операторов Вильсона твиста-2 при конечных значениях спина. Полученный результат свидетельствует о неприменимости анзаца Бете для вильсоновских операторов твиста-2 начиная с 4-го порядка теории возмущений. Учитывая граничные эффекты, найденные на основе согласия с результатами БФКЛ и дважды логарифмической асимптотики, получили предсказания для точной 4-петлевой аномальной размерности целого семейства операторов Вильсона твиста-2, включая поле Кониши, интенсивно изучаемое в настоящее время [2].

В рамках минимальной суперсимметричной Стандартной модели (МССМ) с мягким нарушением суперсимметрии за счет эффектов гравитации имеется возможность существования долгоживущих суперсимметричных частиц, по массе следующих за легчайшими. В такой области коаннигиляции пространства параметров МССМ могут существовать легкие суперпартнеры τ -лептонов (τ -слептоны), а область с большими отрицательными значениями трilinearного параметра мягкого нарушения суперсимметрии A выделяется благодаря существованию легких суперпартнеров топ-кварков (топ-скварков). Сечения рождения существенно зависят от единственного параметра — массы суперчастицы, и для легких τ -слептонов могут достигать нескольких процентов пб. Это в пределах досягаемости большого адронного коллайдера (ЛHC). Сечения рождения топ-скварков достигают десятков и даже сотен пб при массах топ-скварков 150–200 ГэВ. Распады долгоживущих τ -слептонов и топ-скварков могут иметь необычный сигнал, когда тяжелая заряженная частица распадается со значительной задержкой во вторичной вершине в детекторе или даже улетает из детектора. Топ-скварки могут также образовывать так называемые R -адроны (связанные состояния суперсимметричных частиц), если время их жизни больше времени адронизации. Обе области согласуются с экспериментальными ограничениями на массы хиггсовского бозона и чарджино, а также с данными WMAP по реликтовой плотности [3].

Были продолжены исследования в области феноменологии элементарных частиц. Основное внимание уделялось нахождению прецизионных теоретических предсказаний для процессов, которые будут исследоваться на большом адронном коллайдере (ЛHC) в ЦЕРН. В частности, продолжены расчеты и численное моделирование радиационных поправок к процессам типа Дрелла–Яна (процессам одиночного рождения Z - и W -бозонов). Впервые найден полный вклад однопетлевых электрослабых радиа-

ционных поправок к дифференциальной ширине полупетлевого распада топ-кварка [2]. Для условий эксперимента COMPASS (ЦЕРН) найден вклад однопетлевых поправок к лептонному тензору, входящему в амплитуду процесса тормозного излучения лептоном на ядре [4].

Сечение электрон-протонного рассеяния вычислено с учетом лидирующего и следующего за лидирующим логарифмического приближения. Выражение для сечения имеет форму, похожую на сечение процесса Дрелла–Яна. Показано, что в этом приближении радиационные поправки снимают противоречие между имеющимися экспериментальными результатами и тем фактом, что двухфотонный вклад в сечение мал [5].

С использованием аналитических свойств ep -амплитуды рассеяния вперед получены правила сумм, связывающие формфакторы с сечениями неупругого $eP > eX$ дифракционного рассеяния. В случае малого переданного импульса оно связывает зарядовые радиусы и аномальные магнитные моменты с сечениями фоторождения без быструх щелей в конечном состоянии [6].

Изучены также аналитические свойства амплитуд жестких эксклюзивных процессов. Получено, что КХД-факторизация для глубоковиртуального комптоновского рассеяния и эксклюзивного рождения векторных мезонов приводит к дисперсионным соотношениям с константой вычитания, которая определяется D -членом Полякова и Вайса. Рассмотрен предел, в котором фотон становится реальным, а также найдено численное соответствие между D -членом, вычисленным в решеточном приближении, и низкоэнергетической томсоновской амплитудой [7].

Получены общие формулы, связывающие структурные функции W_i квазиупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на нуклонах с формфакторами адронного тока, учитывающие массу конечного лептона, разницу масс протона и нейтрона и вклад нестандартных (нарушающих G -четность) токов второго рода. В рамках модели Смита–Моница для релятивистского ферми-газа найдены ядерные структурные функции T_i , учитывающие эффект ферми-движения нуклонов, принцип запрета Паули и энергию связи для ядерных мишеней. Выполнен статистический анализ имеющихся ускорительных данных по полным и дифференциальным сечениям квазиупругого рассеяния мюонного нейтрино и антинейтрино на дейтерии, водороде, аргоне, углероде, пропане, алюминии, железе, фреоне, неон-водородной и пропан-фреонной смесях. Для векторных формфакторов G_E^p , G_M^p , G_e^n и G_m^n были использованы наиболее современные феноменологические модели, которые хорошо описывают экспериментальные результаты, извлеченные из данных по ep -рассеянию. При стандартных предположениях получено средне-

мировое значение аксиальной массы нуклона $M_A = (1,01 \pm 0,01) \text{ ГэВ}/c^2$. Это значение не противоречит предварительному результату эксперимента NOMAD $(1,05 \pm 0,02 \pm 0,07) \text{ ГэВ}/c^2$ для данных по нейтрино-углеродному образцу и $(1,06 \pm 0,07 \pm 0,12) \text{ ГэВ}/c^2$ для данных по антинейтрино-углеродному образцу, но не подтверждает недавние результаты экспериментов K2K и MiniBooNE, получивших на 20% большие значения аксиальной массы [8].

Зависимость кваркового конденсата и масс π - и σ -мезонов от температуры и барионного химического потенциала в предкритическом режиме была изучена в рамках инстантонной модели вакуума КХД, исследовано влияние фононоподобных возмущений инстантонной жидкости на свойства σ -мезона [9].

СОВРЕМЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Исследования по теме были сосредоточены на следующих направлениях:

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

Техника интеграла по путям Фейнмана была применена к исследованию суперинтегрируемых систем на двумерных пространствах с непостоянной кривизной (на четырех пространствах Дарбу $D_I - D_{IV}$). Такие интегралы по путям были вычислены в системе с разделяющимися переменными, что привело к явным выражениям для функций Грина, дискретным и непрерывным волновым функциям и дискретным спектрам энергии [11].

В терминах образующих аффинных алгебр Гекке сформулированы интегрируемые модели $gl(n|m)$ -типа на открытых цепочках. Построена иерархия коммутирующих элементов (которые являются аналогами высших коммутативных интегралов движения) и найдены функциональные уравнения, которые эти элементы удовлетворяют [12].

Была закончена формулировка метода проекций для построения векторов пространства состояний в квантовых интегрируемых моделях и проведено сравнение этого метода с иерархическим анзацем Бете. Были получены универсальные векторы Бете, и это позволило объединить иерархический и аналитический анзацы Бете в единую теорию, описывающую универсальные свойства пространства состояний в квантовых интегрируемых моделях, ассоциированных с алгебрами gl_N [13].

Продemonстрировано, что собственные значения семейства Q -операторов Бакстера для супер-

В рамках дисперсионного подхода амплитуда редкого распада $\pi^0 \rightarrow e^+e^-$ содержит одну вычитательную константу, которая содержит фактически всю информацию о нетривиальной динамике взаимодействия. В работе [10] эта константа выражена через обратный момент переходного формфактора пиона в симметричной кинематике в лидирующем порядке по $(m_e/\Lambda)^2$. Используя экспериментальные данные для переходного формфактора пиона в симметричной кинематике, полученные коллаборациями CELLO и CLEO, в [10] получили нижнюю границу для брэнчинга данного распада. Применяя также ряд ограничений на формфактор, которые следуют из КХД, в [10] дали количественную оценку для брэнчинга $B(\pi^0 \rightarrow e^+e^-) = (6,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-8}$, что на 3σ ниже, чем результат, представленный коллаборацией KTeV.

симметричных интегрируемых спиновых цепочек, построенных с помощью $gl(K|M)$ -инвариантных R -матриц, подчиняются билинейному разностному уравнению Хироты. Иерархический анзац Бете для спиновых цепочек с любым выбором системы простых корней в этом подходе может рассматриваться как дискретная динамическая система уравнений для нулей полиномиальных решений уравнения Хироты. Используемый основной инструмент — цепь преобразований Бэклунда для уравнения Хироты, связывающих квантовые трансфер-матрицы. Развитый подход обеспечивает систематический способ получения полного набора обобщенных уравнений Бакстера для суперсимметричных интегрируемых спиновых цепочек [14].

В связи с одной из формулировок гипотезы о зеркальной симметрии для многообразий Фано, предложенной Хори и Вафой, изучались лагранжевы торы в проективной плоскости и других торических многообразиях Фано. Было установлено, что гипотеза Хори–Вафы может быть переформулирована в терминах условий Бора–Зоммерфельда, что проясняет связь между зеркальной симметрией и геометрическим квантованием в терминах лагранжевой геометрии [15].

Построена новая модель $N = 8$ суперконформной механики. Она связана с самодействующим $N = 8$ мультиплетом $(1, 8, 7)$ и, несколько неожиданно, обладает инвариантностью относительно исключительной $N = 8, d = 1$ суперконформной группы $F(4)$ с подгруппой R -симметрии $SO(7)$ [16].

Продолжено изучение теорий в суперпространствах с неантикоммутирующими деформациями. По-

казано, что хотя неантикоммутирующие деформации теорий в суперпространстве Минковского ведут к неэрмитовым гамильтонианам H , последние можно сделать эрмитовыми посредством преобразования подобия $H \rightarrow e^R H e^{-R}$ с подходящим оператором R [17].

В рамках исследования суперсимметричных механических систем найден новый нелинейный $N = 8$ супермультиплет вне массовой оболочки с 3 бозонными и 8 фермионными степенями свободы. Геометрия действия соответствующей суперсимметричной механики описывается функцией, удовлетворяющей трехмерному уравнению Лапласа на сфере S^3 [18].

Предложены новые интегрируемые модели гравитации, тесно связанные с двумерными цепочками Тоды. Показано, что в них существуют решения, описывающие нелинейные волны, в частности, статические состояния и космологические модели, которые получены размерной редукцией пространства модулей уравнений Тоды. Для пространства модулей цепочки Тоды найдены два эквивалентных описания, обобщающих соответствующие конструкции для уравнения Лиувилля [19].

Показано, что все супергравитационные бильярды, получаемые компактификацией супергравитаций к трехмерному пространству, в котором они представляют собой нелинейные сигма-модели на некомпактно-симметрических пространствах U/H , вполне интегрируемы. Ключевой пункт в установлении явного алгоритма интегрирования обеспечивается всегда существующим верхнетреугольным вложением разрешимой группы Ли, связанной с U/H , в группу $SL(N, R)$. В рамках такого подхода установлено замечательное соотношение между стрелой направления времени и свойствами подгруппы Вейля группы U . Оказалось, что асимптотические состояния эволюционирующей Вселенной находятся в однозначном соответствии с элементами подгруппы Вейля, что является свойством классов универсальности Титса–Сатаки. Более того, группа Вейля допускает естественное упорядочение в терминах числа отражений $L(T)$ относительно простых корней, и стрела времени всегда направлена в направлении увеличения числа отражений [20].

Согласно идее рассматривать гравитацию как некоторую эффективную низкоэнергетическую теорию изменения пространственно-временной метрики интерпретируются как коллективные возбуждения в некоторой фундаментальной, пока неизвестной нам, теории. Были исследованы свойства энтропии, порождаемой «перепутыванием» фундаментальных степеней свободы при их пространственном разделении поверхностью [21].

В поисках физически приемлемых квантово-полевых теорий на планковских расстояниях привлекается, в частности, идея некоммутирующих координат. Было проанализировано взаимодействие некоммутативных волн и солитонов в $2 + 1$ измере-

ниях для суперсимметричной интегрируемой $U(n)$ -киральной модели, обобщающей модель Уорда. Явные решения некоммутативных уравнений движения этой модели были построены методом итераций решения линейных уравнений. Для иллюстрации метода были построены конфигурация двух рассеивающихся друг на друга некоммутативных $U(2)$ -плоских волн и двух некоммутативных $U(2)$ -солитонов, а также связанное состояние двух некоммутативных $U(1)$ -солитонов [22].

Проблема гравитационной сингулярности по-прежнему привлекает внимание теоретиков. В связи с этим была исследована жизнеспособность вакуумной космологии на основе гравитационного действия Гаусса–Бонне. С этой целью проанализировано поведение динамических траекторий в этой теории. Сделан вывод о том, что мера траекторий, ведущих к гладкой эволюции от стандартной сингулярности к эйнштейновской фазе, пренебрежимо мала в случае произвольных начальных условий [23].

Большие возможности в наблюдательной астрономии открываются при использовании техники гравитационного линзирования в различных диапазонах волн. Было рассмотрено применение гравитационного линзирования в рентгеновском и радиодиапазонах для определения параметров ближайших массивных черных дыр в нашей Галактике. Показано, что необходимо использовать приближение сильного гравитационного поля при расчете эффекта линзирования [24].

При построении расширений стандартной теории гравитации используются довольно сложные математические методы, одним из которых является спектральный анализ дифференциальных операторов. Как одно из возможных приложений этого метода была исследована проблема устойчивости в теориях с высшими производными. В результате была выявлена экспоненциальная неустойчивость в динамике систем, описываемых лагранжианами с высшими производными, при включении внешних диссипативных сил. Это свойство рассматриваемых систем необходимо учитывать при обобщении стандартных полевых моделей путем включения высших производных, например, при рассмотрении дополнительных измерений [25].

Техника спектрального суммирования была использована в расчетах эффекта Казимира. Эта область исследований становится весьма актуальной ввиду ее связи с нанофизикой и нанотехнологиями. Была рассчитана сила Казимира между пластинами конечной толщины, изготовленными из чистого и легированного кремния при различных концентрациях носителей. Для описания добавочной диэлектрической проницаемости в легированном кремнии используются плазменная модель и модель Друде. Полученные результаты сравниваются с результатами для золотых пластин. Исследовано влияние конечной толщины пластин из диоксида ванадия на воз-

никающую между ними силу Казимира. При повышении температуры этот материал претерпевает фазовый переход полупроводник–металл, что приводит к росту силы Казимира. Это делает диоксид ванадия особенно привлекательным для новых экс-

периментов по «реверсированию» силы Казимира. Были также исследованы условия возникновения казимировского отталкивания между плоскими зеркалами, изготовленными из специальных материалов [26].

ТЕОРИЯ ЯДРА

В 2007 г. исследования по теме «Теория ядра» 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.

Исследовано распределение дипольной силы в спектрах четно-четных ядер цепочки изотопов олова. Расчеты проведены в приближении случайной фазы с сепарабельным взаимодействием Скирма трех параметризаций: SLy4, SkM* и SIII. В низкоэнергетической части распределений дипольной силы обнаружена группа слабоколлективизированных состояний. Сила соответствующих $E1$ -переходов возрастает с ростом числа нейтронов в нуклиде. Эти состояния идентифицированы как Ругму-резонанс [27].

Экспериментальные данные об энергиях и приведенных вероятностях $E2$ -переходов для состояний 2_1^+ и $2_{\gamma(\beta)}^+$ в деформированных аксиально-симметричных ядрах проанализированы с применением коллективного гамильтониана Бора. Показано, что массовые коэффициенты $\gamma(\beta)$ -колебаний существенно отличаются от коэффициентов вращения, и их отношение, извлеченное из экспериментальных данных, меняется в пределах 3–5. Свойства аксиально-симметричных ядер из середины редкоземельной области с малыми флуктуациями β и γ переменных могут быть удовлетворительно описаны с использованием различных, но постоянных значений массовых коэффициентов основной, β - и γ -полос. Различия в массовых коэффициентах $\gamma(\beta)$ -колебаний и основной вращательной полосы могут быть объяснены, если учесть не только скалярные, но и другие компоненты тензора масс в гамильтониане Бора [28].

Свойства изоскалярной и изовекторной деформаций большой амплитуды нейтронно-избыточного ядра изучены в подходе Хартри–Фока–Боголюбова с независимыми ограничениями на аксиальные квадрупольные моменты нейтронов Q_n и протонов Q_p . Коллективная динамика в плоскости $\{\langle Q_n \rangle, \langle Q_p \rangle\}$ была проанализирована в рамках метода генератор-

ной координаты с проектированием по угловому моменту и числу частиц. Показано, что даже в таком ядре, как ^{20}O , с относительно небольшим избытком нейтронов моменты переходов заметно меняются при независимом рассмотрении коллективного движения нейтронов и протонов [29].

Эволюция формы ядер $^{162,164}\text{Yb}$ вдоль ираст-полосы исследована в самосогласованных расчетах методом Хартри–Фока с силами Скирма. Обнаружено, что неаксиальная октупольная деформация становится предпочтительной в ядре ^{162}Yb при частотах вращения $\hbar\Omega > 0,4$ МэВ, в то время как в ^{164}Yb при больших частотах вращения доминирует квадрупольная деформация. В ядре ^{162}Yb энергия октупольного фона во вращающейся системе координат обращается в нуль при $\hbar\Omega \approx 0,45$ МэВ. В результате возникает вырождение между нижайшей полосой отрицательной четности и отрицательной сигнатуры и ираст-полосой положительной четности и положительной сигнатуры. Это объясняет спонтанное нарушение зеркальной симметрии вращающегося среднего поля. Напротив, в ядре ^{164}Yb октупольные корреляции проявляют себя через низлежащие октупольные колебания вращающегося ядра с квадрупольной деформацией [30].

Большие значения угловых моментов ядер-фрагментов низкоэнергетического деления объяснены с точки зрения квантово-механического механизма «ориентационной накачки», апеллирующего к принципу неопределенности Гейзенберга. Чтобы получить распределение спинов фрагментов деления в зависимости от их полной энергии, были использованы результаты расчетов их деформационных характеристик методом Хартри–Фока с силами Скирма и БКШ-спариванием. Специальное внимание было уделено количественному определению конфигураций в момент разрыва делящегося ядра. Получено хорошее количественное согласие с данными о спонтанном делении $^{252}\text{Cf} \rightarrow ^{106}\text{Mo} + ^{146}\text{Ba}$ [31].

Индукцированное деление ядра рассмотрено как процесс переноса через барьер деления, сопровождающийся диссипацией. Исследовано влияние микроскопических коэффициентов диффузии на полное время деления и время перехода, для чего численно решалось квантовое мастер-уравнение для приведенной матрицы плотности. В квантовом случае время

перехода оказалось в два раза больше, чем в классическом подходе, базирующемся на уравнении Ланжевена. При средних и высоких энергиях возбуждения асимптотические скорости деления в классическом и квантовом случаях практически одинаковы. При значении коэффициента трения $\hbar\lambda_p \approx 1$ МэВ время перехода меняется от 10^{-21} до $4 \cdot 10^{-21}$ с с уменьшением температуры от $T = 5$ до $T = 0,7$ МэВ, тогда как время жизни по отношению к делению меняется от 10^{-21} с до $5,4 \cdot 10^{-19}$ с. Основной вклад в длительность деления дает время, которое затрачивает делящееся ядро на эволюцию до седловой точки [32].

В рамках статистического подхода исследована эмиссия нейтронов из двойной ядерной системы (ДЯС), находящейся в локальном потенциальном минимуме, образовавшейся во входном канале реакций $^{62-73}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$. Обнаружено, что вероятность эмиссии нейтронов из ДЯС составляет порядка 10^{-2} и увеличивается в 3 раза при изменении массового числа ДЯС от 270 до 281. Это увеличение происходит медленнее, чем в составном ядре. Основной процесс, конкурирующий с эмиссией предразрывных нейтронов в реакциях на Pb, — это квазиделение из начальной ДЯС и из более симметричных ДЯС. Изучая нейтронную эмиссию из ДЯС, можно выяснить, быстрым или медленным процессом является рост шейки. Эмиссия нейтронов уменьшает энергию возбуждения ДЯС и тем самым может помочь в получении почти холодной и относительно долгоживущей ДЯС, которая может рассматриваться как гипердеформированное состояние ядра [33].

Сечения упругого рассеяния протонов ядром ^6He , измеренные в ЛЯР ОИЯИ и других лабораториях, проанализированы с использованием микроскопического оптического потенциала (ОП) и модельных распределений плотности в ^6He . Микроскопический ОП состоял из реального потенциала свертки и мнимой части, которая вычислялась с помощью высокоэнергетического приближения. Потенциал не содержит свободных параметров и полностью задается распределением плотности в ядре ^6He , эффективным NN -взаимодействием и полным NN -сечением. Проверены три современные модели, описывающие структуру ^6He . Наилучшее описание дает так называемая крупномасштабная оболочечная модель. Получено хорошее описание экспериментальных данных при $E > 40$ МэВ/нукл. [34].

Исследованы энергетические корреляции фрагментов развала при переходах их основного состояния в непрерывный спектр возбуждения боромиевских ядер, имеющих структуру гало. Трехчастичная кластерная модель типа $\text{core} + n + n$, воспроизводящая экспериментально известные свойства ^6He и ^{11}Li , использовалась для анализа низколежащих резонансов и мягких мод возбуждения. Анализ коррелированных откликов ^6He показывает, что в слу-

чае узкого трехчастичного резонанса 2_1^+ -переходные энергетические корреляции фрагментов такие же, как в случае корреляционной структуры непрерывного спектра при рассеянии $3 \rightarrow 3$. Эти корреляции сильно отличаются от корреляций широких резонансов 2_2^+ , 1_1^+ , а также мягкой дипольной и монополярной мод, в которых из-за оператора перехода смешивание основного состояния и трехчастичного непрерывного спектра играет определяющую роль [35].

В стандартной теории pp -цикла на Солнце предполагается, что выгорание ^7Be происходит в результате двух бинарных процессов: $e + ^7\text{Be} = ^7\text{Li} + \nu$ и $p + ^7\text{Be} = ^8\text{B} + \nu$. Исследована скорость электронного захвата в предположении о трехчастичном характере этого процесса. Использовано разложение трехчастичной волновой функции по малому параметру $(m_e/m_p)^{1/2}$, где $m_e(m_p)$ — масса электрона (протона). Влияние протона как третьей частицы увеличивает скорость захвата электронов ядрами ^7Be , что ускоряет выгорание этого изотопа и уменьшает концентрацию ^8B , который является источником солнечных нейтрино высоких энергий [36].

Найдена серия новых точных оценок сдвига спектра и поворота спектральных подпространств самосопряженного гамильтониана под действием внедиагональных возмущений. В общем случае доказано, что если спектр исходного гамильтониана состоит из двух изолированных частей σ_0 и σ_1 , то лакуны между ними всегда остаются открытыми, когда возмущение V удовлетворяет условию $\|V\| < d\sqrt{3}/2$, где $d = \text{dist}(\sigma_0, \sigma_1)$. Для случая, когда множество σ_0 лежит в конечной лакуне множества σ_1 , установлено, что открытые интервалы между σ_0 и σ_1 сохраняются при гораздо более слабом условии $\|V\| < d\sqrt{2}$. При этом условии также доказана расширенная версия апостериорной $\tan \Theta$ -теоремы Дэвиса–Кахана для спектральных подпространств, а также соответствующей априорной $\tan \theta$ -теоремы для собственных векторов [37].

Исследованы универсальные черты трехчастичной динамики ультрахолодных бинарных ферми-и бозе-ферми-смесей. Получено полное и универсальное описание ротационно-вибрационного спектра системы из двух идентичных частиц с массой m и третьей частицы с массой m_1 со взаимодействием нулевого радиуса между разными частицами для произвольных значений отношения m/m_1 и полного углового момента L . Для тех значений m/m_1 и L , которые отвечают конечному числу вибрационных состояний, все энергии связи описываются универсальной функцией, зависящей от двух масштабированных переменных. При $L = 1$ зависимости сечения упругого рассеяния и скорости трехчастичной рекомбинации от отношения масс имеют двугорбую структуру, которая связана с появлением связанных состояний [38].

Ранее предложенная релятивистская модель среднего поля с массами адронов и константами связи, зависящими от σ поля, обобщена на ненулевые температуры. Поведение масс адронов в среде моделируется согласно скейлингу Брауна–Ро. Модель включает также высоколежащие барионные резонансы и бозонные возбуждения, равно как и возбуждения σ , ω и ρ полей, взаимодействующих через средние поля. Показано, что уравнение состояния согласуется с решеточными вычислениями для высоких температур, если несколько ослабить константы связи барионных резонансов с нуклоном. В этом случае кварковая жидкость выглядела бы как адронная. Модель использована для описания столкновений тяжелых ионов в широкой области энергий. Она может оказаться особенно полезной для изучения фазовой диаграммы недалеко от возможных фазовых переходов [39].

Исследована асимметрия распада $\omega \rightarrow e^+e^-$ в ядерной материи относительно энергий электрона и позитрона. Анализ проведен в рамках простой резонансной модели. Показано, что возбуждение высокоспиновых резонансов приводит к сильной импульсной зависимости асимметрии при значениях массы виртуального ω -мезона $M = 0,75 - 0,8$ ГэВ, в то время как эта зависимость плоская при $M = 0,7$ ГэВ. Таким образом, указанная асимметрия чувствительна к величине собственной энергии ω -мезона и может быть использована для изучения его свойств в ядерной среде. Экспериментально асимметрию можно изучать в экспериментах и на

установках J-PARC E16, HADES в GSI (а позже на FAIR), CLAS G9 в JLab [40].

Электродезинтеграция дейтрона исследована в рамках ковариантного формализма Бете–Солпитера с сепарабельным ядром нуклон-нуклонного взаимодействия. Реакция изучалась в релятивистском импульсном приближении плоских волн. Аналитически доказано, что, если пренебречь протон-нейтронным взаимодействием, сечение процесса факторизуется на фотон-протонную и спектаторную части. Сравнение расчетов, проведенных с учетом протон-нейтронного взаимодействия и без него, указывает на важную роль нейтрона в процессе электродезинтеграции [41].

Проанализированы возможные следствия искажения волновой функции нуклона в ядре из-за взаимодействия с окружением. Искажения должны сильно зависеть от импульса нуклона. Показано, что зависимость деформации нуклона при нерелятивистских значениях импульса следует из довольно общих соображений. Продемонстрировано подавление точечноподобных конфигураций в волновой функции нуклона, связанного в ядре A , когда система-спектатор $A-1$ находится в произвольной энергетической конфигурации. Одно из следствий искажения волновой функции связанного нуклона состоит в «плоской» зависимости ЕМС-эффекта от массового числа A : для ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^{12}\text{C}$ получена очень близкая величина эффекта, что находится в согласии с экспериментальными данными JLab [42].

ТЕОРИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

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

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

Как известно, логарифмическая конформная теория поля предсказывает логарифмические поправки к корреляционным функциям для моделей с центральным зарядом $c = -2$, а также дает численные значения коэффициентов при этих поправках. Однако до сих пор не существовало точных решений для парных корреляционных функций, содержащих логарифмические члены в ведущих порядках. Показано, что корреляционные функции, содержащие логарифмические члены, возникают для нелокальных операторов в абелевой теории ASM, принадлежащей к классу свободных фермионов. Вычисленные корреляционные функции оказались в точном соответ-

ствии с предсказаниями логарифмической конформной теории [43].

Получены детерминантные формулы для зависящих от времени переходных вероятностей в полностью асимметричном процессе с исключенным объемом и с параллельной динамикой в геометрии кольца. С этой целью был развит метод суммирования по спектру решений уравнений Бете, основанный на многомерном обобщении теоремы Коши для вычетов. Этот метод был применен для построения разложения единичного оператора из обобщенных собственных векторов оператора эволюции, которое позволяет рассчитывать степени матричных элементов. Как промежуточный результат была также получена более общая величина — производящая функция совместной вероятности конфигураций частиц и суммарного переноса частиц за произвольное время [44].

Исследованы одномерные цепочки Изинга с нелокальным взаимодействием, порожденные ав-

томодельными бесконечно-солитонными решениями уравнений Кортевега–де Вриса и Кадомцева–Петвиашвили типа В. Показано, что в скейлинговом пределе, когда взаимодействие становится дальнедействующим, эффективная температура стремится к нулю и возникает фазовый переход второго рода. При этом намагниченность становится кусочно-линейной функцией внешнего магнитного поля, а магнитная восприимчивость претерпевает скачок при критическом значении магнитного поля. Проведены детальные исследования свойств решений эллиптического гипергеометрического уравнения и структуры многомерных эллиптических гипергеометрических функций типа I для системы корней BC_n [45].

Автоэлектронная эмиссия монокристалла графита рассчитана в ААА-модели с учетом энергетического спектра электрона вблизи уровня Ферми. Были рассмотрены два случая ориентации электрического поля относительно монокристалла. Обнаружено, что ток автоэлектронной эмиссии сильно зависит от зонной структуры графита. Ток в этом случае будет описываться формулой, аналогичной закону Фаулера–Нордгейма, но с другим предэкспоненциальным множителем. Последний будет зависеть квадратично от напряженности поля в сильных полях (стандартное поведение по закону Фаулера–Нордгейма) и линейно — в слабых полях. Была обнаружена сильная зависимость эмиссионного тока от межплоскостного расстояния в графите. Кроме того, получено аналитическое выражение, описывающее поведение автоэмиссионного тока в случае одностеночных углеродных нанотрубок, которое подтверждает более ранние численные результаты [46].

Предложенная ранее гамильтонова формулировка допированной носителями t - J -модели была расширена с учетом ограничений на область нефизических состояний. После учета этой важной составляющей стало ясно, что представление, использовавшееся раньше, и отличающееся от него спин-фермионное представление t - J -модели калибровочно связаны. Данное ограничение говорит о том, что t - J -модель может быть спроецирована на решеточную модель Кондо–Гейзенберга. Возможность подобной проекции указывает на важное физическое сходство между квазидвумерными тяжелыми фермионами и высо-

котемпературными полупроводниками. Физическим следствием представления является, в частности, малое количество кроссоверов поверхности Ферми при закрытии спиновой щели [47].

Модель для двух невырожденных полей в резонаторе, связанных посредством резервуара, была использована для описания рамановского рассеяния с образованием стоковского и антистоковского полей. Был обнаружен эффект квантового перепутывания стоковского и антистоковского полей вследствие их непрямого взаимодействия через фононный резервуар, и рассчитана степень квантового перепутывания в зависимости от начального состояния полей и фононного резервуара [48].

Развита микроскопическая теория электронного спектра и сверхпроводящего спаривания в рамках эффективной p - d -модели Хаббарда. Получены точные уравнения Дайсона для нормальных и аномальных функций Грина. Их решения найдены в приближении непересечения для матрицы собственной энергии. Вычислены зависимости электронной дисперсии, спектральных функций и поверхности Ферми от легирования и температуры, а также зависимость температуры сверхпроводящего перехода от степени легирования. При малом легировании наблюдается дугообразная поверхность Ферми и псевдощель в спектральной функции, которые сильно подавляют температуру сверхпроводящего перехода [49].

Зависимость Маккамбера и Стюарта тока вольта от параметра диссипации обобщена на случай системы внутренних джозефсоновских контактов в высокотемпературном сверхпроводнике. Ток в точке излома на верхней ветви исследован как функция параметров связи и диссипации в системе с различным числом контактов. Результаты моделирования данной зависимости и численные расчеты хорошо согласуются. Показано наличие эффекта соизмеримости и предсказано групповое поведение вольт-амперных характеристик для стэков с разным числом контактов. Было продемонстрировано, что зависимость тока в точке излома от параметров связи и диссипации дает метод определения моды продольной плазменной волны, возникающей в системе внутренних джозефсоновских контактов [50].

ДУБНЕНСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (DIAS-TN)

В 2007 г. была успешно продолжена работа в рамках проекта DIAS-TN. В частности, были организованы три школы и рабочее совещание: 5-я Зимняя школа по теоретической физике (28 января – 6 февраля), 11-е рабочее совещание «Теория нуклеации и ее применения» (1–30 апреля), междуна-

родная школа «Теория ядра и астрофизические приложения» (7–17 августа, совместно с Объединением им. Гельмгольца (Германия)), Международная летняя школа по современной математической физике (22–30 июля, совместно с Объединением им. Гельмгольца (Германия)).

Регулярно проводились семинары для студентов и аспирантов, поддерживался сайт DIAS-TH

(<http://theor.jinr.ru/~diastp/diasth/>), продолжалась видеозапись лекций.

РАЗВИТИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Введен в эксплуатацию мощный сервер, приобретенный в конце 2007 г. (dxcore.jinr.ru). Благодаря двум двухъядерным процессорам, 4-канальной подсистеме памяти объемом 16 ГБ и двум скоростным дискам новый сервер демонстрирует производительность, сравнимую с суммарной производительностью 4 двухпроцессорных серверов предыдущего поколения.

Парк персональных компьютеров ЛТФ расширен в результате установки 22 новых машин. Большая часть новых ПК оснащена двухъядерными процессорами, которые привнесли мощь многопроцессорных вычислений на уровень настольных компьютеров. Дополнительные точки доступа были установлены в беспроводной сети ЛТФ, что улучшило качество связи и расширило обслуживаемую площадь.

КОНФЕРЕНЦИИ, СОВЕЩАНИЯ, СОТРУДНИЧЕСТВО

В 2007 г. кроме школ, проводившихся в рамках DIAS-TH, лаборатория участвовала в организации следующих международных конференций и рабочих совещаний:

- международного совещания «Классические и квантовые интегрируемые системы» (21–26 января, Дубна);
- международного совещания «Логарифмическая конформная теория и статистическая механика» (4–8 июня, Дубна);
- XVI Международного коллоквиума «Интегрируемые системы и квантовые симметрии» (14–16 июня, Прага);
- рабочего совещания по сотрудничеству между ЛТФ и АРСТР (Корея) (18–23 июня, Дубна);
- международной конференции «Мюонный катализ» (18–21 июня, Дубна);
- международной конференции «Институт современных исследований — симметрии и спин» (8–14 июля, Прага);
- международного совещания «Суперсимметрии и квантовые симметрии» (SQS'07) (30 июля–4 августа, Дубна);
- XII Международного совещания по спиновой физике высоких энергий (3–7 сентября, Дубна).

Международное сотрудничество ЛТФ в 2007 г. было поддержано грантами полномочных представителей правительств Болгарии, Венгрии, Польши, Румынии, Словакии, Чехии и дирекции ОИЯИ. Сотрудничество с теоретиками Германии было поддержано программой «Гейзенберг–Ландау», с теоретиками Польши — программой «Боголюбов–Инфельд», с теоретиками Чехии — программой «Блохинцев–Вотруба» и с теоретиками Румынии — программой «Цицейка–Марков».

Ряд исследований был выполнен совместно с зарубежными учеными в рамках соглашений ОИЯИ–

INFN, ОИЯИ–IN2P3, а также по проектам, поддержанным грантами INTAS, РФФИ–DFG, РФФИ–CNRS. Продолжало действовать соглашение о сотрудничестве с теоретическим отделом ЦЕРН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baldicchi M. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V.99. P. 242001.
2. *Kotikov A. V. et al.* // *J. Stat. Mech.* 2007. V.0710. P. P10003.
3. *Gladyshev A. V., Kazakov D. I., Paucar M. G.* hep-ph/0710.2322v1; *SUSY07 Proc.* (submitted).
4. *Andonov A. et al.* // *Part. Nucl. Lett.* 2007. V. 4. P. 757; *Arbuzov A. et al.* // *Eur. Phys. J. C.* 2007. V. 51. P. 585; *Arbuzov A. B.* 0710.3639031. 2007; *JHEP.* 2008. 01 (submitted).
5. *Bystritskiy Yu. M., Kuraev E. A., Tomasi-Gustafsson E.* // *Phys. Rev. C.* 2007. V. 75. P. 015207.
6. *Dubnicka S., Dubnickova A. Z., Kuraev E. A.* // *Phys. Rev. D.* 2007. V. 75. P. 057901.
7. *Anikin I. V., Teryaev O. V.* // *Phys. Rev. D.* 2007. V. 76. P. 056007.
8. *Shirokov M. I., Naumov V. A.* // *Concepts Phys.* 2007. V. 4. P. 121; *Kuzmin K. S., Lokhtin K. S., Sinogovskiy S. I.* // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2007. V. 4. P. 477.
9. *Molodtsov S. V. et al.* hep-ph/0702178. 2007.
10. *Dorokhov A. E., Ivanov M. A.* // *Phys. Rev. D.* 2007. V. 75. P. 114007.
11. *Grosche C., Pogosyan G. S., Sissakian A. N.* // *Part. Nucl.* 2007. V. 38, No. 3. P. 587.
12. *Isaev A. P.* // *Theor. Mat. Phys.* 2007. V. 150. P. 187.
13. *Enriquez B., Khoroshkin S., Pakuliak S.* // *Commun. Math. Phys.* 2007. V. 276. P. 691;

- Khoroshkin S., Pakuliak S., Tarasov V.* // J. Geom. Phys. 2007. V. 57. P. 1713.
14. *Kazakov V., Sorin A. S., Zabrodin A.* // Nucl. Phys. B. 2008. V. 790. P. 345; hep-th/0703147. 2008.
 15. *Tyurin N. A.* // Math. Soc. Lecture Notes. London. 2007. V. 338. P. 279;
Tyurin N. A. // Teor. Math. Phys. 2007. V. 150. P. 325.
 16. *Delduc F., Ivanov E.* // Phys. Lett. B. 2007. V. 654. P. 200.
 17. *Ivanov E. A., Smilga A. V.* // JHEP. 2007. 0707. 036.
 18. *Bellucci S., Krivonos S., Sutulin A.* // Phys. Rev. D. 2007. V. 76. P. 065017.
 19. *Filippov A. T.* // Theor. Mat. Phys. 2007. V. 153. P. 422;
Filippov A. T. hep-th/0801.1312. 2007.
 20. *Fre P., Sorin A. S.* hep-th/0710.1059. 2007.
 21. *Fursaev D.* hep-th/0711.1221. 2007.
 22. *Gutschwager C., Ivanova T. A., Lechtenfeld O.* // J. High Energy Phys. 2007. V. 11. P. 052.
 23. *Chingangbam R. et al.* hep-th/0711.2122. 2007.
 24. *Barbashov B. M. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2007. V. 70. P. 191.
 25. *Nesterenko V. V.* // Phys. Rev. D. 2007. V. 75. P. 087703.
 26. *Lambrecht A. et al.* // Europhys. Lett. 2007. V. 77. P. 44006.
 27. *Tarpanov D. et al.* // Phys. At. Nucl. 2007. V. 70. P. 1402.
 28. *Jolos R. V., von Brentano P.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 024309.
 29. *Severyukhin A. P. et al.* // Ibid. V. 75. P. 064303.
 30. *Nazmitdinov R. G., Kvasil J., Tsvetkov A.* // Phys. Lett. B. 2007. V. 657. P. 159.
 31. *Bonneau L., Quentin P., Mikhailov I. N.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 75. P. 064313.
 32. *Sargsyan V. V. et al.* // Ibid. V. 76. P. 064604.
 33. *Zubov A. S. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 33. P. 223.
 34. *Lukyanov V. K. et al.* // Ibid. V. 33. P. 389.
 35. *Danilin B. V. et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 064612.
 36. *Belyaev V. B., Tater M., Truhlik E.* // Ibid. V. 75. P. 034608.
 37. *Kostykin V., Makarov K. A., Motovilov A. K.* // Trans. Amer. Math. Soc. 2007. V. 359. P. 77;
Albeverio S., Motovilov A. K., Selin A. V. // SIAM J. Matrix Anal. Appl. 2007. V. 29. P. 685.
 38. *Kartavtsev O. I., Malykh A. V.* // Pis'ma ZhETF. 2007. V. 86. P. 713; J. Phys. B. 2007. V. 40. P. 1429.
 39. *Khvorostukhin A. S., Toneev V. D., Voskresensky D. N.* // Nucl. Phys. A. 2007. V. 791. P. 180.
 40. *Titov A. I., Kampfer B.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 065211.
 41. *Bondarenko S. et al.* // Phys. At. Nucl. 2007. V. 70. P. 2054.
 42. *Ciofi degli Atti C. et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 055206.
 43. *Poghosyan V. S. et al.* // Phys. Lett. B. 2008. V. 659. P. 768.
 44. *Povolotsky A. M., Priezzhev V. B.* // J. Stat. Mech. 2007. P. P08018.
 45. *Loutsenko I. M., Spiridonov V. P.* // SIGMA. 2007. V. 3. P. 059.
 46. *Osipov V. A.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2008. V. 20. P. 035204.
 47. *Pepino R. T., Ferraz A., Kochetov E.* // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. P. 013803.
 48. *Chizhov A. V.* // JETP Lett. 2007. V. 85. P. 102.
 49. *Plakida N. M., Oudovenko V. S.* // Physica C: Superconductivity. 2007. V. 460–462. P. 993.
 50. *Shukrinov Yu. M., Mahfouzi F.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 157001.