

# ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. Н. Н. БОГОЛЮБОВА

В 2008 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 ла-

боратории является теоретическая поддержка экспериментальных исследований с участием ОИЯИ. Особое внимание уделялось привлечению к работе молодых исследователей, студентов и аспирантов.

## ПОЛЯ И ЧАСТИЦЫ

Исследования по теме «Поля и частицы» проводились в рамках проектов:

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

Поправки к полной ширине ортопозитрония порядка  $O(\alpha)$  и  $O(\alpha^3 \ln(\alpha))$  получены в замкнутой аналитической форме, позволяющей вычислить эти поправки с произвольной точностью [1]. Результат воспроизводит лучшие численные оценки в пределах их точности. Ортопозитроний является системой, удобной для прецизионной проверки справедливости квантовой электродинамики, и играет важную роль в атомной физике и физике элементарных частиц. Полученные в работе результаты имеют фундаментальное значение.

Рассмотрена полная деформация Ли–Страслера  $N = 4$  суперсимметричной теории Янга–Миллса (СЯМ). Исследованы условия, при которых теория будет конформно-инвариантной и конечной. Алгоритм корректирования констант связи в каждом порядке теории возмущения применен для построения семейства теорий, которые конформно-инвариантны до трехпетлевого приближения в не-

планарном пределе и до четырехпетлевого приближения в планарном. Найдены особые решения в планарном случае, которые исчерпываются условием на константы связи в однопетлевом порядке. Некоторые из найденных решений унитарно-эквивалентны бэта-деформированной  $N = 4$  СЯМ, другие решения являются новыми. Исследована возможность сохранения этих условий во всех порядках теории возмущения [2].

Была проанализирована возможность существования относительно легких заряженных суперчастиц в рамках минимальной суперсимметричной стандартной модели (МССМ). Предсказано существование долгоживущих суперпартнеров  $\tau$ -лептонов в так называемом режиме коаннигиляции пространства параметров МССМ. Сценарии с долгоживущими  $t$ -скварками и/или чарджино могут быть реализованы при большом отрицательном значении параметра мягкого нарушения суперсимметрии. Оценены сечения рождения таких частиц на ЛНС [3].

В определенной области пространства параметров МССМ исследована перспектива обнаружения сигнала от двух глюино. В этой области кандидатом на роль частицы темной материи является легчайшее стабильное нейтрино, аннигиляция которого дает естественное объяснение превышению потока

диффузных гамма-лучей над фоном, обнаруженному в эксперименте EGRET. Для отбора событий используется характерная картина процесса, где конечными продуктами распада каждого глюино являются  $b\bar{b}$ -пары и одна или две  $\ell\bar{\ell}$ -пары, а также нейтрально. Показано, что характерная сигнатура события данного процесса весьма перспективна для открытия глюино на LHC [4].

Были продолжены исследования партонных распределений, зависящих от поперечного спина и импульса, являющихся объектом изучения во многих современных и планируемых экспериментах, в частности, в спиновой программе ускорителя NICA. Исследовано партонное распределение ведущего твиста  $h_{1T}$  («pretzelocity»). Было отмечено интересное соотношение, справедливое в большинстве релятивистских моделей, когда pretzelocity равно разности распределений продольного и поперечного спина. Данные HERMES и BELLE использованы для извлечения функции Коллинза, проверки новых приближенных соотношений (типа соотношений Вандзура–Вилчека), связывающих  $h_{1L}^{(1)}(x)$ - и  $h_1(x)$ -предсказания для асимметрий  $A_{UL}^{\sin 2\phi}$  и  $A_{UT}^{\sin(3\phi-\phi_S)}$  в экспериментах CLAS12 и COMPASS [5].

Природа экспериментально наблюдаемых пар скалярных мезонов с сильно различающимися массами исследована в рамках инстантонной модели вакуума КХД. Показано, что коллективные возбуждения инстантонной жидкости могут обусловить неожиданно большое расщепление масс в скалярном секторе [6].

Исследовалась применимость понятий пертурбативной КХД в области, близкой к масштабу адронизации, т.е. ниже 1 ГэВ. Рассмотрена дополнительность между высшими порядками КХД и вкладами высшего твиста при анализе последних данных JLab по связанной с правилом сумм Бьеркена функции  $\Gamma_1^{p-n}(Q^2)$  при  $0,1 < Q^2 < 3$  ГэВ<sup>2</sup>. Для исключения полюса Ландау при  $Q = \Lambda \sim 400$  МэВ использовалась аналитическая теория возмущений (АТВ), недавно успешно примененная к анализу и количественному описанию спектра легких кваркониев в подходе Бете–Солпитера. Значения коэффициентов высшего твиста  $\mu_{2k}$ , полученные с использованием АТВ, демонстрируют лучшую сходимость, чем извлеченные в стандартной теории возмущений КХД. Достигнуто хорошее количественное описание данных JLab вплоть до  $Q \approx 350$  МэВ [7].

Изучены реакции квазиупругого рождения  $\Lambda^-$ ,  $\Sigma^-$ , и  $\Sigma^0$ -гиперонов при взаимодействиях антинейтрино с нуклонами, важные для экспериментов по исследованию нейтринных осцилляций. Получены наиболее общие формулы, связывающие структурные функции квазиупругого  $\nu N$ -рассеяния с (комплексными) формфакторами адронного тока, учитывающие массу конечного лептона и вклад нестандартных (нарушающих G-четность) токов второго

рода. Выполнен статистический анализ имеющихся ускорительных данных по полным и дифференциальным сечениям квазиупругого рассеяния  $\nu\mu$ . При стандартных предположениях извлечено среднемировое значение аксиальной массы  $M_A = 0,999 \pm 0,011$ , которое согласуется с результатами фитирования всех ускорительных данных по эксклюзивным и инклюзивным  $\nu N$ -реакциям [8].

Была продолжена работа по поиску прецизионных теоретических предсказаний для процессов, которые будут исследоваться на LHC в ЦЕРН. В частности, продолжены расчеты и численное моделирование радиационных поправок к процессам типа Дрелла–Яна (процессам одиночного рождения  $Z$ - и  $W$ -бозонов). Предложен новый систематический метод вычисления следующих за лидирующей КЭД-поправок, основанный на ренормгруппе и стратификации фазового пространства кинематических переменных [9].

Изучены ренормгрупповые свойства калибровочно-инвариантных партонных функций распределения, зависящих от поперечного импульса (TMD PDFs). В аксиальной калибровке получены сопоставимые аномальные размерности этих функций и установлена связь между дополнительными ультрафиолетовыми (УФ) расходимостями, являющимися артефактом светоподобной калибровки (либо вильсоновских линий, лежащих на световом конусе — в случае ковариантных калибровок), и особенностями вильсоновских экспонент, входящих в определение TMD PDFs. Установлено, что эффекты, связанные с нечетностью относительно обращения времени и ответственные за такие явления, как односпиновые асимметрии, проявляются уже на уровне аномальных размерностей в виде чисто мнимых вкладов от глауберовских глюонов. Предложено обобщенное определение TMD PDFs, свободное от нежелательных сингулярностей и включающее в себя дополнительный «мягкий» фактор, сингулярности которого в точности компенсируют нежелательные УФ-расходимости исходной функции. Получено уравнение эволюции, аналогичное уравнению Коллинза–Сопера, описывающее зависимость от дополнительного параметра, регуляризирующего расходимость глюонного пропагатора [10].

Изучен феномен дуальности в жестких эксклюзивных процессах, где может быть применима факторизация КХД. Рассмотрены процессы в скалярной  $\phi^3$ -модели, подобные двухфотонным процессам с рождением двух адронов в конечном состоянии. Определены два режима факторизации, каждый из которых связан с различным непертурбативным механизмом. Один механизм включает обобщенные амплитуды распределения твиста 3, а другой механизм связан с твистом 2 (лидирующим твистом) нового непертурбативного объекта — переходной амплитуды распределения [11].

Получены КХД-правила сумм для легкого тета-кварка. Они учитывают вклады двухпионного промежуточного состояния и прямых инстантонов. Анализ данных правил сумм приводит к выводу, что мезонное состояние  $f_0(600)$  может быть рассмотрено как четырехкварковое состояние в поле инстантона с довольно сильной связью с двухпионным состоянием. Предложен новый непертурбативный механизм для потери энергии быстрым партоном в кварк-глюонной плазме (КГП) при температуре выше температуры деконфайнмента. Он связан с взаимодействием партона со скалярными и псевдоскалярными глоболами в КГП. Показано, что данный механизм может играть доминирующую роль в наблюдаемом подавлении выхода струй в ядро-ядерных взаимодействиях. Предложен новый непертурбативный механизм для потери энергии быстрым партоном в кварк-глюонной плазме (КГП) при температуре выше температуры деконфайнмента, обусловленный взаимодействием партона со скалярными и псевдоскалярными глоболами в КГП [12].

Представление Меллина–Барнса было использовано для улучшения теоретической оценки массовых поправок к ширине редкого распада псевдоскалярного мезона в лептонную пару  $P \rightarrow \ell^+ \ell^-$ . Проведено полное суммирование вкладов вида  $\ln(m_i^2/\Lambda^2)(m_i^2/\Lambda^2)^n$  и  $(m_i^2/\Lambda^2)^n$  в амплитуду этого распада. Показано, что полный эффект от массовых поправок пренебрежимо мал для  $e^+e^-$ -канала

и составляет несколько процентов для  $\mu^+\mu^-$ -канала [13].

В рамках лоренц-ковариантной кварковой модели были вычислены формфакторы октет-октетных полуплептонных переходов барионов в предположении о факторизации вкладов валентных кварков и киральных эффектов. Был выполнен детальный анализ SU(3)-нарушающих поправок и представлены результаты расчетов ширин распадов и параметров асимметрии, включая эффекты конечных масс лептонов [14].

Киральная теория возмущений для числа ароматов  $N = 3$  с виртуальными фотонами была исследована в пределе, когда масса странного кварка много больше внешних импульсов и масс нестранных кварков. Была установлена связь электромагнитных низкоэнергетических констант  $C$  и  $k_i$  при  $N = 2$  и  $N = 3$ . Исследована их зависимость от массы странного кварка. Полученные соотношения могут быть полезными при более точном определении значений электромагнитных низкоэнергетических констант [15].

Атомная масса электрона определена с высокой точностью из сравнения теории [16] и эксперимента по лазерной спектроскопии атомов антипротонного гелия,  $A_r(e) = 0,00054857990881(91)[1,7 \cdot 10^{-9}]$ . Эта экзотическая атомная система открывает новые возможности для прецизионного измерения фундаментальных физических констант.

## СОВРЕМЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Исследования по теме были сосредоточены на следующих направлениях:

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

Представлен обзор недавних работ по суперсимметричному расширению модели Ландау квантовой частицы на плоскости во внешнем магнитном поле и ее  $S^2$ -обобщению. Суперсимметричные модели Ландау на плоскости инвариантны относительно супергруппы ISU(1|1) и представляют собой минимальное суперсимметричное расширение модели Ландау. Их общая замечательная черта состоит в существовании скрытой  $N = 2$  суперсимметрии, которая проявляется наиболее наглядно при переходе к специально определенному внутреннему произведению в пространстве квантовых состояний [17].

Суперконформные расширения  $d = 1$  систем типа Калоджеро были получены посредством применения калибровочной процедуры к U( $n$ )-изометрии матричных суперполевых моделей. Рассмотрены слу-

чай  $N = 1$ ,  $N = 2$  и  $N = 4$  суперсимметрий. Бозонный кор  $N = 1$  и  $N = 2$  моделей является стандартной конформной  $A_{n-1}$  системой Калоджеро, а  $N = 4$  модель содержит U(2)-спиновую систему Калоджеро [18].

Была построена наиболее общая  $N = 4$  суперконформная трансляционно-инвариантная 3-частичная система. Подходящий выбор базисов позволяет описать в рамках этой системы обычную  $A_2$ -модель Калоджеро,  $BC_2$ -,  $B_2$ -,  $C_2$ - и  $D_2$ -модели Калоджеро с  $N = 4$  суперконформной симметрией [19].

Иерархические соотношения для бетевских векторов были сформулированы на языке обратимых производящих рядов, принимающих значения в квантованной алгебре токов. На основе этого представления был получен новый тип иерархических соотношений для универсальных векторов Бете. Эти соотношения позволили получить максимально общие ограничения на параметры этих векторов, приводящие к простому правилу перестановки универсаль-

ной матрицы перехода и универсального бетевского вектора. Это правило является алгебраическим обновлением иерархического анзаца Бете [20].

Дана новая конструкция примитивных идемпотентов для алгебр Гекке, ассоциированных с симметрической группой. Идемпотенты определяются как произведения некоторых рациональных функций, возникающих в новой версии фьюжион-процедуры для алгебр Гекке. Нормирующие факторы, получающиеся в рамках этой процедуры, связаны со следами Окнеану–Маркова для построенных идемпотентов [21].

Определены неканонические духовые и антидуховые переменные для нелинейных алгебр типа  $W$ -алгебр. В терминах этих переменных построен БРСТ-оператор для  $W_3$ - и  $W_3^{(2)}$ -алгебр, имеющий каноническую кубическую форму. Некоторые ингредиенты БРСТ-конструкции для квантовых алгебр Ли применены для более широкого класса квадратичных алгебр связей. Важной чертой этой конструкции является использование неканонической алгебры духов, которая в общем случае представляется алгеброй Николса, определяемой с помощью специальных элементов (элементов перетасовок) в кольце группы кос. В этом кольце построены мультипликативные аналоги элементов перетасовок, с помощью которых строятся новые градуированные ассоциативные алгебры («b-shuffle» алгебры) [22].

Найдены новые неторические лагранжевы слое-ния двумерной кубики, индуцируемые бирациональным отображением. Предложен новый метод построения торических и неторических лагранжевых слое-ний торических многообразий Фано [23].

Недавно установленная связь между статическими, космологическими и волновыми решениями в теории гравитации распространена на новый класс интегрируемых двумерных гравитационных моделей, в которых скалярные поля материи описываются уравнениями Тоды. Детально рассмотрены простейшие случаи этих уравнений и на этой основе показано, как можно получить простым путем волновые решения для системы уравнений Тоды общего вида. В дилатонной теории гравитации эти решения описывают нелинейные волны, взаимодействующие с гравитационным полем [24].

Показано, что собственные значения семейства  $Q$ -операторов Бакстера для суперсимметричных 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 [25].

Рассмотрено описание эволюции Вселенной в ранние и поздние моменты времени в рамках моди-

фицированной теории гравитационного поля, взаимодействующего неминимальным путем с полями материи. Такие  $F(R)$  ( $F(G)$ )-теории гравитации, в которых нет неминимального взаимодействия с материей, в принципе реалистичны, они удовлетворяют локальным тестам и воспроизводят  $\Lambda$  CDM эру (эру холодной темной материи) в эволюции Вселенной. Показано, что при специальном выборе функции неминимального гравитационного взаимодействия в рамках  $F(R)$ -моделей можно описать инфляцию и космическое ускорение. Интересно отметить, что при таком описании скалярные поля материи, поддерживающие эру инфляции, оказываются гравитационно экранированными в более поздние моменты времени [26].

Были рассмотрены некоторые физические приложения алгебраического подхода к теории гравитации с ковариантными и контравариантными метрикой и связностями. Предложено учесть поправки к объему дополнительных измерений, которые обусловлены неевклидовым характером пространства-времени Лобачевского. Было показано, что в модели генерирования массы хиггса за счет введения двух бран (видимой и невидимой) любой массе на видимой бране должно соответствовать несколько физических масс. Одновременно были получены алгебраические уравнения, описывающие 4-мерные шварцшильдовские черные дыры в многомерных бранных моделях [27].

Были построены решения типа кинков и «отскоков» в  $pp$ -волновой матричной модели и матричном аналоге  $\phi^4$ -модели. Явные решения типа инстантонов, дионов, монополей и цепочек монополей-антимополей были построены в теории Янга–Миллса на пространствах  $\mathbf{R}^2 \times S^2$  и  $\mathbf{R} \times S^3$  с помощью редукции по группам симметрий к вышеупомянутым матричным моделям. Показано, что уравнения  $pp$ -волновой суперсимметричной матричной модели могут быть переписаны в форме уравнений Лакса, т. е. являются интегрируемыми [28].

При построении квантовой теории поля с учетом кривизны пространства-времени широко используются методы спектральной геометрии и спектрального суммирования. В последнее время эта техника нашла эффективное применение и при расчете вакуумных эффектов в задачах нанозифики. Было исследовано поведение казимировских сил для двух различных зеркал, при этом материальные характеристики границ описывались моделями Лоренца и Друде. Аналитически были получены асимптотики этих сил на больших и малых расстояниях и выявлена связь этих асимптотик с взаимодействием поверхностных плазмонов, что позволило обсудить условия, при которых казимировское притяжение в данной задаче может смениться отталкиванием [29].

В 2008 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.

Подход, основанный на численной сепарабелизации взаимодействия типа Скирма в рамках процедуры «Хартри–Фок–БКШ + квазичастичное ПСФ», обобщен таким образом, чтобы учесть остаточное взаимодействие в канале частица–частица. В качестве примера с одним и тем же набором параметров модели рассчитаны энергии и вероятности возбуждения  $2_1^+$ -уровней в четно-четных нуклидах  $^{126-130}\text{Pd}$ ,  $^{124-132}\text{Cd}$ ,  $^{124-134}\text{Sn}$ ,  $^{128-136}\text{Te}$ ,  $^{134-138}\text{Xe}$ . Взаимодействие в канале частица–частица до некоторой степени ослабляет коллективность колебательных возбуждений. Изменения энергий  $E(2_1^+)$  и  $B(E2)$ -величин в цепочках изотопов и изотонов описываются правильно. Предсказана структура уровней  $2_1^+$  в ядрах  $^{126-130}\text{Pd}$  и  $^{124-132}\text{Cd}$ . Кроме того, обнаружено, что состояние  $2_4^+$  в  $^{130}\text{Te}$ , вероятно, является состоянием смешанной симметрии [30].

Исследованы интегральные характеристики изовекторного гигантского дипольного резонанса (ГДР) в деформированных ядрах из областей редких земель, актинидов и изотопических цепочек сверхтяжелых элементов  $Z = 102, 114, 120$ . Расчеты проводились в рамках самосогласованного ПСФ с сепарабелизацией и силами Скирма SLyб. Расчеты хорошо описывают экспериментальные данные в ядрах редких земель и актинидах. Положение пика резонанса следует оценкам коллективных моделей, демонстрируя скорее объемный характер возбуждения в ядрах редких земель и смесь объемного и поверхностного типов возбуждений в актинидах и сверхтяжелых ядрах. Ширина ГДР в основном определяется фрагментацией Ландау, на величину которой сильно влияет деформация ядра. Деформационное расщепление ГДР обуславливает около 1/3 его ширины [31].

Структура низколежащих состояний ядер  $^{188,190,192}\text{Os}$  исследована в рамках квазичастично-фононной модели ядра. Расчеты хорошо объясняют свойства нижайших полос с  $K^\pi = 2^+$ ,  $K^\pi = 4^+$  и ряда низколежащих полос с  $K^\pi = 0^+$ . С хорошей точностью воспроизведены характеристики многочисленных  $0^+$ -уровней. Характер изменения вероятности  $E2$ -перехода и сечения реакции двухнуклонной передачи в зависимости от массового числа, а также

анализ микроскопической структуры  $0^+$ -состояний указывают на изменение формы ядра при переходе от  $^{188}\text{Os}$  к  $^{192}\text{Os}$ . Особое внимание было уделено уровням  $4_3^+$ . Показано, что в их структуре присутствуют большая компонента « $2\gamma$ -фона» и еще большая однофононная гексадекапольная компонента. Такая смесь объясняет наблюдаемые и, на первый взгляд, противоречивые свойства этих уровней в изотопах Os [32].

Гамильтониан Бора с тремя разными массовыми коэффициентами был применен для описания сильнодеформированных аксиально-симметричных ядер. Показано, что этот гамильтониан применим, когда коллективность вибрационных мод достаточно мала, их энергии возбуждения малы, а  $E2$ -переходы очень сильны [33].

В связи с появлением новых экспериментальных данных проведены новые расчеты долин на поверхности потенциальной энергии (ППЭ) ядра  $^{226}\text{Th}$ . В настоящих расчетах при минимизации в многомерном пространстве параметров деформации были учтены деформации от 1-й до 21-й. В качестве дополнительных ограничений на форму ядра предполагалось, что сохраняются его вытянутость (или квадрупольный момент) или асимметрия (характеризуемая величиной октупольного момента) и толщина шейки. Оказалось, что процесс деления может развиваться вдоль трех долин на ППЭ, что является результатом большей гибкости настоящей параметризации формы делящегося ядра. Благодаря этому удастся проследить более тонкие детали ППЭ по сравнению с другими расчетами. В каждой из трех долин форма ядра различна из-за деформаций высокого порядка. Расчеты качественно объясняют основные экспериментальные данные о модах деления ядра  $^{226}\text{Th}$  [34].

В связи с планируемыми экспериментами выполнены оценки сечений образования ядер нейтронно-избыточных изотопов элементов Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, и Ti в следующих реакциях многонуклонной передачи диффузного типа:  $^{48}\text{Ca}(64 \text{ МэВ/нуклон}, 140 \text{ МэВ/нуклон}) + ^{181}\text{Ta}$  и  $^{48}\text{Ca} + ^{\text{nat}}\text{W}$ . Процесс нуклонной передачи трактовался как диффузия двойной ядерной системы (ДЯС) в координатах зарядовой и массовой асимметрии, которые задавались числом протонов и нейтронов легкой компоненты ДЯС. Хорошее согласие теоретических результатов с уже имеющимися экспериментальными данными подтверждает адекватность механизма многонуклонной передачи в почти-периферических столкновениях при промежуточных энергиях. Предсказанные значения сечений образования новых экзотических изотопов  $^{47}\text{P}$ ,  $^{51,53,55,57}\text{Cl}$ ,  $^{52,54}\text{Ar}$ ,  $^{56,58,60}\text{Ca}$ ,  $^{59,61,63}\text{Sc}$  и  $^{62,64,66}\text{Ti}$  оказались

больше 0,1 пб. Таким образом, эти ядра могут быть синтезированы и зарегистрированы при существующих экспериментальных возможностях. Обсуждена глобальная зависимость сечения образования в реакциях с пучком  $^{48}\text{Ca}$  от зарядового (массового) числа ядра-мишени [35].

Образование новых нейтронно-дефицитных изотопов элементов U, Np, Pu, Am, Cm и Cf в различных реакциях полного слияния проанализировано в модели двойной ядерной системы. Предсказаны сечения формирования указанных изотопов в испарительных каналах  $xn$  и  $\alpha xn$ . При этом не проводилось специальной подгонки под выбранный испарительный канал. Девозбуждение компаунд-ядра описывалось в статистической модели с плотностью уровней, рассчитанной по модели ферми-газа. Результаты хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Предложено использовать асимметричные реакции с ядрами Na, Mg, Al, Si и S, а также реакции с Ca, чтобы расширить область нейтронно-дефицитных изотопов U, Np, Pu, Am, Cm и Cf с сечениями образования выше уровня в 1 нб. Также обсуждены времена жизни относительно альфа-распада нейтронно-дефицитных ядер актинидов [36].

Изучены низкоэнергетические резонансы в системах  $\Lambda$ -нуклоны. Возможные связанные и резонансные состояния гиперъядерных систем  $\Lambda nn$  и  $\Lambda\Lambda n$  определялись как нули соответствующих трехчастичных функций Йоста, рассчитанных в минимальном приближении гиперсферического подхода с локальными двухчастичными  $S$ -волновыми потенциалами для  $nn$ -,  $\Lambda n$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействий. В результате определения положения полюса  $S$ -матрицы на втором (нефизическом) листе поверхности комплексной энергии удалось показать, что у системы  $\Lambda\Lambda n$  есть очень широкое резонансное состояние вблизи порога. Положение этого резонанса очень чувствительно к потенциалу  $\Lambda n$ . Связанное состояние системы  $\Lambda nn$  появляется только в том случае, если двухчастичные потенциалы умножить на 1,5. В системе  $\Lambda nn$  окологороговый резонанс появляется только с таким  $\Lambda\Lambda$ -потенциалом, с которым гиперъядро  $\Lambda\Lambda$   $^6\text{He}$  оказывается «пересвязанным» [37].

Исследованы шестимерные уравнения Шредингера и Фаддеева для трехчастичных систем с двухчастичными центральными потенциалами более общего типа, нежели кулоновский. Регулярные общие и частные физические решения этих уравнений были представлены в виде бесконечных рядов по целым степеням расстояния между одной из частиц и центром масс двух других и искомым функций других трехчастичных координат. В угловом базисе, образованном сферическими и бисферическими гармониками или симметризованными  $D$ -функциями Вигнера, построение этих функций было сведено к решению простых алгебраических рекур-

рентных уравнений. Для проекций физических решений уравнений Шредингера и Фаддеева на угловые базисные функции построены граничные условия в пределе линейной трехчастичной конфигурации [38].

Развит сеточный метод изучения многоканального рассеяния атомов в волноводах с гармоническим удерживающим потенциалом. Метод использован для анализа поперечных возбуждений и девозбуждений, а также процессов резонансного рассеяния. Исследованы столкновения одинаковых и различных атомов как бозонного, так и фермионного типов в гармонических ловушках, допускающих отделение движения центра масс. В пределе нулевой энергии и режиме единственной моды хорошо воспроизводятся известные индуцированные конфайнментом резонансы в бозонных, фермионных и гетероядерных столкновениях. Кроме того, были идентифицированы и проанализированы последовательности резонансов Фешбаха. В многоканальном рассеянии выявлен дуальный индуцированный конфайнментом резонанс, вызывающий полное квантовое подавление рассеяния атомов [39].

Показано, что в рамках квазичастичного приближения случайной фазы (QRPA) и перенормированного QRPA, основанных на боннском потенциале нуклон-нуклонного взаимодействия, конкуренция спаривания и нейтрон-протонного взаимодействия приводит к практически равному нулю матричному элементу безнейтринного двойного бета-распада при расстоянии между ядрами больше 2–3 фм [40].

Усовершенствована предложенная ранее авторами версия модели релятивистского среднего поля, в которой массы адронов и константы связи зависят от  $\sigma$ -мезонного поля (SHMC). Члены, отвечающие за бозонные возбуждения, были включены в уравнения движения и затем в рассчитанные термодинамические величины. Поправки к эффективным массам возбуждений  $\sigma$ ,  $\omega$ ,  $\rho$  и нуклона оказались небольшими для  $T \leq 100$ – $120$  МэВ и растущими с температурой. Поправки к термодинамическим характеристикам остаются умеренными даже при более высоких температурах. С учетом бозонных возбуждений в уравнениях движения квазичастичная SHMC точно удовлетворяет условиям термодинамической согласованности. Влияние ширины частиц было оценено в предположении, что они имеют вакуумные значения, но зависят от энергии. Качественных изменений в поведении системы эти поправки не вызвали [41].

Предложены многограновые сепарабельные ядра нейтрон-протонного взаимодействия в интегральном уравнении Бете–Солпитера для расцепленных  $S$  и  $P$  парциальных волн (с  $J = 0, 1$ ) и связанных  $^3S_1^+ - ^3D_1^+$ -состояний. Рассмотрены два различных метода построения релятивистского обоб-

шения изначально нерелятивистских формфакторов типа Ямагучи, параметризующих эти ядра. Показано, что различия в описании фазовых сдвигов и низкоэнергетических параметров, возникающие при использовании разных методов, невелики. Успешно описаны экспериментальные фазовые сдвиги вплоть до энергий 3 ГэВ в лабораторной системе координат, равно как и низкоэнергетические параметры [42].

Эксклюзивный процесс  ${}^3\text{He}(e, e\gamma){}^2\text{H}$  проанализирован с использованием реалистических малотельных волновых функций и взаимодействия AV18, а взаимодействие в конечном состоянии учтено в приближении эйконала с тем, чтобы описать много-

кратное перерассеяние выбитого нуклона на нуклонах двухтельного спектатора. Расчеты были выполнены в импульсном пространстве, так что нуклонный электромагнитный ток мог быть сохранен в полностью ковариантном виде, благодаря чему удалось избежать нерелятивистской редукции и приближения факторизации. Результаты расчетов, которые сравнивались с недавними экспериментальными данными из JLab, показывают, что лево-правая асимметрия явно зависит от многократного рассеяния в конечном состоянии и демонстрирует неадекватность приближения факторизации для «отрицательных» и больших ( $\geq 300$  МэВ/с) значений потерянного импульса [43].

## ТЕОРИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

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

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

Они велись в двух основных направлениях: изучение термодинамических свойств сильнокоррелированных систем — модели Хаббарда, двумерной  $t$ – $J$ -модели, примесной модели Андерсона; теоретическое описание новых материалов — высокотемпературных сверхпроводников, графена и захваченных в оптические решетки холодных атомов. Отметим, что исследование последних, начавшееся в 2008 г., является весьма перспективным с точки зрения возможного их применения в квантовых компьютерах.

Сформулирован новый подход к исследованию сильнокоррелированных электронных систем. В отличие от прежних методов предлагаемый подход контролируемым образом учитывает локальные электрон-электронные корреляции. В рамках предложенного подхода установлена связь  $t$ – $J$ -модели сильнокоррелированных электронов и решеточной модели Гейзенберга–Кондо тяжелых фермионов. В рамках этого соответствия качественно объяснены недавние экспериментальные результаты о кроссовере ферми-поверхности в высокотемпературных сверхпроводниках [45].

В рамках теоретико-полевой модели исследованы электронные свойства графена с семи- или восьмиугольными кольцами. Поверхность графена с введенными топологическими дефектами считается «конусом с отрицательной кривизной» с бесконечной отрицательной (гауссовой) кривизной в центре. Вычи-

слена плотность состояний для случаев одного семи- и восьмиугольника, а также для пары семиугольников с различной морфологией. Плотность состояний при энергии Ферми равна нулю для всех случаев, кроме двух семиугольников с ненулевым фактором трансляции [46].

Проведено численное моделирование когерентной спиновой релаксации в наномангнетиках, составленных из молекул с большим спиновым магнитным моментом. Таковую когерентную спиновую динамику можно реализовать с помощью электрической цепи, взаимодействующей с магнетиком. Когерентная спиновая релаксация является ультрабыстрым процессом со временем релаксации на порядок короче времени поперечного спинового дефазирования. Проанализировано влияние различных параметров системы. Исследовано влияние формы образца на спиновую релаксацию [47].

Рассмотрена система холодных атомов, захваченных в оптической решетке с двухъямным потенциалом в узлах. Выведено псевдоспиновое представление для эффективного гамильтониана. В равновесном состоянии система обнаруживает две фазы — упорядоченная и неупорядоченная. Фазовый переход второго рода между фазами возникает при изменении или температуры, или параметров системы. Коллективные спиновые возбуждения имеют щель, которая исчезает в точке фазового перехода. Изучена динамика атомов, в случае когда они захвачены в решетке, первоначально находящейся в неравновесном состоянии. Показано, что временная эволюция атомов, в отличие от случая термодинамического равновесия, не может быть описана в приближении среднего поля, так как последнее приводит к структурно-неустойчивой динамической системе. Необходимо

более точное описание, учитывающее эффекты закрутки [48].

Разработана самосогласованная перенормировочная теория спиновых флуктуаций в парамагнитной шпинели  $\text{LiV}_2\text{O}_4$ . В семействе оксидов переходных металлов этот состав — единственная металлическая система с ярко выраженными тяжелофермионными свойствами. В частности, в пределе низких температур  $T$  экспериментально обнаружены аномально большие величины коэффициента теплоемкости  $g = C/T$  и магнитной восприимчивости  $\chi_s$ . Ранее была предложена модель [Yushankhai V. et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 085111], объясняющая такое аномальное поведение как следствие сильного вырождения основного состояния и близости системы к магнитной неустойчивости при  $T \rightarrow 0$ . Низкоэнергетические «критические» антиферромагнитные флуктуации в парамагнитном основном состоянии обусловлены сильными электронными корреляциями и геометрической фрустрацией решетки ионов ванадия. Эволюция спиновых флуктуаций с изменением температуры и внешнего давления описана в рамках самосогласованной перенормировочной теории с учетом взаимодействия спин-флуктуационных мод. В работах [49] подробно обсуждаются также экспериментальные данные для  $\text{LiV}_2\text{O}_4$ , полученные методами неупругого рассеяния нейтронов и ядерного магнитного резонанса. Но основе предложенной теории дана их теоретическая интерпретация.

Обнаружена тонкая структура области точки излома на вольт-амперных характеристиках системы связанных внутренних джозефсоновских контактов в

слоистых сверхпроводниках. Установлено соответствие между особенностями на вольт-амперной характеристике и характером осцилляции электрического заряда в сверхпроводящих слоях и объяснено происхождение тонкой структуры [50].

Исследованы электронный спектр и сверхпроводимость модели Хаббарда в рамках уравнения Дайсона в приближении непересекающихся диаграмм для массового оператора. Вычислена зависимость температуры сверхпроводящего перехода в  $\text{CuO}_2$  от легирования в приближении слабой связи. Обсуждается случай сильной связи [51].

Построено семейство непрерывных биортогональных функций, связанных с эллиптическим аналогом гипергеометрической функции Гаусса, зависящим от восьми параметров и двух базисных переменных. Для этого использовались эллиптический бета-интеграл и интегральный аналог цепочек Бэйли. Найдена связь этой конструкции с эллиптической алгеброй Складина. Построено два эллиптических аналога модулярного дубля Фаддеева [52].

Путем последовательных отображений модель Бернулли для сравнения случайных последовательностей интерпретируется в терминах полностью асимметричного случайного процесса с исключениями в дискретном времени и с последовательной динамикой. Использование анзаца Бете позволяет получить точное аналитическое выражение для распределения наибольшей общей подпоследовательности двух случайных последовательностей. Эта задача возникает, например, при расшифровке и сравнении генетических кодов [53].

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

В 2008 г. была продолжена работа в рамках проекта DIAS-TN. В частности, были организованы четыре школы и рабочее совещание: 5-я зимняя школа по теоретической физике (26 января — 5 февраля), 12-е рабочее совещание «Теория нуклеации и ее применения» (1–30 апреля), международная школа «Плотная ядерная материя в столкновениях тяжелых ионов и астрофизике» (14–26 июля, совместно с Объеди-

нением им. Гельмгольца (Германия)), 2-я международная школа «Физика тяжелых кварков» (11–21 августа, совместно с Объединением им. Гельмгольца (Германия)), международная летняя школа по современной математической физике (7–17 сентября). Регулярно проводились семинары для студентов и аспирантов, поддерживался сайт DIAS-TN (<http://theor.jinr.ru/~diastp/diasth/>), продолжалась видеозапись лекций.

## РАЗВИТИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Для обновления парка ЛТФ приобретено 10 новых персональных компьютеров на двухъядерных процессорах Intel Core 2 E8400. С 4 до 8 Гбайт расширен размер оперативной памяти на главном сервере лаборатории [theor.jinr.ru](http://theor.jinr.ru)

и на сервере баз данных [thproxy.jinr.ru](http://thproxy.jinr.ru). До 300 Гбайт увеличено дисковое пространство для домашних директорий пользователей. К центральному стеку коммутаторов ЛТФ добавлен гигабитный коммутатор.



В 2008 г. кроме школ, проводившихся в рамках DIAS-ТН, лаборатория участвовала в организации 10 международных конференций и рабочих совещаний, проходивших в Дубне, Ереване, Протвино и Праге:

- Международного совещания «Классические и квантовые интегрируемые системы», совместно с ИФВЭ (21–24 января, Протвино, Россия);

- Международной конференции «Симметрии в физике», к 90-летию со дня рождения Я. А. Смодинского (27–29 марта, Дубна);

- XVII Международного коллоквиума «Интегрируемые системы и квантовые симметрии» (19–21 июня, Прага, Чешская Республика);

- XIII Международной конференции «Избранные проблемы современной теоретической физики», к 100-летию со дня рождения Д. И. Блохинцева (1908–1979) (23–27 июня, Дубна);

- Международного совещания по сотрудничеству между ЛТФ и АРСТР (Южная Корея) в области теоретической физики (25–29 июня, Пхохан, Южная Корея);

- Международной конференции «Дубна–на-но’2008» (7–11 июля, Дубна);

- XXVII Международного коллоквиума по теоретико-групповым методам в физике, совместно с Ереванским ГУ (13–19 августа, Ереван, Армения);

- Международной конференции «Ренормгруппа и связанные вопросы» (1–6 сентября, Дубна);

- XIX Балдинского международного семинара по проблемам физики высоких энергий «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика» (29 сентября — 4 октября, Дубна);

- 3-го совещания «Физическая программа проекта NICA» (5–6 ноября).

Международное сотрудничество ЛТФ в 2008 г. было поддержано грантами полномочных представителей правительств Болгарии, Венгрии, Словакии, Польши, Румынии, Чехии и дирекции ОИЯИ. Сотрудничество с теоретиками Германии проходило при поддержке программы «Гейзенберг–Ландау», с теоретиками Польши — программы «Боголюбов–Инфельд», с теоретиками Чехии — программы «Блохинцев–Вотруба» и с теоретиками Румынии — программы «Цицейка–Марков».

Ряд исследований был выполнен совместно с зарубежными учеными в рамках соглашений ОИЯИ–INFN, ОИЯИ–IN2P3 и по проектам, поддержанным грантами INTAS, РФФИ–DFG, РФФИ–CNRS. Продолжает действовать соглашение о сотрудничестве с теоретическим отделом ЦЕРН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kniehl B. A., Kotikov A. V., Veretin O. L. // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. P. 193401.
2. Bork L. V. et al. // *JHEP.* 2008. V. 0804. P. 003.
3. Gladyshev A. V., Kazakov D. I., Paucar M. G. // *Proc. of 15th Intern. Conf. on Supersymmetry and the Unification of Fundamental Interactions (SUSY07).* 2008. P. 338; hep-ph/0811.2911. 2008.
4. Bednyakov V. A. et al. // *Part. Nucl., Lett.* 2008. V. 5, No. 6(148). P. 874–889; *Phys. At. Nucl.* 2009. V. 72. P. 1.
5. Avakian H. et al. // *Phys. Rev. D.* 2008. V. 77. P. 014023; Avakian H. et al. // *Ibid.* V. 78. P. 114024; Efremov A. V. et al. Presented at the 18th Intern. Spin Phys. Symp., Charlottesville, Virginia, USA, Oct. 6–11, 2008. hep-ph/0812.3246. 2008.
6. Zinovjev G. M. et al. // *Yad. Fiz.* 2008. V. 71. P. 334.
7. Pasechnik R. S., Shirkov D. V., Teryaev O. V. // *Phys. Rev. D.* 2008. V. 78. P. 071902.
8. Kuzmin K. S., Lyubushkin V. V., Naumov V. A. // *Eur. Phys. J. C.* 2008. V. 54. P. 517.
9. Arbuzov A. B., Sadykov R. R. // *ZhETF.* 2008. V. 106. P. 488; Arbuzov A. B. et al. // *Eur. Phys. J. C.* 2008. V. 54. P. 451; Arbuzov A. B., Scherbakova E. S. // *Phys. Lett. B.* 2008. V. 660. P. 37.
10. Cherednikov I. O., Stefanis N. G. // *Nucl. Phys. B.* 2008. V. 802. P. 146; *Phys. Rev. D.* 2008. V. 77. P. 094001.
11. Anikin I. V., Teryaev O. V. // *Fizika B.* 2008. V. 17. P. 151.
12. Lee H. J., Kochelev N. I. // *Phys. Rev. D.* 2008. V. 78. P. 076005; Min D. P., Kochelev N. I. // *Phys. Rev. C.* 2008. V. 77. P. 014901.
13. Dorokhov A. E., Ivanov M. A. // *JETP Lett.* 2008. V. 87. P. 531.
14. Faessler A. et al. // *Phys. Rev. D.* 2008. V. 78. P. 094005.
15. Haefeli C., Ivanov M. A., Schmid M. // *Eur. Phys. J. C.* 2008. V. 53. P. 549.
16. Korobov V. I. // *Phys. Rev. A.* 2008. V. 77. P. 042506.
17. Ivanov E. // *Theor. Math. Phys.* 2008. V. 154. P. 349.
18. Fedoruk S., Ivanov E., Lechtenfeld O. hep-th/0812.4276. 2008.
19. Bellucci S., Krivonos S., Sutulin A. // *Nucl. Phys. B.* 2008. V. 805. P. 24.
20. Khoroshkin S. M., Pakuliak S. Z. // *SIGMA.* 2008. V. 4. P. 081.
21. Isaev A. P., Molev A. I., Oskin A. F. // *Lett. Math. Phys.* 2008. V. 85. P. 79.
22. Isaev A. P., Krivonos S. O., Ogievetsky O. V. // *J. Math. Phys.* 2008. V. 49. P. 073512; math-ph/0807.1820. 2008; Isaev A. P., Ogievetsky O. V., Braids M. math-ph/QA/0812.3974. 2008.
23. Tiurin N. A. // *Proc. of Steklov MIRAS.* 2009. V. 264 (in press).
24. de Alfaro V., Filippov A. T. // *Proc. of «QUARKS-2008», Sergiev Posad, May 23–29, 2008 (submitted);* hep-th/0811.4501. 2008.
25. Kazakov V., Sorin A., Zabrodin A. // *Nucl. Phys. B.* 2008. V. 790. P. 345.

26. *Nojiri S., Odintsov S. D., Tretyakov P. V.* // Prog. Theor. Phys. Suppl. 2008. V.172. P. 81.
27. *Dimitrov B. G.* hep-th/0810.1501. 2008.
28. *Popov A. D.* // Phys. Rev. D. 2008. V. 77. P. 125026;  
*Popov A. D.* // Mod. Phys. Lett. A (in press);  
hep-th/0804.3845. 2008.
29. *Lambrecht A., Pirozhenko I.* // Phys. Rev. A. 2008. V. 77. P. 013811.
30. *Severyukhin A. P., Voronov V. V., Nguyen Van Giai* // Phys. Rev. C. 2008. V. 77. P. 024322.
31. *Kleinig W. et al.* // Ibid. V. 78. P. 044313.
32. *Lo Iudice N., Sushkov A. V.* // Ibid. P. 054304.
33. *Jolos R. V., von Brentano P.* // Ibid. V. 77. P. 064317.
34. *Pashkevich V. V., Rusanov A. Ya.* // Nucl. Phys. A. 2008. V. 810. P. 77.
35. *Adamian G. G. et al.* // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. P. 024613.
36. *Adamian G. G. et al.* // Ibid. P. 044605.
37. *Belyaev V. B., Rakityansky S. A., Sandhas W.* // Nucl. Phys. A. 2008. V. 803. P. 210.
38. *Pupyshev V. V.* // Theor. Math. Phys. 2008. V. 155. P. 862.
39. *Saeidian S., Melezhhik V. S., Schmelcher P.* // Phys. Rev. A. 2008. V. 77. P. 042721.
40. *Simkovic F. et al.* // Phys. Rev. C. 2008. V. 77. P. 045503.
41. *Khvorostukhin A., Toneev V., Voskresensky D.* // Nucl. Phys. A. 2008. V. 813. P. 313.
42. *Bondarenko S. G. et al.* // JETP Lett. 2008. V. 82. P. 753; arXiv: 0810.4470v1. 2008.
43. *Ciofi degli Atti C., Kaptari L. P.* // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 122301.
44. *Doiron-Leyraud et al.* // Nature. 2007. V. 477. P. 565.
45. *Pepino R., Ferraz A., Kochetov E.* // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. P. 035130.
46. *Kolesnikov D. V., Osipov V. A.* // Pisma ZhETP. 2008. V. 87. P. 487.
47. *Yukalov V. I., Henner V. K., Kharebov P. V.* // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. P. 134427.
48. *Yukalov V. I., Yukalova E. P.* // Phys. Rev. A. 2008. V. 78. P. 063610.
49. *Yushankhai V., Thalmeier P., Takimoto T.* // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. P. 125126; J. Phys.: Cond. Matt. V. 20. 2008. P. 465221.
50. *Shukrinov Yu. M., Mahfouzi F., Suzuki M.* // Phys. Rev. B. 2008. V. 78. P. 134521.
51. *Plakida N. M., Oudovenko V. S.* // Cond. Matt. Phys. 2008. V. 11. P. 495.
52. *Spiridonov V. P.* // Algebra and Analysis. 2008. V. 20. P. 154; Usp. Matem. Nauk. 2008. V. 63. P. 3.
53. *Priezzhev V. B., Schutz G. V.* // J. Stat. Mech. 2008. P. 09007.