

# ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ им. Н. Н. БОГОЛЮБОВА

В 2006 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 явля-

ется теоретическая поддержка экспериментальных исследований, проводимых с участием Объединенного института. 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.

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

В преддверии пуска ускорителя LHC, в рамках подготовки к поиску суперсимметрии, проведен анализ пространства параметров минимальной суперсимметричной Стандартной модели с учетом последних астрофизических данных по количеству темной материи. Предложена интерпретация данных по потоку диффузных гамма-лучей как сигнала от аннигиляции темной материи в гало Галактики. Показано, что эта интерпретация допускает суперсимметричное толкование, и получена оценка массы легкой суперсимметричной частицы в районе 60 ГэВ. Найдена область пространства параметров, совместная с такой интерпретацией. В этой области вычислены сечения рождения суперпартнеров на LHC. Рассмотрены наиболее вероятные процессы, а также процессы с малым фоном. Построены распределения по недостающему поперечному импульсу, которые являются главным ин-

струментом идентификации суперсимметричных частиц [1].

В  $MS$ -подобных схемах перенормировки теорема Appelkvista–Каррадзоне, вообще говоря, не применима для физических величин, не являющихся наблюдаемыми, например для констант связи, т. е. вклад тяжелых кварков не отделяется автоматически. Изучен вклад тяжелых кварков в константу связи сильного взаимодействия  $\alpha_s^{n_f}(\mu)$ : четырехпетлевые поправки на пороге рождения нового сорта кварков  $n_f$  найдены в аналитическом виде в рамках модифицированной схемы минимальных вычитаний. С использованием известной ранее оценки для четырехпетлевой поправки  $\beta_4$  к  $\beta$ -функции квантовой хромодинамики получена также приближенная связь для параметров  $\Lambda^{n_f}$  при различных значениях  $n_f$  [2].

Функция фрагментации Коллинза получена на основе данных HERMES по азимутальным одиночным спиновым асимметриям в полуинклюзивном глубоко-неупругом рассеянии и данных BELLE по азимутальным асимметриям в  $e^+e^-$ -аннигиляции [3]. Найдено, что данные HERMES и BELLE дают согласованную картину по функции фрагментации Коллинза, которая совместима с данными COMPASS (рис. 1) и с информацией, полученной ранее из анализа данных DELPHI. Сделаны оценки для будущих экспериментов.

На основе фита к эффекту Сиверса в глубоко-неупругом рассеянии сделаны предсказания для одиноч-

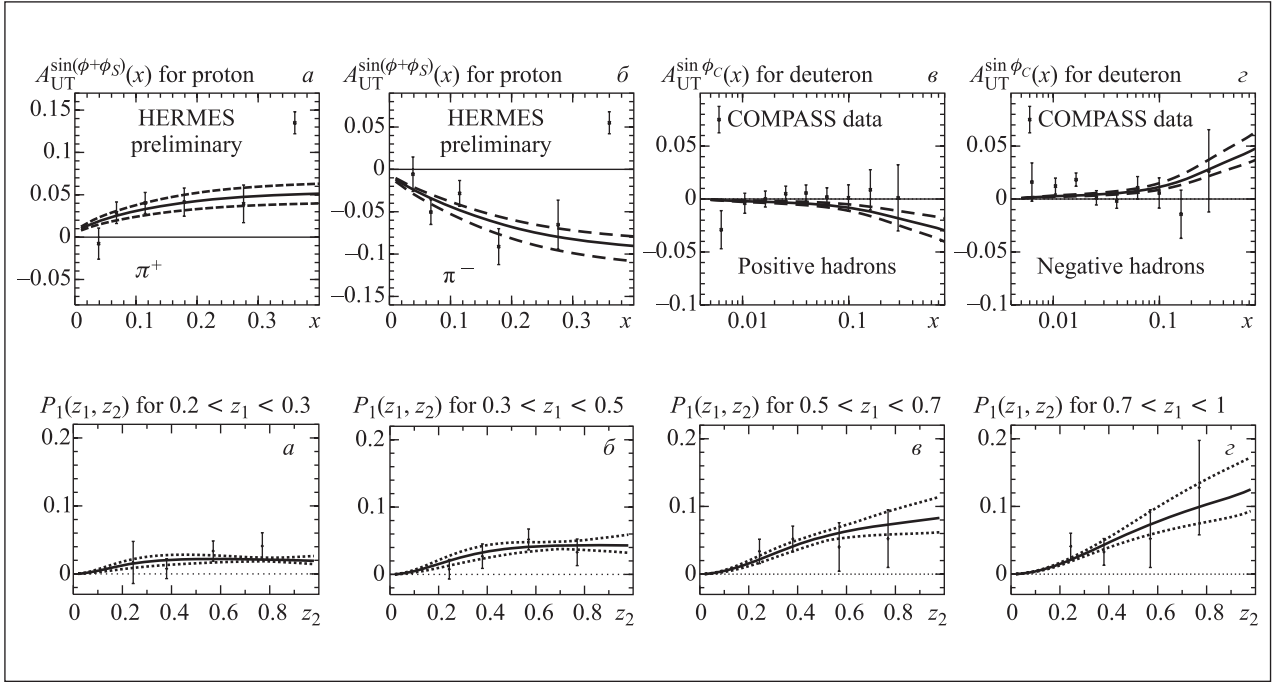


Рис. 1. Верхние графики: данные HERMES (а, б) и COMPASS (в, з) по асимметрии Коллинза. Нижние графики: данные BELLE по эффекту Коллинза

ных спиновых асимметрий в процессе Дрелла–Яна на RHIC [4].

Показана возможность прямого извлечения поперечно-поляризованных кварковых распределений и сопутствующих им  $T$ -нечетных партонных распределений из процессов Дрелла–Яна с неполяризованным пионным пучком и как с неполяризованной, так и с поперечно-поляризованной протонной мишенью. В настоящее время изучение таких процессов планируется в эксперименте COMPASS (ЦЕРН). Проведенные для кинематики COMPASS оценки показывают, что в условиях COMPASS представляется возможным извлечь как поперечно-поляризованные кварковые распределения, так и сопутствующие им  $T$ -нечетные кварковые распределения [5].

Предложен и разработан новый метод анализа процессов поляризованного полуинклюзивного глубоко-неупругого рассеяния в следующем за лидирующим порядке КХД. Метод позволяет напрямую извлекать из эксперимента усеченные меллиновские моменты в следующем за лидирующим порядке КХД. Затем, используя эти моменты в модифицированном методе разложения по полиномам Якоби, можно восстановить локальные кварковые распределения. Метод был применен к анализу данных коллаборации HERMES (DESY). Результаты для валентных распределений, полученные в лидирующем порядке КХД, находятся в хорошем согласии с соответствующими результатами коллабораций HERMES и SMC. Результаты для валентных распределений, полученные в следующем за лидирующим порядке КХД, нахо-

дятся в согласии с существующими параметризациями [6].

Исследование жестких эксклюзивных процессов очень важно для понимания динамики взаимодействия кварков и глюонов. В теории эти исследования основаны на применении гипотезы о факторизации динамики взаимодействия на малых и больших расстояниях. На малых расстояниях для описания жестких процессов применима теория возмущений КХД. На больших расстояниях динамика непертурбативна и может быть параметризована через набор универсальных адронных функций распределения. Эти функции определяются как матричные элементы нелокальных кварк-глюонных операторов между вакуумным и адронным состояниями. В проведенном исследовании найдены амплитуды распределения для пиона,  $\rho$ -мезона и реального и виртуального фотона в лидирующем и следующем за лидирующим твисте на основе непертурбативной динамики вакуума КХД как жидкости инстантонов [7]. Первые эксперименты по измерению амплитуды распределения фотона в процессе диссоциации фотона на два пиона недавно представлены в DESY (HERA).

В рамках аналитического подхода Ширкова–Соловцова в КХД были получены новые интегральные представления для  $D$ -функции Адлера и  $R$ -отношения электрон-позитронной аннигиляции в адроны. Эти представления учитывают взаимосвязь между описанием физических процессов в пространственно- и времениподобной областях, а также эффекты, обусловленные ненулевой массой пиона. Последнее играет

ключевую роль в рассматриваемом подходе, в частности, обеспечивает обращение в нуль  $D$ -функции Адлера в инфракрасном пределе. В рамках развиваемого метода было проведено вычисление  $D$ -функции Адлера с привлечением только ее пертурбативной аппроксимации. Полученный результат хорошо согласуется с экспериментальным предсказанием для  $D$ -функции Адлера во всем интервале энергий [8].

Проведено детальное сравнение ограничений, накладываемых на амплитуду распределения (АР) пиона: из анализа данных экспериментов по измерению  $F_{\pi\gamma\gamma^*}(Q^2)$  в пертурбативной КХД; из непертурбативной КХД — правил сумм с нелокальными конденсатами и из недавних уточненных измерений второго момента АР на решетке. Установлено хорошее взаимное согласие теоретических ограничений и с экспериментальными, и с решеточными результатами. Для уточнения обсуждаемых теоретических ограничений на АР вводится «ренормальная» модель для важных вкладов твиста 4 в переходной формфактор. Исследуется изменение области ограничений для первых двух гегенбауэровских моментов, показано, что прежние качественные выводы об АР не меняются [9].

Были продолжены исследования образования экзотических адронов в жестких процессах [10], позволяющие применить КХД-факторизацию и уменьшить неопределенности, связанные с модельными подходами. Было проанализировано [11] образование экзотических гибридных мезонов в соударениях реальных и виртуальных фотонов.

Недавние эксперименты по измерению электромагнитных формфакторов протона  $G_{E,M}(q^2)$  в пространственноподобной области, проведенные в JLab и SLAC, обнаружили расхождение в результатах, полученных двумя методами измерения. Первый метод основан на измерении неполяризованного  $ep$ -рассеяния, а второй использует метод с передачей поляризации. Одной из возможных причин расхождения этих результатов может быть неполный учет радиационных поправок. Было проведено вычисление радиационных поправок на тормозное излучение из начальных и конечных частиц с помощью метода структурных функций, а также вклад двухфотонного обмена. В результате вклады двухфотонного обмена оказались малыми, меньше чем 1%, во всей кинематически достижимой области. Однако тормозное излучение начального электрона дает значительный вклад, порядка нескольких процентов, и особенно сильное влияние оказывает на метод измерения  $G_E/G_M$ , основанный на неполяризованном сечении. В поляризованном случае эти поправки также присутствуют, но их вклад взаимно сокращается в отношении формфакторов  $G_E/G_M$ , и в результате имеем поправку порядка 0,1%. Применение этих радиационных поправок к известным экспериментальным значениям приводит к совпадению результатов двух методов в пределах ошибки (рис. 2) [12].

С учетом недавних результатов коллаборации CDF по распаду  $B_c \rightarrow J/\psi + \pi$  с  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  (*Abulencia A. et al. (CDF Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 082002*) проведен полный анализ нелептонных двухчастичных распадов и полуплептонных трехчастичных распадов в рамках развиваемой релятивистской конституентной модели [13]. Представлен полный набор численных значений парциальных ширин лептонных, полуплептонных и нелептонных распадов  $B_c$ -мезона, а также точные формулы для угловых распределений каскадных распадов  $B_c^- \rightarrow J/\psi(\rightarrow l^+l^-) + \rho^-(\rightarrow \pi^-\pi^0)$  и  $B_c^- \rightarrow J/\psi(\rightarrow l^+l^-) + W_{\text{off-shell}}^-(\rightarrow l^- + \bar{\nu}_l)$ . Для нелептонного распада  $B_c^- \rightarrow J/\psi + \rho^-$  учтены массы лептонов и  $T$ -нечетные эффекты. Эти угловые распределения могут быть полезными при анализе данных угловых распределений каскадных распадов и позволят более детально изучить динамику спина, по сравнению с анализом только ширин распадов.

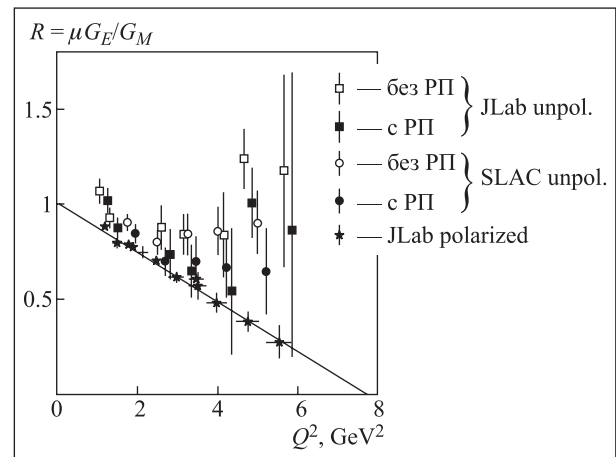


Рис. 2. Экспериментальные данные с учетом радиационных поправок (ПП)

С учетом новейших результатов коллабораций HERMES и COMPASS проанализированы мировые данные по инклюзивным глубоконеупругим процессам (в лидирующем и следующем порядках) для поляризованной структурной функции  $g_1$ . Обновленная параметризация приведена в  $\overline{\text{MS}}$ - и JET-факторизационных схемах и представлена на сетевом сервере HEPDATA (<http://durpdg.dur.ac.uk/hepdata>). Даны оценки степенных поправок к  $g_1$  структурной функции протона и нейтрона, а также распределение спина протона между его составляющими [14].

В рамках квантовой хромодинамики выведено эффективное нелокальное четырехкварковое взаимодействие типа Намбу–Иона–Лазинио. При этом были использованы уравнения компенсации Боголюбова для определения формфакторов эффективного четырехкваркового взаимодействия. Модель не содержит ультрафиолетовых расходимостей, и все ее параметры выражаются через исходные параметры КХД:  $\alpha_s$  и  $m_0$  (токовая масса кварка) [15].

В модели инстантонной жидкости КХД-вакуума изучена природа легчайших скалярных мезонов. Подробно проанализировано влияние вакуумных возмущений на характеристики  $\sigma$ -мезона. В частности, отмечено, что изменения в скалярном секторе могут быть велики несмотря на малость поправок к динамическим массам кварков. В этом случае смешивание  $\sigma$ -мезона и этих возмущений могут проявлять себя как широкие резонансные состояния существенно различных масс [16].

Прецизионная спектроскопия  $\rho$ -вибрационных переходов в молекулах открывает интересные возможности для метрологии фундаментальных констант (отношения масс  $m_e/m_p$ ,  $m_e/m_d$  и других легких ядер). В рамках этой программы были получены ведущие релятивистские и радиационные поправки для  $\rho$ -вибрационных состояний  $\text{H}_2^+$  и  $\text{HD}^+$  с численной погрешностью менее 1 кГц [17]. Вычислены значения сверхтонкого расщепления для состояний  $\text{H}_2^+$  и  $\text{HD}^+$  с точностью до порядка  $m\alpha^6(m_e/M_N)$  [18]. Результаты исследований должны войти отдельной главой в книгу «Precision Physics of Simple Atomic Systems», Lecture Notes in Physics, Springer, 2007. Данные по спектроскопии антипротонного гелия и определение на их основе отношения масс  $m_{\bar{p}}/m_e$  будут включены в корректировку 2006 г. значений фундаментальных констант, рекомендуемых международной группой по метрологии CODATA.

## 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 2006 г. результатов по теме.

Предложена новая модель частицы для теории высших спинов (ВС), воспроизводящая все известные модели такого рода как частные калибровки. Квантование этой системы порождает новую форму уравнений для безмассовых полей высших спинов в расширенном пространстве, включающем помимо дополнительных спиновых координат также комплексную скалярную координату. Своими решениями эти уравнения имеют стандартный мультиплет полей всех целых и полужелтых спиральностей и новые мультиплеты с ненулевой минимальной спиральностью. Построена твисторная формулировка новой модели частицы [21].

Показано, что коэффициенты, характеризующие трехструнную вершину в калибровке светового конуса полевой теории открытых струн, удовлетворяют уравнениям Хироты для бездисперсионной решеточ-

Предложен новый резонансный механизм с участием квазистационарных состояний позитрона, возникающих при совместном действии кулоновского поля антипротона и сильного магнитного поля ловушки для церновских экспериментов ATHENA и ALPHA по формированию атомов антиводорода. Скорость рекомбинации выражена через сечение лазерной ионизации атома, имеющее немонотонную частотную зависимость из-за наличия квазистационарных состояний на фоне континуума. Оценки с использованием рассчитанных значений сечений ионизации указывают на возможность повышения эффективности лазерно-стимулированной рекомбинации при оптимальном подборе частоты лазера [19].

Исследовано рождение электрон-позитронных пар в квазипериодическом электрическом поле стоячей волны с использованием квантового кинетического уравнения с немарковским источником. Для напряженностей полей и частот, соответствующих современным оптическим лазерам, с интенсивностями порядка  $10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup> электрон-позитронная плазма образуется с максимальной плотностью порядка  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>. В качестве наблюдаемого сигнала рождения  $e^+e^-$ -пар из вакуума в экспериментах со встречными оптическими лазерными пучками рассмотрены события двухфотонной аннигиляции, которые будут детектироваться по совпадению  $\gamma$ -квантов. Дана оценка таких событий: 5–10 событий на импульс лазера [20].

Уравнения Хироты позволяют вычислить корреляторы ассоциированной квантовой системы, в которой коэффициенты Неймана характеризуют двухточечные функции. Рассмотрены также трехструнные коэффициенты полевой теории открытых струн в калибровке светового конуса на максимально суперсимметричном  $pp$ -волновом фоне. Показано, что эти коэффициенты Неймана удовлетворяют уравнениям Хироты для полной решеточной иерархии Тоды до второго порядка по струнной массе  $\mu$  включительно. Построены асимптотические разложения по струнной массе для  $\mu$ -деформированных  $\Gamma$ -функций и коэффициентов Неймана [22].

Доказано, что полевые уравнения супергравитации для чисто временных фонов, которые сводятся к уравнениям одномерной  $\sigma$ -модели, допускают представление в виде пары Лакса, и они вполне интегрируемы. В случае, когда эффективные  $\sigma$ -модели соответствуют максимально расширенным некомпактным фактор-пространствам  $U/H$  (максимальной супергравитации или подсекторам супергравитаций с меньшим числом суперсимметрий), может быть построен явный аналитический алгоритм интегрирования. Асимпто-

тики оператора Лакса при  $t \rightarrow -\infty$  и  $t \rightarrow +\infty$  принадлежат подалгебре Картана алгебры  $U$ , и ввиду свойства изоспектральности эти две асимптотики связаны преобразованием некоторого элемента из соответствующей группы Вейля. Следовательно, вся космическая эволюция может быть представлена как рассеяние бильярдных шаров с квантованными углами, определяемыми группой Вейля. Таким образом, алгоритм интегрирования реализован как отображение из  $H/W$  в  $W$  [23].

Выяснено происхождение немассовых дуальностей между  $d = 1$  супермультиплетами с разными наборами физических бозонных полей и одним и тем же числом полей фермионных в явно суперсимметричном суперполевоом подходе. Показано, что эти дуальности возникают в результате калибрования определенных симметрий в инвариантных действиях супермультиплетов с максимальным числом физических бозонов. Попутно построена новая нелинейная версия  $N = 4$  мультиплет (4, 4, 0), такая, что ее простейшее суперполево действие приводит в бозонном секторе к наиболее общей 4-мерной гиперкэлэровой метрике с одной триголоморфной изометрией [24].

Найдены неполиномиальные бакстеризованные решения уравнений отражения, которые связаны с аффинными алгебрами Гекке и Бирман–Мураками–Венцля. Эти решения использованы для новой алгебраической формулировки интегрируемых спиновых моделей на цепочках с нетривиальными граничными условиями [25].

Метод разделения переменных был адаптирован для спиновых  $Z_N$ -симметричных интегрируемых моделей. Задача нахождения собственных векторов коммутирующих интегралов движения была сведена к разностному уравнению Бакстера и в простейшем случае обобщенной модели Изинга ( $N = 2$ ) была решена точно. В общем случае полученное уравнение Бакстера эквивалентно функциональным соотношениям для квантовой матрицы перехода в модели Бакстера–Бажанова–Строганова [26].

Построены явные решения эрмитовых уравнений Янга–Миллса на некоммутативном пространстве  $S_\theta^n$ . В коммутативном пределе эти решения совпадают со стандартными инстантонами на  $CP^n$ , записанными в локальных координатах [27].

Рассмотрены различные методы размерной редукции теории (супер)гравитации к двумерным и одномерным моделям дилатонной гравитации. В частности, была предложена необычная редукция интегрируемой  $(1+1)$ -мерной дилатонной гравитации, взаимодействующей с материей. Эта редукция выполняется в пространстве модулей  $(1+1)$ -мерной теории, сужая общее пространство решений до подпространства одномерных статических состояний (в частности, черных дыр), космологических моделей и волн. Необычность этих решений состоит в том, что существенно одномерные волновые решения явно зависят от двух переменных: пространственной и временной координат.

Было показано, что эти решения можно получить и с помощью обобщенного разделения переменных (применимого к неинтегрируемым теориям и в высших размерностях). Полученные результаты демонстрируют нетривиальную и глубокую связь между статическими состояниями, космологиями и волнами.

Применяя обобщенное разделение переменных, удалось найти существенно одномерные состояния, зависящие от двух переменных в сферически-симметричной теории гравитации, взаимодействующей со скалярными полями материи. Разделение переменных существенно обобщает «наивную» размерную редукцию и, вероятно, является более общим методом редукции, чем широко используемые теоретико-групповые подходы. Этим методом удалось построить необычные обобщения сферических статических состояний и космологий, связанных простым преобразованием дуальности. Еще более интересные новые статические и космологические состояния могут существовать в цилиндрических и аксиальных теориях. Недавно было предложено обобщение стандартной цилиндрической гравитации, сводящееся к  $(1+1)$ -мерной дилатонной гравитации с космологическим потенциалом, порождаемым четырехмерным механизмом Калуцы–Клейна. Такие потенциалы не существуют в сферическом случае, но могут появляться в аксиально-симметричной теории, даже сколь угодно близкой к сферически-симметричной. Отсюда следует качественное отличие почти сферически-симметричной Вселенной от полностью сферически-симметричной. В частности, в почти симметричной Вселенной могут возникать слабые потенциалы геометрической природы, которые могли бы имитировать эффекты темной энергии [28].

Определена геометрическая структура энтропии квантового перепутывания при пространственном разделении многочастичных систем, находящихся вблизи критической точки фазового перехода второго рода. Описание таких систем возможно в терминах квантовой теории поля. Впервые для размерности пространства 2 и 3 установлена форма сублидирующих слагаемых в энтропии в зависимости от геометрии разделяющей поверхности и граничных условий.

Сформулирована и обоснована гипотеза о том, что в теории квантовой гравитации энтропия квантового перепутывания фундаментальных степеней свободы (на единицу площади разделяющей поверхности) равна  $1/(4G)$ , где  $G$  — гравитационная постоянная в низкоэнергетическом секторе теории.

Доказана «голографическая формула» для энтропии квантового перепутывания в конформных теориях, допускающих дуальное описание в терминах гравитации анти-де Ситтера. Данная формула, «угаданная» в работах других авторов, является конкретным подтверждением выдвинутой гипотезы о связи гравитации с явлением квантового перепутывания фундаментальных микроскопических степеней свободы. Формула позволяет свести сложные вычисления энтропии

перепутывания к чисто классической геометрической задаче о минимальных поверхностях в пространстве анти-де Ситтера [29].

Построена космологическая теория возмущений в гамильтоновой формулировке общей теории относительности в конечном пространственно-временном объеме. Эволюционным параметром, инвариантным к пространственно-временным преобразованиям, является космологический масштабный фактор, который

## ТЕОРИЯ ЯДРА

В 2006 г. исследования по теме «Теория ядра» 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 результаты.

В рамках метода релятивистского среднего поля показано, что зависимость остаточных внутриядерных сил от псевдоспина относительно слабая. Это указывает на то, что и взаимодействие частичных возбуждений с колебаниями слабо зависит от псевдоспина, а значит, мало и расщепление псевдоспиновых дублетов из-за векторной связи псевдоспина нечетной частицы с псевдоорбитальным угловым моментом остова. Указано на некоторые возможности экспериментального изучения проявлений псевдоспиновой симметрии в спектрах тяжелых ядер ( $Z \geq 100$ ) с нечетным числом нуклонов [31].

Свойства полос состояний переменной четности в ядрах  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{239-242}\text{U}$ ,  $^{241-245}\text{Pu}$ ,  $^{243-248}\text{Cm}$ ,  $^{245-250}\text{Cf}$ ,  $^{248-251}\text{Fm}$ ,  $^{249-254}\text{No}$ ,  $^{253-256}\text{Rf}$  и  $^{258}\text{Sg}$  проанализированы в рамках модели двойной ядерной системы. Модель исходит из предположения, что кластероподобная форма ядра возникает вследствие ядерного движения по координате масс-асимметрии. Впервые предсказаны энергии низколежащих состояний, четность которых противоположна четности основного состояния [32].

Предложен способ детального экспериментального изучения слабого  $\Lambda N$ -взаимодействия в гиперъядрах  $^{10}_{\Lambda}\text{Be}$  и  $^{10}_{\Lambda}\text{B}$ , который опирается на их кластерную структуру —  $\alpha\alpha N\Lambda$ . Детектирование небольших групп коррелированных  $\alpha\alpha$ -пар могло бы предоставить информацию о распадах на определенные состояния ядер-продуктов ( $^8\text{Be}^*$ ,  $^8\text{Li}$ ,  $^8\text{B}$ ), прокладывая тем самым дорогу для феноменологического анализа слабых распадов гиперъядер  $p$ -оболочки. Отношения интенсивностей отдельных групп  $\alpha$ -частиц, которые предполагается измерять в экспериментах на нуклотроне ОИЯИ, будут хорошим кри-

терием выбора адекватной модели слабого  $\Lambda N$ -взаимодействия [33].

Новые результаты получены и в исследованиях *ядерных реакций*.

В рамках модели точки разрыва показано, что бимодальность деления ядер области актиноидов связана с тем, что для заданных зарядов и масс фрагментов потенциальная энергия системы перед самым делением имеет несколько минимумов, зависящих от деформации фрагментов. Разрыв в таком минимуме приводит к относительному усилению выхода фрагментов с соответствующими значениями полной кинетической энергии и возникновению тонкой структуры распределения масса-энергия. Это явление специфично не только для таких тяжелых ядер, как  $^{256,258}\text{Fm}$  и  $^{256,258,262}\text{No}$ , но и для ядер более легких актиноидов:  $^{236}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  и  $^{252}\text{Cf}$  [34].

В рамках 4-частичной модели искаженных волн исследованы энергетические и угловые корреляции трех фрагментов развала ядер  $^6\text{He}$  на  $^{208}\text{Pb}$  при энергии столкновения 240 МэВ/нукл. Расчеты хорошо воспроизводят экспериментальные данные о корреляциях фрагментов около порога развала. Показано, что физика процесса связана с малым числом элементарных мод возбуждения. Однако с ростом энергии возбуждения  $^6\text{He}$  неожиданно возникают явные отклонения от экспериментальных распределений [35].

В работах по физике *малочастичных систем* получены следующие результаты.

Рассчитаны длины и фазы рассеяния атомов  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$  на димере  $^4\text{He}_2$ . В предположении, что ослабление двухчастичного потенциала имитирует поведение длины рассеяния в магнитном поле, вычислена также зависимость характеристик трехчастичного рассеяния при ультранизких энергиях от величины константы связи в парном взаимодействии и тем самым от величины парной длины рассеяния. Магнитное поле является подходящим средством для моделирования эффекта Ефимова, который имеет место в случае, когда парные длины бесконечны, и проявляется в том, что соответствующая трехчастичная система обладает бесконечным числом связанных состояний. Уже установлено, что возбужденное состояние тримера  $^4\text{He}_3$

имеет ефимовскую природу. Для получения полного эффекта Ефимова в этой системе достаточно ослабить взаимодействие между атомами  ${}^4\text{He}$  всего на 3%. продемонстрировано также, как новый ефимовский уровень рождается из виртуального уровня [36].

Показано, что взаимодействие атом-атом или рассеяние электрона на примеси может быть фактически выключено в результате воздействия геометрического конфайнмента. Настроив ширину  $a_{\perp}$  оптической или магнитной ловушки, можно выключить ультрахолодное рассеяние атома на атоме в удерживающей ловушке. Это возможно, если фундаментальное двухчастичное взаимодействие атом-атом достаточно сильно, а двухчастичные  $s$ - и  $p$ -волновые длины рассеяния  $a_s \sim -a_p$  достигают величин порядка ширины конфайнмента,  $a_{\perp} = 1,45a_s$ . Этот результат может иметь важные приложения. В частности, его можно использовать для улучшения чувствительности управляемых атомных интерферометров, управления свойствами квази-1D квантовых газов или даже для уменьшения тепловых потерь в микроэлектронных устройствах [37].

Основные результаты исследований в рамках проекта «Ядерная структура и динамика при релятивистских энергиях» следующие.

Предложена трехжидкостная гидродинамическая модель для описания релятивистских столкновений тяжелых ионов. Наряду с двумя барионными жидкостями модель рассматривает отстающую во времени эволюцию третьей, свободной от барионов, жидкости вновь рожденных частиц. На основе чисто адронного уравнения состояния модель разумно воспроизводит большое количество экспериментальных данных в области энергий столкновения [38].

Исследована возможность образования  $\Theta^+$ -пентакварка в качестве промежуточного состояния в результате процесса слияния  $KN \rightarrow \Theta^+$  в инклюзивных реакциях  $\gamma D \rightarrow pK^- X$  ( $X = nK^+, pK^0$ ) при кинематических условиях, когда  $pK^-$ -пара рождается

при малых углах и ее инвариантная масса близка к массе  $\Lambda^*$  ( $\Lambda^* \equiv \Lambda(1520)$ ). Проанализированы недавние экспериментальные данные коллаборации CLAS (JLab) по поиску  $\Theta^+$  в эксклюзивной реакции  $\gamma D \rightarrow pK^- nK^+$  и показано, что условия этого эксперимента сильно подавляют вероятность реакции слияния  $KN \rightarrow \Theta^+$ , делая невозможным извлечение сигнала от  $\Theta^+$  из экспериментальных данных [39].

Рассчитан спектр инвариантной массы двух электронов в тормозных процессах в ковариантном диаграммном подходе для эксклюзивной реакции  $Dp \rightarrow p_{\text{sp}} np e^+ e^-$ , когда детектировался вылетающий вперед протон-спектатор  $p_{\text{sp}}$ . Эффективные нуклон-мезонные взаимодействия были подогнаны так, чтобы описать процесс  $pp \rightarrow pp e^+ e^-$  при энергиях ниже порога образования векторных мезонов. Исследовано подпороговое рождение двух электронов в  $Dp$ -столкновениях при малых импульсах спектатора. Расчеты были выполнены для кинематических условий эксперимента HADES [40].

Кроме того, получен новый результат в *теории атомных кластеров*.

Предложен простой способ возбуждения и детектирования низколежащих квадрупольных возбуждений электронов в свободных деформированных металлических кластерах малого размера. Его возможности проанализированы в расчетах в рамках приближения локальной плотности с зависимостью от времени. Долгоживущие квадрупольные колебания могут быть возбуждены резонансным двухфотонным возбуждением и затем детектированы по появлению линий-спутников в фотоэлектронных спектрах, генерированных пробным импульсом. По энергиям этих мод, дополненным фотоэлектронными данными о дырочных уровнях, можно определить весь спектр состояний валентных электронов в среднем поле вблизи энергии Ферми. Кроме того, можно оценить время жизни пар электрон-дырка, а значит, и время релаксации энергии электронов в тепловое движение ионов [41].

## ТЕОРИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

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

— физические свойства комплексных материалов и наноструктур;

— математические проблемы многочастичных систем.

Ряд важных новых результатов был получен при исследовании *физических свойств комплексных материалов и наноструктур*, среди которых отметим следующие.

Впервые сформулирована микроскопическая теория электронного спектра в купратных высоко-

температурных сверхпроводниках в рамках модели Хаббарда, не содержащая подгоночных параметров для электрон-бозонного взаимодействия. Уравнение Дайсона вычислено в приближении непересекающихся диаграмм для массового оператора. Полученные зависимости от температуры и легирования для электронной дисперсии, спектральных функций и поверхности Ферми согласуются с недавними фотоэмиссионными экспериментами [42].

В рамках теоретико-полевой модели исследована низкоэнергетическая электронная структура икосаэдральных фуллеренов. Получено точное аналитиче-

ское решение проблемы (рассчитаны волновые функции и энергетический спектр) [43].

Изучены электронные состояния сфероидальных фуллеренов вблизи энергии Ферми. Обнаружено появление тонкой структуры в электронном энергетическом спектре, обусловленное сфероидальной деформацией. В частности, предсказывается появление двух квазиуловых мод в дополнение к нулевой моде в сфероидальных фуллеренах [44].

Предложена кластерная модель растворения фуллеренов C<sub>60</sub> в неполярном растворителе, позволяющая объяснить экспериментально наблюдаемый максимум в зависимости концентрации раствора от времени при растворении. Модель базируется на кинетических уравнениях теории нуклеации и учитывает баланс между потоком молекул фуллерена из твердой фазы и седиментацией больших кластеров из раствора. Формирование кластеров описывается с помощью капельной модели. Анализ численных решений уравнений дает четыре качественно различных режима растворения, зависящих от сочетания параметров модели [45].

По проекту «Математические проблемы многочастичных систем» следует отметить наиболее важные результаты.

Рассмотрен полностью асимметричный случайный процесс с исключенным объемом в дискретном времени и с параллельным обновлением. Путем преобразования эволюционного оператора проблема сведена к системе уравнений, решаемых с помощью анзаца Бете. Нестационарные решения основного кинетического уравнения получены в детерминантной форме. Это же решение затем получено с помощью комбинаторной интерпретации анзаца Бете [46].

Построен эллиптический аналог гипергеометрической функции Гаусса, и найдена ее связь с моделями типа Калоджеро–Сазерленда. Определены последовательности спектральных преобразований для полиномов Фробениуса–Штикельберга–Тиле, приводящие к новой  $(1+1)$ -мерной интегрируемой цепочке с дискретным временем. Детально изучены два примера функций Стильтеса с явной гипергеометрической или эллиптической зависимостью от времени, приводящей к уравнениям движения цепочки Тоды [47].

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

В рамках DIAS-TN в истекшем году были проведены пять школ и рабочее совещание (Research Workshop): 4-я Зимняя школа по теоретической физике (29 января – 7 февраля); 10-е Рабочее совещание «Теория нуклеации и ее применения» (1–30 апреля); Международная школа «Вычисления для современных и будущих коллайдеров» (15–25 июля) — совместно с Объединением им. Гельмгольца (Германия); Международная школа по физике малочастичных систем

(7–17 августа); Международная школа «Плотная материя в столкновениях тяжелых ионов и астрофизика» (21 августа – 1 сентября) — совместно с Объединением им. Гельмгольца (Германия); Летняя школа по современной математической физике (3–12 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 поддержки наиболее ресурсоемких расчетов приобретен сервер на двух процессорах Xeon-5160 с двойными ядрами на основе новейшей микроархитектуры Intel Core. Сервер оснащен 16-Гбайт высокоскоростной оперативной памятью DDR2-667 МГц и двумя дисками SATA емкостью по 300 Гб.

Парк персональных компьютеров ЛТФ улучшился с приобретением 20 новых машин.

Повысить качество презентации докладов на семинарах и конференциях, проводимых в лаборатории, позволит новый мультимедиа-проектор фирмы Toshiba.

## **КОНФЕРЕНЦИИ, СОВЕЩАНИЯ, СОТРУДНИЧЕСТВО**

В 2006 г. кроме школ, проводившихся в рамках DIAS-TN, лаборатория участвовала в организации 7 международных конференций и рабочих совещаний,

проходивших в Дубне, Ереване, Праге и Протвино. Были проведены Международное рабочее совещание «Классические и квантовые интегрируемые системы»



(23–26 января, Протвино, Россия); Международная конференция «Структура ядра и связанные вопросы» (13–17 июня, Дубна); XV Международный коллоквиум «Интегрируемые системы и квантовые группы» (15–17 июня, Прага); XII Международная конференция «Методы симметрии в физике» (3–8 июля, Ереван); Рочестерская конференция — XXXIII Международная конференция по физике высоких энергий (26 июля–2 августа, Москва); XVIII Международный Балдинский семинар «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика» (25–30 сентября, Дубна) — совместно с Лабораторией высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина; Второй круглый стол «Поиск смешанной фазы сильно-взаимодействующей материи на нуклотроне ОИЯИ: развитие нуклотронного комплекса» (6–7 октября, Дубна) — совместно с Лабораторией высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина.

Международное сотрудничество ЛТФ в 2006 г. было поддержано грантами полномочных представителей 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. *de Boer W. et al.* // Phys. Lett. B. 2006. V. 636. P. 13;  
*Bogachev D. Yu. et al.* // Intern. J. Mod. Phys. A. 2006. V. 21. P. 5221;  
*Bednyakov V. A. et al.* hep-ex/0608060.
2. *Kniehl B. A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 042001.
3. *Efremov A. V., Goeke K., Schweitzer P.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 094025; hep-ph/060305.
4. *Collins J. C. et al.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 094023; hep-ph/0511272.
5. *Sissakian A. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2006. V. 46. P. 147.
6. *Sissakian A., Shevchenko O., Ivanov O.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 094026.
7. *Dorokhov A. E., Broniowski W., Ruiz Arriola E.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 74. P. 054023;  
*Dorokhov A. E.* hep-ph/0610212; Based on the talks given at XVIII Conf. Few Body Problems in Physics, Santos, Brazil, Aug. 21–26, 2006 and ISMD-2006, Paraty, Rio de Janeiro, Brazil, Sept. 2–8, 2006.
8. *Nesterenko A. V., Papavassiliou J.* // J. Phys. G. 2006. V. 32. P. 1025–1034.
9. *Bakulev A. P., Mikhailov S. V., Stefanis N. G.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 056002.
10. *Anikin I. V. et al.* hep-ph/0610177; Proc. of the 33rd Intern. Conf. on High Energy Physics (ICHEP-06) (submitted).
11. *Anikin I. V. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2006. V. 47. P. 71; hep-ph/0601176.
12. *Kuraev E. A., Bystritskiy Yu. M., Tomasi-Gustafsson E.* hep-ph/0603132; Phys. Rev. C (submitted).
13. *Ivanov M. A., Körner J. G., Santorelli P.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 054024.
14. *Leader E., Sidorov A. V., Stamenov D. B.* // Ibid. P. 034023.
15. *Arbuzov B. A., Volkov M. K., Zaitsev I. V.* // Intern. J. Mod. Phys. A. 2006. V. 21. P. 5721.
16. *Molodtsov S. V. et al.* hep-ph/0611203.
17. *Korobov V. I.* // Phys. Rev. A. 2006. V. 74. P. 052506.
18. *Korobov V. I., Hilico L., Karr J.-Ph.* // Phys. Rev. A. 2006. V. 74. P. 040502(R);  
*Bakalov D., Korobov V. I., Schiller S.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97.
19. *Серов В. В., Дербов В. Л., Виноцкий С. И.* // Оптика и спектроскопия. 2007. Т. 102 (в печати);  
*Chuluunbaatar O. et al.* // Proc. SPIE. 2007. V. 6537 (submitted).
20. *Blaschke D. B. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 94. P. 140402.
21. *Fedoruk S., Ivanov E.* // Class. Quant. Grav. 2006. V. 23. P. 5195–5214; hep-th/0604111.
22. *Bonora L. et al.* // Ibid. P. 799;  
*Kadyshevsky V. G., Sorin A. S.* // Theor. Math. Phys. 2006. V. 149(3). P. 1627.
23. *Fre P., Sorin A. S.* // Nucl. Phys. B. 2006. V. 733. P. 334.
24. *Delduc F., Ivanov E.* // Ibid. V. 753. P. 211–241; hep-th/0605211.
25. *Isaev A. P., Ogievetsky O. V.* // Nucl. Phys. B. 2007. V. 760 [PM]. P. 167–183.
26. *von Gehlen G. et al.* // J. Phys. A: Math. Gen. 2006. V. 39. P. 7257–7282; nlin.SI/0603028.
27. *Ivanova T. A., Lechtenfeld O.* // Phys. Lett. B. 2006. V. 639. P. 407.
28. *Filippov A. T.* // Teor. Mat. Fiz. 2006. V. 146. P. 115; hep-th/0605276.
29. *Fursaev D. V.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 124025; hep-th/0602134; JHEP. 2006. 0609. 018; hep-th/0606184.
30. *Barbashov B. M. et al.* // Phys. Lett. B. 2006. V. 633. P. 458–462; Intern. J. Mod. Phys. A. 2006. V. 21. P. 5957.
31. *Jolos R. V., Voronov V. V.* nucl-th/0610079.
32. *Shneidman T. M. et al.* // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. P. 034316.
33. *Majling L., Kuz'min V. A., Teterova T. V.* // Phys. At. Nucl. 2006. V. 69. P. 810.
34. *Andreev A. V. et al.* // Ibid. P. 197.
35. *Ershov S. N., Danilin B. V., Vaagen J. S.* // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. P. 014603.
36. *Kolganova E. A., Motovilov A. K., Sandhas W.* // Few-Body Syst. 2006. V. 38. P. 205.
37. *Kim J. I., Melezhik V. S., Schmelcher P.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 193203.
38. *Ivanov Yu. B., Russkikh V. N., Toneev V. D.* // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. P. 044904.
39. *Titov A. I. et al.* // Ibid. V. 74. P. 055206.

40. *Kaptari L.P., Kämpfer B.* // Nucl. Phys. A. 2006. V. 764. P. 338.
41. *Nesterenko V.O. et al.* // Phys. Rev. A. 2006. V. 73. P. 021201.
42. *Plakida N.M., Oudovenko V.S.* JINR Preprint E17-2006-96. Dubna, 2006; JETP. 2007. V. 131, No. 1.
43. *Kolesnikov D.V., Osipov V.A.* // Eur. Phys. J. B. 2006. V. 49. P. 465.
44. *Pudlak M., Pincak R., Osipov V.A.* // Phys. Rev. B. 2006. V. 74.
45. *Tropin T.V. et al.* // JETP Lett. 2006. V. 83. P. 467.
46. *Povolotsky A.M., Priezhev V.B.* // J. Stat. Mech. 2006. P. 07002.
47. *Spiridonov V.P., Warnaar S.O.* // Adv. in Math. 2006. V. 207. P. 91–132.