

ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. Н. Н. БОГОЛЮБОВА

В 2005 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» охватывали широкий круг проблем *квантовой теории поля* (КТП) и *феноменологии физики частиц*.

Феноменологические исследования включали стандартную модель фундаментальных взаимодействий и ее расширения, а также физику адронов при низких и высоких энергиях. В 2005 г. начаты работы над новым проектом, связанным с столкновениями тяжелых ионов. Основными направлениями исследований были следующие:

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

Показано, что превышение потока диффузных гамма-лучей над фоном выше 1 ГэВ может быть интерпретировано как сигнал от темной материи. Эта интерпретация совместима с суперсимметрией. Обнаружено, что данные EGRET в комбинации со всеми электрослабыми ограничениями полностью совместимы с минимальной моделью супергравита-

ции для скаляров с массами в ТэВ-ной области и калибрино с массами менее 500 ГэВ [1].

Проанализирована область так называемой коаннигиляции в пространстве параметров МССМ и показано, что она совместима с ограничениями, полученными коллаборацией WMAP, на количество темной материи во Вселенной. В этой области *стау* могут быть долгоживущими и пролетать сквозь детектор. В силу относительно малой массы (150–850 ГэВ) сечение их рождения на LHC может достигать нескольких процентов пб [2].

Проанализирована структура УФ-расходимостей в многомерных неперенормируемых теориях. Показано, что лидирующие расходимости (асимптотики) определяются однопетлевыми диаграммами, число которых бесконечно. Предложено явное выражение для однопетлевого контрчлена в произвольной D -мерной скалярной теории. Проведены вычисления диаграмм в ряде скалярных моделей, которые находятся в согласии с этими общими утверждениями. Это позволяет осуществить суммирование ведущих асимптотик, которые не зависят от произвола в вычитании операторов высших размерностей [3].

Вычислены радиационные поправки к рассеянию высокоэнергетического фотона на электроны с учетом лидирующих и следующих за лидирующими поправок. Также учтено влияние излучения до-

полнительного жесткого фотона (двойной комптон-эффект) в лидирующем приближении. Рождение пар в конечном состоянии в данной постановке задачи не рассматривалось. Показано, что дифференциальное сечение может быть записано в виде сечения процесса Дрелла–Яна. Приведено численное значение K -фактора и лидирующих поправок в зависимости от угла рассеянного электрона и его доли энергии [4].

Рассмотрен процесс образования мюонной (пионной) пары с малой инвариантной массой в процессе электрон-позитронной аннигиляции с образованием реального жесткого неколлинеарного фотона. Показано, что дифференциальное сечение описывается в рамках процесса Дрелла–Яна в зарядово-четной постановке эксперимента. Радиационные поправки к электронному блоку и конечному состоянию приведены в аналитическом виде [5].

С использованием эффективных действий для квазимультиреджевской кинематики вычислены выражения, содержащие один или два реджезованных глюона и некоторое количество обычных частиц, RPP , RRP , $RRPP$, $RPPP$, $RRPPP$ и $RPPPP$, где в качестве частиц выступают безмассовые глюоны или глюоны с малой инвариантной массой. Соответствующие выражения калибровочно-инвариантны и удовлетворяют условию бозе-симметрии. В приложении приведен краткий список из полученных правил Фейнмана [6].

В рамках квантовой электродинамики рассмотрен процесс образования пары при столкновении ионов. Исследована роль многофотонных обменов компонент пары с ионами. Мотивацией для работы послужил недавний анализ глубокоэластичного рассеяния (ГНР) на ядрах, где было обнаружено отклонение от предсказаний, следующих из гипотезы жесткой факторизации в многоструйных процессах [7].

КХД предсказывает, что партонное распределение Сиверса, ответственное за лево-правую асимметрию распределения партонов в поперечно-

поляризованном нуклоне, обладает специфическим «свойством универсальности», а именно: имеет противоположные знаки в глубокоэластичных полуинклюзивных процессах и в процессе Дрелла–Яна. На основе существующих данных HERMES обсуждается [8], как это замечательное предсказание факторизации в КХД могло бы быть проверено экспериментально в будущих экспериментах коллабораций PAX и COMPASS (рис. 1, 2) при измерении одиночных спиновых асимметрий, связанных с эффектом Сиверса.

В процесс Дрелла–Яна в pp -столкновениях неизбежно вовлечены функции распределения Сиверса антикварков, и сечения процесса оказываются во много раз меньшими. Расчеты, однако, показывают, что эффект одиночных асимметрий Сиверса в процессе Дрелла–Яна может быть измерен на RHIC с точностью, достаточной, чтобы не только однозначно проверить изменение знака, ограничиваясь определенной кинематической областью, где эффект неизвестной функции распределения Сиверса антикварка минимизирован, но и получить первую информацию о распределении Сиверса для антикварков, ограничиваясь противоположной кинематической областью [9].

Предложен модифицированный метод разложения кварковых распределений по полиномам Якоби. Главной особенностью предложенного метода является использование усеченных (извлекаемых в узком экспериментальном диапазоне) меллиновских моментов кварковых распределений вместо полных моментов (которые не могут быть извлечены из эксперимента в принципе). Было показано, что использование модифицированного метода полиномов Якоби позволяет с высокой точностью извлекать кварковые распределения даже при использовании только первых четырех моментов, извлеченных из эксперимента в следующем за лидирующим порядке КХД. Была также предложена вариационная/экстраполя-

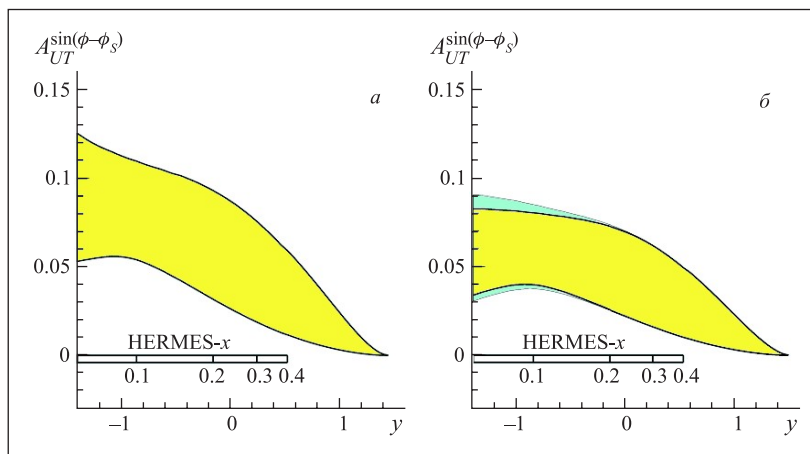


Рис. 1. Азимутальные асимметрии $A_{UT}^{\sin(\phi_h - \phi_S)q_{\perp}/M_N}$ в процессе рождения лептонных пар Дрелла–Яна, $p^{\dagger}h \rightarrow \mu^+ \mu^- X$, в зависимости от быстроты y : а) для кинематики эксперимента PAX, где адрон $h = \bar{p}$; б) для кинематики эксперимента COMPASS, где $h = \pi^-$. Заштрихованная область соответствует 1σ

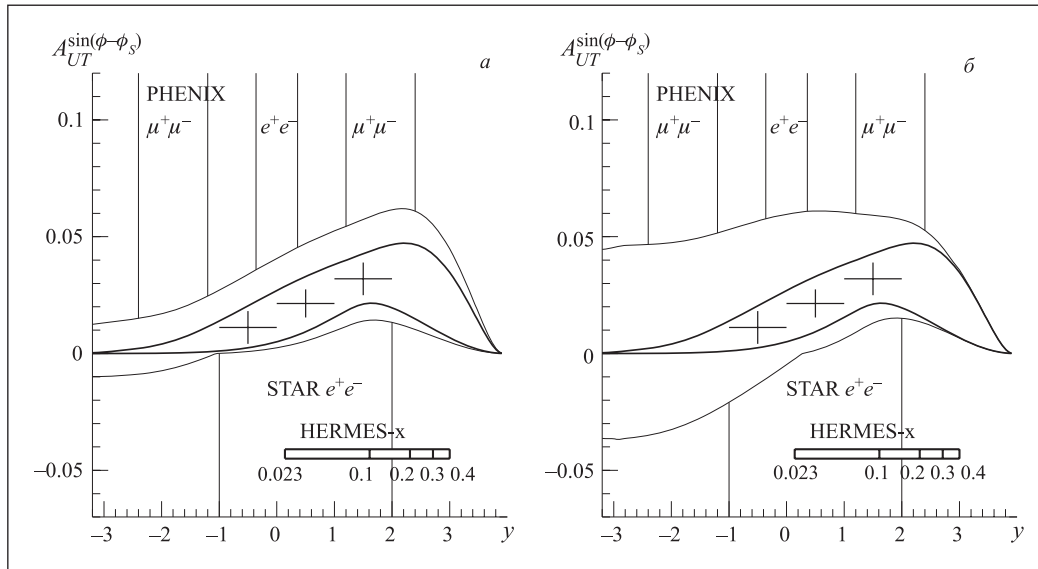


Рис. 2. Азимутальная одиночная асимметрия Сиверса $SSA A_{UT}^{\sin(\phi-\phi_S)}$ в процессе Дрелла–Яна рождения лептонных пар $p^\uparrow p \rightarrow l^+ l^- X$ как функция y для кинематики эксперимента RHIC с $\sqrt{s} = 200$ ГэВ. Графики a и b соответствуют различным предположениям для распределений Сиверса антикварка. Для $Q = 4$ ГэВ показана статистическая ошибка для STAR

ционная процедура, позволяющая с хорошей точностью восстанавливать распределения вне экспериментально доступной области [10].

Рассмотрены процессы Дрелла–Яна как в случае взаимодействия двух неполяризованных адронов, так и в случае взаимодействия неполяризованного адрона с поляризованным. Было показано, что на основе экспериментальных данных по таким процессам можно напрямую, без каких-либо моделей и дополнительных предположений, извлечь как поперечно-поляризованные партонные распределения (transversity), так и связанные с ними T -нечетные партонные распределения (так называемые функции Боера). Приведенные в работе оценки, сделанные на основе симулирования Монте-Карло экспериментальной установки PAX (GSI, Дармштадт), позволяют сделать вывод, что при ожидаемой на PAX статистике можно измерить как поперечно-поляризованные партонные распределения, так и связанные с ними T -нечетные партонные распределения [11].

Развита обобщенная нестепенной, аналитической теории возмущений (без полюса Ландау) Ширкова–Соловцова (АТВ), позволяющее применять ренорм-группу, другие способы суммирования высших порядков теории возмущений по аналитизированной «константе» связи \mathcal{A}_n в любых процессах. Однопетлевая бегущая константа \mathcal{A}_ν оказывается целой функцией индекса ν для пространственно- и временноподобных областей. Это позволяет пополнить линейное пространство АТВ новыми элементами, возникающими в результате суммирования высших порядков. Рассмотрена общая схема и предложены ал-

горитмические правила расчетов в обобщенной таким образом АТВ [12]. Обобщенная АТВ приводит к сильному ослаблению зависимости предсказаний для электромагнитного формфактора пиона от выбора схемы/масштаба перенормировки и от выбора масштаба факторизации [13].

В модели вакуума КХД как инстантонной жидкости рассчитаны адронные поправки к аномальному магнитному моменту мюона, возникающие от адронной поляризации вакуума, эффективной $\gamma\gamma Z$ -вершины и процесса рассеяния света на свете. С этой целью изучены непертурбативные свойства аномальной амплитуды, включающей коррелятор векторного и аксиально-векторного токов во внешнем электромагнитном поле. В общем случае такая амплитуда имеет две лоренц-структуры: продольную w_L и поперечную w_T по отношению к лоренц-индексу аксиального тока. Известно, что в пределе безмассовых кварков продольная w_L и поперечная w_T структуры не имеют пертурбативных поправок в соответствии с теоремами Адлера–Бардина и Вайнштейна. В модели инстантонного вакуума показано, что аномальная структура w_L не имеет непертурбативных поправок в соответствии с принципом дуальности 'т Хофта, в то время как поперечная амплитуда w_T , вычисленная для произвольного пространственноподобного момента q , имеет при больших q лишь экспоненциально подавленные поправки. Это свойство отражает нелокальные свойства вакуума КХД [14].

Надежное установление симметрий и более детальных свойств волновой функции нуклона в конфигурационном пространстве релятивистских «ва-

лентных» кварков имеет первостепенное значение для физики адронов.

В работе [1] на основе дисперсионных правил сумм и правил сумм алгебры токов для сечений фотозвозбуждения нуклонных резонансов, являющихся следствием весьма общих предположений и насыщения полученных соотношений вкладами известных нуклонных резонансов с массами до 2–2,5 ГэВ, определены моменты корреляционных функций кварков в нуклонах и впервые непосредственно из эксперимента и с использованием в максимальной степени модельно-независимого теоретического аппарата получены свидетельства координатной асимметрии распределения кварков. Количественные показатели этой асимметрии характеризуются различием вычисленных значений флуктуации операторов электрического дипольного момента (с отфакторизованными и отделенными зарядами кварков) каждого из «четных» (т.е. пары тождественных, условно q_1 - и q_2 -кварков) и «нечетного» (q_3 -кварка):

$$\langle \mathbf{d}_1^2 \rangle = \langle \mathbf{d}_2^2 \rangle = 0,62 \pm 0,06 \text{ фм}^2,$$

$$\langle \mathbf{d}_3^2 \rangle = 0,78 \pm 0,12 \text{ фм}^2,$$

$$\langle \mathbf{d}_1 \cdot \mathbf{d}_2 \rangle = -0,18 \pm 0,04 \text{ фм}^2,$$

$$\langle \mathbf{d}_1 \cdot \mathbf{d}_3 \rangle = \langle \mathbf{d}_2 \cdot \mathbf{d}_3 \rangle = -0,25 \pm 0,07 \text{ фм}^2,$$

где средние значения берутся по состоянию нуклона в системе «бесконечного» импульса (или в переменных светового фронта). Хорошее согласие с экспериментом изоскалярного среднеквадратичного радиуса «дираковского» формфактора $\langle r_1^2 \rangle^S = 0,34 \pm 0,04 \text{ фм}^2$, (exp : $0,336 \text{ фм}^2$), в котором не проявляются заметным образом эффекты невалентных степеней свободы (пионные токи и т.д.), служит подтверждением адекватности дуальной связи динамики валентных кварков с формированием нуклонных резонансов в прямом канале реакции и обмена невакуумными реджевскими траекториями в кросс-канале [15].

Методом правил сумм КХД изучены трикварковые корреляции в пентакварке [1]. Найдено два квазисвязанных легких цветных кластера кварков uds с массами 800 и 930 МэВ. Построены правила сумм КХД для определения массы и четности нижайшего пентакварка [2]. В расчет включены операторы вплоть до размерности $d = 13$, а также учтены вклады прямых инстантонов. Наши результаты указывают на существование экзотического пентакварка Θ^+ с положительной четностью [16].

Дана теоретическая оценка сечения рассеяния эксклюзивного процесса рождения $\rho^+\rho^-$ и $\rho^0\rho^0$ -мезонов в двухфотонном рассеянии, когда один из начальных фотонов имеет большую виртуальность [17]. Особое внимание уделено вкладам твиста 4, связанным с возможностью рождения экзотического резонанса с изоспином 2 в системе двух

ρ -мезонов. Наш анализ показал, что экспериментальные данные коллаборации L3 (LEP, ЦЕРН) могут быть проинтерпретированы как указание на существование экзотического резонанса с изоспином 2 с массой около 1,5 ГэВ. Показано, что также должно быть заметное сечение электророждения экзотического гибридного мезона $J^{PC} = 1^{-+}$ в бьеркеновском пределе [18].

В свете недавних (Mainz microtron, MAMI) и проводящихся в настоящее время (ЦЕРН, коллаборация COMPASS) экспериментов по поляризуемости пионов уточнение теоретических расчетов поляризуемости стало неотложной задачей. Сечение реакции $\gamma + \gamma \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ было найдено в рамках киральных лагранжианов в порядке p^6 с использованием улучшенной техники расчета. Были получены аналитические результаты для дипольной и квадрупольной поляризуемостей. Проведено сравнение теоретических оценок для квадрупольной поляризуемости с имеющимися экспериментальными данными по реакции $\gamma + \gamma \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ [19].

Известно, что распады $K^+ \rightarrow \pi^- + l_1^+ + l_2^+$, нарушающие сохранение лептонного числа, являются перспективными с точки зрения обнаружения новой физики, не описываемой стандартной моделью, и содержат ценную информацию о массах и смешивании нейтрино. Эти процессы были проанализированы с акцентом на их адронную структуру с применением релятивистской кварковой модели. Показано, что в широком диапазоне масс нейтрино обычно не учитываемый обмен нейтрино в t -канале дает вклад, сопоставимый с вкладом обмена в s -канале. Кроме того, была получена модельно-независимая оценка сверху на полный вклад нейтрино в эти процессы [20].

В модели Намбу–Иона-Лазинио описаны двухфотонные распады векторных мезонов ω , ρ , ϕ , сильный распад $\rho \rightarrow \eta\pi$ и дилептонные распады скалярных мезонов σ , a_0 , f_0 . Эти распады полностью запрещены в вакууме, однако открываются при значениях химического потенциала μ и температуры T вблизи фазового перехода адронной материи в кварк-глюонную плазму. Особенно интересен распад $\rho \rightarrow \gamma\gamma$, который содержит промежуточный скалярный мезон a_0 . Пропагатор этого мезона вблизи критических значений T и μ приобретает форму острого резонанса. Это резко увеличивает ширину указанного распада и делает его сравнимым с такими разрешенными распадами, как, например, $\eta \rightarrow \gamma\gamma$, $\sigma \rightarrow \gamma\gamma$ и $a_0 \rightarrow \gamma\gamma$. В этой области также заметно усиливается распад $\omega \rightarrow \pi\pi$ по сравнению со значением в вакууме. Полученные результаты могут быть использованы при описании экспериментов по столкновению тяжелых ионов, планируемому в ОИЯИ (нуклотрон) и в GSI (SIS-300) [21].

Сформулирована программа физических исследований, которые могут быть проведены в Дубне благодаря возможности ускорения тяжелых ионов до энергии 5 А · ГэВ [22].

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 2005 г. результатов по теме.

Построена $6D$ -суперсимметричная калибровочная теория с четырьмя производными в действии. Теория содержит безразмерную константу связи и поэтому перенормируема. На древесном уровне она обладает $N = (1, 0)$ суперконформной симметрией, которая, однако, нарушена квантовой аномалией [23].

На основе $(2, 8, 6)$ $d = 1$ супермультиплетта построена двумерная $N = 8$ суперсимметричная квантовая механика, наследующая наиболее интересные свойства $N = 2, d = 4$ суперсимметричной теории Янга–Миллса [24].

Выявлены неожиданные связи между теорией высших спинов и нелинейными реализациями супергруппы $OSp(1|8)$, минимального суперконформного расширения $N = 1, 4D$ -суперсимметрии с тензорными зарядами. Ковариантные суперполевые уравнения, содержащие компонентные уравнения для всех целых и полужелых спинов, эквивалентны занулению ковариантных спинорных производных определенных голдстоуновских суперполей [25].

Предложен широкий класс фермионных иерархий тодовского типа и получены их лаксово и гамильтоново описания на основе развитого обобщенного градуированного r -матричного формализма [26].

Был детально изучен предложенный ранее класс интегрируемых моделей со связями типа нелинейного уравнения Лиувилля. Такие модели возникают в $1+1$ дилатонной гравитации, взаимодействующей с N скалярными полями. Структура пространства киральных модульных полей, с помощью которых строится общее решение в рассматриваемых моделях, отождествляется с парой N -мерных единичных сфер, которым должны принадлежать левые и правые модульные поля. Если в качестве модульных полей взяты константы, то происходит редукция двумерной теории к одномерным космологическим моделям и статическим решениям, описывающим, в частности, черные дыры. Дополнительно к таким редуцированным решениям найден новый класс волновых решений. При определенных условиях эти волны могут быть локализованы в пространстве и во времени, т.е. могут рассматриваться как солитонные гравитационные волны. Было показано, что существует тесная связь между такими важными гравитационными объектами, как черные дыры, и различными космологическими сценариями и гравитационными

волнами. Связь между статическими состояниями и космологическими решениями была детально изучена и для нее было предложено естественное название «статико-космологическая» дуальность (СК-дуальность). Эти идеи могут открыть новый путь изучения связи между всеми перечисленными выше объектами, которые имеют очевидно различную физическую природу [27].

Доказано, что инспирированные суперструнами супергравитационные уравнения для чисто временных космологических метрик, сводящиеся к сигма-модельным уравнениям, допускают лаксово представление и являются вполне интегрируемыми. В случае, когда соответствующая сигма-модель на максимально расщепленном некомпактном многообразии (для максимальных супергравитаций или подсекторов супергравитаций с меньшим числом суперсимметрий), продемонстрировано, что она связана с обобщенными уравнениями Тоды и, как следствие, допускает абсолютно явный аналитический алгоритм построения ее общего решения. Показано, что полная космологическая эволюция может быть трактована как рассеяние на бильярде с квантованными углами, определяемыми вейлевской группой группы симметрии сигма-модели [28].

Продemonстрировано, что коэффициенты трехструнной вершины в полевой теории открытых суперструн в калибровке светового конуса удовлетворяют уравнениям Хироты для бездисперсионной иерархии Тоды, что позволило вычислить корреляторы соответствующей квантовой системы, чьи коэффициенты Неймана являются двухточечными функциями. Показано также, что коэффициенты трехструнной вершины в полевой теории открытых суперструн в калибровке светового конуса на максимально суперсимметричном pp -волновом фоне удовлетворяют уравнениям Хироты для полной решеточной иерархии Тоды, по крайней мере, до второго порядка по «струнной массе» включительно. Главная ценность полученных результатов заключается в том, что они указывают на существование интегрируемой модели (сигналом чего являются уравнения Хироты), лежащей в основе полевой теории открытых суперструн, вероятней всего матричной модели, которая, будучи проясненной, сильно бы улучшила понимание полевой теории открытых суперструн. Тот факт, что это, вероятно, является верным и для нетривиального фона, такого как pp -волновой, может предложить путь к разрешению проблемы определения полевой теории открытых суперструн на более общих фонах [29].

Выполнен спектральный анализ уравнений Максвелла в присутствии бесконечно тонкого плоского плазменного слоя. Эта модель описывает в первом приближении плоскую поверхность, образованную

атомами углерода, и представляет интерес для теоретических исследований фуллеренов. Оба сектора модели (ТЕ- и ТМ-моды) имеют положительный непрерывный спектр, а среда ТМ-мод есть связанное состояние (поверхностный плазмон). Для всех ветвей спектра явно построены спектральные ζ -функции и проинтегрированные тепловые ядра. Продемонстрирован новый метод построения фундаментального решения для уравнения теплопроводности (или уравнения Шредингера), рассматриваемых на бесконечной прямой с дельтаобразным источником [30].

Развит гамильтонов вариант космологической теории возмущений в рамках общей теории относительности (ОТО) в случае конечного пространственного объема и интервала времени. Существенным моментом данного подхода является отождествление космологического масштабного фактора со средним по пространству от логарифма детерминанта метрического тензора. Важно, что такое отождествление сохраняет число динамических переменных и энергетических связей в ОТО. Предложенный подход дает возможность объяснить анизотропность реликтового излучения и рассмотреть с этой точки зрения другие важные проблемы современной космологии [31].

Недавно было показано, что открытая топологическая B -модель, заданная на комплексном $(2-4)$ -мерном мини-супертвисторном пространстве с вложенными $D3$ -, $D1$ -бранами, сводится к теории Янга–Миллса в трех измерениях. Предложен способ получения решений в этой модели, основанный на использовании твисторов, и ряд таких решений построен явно [32].

Были исследованы обобщенные уравнения автодуальности Уорда для $U(2n)$ теории Янга–Миллса на R^{4k} , а также их некоммутативные деформации. С помощью аналога конструкции АДНМ были явно получены решения двух типов, которые обобщают инстантоны 'т Хофта и БПСТ-инстантоны с R^4 на некоммутативное пространство R^{4k} [33].

Проведено исследование структуры квантовых суперматричных алгебр серии $GL(m-n)$. Для кван-

товых суперматриц такого типа доказаны обобщенная теорема Гамильтона–Кэли и соотношения Ньютона, определена характеристическая подалгебра и доказана ее коммутативность. Это позволило в конечном итоге определить понятие собственного значения квантовой суперматрицы [34].

При специальных значениях параметра анизотропии $q = \exp(i\pi/3)$ и $q = \exp(i\pi/2)$ установлено (нетривиальное) соотношение между спектрами трех конечных гейзенберговских цепочек частиц спина $1/2$, имеющих различные граничные члены. Спектр одной из этих цепочек — $U_q(sl(2))$ симметричной — хорошо известен, что позволяет восстановить информацию о спектрах двух других цепочек, отвечающих нетривиальным недиагональным условиям на границе. Происхождение подобных соотношений в спектрах объяснено с использованием теории представлений гранично-расширенной алгебры Темперли–Либа, что позволило также сформулировать спектральные тождества для семейства цепочек с более общими условиями на границах [35].

Продолжено исследование математических структур, обеспечивающих интегрируемость нетривиальных квантовых моделей. Эти структуры были использованы для получения точных результатов в некоторых двумерных и трехмерных квантовых интегрируемых системах [36].

Были рассмотрены два эквивалентных формализма, описывающих гиперкэллеровы геометрии с кручением в четырехмерии. Детально представлены некоторые явные примеры (в том числе и типа Каллана–Харви–Строминжера) [37].

Техника фейнмановских интегралов по траекториям применена к суперинтегрируемым системам на двумерных пространствах непостоянной кривизны — пространствах Дарбу D_I-D_{IV} . В большинстве систем координат, допускающих разделение переменных, континуальный интеграл может быть вычислен, что приводит к выражениям для функций Грина, дискретным и непрерывным волновым функциям и дискретному спектру энергии [38].

ТЕОРИЯ ЯДРА

В 2005 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.

Ранее предложенное приближение конечного ранга для сил Скирма обобщено таким образом, чтобы учесть взаимодействие фононов. Рассчитаны энергии и вероятности возбуждения низколежащих 2^+ - и 3^- -уровней, а также распределения силы пе-

переходов в широком интервале энергии возбуждения для сферических ядер с различными массовыми числами. Получено хорошее согласие с данными эксперимента. Роль связи с двухфононными конфигурациями изучена на примере низколежащих 2^+ -состояний ядер нейтроноизбыточных изотопов олова [39].

Микроскопическая квазичастично-фононная модель усовершенствована с целью систематического изучения низколежащих возбужденных 0^+ -уровней, большое число которых недавно обнаружено в некоторых деформированных ядрах. Природа этих состояний понята в результате комбинированного анализа их энергий, волновых функций, вероятностей $E0$ - и $E2$ -переходов и в особенности спектроскопических факторов двухнуклонной передачи. Показано, что для объяснения большого числа экспериментально обнаруженных 0^+ -состояний в ядре ^{168}Er следует использовать подходы, выходящие за пределы приближений среднего поля или случайной фазы [40].

В рамках кластерного подхода к структуре тяжелых ядер объяснено, почему в ядре ^{144}Ba измеренные вероятности $E2$ -переходов между состояниями отрицательной четности значительно больше, чем между состояниями положительной четности. Показано, что этот эффект возникает из-за большого веса α -кластерной компоненты в волновых функциях состояний отрицательной четности [41].

Новые результаты получены и в исследованиях ядерных реакций.

Предсказаны сечения образования нейтроноизбыточных изотопов $^{24,26}\text{O}$, ^{32}Ne , $^{36,38}\text{Mg}$, ^{42}Si и $^{52,54,56,58,60}\text{Ca}$ в диффузных реакциях передачи нескольких нуклонов $^{48}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$, ^{197}Au , ^{232}Th , ^{238}U , ^{248}Cm для энергий, близких к кулоновскому барьеру. Для планирования будущих экспериментов проанализировано общее поведение сечения этой реакции с пучком ^{48}Ca в зависимости от заряда (массового числа) мишени [42].

Выведено полуаналитическое соотношение между радиусами распределения вещества и заряда в гало-ядрах. Соотношение основано на предположении о трехчастичной кластерной структуре $\text{кор} + N + N$ гало-ядра и известных радиусах составляющих его кластеров. Предсказан зарядовый формфактор ^6He [43].

Развита модель для построения микроскопического ядро-ядерного оптического потенциала, который успешно объясняет экспериментальные данные по рассеянию различных пар ядер, в том числе и экзотических. Были рассчитаны зарядовые формфакторы нескольких нестабильных нейтроноизбыточных ядер. Проведено сравнение со стабильными изотопами тех же изотопических цепочек [44].

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

Показано, что в низкоэнергетическом пределе дифференциальное сечение триплетного pp -рассеяния, генерированное суммой ядерного и магнитного взаимодействий в кулоновском поле протонов, быстро осциллирует и, кроме того, имеет полюса второго порядка в направлении рассеяния вперед и назад. Предложена простая низкоэнергетическая аппроксимация, позволяющая экстраполировать такое сечение в область энергий ниже 10 МэВ. Обсуждено новое явление — протон-протонный аналог эффектов Мотта и Швингера [45].

Проведен самосогласованный анализ пионного рассеяния и фоторождения пионов в динамической модели с учетом связи каналов. Результаты анализа указывают на существование третьего и четвертого S_{11} -резонансов с массами 1803 ± 7 и 2117 ± 64 МэВ соответственно. Это согласуется с предсказаниями моделей конституентных кварков. Для фоторождения пионов обнаружен большой отрицательный фоновый вклад в мнимую часть S -волнового мультиполя. Это значит, что для объяснения результатов недавнего мультипольного анализа необходимо, чтобы резонансный вклад был гораздо больше [46].

Основные результаты исследований в рамках проекта «Релятивистская ядерная динамика» следующие.

Предложена и использована для интерпретации уравнения состояния решеточной КХД простая квазичастичная модель, идейно опирающаяся на пертурбативную КХД в низжайшем порядке. Модель вполне приемлемо воспроизводит результаты решеточных расчетов. В противовес другим известным квазичастичным моделям настоящая модель сформулирована скорее в динамических, нежели термодинамических терминах и ее легко применить к системам с конечной плотностью барионов. Например, модель симулирует конфайнмент [47].

Впервые показано, что если пентакварк Θ^+ существует и распадается на NK -пары, то он должен проявить себя в ассоциированном фоторождении $\Lambda(1520) \Theta^+$ на дейтроне независимо от механизма фоторождения Θ^+ в элементарных реакциях $\gamma n \rightarrow \Theta^+ K^-$ или $\gamma p \rightarrow \Theta^+ K^0$ [48].

В обобщенном эйкональном приближении исследованы процессы $^2\text{H}(e, e'p)n$, $^3\text{He}(e, e'p)X$ и $^3\text{He}(e, e'N)2N$. Использовались реалистические трехчастичные волновые функции, взаимодействие в конечном состоянии рассчитывалось с помощью фейнмановских диаграмм. Предложенная схема не содержит каких-либо подгоночных параметров и хорошо воспроизводит экспериментальные данные [49].

Кроме того, новые результаты получены в теории излучения Вавилова–Черенкова.

Рассмотрены новые аспекты задачи о движении заряда в среде в предположении, что сначала он равномерно ускоряется до определенной скорости, затем на конечном интервале движется с постоянной

скоростью и затем равномерно замедляет свое движение. Рассчитано пространственно-временное распределение ударной волны, возникающей, если скорость

заряда достигает скорости света в среде. Результаты предлагается использовать в экспериментальных поисках указанных ударных волн [50].

ТЕОРИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

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

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

Ряд важных новых результатов был получен в области *теории сильно коррелированных систем*, среди которых отметим следующие.

Исследована бозе-эйнштейновская конденсация магнонов в квазидвумерном фрустрированном антиферромагнетике Cs_2CuCl_4 , индуцированная магнитным полем B_c . Построена фазовая диаграмма и вычислена критическая температура $T_c(B)$ в рамках спинового гамильтониана, параметры взаимодействия которого найдены из данных по неупругому рассеянию нейтронов. Получено хорошее согласие с экспериментом [51].

Построена последовательная теория для вычисления спектра квазичастиц в таких сложных магнитных материалах, как магнитные полупроводники. Теория была использована для изучения акустических и оптических спектров в рамках обобщенной спинфермионной модели, описывающей взаимодействующие подсистемы локализованных и зонных электронов [52].

В работах по проекту «Динамические системы: хаос, интегрируемость и самоорганизация» исследованы поправки от конечного размера решетки к свободной энергии модели димеров для открытых и периодических граничных условий. Обнаружена сильная зависимость этих поправок от четности решетки. Найдено объяснение необычным граничным эффектам в рамках логарифмической конформной теории поля с центральным зарядом $c = -2$ [53].

При исследовании *неупорядоченных структур* получены следующие результаты.

Показано, что теплопроводность пластически деформированных образцов Al, Ta и Nb при низких температурах может быть объяснена присутствием разумной плотности оптически колеблющихся ди-

полей дислокаций. Эксперименты по внутреннему трению в этих образцах могут быть описаны в рамках струнной модели дислокаций в предположении, что на дислокационные диполи действуют случайные упругие силы [54].

Показано, что экспериментально наблюдаемая теплопроводность в квазикристаллах $i\text{-AlPdMn}$ может быть описана путем совместного учета фононного рассеяния на диполях клиновых дисклинаций и процессов переброса [55].

В рамках двумерной модели случайных джозефсоновских сетей (образованных двойниковыми дислокациями с полями напряжений, действующими как диэлектрические барьеры между обогащенными кислородом доменами в сверхпроводящих кристаллах) предсказано появление ряда новых поляризационных эффектов в гранулярных материалах во внешнем магнитном поле, включая хемомагнетоэлектричество и зарядовый аналог парамагнитного эффекта Мейснера [56].

Тематика исследований по проекту «Мезоскопические и когерентные явления в квантовых системах» была сосредоточена на основных квантовых эффектах для конечных (мезоскопических) систем.

Развита общая теория для описания процессов нелинейной релаксации спиновых систем из сильно неустойчивого начального положения, когда образец соединен с резонатором. Эти процессы описываются нелинейными стохастическими уравнениями, что принципиально отличает их от процессов спиновой релаксации около состояния равновесия, которые характеризуются линейными дифференциальными уравнениями. Изучение основано на реалистичном микроскопическом гамильтониане, включающем параметры Зеемана, дипольные взаимодействия, обменные взаимодействия и одноузельную анизотропию. Исследовано влияние кросс-корреляций между несколькими типами спинов. Подчеркнута критически важная функция связи между спиновой системой и резонансной электрической цепью. Описано явление когерентной самоорганизации спинов из квантового хаоса некогерентных флуктуаций. Обнаружено, что локальные спиновые флуктуации являются спусковым механизмом, вызывающим спиновую релаксацию из некогерентного неустойчивого состояния. Изучены основные режимы коллективной когерентной спиновой релаксации [57].

Исследована возможность когерентного излучения молекулярными магнетиками. Показано, что для того чтобы реализовать когерентное излучение, необходимо рассматриваемый образец присоединить к резонансной электрической цепи. Изучена роль

сверхтонких взаимодействий между молекулами и ядерными спинами.

Приводятся результаты численного решения спинного эволюционного уравнения [58].

ДУБНЕНСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (DIAS-TN)

В рамках DIAS-TN в истекшем году были проведены пять школ и рабочее совещание (Research Workshop): 3-я зимняя школа по теоретической физике (29 января – 6 февраля) при поддержке РФФИ и ЮНЕСКО-ROSTE (регионального бюро по науке в Европе); летняя школа по физике тяжелых кварков (6–16 июня) при поддержке ЮНЕСКО-ROSTE, программы «Гейзенберг–Ландау» и общества Гельмгольца (Германия); 9-е рабочее совещание «Теория нуклеации и ее применения» (20 июня – 20 июля) при поддержке РФФИ, программы «Гейзенберг–Ландау» и ЮНЕСКО-ROSTE; летняя школа по современной математической физике (14–26 июля) при поддержке РФФИ, программ «Гейзенберг–Ландау»,

«Блохинцев–Вотруба», ЮНЕСКО-ROSTE и общества Гельмгольца (Германия); школа по теории ядра и ее астрофизическим приложениям (26 июля – 4 августа), организованная совместно с УНЦ ОИЯИ при поддержке РФФИ и программ «Гейзенберг–Ландау», «Блохинцев–Вотруба», ЮНЕСКО-ROSTE и общества Гельмгольца (Германия); школа по современной космологии и астрофизике (3–7 октября).

Кроме того, был прочитан курс лекций по конформной теории поля для студентов и аспирантов, поддерживался сайт DIAS-TN (<http://thsun1.jinr.ru/dias/>). Летом 2005 г. открыт учебный класс DIAS-TN.

РАЗВИТИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Локальная сеть ЛТФ расширена на учебный класс DIAS-TN и ряд новых рабочих мест. Всего было подключено 48 новых точек. С установкой двух новых устройств емкость стека сетевых коммутаторов увеличилась на 72 порта. Для улучшения управления локальной сетью созданы базы данных, описывающие распределение ресурсов и позволяющие автоматизировать контроль за их использованием. Внедрение баз данных в обработку электронной почты дало возможность блокировать более 90 % сорных посланий

(«спама»). Дисковое пространство для домашних директорий пользователей на сервере THEOR увеличено до 140 Гбайт. Удвоено дисковое пространство на сервере THPROXY, предназначенное для файлового архива и видеозаписей лекций DIAS-TN. Введены в строй два двухпроцессорных сервера на 64-разрядных процессорах Opteron, приобретенные в конце 2004 г. Оперативная память этих серверов увеличена до 12 и 8 Гбайт. Для установки на рабочих местах приобретено 17 персональных компьютеров на базе Pentium 4.

КОНФЕРЕНЦИИ, СОВЕЩАНИЯ, СОТРУДНИЧЕСТВО

В 2005 г. кроме школ, проводившихся в рамках DIAS-TN, лаборатория участвовала в организации восьми международных конференций и рабочих совещаний.

В Дубне проводились международные рабочие совещания: «Классические и квантовые интегрируемые системы» (24–28 января), «Суперинтегрируе-

мые системы в классической и квантовой механике» (27 июня – 1 июля), «Суперсимметрии и квантовые симметрии» (27–31 июля), «Спиновая физика при высоких энергиях» (27 сентября – 1 октября) и две конференции проходили в Праге: «Интегралы по путям. От квантовой информации до космологии» (6–10 июня), «Квантовые группы и интегрируемые системы» (16–18 июня).

В ЛТФ начаты работы над новым проектом «Поиск смешанной фазы сильно взаимодействующей материи на нуклотроне ОИЯИ». Для создания соответствующей программы теоретических и экспериментальных исследований в апреле 2005 г. в Объединенном институте ядерных исследований возникла неформальная инициативная рабочая группа из теоретиков и экспериментаторов из ЛТФ, ЛВЭ, ЛЯП, ЛФЧ и ЛИТ под общим руководством А. Н. Сисакяна, первые результаты работы которой появились совсем недавно. Более глубокое понимание проблемы сформировалось также и в результате обсуждений с рядом ведущих мировых экспертов в этой области, таких как профессора Х. Затц (Германия), Г. М. Зиновьев (Украина), Т. Хатсуда (Япония) и Х. Штробель (Германия). С целью более детального обсуждения всего круга возникающих вопросов с 7 по 9 июля 2005 г. в ОИЯИ проходила встреча экспертов в формате круглого стола (более подробную информацию об этом можно найти на <http://thsun1.jinr.ru/meetings/2005/roundtable/>), в работе которой могли принять участие и все желающие сотрудники ОИЯИ, интересующиеся этой областью. По итогам работы подготовлен меморандум круглого стола, который будет являться основой для продолжения начатой работы.

19–20 октября в Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова проходило рабочее совещание «Современные проблемы структуры атомных ядер», посвященное 80-летию со дня рождения выдающегося ученого, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, профессора Вадима Георгиевича Соловьева (1925–1998). Профессор В. Г. Соловьев — основатель дубненской научной школы в теории ядра. Его работы оказали значительное влияние на развитие исследований по ядерной физике низких энергий в ОИЯИ. В работе совещания приняли участие ученые из Болгарии, Италии, России, Румынии, Украины, Франции и ОИЯИ. Среди участников было немало учеников В. Г. Соловьева. Совещание показало, что и идеи В. Г. Соловьева, и результаты его конкретных исследований продолжают оставаться в арсенале современной ядерной физики.

Международное сотрудничество ЛТФ в 2005 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.* // *Astronomy & Astrophys.* 2005. V. 44. P. 51.
2. *Gladyshev A. V., Kazakov D. I., Paucar M. G.* // *Mod. Phys. Lett. A.* 2005. V. 20. P. 3085.
3. *Казаков Д. И., Вартанов Г. С.* hep-ph/0410342; ТМФ (в печати).
4. *Ильичев А. Н. и др.* // *ЖЭТФ.* 2005. Т. 100. С. 31–38.
5. *Арбузов А. Б. и др.* // *Письма в ЭЧАЯ.* 2005. Т. 2, № 4(127). С. 41–52.
6. *Antonov E. N. et al.* // *Nucl. Phys. B.* 2005. V. 721. P. 111–135.
7. *Бартоу Э. и др.* // *ЖЭТФ.* 2005. Т. 100. С. 645–655.
8. *Efremov A. V. et al.* // *Phys. Lett. B.* 2005. V. 612. P. 233.
9. *Collins J. C. et al.* hep-ph/0511272. 2005.
10. *Сисакян А. Н., Шевченко О. Ю., Иванов О. Н.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2005. Т. 82. С. 53.
11. *Sissakian A. N. et al.* // *Phys. Rev. D.* 2005. V. 72. P. 054027.
12. *Bakulev A. P., Mikhailov S. V., Stefanis N. G.* // *Ibid.* P. 074014.
13. *Bakulev A. P., Karanikas A. I., Stefanis N. G.* // *Ibid.* P. 074015.
14. *Dorokhov A. E.* // *Acta Phys. Polon. B.* 2005. V. 36. P. 1001–1031; *Eur. Phys. J. C.* 2005. V. 42. P. 309–317.
15. *Gerasimov S. B.* // *Czech. J. Phys.* 2005. V. 55. P. A209–A217.
16. *Lee H. J., Kochelev N. I., Vento V.* // *Phys. Lett. B.* 2005. V. 610. P. 50–60.
17. *Anikin I. V., Pire B., Teryaev O. V.* // *Ibid.* V. 626. P. 86.
18. *Anikin I. V. et al.* // *Phys. Rev. D.* 2005. V. 71. P. 034021.
19. *Gasser J., Ivanov M. A., Sainio M. E.* // *Nucl. Phys. B.* 2005. V. 728. P. 31.
20. *Ivanov M. A., Kovalenko S. G.* // *Phys. Rev. D.* 2005. V. 71. P. 053004.
21. *Radzhabov A. E., Volkov M. K., Yudichev V. L.* hep-ph/0510329; *J. Phys. G* (submitted).
22. *Sissakian A. N. et al.* // *Contribution to the Proc. of the 8th Intern. Workshop «Relativistic Nuclear Physics: from hundreds MeV to TeV», Dubna, May 23–28, 2005; nucl-ex/0511018; Part. Nucl., Lett. (in press).*
23. *Ivanov E. A., Smilga A. V., Zupnik B. M.* // *Nucl. Phys. B.* 2005. V. 726. P. 131–148; hep-th/0505082.
24. *Bellucci S., Krivonos S., Shcherbakov A.* // *Phys. Lett. B.* 2005. V. 612. P. 283–292; hep-th/0502245.
25. *Ivanov E., Lukierski J.* // *Phys. Lett. B.* 2005. V. 624. P. 304–315; hep-th/0505216.
26. *Gribanov V. V., Kadyshevsky V. G., Sorin A. S.* nlin.SI/0505039; *Theor. Math. Phys.* 2006. V. 146. P. 74–85; *Nucl. Phys. B.* 2005. V. 727. P. 564–586; nlin.SI/0506041.
27. *de Alfaro V., Filippov A. T.* hep-th/0504101; *Proc. of the Turin Acad. of Sci.* (submitted); *Filippov A. T.* hep-th/0505060; TMF (submitted).
28. *Fre' P., Sorin A. S.* hep-th/0510156; *Nucl. Phys. B* (in press).

29. *Bonora L. et al.* hep-th/0511006; *Class. Quant. Gravity* (in press).
30. *Bordag M., Pirozhenko I. G., Nesterenko V. V.* // *J. Phys. A: Math. Gen.* 2005. V. 38. P. 11027.
31. *Barbashov B. M. et al.* // *Phys. Lett. B.* 2005 (in press); hep-th/0501242.
32. *Popov A. D., Saemann Ch., Wolf M.* // *JHEP.* 2005. 0510. 058; hep-th/0505161.
33. *Ivanova T. A., Lechtenfeld O.* // *Phys. Lett. B.* 2005. V. 612. P. 65–74; hep-th/0502117.
34. *Гуревич Д. И., Пятков П. Н., Сапонов П. А.* // *Алгебра и анализ.* 2005. Т. 17. С. 157–179.
35. *de Gier J. et al.* // *Nucl. Phys. B.* 2005. V. 729. P. 387–418; hep-th/0505062.
36. *von Gehlen G., Pakuliak S., Sergeev S.* // *J. Phys. A: Math. Gen.* 2005. V. 38. P. 1–30;
Пакуляк С., Хорошкин С. // *ТМФ.* 2005. Т. 145(1). С. 3–34.
37. *Isaev A. P., Santillan O. P.* // *J. of High Energy Phys.* 2005. V. 0510. P. 061; hep-th/0508106.
38. *Grosche Ch., Pogosyan G. S., Sissakian A. N.* // *Path-Integral Approach to Superintegrable Potentials on Darboux Spaces I and II.* DESY Report. 2005; *Path-Integral Approach to Superintegrable Potentials on Darboux Spaces III and IV.* DESY Report. 2005.
39. *Severyukhin A. P. et al.* // *Rom. J. Phys.* 2005. V. 50. P. 391.
40. *Lo Iudice N., Sushkov A. V., Shirikova N. Yu.* // *Phys. Rev. C.* 2005. V. 72. P. 0340303.
41. *Shneidman T. M. et al.* // *Eur. Phys. J. A.* 2005. V. 25. P. 387.
42. *Penionzhkevich Yu. E., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // *Phys. Lett. B.* 2005. V. 621. P. 119.
43. *Danilin B. V., Ershov S. N., Vaagen J. S.* // *Phys. Rev. C.* 2005. V. 71. P. 057301.
44. *Antonov A. N. et al.* // *Ibid.* V. 72. P. 044307.
45. *Пупышев В. В.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2005. Т. 82. С. 243.
46. *Yang S. N. et al.* // *Intern. J. Mod. Phys. A.* 2005. V. 20. P. 1656.
47. *Ivanov Yu. B., Skokov V. V., Toneev V. D.* // *Phys. Rev. D.* 2005. V. 71. P. 1405.
48. *Titov A. I. et al.* // *Phys. Rev. C.* 2005. V. 72. P. 035206.
49. *Ciofi degli Atti C., Kaptari L. P.* // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 95. P. 052502.
50. *Afanasiev G. N., Shilov V. M., Stepanovsky Yu. P.* // *J. Math. Phys.* 2005. V. 46. P. 022901.
51. *Radu T. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 88. P. 137203.
52. *Kuzemsky A. L.* // *Physica B.* 2005. V. 355. P. 318.
53. *Izmailian N. Sh. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 95.
54. *Churochkin D. V., Sahling S., Osipov V. A.* // *Phys. Rev. B.* 2005. V. 71. P. 014116.
55. *Krasavin S. E.* // *J. Phys.: Cond. Mat.* 2005. V. 17. P. 6173.
56. *Сергеенков С. А.* // *ЖЭТФ.* 2005. Т. 101. С. 958–964.
57. *Yukalov V. I.* // *Phys. Rev. B.* 2005. V. 71. P. 184432.
58. *Yukalov V. I., Yukalova E. P.* // *Europhys. Lett.* 2005. V. 70. P. 306.