

ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. Н. Н. БОГОЛЮБОВА

В 2010 г. в лаборатории проводились исследования по четырем темам первого приоритета: «Теория элементарных частиц», «Современная математическая физика: гравитация, суперсимметрия», «Структура и динамика атомных ядер», «Теория конденсированных сред и новые материалы». Важной со-

ставляющей в деятельности лаборатории является теоретическая поддержка экспериментальных исследований в ОИЯИ и в других исследовательских центрах с участием ОИЯИ (ЦЕРН, GSI, BNL, FNAL и др.). Особое внимание уделялось привлечению к работе молодых исследователей, студентов и аспирантов.

ТЕОРИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Исследования по теме «Теория элементарных частиц» 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.

Среди теорий, описывающих физику за пределами стандартной модели, суперсимметрия предлагает замечательного кандидата для частицы темной материи — нейтрино. Одним из предсказаний космологии является величина сечения аннигиляции частиц темной материи, если считать их реликтовыми частицами из ранней Вселенной. В большей части пространства параметров суперсимметрии сечение аннигиляции слишком мало по сравнению с предсказанием космологии. Однако для больших значений $\tan\beta$ сечение аннигиляции посредством обмена псевдоскалярным хиггсовским бозоном в s -канале дает правильное значение для всего интервала возможных масс суперсимметричных частиц вплоть до нескольких ТэВ. Требуемые значения $\tan\beta$ обычно находятся в районе 50, т. е. порядка отношения масс t - и b -кварков, что является также значением предпочтительным для объединения юкавских констант связи в теориях Большого объединения. Для таких больших значений $\tan\beta$ ассоциативное рождение тяжелых хиггсовских бозонов возрастает на три порядка и может быть наблюдаемо как первое указание на новую физику на ЛHC [1].

Исследованы формфакторы для BPS-операторов O_T^a и $N = 4$ супермультиплетов токов тензора энергии-импульса T^{AB} в первом и втором нетривиальном

порядке теории возмущений (ТВ) и для оператора Конishi в первом нетривиальном порядке ТВ в пределе слабой связи. Для всех рассмотренных объектов наблюдается экспоненциация инфракрасных расходимостей, контролируемая двумя аномальными размерностями: касповой аномальной размерностью и коллинеарной аномальной размерностью. Конечные части формфакторов в общем случае выражаются через комбинации логарифмов, полилогарифмов и обобщенных полилогарифмов Гончарова от нескольких переменных. Все ответы выражаются через скалярные интегралы, которые могут быть получены из псевдоконформных интегралов, появляющихся при вычислении амплитуд в $N = 4$ посредством специальной процедуры [2].

Экспериментальные данные по глубоконеупругому рассеянию для структурной функции F_2 из различных экспериментов с неподвижной мишенью были проанализированы [3] в несинглетном приближении в первых трех порядках теории возмущений. Исследование этих данных, имеющих высокую статистическую точность и полученных коллаборациями BCDMS, SLAC, NMC и BFP, было выполнено отдельно для BCDMS и для остальных коллабораций. Близость полученных результатов позволила выполнить анализ всех данных вместе. Как окончательный результат, была найдена константа связи сильного взаимодействия в третьем порядке теории возмущений $\alpha_s(M_Z) = 0,1167 + / - 0,0021$. Ее величина оказалась немного меньше $\alpha_s(M_Z)$, полученной во втором порядке теории возмущений, как это и ожидалось. Применение аналитической и «замороженной» модификаций константы связи, не имеющих нефизической особенности (полюса Ландау), приво-

дит [4] к дальнейшему улучшению согласия между теорией и экспериментом, а найденное поведение вкладов от «высших твистов» находится в хорошем согласии с более ранними подобными исследованиями.

В рамках потенциального подхода разработана [5] непертурбативная модель для инвариантного заряда квантовой хромодинамики. Предложенная модель не содержит нефизических особенностей в области малых энергий и обладает повышенной устойчивостью по отношению к высшим петлевым поправкам. На основе разработанной модели для бегущей константы связи построен статический потенциал кварк-антикваркового взаимодействия. Полученный результат совпадает с пертурбативным выражением для кварк-антикваркового потенциала в области малых межкварковых расстояний и хорошо согласуется с соответствующими данными решеточных расчетов в непертурбативной физически значимой области. В рамках разработанной модели найдено значение масштабного параметра квантовой хромодинамики, которое согласуется с его предыдущими оценками, полученными в рамках потенциального подхода.

Рассмотрено [6] суперсимметричное расширение стандартной модели с юкавским взаимодействием нейтрино и нарушением R-четности. Найдено, что нарушающий R-четность член $\lambda \nu H_u H_d$ приводит к дополнительному вкладу F-типа в хиггсовский скалярный потенциал и, таким образом, в массы суперсимметрических бозонов Хиггса. Наиболее интересное следствие этого дополнительного вклада — модификация выражения для массы легчайшего нейтрального суперсимметричного бозона Хиггса уже на древесном уровне. Таким образом, благодаря этому вкладу масса легчайшего бозона Хиггса увеличивается, что приоткрывает часть пространства параметров для его обнаружения, которая уже была исключена экспериментами на LEP в рамках минимальной суперсимметрической стандартной модели.

Свойства экзотического $X(3872)$ -мезона, рассматриваемого как связанное состояние четырех кварков (тетракварк), были изучены в рамках релятивистской модели конституэнтных кварков с инфракрасным конфайнментом. Были вычислены ширины наблюдаемых в эксперименте сильных распадов $X \rightarrow J/\psi + 2\pi(3\pi)$ и $X \rightarrow \underline{D}^0 + D^0 + \pi^0$. Оказалось, что для разумных значений параметра, характеризующего размер $X(3872)$ -мезона, теоретические результаты согласуются с экспериментальными данными [7].

Предложен механизм [8] для объяснения более медленного, чем ожидалось, падения переходного формфактора пиона при больших импульсах передачи, обнаруженного коллаборацией BaBar в 2009 г. Показано, что логарифмическое усиление формфактора может быть объяснено специфическими свойствами волновой функции пиона. В частности, это

приводит к почти плоской амплитуде распределения пиона в согласии с более ранними предложениями, сделанными Дороховым, Радюшкиным и Поляковым. Дополнительный важный вклад в пионный переходный формфактор, возникающий за счет нарушения изотопической инвариантности, может быть также обусловлен примесью глюонов в волновой функции пиона [9].

Выполнен КХД-анализ поляризованных инклюзивных и полуинклюзивных данных [10]. Преимуществом по сравнению с другими обработками является учет вкладов членов порядка $1/Q^2$ в спиновую структурную функцию нуклона g_1 . Изучено влияние полуинклюзивных данных на форму поляризованных партонных распределений и высших твистов. Выявлено серьезное расхождение между поведением поляризованных странных кварков, полученным из анализа одних лишь инклюзивных данных и обработки комбинированных данных инклюзивного и полуинклюзивного поляризованного рассеяния.

Предложена новая формулировка партонных функций распределения, зависящих от поперечного импульса, основанная на обобщенной концепции калибровочной инвариантности [11]. В данном подходе вильсоновские линии включают в себя зависящие от спина паулиевские факторы. Показано, что хотя учет спинзависимых факторов позволяет сохранить вероятностную интерпретацию распределений твиста-2, они приводят к дополнительным сингулярным вкладам в функции твиста-3. Сформулированы правила Фейнмана для вычислений с вильсоновскими линиями, содержащими спиновые факторы, а также обсуждаются возможные феноменологические следствия развитого подхода.

Показано, что в двухфотонных распадах скалярных мезонов $f_0(600)$, $a_0(980)$ и $f_0(980)$ важную роль играют, наряду с кварковыми, также и мезонные петли. Их учет приводит к хорошему согласию теоретических предсказаний [12] с экспериментом.

Проведен детальный анализ правил сумм для спиновых структурных функций в области малых передач импульса. Путем применения аналитической теории возмущений и основанной на КХД модели для перехода к пределу реальных фотонов удалось добиться хорошего описания прецизионных данных Llab [13].

Продолжены исследования переходного формфактора пиона в связи с данными BaBar, поставившими под сомнение справедливость КХД-факторизации. Построены правила сумм КХД с нелокальными конденсатами для производной амплитуды распределения (AP) пиона при $x \sim 0$ и ее усредненного наклона. Показано, что наблюдаемый в эксперименте BaBar существенный рост переходного формфактора пиона между 10 и 40 ГэВ² нельзя объяснить в рамках коллинеарной факторизации ни выбором AP пиона, ни вкладом высших твистов, ни включением теоретико-возмущенческих по-

правок. В связи с этим был применен точный непертурбативный метод, основанный на аномальном правиле сумм. Метод справедлив и в отсутствие факторизации. Установлено, что аксиальная аномалия для немассового фотона является коллективным эффектом мезонного спектра. При этом малые поправки к континууму могут приводить к относительно большим (примерно в 30 раз для кинематики ВаВаг) поправкам к формфактору пиона [14, 15].

СОВРЕМЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Исследования по теме были сосредоточены на следующих направлениях:

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

Получено интегральное представление для скалярных произведений бетевских векторов в квантовых интегрируемых моделях, ассоциированных с квантовой аффинной алгеброй $U_q(gl_3)$. Этот результат получен в рамках универсального анзаца Бете с использованием токовой реализации этой квантовой аффинной алгебры [18].

Показано, что все примитивные идемпотенты для алгебры Брауера могут быть найдены с помощью вычисления некоторой рациональной функции от нескольких переменных, которая построена как произведение R-матричных факторов [19].

В решеточной $SU(2)$ калибровочной теории были исследованы непрерывный предел и эффекты конечного (физического) объема, а также зависимость от грибовских копий для глюонного пропагатора в калибровке Ландау. При рассмотрении решеток с уменьшающимся размером плакета, но с фиксированным физическим объемом была подтверждена (непертурбативная) мультипликативная перенормируемость и справедливость подхода к вычислению непрерывного предела для перенормированного глюонного пропагатора при импульсах $p \geq 0,6$ ГэВ. Эффекты конечного объема и влияние грибовских копий оказываются малыми в этой области. Напротив, в глубоко инфракрасной области было обнаружено, что влияние грибовских копий велико, а эффекты конечного объема все еще требуют специального рассмотрения [20].

Результаты для модели Ландау на суперплоскости обобщены таким образом, чтобы иметь явную $N = 2$ суперсимметрию на мировой линии для произвольного магнитного поля на любом двумерном многообразии. Процедура квантования в общем случае характеризуется двумя независимыми потенциалами на многообразии, и соответствующий гамильтониан оказывается факторизуемым. В специальном случае, когда как гауссова кривизна, так и магнитное поле постоянны на многообразии и, как следствие,

Были рассмотрены проявления аксиальной аномалии в соударениях тяжелых ионов. Они приводят к так называемому киральному вихревому эффекту, проявляющемуся в наблюдаемых корреляциях нейтронных пар [16].

Разработан последовательный квантово-полевой подход к теории нейтринных осцилляций, основанный на технике макроскопических диаграмм Фейнмана [17].

фундаментальные потенциалы связаны друг с другом, гамильтонианы допускают бесконечные серии факторизаций, что предполагает интегрируемость соответствующих систем. Для частного случая модели с CP^1 в качестве бозонного многообразия найдены в явном виде спектр и полный набор собственных векторов [21].

С использованием подхода гармонического суперпространства построена $N = 4$ суперсимметричная квантовая механика супермультиплетта $(3, 4, 1)$, взаимодействующего с внешним $SU(2)$ калибровочным полем. $N = 4$ суперсимметрия вне массовой поверхности требует, чтобы калибровочное поле описывалось статической формой известного анзаца 'т Хоофта для 4-мерного самодуального $SU(2)$ калибровочного поля, т. е. частным решением уравнений Богомольного для BPS-монополей. Представлены в явном виде соответствующие суперполево и компонентное действия, а также квантовый гамильтониан и $N = 4$ суперзаряды. Последние могут быть использованы для описания более общей системы $N = 4$ механики на фоне произвольного BPS-монополя, но с $N = 4$ суперсимметрией на массовой поверхности. Существенная черта предложенной конструкции — использование «полудинамического» спинового мультиплетта $(4, 4, 0)$ с действием типа Весса–Зумино [22].

Построено отображение трехмерных $N = 4$ суперполей на $N = 3$ гармоническое суперпространство. Левые и правые представления $N = 4$ суперконформной группы реализованы на аналитических $N = 3$ суперполях. Эти представления удобны для описания $N = 4$ суперконформно-инвариантного взаимодействия абелевых калибровочных суперполей с гипермультиплеттами. Проведен анализ $N = 4$ инвариантности неабелевой $N = 3$ суперполево теории Янга–Миллса [23].

Построены лагранжева и гамильтонова формулировки $N = 4$ суперсимметричных систем, описывающих движение частицы с изоспином на конформно-плоском 4-многообразии с $SO(4)$ -изометрией, на котором задано внешнее неабелево калибровочное поле БПСТ-инстантона. Конформный фактор может быть выбран разными способами, приводящими

к различным системам, таким как суперконформная механика, а также частица на 4-сфере, псевдосфере или многообразии $R \times S^3$. Изоспиновые степени свободы возникают как бозонные компоненты дополнительного фермионного $N = 4$ супермультиплетта, остальные компоненты которого становятся вспомогательными после неканонического нелокального переопределения [24].

Предложены новые модели «аффинной» теории гравитации в D-мерном пространстве-времени с симметричными связностями. Модели основываются на идеях Вейля, Эдингтона, Эйнштейна и, в частности, на эйнштейновском предложении характеризовать геометрию пространства-времени, используя принцип Гамильтона. Коэффициенты связности получаются в результате варьирования «геометрического» лагранжиана, который по предположению является произвольной функцией обобщенного тензора кривизны Риччи, выраженного через коэффициенты. Теория предсказывает, в дополнение к стандартной теории гравитации Эйнштейна, темную энергию, нейтральное массивное векторное поле, а также массивные скалярные поля. Эти поля взаимодействуют только с гравитацией и могут генерировать темную материю и/или инфляцию. Массы имеют чисто геометрическую природу, и в любой конкретной модели нельзя избежать их появления [25].

Полностью исследована проблема интегрирования уравнений Лакса для операторов произвольного вида и для общих начальных данных. Получена общая формула для соответствующего решения, которая справедлива для начальной матрицы Лакса произвольного вида как для диагонализуемой, так и для недиагонализуемой матрицы [26]. Эта формула дает оригинальное и математически строгое доказательство существования рассматриваемого решения. Эти результаты важны для различных физических приложений уравнений Лакса с матрицами произвольного вида и с произвольными начальными данными.

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА АТОМНЫХ ЯДЕР

В 2010 г. исследования 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.

Разработана новая версия квазичастично-фононной модели для нечетных ядер, более по-

исследованы эрмитовы уравнения Янга–Миллса для калибровочных потенциалов на комплексном векторном расслоении E над почти комплексным многообразием X^6 , которое является пространством твисторов для ориентированного риманова многообразия M^4 . Каждое решение этих уравнений на таком X^6 определяет псевдоголоморфную структуру на расслоении E . Показано, что обратное отображение на X^6 любого антисамодуального калибровочного поля, заданного на M^4 , является решением рассматриваемых уравнений Янга–Миллса на X^6 . Это соответствие позволяет ввести новые твисторные действия для бозонных и суперсимметричных теорий Янга–Миллса. В качестве примера многообразия X^6 рассмотрены однородные почти кэлеровы или Калаби–Яо многообразия, которые являются твисторными пространствами S^4 , CP^2 и V_4 , SV_2 соответственно (действительный 4-мерный шар и комплексный 2-мерный шар). Предложены различные явные примеры решений исследуемых уравнений Янга–Миллса на этих пространствах. Кратко рассмотрены приложения полученных результатов в моделях компактификации гетеротических струн на потоках [27].

При построении квантовой теории поля, учитывающей кривизну пространства-времени и геометрию границ, успешно применяются методы спектральной геометрии. В этом подходе исследована возможность нарушения третьего закона термодинамики в расчетах эффекта Казимира. Рассмотрены материалы границ двух типов: металлы, описываемые моделью Друде, и диэлектрики, обладающие ненулевой проводимостью по отношению к постоянному току. В этих случаях нарушение третьего закона термодинамики проявляется как неисчезающая энтропия при нулевой температуре. Проанализированы расчеты для плоских границ и вычислен соответствующий вклад для конфигурации материальный шар над плоскостью. Показано, что нарушение третьего закона термодинамики не связано с бесконечным размером плоскостей в данных задачах [28].

следовательно учитывающая корреляции в основном состоянии сферического ядра. Именно, для описания однофононных возбуждений четно-четного остова использовано расширенное (или перенормированное) приближение случайных фаз, а в пробную волновую функцию нечетного ядра добавлены обратные амплитуды. В результате уравнения, описывающие взаимодействие нечетной частицы с остовом, оказываются связанными с уравнениями для парных корреляций и вибрационных возбуждений четно-четного остова. Рассчитаны спектроскопические факторы и

вероятности $E2$ -переходов для низколежащих уровней ряда изотопов Те, Хе и Ва с массовыми числами $A \approx 130$ [29].

Предложен новый термодинамически последовательный метод расчета скоростей ядерных процессов, связанных со слабым взаимодействием и протекающих в горячем звездном веществе. Метод основан на термополевой динамике и отличается ясной трактовкой процессов возбуждения и деэксцитации горячего ядра. Рассчитана зависимость распределений силы переходов Гамова–Теллера и зарядово-обменных переходов первого порядка запрета от температуры для нескольких изотопов Fe и Ge. С полученными распределениями рассчитаны скорости электронного захвата на этих ядрах при температурах и плотностях, типичных для различных стадий коллапса сверхновой [30].

В нечетных ядрах токовые и спиновые плотности функционала Скирма вызывают появление T -нечетных слагаемых среднего поля. Проведен систематический анализ влияния этих компонент на энергии связи ядер, четно-нечетные скачки, энергии отделения нуклона и спектры. Расчеты выполнены для 1300 сферических и аксиально-деформированных нечетных ядер из области $16\mu \leq Z \leq \mu 92$ с силами Скирма SkI3, SLy6 и SV-bas. Учитывались парные корреляции (в приближении БКШ) и эффект блокировки для нечетного нуклона. Эффект от T -нечетных слагаемых среднего поля в целом оказался мал, хотя им нельзя полностью пренебречь. Этот эффект, однако, заметно слабее влияния параметризации сил Скирма и эффектов самосогласования [31].

Выполнены расчеты ядерного матричного элемента (ЯМЭ) безнейтринного двойного β -распада ядра ^{150}Nd , учитывающие эффекты ядерной деформации. Использовано протон-нейтронное квазичастичное приближение случайных фаз (ПСФ) с G -матрицей Брюкнера, построенной на основе зависящего от заряда боннского (Bonn-CD) NN -потенциала. Полученная величина ЯМЭ оказалась на 40% меньше рассчитанной ранее без учета ядерной деформации. С новым значением ЯМЭ вероятность безнейтринного двойного β -распада ^{150}Nd , которая вскоре будет измерена коллаборацией SNO+, станет одной из лучших проб для майорановской массы нейтрино [32].

Показано, что в реакциях многонуклонной передачи с пучком ^{48}Ca и актинидными мишенями при энергиях порядка величины кулоновского барьера могут быть синтезированы новые сильно нейтронно-избыточные ядра $^{84;86}\text{Zn}$ и $^{90;92}\text{Ge}$. Динамика бинарной реакции рассматривалась в рамках модели двойной ядерной системы как диффузионная задача нескольких нуклонов между взаимодействующими ядрами в столкновениях, когда энергия возбуждения получившегося экзотического ядра ниже порога испускания нейтрона. Предсказанные сечения находятся в пределах 0,1–5 пб для разных нуклидов.

Существующие экспериментальные установки позволяют измерить сечение 1 пб за недельный сеанс [33].

Предложен способ рождения гипердеформированных (ГД) ядерных систем в столкновениях тяжелых ионов. Такие системы рассматриваются как двойные или квазимолекулярные ядерные системы. При энергиях сталкивающихся ядер вблизи кулоновского барьера образовавшаяся во входном канале возбужденная двойная ядерная система (ДЯС), охлаждаясь за счет испускания нейтронов, может трансформироваться в ГД ядерную систему. Эта трансформация описывалась в статистическом подходе. При подбарьерных энергиях туннелирование сквозь кулоновский барьер рассматривалось в квантовом диффузионном подходе, основанном на формализме редуцированной матрицы плотности. Для пучков ^{40}Ca , ^{48}Ca и ^{58}Ni определены оптимальные пары сталкивающихся ядер с наиболее вероятным образованием ГД-конфигураций. Рассчитаны сечения образования и некоторые характеристики ГД-состояний, определены условия их экспериментальной идентификации. При подбарьерных энергиях столкновений рассчитаны парциальные сечения рождения и вероятности идентификации в зависимости от энергии пучка [34].

Выявлена причина несоответствия значений отношения сечения образования испарительного остатка σ_{ER} к сечению слияния σ_{fus} , измеренных в реакциях $^{19}\text{F}+^{181}\text{Ta}$ и $^{16}\text{O}+^{184}\text{W}$ при высоких энергиях. Анализ был проведен в рамках модели двойной ядерной системы и усовершенствованной статистической модели. Показано, что наблюдаемое различие вызвано ненамеренным включением вклада событий квазиделения и быстрого деления в выход делительно-подобных фрагментов. Различный выход испарительных остатков и фрагментов от процессов слияния-деления для указанных реакций вызван разными значениями сечений захвата на первой стадии реакции [35].

Проанализировано современное состояние исследований возбуждений гало-ядер, лежащих в непрерывном спектре, а также других свойств открытых квантовых систем. Обсуждается микроскопический метод искаженных волн для четырех частиц, позволяющий описывать реакции развала гало-ядер с вылетом двух нейтронов с возбуждением низколежащих состояний гало. Теория объясняет процессы и упругого, и неупругого развала. Последовательным образом учтены и кулоновская, и ядерная диссоциация. Отмечено, что изучение двухпротонного распада позволяет получить дополнительные сведения о свойствах ядерных трехчастичных структур. Теория довольно хорошо описывает данные по корреляциям фрагментов вблизи порога развала. Нужны эксперименты по измерению эксклюзивных сечений, так как теория в настоящий момент способна предсказать корреляционные сечения как для инклюзивных, так и для эксклюзивных реакций [36].

Данные по упругому рассеянию ${}^6\text{He}$ на ${}^{12}\text{C}$ при энергиях 3; 38,3 и 41,6 МэВ/нуклон исследованы в подходе, использующем микроскопический оптический потенциал (ОП), полученный с помощью процедуры двойной свертки и высокоэнергетического приближения. Этот ОП основан на распределениях плотностей протонов и нейтронов в сталкивающихся ядрах. Для ${}^6\text{He}$ использованы результаты модельных теоретических расчетов, для ${}^{12}\text{C}$ — экспериментальные формфакторы рассеяния электронов. Глубины действительного и мнимого слагаемых ОП подбирались по данным эксперимента. Для описания экспериментальных данных при низких энергиях необходимо добавить члены поверхностного характера в виде производной от мнимой части микроскопического ОП. Проблема неоднозначности при выборе ОП была снята наложением условия, согласно которому соответствующие объемные интегралы должны удовлетворять определенной зависимости от энергии столкновения [37].

В эксперименте, выполненном в Инсбрукском университете в сотрудничестве с теоретиками из ЛТФ ОИЯИ и Гамбургского университета, наблюдались индуцированные конфайнментом резонансы (ИКР) в сильно взаимодействующих квантовых газовых системах с перестраиваемым взаимодействием в 1D-и 2D-геометрии удерживающих оптических потенциалов. В 1D-системе с поперечным удержанием возникновение ИКР обусловлено связью между входным каналом двух сталкивающихся атомов и закрытым каналом с поперечно возбужденным молекулярным состоянием. По характерным атомным потерям и тепловым сигналам наблюдалось существенное изменение атом-атомного рассеяния при выполнении условия появления ИКР, когда длина s -волнового рассеяния достигала масштаба поперечного диаметра удерживающего потенциала. Было подтверждено предсказание В. Мележика о том, что анизотропия поперечной ловушки вызывает расщепление ИКР. Этот эффект — следствие снятия вырождения в анизотропной ловушке у порога закрытого канала с поперечно возбужденным молекулярным состоянием [38].

В рамках разработанной ранее мезонно-обменной модели «Дубна–Майнц–Тайбэй» исследована структура сингулярностей амплитуд рассеяния системы πN . Для всех парциальных волн вплоть до F и энергий до $W \sim 2$ ГэВ (в с. ц. м.) полюса T-матрицы были вычислены с помощью трех различных техник: аналитического продолжения на

плоскость комплексной энергии, диаграммы скоростей и метода регуляризации. Для всех четырехзвездных резонансов за исключением $S_{11}(1535)$ получено очень хорошее согласие результатов аналитического продолжения и метода регуляризации. Кроме того, были найдены полюса и для не столь хорошо установленных резонансов, но в этих случаях положения полюсов и вычеты, полученные методом аналитического продолжения, могли существенно отличаться от результатов диаграммы скоростей и метода регуляризации [39].

Сдвиговая (η) и объемная (ς) вязкости для адронной и кварк-глюонной фаз, а также чисто глюонной материи рассчитаны с помощью метода квазичастиц в приближении времени релаксации. Общие выражения для η и ς получены в теории релятивистского среднего поля для квазичастиц с масштабируемыми адронными массами и константами связи. Двухфазная модель, предполагающая фазовый переход первого порядка из адронной фазы в сильно связанную кварк-глюонную фазу, была сконструирована с помощью условий Гиббса. Уравнение состояния в такой модели успешно воспроизводит глобальные свойства горячей и плотной адронной материи, в том числе в области температур вблизи критической. Воспроизводится и фазовый переход первого порядка для глюонной материи. Проанализировано, как зависят отношения вязкостей к энтропии (η/s , ς/s) от температуры и барионной плотности. Выполнены оценки влияния ширины резонансов на η , ς , η/s , ς/s и обнаружено, что при низких температурах такое влияние существенно [40].

В ковариантном подходе Бете–Солпитера построено сепарабельное 6-го ранга ядро нейтрон-протонного взаимодействия для триплета 3S_1 – 3D_1 связанных парциальных волн. Рассмотрены два метода релятивистского обобщения изначально нерелятивистских формфакторов, параметризующих ядро. Параметры модели определены путем подгонки упругих 3S_1 и 3D_1 фазовых сдвигов и триплетной длины рассеяния, а также асимптотического значения отношения волновой функции дейтрона и его энергии связи. Сконструированное ядро с успехом использовано для описания массовых и немассовых характеристик триплетного 3S_1 – 3D_1 состояния парциальных волн для системы np и дейтрона. Построенное сепарабельное NN -взаимодействие может быть использовано в расчетах фото- и электродезинтеграции дейтрона [41].

ТЕОРИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Исследования в области теории конденсированного состояния вещества проводились в рамках проектов:

- физические свойства комплексных материалов и наноструктур;

• математические проблемы многочастичных систем.

Разработана новая теория спектра спиновых возбуждений в сильно коррелированных электронных системах, таких как высокотемпературные купратные сверхпроводники. На основе проекционной техники Мори для термодинамических функций Грина получено точное представление для динамической спиновой восприимчивости, которая вычислена для t - J -модели в сверхпроводящей фазе. Впервые дано объяснение слабой температурной зависимости магнитной резонансной моды, которая наблюдается в экспериментах по рассеянию нейтронов в купратных сверхпроводниках [42].

В рамках теории многочастичных функций Грина изучена температура переориентации на антиферромагнитной квадратной решетке. Модельный гамильтониан включает гейзенберговское обменное взаимодействие, одноионную анизотропию второго порядка и поперечное внешнее магнитное поле в направлении оси x . Температура переориентации оценена как функция параметра одноионной анизотропии при разных значениях поперечного магнитного поля. С помощью этого же метода изучена модель ультратонкой ферромагнитной пленки с учетом разных обменных взаимодействий на поверхности и в объеме. Оценено значение поля переориентации как функция параметра поверхностной одноионной анизотропии при разных значениях толщины пленки, усиления поверхностного обменного взаимодействия и температуры [43].

Аналитически рассчитана интенсивность малоуглового рассеяния на обобщенном фрактале Кантора в трех измерениях. Его изменяемая фрактальная размерность зависит от безразмерного масштабного параметра и может варьироваться в пределах от 0 до 3. Рассчитано малоугловое рассеяние от монодисперсных множеств со случайной ориентацией и положением. В интенсивности рассеяния обнаружены характерные осцилляции вокруг кривой, убывающей по степенному закону, при этом значение степени совпадает с фрактальной размерностью. Минимумы и максимумы исчезают при увеличении полидисперсности рассматриваемого множества фракталов. Было установлено, что для всякой конечной генерации фрактала показатель степени стремится к величине 4 при достаточно больших значениях волнового вектора (закон Порода). Показано, что число частиц в конечной генерации можно оценить, зная значение границы между фрактальной областью и областью Порода [44].

Предложена статистическая модель для описания квантовой турбулентности в сверхтекучей системе с наличием конденсата Бозе–Эйнштейна. Такую турбулентную сверхтекучую систему можно реализовать для бозе-атомов в ловушке, созданной либо переменным потенциалом, либо переменным магнитным полем, которое модулирует длину атомного рассеяния

посредством резонанса Фешбаха. Турбулентная система представлена в виде непрерывной смеси состояний, каждое из которых характеризуется своей собственной завихренностью, соответствующей определенному вихрю [45].

Исходя из первых принципов проведены квантово-химические вычисления для перовскита LaCoO_3 с использованием экспериментальных структурных данных. Вычисленное упорядочение уровней энергии для различных спиновых состояний Co^{3+} в случае тригональной решеточной структуры при температурах $T = 5 \text{ К}$ и 300 К показало, что низкоспиновое ($LS, S = 0$) основное состояние отделено от первого возбужденного высокоспинового ($HS, S = 2$) состояния щелью менее 100 МэВ , тогда как состояние со средним значением спина ($IS, S = 1$) расположено при энергии много более $0,5 \text{ эВ}$. Было сделано предположение, что локальная релаксация решетке вокруг иона Co^{3+} , возбужденного до состояния HS , и спин-орбитальное взаимодействие уменьшают спиновую щель до значения порядка 10 МэВ . Было обнаружено, что взаимодействие состояния IS с ян-теллеровской деформацией решетки является достаточно сильным и понижает энергетическое положение этого уровня до значения $200\text{--}300 \text{ МэВ}$ [46].

Показано, что природа аномального изотопического эффекта в NbTi-H/D может быть объяснена крупномасштабными флуктуациями коэффициента теплового расширения, способными породить аномальные двухуровневые системы [47].

Сформулирован теоретико-полевой подход для описания дираковских фермионов на упругой мембране с дисклинацией вне предела абсолютной жесткости. Упругая мембрана рассматривается как вложение $2D$ -поверхности в R^3 . Дисклинация учитывается посредством $SO(2)$ калибровочного вихря, расположенного в центре мембраны, что приводит к метрике с конической сингулярностью. Сглаживание конической сингулярности учитывается путем замены жесткой плоской мембраны с дисклинацией на гиперболоид с почти нулевой кривизной, на вершине которого расположен $SO(2)$ -вихрь. Параметры вложения выбраны таким образом, чтобы удовлетворить решениям уравнений Кармана. Показано, что однородная часть решения служит для стабилизации теории. Обсуждается модификация уровней Ландау и плотности электронных состояний графеновой мембраны вследствие упругости [48].

Проведено детальное исследование фазовой динамики и вольт-амперных характеристик в системе связанных джозефсоновских переходов. Рассчитана зависимость сверхпроводящего, квазичастичного, диффузионного токов и тока смещения от величины полного тока через систему. Исследована роль диффузионного тока в формировании вольт-амперной характеристики и показано его влияние на процесс ветвления вольт-амперной характеристики и величину тока

возврата. Получено качественное согласие результатов расчета с экспериментальными данными [49].

Рассмотрены характерные примеры туннельной и транспортной динамики конденсата Бозе–Эйнштейна в ловушке с двумя ямами: осцилляции Джозефсона (ОД), макроскопическое квантовое самоудержание (МКСУ) и полный адиабатический транспорт. Будучи достаточно общими явлениями, эти динамические режимы имеют близкие аналогии с эффектом Джозефсона в сверхпроводниках и транспортными проблемами в наносистемах. Вычисления проведены в рамках метода, зависящего от времени среднего поля в двухмодовом приближении (транспорт), и за его пределами (ОД и МКСУ). Для транспорта предложен универсальный адиабатический протокол переноса заселенности, дающий полный устойчивый транспорт даже при сильных нелинейных эффектах [50].

Точно вычислена асимптотика двухточечных корреляционных функций высот в абелевой модели «Сэндпайл» на двумерной квадратной решетке. С помощью комбинаторных методов перечисления покрывающих деревьев хорошо известные результаты для коррелятора минимальных высот $(1, 1)$ обобщены на случай $(1, h)$ для высот $h = 2, 3, 4$. Эти результаты подтверждают доминирующее логарифмическое поведение для больших расстояний, предсказанное логарифмической конформной теорией поля на основе предложенного ранее отождествления полей. Из решеточных вычислений впервые получены коэффициенты перед степенными и логарифмическими асимптотиками [51].

Рассмотрены упрощенные модели взаимодействия заряженного вещества с резонансными модами излучения, обобщающие хорошо известные модели Джейнса–Каммингса и Дике. Показано, что эти новые модели являются интегрируемыми для произвольного числа дипольных источников и резонансных мод поля излучения. Построены интегралы движения для гиперболических квантовых систем частиц Сазерленда с внутренними степенями свободы ($su(n)$ -спинами), взаимодействующих с внешним полем с потенциалом Морса произвольной напряженности. Эти системы являются связанными, если на

параметры теории и число частиц налагаются некоторые ограничения. Основное состояние описывается волновой функцией типа Джастроу [52].

Обобщение идеи электрической-магнитной дуальности на случай неабелевых теорий изучалось в рамках $N = 1, 2, 4$ суперсимметричных теорий поля с конца 70-х гг. Переход от ультрафиолетового к инфракрасному режиму в $N = 1$ теориях осуществляется преобразованиями дуальности Сайберга, которые, как считалось, обязаны находиться в конформном окне $3N_c/2 < N_f < 3N_c$ для SQCD с калибровочной группой $SU(N_c)$ и N_f -ароматами. С использованием техники суперконформных индексов показано, что существуют нетривиальные дуальности, лежащие вне этого конформного окна. Они имеют более сложную структуру и существуют для дуальной калибровочной группы $SU(N_c)$ и $N_f = 4$ (для произвольного четного N_c) или $N_f = N_c + 2$ (для произвольного N_c). Аналогичные дуальности за пределами конформного окна были найдены и для калибровочной группы $SP(2N_c)$. Для соответствующих теорий физически характерно наличие киральных суперполей с маленькими или отрицательными R -зарядами. Для $N = 4$ теорий для всех простых калибровочных групп построены явные выражения для суперконформных индексов в терминах эллиптических гипергеометрических интегралов. Для определенных значений параметров эти индексы вычислены точно [53].

Выведены бесконечные множества неравенств, которые дают оценки сверху на разности между квадратичными флуктуациями интенсивных наблюдаемых N -частичной системы и соответствующим внутренним произведением Боголюбова–Дюамеля. Они обобщают все известные неравенства, которые могут быть использованы при мажорационном шаге метода аппроксимирующего гамильтониана. Их характерной новой чертой является то, что при достаточно слабых условиях оценки сверху имеют одну и ту же форму и порядок малости по N для всех величин, получаемых путем конечного числа коммутаций исходной интенсивной наблюдаемой с гамильтонианом системы [54].

ДУБНЕНСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ (DIAS-TH)

В рамках DIAS-TH в истекшем году были проведены три школы и рабочее совещание: 8-я зимняя школа по теоретической физике (31 января — 7 февраля); 14-е рабочее совещание «Теория нуклеации и ее применения» (1–30 апреля); международная школа «Фазовая структура КХД при конечной плотности в столкновениях тяжелых ионов» (21 ав-

густа — 4 сентября) — с Объединением им. Гельмгольца (Германия); летняя школа по современной математической физике (5–15 сентября) — с Объединением им. Гельмгольца (Германия). Более 90 аспирантов и молодых ученых из стран-участниц ОИЯИ приняли участие в работе школ DIAS-TH.

Регулярно проводились семинары для студентов и аспирантов, прочитаны курсы лекций и обзорные лекции по актуальным проблемам со-

временной физики; поддерживался сайт DIAS-TN (<http://theor.jinr.ru/~diastp/diasth/>), продолжалась видеозапись лекций.

РАЗВИТИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В конференц-зале ЛТФ установлен стационарный проектор. Парк персональных компьютеров лаборатории пополнился 14 новыми ПК, два из которых оснащены четырехъядерными процессорами (24 Гбайт оперативной памяти) и твердотельными

жесткими дисками. Введена в работу система аудио-видеотрансляции по сети интернет «Vidicor». Система использовалась в работе нескольких конференций и семинаров. Локальная сеть ЛТФ пополнилась дополнительным оборудованием.

КОНФЕРЕНЦИИ, СОВЕЩАНИЯ, СОТРУДНИЧЕСТВО

Помимо школ, проводившихся в рамках DIAS-TN, в 2010 г. лаборатория участвовала в организации 11 международных конференций и рабочих совещаний, проходивших в Дубне, Цахкадзоре и Праге. Это:

- 19-й Международный коллоквиум «Интегрируемые системы и квантовые симметрии», 17–19 июня, Прага, Чехия;

- Двустороннее совещание ОИЯИ–КНР по ядерной физике, 28 июня — 4 июля, Дубна;

- международная конференция по теоретической физике «Дубна-нано 2010», 5–10 июля, Дубна;

- международная конференция «Симметрии и спин», 18–25 июля, Прага, Чехия;

- международная конференция «Методы симметрии в физике», 16–21 августа, Цахкадзор, Армения;

- 6-е Международное совещание «Критическая точка и начало деконфайнмента (CPOD)», 23–29 августа, Дубна;

- 2-й симпозиум ЮАР–ОИЯИ «Модели и методы в малочастичных и многочастичных системах», 8–10 сентября, Дубна;

- международное совещание «Боголюбовские чтения», 22–25 сентября, Дубна;

- 20-й Балдинский международный семинар по проблемам физики высоких энергий «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика», 4–9 октября, Дубна;

- совещание «Структура ядра: новые достижения» (к 85-летию профессора В.Г. Соловьева), 14–16 октября, Дубна;

- 2-й круглый стол Италия–Россия в Дубне «Космофизика и биология», 19–22 декабря, Дубна.

Международное сотрудничество ЛТФ в 2010 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 РФФИ–DFG, РФФИ–CNRS. Продолжает действовать соглашение о сотрудничестве с теоретическим отделом ЦЕРН, Азиатско-тихоокеанским центром теоретической физики (Республика Корея), Институтом теоретической физики АН КНР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beskidt C. et al. // Phys. Lett. B. 2011. V. 695. P. 143.
2. Bork L. V., Kazakov D. I., Vartanov G. S. hep-th/1011.2440; JHEP (in press).
3. Shaikhatdenov B. G. et al. // Phys. Rev. D. 2010. V. 81. P. 034008.
4. Kotikov A. V. et al. // Phys. Rev. D. (in press); hep-ph/1008.0545.
5. Belyakova Yu. O., Nesterenko A. V. // Intern. J. Mod. Phys. A (in press); arXiv:1011.1148.

6. Gladyshev A. V., Parpalak R. S. // Mod. Phys. A (in press); hep-ph/1006.5578.
7. Dubnicka S. et al. // Phys. Rev. D. 2010. V. 81. P. 114007.
8. Dorokhov A. E. // JETP Lett. 2010. V. 92. P. 777.
9. Kochelev N. I., Vento V. // Phys. Rev. D. 2010. V. 81. P. 034009.
10. Leader E., Sidorov A. V., Stamenov D. B. // Ibid. V. 82. P. 114018.
11. Cherednikov I. O., Karanikas A. I., Stefanis N. G. // Nucl. Phys. B. 2010. V. 840. P. 379.

12. Волков М. К., Кураев Э. А., Быстрицкий Ю. М. // ЯФ. 2010. Т. 73. С. 469.
13. Pasechnik R. S. et al. // Phys. Rev. D. 2010. V. 81. P. 016010.
14. Mikhailov S. V., Pimikov A. V., Stefanis N. G. // Phys. Rev. D. 2010. V. 82. P. 054020.
15. Klopot Y. N., Oganessian A. G., Teryaev O. V. // Phys. Lett. B. 2011. V. 695. P. 130.
16. Rogachevsky O., Sorin A. S., Teryaev O. V. // Phys. Rev. C. 2010. V. 82. P. 054910.
17. Naumov D. V., Naumov V. A. // J. Phys. G. 2010. V. 37. P. 105014.
18. Belliard S., Pakuliak S., Ragoucy E. // SIGMA. 2010. V. 6. P. 094.
19. Исаев А. П., Молев А. И. // Алгебра и анализ. 2010. Т. 22. С. 142.
20. Bornyakov V. G., Mitrjushkin V. K., Mueller-Preussker M. // Phys. Rev. D. 2010. V. 82. P. 014504.
21. Beylin A. et al. // JHEP. 2010. V. 1004. P. 091.
22. Ivanov E., Konyushikhin M. // Phys. Rev. D. 2010. V. 82. P. 085014.
23. Zupnik B. M. // Theor. Math. Phys. 2010. V. 165. P. 1315.
24. Krivonos S., Lechtenfeld O., Sutulin A. // Phys. Rev. D. 2010. V. 81. P. 085021.
25. Filippov A. T. // Theor. Math. Phys. 2010. V. 163. P. 753.
26. Chemissany W., Fre P., Sorin A. S. // Nucl. Phys. B. 2010. V. 833. P. 220.
27. Popov A. D. // Ibid. V. 828. P. 594.
28. Bordag M., Pirozhenko I. G. // Phys. Rev. D (submitted); quant-ph/1010.1217.
29. Mishev S., Voronov V. V. // Phys. Rev. C. 2010. V. 82. P. 064312.
30. Alan A. et al. // Ibid. V. 81. P. 015804.
31. Pototzky K. J. et al. // Eur. Phys. J. A. 2010. V. 46. P. 299.
32. Dong-Liang Fang et al. // Phys. Rev. C. 2010. V. 82. P. 051301.
33. Adamian G. G. et al. // Ibid. V. 81. P. 024604.
34. Zubov A. S. et al. // Ibid. V. 81. P. 024607; V. 82. P. 034610.
35. Nasirov A. K. et al. // Phys. Lett. B. 2010. V. 686. P. 72.
36. Ershov S. N. et al. // Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2010. V. 37. P. 064026.
37. Lukyanov V. K. et al. // Phys. Rev. C. 2010. V. 82. P. 024604.
38. Haller E. et al. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 153203.
39. Tiator L. et al. // Phys. Rev. C. 2010. V. 82. P. 055203.
40. Khvorostukhin A. S., Toneev V. D., Voskresensky D. N. // Nucl. Phys. A. 2010. V. 845. P. 106; arXiv:1011.0839.
41. Bondarenko S. G. et al. // Nucl. Phys. A. 2010. V. 848. P. 75.
42. Plakida N. M. High-Temperature Cuprate Superconductors. Experiment, Theory, and Applications // Springer Series in Solid-State Sciences. 2010. V. 166. 570 p.
43. Ilkovic V., Kecer J. // Acta Phys. Polonica A. 2010. V. 118. P. 63; Ilkovic V. // Phys. Stat. Sol. B. 2010. V. 247. P. 979.
44. Cherny A. Yu. et al. // J. Appl. Crystallography. 2010. V. 43. P. 790.
45. Yukalov V. I. // Laser Phys. Lett. 2010. V. 7. P. 467.
46. Siurakshina L. et al. // Eur. Phys. J. B. 2010. V. 74. P. 53.
47. Sahling S. et al. // Phys. Rev. B. 2010. V. 82. P. 174204.
48. Kochetov E. A., Osipov V. A. // JETP Lett. 2010. V. 91. P. 110; Kochetov E. A., Osipov V. A., Pincak R. // J. Phys.: Condens. Matter. 2010. V. 22. P. 395502.
49. Shukrinov Yu. M., Rahmonov I. // JETP Lett. 2010. V. 92. P. 327.
50. Nesterenko V. O. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. V. 248. P. 012033.
51. Poghosyan V. S. et al. // J. Stat. Mech. 2010. V. 1007. P. P07025.
52. Sadovnikov B. I., Inozemtseva N. G., Inozemtsev V. I. // Teor. Mat. Fiz. 2010. V. 164(3). P. 410; 419.
53. Spiridonov V. P., Vartanov G. S. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. P. 061603.
54. Brankov J. G., Tonchev N. S. // Cond. Mat. Phys. 2011. V. 14. P. 1.