

**Отчет о научной деятельности  
Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма  
в 2009 г.**

**I. Важнейшие результаты научных исследований:**

1. Наблюдены длительные всплески гамма излучения длительностью 100-200 мсек, возникающие в грозовом разряде. Найдена строгая корреляция между гамма и радио излучениями. Это позволяет утверждать, что пробой атмосферы на убегающих электронах, предложенный группой под руководством А.В. Гуревича, является основным механизмом происхождения грозового разряда. (Рук. Гуревич А.В.)

2. Найдено точное статическое, сферически симметричное решение типа черной дыры в нелинейной четырехмерной бозонной теории полей высших спинов, которое описывается фоковским вакуумом в некоммутативной твисторной алгебре. Поскольку полученное решение не предполагает какого-либо низкоэнергетического разложения, учитывая члены всех порядков как по нелинейностям, так и по производным, оно дает уникальную возможность непertурбативного исследования эффектов сильного гравитационного поля и полей высших спинов. Высказано предположение, что найденное решение может обеспечить динамический механизм компактификации лишних пространственных измерений характерной для теории бран. (Рук. Васильев М.А.)

3. Разработана техника ренормгруппы в гравитирующей Стандартной модели с полем Хиггса, генерирующей космологическую инфляцию. Показано, что эффект бегущих констант связи существенно понижает область значений хиггсовской массы, совместную с наблюдательными данными космического микроволнового фона, от ранее полученного однопетлевого порога в 230 Гэв до интервала  $136 \text{ Гэв} < M_H < 185 \text{ Гэв}$ , в пределах которого открытие хиггсовской частицы ожидается на Большом адронном коллайдере. (Рук. Барвинский О.А.)

4. Проведено исследование возникновения диффузионной неустойчивости в системе из трех уравнений типа «реакция-диффузия». В общем виде получены условия как тьюринговской, так и волновой неустойчивостей. Выявлены качественные свойства, которыми должна обладать система для того, чтобы в ней могла произойти бифуркация каждого из двух типов. В численных экспериментах показано, что при выполнении соответствующих условий в нелинейной модели возникают пространственно-временные структуры, которые предсказываются линейным анализом (Рук. Полежаев А.А.)

5. Построена диаграммная техника, предназначенная для описания систем сильнокоррелированных фермионов. В этой технике использовано введение в формализм некоторого нового набора переменных – псевдочастичных операторов. Для таких псевдочастичных операторов разработаны правила построения диаграммной техники на базе диаграммной техники Келдыша, полностью учитывающие ограничения в пространстве состояний для таких псевдочастиц. (Рук. Арсеев П.И.)

**II. Основные результаты научных исследований:**

*Сектор квантовой теории поля и квантовой статистики  
(Руководитель сектора д.ф.м.н. М.А. Васильев)*

Тема: Калибровочные модели и теория единых взаимодействий № 01.2.007 07807 (п. 2,13)

1. Найдены свободные лагранжианы для калибровочных и некалибровочных конформных бозонных полей произвольного типа симметрии в произвольной размерности. Показано, что конформные калибровочные поля различных типов, их калибровочные преобразования и калибровочно инвариантные напряженности отвечают суперсимметричным вакуумам определенной матричной механики. Установлено совпадение обобщенных тензоров Вейля конформных и унитарных моделей высших спинов. Рассмотрены особенности твисторной интерпретации  $Sp(8)$ -инвариантной формулировки четырехмерных безмассовых полей. Найден такой нестандартный БРСТ оператор  $Q$ , что решение уравнения  $Qf=0$  эквивалентно развернутым уравнениям высших спинов.
2. Предложена компактная формулировка калибровочных полей смешанного типа симметрии на пространстве Минковского и анти-де Ситтера. Теория сформулирована в рамках БРСТ подхода.
3. В формализме полей-антиполей анализируются известные доказательства существования и единственности собственного мастер-действия в приводимом случае и дано новое доказательство, базирующееся на использовании новой разрешающей степени, относительно которой физические переменные несут заряд  $+1$  а калибровочные переменные являются нейтральными. Показано, что для каждого выбора калибровочных генераторов и их партнёров в высших стадиях, существует собственное мастер-действие, включающее их в квадратичном порядке по вспомогательным переменным. Введены антисимплектические гамма-матрицы и оператор Дирака. Исследована аналогия между формулой Шрёдингера-Лихнеровича для спинорных расслоений в римановой спинорной геометрии и нильпотентным нечётным дельта-оператором в антисимплектической геометрии.
4. В граничной теории Лиувилля найден бесконечный набор соотношений для граничных полей. В классическом пределе эти соотношения дают высшие уравнения движения теории Лиувилля с границей. Данные соотношения используются для нахождения корреляторов физических полей в рамках Лиувиллевской гравитации. Был разработан метод численного расчета четырехточечных корреляционных интегралов вырожденных полей в рамках Лиувиллевской теории гравитации. Численная процедура вычисления основана на эллиптической параметризации пространства модулей, а также, на разложении корреляционных функций на четырехточечные конформные блоки, определяющие парциальный вклад модуля Верма с данной конформной размерностью примарного поля в операторные разложения исходных полей.
5. Дано координатно независимое развернутое описание черной дыры общего типа в пространстве  $AdS_4$  с произвольными параметрами массы, НУТ, магнитным и электрическими зарядами, а также двумя кинематическими параметрами, один из которых является угловым моментом. Показано, что предложенный метод воспроизводит различные известные формы метрик черных дыр, включая метрики Картера, Керра-Ньюмана.
6. Найдено точное статическое, сферически-симметричное решение типа черной дыры в четырехмерной нелинейной бозонной теории полей высших спинов. Полученное решение не предполагает какого-либо низкоэнергетического разложения, учитывая члены всех порядков по производным в нелинейных уравнениях.
7. Для самодуальных калибровочных полей в плоском пространстве четной размерности развита формулировка второго порядка. Получен калибровочно-инвариантный лагранжиан со стандартными кинетическими членами для антисимметричных полей и соответствующие калибровочные преобразования. Найдено действие конформных самодуальных полей в калибровке светового конуса. Используя параметризацию Пуанкаре пространства анти-де Ситтера, найдено представление для калибровочно инвариантного действия массивного поля произвольного спина. Показано, что вся зависимость действия и калибровочных преобразований от массы, радиальной координаты, радиальной производной и кривизны пространства анти-де Ситтера выражается в терминах одного лестничного оператора. Найдена модифицированная калибровка де Дондера, которая приводит к расцепляющимся уравнениям движения. Найдено простое представление

для калибровочно-инвариантного действия массивного поля произвольного спина в пространстве анти-де Ситтера в произвольной параметризации.

Используя калибровочную формулировку Штюкельберга конформных токов и источников, получено калибровочно-инвариантная 2-точечная вершина для конформных источников произвольного спина. Изучено АдС/КТП соответствие для безмассовых полей произвольного спина в пространстве анти-де Ситтера и соответствующих конформных источников произвольного спина. Используя модифицированную калибровку де Дондера, получено эффективное действие для безмассового поля произвольного спина в пространстве анти-де Ситтера. Показано что эффективное действие совпадает с калибровочно-инвариантной 2-точечной вершиной конформного источника, а ультрафиолетовая расходимость эффективного действия совпадает с действием конформного поля. Получено конусное действие со старшими производными для конформного поля произвольного спина.

8. Полученный ранее спектр гармоник гравитационного излучения одной частицы, вращающейся по кругу, обобщен на случай двух частиц, вращающихся вокруг общего центра масс. Исследуются поправки к главным членам гравитационного излучения нерелятивистских частиц на Кеплеровских орбитах

9. Получена формула, обобщающая формулу Эйлера – Маклорена для общих ассоциативных алгебр. Предложена алгебра, теория представлений которой связана с теорией разложения тензорных произведений представлений алгебр Ли. Построены операторы Рота-Бакстера для матричных алгебр. Построены операторы BRST с неканоническими духами. Получены новые формулы для симметризаторов для алгебр Бирмана-Мураками-Венцля (Birman-Murakami-Wenzl). Предложена квантовая алгебра Ли, основанная на R- матрице Кремера – Жерве.

10. Получена полное описание калибровочных полей в пространстве (анти)-де Ситтера в терминах калибровочных форм со значениями во всевозможных конечномерных представлениях симметрии пространстве (анти)-де Ситтера. Показано, что в пространстве (анти)-де Ситтера калибровочное поле общего вида однозначно определяется спином, симметрией калибровочного параметра и глубиной частичной безмассовости.

11. С использованием метода построения самосопряжённых операторов как самосопряжённых расширений симметрических операторов построены все самосопряжённые гамильтонианы для всех значений параметров (констант связи) в модели Калоджеро и моделях нерелятивистской и релятивистской заряженных частиц в однородном магнитном поле и поле Аронова-Бома. Выполнен их спектральный анализ. Найдены осцилляторные представления всех положительно определённых гамильтонианов модели Калоджеро.

12. Описаны пространства вакуумных корреляционных функций в квантовой теории Веса-Зумино-Виттена. Вычислено разложение соответствующих пространств по значениям конформного веса квантовых полей. Доказано, что множество секторов в теории Веса-Зумино-Виттена определяется по  $C_2$  алгебре вакуумного модуля. Вычислены собственные функции квантового гамильтониана Тога. Получены явные фермионные формулы. В качестве основного средства использован формализм квантовых групп и соответствующих пространств состояний.

В терминах иерархии системы Кадомцева-Петвиашвилли построена группа симметрий потенциалов Громова-Виттена на древесном уровне. Найдены явные формулы для соответствующих фробениусовых многообразий (решений уравнения Виттена-Дийкграфа-Верлинде-Верлинде). Группа симметрий отождествлена с симплектической группой пель Гивенталья

14. Изучены 2d преобразования дуальности в классической модели суперструны  $AdS(5) \times S(5)$  и их влияние на интегрируемую структуру модели. Показано, что дуальная модель имеет ту же самую группу конформных симметрий что и исходная модель. Это интерпретируется как следствие интегрируемости модели. Изучена структура разложения по большим значениям спинов аномальных размерностей операторов  $N=4$  теории суперсимметричного Янга-Миллса, которые имеют фиксированное значение твиста и дуальны вращающейся струне в  $AdS(5)$ . Показано что свойство взаимности известное

ранее для режима слабой связи калибровочной теории остается справедливым в режиме сильной связи, в обоих случаях как в лидирующем порядке, так и следующем порядке.

15. Показана ультрафиолетовая конечность суперструны в  $AdS(5) \times S(5)$ , редуцированной в соответствии с процедурой Полмеера. Это подтверждает ожидание, что редуцированная модель эквивалентна исходной модели суперструны и поэтому может быть использована для ее решения.

16. Исходя из самых общих принципов, в их числе причинности, требующей ограниченности групповой скорости сигнала во внешнем поле, в нелинейной электродинамике установлены свойства выпуклости лагранжиана на классе постоянных полей как функции инвариантов поля

*Сектор теории элементарных частиц  
(Руководитель сектора - д.ф.-м.н. М.А. Соловьев)*

Тема: Исследование актуальных проблем физики элементарных частиц и космологии методами квантовой теории поля № 01.2.007 07804 (п. 2, 13, 14)

1. Изучен спектр возбуждений поля Дирака на фоне решения типа "горла" в 10-мерной ПВ супергравитации при наложении различных граничных условий на спинорное поле на UV и IR концах "горла" и при учете флуксуонов, возникающих за счет взаимодействия поля Дирака с антисимметричной формой 5-го порядка. Показано, что стандартные граничные условия дают обычный спектр масс фермионов, соответствующий, согласно процедуре Рэндалл-Сандрам, масштабу электрослабых взаимодействий порядка 1 TeV. Новым результатом является спектр, получаемый при наложении "скрученных" граничных условий, разных для правых и левых спиноров. Этот спектр масс экспоненциально убывает, и при наличии флуксуона наибольшее значение массы совпадает со значением массы электронного нейтрино порядка 0,001 eV. Существенно, что этот малый массовый масштаб (отличающийся от электрослабого масштаба на те же 15 порядков, некоторые тем меньше планковского) получается без применения стандартного механизма, предполагающего наличие сверхтяжелого правого нейтрино. В данном случае ненаблюдаемость правого нейтрино в экспериментах объясняется тем, что его волновая функция в экстра-пространстве сосредоточена вблизи UV конца "горла", тогда как массивные моды обычной наблюдаемой материи сосредоточены вблизи IR конца. Для левого нейтрино это не так, и поэтому оно наблюдаемо.

2. Разработана техника ренормализационной группы в Стандартной модели с хиггсовским полем, обладающим сильной неминимальной связью скривизной пространства-времени. Обнаружено явление, аналогичное свойству асимптотической свободы, реализующееся в этой модели в масштабе энергий близких к масштабу инфляции в теории ранней Вселенной. Это обусловлено тем, что неминимальная связь приводит к подавлению петлевых вкладов гравитонов и хиггсовских частиц. Развита техника применена к теории инфляции, генерируемой полем Хиггса. Показано, что наблюдательные данные для спектра космического микроволнового фона накладывают ограничения на величину массы хиггсовского бозона в этой модели, причем эффект бегущих констант связи существенно опускает нижнюю границу этой массы от ранее полученного однопетлевого результата в 230 ГэВ до 136 ГэВ. Допустимые значения массы Хиггса оказываются в области от 136 ГэВ до 185 ГэВ, близкой к интервалу, диктуемому стабильностью электро-слабого вакуума и ограничениями теории возмущений. Оба предела этой области следуют из нижнего ограничения на спектральный индекс длинноволновой (порядка 500 мегапарсек) части спектра реликтового излучения, известного из данных спутника WMAP. При подходе к границам этой области свойство асимптотической свободы нарушается, что позволяет использовать будущие более точные измерения микроволнового фона для тестирования Стандартной модели, дополнительного к программе LHC.

3. Предложена формулировка туннелирующего космологического состояния в форме интеграла по путям, допускающая непротиворечивую ренормализационную схему. Эта формулировка применена к модели инфляции, генерируемой неминимально взаимодействующим с кривизной хиггсовским бозоном. Построенный космологический сценарий охватывает не только формирование наблюдаемого спектра микроволновых космологических возмущений, но и образование самого инфляционного фона, на котором они существуют. Это достигается формированием начальных данных для инфляции в виде острого вероятностного пика в квантовом распределении поля инфлатона, основанном на том же ренормгрупповом механизме, который лежит в основе образования наблюдаемого спектра реликтового излучения, совместного с полученным интервалом значений хиггсовской массы. Это приводит к объединению квантовой космологии, феноменологии Стандартной модели и теории инфляции.
4. Построена 5-мерная модель, дуальная микроканоническому состоянию 4-мерной космологии, генерируемой конформной теорией поля с большим числом квантовых полей. Модель описывает индуцированную на бране гравитацию в 5-мерном пространстве-времени Шварцшильда-де Ситтера (обобщая модель Двали-Габададзе-Поррати, DGP). 5-мерная и индуцированная на бране 4-мерная космологические постоянные принадлежат верхней границе значений этой константы, накладываемой конформной теорией поля и совпадающей с широко обсуждаемым гравитационным обрезанием в теории с большим числом видов квантовых полей. Результирующая DGP/CFT дуальность предлагает новый тип квантово-классического соответствия, не зависящего от выбора гравитационного фона и выходящего за рамки AdS/CFT соответствия.
5. Предложен механизм, который мог бы примирить отрицательное значение первичной космологической постоянной, совместное с суперсимметрией, и теорию инфляции, требующую положительности эффективного космологического члена. Этот механизм основан на эффекте конформной аномалии гравитирующих конформных полей и альтернативен механизму Каллош-Кашру-Линде-Триведи.
6. Разработанная ранее техника Швингера-ДеВитта ковариантного квазилокального разложения квантового эффективного действия в гравитационных бранных моделях и моделях с границами применена в обобщенной модели Двали-Габададзе-Поррати. Эффективное действие этой модели вычислено в приближении, квадратичном по внешней кривизне браны и линейном по кривизне 5-мерного пространства погружения.
7. Изучены локальные БРСТ когомологии для сигма моделей типа AKSZ (Александров--Концевич--Шварц--Заборонский). Пространством мишени для таких моделей является  $Q$ -многообразие, т.е. супермногообразие, наделенное нечетным нильпотентным векторным полем. Показано, что локальные БРСТ когомологии изоморфны  $Q$ -когомологиям. Аналогичный результат получен для когомологий в пространстве функциональных-мульти-векторных полей. Обсуждаются приложения результатов к обратной задаче вариационного исчисления.
8. Построена (под)алгебра высших симметрий для произвольного синглтона целого спина и предложены аргументы в пользу того, что данная алгебра исчерпывает высшие симметрии. Результат обобщает классификацию Иствуда для скалярного синглтона. В основе подхода лежит БРСТ формулировка уравнений движения в явно локальном и явно конформно-инвариантном виде. Данный подход позволяет охарактеризовать высшие симметрии как бесследовые инварианты супералгебры  $osp(2s|2)$ . Если соответствующие условия (анти)самодуальности также наложены, то алгебра высших симметрий совпадает с обертывающей конформной алгебры.
9. Предложена компактная формулировка калибровочных полей смешанного типа симметрии на пространстве AdS. Построенная формулировка явным образом локальна и калибровочно инвариантна. Альтернативные формулировки (включая оригинальную формулировку Мецаева, развернутую формулировку и некоторые новые формы) могут быть получены посредством редукции и частичной фиксации калибровки. Формулировка развита в терминах БРСТ теории и использует двойственность Хау.

10. Теория Зайберга-Виттена, деформированная посредством операторов, возникающих из дуальной теории струн, описана в терминах интегрируемых систем и получено явное решение для абелева случая. В неабелевом случае решения выражены в терминах периодов абелевых дифференциалов с особенностями в точках ветвления спектральной кривой. Решения минимальной лиувиллевой гравитации в терминах интегрируемых систем сравниваются с подходом мирового листа, найдена явная замена переменных для специальных случаев.

11. Изучены деформации теории струн в формализме первого порядка, отвечающие разложению в сингулярном фоне. Показано, что эффективное действие для полей Бельтрами может быть точно вычислено уже в однопетлевом приближении и 2-мерная конформная инвариантность приводит к тому, что эти поля удовлетворяют уравнениям Кодаира-Спенсера. Такое же заключение следует их прямого вычисления 3- и 4-точечной функций в соответствующей конформной теории поля. Результаты вычислений интерпретируются в терминах БРСТ-подхода.

12. Изучено соотношение между конформными блоками и статистической суммой Некрасова для конформной суперсимметричной  $SU(2)$  калибровочной теорией. Рассмотрен асимптотически свободный предел этого соотношения и получена формула для статсуммы в терминах формы Шаповалова для алгебры Виросоро. Результат выражен также в терминах скалярных произведений некоторых когерентных состояний в модуле Виросоро старшего веса. Описано действие алгебры Виросоро на этих состояниях.

13. Асимптотическая формула Замолотчикова для двумерного конформного блока применена к 4-мерной  $N=2$  суперсимметричной калибровочной теории и показано, что она приводит к точной непertурбативной бета-функции. Точные значения коэффициентов для инстантонных зарядов могут быть извлечены из специальной модулярной формы на пространстве модулей кривой Виттена-Зайберга.

14. Найдены и исследованы новые алгебраические структуры, развивающие теорию алгебр Хопфа и теорию квантовых групп и выражающие содержание парафермионной статистики в  $(p,1)$  логарифмических моделях двумерной конформной теории поля, обобщая фермионные коммутационные соотношения. Общая конструкция применена к конкретным квантовым группам, интерес к которым мотивируется, в частности, двойственностью с логарифмическими моделями.

15. Описана квантовая плоскость в корне четной степени из единицы в нестандартном варианте с так называемыми разделенными степенями, что позволяет перейти от представлений конечномерной квантовой группы, двойственной триплетной алгебре в логарифмических моделях двумерной конформной теории поля, к ее бесконечномерному расширению, двойственному алгебре Виросоро. Для данной квантовой плоскости построен ее квантовый комплекс де Рама и найдено его разложение на неприводимые представления указанных квантовых групп.

16. На основе теории самосопряженных расширений симметрических операторов и метода Крейна направляющих функционалов построены все возможные самосопряженные гамильтонианы в одночастичной задаче Калоджеро (при всех значениях константы связи) и выполнен их спектральный анализ. Найдены осцилляторные представления всех ограниченных снизу гамильтонианов Калоджеро.

17. Изучена проблема построения самосопряженного гамильтониана для квантовомеханической задачи о движении электрона в поле бесконечно тонкого соленоида (эффект Ааронова-Бома). Рассмотрение проведено как для нерелятивистского, так и для релятивистского случая. Найдены все самосопряженные расширения исходного сингулярного дифференциального выражения, инвариантные относительно вращений вокруг оси соленоида и трансляций вдоль его оси. При помощи метода направляющих функционалов Крейна выполнен спектральный анализ полученных самосопряженных расширений.

18. Найдены условия, обеспечивающие выпуклую зависимость решений обыкновенных дифференциальных уравнений в упорядоченном конечномерном векторном пространстве от начальных данных.

19. Исследованы некоммутативные деформации квантовой теории поля, получаемые заменой обычных произведений полей звездочными произведениями и охарактеризованы основные свойства деформированных вакуумных средних. Определено функциональное пространство, наиболее адекватное звездочным произведениям Мойала и Вика-Вороса и концепции строгого деформационного квантования.

20. Исследованы свойства  $n$ -точечных вакуумных средних нормально упорядоченной гауссовой функции свободного поля. Доказано, что их рост в импульсном представлении удовлетворяет экспоненциальному высоко-энергетическому ограничению с независящим от  $n$  показателем  $l$ , играющим роль фундаментальной длины. Показано, что эта модель является локализуемой в крупных (по сравнению с длиной  $l$ ) масштабах пространства-времени и для нее соблюдается введенное ранее обобщенное условие причинности, сформулированное как условие непрерывности полевого коммутатора по естественной топологии, определяемой фундаментальной длиной и ассоциированной со световым конусом.

21. Изучена теория представлений люстиговского предела квантовой группы  $sl(2)$  в корне из единицы. Найдены тензорные произведения неприводимых и проективных представлений в этом пределе. Показано, что эти тензорные произведения соответствуют алгебре слияний логарифмических минимальных моделей, возникающих при описании решеточной модели случайных кластеров.

*Сектор физики высоких энергий  
(Руководитель сектора д.ф.-м.н. И.М. Дремин)*

Тема: Исследование свойств кварк-глюонной среды, проявляющихся в процессах взаимодействия протонов и ядер высоких энергий. № 01.2.007.07803 (п. 13)

1. Определены вещественная и мнимая части хромопроницаемости кварк-глюонной среды на основе описания экспериментальных данных о взаимодействиях ядер на ускорителе RHIC.
2. Рассмотрена проблема неустойчивостей кварк-глюонной среды.
3. Исследованы проблемы массивной теории гравитации с нарушенной и с ненарушенной лоренц-симметрией.
4. Построено квантование препотенциала Зайберга-Виттена, которое воспроизводит функции Некрасова и найдена связь этих последних с двумерными конформными теориями.
5. Найдена связь комплексной, унитарной матричных моделей и модели Концевича. Резольвенты этой последней систематически изучены.

*Сектор взаимодействия радиоволн с плазмой  
(Руководитель сектора академик РАН А.В. Гуревич)*

Тема: Применение методов описания нелинейных явлений в астрофизике и радиофизике № 01.02.007.07805 (п. 2, 4, 10, 11, 12, 14, 34)

1. Исследована нелинейная динамика развития зеркальной неустойчивости в анизотропной плазме. Показано, что после экспоненциального роста возмущений магнитного поля происходит переход на взрывную стадию, когда образуются ямы магнитного поля. Нелинейная стадия заканчивается переходом в стационарное состояние с амплитудой падения около 60% и поперечными размерами в несколько ионных циклотронных радиусов.
2. Рассмотрено заполнение электронно-позитронной плазмой вакуумной магнитосферы

вращающихся замагниченных нейтронных звезд. Показано, что рожденные частицы захватываются области магнитосферы вблизи поверхностей, где электрическое поле перпендикулярно магнитному. Частицы совершают движение по замкнутым траекториям вдоль этой поверхности. В перпендикулярном направлении их колебания затухают по времени из-за потерь на изгибное и тормозное излучения.

3. Исследовано взаимодействие ям плотности электронов в ионосфере, образованных при воздействии на ионосферу мощной электромагнитной волны. Эти неоднородности плотности сильно вытянуты вдоль геомагнитного поля, и в них генерируются нижнегибридные волны, запертые внутри ям. Верхнегибридные волны излучают, так называемые, Z-волны, которые рассеиваются на соседних неоднородностях плотности. Так осуществляется электромагнитное взаимодействие ям плотности. Показано, что в результате такого взаимодействия наиболее выгодным является случайное взаимное расположение неоднородностей в плоскости перпендикулярной магнитному полю.

4. Впервые проведен последовательный анализ эффектов предельной поляризации при распространении радиоизлучения в магнитосфере пульсаров. Мы использовали метод Кравцова для расчета распространения волн в неоднородной среде. Это позволило включить в рассмотрение не только переход от геометрической оптики к вакууму, но и поворот магнитного поля. Было показано, что для обычных пульсаров (период  $P$  порядка 1 сек, магнитное поле  $B$  порядка  $10^{12}$  Гс, параметр множественности порядка  $10^4$ ) поляризация формируется внутри светового цилиндра на расстояниях, сравнимых с радиусом светового цилиндра. При этом степень циркулярной поляризации выходящего излучения соответствует 1-10%, в полном согласии с наблюдательными данными. Численное моделирование позволяет определить поляризацию для произвольных параметров радиопулсаров.

5. Предложена статистическая теория гидродинамической турбулентности, основанная на уравнении Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в пределе бесконечно больших чисел Рейнольдса. Показано, что динамика плотности вероятности распределения завихренности определяется линейным уравнением. Источником случайных пульсаций завихренности являются крупномасштабные пульсации компонент вторых пространственных производных давления. Эта составляющая пульсаций давления оказывается определяющей в развитии нитевидных вихревых структур - филаментов. В филаментах достигаются наибольшие значения завихренности. Эти структуры обеспечивают перемежаемость турбулентности. Построенная теория позволяет вычислить лагранжевы и эйлеровы структурные функции скорости, т.е. моменты распределения приращения скорости частицы при смещении по времени и пространству соответственно. Показано, что показатели структурных функций определяются линейными инкриментами роста завихренности. Нелинейные эффекты влияют лишь на амплитуды структурных функций. На временах, малых по сравнению с корреляционным временем крупномасштабной турбулентности и на расстояниях, малых по сравнению с её основным пространственным масштабом, структурные функции подчиняются скейлинговым соотношениям. Полученные аналитические выражения для скейлинговых показателей структурных функций, выведены непосредственно из уравнения Навье-Стокса. Вычисленные значения этом находятся в полном согласии с результатами как численных, так и лабораторных экспериментов.

6. Проведен анализ наблюдательных данных, полученных в 2007 году на экспериментальном комплексе «Гроза» Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН. Анализ данных позволил определить спектр гамма излучения ступенчатого лидера молнии и впервые дать оценку полной энергии, выделяемой лидером в гамма диапазоне. Среди зарегистрированных в эксперименте событий удалось выделить такие, которые можно трактовать как первое наблюдение специфического вида разряда, происходящего по механизму пробоя на убегающих электронах (ПУЭ) при прохождении через электрическое поле грозы широкого атмосферного ливня (ШАЛ) космических лучей. Теория ПУЭ-ШАЛ разряда была ранее развита А.В. Гуревичем, Ю.В. Медведевым (ОБТ РАН) и К.П.Зыбиным.



7. Дан обзор новых наблюдений на ТШВНС ФИАН влияния космических лучей и пробоя на убегающих электронах (ПУЭ) на грозовые процессы в атмосфере. Предложены соотношения подобия для явления пробоя для убегающих электронах. Рассмотрены особенности пробоя вещества при значениях электрического поля, лежащих в диапазоне от критического поля теплового пробоя, до его удвоенного значения. При этих значениях поля возможен как тепловой пробой, так и ПУЭ. Показано,

ду численного моделирования задачи  $N$  тел. Развиваемая теория имеет приложение к проблеме нахождения темпа захвата звезд сверхмассивными черными дырами в центрах галактик. Поскольку звезды на хаотических орбитах, которые могут захватываться черной дырой, составляют значительную долю популяции галактики, то решение именно нестационарной задачи может дать обоснованную оценку на темп аккреции вещества на черную дыру, а значит и на мощность излучения активных ядер галактик и квазаров

3. Разработан программный комплекс SMILE для построения самосогласованных орбитальных конфигураций звездных систем и гало темной материи методом Шварцшильда и анализа регулярной и хаотической динамики орбит. Он реализован в виде программ на языке C++, позволяющих исследовать в заданном потенциале индивидуальные орбиты и семейства орбит, строить сечения Пуанкаре для двумерной задачи и карты частот для трехмерной задачи, создавать самосогласованные модели методом Шварцшильда. Готовится к публикации статья с описанием работы комплекса SMILE; исходные тексты программ и скомпилированные для различных операционных систем версии будут опубликованы в интернете на сайте <http://td.lpi.ru>

4. Рассмотрена задача о строении звездных скоплений вокруг сверхмассивных черных дыр. Показано, что при наличии трехосной асимметрической компоненты потенциала возникает новый класс орбит- пирамидные орбиты. Звезды на этих пирамидных орбитах прецессируют под действием асимметричного потенциала и могут захватываться и приливным образом разрушаться черной дырой. Проведено детальное исследование свойств таких орбит как с помощью аналитических методов, так и с использованием разработанного программного пакета SMILE. По результатам работы готовится к публикации статья.

5. При увеличении барионной (нейтронной) плотности вещества необходимо учитывать одновременно два существенных фактора: уменьшение запаса внутренней устойчивости компактных нейтронных звезд, обусловленное возможным образованием черной дыры, с одной стороны, и фазовый переход – деконфайнмент цвета и трансформация КХД – вакуума- внутри ядерной материи, с другой. Обе неустойчивости развиваются при весьма похожих условиях и решающим образом влияют на дальнейшую судьбу коллапсирующей звезды. Поскольку при упомянутом фазовом переходе вакуум адронной фазы (заполненный глюонным и киральным кварк-антикварковым конденсатами) превращается в пустой (пертурбативный) вакуум субадронной фазы и, стало быть, соответствующее (очень высокое) давление резко падает, прежде «холодная» (вырожденная) ядерная среда начинает коллапсировать в новый вакуум. Если масса звезды достаточно велика, то это схлопывание приводит к сильнейшему разогреву, который прекращается только после образования кварк-глюонной плазмы с температурой не менее 100 МэВ, способной противостоять дальнейшему гравитационному сжатию (типичные температуры при взрывах сверхновых меньше, как минимум, на порядок). Это должно, по всей вероятности, воздвигнуть «огненную стену» на пути проваливания коллапсирующей материи в черную дыру.

6. В опубликованной в 2009 г. статье рассчитан джозефсоновский ток в структуре сверхпроводник-изолятор-нормальный металл – изолятор-сверхпроводник. Предполагается, что тонкие изолирующие прослойки характеризуются спин-активным рассеянием. Получена явная зависимость тока от двух  $S$  - матриц.

В другой статье, принятой в печать в журнале Phys.Rev.B, найдено эффективное действие перехода сверхпроводник- нормальный металл для энергий много меньших сверхпроводящей щели. При этом предполагается произвольным распределение прозрачностей каналов проводимости. Найденное действие используется для расчета поправок из-за электрон-электронного взаимодействия к вольт-амперным характеристикам (андреевской проводимости).

7. Разрабатывается подход к изучению свойств потоков ренормализационной группы на основе теории информации. Введено понятие средних потерь информации при перенормировке как условной энтропии быстрых переменных (которые устраняются в под-

ходе Вильсона) при фиксации медленных. Положительность потерь приводит к уменьшению энтропии при перенормировке, что, впрочем, обусловлено в значительной степени просто уменьшением числа степеней свободы. Введена также более удобная величина-взаимная информация быстрых и медленных переменных, которая гораздо лучше отражает изменение в физике в результате перенормировки. Показано, что для целого ряда ренормгрупповых преобразований (преобразования децимации) в решеточных спиновых моделях положительность взаимной информации сразу приводит к монотонному возрастанию энтропии на узел вдоль потока ренормгруппы

8. Изучен парадоксальный аспект процесса квантового измерения, который можно назвать распутыванием при измерении. Известно, что при измерении квантовой системы происходит запутывание (возникает квантовая корреляция) измеряемой системы с измерительным прибором или, в более общем случае, с окружением этой системы (резервуаром). В работе Dodd and J.J.Halliwel (Phys.Rev.A,2004) показано, что в некоторых случаях влияние резервуара на частицу действует противоположным образом, а именно, ликвидирует запутывание, которое имеет место внутри измеряемой системы перед ее измерением. Для более детального анализа этой парадоксальной ситуации был применен подход, в котором непрерывные измерения квантовой системы (эффективно представляющие действие на нее резервуара) описываются ограниченными интегралами по путям. Этот подход был использован для описания непрерывного измерения двухчастичной системы, находящейся в запутанном состоянии. При этом не только доказывается возникновение эффекта распутывания при измерении, но и наглядно выявляется причина этого эффекта, а также ограничения, при которых эффект возникает. Показано, что под действием резервуара (непрерывного измерения) двухчастичное запутанное состояние может становиться сепарабельным, т.е. запутывание может исчезать. Эффект распутывания имеет место лишь в том случае, когда действие резервуара приводит к декогеренции, но не к диссипации (в этом случае уравнение для матрицы плотности измеряемой системы отличается от уравнения Лиувилля лишь двойным коммутатором измеряемой наблюдаемой с матрицей плотности).

#### *Сектор теории сверхпроводимости*

*(Руководитель сектора д.ф.-м.н., член корр. РАН Е.Г. Максимов)*

Тема: Исследование электронных и фононных спектров кристаллических систем и вычисление на их основе физических свойств кристаллов. № 01.2.007.07788 (п.6,7)

1. На основе первопринципных расчетов динамики решетки исследовано плавление натрия и лития при высоких давлениях. Установлены факторы, ответственные за недавно открытое аномальное поведение кривой плавления Na: это уменьшение при сжатии модуля сдвига при малых векторах  $q \sim 0$  и смягчение поперечных фононных мод при больших  $q$  вблизи границы зоны Бриллюэна. Оба фактора приводят к возрастанию с давлением амплитуд тепловых колебаний. В рамках простого подхода с использованием критерия Линдемана удалось количественно описать немонотонное поведение кривой плавления  $T_m(p)$  натрия в очень широком интервале давлений и температур, и в частности, падение температуры плавления при  $p \sim 1$  Мбар до более низких значений, чем при нормальном давлении. При описании  $T_m(p)$  лития вблизи тройной точки ОЦК–ГЦК–жидкость данный подход приводит к нефизическому разрыву кривой плавления. Это обусловлено «мягкостью» фононного спектра ОЦК лития, которая является необходимым условием для существования высокотемпературной ОЦК фазы. На примерах плавления в Na и Li выявлены причины, по которым критерий Линдемана может быть эффективным в одних ситуациях и неприменимым в других.

2. Был проведен подробный анализ истории развития теоретических представлений о природе сегнетоэлектрического перехода в ионных кристаллах. Было отмечено, что уже в рамках феноменологической теории сегнтоэлектричества В.Л. Гинзбургом было сфор-

мулировано понятие о «мягкой» моде, частота которой стремится к нулю при приближении к температуре фазового перехода. Экспериментально и теоретически позднее было показано, что эта «мягкая» мода является одной из оптически-активных поперечных фононных мод при импульсе  $q = 0$ . В рамках простейших моделей динамики решетки было показано, что «мягкая» мода возникает как результат конкуренции двух вкладов в динамическую матрицу колебаний – короткодействующего отталкивания между ионами и дальнедействующего диполь-дипольного притяжения. Последующее развитие первопринципных методов расчета физических свойств кристаллов в рамках теории функционала плотности (ТФП) позволило вычислить энергии кубической и сегнетоэлектрических фаз и показать, что сегнетоэлектрические фазы являются более энергетически выгодными, чем параэлектрическая кубическая фаза. Было показано также, что в рамках ТФП, использующем представление волновых функций электронов в виде суммы блоховских функций, возникают трудности как в интерпретации причины сегнетоэлектрического перехода, так и в определении природы электрической поляризации кристалла. Возникают также противоречия с результатами, полученными ранее в рамках простых феноменологических моделях ионных кристаллов. Было показано также, что разработанный нами ранее первопринципный метод поляризуемого и деформируемого иона, во-первых, позволяет проводить детальные количественные расчеты свойств ионных кристаллов, во-вторых, может служить в значительной мере обоснованием старых феноменологических теорий. Различия в трактовке результатов, возникающих в обоих подходах, связаны, в основном, с отличием используемых математических методик, а не физических моделей.

3. Подробно исследовано влияние давления на фононные спектры, электрон-фононное взаимодействие (ЭФВ) и критическую температуру сверхпроводящего перехода в нитридах циркония и гафния ZrN и HfN. Рассчитанные плотности фононных состояний качественно согласуются с рамановскими спектрами, измеренными при нескольких давлениях в интервале до 32 ГПа. Критическая температура  $T_c$  определялась непосредственно из решения уравнения Элиашберга с использованием вычисленной нами из первых принципов функции Элиашберга. Барическая производная  $\partial T_c / \partial p$  для ZrN хорошо согласуется с результатами измерений при низком давлении. Для HfN в литературе отсутствуют экспериментальные данные по  $T_c$ , а имеющаяся феноменологическая оценка существенно отличается от полученного нами значения  $T_c$ . Проанализированы причины этого расхождения и показано, что для количественного определения  $T_c$  необходимы первопринципные расчеты. При  $p > 10$  ГПа зависимость  $T_c(p)$  в ZrN и HfN становится нелинейной с замедлением падения  $T_c$ . Показано, что понижение  $T_c$  при сжатии происходит из-за уменьшения константы ЭФВ  $\lambda$ , которое, в свою очередь, обусловлено возрастанием фононных частот.

4. Проведены расчеты электронной структуры кремниевых нанокластеров, легированных атомами P, As и Sb. Основное внимание уделено сужению ширины запрещенной области, вызванному легированию. Найдено, что в кремниевых нанокластерах этот эффект имеет значительно большую величину, чем в объемном кремнии. Трудность исследования состоит в том, что данный эффект не может быть корректно описан в рамках теории функционала электронной плотности. Поэтому все расчеты были выполнены в рамках теоретико-полевого подхода (приближение GW), требующего во много раз больших компьютерных ресурсов. Показано, что сужение щели является результатом усиления экранирования межэлектронного взаимодействия, вызванного легированием. Из-за дискретного характера электронного спектра в нанокластерах усиление экранирования и сужение щели существенно отличаются от аналогичных эффектов в объемных полупроводниках. Предложена простая аналитическая модель, дающая результаты, неплохо согласующиеся с численными расчетами.

5. Выполнены два исследования по оптике мягкого рентгеновского диапазона.

(а) Сконструирована, изготовлена и опробована пара спектрально согласованных многослойных зеркал для объектива Шварцшильда, работающего в области «углеродного окна» (длина волны 4,5 нм). Спектральное согласование зеркал, имеющих очень узкую полосу отражения (1% от длины волны), представляет большие трудности. Для области «углеродного окна» согласование зеркал достигнуто впервые. (б) Изучен механизм разрушения многослойного отражающего покрытия Sc/Si под действием излучения рентгеновского лазера с длиной волны 46,9 нм. Понимание основных стадий разрушения многослойной оптики становится в настоящее время все более актуальной задачей в связи с появлением таких сверхмощных источников излучения, как лазеры на свободных электронах.

6. Развита аналитическая теория, позволяющая вычислять константы распространения и потери многослойных брэгговских световодов. Полученные результаты хорошо согласуются с прямыми численными расчетами и экспериментальными данными. Её использование позволит ясно представить, как скажутся изменения в структуре световода на основных его свойствах (спектре потерь, дисперсии, поле моды и т.д.). Это позволит выбрать оптимальные параметры световода и удовлетворить главные практические требования к его свойствам – одномодовый режим, низкие потери, низкая чувствительность к изгибу, большая площадь поля моды и т.д.

7. Теоретически исследовано явление нелокального Андреевского отражения в гетероструктурах типа нормальный металл – сверхпроводник – нормальный металл при наличии внешнего микроволнового поля. Показано, что при подщелевых частотах внешнего сигнала нелокальная проводимость указанных структур становится отрицательной. Данное предсказание может быть непосредственно проверено на эксперименте.

8. Построена теория протекания джозефсоновского тока в структуре сверхпроводник/нормальный металл/сверхпроводник, причем границы раздела между сверхпроводниками и нормальной прослойкой предполагались магнитными (спин-активными). В баллистическом пределе получены общие формулы, описывающие поведение джозефсоновского тока от температуры, параметров рассеяния на границе и геометрических параметров системы. Показано, что в таких системах возможна реализация, так называемого, пи-контакта, в котором основному состоянию соответствует разность фаз равная  $\pi$ . Также показано, что в контактах с малым количеством проводящих каналов возможно резонансное усиление джозефсоновского тока.

9. Разработана количественная теория нелокального контактанса в трёхтерминальных гетероструктурах нормальный металл/сверхпроводник/нормальный металл. На основе решения уравнения Узделя были получены аналитические выражения для локального и нелокального контактансов, которые справедливы при произвольной температуре, прозрачности границ раздела и геометрии задачи. Показано, что величина нелокального сопротивления при нулевой температуре имеет универсальное значение и не зависит от характеристик нормальных электродов и сопротивлений контактов, а определяется только формой и параметрами сверхпроводника. Полученные аналитические формулы дают хорошее численное согласие с экспериментом.

10. Рассматривалось кольцо, состоящее из металлических квантовых точек, помещенное в магнитное поле. В данной системе наблюдаются Арон-Бомовские осцилляции контактанса как функции магнитного потока, пронизывающего систему. Изучалось влияние электрон-электронного взаимодействия на данные осцилляции. Оказалось, что взаимодействие вызывает декогерентность в системе, а значит и подавление осцилляций при всех температурах включая нулевую. Было получено выражение как для формы осцилляций так и для амплитуды. Интересной особенностью системы оказался тот факт, что температура кроссовера между тепловым и квантовым режимами дефазировки зависит от размера кольца.

11. Исследовалось поведение квантовой частицы на кольце в магнитном поле, взаимодействующей с окружением типа «неупорядоченный металл». К системе был добавлен периодический потенциал, так что частица двигалась за счет туннелирования между соседними минимумами потенциала. При помощи инстантонной техники был посчитан незатухающий ток в системе. Было показано, что при низких температурах он исчезает при размере кольца большем, чем «длина дефазировки», которая определяется взаимодействием и не зависит от температуры.

12. Построена теория многократного ( $10\text{-}10^5$ ) усиления напряжения в полимерных цепях, в зависимости от внешних условий (температуры, pH, наличия определенных веществ) и структуры полимера. Практическое применение этого эффекта связано с созданием чувствительных сенсоров реагирующих на изменения различных внешних условий.

13. Построена теория полимерных щеток, которые могут находиться как в объеме, так и быть абсорбированными на притягивающей поверхности при наличии произвольного растворителя. Предсказана возможность зависимость условий их разрыва от внешних условий.

14. Построена теория полимеров, абсорбированных на поверхности в зависимости от их поверхностной плотности и химической структуры. Механизм адсорбции и десорбции таких полимеров ответственен за обмен живых клеток со внешней средой, определяя интенсивность всех биологических процессов, происходящих в клетках.

15. Предложен физический механизм диффузии, приводящий к пространственной модуляции степени полимеризации олигомера в слое жидких фото-полимеризуемых композиций. Построена теория возникновения поверхностного ландшафта, который наблюдается в слое тонких пленок для некоторых олигомерных веществ. Практическое применение данной работы связано с предсказанием оптимального состава и выбором условий синтеза дифракционных оптических элементов (решеток, линз и т.д.).

16. Предложена модель, учитывающая вклады наполнителя, связующего и ансамбля микротрещин в упругие характеристики реакторного графита. Получено аналитическое решение этой модели, на основе которого вычислены упругие модули и скорость звука в графите. Показано, что анизотропия вычисленной скорости звука и ее зависимость от гидростатического давления находятся в согласии с экспериментом. Практическое применение данной работы связано с возможностью расчета напряжений, развивающихся в реакторных кладках в зависимости от микроскопических свойств используемого графита (его морфологии).

17. Методом точной диагонализации изучены эффекты парных корреляций в малых кластерах в модели БКШ. Вычислена теплоемкость системы и обнаружена особенность в ней качественно совпадающая с полученной недавно на эксперименте. Изучена зависимость этой особенности от четности числа электронов.

*Сектор теории твердого тела*

*(Руководитель сектора –член корр. РАН, д.ф.-м.н. П.И. Арсеев)*

Тема: Кинетика электронов и фононов в неоднородных системах № 01.2.007.07787 (п. 6)

1. Для описания взаимодействия электронного тока с колебательными степенями свободы в туннельных контактах содержащих единичные атомы и молекулы были построены эффективные гамильтонианы электрон-фононного взаимодействия в рамках адиабатического подхода Борна-Оппенгеймера. Было исследовано взаимодействие электронов со специальной модой - колебанием молекулы, как целого, "внутри" туннельного контакта. Частоты и характеристики этих колебаний сами определяются величиной гибридизации

электронных состояний молекулы с состояниями подложки, поэтому такие колебательные степени свободы не могут быть определены независимо, в пренебрежении туннельными переходами электронов. Для определения электрон-колебательного взаимодействия надо исходить из точных волновых функций всей системы. Построенные по полученным формулам зависимости туннельной проводимости от напряжения показывают, что, если электронный уровень атома лежит вблизи уровня Ферми подложки, то для больших значений гибридизации состояний молекулы с берегами контакта особенности, связанные с колебаниями, имеют вид ступеньки вниз (проводимость уменьшается). Но если электронный уровень удален от уровня Ферми на величину, которая сравнима с уширением уровня за счет гибридизации, то форма особенности начинает меняться. Если уровень атома лежит выше уровня Ферми, то особенность выглядит, как острый провал. Если значительно ниже --- то как пикок.

2. Развивался специальный способ построения теории, описывающей магнитные примеси, взаимодействующие с зонными электронами. Этот способ состоит во введении дополнительных ограничений на возможные состояния и конфигурации частиц. Так, каждое магнитное состояние электронов примеси, являющееся многоэлектронным состоянием с сильным кулоновским взаимодействием, может рассматриваться как рождение некоторой "псевдочастицы". Переход из одного многоэлектронного состояния в другое на этом языке соответствует уничтожению одной "псевдочастицы" и появлению другой. Однако, из-за того, что эти "псевдочастицы" на самом деле не являются независимыми, для них появляются ограничения в пространстве всех возможных конфигураций. Была построена диаграммная техника для таких псевдочастичных операторов, основанная на базе диаграммной техники Келдыша и полностью учитывающая ограничения в пространстве состояний для таких псевдочастиц. Характерной особенностью является то

Тема: Исследование пространственно-временной самоорганизации в нелинейных распределенных диссипативных системах № 01.02.007.07802 (п. 2, 4, 5,10, 27, 48, 50)

1. Проведено исследование возникновения диффузионной неустойчивости в системе из трех уравнений типа «реакция-диффузия». В общем виде получены условия как тьюринговской, так и волновой неустойчивостей. Выявлены качественные свойства, которыми должна обладать система для того, чтобы в ней могла произойти бифуркация каждого из двух типов. В численных экспериментах показано, что при выполнении соответствующих условий в нелинейной модели возникают пространственно-временные структуры, которые предсказываются линейным анализом.

2. Изучено явление т.н. «осцилляторной смерти» (ОС), т.е. исчезновение автоколебаний при сильном взаимодействии осцилляторов, при наличии небольшой расстройки параметров взаимодействующих систем. Обнаружено, что в отличие от систем с одинаковыми осцилляторами, в которых ОС сосуществует в фазовом пространстве с синхронными синфазными автоколебаниями, разумное увеличение расстройки приводит к исчезновению автоколебаний в большой области пространства параметров. Явление доминирования ОС наблюдается в моделях с разным типом фазовых портретов, в частности в моделях генетических осцилляторов, что открывает возможности для интересных спекуляций.

3. Проведено исследование реакционно-диффузионной модели роста опухоли, учитывающей дихотомию клеточной подвижности и пролиферации. Изучена зависимость скорости роста опухоли в модели от ее основных параметров. Было показано, что в отличие от моделей типа Колмогорова-Петровского-Пискунова и Фишера скорость роста опухоли зависит не только от скорости деления ее клеток ( $v \sim B^{1/2}$  в уравнении Фишера, и  $v \sim B^{3/4}$  в модели с дихотомией подвижности и пролиферации), но и от скорости их гибели при отсутствии необходимого уровня питательных веществ. Однако эта зависимость носит сложный, не степенной характер. В рамках модели начато исследование устойчивости роста фронта опухоли в двумерном случае.

4. Продолжено исследование свойств бегущих волн горения, распространяющихся в горючей смеси, в модели с двухступенчатым цепным механизмом реакции в адиабатическом одномерном случае. В пространстве параметров найдены области существования бегущих волн, пульсирующих волн, соответствующих различным периодам осцилляций, и хаотических волн горения. Установлены границы существования данных решений, т.е. критические значения параметров для бифуркаций Хопфа, последовательных бифуркаций удвоения периода, границы возникновения и исчезновения хаоса. Исследован сценарий затухания волн горения, приводящий к исчезновению хаотического режима распространения пламени. Установлено, что возникновение затухания происходит по сценарию переходного хаоса за счет кризиса хаотического аттрактора, вызванного слиянием самого хаотического аттрактора с границей его бассейна притяжения. Показано, что для чисел Льюиса для топлива близких к единице области существования пульсирующих решений в пространстве параметров сжимаются и располагаются близко друг к другу, что делает экспериментальное наблюдение явления удвоения периода затруднительным. Установлено, что пульсирующие решения в среднем распространяются со скоростью меньшей, чем скорость бегущей волны горения для тех же значений параметров.

5. Продолжались работы по дальнейшему развитию динамической теории информации и использованию её в различных областях науки. Продолжались исследования методологических аспектов синергетики. Показано, что она является математической основой диалектики. Продолжались исследования роли принципа дополнительности Н. Бора. В развивающихся системах. Показано, что он является необходимым этапом развития, в котором рождается новая информация. Продолжались исследования процессов мышле-



ния не основе теории нейросетей. Показано, что процессы интуитивного и логического мышления (а также переходы интуитивного в логическое) могут моделироваться в рамках нейрокомпьютинга, но для этого необходимы две подсистемы; сохраняющая и поисковая. Продолжались работы по применению динамической теории информации в экономике и социологии. Показано, что деньги представляют собой условную информацию. Подготовлено третье дополненное издание монографии «Синергетика и Информация» (Динамическая теория информации).

6. Продолжались работы по исследованию квантово-механических колебаний в первичных процессах фотосинтеза. Теоретические результаты сопоставлены с экспериментальными и продемонстрировано удовлетворительное согласие.