
**РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ИНСТИТУТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
ИМ. Л.Д. ЛАНДАУ РАН**



2025



В 2025 г. сотрудники Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН продолжали работы в различных областях современной теоретической физики.

За прошедший год сотрудниками института была издана 1 монография и опубликовано 104 научных статьи, в том числе в таких высокорейтинговых международных журналах как Nature Communications (1), Communications Materials (1), Communications Physics (1), Physical Review Letters (1). В журнале Успехи Физических Наук был издан специальный выпуск, посвященный 60-летию ИТФ, в который вошли несколько обзоров по актуальным разделам физики, написанных сотрудниками института.

В 2025 г. продолжалось омоложение научного коллектива ИТФ: в институте появились новые аспиранты. Продолжила свою деятельность молодежная лаборатория, поддержанная грантом Минобрнауки. Также РФФИ поддержал заявку 2025 г. сотрудника ИТФ В.А. Зюзина на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами. Также продолжалась реализация еще 5 проектов РФФИ. Сотрудники института С.С. Апостолов и А.В. Литвинов победили в конкурсе Junior Leader фонда БАЗИС. Директор ИТФ И.В. Колоколов в 2025 г. был избран в член-корреспонденты РАН.

В 2025 г. в сотрудничестве с Институтом физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН продолжала функционировать лаборатория “Современная гидродинамика”, в которой проводятся как теоретические, так и экспериментальные исследования.

В 2025 г. в институте была проведена международная конференция, приуроченная к 80-летию юбилею Владимира Петровича Минеева. Также в институте прошла традиционная научная школа для студентов младших курсов. В 2025 году был сделан первый шаг по взаимодействию между ИТФ и Институтом теоретической физики Китайской академии наук. В рамках сотрудничества заработал регулярный российско-китайский онлайн коллоквиум. Традиционно сотрудники института были в составе оргкомитетов нескольких российских и международных конференций и научных школ, прошедших в 2025 г.

В 2025 г. была возобновлена традиция проведения молодёжного конкурса научных работ. В 2025 г. в конкурсе участвовало 8 работ аспирантов и студентов.

В 2025 г. сотрудники института продолжали активную педагогическую деятельность, читая лекции на базовых кафедрах института в МФТИ и ВШЭ, осуществляя научное руководство студентами и аспирантами, проводя занятия со

студентами в других вузах, и принимая экзамены по программе традиционного теорминимума Ландау. К сожалению в 2025 г. институт понёс потери. 23 сентября 2025 г. ушёл из жизни замечательный учёный, член-корр. РАН Юрий Николаевич Овчинников. Его работы по сверхпроводимости и диссипативным квантовым системам навсегда вошли в золотой фонд теоретической физики.

Оглавление

1	Основные научные результаты	5
2	Научные мероприятия	15
3	Образовательная деятельность	17
4	СМИ об институте	18
5	Научные результаты	22
5.1	Новые эффекты в физике конденсированного состояния вещества	23
5.2	Квантовые явления в наноструктурах и новых материалах	33
5.3	Нелинейные режимы взаимодействия вещества и излучения	42
5.4	Хаотическая и регулярная динамика систем гидродинамического типа	49
5.5	Квантовая теория поля, теория струн и математическая физика	57
5.6	Сильные взаимодействия, релятивистская астрофизика, гравитация, космология	62
5.7	Транспорт в неупорядоченных системах: от наноструктур до турбулентной атмосферы	71

1 Основные научные результаты

В 2025 г. сотрудниками ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН были получены следующие основные результаты. Построена теория, описывающая пространственно-временную динамику амплитудной моды (Шмида-Хиггса) в неупорядоченных сверхпроводниках, предсказывающая осцилляции и субдиффузионное распространение. Показано, что для однозначной идентификации этой коллективной моды необходимо применение неоднородного электрического поля, которое индуцирует характерный пик в нелинейном отклике. Обнаружено, что темновое состояние в диссипативных двухзонных фермионных системах с сохраняющимся числом частиц является неустойчивым. Эта неустойчивость обусловлена аналогом ударной ионизации и приводит к установлению нового равновесного состояния с конечной заселенностью верхней зоны. Показано, что в резистивной модели джозефсоновского перехода всего двух гармоник в ток-фазовом соотношении достаточно для возникновения всех возможных дробных ступенек Шапиро. Также продемонстрировано, что сдвиг фазы между гармониками приводит к джозефсоновскому диодному эффекту, проявляющемуся в асимметрии положительных и отрицательных ступенек. Объяснен механизм изотропного отрицательного магнитосопротивления в слоистых антиферромагнитных полуметаллах, связанный со сжатием электрон-

ных волновых функций из-за обменного расщепления в магнитном поле. Теоретические предсказания подтверждены расчетами из первых принципов и экспериментальными данными на примере соединения EuSn_2As_2 . Продемонстрировано создание глубокой цилиндрической микрополости в кристалле фторида лития с помощью единичного жесткого рентгеновского импульса от лазера на свободных электронах. Этот метод, основанный на ударноволновом воздействии с давлением на уровне терапаскалей, открывает новый путь для лазерной обработки прозрачных и других материалов. Установлено, что распределение интенсивности светового пучка в турбулентной атмосфере имеет "жирные" хвосты, убывающие по закону растянутой экспоненты с показателями $7/12$ или $7/13$. Это объясняет более высокую, чем ожидалось, вероятность возникновения экстремальных всплесков интенсивности, что имеет важное практическое значение для оптических систем. Предложен и апробирован новый метод комагнетометрии с использованием плотного пучка частиц для независимого мониторинга магнитного поля в накопителях. Метод, включая вариант самокомагнетометрии, позволяет поддерживать стабильность спиновой фазы в течение многих часов, что критически важно для прецизионных спиновых экспериментов.

Динамика моды Хиггса в неупорядоченных сверхпроводниках

И.С. Бурмистров

Построена теория пространственно-разрешенной динамики коллективной амплитудной моды Шмида-Хиггса (SH) в неупорядоченных s -волновых сверхпроводниках и фермионных сверхтекучих жидкостях (см. рис. 1a,b). Амплитудная коллективная мода проявляется как полюс в SH восприимчивости, которая описывает отклик модуля порядка на его же изменение. Показано, что эта восприимчивость имеет сложную аналитическую структуру в плоскости комплексной частоты. При нулевой температуре найдено, что, когда длина когерентности значительно превышает среднюю длину свободного пробега, (i) отклик SH восприимчивости при фиксированных волновых векторах демонстрирует колебания с частотой 2Δ и затухающие как $1/t^2$, где Δ - сверхпроводящая щель; (ii) субдиффузионные колебания с динамическим показателем $z = 4$, которые проявляются на более поздних временах и на больших расстояниях; и (iii) пространственные колебания при фиксированной частоте зату-

хают экспоненциально, с периодом, который уменьшается по мере приближения частоты к 2Δ сверху. Когда длина когерентности сравнима со средней длиной свободного пробега, появляются дополнительные экспоненциально затухающие колебания при фиксированном волновом векторе на частоте выше 2Δ .

Кроме того, построена теория отклика третьего порядка в токе при действии неоднородного в пространстве электрического поля (см. рис. 1c). Показано, что мода Шмида-Хиггса индуцирует дополнительный пик в токе генерации третьей гармоники при конечных волновых векторах. Частота этого пика смещена от обычного резонанса при частоте равной Δ , вызванного квазичастичными переходами через сверхпроводящую щель. Таким образом, показано, что неоднородное электрическое поле является необходимым для однозначной идентификации амплитудной коллективной моды.

Работа поддержана госзаданием FFWR-2024-0015.

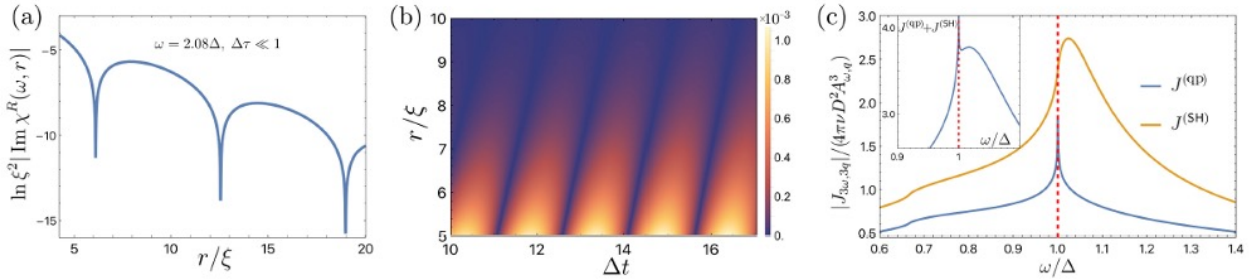


Рис. 1: (а) Пространственные осцилляции в мнимой части SH восприимчивости в двумерном грязном сверхпроводнике. (б) Пространственно-временные осцилляции в модуле SH восприимчивости в двумерном грязном сверхпроводнике. (с). Вклад амплитудной моды (синяя линия) и квазичастичный вклад (оранжевая линия) в нелинейный ток.

Результаты опубликованы:

1. P. A. Nosov, E. S. Andriyakhina, I. S. Burmistrov, *Spatially-resolved dynamics of the amplitude Schmid-Higgs mode in disordered superconductors*, Phys. Rev. Lett. 135, 056001 (2025).

Неустойчивость темнового состояния в модели двухзонных фермионов с диссипативной динамикой, сохраняющей полное число частиц

А.А. Люблинская, И.С. Бурмистров

Изучен широкий класс двухзонных фермионных систем, подверженных диссипации, сохраняющей общее число частиц. По построению эти модели имеют гарантированное устойчивое состояние — темновое состояние — с полностью заполненной нижней зоной и пустой верхней зоной. В пределе слабой диссипации выведены уравнения, описывающие динамику фермионной плотности на больших масштабах длины и на больших временах. Они принадлежат к классу реакционно-диффузионных уравнений Фишера-Колмогорова-Петровского-Пискунова. Эти уравнения отличаются от стандартных систем реакционно-диффузионных уравнений наличием глобального закона сохранения - сохранения полного числа частиц в двух зонах. Анализ полученных уравнений показывает, что темновое состояние является неустойчи-

вым, уступая место новому устойчивому состоянию с конечной плотностью частиц в верхней зоне (см. рис. 2). Оказывается, что за этой неустойчивостью скрывается известный из физики полупроводников эффект. Этот физический процесс полностью аналогичен процессу ударной ионизации в полупроводниках, предсказанном Л.В. Келдышем в 60е годы прошлого века. В дальнейшем планируется провести анализ влияния флуктуаций на выводы о неустойчивости темнового состояния.

Таким образом, диссипативные системы с сохраняющимся числом частиц, вероятно, не являются надежным универсальным инструментом для стабилизации темновых состояний.

Работа поддержана госзаданием FFWR-2024-0017.

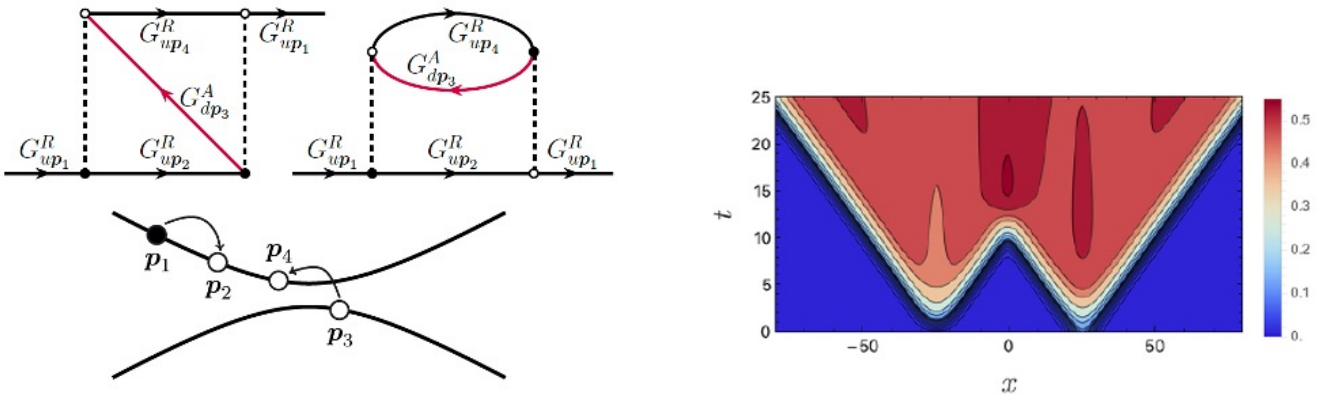


Рис. 2: (левая панель) Диаграммы и процесс типа ударной ионизации, приводящий к рождению частиц в верхней зоне. (правая панель) Пример зависимости плотности частиц в верхней зоне от времени для одномерной модели при наличии локального рождения частиц в верхней зоне в $t = 0$.

Результаты опубликованы:

1. A. A. Lyublinskaya, P. A. Nosov, I. S. Burmistrov, *Instability of the engineered dark state in two-band fermions under number-conserving dissipative dynamics*, Phys. Rev. B 111, 094302 (2025).

Все дробные ступеньки Шапиро в резистивной модели с двумя джозефсоновскими гармониками

П.Н. Царев, Я.В. Фоминов

Исследованы ступеньки Шапиро — участки постоянного напряжения на вольт-амперной характеристике джозефсоновского контакта, которые появляются в результате синхронизации частоты внутренней динамики сверхпроводящей фазы джозефсоновского контакта с частотой внешнего сигнала. Математически этот эффект фазовой синхронизации может быть описан резистивной моделью джозефсоновского контакта (RSJ), являющейся важным примером нелинейной динамической системы. В стандартной резистивной модели рассматривается джозефсоновский контакт без ёмкости и с синусоидальным ток-фазовым соотношением

$I_s(\varphi) = I_1 \sin \varphi$ (содержащим одну джозефсоновскую гармонику) в режиме заданного тока с монохроматической переменной компонентой. Хотя данная модель предсказывает возникновение только целых ступенек Шапиро, известно, что учёт высших джозефсоновских гармоник приводит к появлению ступенек соответствующей дробности. А именно, наличие в ток-фазовой зависимости гармоники с номером k (т.е. слагаемого вида $I_k \sin k\varphi$) приводит к возникновению ступенек Шапиро с дробными номерами вида n/k . Такие дробные ступеньки мы называем тривиальными.

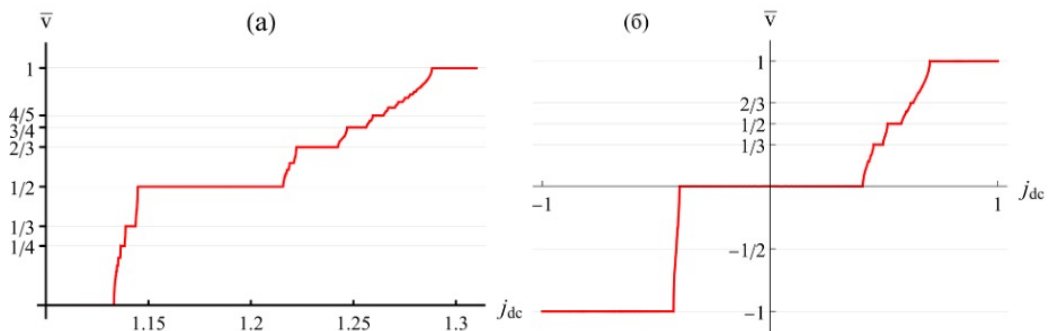


Рис. 3: Дробные ступеньки Шапиро в резистивной модели с двумя гармониками ток-фазового соотношения: $I_s(\varphi) = I_1 \sin \varphi + I_2 \sin 2\varphi$. (а) Вольт-амперная характеристика при наличии внешнего облучения, показывающая наличие не только тривиальных ступенек Шапиро (с целыми и полуцелыми номерами), но также и нетривиальных ступенек более высокой дробности. (б) Вольт-амперная характеристика при наличии также сдвига фаз между двумя джозефсоновскими гармониками. В этом случае имеет место джозефсоновский диодный эффект для всех ступенек Шапиро (как тривиальных, так и нетривиальных), проявляющийся в асимметрии ступенек с номерами, отличающимися знаком. Параметры графика подобраны так, что в области отрицательных напряжений дробные ступеньки очень малы и почти не видны, в то время как в положительной области они хорошо видны.

Результат нашего исследования состоит в том, что всего двух джозефсоновских гармоник в ток-фазовом соотношении достаточно для возникновения всех возможных дробных ступенек Шапиро в

рамках резистивной модели. Это означает, что помимо дробных ступенек со знаменателем $k = 2$ (которые в данном случае являются тривиальными), возникают также все нетривиальные вида n/k с про-

извольными целыми числами n и k (см. иллюстрацию на рис. 3а). Используя методы теории возмущений с обратной связью, мы аналитически находим амплитуды (размеры) этих дробных ступенек. Кроме того, вводя фазовый сдвиг между двумя джозефсоновскими гармониками (что возможно в системах с нарушенной симметрией обращения времени, на-

пример, в асимметричном СКВИДе), мы демонстрируем асимметрию между положительными и отрицательными дробными ступеньками, что является проявлением джозефсоновского диодного эффекта (см. иллюстрацию на рис. 3б).

Работа поддержана госзаданием FFWR-2024-0016.

Результаты опубликованы:

1. Pavel N. Tsarev, Yakov V. Fominov, *All fractional Shapiro steps in the RSJ model with two Josephson harmonics*, SciPost Physics 19, 148 (2025).

Изотропное отрицательное магнитосопротивление в антиферромагнитных металлах из-за обменного расщепления

П.Д. Григорьев

Слоистые полуметаллы с антиферромагнитным (АФМ) упорядочением, такие как EuFe_2As_2 , EuSn_2As_2 , EuSn_2P_2 , EuIn_2As_2 и др., обладают отрицательным магнитосопротивлением: сопротивление квадратично уменьшается с полем на величину 46% вплоть до поля H_{sf} полной спиновой поляризации, оставаясь изотропно к направлению тока и почти изотропно по полю. Его объяснение до сих пор отсутствовало. Мы предлагаем новый механизм, связанный с нарушением симметрии между АФМ подрешетками. Это сжимает волновые функции электронов проводимости, что усиливает их рассеяние на дефектах и дает изотропное магнитосопротивление. Проведенные численные

расчеты методом функционала плотности подтверждают это сжатие. Предложенный механизм магнитосопротивления применим к широкому классу слоистых АФМ металлов. Величина эффекта определяется параметром γ^2 , где γ — это отношение энергии обменного расщепления к интегралу перескока между АФМ подрешетками. Мы провели детальное экспериментальное исследование этого эффекта в EuSn_2As_2 и сравнили его с нашими теоретическими предсказаниями, получив хорошее согласие для кристаллов различного состава (см. рисунок 4).

Работа поддержана госзаданием FFWR-2024-0015.

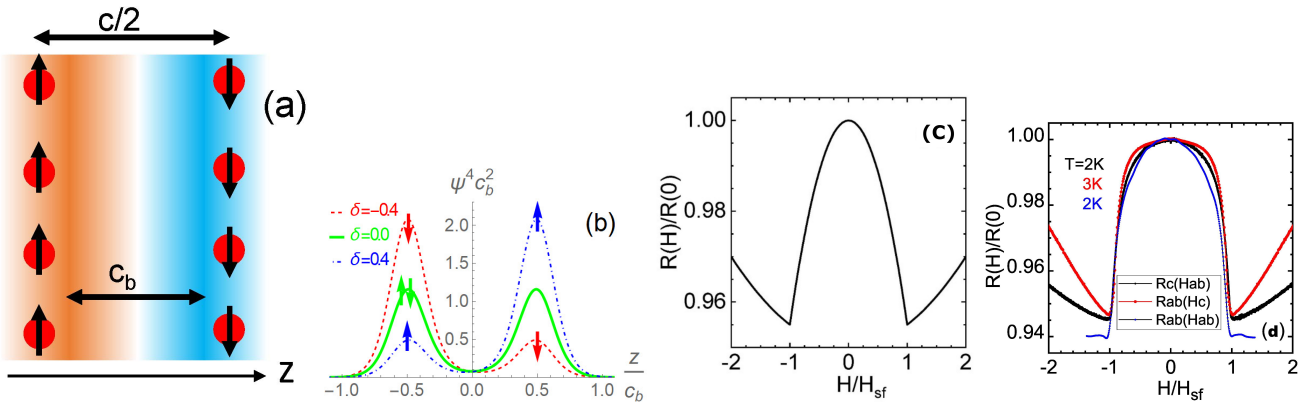


Рис. 4: (а) Схематическое расположение магнитных антиферромагнитного порядка А-типа. (б) Соответствующее изменение волновой функции электронов. (с) Теоретический вид и (d) экспериментальные данные отрицательного магнитосопротивления в АФМ полуметаллах для различных ориентаций магнитного поля и тока.

Результаты опубликованы:

1. P.D. Grigoriev, N.S. Pavlov, I.A. Nekrasov, I.R. Shein, A.V. Sadakov, O.A. Sobolevskiy, E. Maltsev and V.M. Pudalov, *Universal negative magnetoresistance in antiferromagnetic metals from symmetry breaking of electron wave functions*, Communications Materials 6, 252 (2025).

Формирование нанополости с большим отношением сторон в кристалле LiF с использованием фемтосекундного рентгеновского импульса лазера на свободных электронах

Н.А. Иногамов, В.В. Хохлов, Ю.В. Петров

Субпикосекундная оптическая лазерная обработка металлов активно используется для модификации нагретого поверхностного слоя. Но для более глубокой модификации различных материалов необходим лазер в диапазоне жесткого рентгеновского излучения. Здесь мы демонстрируем, что один рентгеновский импульс 9 кэВ от лазера на свободных электронах может сформировать цилиндрическую полость диаметром мкм и длиной ~ 1 мм в LiF, окруженную ударно-

трансформированным материалом. Генерируемая плазмой ударная волна с давлением на уровне ТРа приводит к повреждению, плавлению и полиморфным превращениям любых материалов, включая прозрачные и непрозрачные для обычных оптических лазеров. Более того, цилиндрические ударные волны могут быть использованы для получения значительного количества экзотических полиморфов высокого давления.

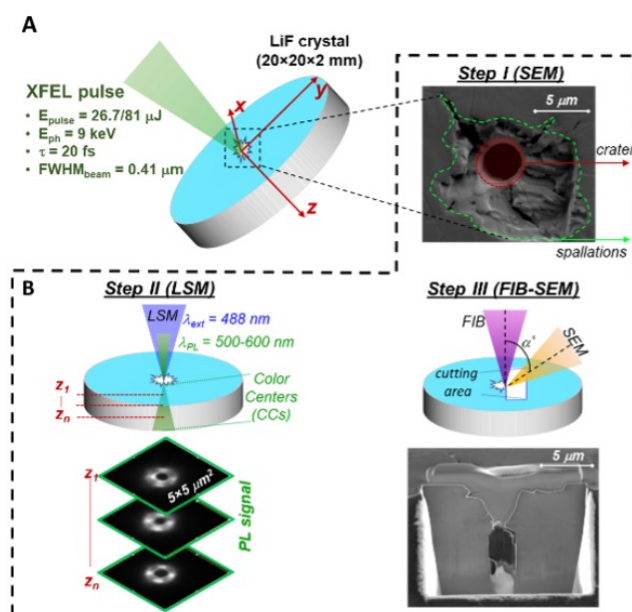


Рис. 5: Эксперимент по созданию полости в кристалле LiF с помощью пучка XFEL. (А) - Схема облучения образца LiF. (В) - Диагностика для изучения морфологии повреждения - этап I (сканирующий электронный микроскоп SEM), этап II (считывание сигнала PL с помощью лазерного конфокального микроскопа LSM), этап III (изучение внутренней морфологии полости путем разрезания образца сфокусированным ионным пучком и подсветкой SEM).

Распространение волн давления в LiF, радиальное течение материала, образование трещин и пустот анализируются с помощью континуального и атомистического моделирования/ Описана последо-

вательность процессов, приводящих к конечной структуре с длинной полостью. Аналогичные результаты могут быть получены для полупроводников и керамик, что открывает новый путь для развития

лазерной обработки материалов жестки- Работа поддержана госзаданием
ми рентгеновскими импульсами. (см. ри- FFWR-2024-0013.
сунок 5).

Результаты опубликованы:

1. S.S. Makarov et al., Nature Communications 16, 11504 (2025).

Вероятности всплесков интенсивности света, распространяющегося в турбулентной среде

И. В. Колоколов, В. В. Лебедев

Определены вероятности редких событий, когда в световом пучке, распространяющемся через турбулентную среду (атмосферу), формируется всплеск с интенсивностью I , намного превышающей среднюю I_0 . Установлена общая структура функции распределения интенсивности $P(I)$ и определены ее хвосты. Они характеризуются так называемыми растянутыми экспонентами $7/12$ и $7/13$: $\ln P(I) \propto I^{7/12}$, $\ln P(I) \propto I^{7/13}$ то есть являются “жирными”. Реализация той или иной асимптотики зависит от длины распространения и значения интенсивности. Таким образом, вероятность появления всплесков оказывается намного больше, чем их на-

ивная оценка в рамках гауссовой статистики волнового поля, являющейся в действительности промежуточной асимптотикой.

Данный эффект имеет несомненное практическое значение. Относительно большая частота всплесков интенсивности наблюдалась ранее в натурных экспериментах и не имела должного объяснения. На фазовой диаграмме (см. рис. 6) представлены области параметров, где имеют место различные асимптотические режимы. Параметр γ измеряет расстояние до приёмника.

Работа поддержана госзаданием FFWR-2024-0014.

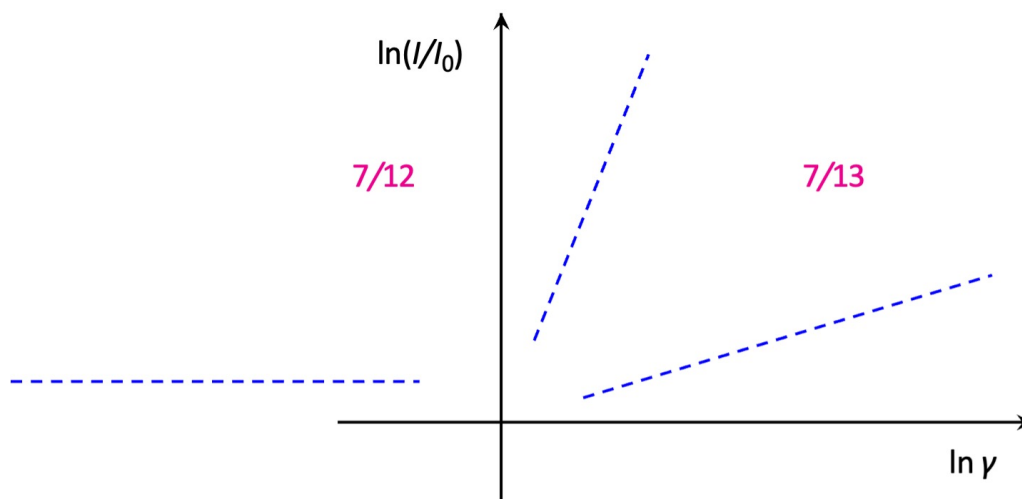


Рис. 6: Области, соответствующие различному поведению $P(I)$.

Результаты опубликованы:

1. И.В. Колоколов, В.В. Лебедев, *Статистика высоких интенсивностей света, распространяющегося в турбулентной среде*, УФН 195, 1179-1198, (2025).

Долговременная комагнетометрия при радиочастотных спин-флипах в накопителях и коллайдерах

Н.Н. Николаев

Сохранение спинового резонанса в течение нескольких часов императивно в измерении спиновых эффектов в накопителях и коллайдерах и требует комагнетометрии — независимого мониторинга магнитного поля. В работах [1,2] предложена и впервые апробирована на накопителе COSY комагнетометрия с коррекцией частоты прецессии рабочих банчей измерением частоты прецессии пилотного банча, иммунного к радиочастотному ротатору спина, выключаемого при

пересечении ротатора пилотным банчем, см. Рис.7. Показано, что при быстрых по сравнению с дрейфом магнитного поля спин-флипах комагнетометрия может быть реализована измерением частоты прецессии горизонтальной проекции спина собственно рабочих банчей (self-comagnetometry). Развитая обратная связь позволяет удерживать стабильность спиновой фазы на уровне 0.2 рад.

Работа поддержана госзаданием FFWR-2024-0011.

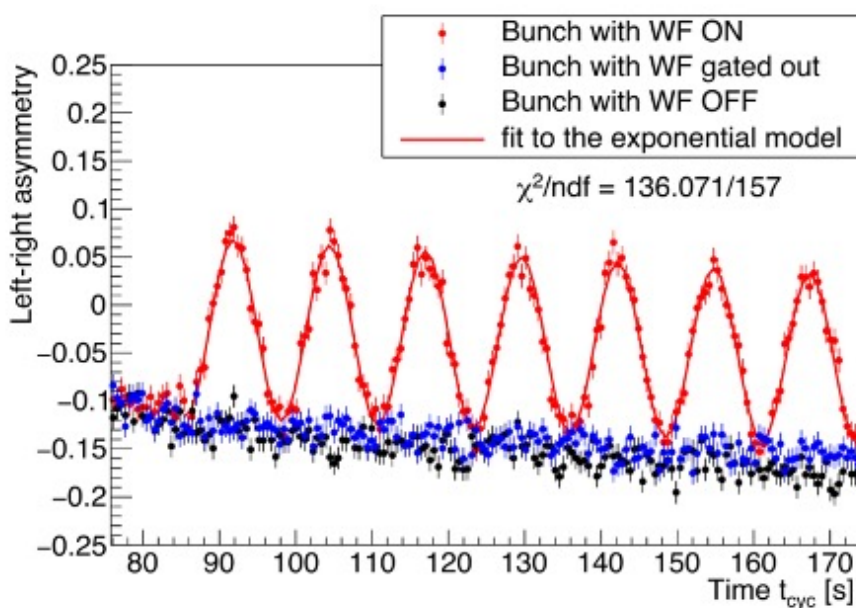


Рис. 7: Спин-флипы рабочего банча (красные точки) при нечувствительности к спин-флипперу поляризации пилотного банча (синие точки), результаты для которого идентичны поляризации при полностью выключенном спин-флиппере.

Результаты опубликованы:

1. J. Slim, F. Rathmann, N.N. Nikolaev et al. (JEDI Collab.), *Proof-of-principle demonstration of a pilot bunch comagnetometer in a stored beam*, Phys. Rev. Res. 7, 023257 (2025).
2. V. Hejny, J. Pretz, F. Abusaif, ... N.N. Nikolaev et al (JEDI Collaboration), *Maintaining a resonance condition of an rf spin rotator through a feedback loop in a storage ring*, Phys. Rev. Accel. Beams 28, 062801 (2025).

2 Научные мероприятия

В начале декабря 2025 г. в институте состоялась конференция “Superfluidity, superconductivity, and topology: conventional and unconventional”, приуроченная к 80-летнему юбилею Владимира Петровича Минеева. Из-за санкций министерства финансов США в отношении института конференция проходила в онлайн режиме. В конференции приняли участие нынешние и бывшие сотрудники ИТФ им. Л.Д. Ландау - ученики В.П. Минеева, которые работают в научных центрах и университетах по всему миру, а также иностранные коллеги. С материалами юбилейной конференции можно ознакомиться на сайте <https://mineev80.itp.ac.ru>.

Традиционно сотрудники ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН активно привлекаются к участию в программных и организационных комитетах российских и международных конференций. В 2025 г. при таком участии сотрудников института прошли XXIX симпозиум “Нанофизика и наноэлектроника” (Нижний Новгород), Совещание по физике твердого тела (Санкт-Петербург), международная конференция “Fundamental Problems of Superconductivity 2025” (Москва), международная конференция по теоретической физике “Landau Week 2025” (Армения), VI Международная конференция “Газоразрядная плазма и синтез наноструктур” (Казань), конференция “Геометрия, топология и математическая физика” (Москва), X Всероссийская конференция “Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике” (Новосибирск), Международная конференция “Superconducting and Magnetic Hybrid Structures” (Дубна).

В 2025 г. сотрудники института активно представляли свои результаты на

российских и международных научных мероприятиях, в том числе на международной конференции по ускорителям заряженных частиц IPAC’25 (Тайвань), X Международной конференции “Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2025” (Москва), на международной конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC’25 (Санкт-Петербург), конференции Baxter2025 “Celebrating the Life and Achievements of Rodney James Baxter” “Exactly Solved Models and Beyond” (Канада), весенней серии семинаров по актуальным темам в области квантовых полей и струн (Китай), “Correlation Functions of Integrable Lattice Models and Quantum Field Theories” (Германия), “Quantum Theory and Symmetries” (Армения), “Advances in Quantum Field Theory (AQFT’25)” (Дубна), “Integrable systems and quantum theory 2025” (Санкт-Петербург), XL Фортговская международная конференция “Взаимодействие интенсивных потоков энергии с веществом” (Кабардино-Балкария), The 21-th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation (CSCPIER-2025) (Москва), XVII Международной конференции “ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ” (Снежинск), The International Symposium “Fundamentals of Laser Micro- and Nanotechnology (FLAMN-25)” (Санкт-Петербург), 4-ой международной конференции ФКС-2025 “Физика конденсированных состояний” (Черноголовка), Международной конференции “Materials Science and Nanotechnology (MSN-2025)” (Екатеринбург), The 32nd International conference Advanced Laser Technologies ALT 2025 (Казань), конференции “Dynamics in Siberia” (Новосибирск), “Ломоносовские Чтения” (Москва),

The 10th International Conference on Differential and Functional Differential Equations (Москва), V Конференции математических центров России (Красноярск), XXXIV Научной сессии Совета РАН по нелинейной динамике (Москва), XXXVI Всероссийской Школе-семинаре “Волновые явления: физика и применения” имени профессора А. П. Сухорукова (Красновидово), XVI Международная научно-практическая конференция “Пилотируемые полёты в космос” (Звёздный городок), International Conference “Nonlinear Science and Complexity” (Бразилия), Международной конференции “Экстремальные волны в физике и геофизике” (Нижний Новгород), “Theoretical and Applied Aspects of Geophysical Fluid Dynamics” (Москва), “Nonlinear Dynamics and Machine Learning” (Москва - Санкт-Петербург), 16th RASA Conference (США), 5ой Российской конференции “Графен: молекула и 2D кристалл” (Новосибирск), Международной конференции “Superconductivity in Nanostructures” (Казань), Международной конференции “Advanced functional materials for digital and quantum electronics 2025” (Долгопрудный), Международной конференции GRID2025 (Дубна), Международной конференции “Суперкомпьютерные дни в России” (Москва), Международной конференции IUPAP CCR2025 (США), XXII Конференции “Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления” (Москва), Научной конференции “Численное моделирование в механике сплошных сред” 2025 (Долгопрудный), Конференции “Quantum optics and related topics” (Москва), Конференции “Квантовые материалы: физика, открытые вопросы и перспективы” (Санкт-Петербург), “The First Quantum Connections Winter School” (Китай) и др.

3 Образовательная деятельность

Традиционно сотрудники ИТФ им. Л.Д. Ландау активно участвуют в образовательной деятельности. При институте действуют две базовые кафедры: Кафедра “Проблемы теоретической физики (теор- группа Горькова)” Московского Физико-Технического Института и Кафедра теоретической физики факультета физики НИУ Высшая Школа Экономики. Сотрудники института читают лекции и ведут семинары по современным вопросам теоретической физики на этих базовых кафедрах. Все программы курсов являются оригинальными и отражают современный мировой уровень в данной предметной об-

ласти. Дополнительно сотрудники института ведут занятия, в том числе читая оригинальные курсы лекций, со студентами в МФТИ, МГУ, МИСиС, Сколтех, МИФИ.

Летом 2025 г. на базовых кафедрах успешно прошли защиты 7 магистерских дипломов. В 2025 г. в институт был принят 1 аспирант.

В 2025 г. продолжался прием экзаменов по программе теорминимума Ландау. В 2025 г. успешно были сданы экзамены “Математика-1” (10 студентов), “Теория поля” (1 студент) и “Квантовая механика” (6 студентов).

4 СМИ об институте

В 2025 г. усилиями зам. дир. ИТФ Я.В. Фомина, и пресс-секретаря ЛФИ МФТИ В. Луговской был подготовлен материал “60 лет на фронтире теорфизики. К юбилею Института имени Ландау” о базовой кафедре МФТИ в ИТФ “Проблемы теоретической физики (теоргруппа Горькова)”. Этот материал был опубликован в журнале МФТИ ЗА НАУКУ <https://zanauku.mipt.ru/2025/10/27/60-let-na-frontire-teorfiziki-k-yubileyu-instituta-imeni-landau/>. Ниже это интервью приведено в редакции Я. Фомина.

Институту теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук (ИТФ) исполнилось 60 лет. Можно смело сказать, что имя Ландау и названного в его честь института известны всем физикам в мире, как действующим, так и готовящимся ими стать (мимо курса Ландау-Лифшица никто не прошел, по крайней мере, в ведущих физических вузах). На Физтехе ИТФ является базовой организацией (раньше — на ФОПФе, сейчас — в ЛФИ).

Из истории ИТФ – С конца 1930-х и до начала 1960-х годов Лев Давидович Ландау руководил теоретическим отделом в Институте физических проблем (ИФП) в Москве, созданном Петром Леонидовичем Капицей. Всё это время Ландау активно занимался подготовкой учеников, готовых заниматься теоретической физикой. В результате возникла «Школа Ландау», т.е. группа его учеников и сотрудников, которая отличалась чрезвычайно широким спектром теоретических исследований. К началу 1960-х ей стало тесно в ИФП и среди учеников Ландау начала витать идея создания отдельного института. Катализатором этого процесса послужило событие трагическое.

В начале 1962 года Лев Давидович Ландау попал в автомобильную аварию, в результате которой оказался буквально между жизнью и смертью. К «операции» по спасению Ландау подключились многие физики Москвы, Советского союза и всего мира. С их помощью были добы-

ты необходимые редкие лекарства, уникальные медицинские приборы, организованы дежурства в больнице и т.д. В результате врачам удалось сохранить Ландау жизнь, но вернуться к работе он так и не смог.

Процесс организации ИТФ возглавили ученики Ландау И.М. Халатников (который и стал первым директором нового института), А.А. Абрикосов, Л.П. Горьков и И.Е. Дзялошинский. Имя нобелевского лауреата Абрикосова знают все студенты-физики, а многие теоретики знают ещё и книгу по диаграммной технике как раз авторства Абрикосова, Горькова, Дзялошинского, знаменитую АГД. В 1964 году был подписан приказ о создании Института теоретической физики (ИТФ), а в 1965 году ИТФ заработал. Институт был организован в подмосковной Черноголовке. К тому времени в Черноголовке уже существовал академический центр, включавший в себя несколько исследовательских институтов, что предоставляло широкие возможности плодотворного взаимодействия теоретиков ИТФ с физиками-экспериментаторами. Сохранились у ИТФ и «родственные» связи с Институтом физических проблем. После И.М. Халатникова институтом руководили выдающиеся ученые В.Е. Захаров, В.В. Лебедев. В настоящее время директор института — И.В. Колоколов.

Школу Ландау всегда отличала нацеленность на объяснение экспериментальных данных. В то же время теоретическая

физика имеет свою собственную логику развития. Зачастую новые теоретические подходы позволяют получать нетривиальные физические результаты «на кончике пера». Но, следуя заветам отцов-основателей ИТФ, физик-теоретик всегда должен задаваться вопросами: «Как можно вычислить наблюдаемые величины? Можно ли результат вычислений сравнить с экспериментом сейчас или в обозримом будущем?»

Сотрудники института занимаются актуальными вопросами, интересующими учёных в самых разных странах. По многим направлениям работы сотрудников ИТФ формируют повестку научных исследований и определяют мировой уровень теории. У института имеются связи с исследовательскими организациями как на Западе, которые сохранились, несмотря на известные сложности, так и на Востоке, которые интенсивно развиваются. Ключевую роль в этих связях играют личные контакты, возникшие, в частности, во время работы сотрудников ИТФ за рубежом.

Из истории кафедры – С самого начала существования ИТФ созданная в нём научная атмосфера и высокий уровень исследований притягивал физиков-теоретиков из разных институтов страны. Благодаря этому у руководства ИТФ всегда была возможность приглашать в институт ученых высокого уровня. При этом «отцы-основатели» ИТФ прекрасно понимали, что для дальнейшего стабильного пополнения института кадрами необходимо наладить собственную систему подготовки. Были использованы обширные связи Школы Ландау с Физтехом, где с момента его создания преподавал Ландау, а в дальнейшем к преподаванию привлекались многие его ученики. С 1966 года при ИТФ заработала базовая кафедра МФТИ «Проблемы теоретической физики» под руководством Льва Петровича Горькова.

Среди студентов её всегда называли теоргруппой Горькова. В прошлом году этот исторический факт был закреплён в названии кафедры, которая теперь официально носит название «Проблемы теоретической физики (теоргруппа Горькова)».

Л.П. Горьков руководил кафедрой 25 лет. После него заведующими были выдающиеся учёные и талантливые учителя: В.П. Минеев, С.В. Иорданский, М.В. Фейгельман. Сейчас кафедру возглавляет Я.В. Фоминов. Характерная особенность школы Ландау, которая воплотилась в процессе обучения студентов на кафедре – использование наиболее эффективных математических методов для анализа физических явлений из самых разных областей физики, вне зависимости от сложности этих методов.

За время своего существования кафедра выпустила более 250 физиков-теоретиков. Большинство из них защитили кандидатские диссертации в стенах ИТФ, около 40 стали докторами физико-математических наук, В.В. Лебедев (директор Института в 2003-2018 годах), Ю.Г. Махлин и Н.А. Иногамов избраны членами-корреспондентами РАН. А.Я. Мальцев, П.М. Лушников и И.С. Бурмистров избраны профессорами РАН. Выпускники кафедры сделали основополагающие работы во многих областях современной теоретической физики, в том числе в теории сверхпроводимости и сверхтекучести, в теории мезоскопических электронных систем, в точно-решаемых многочастичных моделях статистической физики и др.

Результаты ряда выпускников кафедры стали «именными»: эффект Эдельштейна для веществ со спин-орбитальным взаимодействием, модель спиновой жидкости Китаева, точно решаемая модель Сачдева-Йе-Китаева для сильно коррелированных систем, сила Копнина для квантованных вихрей в сверхпроводя-

щих и сверхтекучих системах, формула Левитова-Лесовика для статистики переноса заряда в мезоскопических проводниках, нелинейная репличная сигма-модель Финкельштейна для взаимодействующих электронов, нелинейная суперсимметричная сигма-модель Ефетова для неупорядоченных систем, инстантоны Коршунова для квантового туннелирования с диссипацией, уравнение Дорохова-Мелло-Перейры-Кумара для квазиодномерных неупорядоченных мезоскопических систем, распределение Дорохова для прозрачностей диффузного проводника, модель Ландау-Бразовского для «голубой фазы» в жидких кристаллах, резонансы Лебеда в органических соединениях.

Кафедра была создана в первую очередь для подготовки молодых физиков-теоретиков для ИТФ. При этом уровень подготовки выпускников кафедры оказался настолько высоким, что они легко находят себе работу по всему миру. В настоящее время выпускники кафедры работают в крупнейших научных центрах и университетах в России и во многих других странах. Они не забывают альма-матер и составляют сообщество единомышленников.

Кафедра и ИТФ сейчас – В последние годы на кафедре студенты и аспиранты готовятся в основном по следующим направлениям: теория сверхпроводимости, теория низкоразмерных систем (квантовые ямы, графен, топологические изоляторы), физика квантовых вычислений, теория неупорядоченных систем, гидродинамика и теория турбулентности, теория нелинейной оптической связи, физика плазмы и лазеров, вычислительная статистическая физика. В целом на кафедре преподают и руководят исследовательской работой студентов и аспирантов около 30 научных сотрудников, аспирантов и магистрантов. В основу учебной программы кафедры заложен универсализм,

который заключается в едином подходе к теоретической физике, воплощенном в знаменитом курсе теоретической физики Ландау-Лифшица. Это позволяет выпускникам кафедры непринужденно переключаться с одной области исследований на другую, что весьма ценится в физическом сообществе.

ИТФ продолжает принимать экзамены теоретического минимума Ландау. Экзамены из полного набора, включающего в себя два математических и девять физических экзаменов, может попробовать сдать любой желающий. Сдавать можно любые отдельные экзамены в любом порядке. Сдача экзамена — это всегда вызов, который позволяет сдающему проверить свои силы в области теоретической физики. Все сдавшие экзамен заносятся в список на сайте «Теоретический минимум Ландау». Этот список — исторический, ведётся с 1933 года, и в нём в числе первых сдавших есть такие великие учёные как Е.М. Лифшиц, И.М. Халатников, А.А. Абрикосов и многие другие. Для кафедры экзамены теорминимума — важный механизм отбора и обучения студентов. Первые экзамены теорминимума (Математика-1 и Механика) помогают попасть на кафедру при распределении в середине 2 курса. А в дальнейшем, при обучении на кафедре, сдача части экзаменов является обязательной.

На кафедре с её основания принят свободный стиль работы и общения — при довольно жёстких требованиях к уровню учебных успехов и научной работы студентов. Каждый студент сам выбирает себе научного руководителя, обычно в начале 4-го курса (можно и раньше, если студентом уже сданы необходимые экзамены теорминимума Ландау). После этого главное, что требуется от студента — активно работать в выбранной им области.

Петр Леонидович Капица когда-то писал в газете «За науку»: «...МФТИ гото-

вит научные кадры, образно говоря, не методом конвейера, а методом штучной обработки». Сейчас это называется индивидуальной образовательной траекторией. Такой подход в полной мере относится к нашей кафедре. Кафедра активно привлекает к преподаванию аспирантов и даже старшекурсников, в результате чего мы имеем возможность устраивать индивидуальную работу со студентами, посещающими наши предметы для младших курсов (еще до распределения по кафедрам). Многие младшекурсники, посещающие такие занятия, имеют возможность индивидуального обсуждения задач с нашими преподавателями и ассистентами. Для младшекурсников раз в два года в ИТФ проходит летняя школа по теоретической физике, где студенты под руководством сотрудников ИТФ и преподавателей кафедры постигают, что это такое — решать новую научную задачу. Ближайшая такая школа пройдет в августе текущего года.

С точки зрения научной траектории у студента в ИТФ имеются широчайшие возможности и большая академическая свобода. Даже в студенческие годы и во время аспирантуры, когда за постановку задач отвечает научный руководитель,

обдуманное предложение студента о возможных направлениях исследований обязательно учитываются. А после защиты диссертации молодой сотрудник института формулирует себе задачи сам, исходя из собственных интересов и научного стиля.

Институт и кафедра – это живой организм, который ищет свои пути в современном мире. ИТФ активно участвует в международной научной жизни, всесторонне используя имеющиеся возможности. Проводятся международные конференции и семинары, ведется совместная работа с зарубежными научными центрами. Многие работающие за рубежом сотрудники продолжают активное сотрудничество с институтом, помогая тем самым становлению молодых ученых и способствуя развитию и укреплению научных связей. Институт приглашает к себе с визитами или на работу коллег из-за рубежа, работает с ними над совместными проектами, пополняется выпускниками кафедры и молодыми учеными из других научных центров страны и мира. Институт и кафедра продолжают активно работать и сохранять традиции отношения к науке, заложенные основателями института, выдающимися физиками-теоретиками, учениками Ландау.

5 Научные результаты

В 2025 г. научные исследования в ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН проводились в рамках нескольких государственных заданий: “Теоретическое исследование новых эффектов в физике конденсированного состояния вещества”, “Квантовые явления в наноструктурах и новых материалах”, “Нелинейные режимы взаимодействия вещества и излучения”, “Хаотическая и регулярная динамика систем гидродинамического типа”, “Квантовая теория поля, теория струн и математическая физика”, “Новые направления в физике сильных взаимодействий, фундаментальных симметрий, релятивистской астрофизике, гравитации и космологии”, “Транспорт в неупорядоченных системах:

от наноструктур до турбулентной атмосферы”, и грантов РФФИ: “Сверхпроводящий диодный эффект”, “Взаимодействие когерентных структур и флуктуаций в гидродинамических системах”, “Теория сверхтоковых состояний в неупорядоченных сверхпроводниках”, “Стохастические структура и динамика в неравновесных процессах физики биополимеров”, “Интегрируемые модели квантовой теории поля и теории струн”.

В 2025 г. ИТФ им. Л.Д. Ландау сохранил лидирующее положение по широкому кругу вопросов в перечисленных выше областях исследований. Более детально с полученными в 2025 г. результатами можно ознакомиться далее.

5.1 Новые эффекты в физике конденсированного состояния вещества

В рамках данной темы в 2025 году проводились исследования в области теории сверхпроводимости, магнетизма, квантовой жидкости, жидких кристаллов, неупорядоченных систем, квантовых вычислений и других вопросов физики конденсированного состояния. Ниже приводятся результаты, полученные в 2025 году.

Динамика амплитудных мод и локализация в неупорядоченных сверхпроводниках

Исследована пространственно-временная динамика коллективной амплитудной моды Шмида-Хиггса (SH) в неупорядоченных s-волновых сверхпроводниках. Проанализирована аналитическая структура восприимчивости SH при нулевой температуре как функции комплексной частоты и найдено, что в грязном пределе когда длина когерентности значительно превышает среднюю длину свободного пробега: (i) отклик SH при фиксированных волновых векторах демонстрирует осцилляции с частотой 2Δ , затухающие со временем как $1/t^2$, где Δ - величина сверхпроводящая щель; (ii) пространственно-временные субдиффузионные колебания с динамическим показателем $z = 4$; и (iii) пространственные колебания на фиксированной частоте затухают экспоненциально, с периодом, который уменьшается по мере приближения частоты к 2Δ сверху. Когда длина когерентности сравнима со средней длиной свободного пробега, появляются дополнительные экспоненциально затухающие колебания на фиксированных волновых векторах с частотой выше 2Δ . Кроме того, показано, что амплитудная коллективная мода индуцирует дополнительный пик в токе генерации третьей гармоники при конечных волновых векторах. Частота этого пика смещена от обычного резонанса на Δ , тем самым обеспечивая однозначную характеристику динамики амплитуды параметра порядка [1]. (И.С. Бурмистров)

Предполагается, что локализация Андерсона приводит к повышению критической температуры неупорядоченных сверхпроводников. Несмотря на огромный объем теоретических работ, основанных на нелинейных сигма-моделях, не хватает экспериментов для понимания физики взаимодействующих электронов в неупорядоченных системах. Исследован монослой олова на кремнии, материал, известный своим антиферромагнитным основным состоянием. Проанализированы статистические свойства карт туннельной проводимости для все более и более локализованных состояний по мере приближения энергии к краю валентной зоны. Используя мультифрактальный анализ, мы показываем, что система следует точному соотношению симметрии, основанному на алгебраической структуре размерностей операторов в нелинейных сигма-моделях. Показано, что в области далекой от края валентной зоны симметричные соотношения выполняются. Показано, что мультифрактальный анализ в равной степени может быть применен к универсальным флуктуациям проводимости в экспериментах по магнитотранспорту, предоставляя, таким образом, мощный инструмент для исследования лежащих в основе симметрий неупорядоченных электронных фаз [2]. (И.С. Бурмистров)

Космологические аналогии и двухжидкостная модель

Аналоги конденсированного состояния полезны для рассмотрения явлений, связанных с квантовым вакуумом. Это связано с тем, что в конденсированном состоянии нам известны физика как в инфракрасном, так и в ультрафиолетовом диапазоне, в то время как в физике элементарных частиц и гравитации физика в транспланковском масштабе неизвестна. Одним из краеугольных камней связей между нерелятивистским конденсированным состоянием и современными релятивистскими теориями является двухжидкостная гидродинамика сверхтекучего гелия. Динамика и термодинамика состояния де Ситтера при расширении Вселенной несут в себе некоторые черты многожидкостной системы. Фактически существуют три компонента: квантовый вакуум, гравитационная компонента и релятивистская материя. Расширяющийся вакуум де Ситтера служит термостатом с локальной температурой, которая вдвое превышает температуру Гиббонса-Хокинга связанную с космологическим горизонтом. Эта локальная температура приводит к нагреванию как материи, так и гравитационной компоненты. Последняя ведет себя как жесткая материя Зельдовича и представляет собой темную материю. В равновесии и в отсутствие обычной материи положительное парциальное давление темной материи компенсирует отрицательное парциальное давление квантового вакуума. Поэтому в состоянии полного равновесия полное давление равно нулю. Это аналогично сверхтекучей и нормальной компонентам в сверхтекучих жидкостях, которые вместе создают нулевое давление жидкости в отсутствие окружающей среды. Мы расширяем этот подход двух темных компонент и предлагаем феноменологическую теорию, которая описывает динамику темной энергии и темной материи. Для этого мы предполагаем, что в динамике гравитационная темная материя ведет себя как настоящая жесткая материя Зельдовича. В этой феноменологической модели обе темные компоненты испытывают степенное затухание из-за обмена энергией между этими компонентами. В результате их значения в настоящее время имеют правильный порядок величины, который соответствует наблюдениям [3]. (Г.Е. Воловик)

Магнитосопротивление и свойства антиферромагнитных металлов

Известно, что слоистые ван-дер-ваальсовы кристаллы топологически нетривиальных и тривиальных полуметаллов с антиферромагнитным (АФМ) упорядочением магнитной подрешетки проявляют отрицательное магнитосопротивление, которое хорошо коррелирует с изменениями намагниченности АФМ в магнитном поле. Этот эффект описан в нескольких экспериментальных исследованиях с EuFe_2As_2 , EuSn_2As_2 , EuSn_2P_2 и др., где сопротивление квадратично уменьшается с полем примерно на 5% вплоть до поля спиновой поляризации. Хотя этот эффект хорошо документирован экспериментально, его теоретическое объяснение отсутствовало до сих пор. В нашей работе предложен механизм, описывающий наблюдаемое магнитосопротивление, присущее АФМ металлам и основанное на нарушении бинарной симметрии. Оно почти изотропно направлениям поля и тока, в отличие от известных механизмов, таких как гигантское магнитосопротивление и хиральная аномалия. Предложенный собственный механизм магнитосопротивления проявляется в широком классе слоистых АФМ-упорядоченных полуметаллов. Теоретически рассчитанное магнитосопротивление качественно согласуется с экспериментальными данными для кристаллов

различного состава [4]. (П.Д. Григорьев)

Мы изучаем влияние несовершенного нестинга в состоянии волны зарядовой плотности (ВЗП) на различные электронные свойства в рамках простой двумерной модели сильной связи. Обсуждаемая модели отражает основные особенности квазиодномерных металлов, в которых возникают ВЗП. Мы показываем, что ВЗП с несовершенным нестингом приводит к необычным сингулярностям в плотности состояний квазичастиц и к степенной перенормировке критической температуры сверхпроводимости. Наши результаты получены при сколь угодно большом антинестинге и могут помочь понять фазовую диаграмму широкого класса сверхпроводников с волнами плотности. Мы также вычисляем тензор проводимости в широком диапазоне температур, включая переход ВЗП, и получаем удовлетворительное согласие с экспериментальными данными по трихалькогенидам редкоземельных металлов и многим другим материалам с ВЗП [5]. (П.Д. Григорьев)

В HoTe_3 обнаружены медленные осцилляции магнетосопротивления, периодические по обратному магнитному полю с частотой 3.4 Тл. Температурная зависимость амплитуды осцилляций близка к экспоненциальной даже при низкой температуре, что может являться следствием наличия мягких мод в системе и позволяет оценить скорость рассеяния электронов на них. В области магнитных полей больше 1 Тл осцилляции удается описать как интерференционные, связанные с наличием расщепления зонной структуры из-за бислойной структуры HoTe_3 . Полученные данные позволили вычислить отношение интегралов перескока между слоями и внутри бислоя, и оценить их величины [6]. (П.Д. Григорьев)

Эффект де Гааза-ван Альфена и отрицательные ионы в гелии

В работе исследуется эффект де Гааза – ван Альфена в двумерных металлах при различных условиях и с произвольной формой уровней Ландау. Мы рассматриваем предел фиксированной электронной плотности и промежуточную ситуацию конечного электронного резервуара. Получена аналитическая формула для намагниченности при постоянной электронной плотности и при произвольной температуре [7]. (П.Д. Григорьев)

В природе существуют только синглетные отрицательные ионы водорода H_s^- с полным электронным спином $S = 0$. Мы предсказываем, что в жидком гелии можно наблюдать также и триплетные ионы H_t^- со спином $S = 1$. Эффект связан с локализацией электрона в гелии в пузырьке радиуса $\approx 2\text{нм}$. Атом водорода H имеет положительный потенциал $\mu_{\text{H}} \approx 34\text{К}$ в жидком гелии, а его энергия в электронном пузырьке меньше: $\varepsilon_{\text{H}} \approx 9\text{К}$. Поэтому поверхность электронного пузырька адсорбирует атом H даже в том случае, когда триплетная длина рассеяния электрона на атоме водорода положительна: $a_t \cong 0.94\text{Å}$, что отвечает отталкиванию электрона от атома. Волновая функция электрона сосредоточена в основном в центре пузырька, а атом H локализован на внутренней стороне его поверхности в слое шириной $\approx 5\text{Å}$. Кроме колебательных, атом водорода в электронном пузырьке имеет и вращательные уровни с характерной энергией $\varepsilon_B \approx 0.07\text{К}$. Триплетные ионы H_t^- можно наблюдать в каплях жидкого гелия после их допирования поляризованными электронами и атомами H . Рассмотрены и

триплетные отрицательные ионы типа Na_t^- , для которых $\mu_A > 0$, а $a_t < 0$. В этом случае реализуется электронный пузырь с атомом Na в его центре. Таким образом, показано, что в жидком гелии можно создать и исследовать такие отрицательные ионы, которые не существуют в вакууме или в обычных условиях. Часто такие отрицательные ионы имеют триплетное основное состояние, которое мы исследовали для ионов химических элементов первого ряда в таблице Менделеева: водород, литий, натрий, калий, цезий. Получены теоретические оценки их энергии и других параметров в жидком гелии [8]. (А.М. Дюгаев, П.Д. Григорьев)

Двумерная коалесценция и жидкие кристаллы

В работе исследована двумерная коалесценция в свободно подвешенных смектических пленках. Были получены пленки с практически линейной границей между двумя областями разной толщины и круглых областей (островков), толщина которых больше толщины окружающей пленки. Исследована коалесценция круглого островка с соседней областью пленки. Дана теоретическая интерпретация обнаруженной эволюции формы островка на разных стадиях коалесценции [9]. (Е.И. Кац)

Изучен так называемый перенос киральности (от малых масштабов к большим). В рамках теории Ландау предложен простой теоретический анализ того, как происходит этот перенос для киральных наклонных спиралеобразных жидких кристаллов. Показано, что знак киральной закрутки наклонной геликоидальной спирали всегда противоположен знаку холестерика, из которого эта наклонная спираль возникает в результате фазового перехода. Физика, лежащая в основе этого соотношения связана с условием ортогональности холестерического директора и векторного параметра порядка наклонной геликоидальной фазы [10]. (Е.И. Кац)

Квазикристаллические потенциалы и их свойства

Был рассмотрен специальный класс квазипериодических потенциалов, возникающих в физике фотонных систем и обладающих вращательной симметрией 8-го порядка. Были проанализированы “скейлинговые” свойства таких потенциалов, а именно, скорость роста их замкнутых линий уровня при приближении к энергии, отвечающей (перколяционному) порогу протекания. Получение оценок на соответствующие скейлинговые индексы позволяет, в частности, провести сравнение таких потенциалов с различными моделями случайных потенциалов на плоскости [11]. (А.Я. Мальцев)

Была рассмотрена задача Новикова об описании линий уровня квазипериодических функций на плоскости для двумерных потенциалов диэдральной симметрии. Потенциалы такого типа играют важную роль во многих двумерных системах, в частности, при описании двумерных квазикристаллов. Во многих задачах при этом возникает необходимость описания геометрии линий уровня таких потенциалов, и, в частности, ее зависимости от уровня энергии. Было показано, что квазипериодические потенциалы описанного типа могут иметь открытые линии уровня лишь на единственном уровне энергии $\epsilon = \epsilon_0$, что также сближает их со случайными потенциалами на плоскости [12]. (А.Я. Мальцев)

Высокотемпературные сверхпроводники и квантовые вычисления

В самосогласованном приближении для обобщенной модели Хаббарда на квадратной решетке, с учетом нелокального взаимодействия фермионов на ближайших узлах, получены аналитические решения уравнений Боголюбова-де Жена, описывающие основное состояние системы с сосуществующими волнами сверхпроводящей (PDW), спиновой (SDW), или зарядовой (CDW) плотности, наблюдаемыми в некоторых высокотемпературных сверхпроводниках. В частности, решение дает ту же периодичность для волн CDW и PDW, а также псевдощель в спектре возбуждений [13]. (С.И. Матвеев)

Предложена модель масштабируемого квантового процессора на основе кубитов с использованием вращательных уровней отдельных ультрахолодных полярных молекул, рассматривая каждую молекулу как кубит или кудит размерности $d = 3, 4, 5$. Вычислительное пространство кодируется в подмножестве вращательных уровней и включает в себя: кодирование кубитов в двухуровневых подпространствах; использование трехуровневых подпространств для включения вспомогательного уровня, который упрощает разложение многокубитных гейтов, таких как гейт Тоффоли; использование четырехуровневых подпространств для кодирования двух кубитов на молекулу; и использование пятиуровневых подпространств для кодирования двух кубитов плюс вспомогательный уровень для упрощенной реализации сложных многокубитных операций. Гейты запутанности между кудитами реализуются посредством перемещения молекул в оптических ловушках, за счет использования диполь-дипольных взаимодействий для обеспечения когерентной связи. Хотя многомерное кодирование вносит дополнительную сложность в эксперименты, оно обеспечивает повышенную гибкость и эффективность выполнения квантовых алгоритмов. Результатом работы является построение универсального набора квантовых гейтов. Проанализированы экспериментальные параметры для реализации модели на дипольных молекулах SrF и RbCs. Рассмотренный подход предлагает многообещающий путь к масштабируемой и универсальной обработке квантовой информации с помощью многоуровневых систем и потенциально может быть реализован [14]. (С.И. Матвеев)

Альтермагнетизм и аномальный эффект Холла

В работе представлено теоретическое описание пьезомагнитных металлов или, как их ныне принято называть, альтермагнетиков в нормальном и сверхпроводящем состоянии. Прослежена аналогия с соответствующим теоретическим описанием для металлов, не обладающих пространственной инверсией. Особое внимание уделено проблеме аномального эффекта Холла и продемонстрировано его отсутствие как в альтермагнитных, так и в нецентросимметричных металлах. Показано, что сверхпроводящее состояние в альтермагнетиках обусловлено спариванием электронов из зон, расщепленных спин-орбитальным взаимодействием, что делает маловероятным существование таких сверхпроводников [15]. (В.П. Минеев)

Фазовая диаграмма давление–температура сверхпроводящего UTe₂ с тремя линиями фазовых переходов второго рода не может быть объяснена в терминах последовательных переходов в сверхпроводящие состояния с понижением симметрии. Задача

решается с использованием двухзонного описания сверхпроводящего состояния UTe_2 [16]. (В.П. Минеев)

Хорошо известно, что аномальный эффект Холла в ферромагнитных и сильно парамагнитных металлах помимо асимметричного рассеяния электронов на примесях определяется кривизной Берри - квантово-механическим свойством электронных состояний идеального кристалла. Однако, экспериментально было установлено, что холловская компонента сопротивления в ферромагнитном соединении URhGe не зависит от кривизны Берри. Кристаллическая симметрия этого вещества включает операцию обращения времени только в сочетании с поворотами и отражениями кристаллической решетки, что характерно для так называемых альтермагнитных материалов. Показано, что строго нулевая кривизна Берри является следствием несимметричной кристаллической симметрии URhGe [17]. (В.П. Минеев)

Статья посвящена 60-летию Института Теоретической Физики имени Л.Д.Ландау и представляет обзор нормальных и сверхпроводящих свойств металлов с тороидальным, альтермагнитным и нецентросимметричным упорядочением. Металлы с тороидальным порядком - это соединения, не обладающие симметрией по отношению к инверсии времени и пространственной инверсии, но симметричные по отношению к произведению этих операций. Электрический ток, протекающий по такому металлу, вызывает его намагничивание. Сверхпроводящие состояния в тороидальных металлах представляют смесь синглетного и триплетного состояний. Щель в спектре элементарных возбуждений отсутствует даже в отсутствие примесей и дефектов решетки. Альтермагнетики - это антиферромагнитные металлы со спиновым расщеплением электронных зон, вызванным нарушением симметрии относительно обращения времени в сочетании с вращениями или отражениями кристаллической решетки. Подобное расщепление зон имеет место в металлах, кристаллическая решетка которых не обладает пространственной инверсией. В металлах такого рода имеет место аномальный эффект Холла. В отличие от нецентральносимметричных металлов в альтермагнетиках протекание тока не вызывает появления намагниченности, но имеется специфический пьезомагнитный эффект Холла. Сверхпроводящее спаривание в нецентросимметричных металлах происходит между электронами из одной зоны, тогда как в альтермагнетиках имеет место межзонное спаривание, что не способствует формированию сверхпроводящего состояния [18]. (В.П. Минеев)

Туннелирование частиц через классически запрещенную область под потенциальным барьером - чисто квантовомеханический эффект, описанный в 1928 году Георгием Гамовым для объяснения конечной вероятности радиоактивного альфа распада ядер. Этот же механизм, связанный с туннелированием куперовских пар, лежит в основе эффекта Джозефсона - без- диссипативного протекания постоянного тока через контакт между двумя сверхпроводниками. Конечное падение напряжения, то есть разрушение сверхпроводящего состояния, возникает при токах больше некоторого критического значения. Возникновение диссипативного режима возможно и при токах меньше критического за счет скачков макроскопической переменной разности фаз сверхпроводящих состояний на контакте, которые происходят как за счет термоактивационного механизма преодоления потенциального барьера, так и за счет квантового подбарьерного туннелирования. Экспериментальные исследования перехода

между этими двумя механизмами в электрической цепи с джозефсоновским контактом были удостоены Нобелевской премии по физике 2025 года [19]. (В.П. Минеев)

Опубликован учебник, представляющий расширенный вариант лекций по физической кинетике, читавшихся автором в разные годы Московском Физико-Техническом Институте в рамках курса теоретической физики. В нём рассмотрены основные методы кинетической теории, а также их простейшие приложения к классическим и квантовым газам, плазме и твёрдым телам [20]. (В.П. Минеев)

Применение машинного обучения к исследованию фазовых переходов

Исследована возможность извлечения характеристик фазовых переходов второго порядка с помощью машинного обучения с переносом. Мы провели машинное обучение для бинарной классификации моментальных снимков распределения спинов изотропной модели Изинга. Двоичная классификация выполняется в ферромагнитной и парамагнитной фазах с использованием известной критической температуры. Обученная сеть используется для прогнозирования того, принадлежит ли снимок, полученный из моделирования с ортогональной анизотропией, к парамагнитной фазе. Используя конечно-мерный анализ вероятности фаз, мы оцениваем критическую температуру и показатель длины корреляции. Это дает нам оценку интервала параметра анизотропии, в котором нейронная сеть может делать правильные оценки [21]. (Л.Н. Щур)

Машинное обучение — это новый инструмент для исследования физических моделей. Одно из возможных применений — изучение фазовых переходов с помощью анализа распределения спинов на регулярных решетках с использованием подхода контролируемого обучения. Новым вопросом является применимость переноса обучения, сети, контролируемой на конкретной модели и используемой для вывода информации о другой модели. Входные данные моделируются с помощью алгоритмов Монте-Карло, а распределение спинов и распределение корреляторов используются для обучения, валидации и тестирования. Для контролируемого обучения используются полностью связанная нейронная сеть (FCNN), сверточная нейронная сеть (CNN) и остаточная нейронная сеть (ResNet). Три двумерные спиновые модели — модель Изинга, 4-состоятельная модель Поттса и модель Бакстера-Ву — используются для оценки критической температуры фазового перехода и экспонент длины корреляции. Основным выводом заключается в том, что перенос обучения зависит от класса универсальности модели, использующей как распределение спинов, так и распределение корреляторов, и поэтому не является устойчивым [22]. (Л.Н. Щур)

Основной вопрос, поднятый в статье, заключается в том, можно ли использовать нейронную сеть, обученную на модели спиновой решетки в одном классе универсальности, для тестирования модели в другом классе универсальности. Нас интересуют такие величины, как критическая температура фазового перехода и показатель длины корреляции. Другими словами, вопрос переноса обучения заключается в том, насколько «универсальна» обученная сеть и при каких условиях. Для этого мы применили процедуру контролируемого обучения к трем двумерным моделям, для которых точно известны критические свойства: модели Изинга, четырехсостоятельной модели

Поттса и модели Бакстера-Ву. Мы рассматриваем два набора данных: один с конфигурациями спина и один с конфигурациями энергии связи. Мы обнаружили, что оценки критической температуры хорошо согласуются с известными результатами для обоих наборов данных, но не с результатами перекрестного тестирования с использованием наборов данных энергии двух моделей: четырехсостоятельной модели Поттса и модели Изинга. Оценки экспоненты критической длины менее регулярны и, по-видимому, более точны для наборов данных энергии. Хорошим примером является перекрестное тестирование с использованием набора данных энергии между моделью Изинга и моделью Бакстера-Ву как в направлении обучения, так и в направлении тестирования [23]. (Л.Н. Щур)

Мы ставим задачу возможности исследования критического поведения систем с фазовым переходом первого порядка с помощью глубокого машинного обучения. Мы предлагаем протокол машинного обучения с тройной классификацией мгновенных конфигураций спина с использованием известных значений энергии неупорядоченной фазы и энергии упорядоченной фазы. Обученная нейронная сеть используется для прогнозирования того, принадлежит ли данная выборка к той или иной фазе вещества. Это позволяет нам впервые оценить вероятность того, что конфигурации с определенной энергией принадлежат упорядоченной фазе, фазе сосуществования и неупорядоченной фазе. На основе этих вероятностей мы получили оценки значений критических энергий и скрытой теплоты для модели Поттса с 10 и 20 компонентами, которая подвергается сильному дискретному переходу. Мы также обнаружили, что вероятности могут отражать геометрические переходы в фазе сосуществования [24]. (Л.Н. Щур)

Список публикаций

- [1] P. A. Nosov, E. S. Andriyakhina, I. S. Burmistrov, Spatially-resolved dynamics of the amplitude Schmid-Higgs mode in disordered superconductors, *Phys. Rev. Lett.* 135, 056001 (2025).
- [2] Mathieu Lizée, Mohammadmehdi Torkzadeh, François Debontridder, Marie Hervé, Christophe Brun, Igor Burmistrov, Tristan Cren, Anderson transition symmetries at the band-edge of a correlated Sn/Si monolayer, *Communications Physics* (2025) 8:474.
- [3] Г. Е. Воловик, От двухжидкостной модели Ландау к Вселенной де Ситтера, *УФН* 195 1137–1156 (2025).
- [4] Pavel D. Grigoriev, Nikita S. Pavlov, Igor A. Nekrasov, Igor R. Shein, Andrey V. Sadakov, Oleg A. Sobolevskiy, Evgeny Maltsev Vladimir M. Pudalov, Universal negative magnetoresistance in antiferromagnetic metals from symmetry breaking of electron wave functions, *Communications Materials* 6, 252 (2025).
- [5] A.V. Tsvetkova, Ya.I. Rodionov, P.D. Grigoriev, Resistivity, density of electronic states, and superconducting transition temperature in density wave compounds with imperfect nesting, *Phys. Rev. B* 111, 205141 (2025).
- [6] С.В. Зайцев-Зотов, П.Д. Григорьев, Д. Воропаева, А.А. Морочо, И.А. Кон, Е. Пашу, А. Хадж-Аззем, П. Монсо, Медленные осцилляции поперечного магнетосопротивления в HoTe_3 , *Письма в ЖЭТФ*, 121(2), 153-159 (2025).
- [7] T. I. Mogilyuk, P. D. Grigoriev, A. A. Morocho, V. O. Favorov, I. Y. Polishchuk, and I. D. Vagner, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 89(10), 1846 (2025).
- [8] А.М. Дюгаев, П.Д. Григорьев, В.Д. Кочев, Е.В. Лебедева, Триpletные отрицательные ионы водорода в жидком гелии, *ЖЭТФ*, 168(2), 196-200 (2025).
- [9] A P. Dolganov, N. Shuravin, V. Dolganov, E. Kats, "Two-dimensional coalescence of circular islands with smectic half-space", *Liquid Crystals*, 1–9 (2025).
- [10] E.I.Kats, Chiral twist-bend liquid crystals, *arXiv:2509.14686v3* (2025).
- [11] А.Я. Мальцев, О скейлинговых свойствах квазикристаллических потенциалов симметрии восьмого порядка, *ЖЭТФ*, 168(2), 222-233 (2025).
- [12] A. Ya. Maltsev, The Novikov problem for dihedral symmetry potentials, *J. Math. Sci.* 294(6), 906 (2025).
- [13] S. I. Matveenko and S. I. Mukhin, Pair density wave solution for a self-consistent model, *Phys. Rev. B* 111, 125155 (2025).

- [14] S. Kh. Muminov, E. O. Kiktenko, A. S. Nikolaeva, D. A. Drozhzhin, S. I. Matveenko, A. K. Fedorov, G. V. Shlyapnikov, Scalable platform for qudit-based quantum computing using polar molecules, arXiv:2508.10850, Physical Review Research на рецензии.
- [15] В.П. Минеев, Альтермагнитные и нецентросимметричные металлы, Письма в ЖЭТФ, 121, 441 (2025).
- [16] В.П. Минеев, Фазовая диаграмма UTe_2 , Письма в ЖЭТФ, 121, 911 (2025).
- [17] В.П. Минеев, URhGe - альтермагнитный ферромагнетик, Письма в ЖЭТФ, 122, 351 (2025).
- [18] В.П. Минеев, Тороидальный, альтермагнитный и нецентросимметричный порядок в металлах, УФН 195, 1221(2025).
- [19] В.П. Минеев, О Нобелевской премии по физике 2025 года, УФН 195, 1232 (2025).
- [20] В.Н. Горелкин, В.П. Минеев, «Кинетика» Учебное издание для вузов. М.: МЦНМО, 2025. 132 с. ISBN 978-5-4439-1880-8
- [21] D.D. Sukhoverkhova, L.N. Shchur, Transfer Machine Learning of an Anisotropic Model, Lobachevskii Journal of Mathematics, 46(1), 528-534 (2025).
- [22] Vladislav Chertentkov, Lev Shchur, Supervised and Transfer Learning for Phase Transition Research, LNCS, Vol. 15406, 434-449 (2025).
- [23] Vladislav Chertentkov, Lev Shchur, Machine learning domain adaptation in spin models with continuous phase transitions, Phys. Rev. E 112, 034104 (2025).
- [24] Diana Sukhoverkhova, Vyacheslav Mozolenko, Lev Shchur, Phase probabilities in first-order transitions using machine learning, Phys. Rev. E 112, 044128 (2025).

5.2 Квантовые явления в наноструктурах и новых материалах

В рамках данной темы в 2025 году проводились исследования в области теории сверхпроводящих пленок, топологических сверхпроводников и майорановских мод, диссипативных квантовых систем, сверхпроводящих гетероструктур и эффектов близости, эффектов Холла, ван-дер-ваальсовых гетероструктур и нечётной вязкости в двумерных системах, а также других вопросов физики конденсированного состояния. Ниже приводятся результаты, полученные в 2025 году.

Спектральные и транспортные свойства сверхпроводящих пленок

Исследовано протекание сверхтекучего тока в сверхпроводящих пленках в присутствии неоднородностей. Работая в окрестности критической температуры и используя модель короткодействующего беспорядка в квадратичном члене функционала Гинзбурга-Ландау, мы развили теорию возмущений по силе неоднородности. Устранение ультрафиолетовых расходимостей, связанных с перенормировкой критической температуры, приводит к хорошо определенной теории, описывающей крупномасштабную физику. При наличии неоднородностей корреляционные функции параметра порядка и сверхтока спадают степенным образом на больших расстояниях, что обусловлено перемешиванием амплитудной и фазовой мод. Величина флуктуаций растет с увеличением среднего тока [1]. (М. А. Скворцов, О. Б. Зуев)

Получено точное решение задачи о термоактивационном барьере для распада сверхтокового состояния в двумерных пленках при токах близких к критическому. Показано, что в этом пределе функционал Гинзбурга-Ландау для комплексного параметра порядка сводится локальному функционалу для одной действительной переменной, связанной с функцией тока. Седловое уравнение для этого функционала является эллиптическим уравнением Буссинеска, которое относится к классу точно интегрируемых. С помощью преобразования Хироты получено точное инстантонное решение и найдена зависимость величины барьера от тока. Использованное приближение нарушается при токах ниже 95% от критического. При токе I_{top} порядка 90% от критического ожидается топологический фазовый переход от инстантона Буссинеска к решению типа вихрь-антивихрь [2]. (М. А. Скворцов, А. В. Польшкин)

Построена полностью микроскопическая теория оптической проводимости неупорядоченного сверхпроводника с постоянным током. Получено общее аналитическое выражение для $\sigma(\omega)$ при произвольной частоте ω , температуре T и постоянном сверхтоке I . Помимо модификации обычной проводимости Маттиса-Бардина, сверхток вносит два новых вклада: связанный с перераспределением квазичастиц и обусловленный возбуждением амплитудной моды (моды Шмида-Хиггса). Аналитически и численно исследованы основные особенности оптической проводимости: пик в ее действительной части и изменение знака мнимой. Оба эффекта становятся более выраженными при увеличении I и уменьшении T . Показано, что низкочастотный отклик определяется процессами неупругой релаксации, которые приводят к гигантскому микроволновому поглощению и подавлению сверхтекучего отклика вблизи критического тока [3]. (М. А. Скворцов, А. В. Польшкин)

Построена теория плазменных колебаний в неупорядоченных сверхпроводниках при произвольных температурах. Исходя из микроскопического описания в рамках кельдышевской сигма-модели, закон дисперсии плазмонов $\omega(q)$ связан с оптической проводимостью $\sigma(\omega, T)$ сверхпроводника, которая, однако, требует аналитического продолжения в нижнюю полуплоскость комплексной частоты. Обнаружено разрывное поведение на сверхпроводящем переходе: скачок как в действительной, так и в мнимой части $\omega(q)$ при критической температуре T_c . При любой температуре ниже T_c плазменная дисперсия обрывается на критическом волновом векторе $q_c(T)$, где плазмоны остаются незатухающими, причём критическая частота $\omega[q_c(T)] \approx 2\Delta(0)$ слабо зависит от температуры. Существенное затухание плазмонов наблюдается лишь в узком интервале температур вблизи T_c , при этом добротность начинает снова расти на больших значениях q [4]. (М. А. Скворцов, Д. К. Карузин)

Исследованы статистические свойства потенциала пиннинга вихрей в тонкой сверхпроводящей плёнке. Неоднородности моделируются функционалом Гинзбурга-Ландау со случайной температурой и короткодействующим гауссовым беспорядком. В приближении жёсткого вихря, применимого для слабого беспорядка, энергетический ландшафт $E(R)$ наследует гауссову статистику неоднородностей. В этом режиме для средней концентрации минимумов получено выражение $1/(6\xi)^2$, указывая на то, что типичное расстояние между соседними минимумами заметно превышает размер ко-ра вихря ξ . Выходя за рамки приближения жёсткого ядра, мы позволяем параметру порядка вихря релаксировать в ответ на неоднородности. В результате статистика потенциала пиннинга становится негауссовой. Вычислены ведущие поправки, обусловленные деформацией ядра, которая приводит к уменьшению плотности минимумов с относительной величиной эффекта пропорциональной $(T_c - T)^{-1/2}$ [5]. (М. А. Скворцов, Н. А. Степанов)

Квантовый эффект Холла: кроссовер между спиновым и целочисленным вариантами

В последнее время вновь возрос интерес к исследованиям критического поведения в спиновом квантовом эффекте Холла, который реализуется в неупорядоченных, невзаимодействующих фермионах с симметрией класса C по классификации Алтланда-Цирнбауэра в двух пространственных измерениях. Спиновый и целочисленный квантовые эффекты Холла являются двумя родственными эффектами и относятся к топологическим фазовым переходам в двумерных электронных системах. Их тесная взаимосвязь позволяет преобразовать спиновый в целочисленный квантовый эффект Холла путем непрерывного увеличения зеемановского магнитного поля, нарушающего $SU(2)$ симметрию. Изучены микроскопические и мезоскопические особенности соответствия объем-границ и судьбы безмассовых краевых возбуждений и объемных топологических (инстантоны) возбуждений при таком кроссовере в топологических сверхпроводниках. Предложена возможная экспериментальная проверка нашей теории [6]. (М.В. Парфенов, И.С. Бурмистров)

Взаимодействие скирмионов и сверхпроводящих вихрей

Представлен обзор недавних работ, выполненных в Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, по изучению влияния сверхпроводящего вихря на форму и

положение скирмионов типа Нееля в гетероструктурах сверхпроводник—киральный ферромагнетик. На основе аналитических и численных подходов предсказан ряд эффектов, вызванных неоднородным магнитным полем вихря: значительное увеличение радиуса или изменение киральности скирмиона в случае соосного расположения вихря и скирмиона, модификация формы скирмиона в случае эксцентрической конфигурации. Обсуждаются недавние эксперименты по изучению рассматриваемых эффектов [7]. (С.С. Апостолов, И.С. Бурмистров)

Топологические сверхпроводники и майорановские моды

Рассматривается интерферометр на основе киральных майорановских и дираковских мод в гибридном джозефсоновском контакте сверхпроводник/ферромагнетик/сверхпроводник на поверхности топологического материала. Такие одномерные киральные моды участвуют в переносе джозефсоновского тока, что приводит к необычному ток-фазовому соотношению. На ток оказывают влияние доменные стенки в магнитной прослойке. Показано, что сверхток зависит от расстояния между доменными стенками, а с другой стороны, он определяет взаимодействие между стенками и, как следствие, динамику магнитного слоя [8]. (К. Е. Турышев, Ю. Г. Махлин)

В недавних экспериментах с планарными джозефсоновскими контактами сверхпроводник-топологический изолятор-сверхпроводник, в том числе в кольцевой геометрии, был обнаружен конечный джозефсоновский ток при целочисленном магнитном потоке. Эти наблюдения обсуждались в связи с майорановскими нулевыми модами на джозефсоновских вихрях в таких контактах. Предложено объяснение этих результатов, связывающее их с неоднородностями в контакте. В пределе, когда низко-энергетические уровни, локализованные на соседних вихрях, не перекрываются, конечный ток может быть вызван неоднородностями, например, в ширине контакта или распределении химического потенциала. При этом при низких температурах основной вклад в ток дают связанные состояния с низкой, но ненулевой энергией. Предложены методы исследования этих состояний, основанные на микроволновой спектроскопии и особых правилах отбора для переходов между связанными состояниями [9]. (Ю. Г. Махлин)

Исследовано влияние зеемановского расщепления на возбуждения с нулевой энергией, локализованные в вихрях и на углах, в двумерном топологическом сверхпроводнике второго порядка. Аналитически и численно показано, что вихревые моды с нулевой энергией устойчивы к воздействию магнитного поля до тех пор, пока сверхпроводящая щель в объеме открыта. С другой стороны, пары майорановских крамерсовских состояний, существующие на каждом углу квадратной решетки при нулевом поле и защищенные симметрией относительно обращения времени, в общем случае расщепляются под действием поля. Основываясь на расчетах знака дираковской массы, индуцированной сверхпроводящим спариванием, для краевых состояний в фазе топологического изолятора, мы также обнаружили специфический набор параметров модели, который поддерживает пары угловых майорановских мод с нулевой энергией в присутствии магнитного поля. В этом параметрическом режиме нулевые угловые моды могут сосуществовать с соответствующими вихревыми. Предвестником такого

сосуществования является бесщелевой объемный спектр с дираковскими конусами в нормальном (несверхпроводящем) состоянии [10]. (С.В. Аксенов)

Диссипативные квантовые системы

В рамках квантового полевого подхода, описывающего эволюцию квадратичного лиувиллиана в базисе когерентных состояний на контуре Келдыша, исследованы спектральные и транспортные свойства диссипативной сверхпроводящей системы, связанной с нормальными ферми-резервуарами (контактами). Выведено обобщение формулы Меира-Вингринга и матрицы Онсагера для сверхпроводящей системы, связанной с произвольным количеством фермиевских бань. В соответствии с правилом Кирхгофа, получено выражение, описывающее ток потерь, индуцированный диссипацией, и сформулированы модифицированные квантовые кинетические уравнения. Для широкозонных контактов, локально связанных с отдельными узлами, обнаружено, что каждый контакт уменьшает кратность вырождения неравновесного стационарного состояния на единицу. Эти результаты были численно подтверждены при рассмотрении расширенной цепочки Китаева в симметричных точках, связанной с одним контактом. Кроме того, в режиме линейного отклика при низких температурах продемонстрировано, что (не)вырожденные неравновесные стационарные состояния соответствуют (не)квантованным пикам кондуктанса при нулевом напряжении. Рассмотрение проблемы резонансного транспорта через майорановскую моду цепочки Китаева показало, что диссипация приводит к подавлению пика при нулевом смещении и его асимметрию [11]. (С.В. Аксенов, И.С. Бурмистров)

Сверхпроводящие гетероструктуры и эффекты близости

Проведен теоретический анализ недавних экспериментов, выполненных в Казанском физико-техническом институте им. Е.К.Завойского РАН. В эксперименте были исследованы структуры сверхпроводящего спинового клапана (ССК) $\text{Fe}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Pb}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Fe}$ (где Si_3N_4 представляет собой диэлектрический изолирующий слой контролируемой толщины). Изучалась зависимость величины эффекта ССК от толщин сверхпроводящего (S) и изолирующего (I) слоев. Оптимизация толщин S и I слоев позволила осуществить полное переключение между нормальным и сверхпроводящим состояниями при изменении взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных (F) слоев с антипараллельной на параллельную с максимальным значением эффекта ССК, равным 0.36 K. Эти результаты демонстрируют, что структуры ССК с регулируемой прозрачностью S/F-границы, контролируемой с помощью изолирующих прослоек, являются перспективными для достижения значительной величины эффекта. Для объяснения полученных результатов нами была использована теория, учитывающая произвольные направления обменных полей F слоев и произвольные параметры границ в рамках квазиклассической теории сверхпроводимости в диффузном пределе. Необходимым элементом теории является учет триплетного эффекта близости. Теория качественно объясняет полученные экспериментальные результаты. В частности, для структур с сильным подавлением сверхпроводимости в пределе идеальных границ теоретически подтверждено, что должно наблюдаться немонотонное поведение эффекта ССК с ростом сопротивления границы [12]. (Я.В. Фоминов)

Исследованы ступеньки Шапиро — участки постоянного напряжения на вольт-амперной характеристике джозефсоновского контакта, которые появляются в результате синхронизации частоты внутренней динамики сверхпроводящей фазы джозефсоновского контакта с частотой внешнего сигнала. С математической точки зрения этот эффект фазовой синхронизации описывается резистивной моделью джозефсоновского контакта (RSJ), являющейся важным примером нелинейной динамической системы. В стандартной резистивной модели рассматривается джозефсоновский контакт с малой ёмкостью и синусоидальным (содержащим одну джозефсоновскую гармонику) ток-фазовым соотношением в режиме заданного тока с монохроматической переменной компонентой. Хотя данная модель предсказывает возникновение только целых ступенек Шапиро, известно, что учёт высших джозефсоновских гармоник приводит к появлению дробных ступенек. Наш результат состоит в том, что всего двух джозефсоновских гармоник в ток-фазовом соотношении достаточно для возникновения всех возможных дробных ступенек Шапиро в рамках резистивной модели. Используя методы теории возмущений, мы анализируем амплитуды этих дробных ступенек. Кроме того, вводя фазовый сдвиг между двумя джозефсоновскими гармониками, мы демонстрируем асимметрию между положительными и отрицательными дробными ступеньками — характерный признак джозефсоновского диодного эффекта [13]. (Я.В. Фоминов)

Бислой сверхпроводник/альтермагнетик с беспорядком

Начиная с микроскопической теории Горькова, изучено влияние беспорядка на сверхпроводящий фазовый переход в сверхпроводяще-альтермагнитных (S/AM) двухслойных структурах, где связь между слоями реализуется за счет эффекта близости. Потенциальное рассеяние на точечных примесях приводит к сильному увеличению критической температуры сверхпроводимости (T_c) из-за усреднения зависящего от импульса обменного поля, индуцируемого альтермагнитным слоем. В присутствии магнитных примесей значение T_c может даже стать немонотонной функцией концентрации примесей из-за взаимодействия между немагнитными и магнитными механизмами рассеяния. Экспериментальное наблюдение таких необычных эффектов влияния беспорядка на сверхпроводимость может облегчить обнаружение альтермагнитного упорядочения и использование S/AM структур в сверхпроводящей спинтронике [16]. (М.М. Васякин)

Ван-дер-ваальсовы гетероструктуры и неупорядоченные двумерные системы

В работе изучается взаимодействие между сверхпроводящим и сегнетоэлектрическим параметром порядка в ван-дер-ваальсовых структурах в рамках феноменологической модели бислоя, предполагающей наличие межслоевого сверхпроводящего спаривания и туннелирования между слоями. Присутствие спонтанной сегнетоэлектрической поляризации, перпендикулярной слоям, учитывается через относительный сдвиг энергетических зон электронов в разных слоях. Для ступенчатого сдвига зон, моделирующего границу между двумя противоположно поляризованными доменами, продемонстрирована возможность образования локализованных сверхпроводящих состояний при температурах превышающих критическую температуру возникновения однородной сверхпроводимости. Показано, что учёт туннелирования между

слоями приводит к подавлению локализованных состояний для синглетной спиновой структуры параметра порядка. В случае триплетной структуры обнаружено, что туннелирование подавляет как локализованную, так и однородную сверхпроводимость. Также исследуется влияние внешнего магнитного поля, параллельного слоям структуры, на однородные сверхпроводящие состояния с триплетной и синглетной спиновой структурой. Продемонстрировано, что орбитальный эффект поля приводит к подавлению туннелирования между слоями и, как следствие, росту критической температуры в триплетном случае. Показано, что парамагнитный эффект может приводить к появлению возвратных сверхпроводящих фаз, а также анизотропии критического поля в случае триплетного параметра порядка. Обсуждается совместное влияние орбитального и парамагнитного эффектов магнитного поля [14]. (Д.С. Анненков)

Гидродинамические свойства двумерных электронных систем

Разработана микроскопическая теория нечётной вязкости в двумерных электронных системах с плавным беспорядком и спин-орбитальным взаимодействием. Показано, что спин-орбитальное рассеяние приводит к появлению недиагональной компоненты тензора вязкости. Выведены гидродинамические уравнения для спиновых и электрических токов для электронов, взаимодействующих с плавным беспорядком. Рассчитан вклад нечётной вязкости в аномальный эффект Холла [15]. (Д.С. Загробян)

Аномальный эффект Холла в антиферромагнетиках

В работе [17] построена простая теоретическая модель коллинеарного, скомпенсированного, металлического антиферромагнетика, в котором симметрия кристаллической решетки может контролироваться немагнитным атомом. Такая система толком никем не изучалась. В зависимости от расположения немагнитного атома были получены две фазы: фаза антиферромагнетика с зеркальной симметрией и ферромагнетика. У первой невозможно существование инварианта Дзялошинского, однако, возможен аномальный спиновый эффект Холла. У ферромагнетика отсутствует симметрия между магнитными подрешетками и есть инвариант Дзялошинского, который и отвечает аномальному эффекту Холла. Был выявлен механизм аномального эффекта Холла: спин-импульсное расщепление электронов проводимости за счёт взаимодействия с Неелевским порядком и немагнитным атомом, и созданное немагнитным атомом спин-орбитальное взаимодействие. Работа [18] обобщила работу [17] на случай диэлектрического антиферромагнетика. Возможно, обе работы надо было объединить в одну, но так получилось во времени, что идея про магноны пришла гораздо позже. В работе [18] изучался тепловой эффект Холла магнонов. Из нового: было показано, что взаимодействие Дзялошинского–Мории приводит к расщеплению антиферромагнитных магнитных мод в Γ -точке. По сути это взаимодействие является калибровочным потенциалом для магнонов. Это взаимодействие и отвечает тепловому эффекту Холла в ферромагнитной фазе. Было предложено управлять тепловым эффектом Холла магнонов внешним электрическим полем в случае, когда система допускает существование дипольного момента в элементарной ячейке [17, 18]. (В.А. Зюзин)

Работа [19] на основе простых двумерных моделей систематизировала все возможные коллинеарные антиферромагнетики, которые допускают существования аномального эффекта Холла. Это ферромагнетики и слабые ферромагнетики Дзялошин-

ского. Для всех моделей был изучен инвариант Дзялошинского и посчитана кривизна Берри, которая по сути и есть орбитальная намагниченность электронов проводимости. И инвариант, и фаза Берри были показаны соответствующими друг другу. В работе был понят механизм аномального эффекта Холла — это спин-импульсное расщепление электронов проводимости и спин-орбитальное взаимодействие. Оба слагаемых созданы немагнитными атомами и соответствуют тем нарушенным симметриям, которые позволили инвариант Дзялошинского в системе. То есть не каждая спин-орбита будет давать орбитальную намагниченность. В работе также [19] был рассмотрен трехмерный антиферромагнетик на решетке рутила [19]. (В.А. Зюзин)

В работе [20] изучался вопрос о том, как ещё можно получить спиновое расщепление электронов проводимости в антиферромагнетике. Показано, что, если электроны проводимости и локализованные спины Неелевского порядка расположены на разных узлах, то обменное взаимодействие будет спин-импульсным за счёт виртуальных прыжков электронов проводимости через узлы с локализованными спинами. Показано, что для неколлинеарного антиферромагнитного порядка такое взаимодействие очень похоже на спин-орбитальное взаимодействие Рашбы, которое тем не менее нарушает симметрию по отношению к обращению времени. Было показано, что такое взаимодействие ведёт к Дираковским точкам в спектре. Дополнительный ферромагнитный момент открывает щель в этих Дираковских точках, делая систему топологической. Как результат мы аналитически изучили аномальный эффект Холла в ферромагнетике с неколлинеарным антиферромагнитным порядком. Эффект не нуждался в спин-орбите и не квантовался, не смотря на открывание щели и существования киральных краевых мод [20]. (В.А. Зюзин)

Список публикаций

- [1] Mikhail A. Skvortsov, Oleg B. Zuev, and Dina I. Fazlizhanova, Supercurrent flow in inhomogeneous superconductors, *Physical Review B* 111, 144510 (2025).
- [2] Mikhail A. Skvortsov, Artem V. Polkin, Thermal phase slips in superconducting films, arXiv:2506.18130 [cond-mat.supr-con].
- [3] A. V. Polkin and M. A. Skvortsov, Optical conductivity of a dirty current-carrying superconductor, arXiv:2512.06943.
- [4] D. K. Karuzin and M. A. Skvortsov, Plasmon excitations and their attenuation in dirty superconductors, arXiv:2511.23431.
- [5] M. S. Kniazev, N. A. Stepanov, and M. A. Skvortsov, Statistics of the vortex pinning potential in superconducting films, arXiv:2512.11780.
- [6] M. V. Parfenov, I. S. Burmistrov, Bulk-edge correspondence at the spin-to-integer quantum Hall effect crossover in topological superconductors, *Phys. Rev. B* 112, L161407 (2025).
- [7] S. S. Apostoloff, E. S. Andriyakhina, I. S. Burmistrov, “The Effect of Pearl Vortices on the Shape and Position of Néel-Type Skyrmions in Superconductor-Chiral Ferromagnet Heterostructures” (Влияние вихрей Пирла на форму и положение скирмионов типа Нееля в гетероструктурах сверхпроводник — киральный ферромагнетик), *УФН* 195, 1157 (2025).
- [8] К. Е. Турышев, Ю. Г. Махлин, Взаимное влияние доменных стенок и сверхтока в топологическом джозефсоновском контакте, *Письма в ЖЭТФ* 121, 57 (2025).
- [9] K. Piasotski, O. Lesser, A. Reich, P. Ostrovsky, E. Grosfeld, Yu. Makhlin, Y. Oreg, A. Shnirman, Current flow in topological insulator Josephson junctions due to imperfections, *Phys. Rev. B* 111, 174527 (2025).
- [10] S.A.O. Zlotnikov, A.D. Fedoseev, S.V. Aksenov, Zeeman field effect on zero-energy vortex and corner modes in a two dimensional second-order topological superconductor, *J. Supercond. Nov. Magn.* 39, 5 (2026).
- [11] S.V. Aksenov, M.S. Shustin, and I.S. Burmistrov, Controlling Quantum Transport in a Superconducting Device via Dissipative Baths, *Phys. Rev. B* на рецензии; arxiv:2511.07196.
- [12] A. A. Kamashev, N. N. Garif'yanov, A. A. Validov, A. S. Osin, Ya. V. Fominov, I. A. Garifullin, Superconducting spin valve effect in Fe/Si₃N₄/Pb/Si₃N₄/Fe heterostructures, *Phys. Rev. B* 112, 134509 (2025).

- [13] Pavel N. Tsarev, Yakov V. Fominov, All fractional Shapiro steps in the RSJ model with two Josephson harmonics, *SciPost Phys.* 19, 148 (2025).
- [14] D. S. Annenkov, A. A. Kopasov, and A. S. Mel'nikov, Interplay of ferroelectricity and interlayer superconductivity in van der Waals bilayers, *Phys. Rev. B* 112, 224521 (2025).
- [15] D.S. Zohrabyan, M.M. Glazov, Odd viscosity and anomalous Hall effect in two dimensional electron systems with smooth disorder, arXiv:2512.06451.
- [16] M.M. Vasiakin, A.S. Mel'nikov, Disorder-enhanced superconductivity in altermagnet-superconductor hybrids, *Phys. Rev. B* 111, L100502 (2025).
- [17] V.A. Zyuzin, Metallic collinear antiferromagnets with mirror-symmetric and asymmetric spin-splittings, *Phys. Rev. B* 112, 165104 (2025).
- [18] V.A. Zyuzin, Magnon thermal Hall effect in collinear ferrimagnets, *Phys. Rev. B* на рецензии; arXiv:2505.22317.
- [19] V.P. Golubinskii and V.A. Zyuzin, Anomalous Hall effect in metallic collinear antiferromagnets, *Письма в ЖЭТФ* на рецензии; arXiv:2511.02787.
- [20] V.A. Zyuzin, Ferromagnet with a non-collinear antiferromagnetic order and anomalous Hall effect, *Phys. Rev. B* принята; arXiv:2509.22266.

5.3 Нелинейные режимы взаимодействия вещества и излучения

В рамках данной темы в 2025 году проводились исследования в области распространения оптических сигналов в волокнах, лазерного воздействия на материалы, свойств тонких пленок, формирования наноструктур, спектральных свойств рассеивателей и интегрируемых моделей нелинейных волновых процессов. Ниже приводятся результаты, полученные в 2025 году.

Численное моделирование в нелинейной волоконной оптике

Предложен новый численный метод для моделирования распространения оптического сигнала в рамках нелинейного уравнения Шредингера. Метод основан на гамильтоновом формализме и каноническом преобразовании. Разработан и реализован численный алгоритм. Исследована (аналитически и численно) область применимости алгоритма и показано его преимущество по сравнению с существующими алгоритмами. Диссипация также может быть включена. Исследована эволюция различных волновых полей, распространяющихся в оптоволокне [1]. (А.И. Дьяченко)

Аномальное пропускание света пленками никеля

Технологии, связанные с ультратонкими пленками, имеют важное значение для микроэлектроники. В этой связи много внимания обращают на механические и оптические свойства пленок. В работе исследованы пленки никеля на подложке из стекла. Обнаружен неожиданный эффект прозрачности пленок для света с пропусканием 1–10% падающего излучения. При этом пленки, во-первых, имеют толщину достаточно большую по сравнению с толщиной скин-слоя 12–13 нм (поэтому такое пропускание названо аномальным), во-вторых, сохраняют свои упругие механические характеристики, которые не отличаются от свойств абсолютно однородных пленок с фиксированной толщиной. Соответственно, наши пленки действуют стандартно в качестве акустических резонаторов и в качестве излучателей акустических волн в подложку (трансдьюсеров). Аномальное пропускание света объясняется неоднородной структурой пленки. При этом пропускание света позволяет видеть через пленку бриллюэновские интерференционные осцилляции, связанные с распространением акустических волн в подложке [2, 3]. Впервые развит гибридный подход, позволяющий комбинировать двухтемпературную гидродинамику и электродинамику. В результате найдена не только амплитуда Бриллюэновских осцилляций, но и впервые определена фаза этих осцилляций [3]. (Ю.В. Петров, В.А. Хохлов, Н.А. Иногамов)

Лазерное термоциклирование поверхности меди

Исследованы механизмы формирования поверхностного рельефа на объемных образцах меди при воздействии лазерных импульсов (длительность 10 нс, длина волны 355 нм) в доабляционном режиме. Экспериментально установлено, что в процессе облучения при плотностях энергии 0.60–1.05 Дж/см² на поверхности образцов в локальных областях вблизи границ зерен формируется характерная система выступов/впадин, высота/глубина которых достигает 500 нм. Методами оптической профилометрии, конфокальной сканирующей лазерной микроскопии и просвечивающей

электронной микроскопии установлена деформационная природа формирующегося рельефа. При этом в тонком приповерхностном слое вблизи границ зерен обнаруживаются следы развития пластической деформации: наноразмерные двойниковые пластины, дислокации и малоугловые дислокационные границы. Молекулярно-динамическое моделирование показало, что основной физической причиной развития рассматриваемого рельефа является анизотропия теплового расширения различных ориентированных зерен (кристаллитов) при циклическом нагреве до предплавильных температур. Установлено, что термомеханические напряжения, возникающие в приповерхностном слое, превышают предел текучести материала, что приводит к необратимой пластической деформации. Показано накопление структурных изменений с ростом как плотности энергии, так и числа импульсов. Полученные результаты важны для понимания механизмов деградации структуры металлов при циклическом импульсном термомеханическом нагружении и могут быть использованы, в частности, для разработки методов повышения эксплуатационной стойкости металлооптики [4, 5]. (Ю.В. Петров, Н.А. Иногамов, В.А. Хохлов)

Формирование наноканалов рентгеновским лазером

Недавние исследования и разработки в области формирования наноразмерных каналов как центрального компонента наножидкостных систем биочипов произвели революцию в области биологии и химии. Исследование новых путей формирования наноканалов становится все более необходимым для создания аналитических инструментов нового поколения с точным контролем расхода жидкости, высокой селективностью и увеличенным массовым расходом. В работе демонстрируется, что один импульс рентгеновского лазера на свободных электронах с энергией 9 кэВ может сформировать наноразмерную полость длиной в миллиметр в LiF. Создаваемое лазером ударное давление приводит к образованию канала с соотношением длины к диаметру >1000 . Образование пустот анализируется с помощью континуального и атомистического моделирования, выявляющего последовательность процессов, приводящих к окончательной структуре длинной полости. Эта работа представляет собой первое, насколько нам известно, исследование формирования наноканалов длиной в миллиметр с помощью одиночного импульса рентгеновского лазера на свободных электронах высокой яркости. Рентгеновский лазер на свободных электронах с частотой следования МГц открывает новые возможности для разработки лабораторных приложений на кристалле в любых материалах, в том числе непрозрачных для оптических лазеров [6]. (Ю.В. Петров, В.А. Хохлов, Н.А. Иногамов)

Управляемые плазмонные резонансы для оптической сенсорики

Мы исследовали оптические свойства регулярной решётки плазмонных наноплазмонных антенн, выполненных в виде субволновых металлических сферических частиц, частично погружённых в металлическую подложку с полым зазором между частицами и подложкой. Используя золото — характерный плазмонный материал — для изготовления частиц и подложки, мы показали, что решётка наноплазмонных антенн обладает двумя различными резонансами, которыми можно управлять, изменяя параметры отдельных наноплазмонных антенн и период решётки. Особое внимание уделено сценарию, в котором эти два резонанса перекрываются, что приводит к появлению асимметричной резонанс-

ной особенности Фано-типа в спектре отражения решётки. Рассмотрена возможность использования исследуемой решётки наноантенн для рефрактометрических измерений. Помимо рефрактометрии, результаты, полученные в данной работе, могут найти применение при создании новых функциональных элементов нанофотоники для концентрации, усиления и перераспределения электромагнитного поля. [7]. (Н.А. Иногамов)

Прозрачные рассеиватели и энергии частичной прозрачности

В последнее время большой интерес вызывает задача об энергиях частичной прозрачности (transmission eigenvalues) для волновых задач рассеяния – энергиях, при которых можно так подобрать приходящую из бесконечности волну, чтобы отсутствовала рассеянная волна, и, в частности, объект не отбрасывал тени. Это условие значительно слабее условия прозрачности на данной энергии (рассеянная волна отсутствует для любой приходящей). Другими словами, для данных энергий оператор рассеяния минус тождественный имеет ненулевое ядро. Известно, что если потенциал гладкий и финитный, то уровни частичной прозрачности образуют дискретное множество и имеют конечную кратность, однако этот результат несколько искусственный, поскольку, как ранее показали авторы, существуют потенциалы (по крайней мере в размерности 2), убывающие быстрее любой степени расстояния и прозрачные при одной энергии (т.е. данный уровень частичной прозрачности имеет бесконечную кратность). Также, при добавлении точечного рассеивателя типа Бете-Пайерлса-Ферми кратность энергии частичной прозрачности изменяется не более чем на 1. В данном тексте приведен обзор наших результатов [8]. (П.Г. Гриневич)

РТ-симметричные операторы Шредингера

В последнее время публикуется большое число работ, посвященных изучению РТ-симметричных операторов и интегрируемых уравнений. В конечнозонной теории одномерного оператора Шредингера есть два подхода: 1) Подход Матвеева-Итса, основанный на теории тета-функций Римана и 2) подход Дубровина, использующий динамику дивизоров. Недавно Тайманов написал работу, в которой проведена характеристика РТ-симметричных операторов Шредингера в рамках первого подхода. В данной работе мы описываем спектральные кривые и динамику дивизоров в приближении первого порядка. Оказывается, что в данном приближении резонансные точки невозмущенной кривой распадаются либо на пары вещественных, либо на пары комплексно сопряженных, а дивизоры двигаются по эллипсам с фокусами в этих точках [9]. (П.Г. Гриневич)

Конечнозонное интегрирование и дивизоры Дубровина-Натансона

Классические работы по конечнозонному интегрированию уравнения Кортевега-де Фриза можно интерпретировать следующим образом. На спектральной кривой имеется g конечных циклов, на каждом из которых имеется ноль волновой функции, т.е. g точек, каждая на своей окружности. Получающийся тор есть в точности тор Ливилля, линеаризующие движение координаты вводятся через преобразование Абеля. При переходе к вырожденным кривым, отвечающим многосолитонным решениям,

возникает необходимость уточнить понятие дивизора, при этом возникают разрешения особенностей. Нами показано, что для случая так называемых ММ-кривых и дивизоров Дубровина-Натансона на них, отвечающих вещественным регулярным многосолитонным решениям уравнения КП-2, при дополнительном предположении, что все клетки соответствующей диаграммы Юнга заполнены (случай не слишком сильно вырожденных клеток), достаточно произвести разрешения особенностей двух простейших типов, и многообразие дивизоров описывается достаточно просто [10]. (П.Г. Гриневич)

Циркулярно поляризованные оптические солитоны и вихри

Для векторного уравнения типа ротор-ротор, описывающего монохроматическую световую волну в керровской среде, исследована точная подстановка, приводящая к системе четырех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка для функций от поперечной радиальной координаты. В системе фигурирует целое число m – кратность вихря в продольной компоненте электрического поля. При этом $(m-1)$ – кратность вихря в волне левой круговой поляризации, $(m+1)$ – в волне правой поляризации. С $|m| = 1$ численные решения этой системы с подходящими краевыми условиями позволяют получить полную информацию о внутреннем строении сильно нелинейного, циркулярно поляризованного оптического пучка в фокусирующей среде, с учетом продольной компоненты поля и небольшой доли противоположной поляризации. При $m = 0$ для дефокусирующей среды имеется решение в виде левозакрученного вихря в лево-поляризованной волне, которое качественно отличается от правого вихря в левой волне при $m = 2$ [11]. (В. П. Рубан)

Узкие световые пучки с линейной поляризацией

В рамках векторного уравнения типа ротор-ротор, описывающего монохроматическую световую волну в фокусирующей керровской среде, численно с большой точностью найдена поперечная структура предельно узких самосфокусированных оптических пучков, имеющих линейную поляризацию. Для таких двумерных пространственных солитонов при их ширине всего около одной длины волны существенны все три компоненты электрического поля. Поскольку солитоны являются «седловыми точками» некоторого функционала, использованный здесь численный метод представляет собой релаксационную процедуру, в которой по устойчивым модам происходит минимизация, а по большинству неустойчивых мод – максимизация функционала. Единственная оставшаяся при этом неустойчивая мода общей амплитуды стабилизируется фиксацией потока энергии через поперечное сечение пучка [12]. (В. П. Рубан)

Нелинейная гидродинамика и волны

Путем численного моделирования точных уравнений движения (в конформных переменных) для плоских нестационарных потенциальных течений идеальной жидкости со свободной поверхностью над сильно неоднородным профилем дна обнаружен эффект нелинейного сжатия длинного волнового пакета при его брэгговском отражении от участка с плавно нарастающей высотой периодически расположенных барьеров. При этом образуется короткий и высокий пакет стоячих волн с резкими гребнями, который затем трансформируется в обратную волну. Существенно, что по ча-

стоте падающей волны эффект максимален не в середине обусловленной барьерами спектральной щели, а ближе к ее верхнему краю, когда прямая волна успевает проникнуть достаточно далеко в рассеивающую область и там, вместе с возникшей обратной волной, сформировать на некоторое время подобие брэгговского солитона [13]. (В. П. Рубан)

Список публикаций

- [1] S. Dremov, D. Kachulin, I. Chekhovskoy, O. Sidelnikov, A. Redyuk, A. Dyachenko, Applying Canonical Transformations to Nonlinear Schrödinger Equation for Modeling Fiber Optic Communications, *Physica D: Nonlinear Phenomena* 486, 135049 (2026).
- [2] Ю.В. Петров, С.А. Ромашевский, А.В. Дышлюк, В.А. Хохлов, Е.М. Еганова, М.В. Поляков, С.А. Евлашин, С.И. Ашитков, О.Б. Витрик, Н.А. Иногамов, Аномальное пропускание света оптически толстыми пленками никеля, являющимися оптоакустическими трансдьюсерами, *ЖЭТФ*, 167(5), 645-671 (2025).
- [3] А.В. Дышлюк, С.А. Ромашевский, Ю.В. Петров, В.А. Хохлов, О.Б. Витрик, Н. А. Иногамов, Моделирование бриллюэновских осцилляций, порожденных метаматериалом на основе наноструктурированной пленки никеля, *Письма в ЖЭТФ принята*, том 123, номер 3.
- [4] И.В. Неласов, С.С. Манохин, Ю.Р. Колобов, В.В. Жаховский, Е.А. Перов, Ю.В. Петров, Ю.В. Хомич, Т.В. Малинский, Н.А. Иногамов, В.Е. Рогалин, Эволюция микроструктуры приповерхностного слоя меди при термоциклировании лазерными импульсами наносекундной длительности, *ЖЭТФ* 167(6), 782-797 (2025).
- [5] В.Е. Рогалин, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, Ю.Р. Колобов, С.С. Манохин, Т.В. Малинский, И.В. Неласов, Е.А. Перов, Ю.В. Петров, В.А. Хохлов, Ю.В. Хомич, Термоциклирование поверхности меди в доабляционном режиме при нагреве УФ лазерными наносекундными импульсами, *ФТТ* 67(12), 2371 (2025).
- [6] Sergey S. Makarov, Vasily V. Zhakhovsky, Sergey Yu. Grigoryev, Petr Chuprov, Tatiana A. Pikuz, Nail A. Inogamov, Victor A. Khokhlov, Yuri V. Petrov, Eugene Perov, Vadim Shepelev, Takehisa Shobu, Aki Tominaga, Ludovic Rapp, Saulius Juodkazis, Mikako Makita, Motoaki Nakatsutsumi, Thomas R. Preston, Karen Appel, Zuzana Konopkova, Valerio Cerantola, Erik Brambrink, Jan-Patrick Schwinkendorf, Istvan Mohacsi, Vojtech Vozda, Vera Hajkova, Tomas Burian, Jaromir Chalupsky, Libor Juha, Norimasa Ozaki, Ryosuke Kodama, Ulf Zastra, Andrei V. Rode and Sergey A. Pikuz, Formation of high-aspect-ratio nanocavity in LiF crystal using a femtosecond X-ray free-electron laser pulse, *Nature Communications* 16, 11504 (2025).
- [7] A. V. Dyshlyuk, N. A. Inogamov, O. B. Vitrik, Substrate-Embedded Dipole Nanoantenna Arrays: Collective Optical Response, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 89, S479–S486 (2025).
- [8] P. G. Grinevich, R. G. Novikov, "Transparent scatterers and transmission eigenvalues Extended Abstracts IPMS 2024 Conference – "Inverse Problems: Modeling and Simulation"(Мальта, 26 мая – 01 июня 2024), *Trends in Mathematics*, 11, ред.

Alemdar Hasanov Hasanoglu, Roman Novikov, Karel Van Bockstal, Springer Nature Switzerland AG, 2025, 265–274.

- [9] P. G. Grinevich, I. A. Taimanov, On perturbations of the spectrum of one-dimensional PT-symmetric periodic Schrodinger operator, Regular and Chaotic Dynamics v. 30, №6, pp. 962-968 (2025).
- [10] S. Abenda, P. G. Grinevich, Dubrovin-Natanzon divisors on MM-curves, 2025, 35 pp., arXiv:2508.08426
- [11] В. П. Рубан, «Точные» решения для циркулярно поляризованных солитонов и вихрей в керровской среде, Письма в ЖЭТФ, 121(5), 375-380 (2025).
- [12] В. П. Рубан, Узкие световые пучки с линейной поляризацией в керровской среде, Письма в ЖЭТФ 121(11), 871-875 (2025).
- [13] В. П. Рубан, Нелинейная динамика волн над неоднородно периодическим дном, Письма в ЖЭТФ 122(7), 397-402 (2025).

5.4 Хаотическая и регулярная динамика систем гидродинамического типа

В рамках данной темы в 2025 году проводились исследования в области нелинейной динамики сложных сред, включая жидкие кристаллы, турбулентные потоки, магнитные системы, распространение волн в случайных средах, динамику везикул и мембран, акустическую и водную турбулентность, и взаимодействие волн с вихревыми течениями. Ниже приводятся результаты, полученные в 2025 году.

Нелинейная динамика жидких кристаллов

Проведено исследование нелинейной динамики флексоэлектрической неустойчивости в нематических жидких кристаллах, инициированной внешним переменным электрическим полем, при малых отклонениях амплитуды внешнего поля от своего порогового значения в рамках построенной нами точной системы уравнений электро-нематодинамики для случая отрицательных анизотропий диэлектрической проницаемости и электрической проводимости. Целью исследования было определить, какие структуры искажений поля нематического директора оказываются устойчивыми выше порога неустойчивости при учете нелинейностей. Исследуемая флексо-неустойчивость возникает при конечном волновом векторе. Проводился анализ медленной динамики, т.е. поведение системы на временных масштабах, значительно превышающих период внешнего электрического поля. В рамках численных исследований нелинейной динамики было подтверждено выживание статических или динамических структур, предсказанных линейной теорией. Очевидно, что устройство и поведение динамических структур оказывается наиболее нетривиальным и интересным, когда инкремент наиболее неустойчивой моды имеет мнимую часть, так называемая бифуркация Хопфа. Было получено, что при малых отклонениях амплитуды внешнего электрического поля от порогового значения в окрестности бифуркации Хопфа движущиеся двумерные периодические (в горизонтальной плоскости нематического слоя, параллельной ограничивающей поверхности) структуры возмущений нематического директора являются неустойчивыми. Устойчивыми же динамическими текстурами при указанных значениях внешнего поля оказываются стоячие или бегущие волны так называемых «наклонных роллов», оптически детектируемых по отклонениям нематического директора от начального однородного (наклонных в смысле ненулевых значений обоих компонент критического волнового вектора в указанной горизонтальной плоскости). Указанные структуры являются эффективно одномерными в главных порядках по амплитудам возмущений. Установлено, что тип динамической бифуркации зависит от материальных параметров жидкокристаллического вещества и от параметров внешнего поля. Более того, в зависимости от указанных параметров бифуркация, соответствующая образованию движущихся наклонных роллов, может быть мягкой, т. е. непрерывной, «критической» или близкой к «трикритической», или жесткой (то есть возникающей в точке бифуркации с конечной амплитудой). Наконец, в духе теории Гинзбурга-Ландау была построена динамическая феноменологическая теория формирования таких структур, которая справедлива в ближайшей окрестности порога неустойчивости [1]. (Е.С. Пикина, Е.И. Кац, В.В. Лебедев)

Метастабильность липидных везикул

В данной работе изучались упругие свойства вытянутых везикул, исследовалась динамика формы везикул в осесимметричном растягивающем потоке. Для везикул с малым приведенным объёмом (большим отношений полуосей в равновесии) из указанного анализа установлено, что критическим образом по темпу растягивающего потока пропадает стационарное состояние и везикула переходит в неограниченное растяжение. Из скейлингового анализа упругой энергии Хельфриха и вязкого трения со стороны потока для растянутых конфигураций, установлен метастабильный характер любого стационарного состояния везикулы в растягивающем потоке и оценен размер области устойчивости. Проведено численное моделирование динамики вытянутых везикул в растягивающем потоке с темпом несколько выше критического [2]. (Е.С. Пикина, М.А. Шишкин)

Магнитные системы и спиновая динамика

Недавние разработки в области спинтроники вновь привлекли внимание к спиновой динамике кубических ферромагнитных кристаллов EuO и EuS. Эти ферромагнетики обладают максимально простой магнитной структурой, что делает их наиболее подходящими системами для тестирования различных теоретических моделей магнитных материалов. Обычно используемое приближение среднего поля Вейсса (MFA) дает только качественное описание температурной зависимости намагниченности $M(T)$. Мы разрабатываем последовательную теорию для $M(T)$, основанную на методе диаграммной теории возмущений для спиновых операторов. Наша теория находится в отличном количественном согласии с экспериментальной зависимостью $M(T)$ для EuO и EuS во всем диапазоне температур от $T = 0$ до малой окрестности температуры Кюри. В частности, наша теоретическая зависимость $M(T)$ демонстрирует степенное поведение намагниченности с показателем $\beta_* \approx 1/3$, что согласуется с экспериментально наблюдаемым поведением в EuO и EuS. Такой индекс может быть назван "докритической аномалией" [3]. (И.В. Колоколов)

Статистика света в турбулентной атмосфере

Представлено исследование статистических свойств распространения света в турбулентной среде. Основное внимание мы уделяем анализу плотности вероятности интенсивности I для различных значений I и длины пути светового пучка. Плотность вероятности $P(I)$ имеет два хвоста, характеризующихся растянутыми экспонентами, соответствующими тому, что вероятность всплесков с интенсивностью, существенно превышающей типичное значение, оказывается значительно выше, чем можно было бы предположить, исходя из обычно используемого экспоненциального распределения [4]. (В.В. Лебедев, И.В. Колоколов)

Мы исследуем парную корреляционную функцию случайной фазовой составляющей световых волн, распространяющихся в турбулентных средах. В частности, мы фокусируемся на корреляционной функции фазовых градиентов, рассматривая случай гауссовых начальных профилей, уделяя особое внимание плоским и сферическим волнам. Расчеты выполнены в рамках основного порядка теории возмущений [5]. (В.В. Лебедев, И.В. Колоколов)

Мы исследуем вероятность появления высоких значений интенсивности I светового луча при его распространении в турбулентной атмосфере. Исходя из функционального интегрального представления средних значений по турбулентным колебаниям, мы находим конфигурацию седловой точки в функциональном пространстве, соответствующую высоким значениям I . Конфигурация седловой точки определяет хвост функции плотности вероятности I , характеризующийся растянутым показателем степени и определяющий высокие моменты I . Исследуя колебания показателя преломления поверх конфигурации седловой точки, мы устанавливаем условия применимости подхода, которые различаются для случаев слабых и сильных мерцаний [6]. (В.В. Лебедев, И.В. Колоколов)

Молекулярная сортировка в биологических системах

Молекулярная сортировка в биологических мембранах необходима для правильного функционирования клеток. Она также играет решающую роль в выделении вирусов из клеток-хозяев. Недавно мы предположили, что этот процесс обусловлен разделением фаз, при котором образование и рост сортирующих доменов зависит, главным образом, от прямых межмолекулярных взаимодействий. В дополнение к этому, подобные Казимиру силы, возникающие в результате энтропийных эффектов в колеблющихся мембранах, также могут играть значительную роль в процессе молекулярной дистилляции. Здесь, используя комбинацию теоретического анализа и численного моделирования, мы исследуем, как подобные Казимиру взаимодействия между жесткими мембранными включениями способствуют сортировке, особенно в биологически значимом режиме, когда прямые межмолекулярные взаимодействия слабы. Наши результаты показывают, что эти взаимодействия улучшают молекулярную дистилляцию за счет уменьшения критического радиуса для образования новых областей сортировки и облегчения захвата молекул внутри этих областей. Мы определяем относительную жесткость мембраны и надмолекулярные домены как ключевой параметр, контролирующей эффективность молекулярной сортировки, позволяют по-новому взглянуть на физические принципы, лежащие в основе молекулярной сортировки в биологических системах [7]. (В.В. Лебедев, И.В. Колоколов)

Взаимодействие волн с вихревыми течениями

Мы изучаем взаимодействие инерционных волн с геострофическим течением в быстро вращающейся жидкости. В соответствии с экспериментальными условиями в работе рассматриваются инерционные волны, возбуждаемые источником вблизи боковой границы течения и попадающие в область, где присутствует геострофическое вихревое течение. В работе выводится и анализируется волновое уравнение, описывающее распространение сходящихся и расходящихся цилиндрических волн на фоне среднего вихревого течения, которое рассматривается как осесимметричное дифференциальное вращение. Показано, что в бездиссипативном пределе монохроматическая волна не оказывает вращающего момента на вихревое течение до тех пор, пока она не поглотится внутри критического слоя. Из сходящихся волн поглощаются только те, которые несут угловой момент того же знака, что и вращение вихря. Сходящиеся волны с противоположным знаком углового момента просто отражаются от вихря. Поглощение волны возможно только в том случае, если вихревое течение характери-

зуются достаточно высокой угловой скоростью. Поведение волны вблизи критического слоя может быть описано известной моделью, в которой среднее течение представляет собой прямолинейное сдвиговое течение. Показано, что стандартное приближение волнового пакета для коротковолнового предела неприменимо в окрестности слоя; оно пересмотрено путем вывода соответствующего уравнения и переформулирования закона сохранения волнового действия. Для окрестности критического слоя выводится модель, учитывающая вязкую диссипацию; вязкие эффекты исследуются для поглощения как монохроматической волны, так и волнового пакета [8]. (С.С. Вергелес, Н.А. Ивченко)

Мы исследуем пространственную зависимость парных корреляционных функций компонент поля скорости в вращающейся турбулентной жидкости на фоне когерентного геострофического вихря. Статистика турбулентных пульсаций определяется их динамикой, которая представляет собой динамику инерционных волн, подверженных влиянию дифференциального вращения в вихре и слабого вязкого демпфирования. Нас интересуют расстояния, превышающие масштаб волнового форсинга, но меньшие радиуса когерентного вихря. Мы устанавливаем анизотропию корреляционной функции поля скорости на этих расстояниях. Все диагональные элементы корреляционной функции убывают логарифмически в продольном направлении и степенным образом в радиальном направлении и вдоль оси вращения, что не зависит от деталей корреляционной функции форсинга и указывает на «когерентность» течения. Напротив, кросс-корреляционная функция радиально-азимутальных компонент скорости, которая есть напряжение Рейнольдса для совпадающих точек, демонстрирует сильную зависимость от корреляционной накачки форсинга и быстро убывает на расстояниях, превышающих масштаб накачки [9]. (С.С. Вергелес, Л.Л. Огородников)

Двумерная турбулентность в ограниченных областях

Мы исследуем двумерную турбулентность в квадратной области с условием прилипания на границах и без трения о дно с помощью прямого численного моделирования. Показано, что динамика системы сильно зависит от крутящего момента M внешнего воздействия. При относительно большом значении M в центре области формируется долгоживущий когерентный вихрь, создающий постоянный момент импульса. При меньших крутящих моментах угловой момент претерпевает случайные смены знака из-за спонтанного переключения циркуляции центрального вихря, хотя направление его вращения преимущественно совпадает с направлением крутящего момента. Мы исследовали переход между этими режимами, плавно изменяя величину M , и обнаружили, что усредненный по времени угловой момент системы подчиняется зависимости $\langle \mathcal{L} \rangle \propto M^{1/3}$. Значительная часть энергии в системе диссипирует вблизи ее границ, что требует пересмотра скейлинговых законов для однородных систем. Предложены новые скейлинговые соотношения, которые позволяют совместить профили скорости в пограничных слоях для расчетов с различной вязкостью жидкости и амплитудами внешней силы. Профили скорости характеризуются линейным вязким подслоем, за которым следует короткий логарифмический участок. Толщина пограничного слоя δ масштабируется вместе с крупномасштабным числом Рейнольдса Re как $\delta \sim L \cdot Re^{-1/2}$, что указывает на то, что трение у стенок недостаточно для остановки обратного каскада энергии до того, как он достигнет размера системы L [10]. (В.М. Парфеньев)

Акустическая турбулентность

В работе представлен краткий обзор теоретических и численных работ по трехмерной акустической турбулентности как в слабо нелинейном режиме, когда амплитуды звуковых волн малы, так и в случае сильной нелинейности. Основанием этого обзора стали классические исследования с одной стороны В.Е. Захарова (1965) и В.Е. Захарова и Р.З. Сагдеева (1970) по слабой акустической турбулентности, и с другой - Б.Б. Кадомцева и В.И. Петвиашвили (1972). До недавнего времени не было убедительных численных экспериментов, подтверждающих ту или другую точку зрения. В работах авторов этого обзора в 2022 и 2024 гг. были найдены веские аргументы на основе прямого численного моделирования в пользу той и другой теории. Показано, что спектр слабой турбулентности Захарова-Сагдеева $\propto k^{-3/2}$ реализуется не только при малой положительной дисперсии звуковых волн, но и в случае полного отсутствия дисперсии. Рассчитанные спектры турбулентности в слабо нелинейном режиме имеют анизотропное распределение: в области малых k формируются узкие конусы (джеты), уширяющиеся в Фурье пространстве. В случае слабой дисперсии джеты сглаживаются, а спектр турбулентности стремится к изотропному в области коротких длин волн. В отсутствии дисперсии спектр турбулентности представляет собой дискретный набор джетов, подверженных дифракционной расходимости. Выяснено, что для каждого отдельного джета нелинейные эффекты намного слабее дифракционных, что препятствуют формированию ударных волн. Таким образом, спектры слабой турбулентности Захарова-Сагдеева реализуются за счет малости нелинейных эффектов по сравнению с дисперсией или дифракцией. При увеличении уровня накачки в бездисперсионном режиме, когда нелинейные эффекты начинают преобладать, происходит формирование ударных волн — разрывов плотности. В итоге акустическая турбулентность переходит в сильно нелинейное состояние в виде ансамбля случайных ударных волн, описываемого спектром Кадомцева-Петвиашвили $\propto k^{-2}$ [11]. (Е.А. Кузнецов)

Турбулентность волн на воде

В работе представлены результаты прямого численного моделирования турбулентности волн на воде для потенциальных течений в рамках конформных переменных с учетом низкочастотной накачки и высокочастотного затухания вязкого типа. В данной модели для широкого диапазона амплитуд накачки не обнаружен режим слабой турбулентности, предсказанный ранее в работе А. I. Dyachenko, Y. V. Lvov, V. E. Zakharov, *Physica D*, 87(1-4), 233-261 (1995). Показано, что для типичных параметров турбулентности главными эффектами являются процессы опрокидывания волн, формирования на их гребнях каспов, которые вносят основной вклад в спектры турбулентности с зависимостью от частоты и волнового числа с одной и той же степенью, равной -4 , в полном соответствии с теорией: Е. А. Кузнецов, Спектры турбулентности, порождаемые сингулярностями. Письма ЖЭТФ, **80**, 92-98 (2004). В этом сильно нелинейном режиме плотность вероятности крутизны волн при больших отклонениях имеет степенные хвосты, ответственные за перемежаемость турбулентности [12]. (Е.А. Кузнецов)

Магнитные филаменты в солнечной конвективной зоне

Возникновение магнитных филаментов на границе конвективных ячеек представляет собой одну из центральных проблем солнечной физики. Ранее данная задача исследовалась в кинематическом приближении и было показано, что максимальный рост магнитных филаментов возникает в области гиперболических точек нисходящих потоков, а их затухание — в области восходящих. В данной работе исследуется обратное влияние нарастающего магнитного поля на конвективное течение. Численно и аналитически показано, что с ростом магнитного поля происходит смещение гиперболической точки за счет магнитного давления вдоль границы конвективной зоны [13]. (Е.А. Кузнецов)

Супергармоническая неустойчивость волн Стокса

В рамках массивных вычислений мы достигли четвёртой ветви супергармонической неустойчивости волн Стокса. Используя полученные результаты, удалось проверить феноменологические формулы зависимости инкрементов роста, соответствующих разным ветвям неустойчивости, от параметра нелинейности (крутизны, определяемой как отношение размаха волны к её длине) в области появления новой ветви неустойчивости и вдали от неё. Продемонстрировано, что формулы, одна из которых получена как подгонка методом наименьших квадратов по данным первых трёх ветвей неустойчивости, а другая просто феноменологическая асимптотика, работают для четвёртой ветви неустойчивости и для полученных до этого ветвей. Приводятся инкременты роста для всех четырёх ветвей неустойчивости [14]. (А.О. Короткевич, А.О. Прокофьев)

Список публикаций

- [1] E.S. Pikina, E.I. Kats, A.R. Muratov and V.V. Lebedev, Pattern formation in nematics above the instability threshold: Finding the right pass to move or not to move, will be sent to Phys. Rev.
- [2] M.A. Shishkin, E.S. Pikina, The metastability of lipid vesicle shapes in uniaxial extensional flow, arxiv:2511.20840.
- [3] Igor. V. Kolokolov, Victor S. L'vov, and Anna Pomyalov, Precritical anomalous scaling and magnetization temperature dependence in cubic ferromagnetic crystals, Phys. Rev. B 111, 104433 (2025).
- [4] И. В. Колоколов, В. В. Лебедев, Статистика высоких интенсивностей света, распространяющегося в турбулентной среде, УФН 195, 1179-1198, (2025).
- [5] I.V. Kolokolov, V.V. Lebedev, F.A. Starikov, Correlations of the phase fluctuations in the presence of weak scintillations, Journal of the Optical Society of America A 42(11), 1654-1666 (2025).
- [6] I.V. Kolokolov, V.V. Lebedev, Universal tail of the probability density function of the intensity of light propagating in a turbulent medium, Phys. Rev. E 111, 064104 (2025).
- [7] Damiano Andregretti, Luca Dall'Asta, Andrea Gamba, Igor Kolokolov, Vladimir Lebedev, Molecular sorting on a fluctuating membrane, SciPost Phys. 18, 099 (2025).
- [8] Nikolay A. Ivchenko, and Sergey S. Vergeles, Absorption and reflection of inertial waves by a geostrophic vortex, Physics of Fluids 37, 126605 (2025).
- [9] Leon L. Ogorodnikov, Sergey S. Vergeles. Long-range spatial velocity statistics in a rotating coherent turbulent vortex. Physical Review Fluids 10, 124702 (2025).
- [10] A. Shikhanian and V. Parfenyev, "The effects of no-slip boundaries and external force torque on two-dimensional turbulence in a square domain Phys. Fluids 37, 095127 (2025).
- [11] Е.А. Кочурин, Е.А. Кузнецов, Звуковая турбулентность: от спектров Захарова-Сагдеева к спектру Кадомцева-Петвиашвили, Изв. ВУЗОВ Радиофизика, 68, no. 5-6, 417-435 (2025).
- [12] Е.А. Кочурин, Е.А. Кузнецов, Эффекты сильной турбулентности для волн на воде, Письма в ЖЭТФ 122(4), 214 – 219 (2025).

- [13] E.A. Kuznetsov, E.A. Mikhailov, V.D. Khvoshchinskaya, The influence of magnetic filament generation on flows in the solar convective zone, Pisma ZhETF (submitted) (2025).
- [14] A. O. Korotkevich and A. O. Prokofiev, Fourth branch of instability of Stokes' wave and dependence of corresponding growth rate on nonlinearity, Письма в ЖЭТФ принята, 123 (3), (2026).

5.5 Квантовая теория поля, теория струн и математическая физика

В рамках данной темы в 2025 году проводились исследования в области фундаментальных проблем квантовой теории поля, теории струн и математической физики, включая интегрируемые системы, конформные теории поля, двумерные калибровочные теории, компактификации струнных теорий, а также развитие соответствующих математических методов. Ниже приводятся результаты, полученные в 2025 году.

Матричные одевающие цепочки и уравнения движения твердого тела

В статье изучены дифференциальные уравнения, связанные с квазипериодическими замыканиями одевающей цепочки, порожденной преобразованиями Дарбу для операторов Шредингера с матричным потенциалом. Ранее, в работах Шабата, Веселова, Адлера и др. было показано, что в скалярном случае этот подход позволяет строить конечнозонные потенциалы и их деформации типа Пенлеве, определяющие многофазные обобщения гармонического осциллятора. В матричном случае приложения одевающей цепочки еще более разнообразны и включают большое число известных и новых систем. В статье продемонстрировано, что в эту схему вкладываются уравнения движения твердого тела с закрепленной точкой в ньютоновском поле с квадратичным потенциалом (в произвольной размерности); также изучены некоторые простые примеры замыканий для потенциалов в матрицах 2×2 , для них построены решения в элементарных функциях и трансцендентах Пенлеве, изучены их спектральные свойства [1]. (В.Э. Адлер)

Спектр мезонов в двумерной КХД (модель 'т Хоофта) с кварками неравных масс

Изучается спектр масс мезонов в пределе большого числа цветов в двумерной квантовой хромодинамике, известной также как модель 'т Хоофта. Разработанный в предыдущих работах метод обобщается на самый общий случай мезонов, состоящих из кварков неравных масс. Мы получаем точное выражение для спектральных сумм, а также систематическое WKB-разложение для собственных значений, которые подтверждаются численным решением уравнения 'т Хоофта. Также проанализировано поведение ответов в разных асимптотических режимах, включая киральный предел, предел двух и одного тяжелого кварков, и найдено согласие с более ранними аналитическими результатами других авторов [2]. (А.А. Артемьев, А.В. Литвинов, П. Мещеряков)

Спектр мезонов в теории поля Изинга в двухчастичном приближении

Мы исследовали теорию поля Изинга в двухчастичном приближении, описываемое в терминах уравнения Бете-Солпитера. Данное уравнение, выведенное Фонсейкой и Замолодчиковым, как систематическая реализация подхода Маккоя-Ву, описывает конфайнмент, моделируя «мезоны» как связанные состояния двух майорановских фермионов («кварков»), аналогично интегральному уравнению в модели 'т Хоофта. Несмотря на свою приближенность, уравнение Бете-Солпитера даёт удивительно точные предсказания для спектра масс стабильных мезонов в широком диапазоне

параметров. Используя структурное сходство с уравнением БС в модели 'т Хоофта в двумерной КХД, мы разрабатываем новую непertурбативную аналитическую модель, следуя подходу Фатеева, Лукьянова и Замолодчикова. В рамках этого подхода мы вычисляем спектральные суммы и систематически выводим разложение для больших n для уравнения Бете-Солпитера, которое описывает спектр бесконечной башни мезонов [3]. (А.В. Литвинов, П. Мещеряков, Е. Шестопапов)

х-у замена для $(2, 2p+1)$ минимальной струны

Продолжается изучение дуальностей между двумерной гравитацией и матричными моделями на примере $(2, 2p+1)$ минимальной струны. Предложена переформулировка дуальности, связанная с более известной с помощью "х-у замены" на языке топологической рекурсии. Эта переформулировка проясняет некоторые концептуальные и технические сложности в составлении "словаря" дуальности, позволяет обойтись без использования "резонансных преобразований" ранее используемых для сопоставления результатов в двух подходах, а также позволяет просто сравнить ответы с амплитудами в других известных теориях двумерной гравитации, таких как "комплексная струна Лиувилля". Также сформулирована гипотеза о том, как в "матрично-модельной" формулировке вычисляются корреляторы с операторами, помимо обычно рассматриваемых "тахеонов" [4]. (А.А. Артемьев)

Свободнополевая конструкция гетеротических струн на многообразиях Калаби-Яу

Модели гетеротических струн в 4-мерном пространстве представляют собой гибридные теории леводвижущейся $N=1$ фермионной струны, дополнительные 6 измерений которой компактифицированы на $N=2$ теории SCFT с центральным зарядом 9, и праводвижущейся бозонной струны, дополнительные измерения которой также компактифицированы на теории SCFT с центральным зарядом 9, а оставшиеся 13 измерений компактифицированы на торе алгебры Ли $E_8 \times SO(10)$. В работе предложена свободнополевая конструкция такой струны, компактифицированной на многообразии Калаби-Яу типа Берглунда-Хубша в комбинаторном подходе Батырева-Борисова [5]. (А.А. Белавин)

Конструкция зеркальных пар орбифолдов Калаби-Яу типа Берглунда-Хубша

В этой работе мы предлагаем алгоритм построения орбифолдов многообразий Калаби-Яу типа Берглунда-Хубша. Данный подход позволяет получить все зеркальные пары для многообразий Калаби-Яу этого типа. В качестве примера рассмотрена одна из моделей типа Ферма, для которой были найдены все её орбифолды и их зеркальные пары, а также для каждого орбифолда было найдено число поколений кварков и лептонов, а также число типов частиц, участвующих только в гравитационном взаимодействии, то есть частиц тёмной материи [6]. (С.С. Алешин, А.А. Белавин)

Корреляционные числа в минимальной струне Вирасоро

Мы изучаем корреляционные числа в минимальной струне Вирасоро, предложенной в недавней работе Эберхардта и др. Данная теория описывается конформной теорией

рией материи, так называемой времениподобной теорией Лиувилля и гравитацией — пространственноподобной теорией Лиувилля. Используя аналитические свойства корреляционных функций в пространственно и времениподобных теориях Лиувилля, мы аналитически нашли точные выражения для корреляционных чисел для сферы с 4-мя точками и тора с одной точкой [7]. (А.В. Литвинов, Д. Хромов)

Редукции уравнений автодуальной конформной структуры

Изучались редукции иерархии бездисперсионной интегрируемой системы уравнений, связанной с общей локальной формой автодуальной конформной структуры (АДКС) с сигнатурой $(2,2)$. Построена система АДКС типа В и рассмотрены её связи с исходной системой АДКС. Приведены примеры дифференциальных и неавтономных редукций, а также найдены решения некоторых редуцированных систем [8]. (Л.В. Богданов)

Симметрии Орлова-Шульмана для иерархии Манакова-Сантини

Построены симметрии Орлова-Шульмана для иерархии Манакова-Сантини (MS). Приведено явное доказательство совместимости дополнительных симметрий с основными потоками иерархии MS и рассмотрено несколько простых примеров, включая преобразование Галилея и масштабирование. Также представлена картина симметрий Орлова-Шульмана в терминах схемы одевания, основанной на задаче Римана-Гильберта [9]. (Л.В. Богданов)

Формфакторы композитных операторов твиста в модели sh-Гордона

Модель sh-Гордона в размерности $1+1$ представляет собой одну из простейших и прекрасно изученных массивных интегрируемых релятивистских квантовых теорий поля. Мы рассматриваем эту теорию на многолистных римановых поверхностях с плоской метрикой, которые могут быть представлены стопкой плоскостей, соединенных друг с другом по линиям разрезов. Разрезы заканчиваются точками ветвления, которые представляются операторами твиста. Операторы такого сорта интересны в рамках задачи о вычислении энтропий запутанности фон Неймана и Реньи оригинальной модели на плоскости. Композитные операторы твиста представляют собой естественные обобщения операторов твиста, которые можно получить, помещая локальный оператор в точку ветвления с помощью некоторой предельной процедуры. Корреляционные функции в квантовой теории поля могут быть в принципе получены с помощью спектрального разложения. Оно позволяет их выразить через формфакторы локальных операторов, т.е. матричные элементы в базисе стационарных состояний. В интегрируемых моделях формфакторы можно получить точно как решения системы бутстрапных уравнений. Тем не менее, отождествление этих решений с операторами, выраженными через основные поля системы, остается проблематичным. В этой работе мы развиваем технику вычисления формфакторов некоторого класса композитных операторов твиста, определенных через основные поля, в квазиклассическом приближении [10]. (М. Лашкевич, А. Нестуров)

Явная конструкция состояний в орбифолдах произведений N=2 суперконформных минимальных моделей

Известно, что орбифолды произведений N=2 суперконформных минимальных моделей описывают сигма-модели на многообразиях Калаби-Яу. В работе предложено обобщение явной конструкции состояний в орбифолдах произведений N=2 суперконформных минимальных моделей с недиагональным спариванием голоморфных и антиголоморфных примарных состояний. Известно, что такие минимальные модели классифицируются диаграммами Дынкина ADE типов. Мы показываем, что твистование состояний элементами допустимой группы G_{adm} , которое используется для построения модели орбифолда, согласовано с недиагональным спариванием. Мы получаем в явном виде полный набор полей орбифолда из условия взаимной локальности и других аксиом конформного бутстрапа. Оказывается, что полный набор конформных полей орбифолда нумеруется элементами дуальной группы G_{adm}^* . Замена группы G_{adm} на группу G_{adm}^* приводит к конструкции зеркального орбифолда, изоморфного исходному [11]. (Б. Еремин, С.Е. Пархоменко)

Список публикаций

- [1] V.E. Adler, A.P. Veselov. Spinning top in quadratic potential and matrix dressing chain, *Regular and Chaotic Dynamics*, 30(4), 464-480 (2025).
- [2] A. Artemev, A. Litvinov, P. Meshcheriakov, QCD2 't Hooft model: Two-flavor mesons spectrum, *Phys. Rev. D* 111, 125001 (2025);
- [3] A. Litvinov, P. Meshcheriakov and E. Shestopalov, Meson mass spectrum in Ising field theory, *Phys. Rev. D* 112, 085021 (2025).
- [4] A. Artemev, x-y swap for $(2, 2p+1)$ minimal string, *Phys. Rev. D* 112, 046019 (2025).
- [5] A.A. Belavin, Free field construction of heterotic string compactified on Calabi-Yau manifolds of Berglund-Hubsch type in the Batyrev-Borisov combinatorial approach, *Nuclear Physics B* 1018, 117055 (2025).
- [6] С.С. Алешин, А.А. Белавин, Конструкция зеркальных пар орбифолдов Калаби-Яу типа Берглунда-Хубша, *Письма в ЖЭТФ* 123, 68 (2026).
- [7] D. Khromov and A. Litvinov, On correlation numbers $V_{0,4}$ and $V_{1,1}$ in Virasoro Minimal String Theory, arXiv:2509.25960 [hep-th].
- [8] L.V. Bogdanov, Differential and other reductions of the self-dual conformal structure equations, *Physica D: Nonlinear Phenomena* 483, 135001 (2025).
- [9] L.V. Bogdanov, The Orlov-Schulman symmetries of the Manakov-Santini hierarchy, *Lobachevskii Journal of Mathematics* 46(11), 5755–5764 (2025).
- [10] M. Lashkevich, A. Nesturov, Form factors of composite branch-point operators in the sinh-Gordon model on a multi-sheeted Riemann surface: semiclassical limit, *Journal of High Energy Physics*, принята; arXiv:2508.12878.
- [11] B. Eremin and S. Parkhomenko, Explicit construction of states in orbifolds of products of $N = 2$ Superconformal ADE Minimal models, направлена в *Nuclear Physics B*; arXiv:2506.21992 [hep-th].

5.6 Сильные взаимодействия, релятивистская астрофизика, гравитация, космология

В рамках данной темы в 2025 году проводились исследования в области фундаментальных проблем физики сильных взаимодействий, гравитации, космологии, релятивистской астрофизики, а также экспериментальных методов исследования фундаментальных симметрий. Ниже приводятся результаты, полученные в 2025 году.

Квантовая гравитация и термодинамика черных дыр

В статье [6] доказано, что в изучаемой С.Н. Вергелесом 4D решёточной квантовой теории гравитации имеет место свойство унитарности непосредственно на решётке в случае сигнатуры Минковского. Доказательство справедливо только для решёток, сохраняющих число степеней свободы в процессе эволюции во времени. Евклидова сигнатура и сигнатура Минковского связаны деформацией контуров интегрирования динамических переменных в дискретном решёточном функциональном интеграле. Важно, что результат получен непосредственно на решётке. Поскольку исследуемая решёточная теория гравитации в пределе длинных волн переходит в известную теорию Эйнштейна-Картана-Палатини, полученный результат означает, что данная решёточная теория гравитации имеет право рассматриваться как дискретная регуляризация общепринятой непрерывной физической теории гравитации [6]. (С.Н. Вергелес)

Процессы квантового туннелирования, связанные с черной дырой, определяют термодинамику черной дыры. Температура Хокинга определяется процессами квантового туннелирования излучения частиц из черной дыры. С другой стороны, энтропия Бекенштейна-Хокинга черной дыры получается путем рассмотрения макроскопических процессов квантового туннелирования при расщеплении черной дыры на меньшие черные дыры. Эти туннельные процессы также определяют правило композиции для энтропии черной дыры, которое совпадает с правилом композиции для неэкстенсивной энтропии Цаллиса-Цирто с $\delta = 2$. Применение неэкстенсивной энтропии Цаллиса-Цирто к черной дыре показывает, что спектр масс черной дыры является эквидистантным, $M = Nm$. Здесь N — целое число, а m — квант массы, выраженный через приведенную массу Планка. Энтропия Бекенштейна-Хокинга черной дыры с массой $M = Nm$ равна N^2 [2]. (Г.Е. Воловик)

В работе [4] мы рассматривали термодинамику чёрной дыры с неэкстенсивной энтропией. Эта энтропия подчиняется правилу композиции, которое совпадает с правилом композиции в неэкстенсивной статистике Цаллиса-Цирто $\delta = 2$. Здесь мы расширяем этот подход на термодинамику белых дыр. Энтропия белой дыры отрицательна, что следует из скорости макроскопического квантового туннелирования из чёрной дыры в белую. Энтропия белой дыры равна со знаком минус энтропии чёрной дыры с той же массой. Это отражает антисимметрию относительно обращения времени, при которой вектор сдвига в формализме Арновитта-Дезера-Миснера меняет знак. Эта симметрия позволяет расширить энтропию Цаллиса-Цирто, добавив знак минус к формуле Цаллиса-Цирто, применённой к белой дыре. В результате правило

композиции остаётся прежним, с той лишь разницей, что вместо энтропии оно содержит модуль энтропии. Такое же неэкстенсивное правило композиции получается и для энтропии чёрной дыры Рейсснера-Нордстрёма. Эта энтропия формируется из положительной энтропии внешнего горизонта и отрицательной энтропии внутреннего горизонта. Модель чёрной дыры, образованной «атомами чёрной дыры» с массой планковского масштаба, также расширена, чтобы включить отрицательную энтропию белых дыр [4]. (Г.Е. Воловик)

Состояние де Ситтера обладает особой симметрией: оно однородно, а его кривизна постоянна в пространстве. Поскольку все точки пространства де Ситтера эквивалентны, это состояние описывается локальной термодинамикой. Это состояние имеет локальную температуру $T = H/\pi$ (что равно удвоенной температуре Гиббонса-Хокинга), локальную плотность энтропии, локальную плотность энергии, а также локальные гравитационные степени свободы — скалярную кривизну R и эффективную гравитационную связь K . С другой стороны, существует космологический горизонт, который также может быть охарактеризован термодинамическими соотношениями. Мы рассматриваем связи между локальной термодинамикой и термодинамикой космологического горизонта. В частности, существует голографическая связь между плотностью энтропии, проинтегрированной по объёму Хаббла, и энтропией Гиббонса-Хокинга горизонта, $S_{\text{volume}} = S_{\text{horizon}} = A/4G$. Мы также рассматриваем первый закон термодинамики в этих двух подходах. В локальной термодинамике, с одной стороны, первый закон справедлив для произвольного объёма V пространства де Ситтера. С другой стороны, первый закон применим и к термодинамике горизонта. В обоих случаях температура одинакова. Это рассмотрение распространяется на сжимающийся горизонт де Ситтера с его отрицательной энтропией, $S_{\text{volume}} = S_{\text{horizon}} = -A/4G$ [5]. (Г.Е. Воловик)

Здесь мы рассматриваем модель, которая соответствует обобщённой статистике Цаллиса-Цирто с $\delta = 2$ и расширяет её, предлагая квантование энтропии чёрной дыры, $S = N(N - 1)/2$. В этой модели чёрная дыра состоит из N так называемых планконов — объектов с приведённой планковской массой, так что её масса квантуется, $M = Nm$. Энтропия каждого планкона равна нулю, но энтропия чёрной дыры с N планконами обеспечивается $N(N - 1)/2$ степенями свободы — корреляциями между гравитационно взаимодействующими планконами. Эту модель можно расширить до заряженной чёрной дыры Рейсснера-Нордстрёма (RN), состоящей из заряженных планконов. Несмотря на заряд, статистический ансамбль планконов остаётся неизменным, и RN-чёрная дыра с N планконами имеет ту же энтропию, что и электрически нейтральная дыра. Это подтверждается адиабатическим процессом перехода от RN к чёрной дыре Шварцшильда при изменении постоянной тонкой структуры. Адиабатичность нарушается в крайнем пределе, когда гравитационное взаимодействие между двумя планконами компенсируется отталкиванием между их электрическими зарядами, и RN-чёрная дыра теряет устойчивость. Энтропия белой дыры, образованной теми же N планконами, имеет отрицательную энтропию: $S = -N(N - 1)/2$ [6]. (Г.Е. Воловик)

Горизонт событий является источником необратимости, аналогичной статистической необратимости. Именно поэтому для систем с горизонтом событий нет разницы между квантовыми и тепловыми флуктуациями. Квантовые процессы квантового туннелирования определяют термодинамику этих систем, их температуры, энтропии

и флуктуации. Мы рассмотрели три примера дисперсии энтропии, подтверждающие эту точку зрения: (i) дисперсия площади горизонта чёрной дыры, полученная с учётом квантовых флуктуаций; (ii) дисперсия энтропии объёма Хаббла в состоянии де Ситтера, полученная с учётом тепловых флуктуаций; и (iii) дисперсия энтропии в целых числах в модели планконов, определяемая распределением Пуассона [7]. (Г.Е. Воловик)

Статистика Цаллиса-Цирто с $\delta = 2$ выражает полную энтропию черной дыры Рейсснера-Нордстрёма через энтропии ее внешнего и внутреннего горизонтов. Этот же закон композиции применим к энтропии черной дыры Керра. В отличие от черной дыры Рейсснера-Нордстрёма, где полная энтропия зависит только от массы M и не зависит от ее заряда Q , энтропия черной дыры Керра является суммой вкладов ее массы M и углового момента J , то есть $S(M, J) = S(M, 0) + 4\pi\sqrt{J(J+1)}$. Здесь $S(M, 0)$ — энтропия черной дыры Шварцшильда. Это показывает, что при поглощении или испускании керровской чёрной дырой с $J \gg 1$ безмассовой частицы со спином $s_z = \pm 1/2$ её энтропия изменяется на $|\Delta S| = 2\pi$. Мы также рассмотрели квантование энтропии, предложенное моделью, в которой термодинамика чёрной дыры представлена ансамблем чёрных дыр планковского масштаба — планконов [8]. (Г.Е. Воловик)

Хьюз и Кусмарцев обсудили с топологической точки зрения разницу между температурой Гиббонса-Хокинга T_{GH} , приписываемой излучению Хокинга от космологического горизонта де Ситтера, и вдвое более высокой локальной температурой состояния де Ситтера, $T = H/\pi$. Согласно их подходу, эта разница определяется эйлеровой характеристикой $\chi(M)$ рассматриваемого пространства-времени с евклидовым временем. Инвариант $\chi(M)$ различен для глобального пространства-времени $M = S^4$ и для многообразия, ограниченного областью вблизи горизонта, $M = D^2 \times S^2$. Здесь мы рассматриваем применение топологического подхода к черным дырам Рейсснера-Нордстрёма (RN) с двумя горизонтами. Как внешний, так и внутренний горизонты характеризуются своей топологией вблизи горизонта, которая определяет соответствующие температуры горизонта. В результате корреляции между горизонтами энтропия RN-чёрной дыры не зависит от её электрического заряда, а полностью определяется массой чёрной дыры. Это демонстрирует применимость топологического подхода к многогоризонтным системам [9]. (Г.Е. Воловик)

Распад протона в среде де Ситтера определяется температурой $T = H/\pi$, где H — параметр Хаббла. Эта температура вдвое превышает температуру Гиббонса-Хокинга $H/2\pi$. Это демонстрирует физическое различие двух процессов. Температура $T = H/\pi$ определяет скорость распада протона в локальном процессе, который происходит внутри космологического горизонта. В то же время температура Гиббонса-Хокинга связана с процессами, в которых участвуют фотоны Хокинга или другие частицы, излучаемые с космологического горизонта. Та же температура $T = H/\pi$ определяет излучение электрон-позитронных пар позитроном или другим объектом в среде де Ситтера. Рождение материи и её термализация в тепловой бане де Ситтера приводит к обмену энергией между материей и квантовым вакуумом и, в конечном итоге, к распаду состояния де Ситтера в равновесный вакуум Минковского. Также обсуждается эффект Унру. Можно ожидать аналогичного разделения эффектов, обусловленных двумя различными температурами: эффекты связанные с горизонтом Риндлера с температурой Унру $T = a/2\pi$ и локальная радиация с $T = a/\pi$ [3]. (Г.Е. Воловик)

Физика тяжелых ионов и кварк-глюонная плазма

Впервые исследовано явление охлаждения струй (jet quenching) в соударениях ядро-ядро (AA) для фактора модификации I_{AA} функций фрагментации меченых адронами струй для сценариев с рождением кварк-глюонной плазмы (КГП) в pp -соударениях и без. Расчеты выполнены для зависящей от температуры бегущей константы связи КХД с учетом радиационных и столкновительных потерь энергии партонов в КГП. Радиационные потери энергии вычислены в рамках подхода интеграла по путям на световом конусе (LCPI от light-cone path integral) (B.G. Zakharov, JETP Lett. 63, 952 (1996); JETP Lett. 65, 615 (1997); Phys. Atom. Nucl. 61, 838 (1998); JETP Lett. 70, 176 (1999)), а столкновительные энергетические потери в модифицированном подходе Бьеркена с аккуратным учетом кинематики процессов 2 в 2. Использовалась параметризация бегущей $\alpha_s(Q, T)$, которая имеет короткое плато α_s^{fr} при $Q_{fr} \sim \kappa T$, а затем падает $\propto Q$. Этот анзац мотивирован решеточными расчетами α_s в КГП (A. Bazavov et al., Phys. Rev. D98, 054511 (2018)). Значение параметра κ было определено из фитирования всех имеющихся данных по ядерному фактору модификации R_{AA} спектров адронов для соударений тяжелых ядер на ЛНС. Параметры файерболла КГП в струйных AA событиях вычислялись используя Монте-Карло модель Глаубера поврежденных нуклонов, развитую ранее (B.G. Zakharov, Eur.Phys.J.C 78 (2018) 5, 427; JETP 124, 860 (2017)). Расчеты показали, что результаты для I_{AA} в соударениях тяжелых ядер Au+Au при $\sqrt{s} = 0.2$ ТэВ и Pb+Pb при $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ для сценариев с рождением КГП в pp соударениях и без оказываются близки друг другу и хорошо согласуются с данными RHIC и LHC. Были выполнены также расчеты фактора I_{AA} в O+O соударениях, который может быть измерен в экспериментах проводящихся в настоящее время на ЛНС. Было обнаружено, что для O+O соударений фактор I_{AA} для сценария с рождением КГП в pp соударениях заметно выше чем для сценария без рождения КГП в pp соударениях. Это открывает возможность использовать данные по фактору I_{AA} для легких ядер как пробник образования КГП в pp соударениях [10]. (Б.Г. Захаров)

В 2025г. на ЛНС начались эксперименты по изучению столкновений легких ядер O+O и Ne+Ne (с возможным расширением на C+C столкновения) при энергии $\sqrt{s} = 5.36$ ТэВ. Мотивацией этих экспериментов является определение минимального размера кварк-глюонной плазмы, который важен с точки зрения понимания механизмов быстрой термализации горячей КХД материи, обнаруженной ранее в столкновениях тяжелых ядер на RHIC и LHC. Обнаруженные в последние годы потоковые эффекты в pp соударениях при энергиях ЛНС свидетельствуют в пользу образования КГП малого размера и в pp соударениях. В этом случае можно ожидать наличия охлаждения струй в pp соударениях в кварк-глюонной плазме, аналогичного обнаруженному в соударениях тяжелых ядер. По запросу коллабораций CMS и ALICE Захаровым были выполнены расчеты ядерного фактора модификации R_{AA} для O+O и Ne+Ne соударений. Расчеты проводились в рамках формализма развитого ранее [B.G. Zakharov, JHEP 09, 087 (2021)] для сценариев с рождением КГП в pp соударениях и без. Предсказания этих двух сценариев очень близки для случая тяжелых ядер, но имеют различную A -зависимость, что приводит к существенной разнице в R_{AA} для легких ядер. Первые данные коллаборации CMS по R_{AA} для O+O и Ne+Ne соударений [CMS Collaboration, arXiv:2510.09864; <http://cds.cern.ch/record/2942011/files/HIN-25-014-pas.pdf>] оказались в хорошем согласии с предсказаниями Захарова для сценария с рождением КГП в

pp соударениях, и явно противоречат сценарию без образования КГП в pp соударениях. Предсказания других групп, полученные в сценарии без образования КГП в pp столкновениях, оказались в противоречии с данными CMS. Доказательство наличия jet quenching в pp соударениях, несомненно, представляет большой интерес для физики жестких адронных процессов, так как это существенно меняет устоявшиеся пол века назад в пертурбативной КХД (пКХД) представления о процессах с большими p_T . Ясно, что в случае значительных jet quenching эффектов от взаимодействия в конечном состоянии вызванных потерями энергии в КГП, стандартные схемы пКХД вычисления высших поправок теряют смысл [11]. (Б.Г. Захаров)

Спиновая динамика и поляризованные пучки

В условиях дрейфа магнитных полей в накопителях заряженных частиц для сохранения радиочастотного спинового резонанса на больших временах требуется комагнитометрия — независимый мониторинг магнитного поля. В условиях непрерывного спин-флипа контроль поля по частоте прецессии горизонтальной поляризации становится невозможным при близкой к вертикальной ориентации спина. В работе предложена и впервые успешно проверена экспериментально на накопителе COSY техника выключения радиочастотного ротатора спина при прохождении пилотного банча через ротатор. Пилотный банч выступает как комагнитометр для коррекции частоты прецессии спина рабочих банчей. В работе также обсуждены требования к точности экспериментальных данных для дискриминации между $1/T_2$ ЯМР феноменологией Блоха и развитой Н.Н. Николаевым с соавторами динамической теорией декогеренции за счет синхротронных колебаний [12]. (Н.Н. Николаев)

Развита уникальная однобанчевая резонансная комагнитометрия (self-comagnetometry) спин-флипа в накопителях. При достаточно медленном дрейфе магнитного поля и достаточно высоких частотах спин-флипа дрейф фазы прецессии спина может быть измерен, и скорость изменения магнитного поля может быть определена за время, необходимое для статистически значимого определения дрейфа спиновой фазы. Полученный сигнал используется для коррекции магнитного поля накопителя для сохранения в среднем частоты прецессии. В проведенном на накопителе COSY эксперименте показано, что при этом точность сохранения условия спинового резонанса может быть сопоставимой с достижимой в технике пилотного банча [13]. (Н.Н. Николаев)

Обсуждена программа поляризационных экспериментов на электрон-протонном коллайдере eIC с привязкой к технике источников поляризованных протонов, дейтронов, гелионов и избранных легких ядер с последующим накоплением и ускорением до рабочей энергии с сохранением поляризации, и возможностей поляриметрии [14]. (Н.Н. Николаев)

Проанализированы эффекты деполяризации, индуцируемые пучком, в водородной струйной мишени (HJET), которая использовалась для абсолютной поляриметрии адронных пучков на релятивистском коллайдере тяжёлых ионов (RHIC), и будет применяться в будущем на электрон-ионном коллайдере (EIC). Более высокая частота повторения банчей, и их меньшая длительность на EIC, смещают гармоники пучка в область частот, которые могут резонансно возбуждать сверхтонкие переходы в атомар-

ном водороде, что создаёт угрозу деполяризации атомов мишени. Используя частотный анализ гармоник пучка и частот сверхтонких переходов, мы устанавливаем порог частот испускания фотонов, выше которого поля, индуцированные пучком, слишком слабы, чтобы вызвать значительную деполяризацию. Для режимов инъекции (23,5 ГэВ) и "плато" (275 ГэВ) на EIC деполяризация, вызванная структурой сгустков, делает невозможной работу при текущем для RHIC значении направляющего магнитного поля у мишени $B_0 = 120$ мТл. Увеличение направляющего магнитного поля у мишени до $B_0 \approx 400$ мТл смещает все частоты сверхтонких переходов как минимум в три раза выше пороговой частоты, что гарантирует надёжную абсолютную поляризацию пучка с требуемой на EIC точностью в 1%. [15]. (Н.Н. Николаев)

Проведение экспериментов по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) с частицами, характеризующимися положительными и отрицательными значениями магнитной аномалии G , можно осуществить в структуре типа квази-замороженного спина (QFS). Она может быть реализована на основе существующего синхротрона с магнитными арками, например NICA, с добавлением элементов со скрещенными E+V полями на прямых участках. Таким образом, вращение спин-вектора в магнитных арках компенсируется в E+V фильтрах Вина. При этом возможно накопление сигнала ЭДМ аналогично методу замороженного спина (FS). Рассмотрена возможность модернизации ускорителя Нуклотрон комплекса NICA с добавлением электростатических элементов с целью соблюдения условия QFS и измерения ЭДМ. Проведена соответствующая магнитооптическая оптимизация структур накопительных колец. Также проведено исследование спин-орбитальной динамики пучка частиц, подтверждающее возможность проведения экспериментов по поиску ЭДМ на комплексе NICA. [16] (А.А. Мельников)

Основным методом измерения ЭДМ, позволяющим достичь точности в 10^{-29} е·см, является метод частотной области. При этом измеряется частота спин-прецессии, вызванная наличием электрического и магнитного дипольного момента (ЭДМ и МДМ). Для прецизионного измерения ЭДМ в структуре типа квази-замороженного спина было получено аналитическое выражение для измеряемой частоты и направления оси спин-прецессии матричным методом. Было проведено сравнение структур типа замороженного и квази-замороженного спина с точки зрения величины измеряемого сигнала. С помощью матричной техники анализа структур показано, что для увеличения ЭДМ-сигнала необходимо уменьшать угол поворота спина в магнитном кольце и компенсировать его в фильтре Вина. Для частиц с относительно большим значением магнитной аномалии, например протонов, необходимо размещение нескольких пар магнитных сегментов с фильтрами Вина. В результате аналитического исследования было продемонстрировано, что частота спин-прецессии линейна по ЭДМ, и инвариантная ось прецессии лежит в плоскости кольца. В результате, систематический вклад от МДМ в измеряемую частоту может быть вычтен при обратной инъекции пучка, и ЭДМ-сигнал частиц может быть измерен частотным методом. [17] (А.А. Мельников)

Одним из возможных вариантов модернизации инжекционного комплекса коллайдера НИКА является проектирование накопителя в форме 8, перспективного с точки зрения спиновой динамики. Одними из главных достоинств такой структуры являются: отсутствие пересечения спиновых резонансов при ускорении пучка и возможность управлять поляризацией в спин-прозрачном режиме. Более того, кольцо формы

8 характеризуется временем когерентности спинов несколько часов. Данная гипотеза была численно проверена и объяснена с точки зрения сдвига равновесного уровня энергии частиц. При этом происходит компенсация угла поворота спина в противоположных арках с учётом влияния вторых порядков отклонений по фазовым координатам на декогеренцию. Долгое время спиновой когерентности является крайне положительным условием для набора статистических данных при проведении прецизионных экспериментов с поляризованными пучками. Например, это может быть поиск аксиноподобных частиц. Было показано, что для этого в структуру ускорителя необходимо добавить фильтр Вина для задания спиновой частоты и поиска резонанса с аксионным полем. Также это может быть поиск ЭДМ легких ядер. Для этого в структуру должны быть добавлены фильтры Вина на прямых секциях для компенсации угла поворота спина в арках и соленоиды-змейки, позволяющие накапливать вращение спина от ЭДМ в структуре. В рамках данного исследования представлены и проанализированы указанные варианты модификаций структуры формы 8 для поиска нарушения фундаментальных симметрий. [18] (А.А. Мельников)

Список публикаций

- [1] S.N. Vergeles, Unitarity of 4D lattice theory of gravity, Phys. Rev. D 112, 054509 (2025).
- [2] G.E. Volovik, Tsallis-Cirto entropy of black hole and black hole atom, Письма в ЖЭТФ 121, 260-262 (2025).
- [3] G.E. Volovik, Proton decay in de Sitter environment, prepared for collection of papers dedicated to the memory of Alexei Starobinsky, arXiv:2411.01892.
- [4] G.E. Volovik, Extended Tsallis-Cirto entropy for black and white holes, Письма в ЖЭТФ 122, 261-263 (2025).
- [5] G.E. Volovik, First law of de Sitter thermodynamics, Письма в ЖЭТФ 121, 806-808 (2025).
- [6] G.E. Volovik, Thermodynamics of black and white holes in ensemble of Planckons, accepted in JETP, arXiv:2506.13145 [gr-qc].
- [7] G.E. Volovik, Thermodynamic and quantum fluctuations of horizon area, arXiv:2508.08006.
- [8] G.E. Volovik, Thermodynamics of Kerr black hole: Tsallis-Cirto composition law and entropy quantization, arXiv:2509.00748.
- [9] G.E. Volovik, Comment on "Topological origin of horizon temperature via the Chern-Gauss-Bonnet theorem Письма в ЖЭТФ 122, 430-431 (2025).
- [10] B.G. Zakharov, Nuclear modification factor I_{AA} in AA collisions at RHIC and LHC energies in scenarios with and without quark-gluon plasma formation in pp collisions, JETP Letters 122(5), 269 (2025).
- [11] B.G. Zakharov, Predictions for R_{AA} in 5.36 TeV C+C, O+O, and Ne+Ne collisions at the LHC, Письма в ЖЭТФ 122(8), 437 (2025).
- [12] J. Slim, F. Rathmann, N.N. Nikolaev, A. Melnikov et al. (JEDI Collaboration), Proof-of-principle demonstration of a pilot bunch comagnetometer in a stored beam, Phys. Rev. Res. 7, 023257 (2025).
- [13] V. Hejny, J. Pretz, F. Abusaif, A. Melnikov, N.N. Nikolaev et al (JEDI Collaboration), Maintaining a resonance condition of an rf spin rotator through a feedback loop in a storage ring, Phys. Rev. Accel. Beams 28, 062801 (2025).

- [14] Grigor Atoian, Nigel Buttimore, Giuseppe Ciullo, Ian Cloet, Marco Contalbrigo, A. Melnikov, N.N. Nikolaev et al., Realizing the Scientific Program with Polarized Ion Beams at EIC, направлено в Phys. Rev. C; arXiv:2510.10794 [nucl-ex].
- [15] F. Rathmann, A. Nass, K.O. Eyser, V. Shmakova, E.C. Aschenauer, G. Atoian, A. Cannavo, X. Chu, K. Hock, H. Huang, H. Lovelace, G. Mahler, N.N. Nikolaev, J. Ritter, G. Robert-Demolaize, V. Schoefer, P. Shanmuganathan, E. Shulga, H. Soltner, and Z. Zhang, Eliminating beam-induced depolarizing effects in the hydrogen jet target for high-precision proton beam polarimetry at the Electron-Ion Collider, Phys. Rev. Accel. Beams accepted (2026).
- [16] Ю. В. Сеничев, А. Е. Аксентьев, С. Д. Колокольчиков, А. А. Мельников, В. П. Ладыгин, Е. М. Сыресин, Рассмотрение адаптированной структуры Нуклотрона для поиска электрического дипольного момента легких ядер, Ядерная физика и инжиниринг 16, с. 304–309 (2025).
- [17] A.A. Melnikov, Yu. V. Senichev, A. E. Aksentyev, S. D. Kolokolchikov, Investigation of the Quasi-frozen Spin Lattice for the EDM Search, Phys. Atom. Nuclei 88, pp. 1–4 (2025).
- [18] A. Melnikov, S. Kolokolchikov, A. Aksentyev, Y. Senichev, Investigation of Spin-Decoherence in a Figure-8 Ring to Search for CP-Violation Sources, Physics of Particles and Nuclei Letters принята (2026).

5.7 Транспорт в неупорядоченных системах: от наноструктур до турбулентной атмосферы

В 2025 году лаборатория перспективных исследований в физике конденсированного состояния проводила работу по нескольким направлениям (транспорт в низкоразмерных системах и наноструктурах; открытые диссипативные квантовые системы; процессы взаимодействия поверхностных волн и гидродинамических течений; распространение электромагнитного излучения в турбулентной среде; стохастическая динамика полимеров в турбулентных течениях), объединенных в рамках общей тематики — транспорт в неупорядоченных системах. Ниже приводятся основные результаты, полученные в 2025 году.

Энергетический спектр экситонов в муаровых сверхрешетках на основе дихалькогенидов переходных металлов

В работе рассматривается вопрос энергетического спектра экситонов в муаровых сверхрешетках на основе дихалькогенидов переходных металлов. Предложен механизм делокализации оптически-активных экситонов за счет их взаимодействия с индуцированным ими электромагнитным полем. Был рассчитан экситонный спектр, который содержит две ветви. В пределе малых волновых векторов по сравнению с обратным периодом решётки одна из них продольная и обладает линейной дисперсией, вторая — поперечная и бездисперсионная. На основе полученного спектра был рассчитан коэффициент диффузии для квазиклассического режима и показано, что в случае режима с сильным беспорядком дальнедействующий характер переноса между узлами решетки посредством электромагнитного поля приводит к степенному закону зависимости коэффициента диффузии от температуры [1]. (А.М. Шенцев)

Конфигурации магнитных скирмионов высокого порядка и пирловского вихря в связанном состоянии в тонких гетероструктурах сверхпроводник/киральные магнетик

В рамках магнитного энергетического функционала гибридной 2D структуры сверхпроводник/киральные магнетик, в котором учитываются обменное взаимодействие, одноионная анизотропия, а также орбитальные и зеемановские эффекты полей рассеяния пирловского вихря, изучены условия стабилизации магнитных скирмионов высокого порядка со значениями топологического заряда $|Q| = 3, 4$. В отличие от ранее изученного случая $|Q| = 2$, скирмионы с более высоким топологическим зарядом $|Q|$ не обязаны формировать некоаксиальные конфигурации связанной пары с вихрем Пирла. При этом для скирмионов с $|Q| = 3$ конкуренция взаимодействий в континуальном пределе допускает различную степень коаксиальности, однако коаксиальная конфигурация не может быть стабилизирована на реальной дискретной решетке из-за малых размеров скирмионов. Скирмионы с $|Q| = 4$ формируют устойчивые коаксиальные пары с вихрем Пирла [2]. (М.С. Шустин)

Индукцируемые диссипацией неравновесные стационарные состояния в топологических сверхпроводниках

Поиск условий, обеспечивающих вырожденные стационарные состояния в неравновесных топологических сверхпроводниках, важен для развития диссипативной квантовой инженерии — области, привлекающей значительное внимание исследователей в последнее десятилетие. В данной работе мы рассматриваем такую задачу, исследуя топологические сверхпроводники, содержащие неспаренные майорановские моды, под влиянием диссипативных полей окружающей среды. В рамках формализмов Горини — Коссаковского — Судариана — Линдблада и третичного квантования найдено соответствие между равновесными майорановскими модами и неравновесными нулевыми кинетическими модами. Представлено простое алгебраическое соотношение между количеством таких возбуждений, выраженное через гибридизацию одночастичных волновых функций майорановских мод и линейных диссипативных полей. Основываясь на этих результатах, были предложены практические рецепты стабилизации вырожденных стационарных состояний в топологических сверхпроводниках посредством контролируемого управления диссипацией. Для демонстрации результатов общей теории проведено рассмотрение модели цепочки Китаева класса BDI с дальними перескоками и сверхпроводящими спариваниями — системы, в которой, как известно, существуют устойчивые краевые майорановские моды. По результатам исследования была подготовлена статья, в данный момент находящаяся на рассмотрении в журнале *SciPost Physics* [3]. (М.С. Шустин, И.С. Бурмистров)

Неустойчивость темновых состояний в двухзонных фермионных системах с диссипативной динамикой при сохранении общего числа частиц

Опубликована работа с результатами исследования класса двухзонных фермионных систем, подверженных диссипации, сохраняющей общее число частиц. По построению эти модели имеют гарантированное устойчивое состояние — темновое состояние — с полностью заполненной нижней зоной и пустой верхней зоной. В пределе слабой диссипации мы выводим уравнения, описывающие динамику фермионной плотности на больших масштабах длины и времени. Они принадлежат к классу реакционно-диффузионных уравнений Фишера-Колмогорова-Петровского-Пискунова. Наш анализ показывает, что темновое состояние является неустойчивым, уступая место новому устойчивому состоянию с конечной плотностью частиц в верхней зоне. Для таких систем в работе найден физический процесс, приводящий к неустойчивости, который оказался аналогичен процессу ударной ионизации в полупроводниках. Таким образом, диссипативные системы с сохраняющимся числом частиц, вероятно, не являются надежным универсальным инструментом для стабилизации темновых состояний [4]. (А.А. Люблинская, И.С. Бурмистров)

Диодный эффект в ступенях Шапиро в асимметричном СКВИДе с сверхпроводящим мостиком

Разработан теоретический подход с использованием метода медленных переменных в резистивной модели джозефсоновского контакта (RSJ), позволяющий объяснить особенности джозефсоновского диодного эффекта (ДДЭ), наблюдаемого в асимметричном СКВИДе со сверхпроводящим мостиком в недавних экспериментах. Для таких

систем мы предсказываем новый (амплитудный) механизм ДДЭ, который возникает из-за наличия сверхпроводящего наномостика с многозначной ток-фазовой зависимостью. Технически этот механизм проявляется в зависимости амплитуды первой джозефсоновской гармоники ток-фазового соотношения всего СКВИДа от направления тока. Мы показываем, что этот механизм объясняет наблюдаемый в эксперименте выраженный асимметричный характер ступенек Шапиро, который сосуществует с относительно малой асимметрией критических токов. Кроме того, мы исследуем, как диодная эффективность (количественно определяемая через асимметрию ступеней Шапиро) зависит от магнитного потока через сверхпроводящее кольцо и от мощности внешнего СВЧ-облучения. Наши теоретические предсказания хорошо согласуются с экспериментальными наблюдениями [5]. (Г.С. Селезнев)

Нелинейная генерация течений волнами на поверхности жидкости

Затухание поверхностных волн из-за вязкой диссипации сопровождается возбуждением медленных вихревых течений благодаря сохранению полного импульса. Мы представляем теоретическую модель для волн малой амплитуды, объясняющую эксперименты по генерации вихревых течений скрещенными волнами. Особое внимание уделено влиянию поверхностных загрязнений, которое учтено в рамках модели тонкой жидкой эластичной плёнки, приводящей к усилению диссипации волн и интенсификации вихревых течений. При увеличении амплитуды течений необходимо учитывать их взаимодействие с волнами. Предложена теоретическая схема, описывающая данное взаимодействие, с демонстрацией её применимости к классическим задачам: волнам Гуйона, распространению коротких волн навстречу течению и циркуляции Ленгмора. В заключение описаны экспериментальные данные для турбулентного режима генерации течений, реализующегося при достаточно большой амплитуде волн, и обозначены открытые вопросы в этом направлении [6]. (С.С. Вергелес, В.М. Парфеньев)

Стохастическая динамика полимерных молекул в вязком подслое эластической турбулентности

Хаотическая динамика полимерных растворов представляет интерес в связи с наблюдаемыми в таких системах эффектами. Так, к примеру, добавление в турбулентную жидкость с большим числом Рейнольдса даже относительно небольшого количества полимерной примеси может приводить к существенному уменьшению гидродинамического сопротивления течению. Еще одним интересным явлением служит так называемая эластическая турбулентность – возбуждаемое при низких числах Рейнольдса состояние хаотического движения полимерного раствора.

Большая часть теоретических работ на тему динамики отдельных полимерных молекул в хаотических течениях посвящены случаю однородных и изотропных по статистическим свойствам флуктуаций поля скорости. Нами была рассмотрена задача теоретического моделирования статистики координаты и вектора растяжения конечнорастяжимого полимера с нелинейной упругостью, помещенного в вязкий подслой турбулентного течения несжимаемой жидкости. Течение в указанной области представляет собой пример пространственно неоднородного и неизотропного хаотического поля скорости, что обусловлено граничными условиями непроницаемости и непро-

скальзывания на стенке.

В ходе исследования было получено кинетическое уравнение на функцию плотности вероятности координаты и вектора растяжения полимера в вязком подслое, описаны ключевые безразмерные параметры, определяющие различные режимы поведения полимера, а также получены локально-равновесные выражения для средних значений некоторых связанных с растяжением полимера величин в сильно нелинейном режиме растяжений. Вывод кинетического уравнения выполнен в предположении об относительной малости времени корреляции турбулентных флуктуаций на фоне характерных масштабов времени результирующей динамики полимера. Данное предположение, как показано, оказывается оправданным в режиме сильных растяжений с локально равновесной статистикой [7]. (С.А. Белан)

Нелинейная динамика везикул

Везикулы - замкнутые оболочки из липидного бислоя, который представляет собой гибкую, но несжимаемую двумерную жидкую мембрану. Особый интерес представляет неравновесный отклик сдутых везикул на внешние воздействия, что актуально для медицинских и технологических приложений (например, в микрофлюидике и доставке лекарств). Исследование включало два взаимодополняющих направления: разработку эффективных вычислительных алгоритмов и получение новых физических результатов.

Для численного моделирования был разработан метод касательной динамики, позволяющий поддерживать оптимальную локальную плотность узлов (точек коллокации). Существенного ускорения вычислений удалось достичь благодаря созданию схемы дискретизации интегральных операторов с логарифмической особенностью, эффективной как по времени, так и по точности. Кроме того, реализован метод устранения численной неустойчивости при вычислении сил Хельффриха вблизи оси симметрии, основанный на аналитическом выделении сингулярной части. Это позволило подавить погрешность, которая ранее росла с увеличением числа точек коллокации. В рамках изучения так называемой «жемчужной неустойчивости» (pearling instability) - образования цепочки сферических бусин из цилиндрической везикулы под действием растягивающего потока - было показано, что характерная скорость развития неустойчивости превышает скорость растяжения самой везикулы. Это позволило построить аналитическую теорию нейтральных мод возмущений в поле адиабатически изменяющегося контрольного параметра. Прямой численный анализ подтвердил, что критическое возмущение локализовано на масштабе, существенно меньшем длины везикулы. Установлено, что ключевую роль в развитии неустойчивости играют начальные тепловые флуктуации. Их учет в прямом численном моделировании позволил добиться лучшего согласия с экспериментальными данными касательно порядка образования бусин. Используя аналитическое решение задачи об обтекании везикулы в форме сфероида, мы получили асимптотически точное значение критической скорости растягивающего потока в зависимости от степени вытянутости везикулы. Дополнительно была исследована неустойчивость под действием внешней силы, локализованной на полюсах везикулы и растущая с длиной везикулы медленнее, чем гидродинамическая сила в потоке. В этом случае были обнаружены качественно иные режимы динамики после образования жемчужной структуры. (М.А. Шишкин)

Флуктуации интенсивности светового пучка при распространении в турбулентной среде

Рассмотрено распространение лазерного излучения в турбулентной среде. Получены результаты для двухточечной корреляционной функции интенсивностей, охватывающие широкий диапазон уровней сцинтилляций — от слабых до сильных. В асимптотическом пределе больших расстояний между точками приёмника излучения была выявлена универсальная (не зависящая от уровня сцинтилляций) степенная зависимость поправки к интенсивности от расстояния между точками измерений. Указанный результат был получен с применением диаграммной техники, обеспечивающей более высокую точность по сравнению с приближёнными методами, использовавшимися в исследованиях 1970-х годов. Статья с изложением результатов работы по данному направлению принята к печати в журнале «Письма в ЖЭТФ» [8]. (Н.Г. Маснев)

Список публикаций

- [1] A.M. Shentsev, M.M. Glazov, Electromagnetic field assisted exciton diffusion in moiré superlattices, Phys. Rev. B 111, 045301 (2025).
- [2] А.Д. Федосеев, М.С. Шустин, Д.М. Дзедзисашвили, Конфигурации магнитных скирмионов высокого порядка и пирловского вихря в связанном состоянии, ФТТ 67, 1298 (2025).
- [3] M.S. Shustin, S.V. Aksenov, I.S. Burmistrov, Dissipation-Induced Steady States in Topological Superconductors: Mechanisms and Design Principles, на рецензии в SciPost Physics; arXiv:2508.11242.
- [4] A.A. Lyublinskaya, P. A. Nosov, I. S. Burmistrov, Instability of the engineered dark state in twoband fermions under number-conserving dissipative dynamics, Phys. Rev. B 111, 094302 (2025).
- [5] D.S. Kalashnikov, G.S. Seleznev, A. Kudriashov, I. Babich, D. Y. Vodolazov, Y.V. Fominov, V.S. Stolyarov, Diode effect in Shapiro steps in an asymmetric SQUID with a superconducting nanobridge, Phys. Rev. B 112, 144504 (2025).
- [6] С.С. Вергелес, А.А. Левченко, В.М. Парфеньев, Нелинейная генерация течений волнами на поверхности жидкости, Успехи Физических Наук 196, 1199 (2025).
- [7] С.А. Белан, Кинетическое уравнение для полимера с нелинейной упругостью в вязком пристенном подслое турбулентности, ЖЭТФ принята.
- [8] Н.Г. Маснев, Корреляции интенсивности светового пучка, распространяющегося в турбулентной среде, Письма в ЖЭТФ принята.

