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



2024



В 2024 г. Институту теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН исполнилось 60 лет с момента создания. В течение года проходили события и мероприятия, приуроченные к этой юбилейной дате. В апреле 2024 г. в ИТФ состоялись выборы директора. Коллектив института проголосовал за новый 5-летний срок И.В. Колоколова на посту директора института. В сентябре 2024 г. на выборах Ученого Совета института был значительно обновлен его состав.

За прошедший год сотрудниками института было издано 3 монографии и опубликовано 100 научных статей, в том числе в таких высоко-рейтинговых международных журналах как Nature Communications (1) и Physical Review Letters (2).

В 2024 г. продолжалось омоложение научного коллектива ИТФ. Институт выиграл грант Минобрнауки на создание молодежной лаборатории. Это позволило привлечь в ИТФ несколько молодых теоретиков, в том числе 3-х аспирантов, 1 кандидата и 1 доктора физико-математических наук. Также в 2024 г. ИТФ выиграл грант РНФ на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами.

В 2024 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 2024 г. в институте были проведены две международных конференции и одна научная школа. В том числе был сделан первый шаг по взаимодействию между ИТФ и рядом центров теоретической физики в Индии. Традиционно сотрудники института были в составе оргкомитетов нескольких российских и международных конференций и научных школ, прошедших в 2024 г.

В 2024 г. была возобновлена традиция проведения молодежного конкурса научных работ. В 2024 г. в конкурсе участвовало 11 работ аспирантов и студентов.

В 2024 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 2024 г. институт понёс потери. 6 июня 2024 г. ушёл академик Сергей Петрович Новиков, великий ученый и замечательный учитель.

Оглавление

1	Основные научные результаты	4
2	Научные мероприятия	13
3	Образовательная деятельность	16
4	Награды	17
5	СМИ об институте	18
6	Научные результаты	25
6.1	Новые эффекты в физике конденсированного состояния вещества	26
6.2	Квантовые явления в наноструктурах и новых материалах	37
6.3	Нелинейные режимы взаимодействия вещества и излучения . . .	46
6.4	Хаотическая и регулярная динамика систем гидродинамического типа	53
6.5	Квантовая теория поля, теория струн и математическая физика .	62
6.6	Сильные взаимодействия, релятивистская астрофизика, гравита- ция, космология	70
6.7	Транспорт в неупорядоченных системах: от наноструктур до тур- булентной атмосферы	80

1 Основные научные результаты

В 2024 г. сотрудниками ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН были получены следующие основные результаты. Впервые разработана теория динамики изгибных деформаций в гибких двумерных материалах с учетом ненулевого натяжения, которое реализуется экспериментально в наномеханических резонаторах на основе графена и других одноатомных слоев. Проведено совместное теоретическое и экспериментальное исследование зависимости волны зарядовой плотности от деформации кристалла на примере трителлуридов редкоземельных металлов. Проведено исследование влияния конечной емкости контактов и температуры на характер проявления джозефсоновского ди-

одного эффекта в асимметричных СКВИДах. Впервые предложен эксперимент, позволяющий измерить величину отклонения углового распределения ультрахолодных нейтронов при диффузном рассеянии от закона Ламберта. Исследована двумерная квантовая хромодинамика в пределе большого количества цветов, так называемая модель 'т Хоофта, для которой показано, что спектр в этой модели можно эффективно искать, используя методы интегрируемости. Впервые исследовано влияние цветовой рандомизации партонa на p_T уширение быстрого партонa в неравновесной кварк-глюонной плазме при наличии турбулентных коллективных цветных полей.

Волны плотности заряда, управляемые одноосным напряжением

П.Д. Григорьев

Проведено совместное (теоретическое и экспериментальное) исследование зависимости волны зарядовой плотности (ВЗП) от деформации кристалла на примере трителлуридов редкоземельных металлов. Показано, что небольшая деформация TbTe₃ может оказать существенное влияние на его ВЗП, с ориентационным переходом между двумя перпендикулярными направлениями её волнового вектора, управляемым параметром a/c – отношением постоянных кристаллической решетки вдоль двух главных осей, с крошечной областью сосуществования вблизи $a=c$ и без изменения пространственной группы. Температура перехода ВЗП Тс показывает линейную зависимость от

$a-c$, в то время как щель в электронном спектре и скачок сопротивления насыщаются вдали от области сосуществования. Дано теоретическое объяснение этим результатам. Такое поведение хорошо объясняется в рамках модели сильной связи, если учесть ещё зависимость электрон-электронного взаимодействия от волнового вектора. Наши результаты ставят под сомнение связь ВКШ между щелью и Тс в системах RTe₃. Работа открывает новый путь к изучению сосуществующих или конкурирующих электронных порядков в конденсированном веществе с помощью деформации.

Работа поддержана госзаданием FFWR-2024-0015.

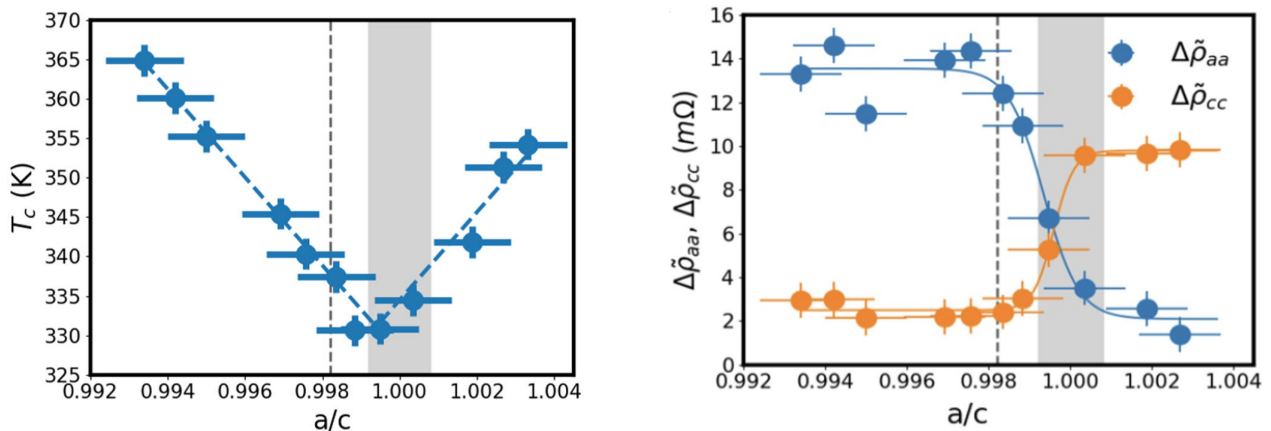


Рис. 1: (Левая панель) Влияние одноосной деформации на температуру перехода в состояние с волной зарядовой плотности в TbTe₃; a и c – размер элементарной ячейки вдоль главных осей. (Правая панель) Зависимость сопротивления вдоль главных осей в проводящей плоскости в TbTe₃ от одноосной деформации, определяемой отношением постоянных решетки a/c .

Результаты опубликованы:

1. A. Gallo-Frantz, A.A. Sinchenko, D. Ghoneim, L. Ortega, P. Godard, P.-O. Renault, P.D. Grigoriev, A. Hadj-Azzem, P. Monceau, D. Thiaudière, E. Bellec, V.L.R. Jacques, D. Le Bolloc'h, *Charge density waves tuned by biaxial tensile stress*, Nature Communications 15, 3667 (2024).

Метод измерения отклонения от закона Ламберта при диффузном рассеянии ультрахолодных нейтронов на материальных стенках

П.Д. Григорьев, А.М. Дюгаев

Моделирование движения ультрахолодных нейтронов (УХН) важно для оценки их потерь, точного измерения их времени жизни и для описания других экспериментов. В материальных ловушках необходимо учитывать не только зеркальное, но и диффузное упругое отражение УХН от стенок ловушки. Обычно для описания такого диффузного рассеяния применяют косинусоидальный закон Ламберта для углового распределения рассеявшихся нейтронов, который не имеет строгого теоретического вывода и часто нарушается. В нашей работе предложен экс-

перимент, позволяющий измерить величину отклонения углового распределения УХН при диффузном рассеянии от закона Ламберта. Это отклонение можно определить по разнице числа нейтронов, вылетающих через центральное и торцевое окно длинной узкой ловушки УХН. Проведены Монте-Карло расчёты, соответствующие возможному эксперименту и показывающие значительную величину эффекта для разных форм ловушки.

Работа поддержана грантом РНФ № 23-22-00312.

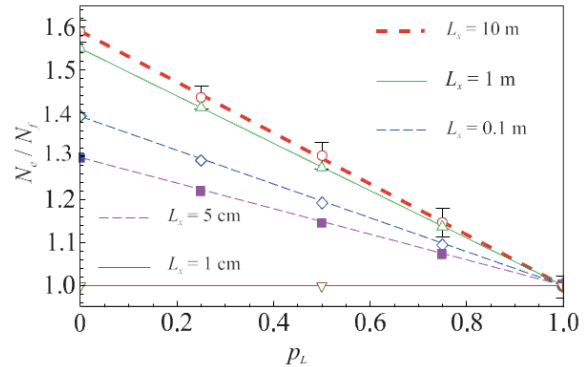
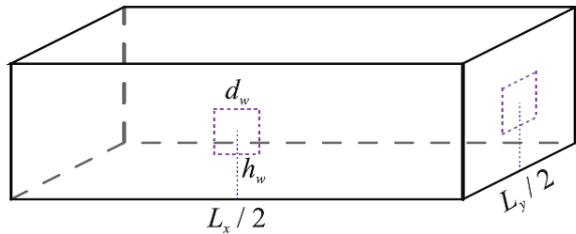


Рис. 2: (Левая панель) Вытянутая материальная ловушка для УХН размером $L_x \times L_y \times L_z$. Квадратные отверстия (переднее и торцевое) размера d_w , расположены на высоте h_w , через них нейтроны вылетают из ловушки. (Правая панель) Отношение количества нейтронов, прошедших через торцевое отверстие N_c к количеству нейтронов, прошедших через переднее отверстие N_f как функция вероятности ламбертовского рассеяния p_L , для ловушек различной длины L_x .

Результаты опубликованы:

1. П.Д. Григорьев, В.Д. Кочев, В.А. Цыплухин, А.М. Дюгаев, И.Я. Полищук, *Метод измерения отклонения от закона Ламберта при диффузном рассеянии ультрахолодных нейтронов на материальных стенках*, Письма в ЖЭТФ 120(12), 911 (2024).

Затухание изгибных фононов в двумерных упругих материалах

А.Д. Коковин, И.С. Бурмистров

Разработана теория динамики изгибных деформаций в гибких двумерных материалах с учетом ненулевого натяжения – ситуация реализуемая экспериментально в наномеханических резонаторах на основе графена и других одноатомных слоев. Изучено затухание изгибных фононов в свободно подвешенных кристаллических мембранах. Продемонстрировано, что перенормировка динамических свойств не включает в себя расходящиеся на ультрафиолете логарифмические вклады, в отличие от статических. Этот факт позволяет найти скейлинговый вид затухания, определить его асимптотическое поведение на малых и боль-

ших частотах и получить точное выражение для динамического показателя изгибных фононов в длинноволновом пределе: $z=2-\eta/2$. Здесь η – универсальный показатель, управляющий статической перенормировкой изгибной жесткости. Также определен динамический показатель для длинноволновых плоскостных фононов: $z'=(2-\eta/2)/(1+\eta/2)$. Полученные результаты сравнены с экспериментами по изучению фононных спектров в графене и динамике наномеханических резонаторов на основе графена. Также была разработана теория затухания изгибных фононов в гибких двумерных кристаллических материалах с конечным натяжением.

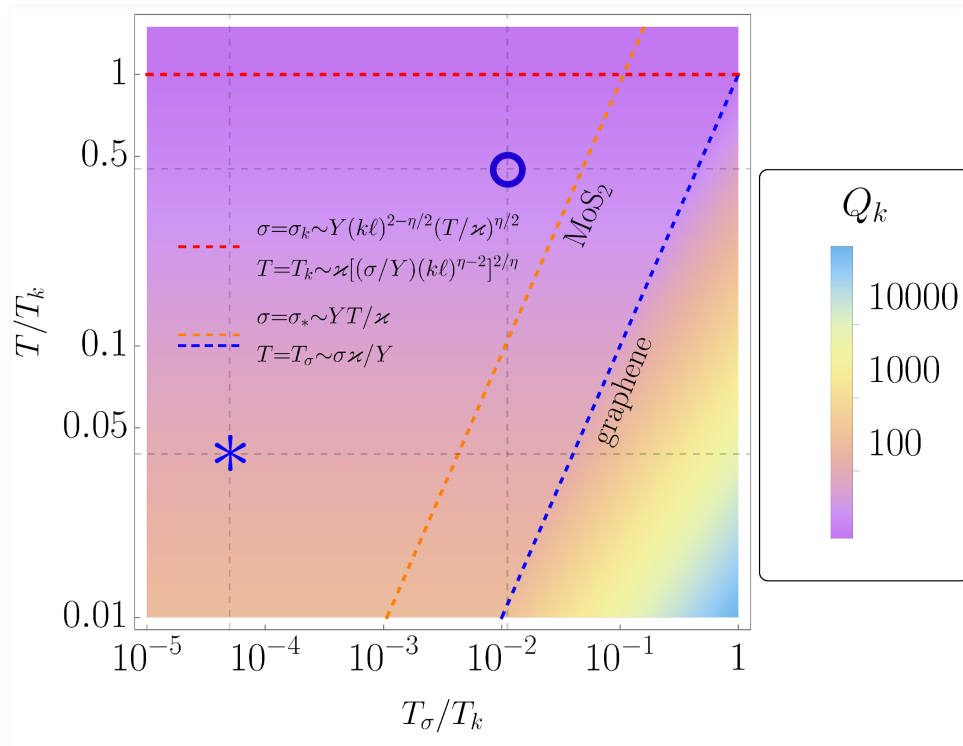


Рис. 3: Цветная карта зависимости фактора добротности линии от температуры T и натяжения σ , для малых волновых векторов k . Звездочка и круг обозначают ожидаемую добротность для графена и MoS_2 с учетом реалистичных параметров.

Продemonстрировано, что наличие ненулевого натяжения сильно уменьшает относительную величину затухания и, следовательно, приводит к параметрическому сужению спектральной линии фононов из-за управляемого механиче-

ским натяжением подавления эффектов запаздывания в динамически экранированном межфононном взаимодействии. Предсказана степенная зависимость ширины спектральной линии от температуры и механического натяжения. Предсказанное подавление затухания фононов механическим натяжением может быть причиной высоких показателей добротности механических нанорезонаторов на основе изгибных двумерных материалов (см. Рис. 3).

Работа поддержана госзаданием FFWR-2024-0015.

Результаты опубликованы:

1. A. D. Kokovin, V. Yu. Kachorovskii, I. S. Burmistrov, *Narrowing of the flexural phonon spectral line in stressed crystalline two-dimensional materials*, Phys. Rev. Lett. 133, 136203 (2024).
2. A. D. Kokovin, I. S. Burmistrov, *Attenuation of flexural phonons in free-standing crystalline two-dimensional materials*, Phys. Rev. B 110, 125432 (2024).

Влияние емкости и температурных флуктуаций на джозефсоновский диодный эффект в асимметричных СКВИДах с высшими джозефсоновскими гармониками

Г.С. Селезнёв, Я.В. Фоминов

Асимметричные СКВИДы, в рукавах которых находятся разные джозефсоновские контакты (рис. 4а) с высшими джозефсоновскими гармониками в ток-фазовых соотношениях, демонстрируют джозефсоновский диодный эффект (различие характеристик системы при протекании тока в разные стороны). В таких системах сила и знак диодного эффекта контролируются значением магнитного потока Φ через петлю интерферометра. Мы исследуем влияние конечной емкости контактов и температуры на характер прояв-

ления джозефсоновского диодного эффекта в асимметричных СКВИДах. Основное внимание уделяется “минимальной модели”, в которой один контакт имеет синусоидальную ток-фазовую характеристику $\sin \varphi$, а другой помимо этого имеет дополнительную вторую гармонику $\sin 2\varphi$. В рамках резистивно-емкостной модели мы аналитически и численно находим вольт-амперную характеристику (ВАХ) (рис. 4б) асимметричного СКВИДа, которая в данном случае оказывается асимметричной и гистерезисной.

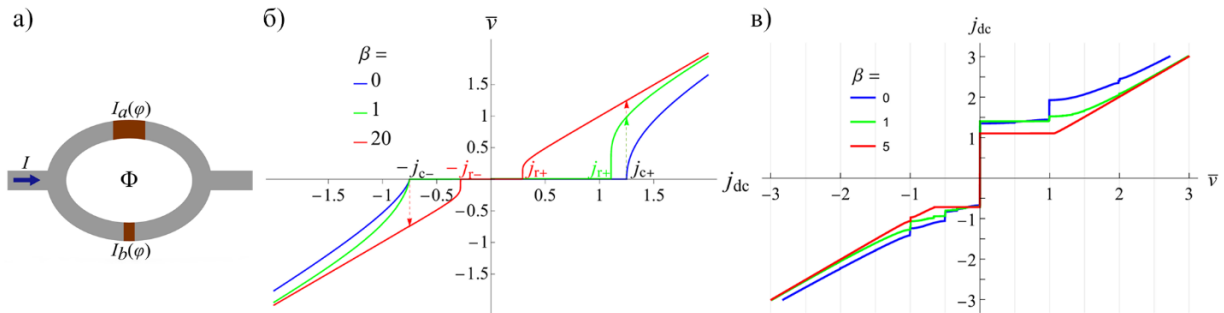


Рис. 4: (а) Асимметричный СКВИД, содержащий два разных джозефсоновских контакта. (б) Вольт-амперная характеристика асимметричного СКВИДа при разных значениях параметра МакКамбера (емкости контактов). Зеленая кривая демонстрирует режим одностороннего гистерезиса. (в) Асимметрия ступеней Шапиро (положительных и отрицательных) при разных значениях параметра МакКамбера. Асимметрия максимальна при малых значениях параметра МакКамбера.

При этом в случае конечных емкостей контактов на ВАХ возникает качественно новая особенность, которая не наблюдается в случае нулевых емкостей — асимметрия токов возврата. Наиболее ярким проявлением этой особенности является режим одностороннего гистерезиса, при котором гистерезис в системе наблюда-

ется только при одном направлении тока (с током возврата j_r меньше критического тока j_c в этом направлении). В то же время, диодный эффект на резистивной ветке ВАХ оказывается максимален при малых емкостях контактов. В частности, это так для асимметрии высот ступенек Шапиро в случае внешнего облучения

системы (рис. 4в). Кроме того, мы изучаем влияние температурных флуктуаций на джозефсоновский диодный эффект в рассматриваемой системе. В режиме низких температур из-за эффекта термоактивации флуктуации приводят к экспоненциально сильной асимметрии ВАХ, а также к асимметрии токов переключения, возникающих как под воздействием самих температурных флуктуаций, так и в режиме синхронизации с внешним облучением. Основываясь на описанных выше особенностях, мы обсуждаем оптимальный выбор параметров системы для различных экспериментов с джозефсоновскими диодами.

Результаты получены в рамках гранта РФФ 24-12-00357.

Результаты опубликованы:

1. G. S. Seleznev, Ya. V. Fominov, *Influence of capacitance and thermal fluctuations on the Josephson diode effect in asymmetric higher-harmonic SQUIDs*, Phys. Rev. B 110, 104508 (2024).

Спектр масс мезонов в модели 'т Хоофта

А.В. Литвинов, П.А. Мещеряков

Исследована двумерная квантовая хромодинамика в пределе большого количества цветов, так называемая модель 'т Хоофта. 'т Хоофтом еще в 1972 году было выведено интегральное уравнение, описывающее спектр масс мезонов в этой модели. В нашей работе показано, что спектр в этой модели можно эффективно искать, используя методы интегрируемости. А именно, данное уравнение было сведено в так называемому TQ-уравнению Бак-

стера. Мы разработали методы аналитического вычисления спектральных сумм и WKB разложения для спектра в случае, когда массы кварков, составляющих мезон, произвольные, но при этом одинаковые. Полученные нами результаты обобщают результаты, полученные ранее Фатеевым, Лукьяновым и Замолотчиковым для специального значения масс.

Работа поддержана грантом РФФИ 23-12-00333.

α	-0.5			-0.1			0.1			0.5		
n	$\lambda_n^{(6)}$	$\delta\lambda, \%$	$\lambda_n^{(num)}$	$\lambda_n^{(6)}$	$\delta\lambda, \%$	$\lambda_n^{(num)}$	$\lambda_n^{(6)}$	$\delta\lambda, \%$	$\lambda_n^{(num)}$	$\lambda_n^{(6)}$	$\delta\lambda, \%$	$\lambda_n^{(num)}$
0	0.21518	3.1	0.22186	0.23671	43.8	0.34048	0.27578	43.6	0.39614	0.33815	48.8	0.50322
2	1.14542	$3.5 \cdot 10^{-3}$	1.14538	1.33177	$2.1 \cdot 10^{-3}$	1.33180	1.41514	$2.4 \cdot 10^{-3}$	1.41518	1.57042	$1.6 \cdot 10^{-3}$	1.57044
4	2.11510	$7.3 \cdot 10^{-6}$	2.11511	2.32668	$3.0 \cdot 10^{-5}$	2.32668	2.42124	$3.5 \cdot 10^{-5}$	2.42124	2.59703	$2.9 \cdot 10^{-6}$	2.59703
6	3.09608	$9.1 \cdot 10^{-5}$	3.09608	3.32323	$2.0 \cdot 10^{-6}$	3.32323	3.42495	$2.2 \cdot 10^{-6}$	3.42495	3.61415	$2.2 \cdot 10^{-6}$	3.61415
8	4.08220	$9.3 \cdot 10^{-5}$	4.08221	4.32064	$3.7 \cdot 10^{-7}$	4.32064	4.42763	$2.9 \cdot 10^{-7}$	4.42763	4.62684	$4.7 \cdot 10^{-7}$	4.62684
10	5.07129	$8.9 \cdot 10^{-5}$	5.07130	5.31857	$2.0 \cdot 10^{-7}$	5.31857	5.42974	$8.8 \cdot 10^{-8}$	5.42974	5.63694	$4.6 \cdot 10^{-8}$	5.63694
12	6.06230	$8.6 \cdot 10^{-5}$	6.06231	6.31684	$1.6 \cdot 10^{-7}$	6.31684	6.43148	$5.4 \cdot 10^{-8}$	6.43148	6.64535	$7.4 \cdot 10^{-8}$	6.64535
14	7.05466	$8.2 \cdot 10^{-5}$	7.05466	7.31537	$1.6 \cdot 10^{-7}$	7.31537	7.43296	$4.8 \cdot 10^{-8}$	7.43296	7.65254	$1.2 \cdot 10^{-7}$	7.65254
16	8.04801	$8.0 \cdot 10^{-5}$	8.04802	8.31408	$1.5 \cdot 10^{-7}$	8.31408	8.43425	$4.6 \cdot 10^{-8}$	8.43425	8.65883	$1.3 \cdot 10^{-7}$	8.65883
18	9.04213	$7.7 \cdot 10^{-5}$	9.04214	9.31294	$1.5 \cdot 10^{-7}$	9.31294	9.43539	$4.6 \cdot 10^{-8}$	9.43539	9.66442	$1.4 \cdot 10^{-7}$	9.66442
20	10.0369	$7.5 \cdot 10^{-5}$	10.0369	10.3119	$1.5 \cdot 10^{-7}$	10.3119	10.4364	$4.6 \cdot 10^{-8}$	10.4364	10.6695	$1.5 \cdot 10^{-7}$	10.6695
22	11.0321	$7.4 \cdot 10^{-5}$	11.0321	11.3110	$1.5 \cdot 10^{-7}$	11.3110	11.4374	$4.6 \cdot 10^{-8}$	11.4374	11.6740	$1.5 \cdot 10^{-7}$	11.6740
24	12.0277	$7.2 \cdot 10^{-5}$	12.0277	12.3101	$1.5 \cdot 10^{-7}$	12.3101	12.4382	$4.6 \cdot 10^{-8}$	12.4382	12.6782	$1.5 \cdot 10^{-7}$	12.6782
26	13.0237	$7.1 \cdot 10^{-5}$	13.0237	13.3093	$1.5 \cdot 10^{-7}$	13.3093	13.4390	$4.6 \cdot 10^{-8}$	13.4390	13.6821	$1.5 \cdot 10^{-7}$	13.6821
28	14.0200	$6.9 \cdot 10^{-5}$	14.0200	14.3086	$1.5 \cdot 10^{-7}$	14.3086	14.4397	$4.6 \cdot 10^{-8}$	14.4397	14.6857	$1.6 \cdot 10^{-7}$	14.6857

Рис. 5: Значения четных собственных значений (масс мезонов) для различных значений масс кварков (параметр alpha). Приведено численное и аналитические значения, а также относительная ошибка.

Результаты опубликованы:

1. Alexey Litvinov and Pavel Meshcheriakov, *Meson mass spectrum in QCD2 t Hoofts model*, Nucl. Phys. B 1010, 116766 (2025).

Влияние цветовой рандомизации на p_T -уширение в кварк-глюонной плазме с турбулентными цветовыми полями

Б.Г. Захаров

Впервые исследовано влияние цветовой рандомизации партона на p_T уширение быстрого партона в неравновесной кварк-глюонной плазме (КГП) при наличии турбулентных коллективных цветных полей. Показано, что рандомизация цветовой волновой функции партона эквивалентна уменьшению корреляционного радиуса для турбулентного глюонного поля в КГП, и приводит к уменьшению транспортного коэффициента $\hat{g}$. Дан количественный анализ этого эффекта для модели флуктуирующего цветного поперечного магнитного поля в виде последовательности слоев одинаковой толщины ΔL .

Усреднение по случайным цветовым полям выполнено путем интегрирования по группе $SU(3)$ независимым образом для различных слоев с однородными полями, и установлена связь $\langle p_T^2 \rangle$ с произведением вильсоновских факторов для партона p и антипартона $\bar{p}$. Найдено, что для корреляционной длины глюонного поля ~ 1 фм роль цветовой рандомизации существенна и уменьшает транспортный коэффициент $\hat{g}$ на фактор $\sim 0.7 \div 0.6$ в зависимости от отношения электрической и магнитной дебаевских масс.

Работа поддержана госзаданием
FFWR-2024-0011.

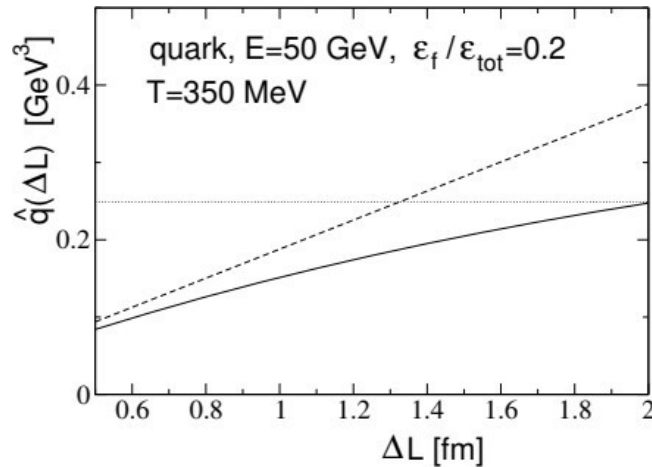


Рис. 6: Транспортный коэффициент $\hat{g}$ для кварка с энергией $= 50$ Гэв в КГП с температурой $T = 350$ Мэв как функция ΔL : сплошная линия с учетом, и пунктирная линия без учета, цветовой рандомизации.

Результаты опубликованы:

1. B.G. Zakharov, *Effect of parton color randomization on p_T broadening in quark-gluon plasma with turbulent color fields*, ЖЭТФ 166(2), 216 (2024).

2 Научные мероприятия

В 2024 г. ИТФ им Л.Д. Ландау РАН полностью организовал и провел несколько научных мероприятий.

В начале июля 2024 г. в институте состоялась международная конференция “Russian-Indian Workshop Froniters of Theoretical Condensed Matter Physics”, участие в которой приняли 11 профессоров и 6 молодых ученых и аспирантов из различных научных и образовательных организаций Индии, научные со-

трудники, аспиранты и студенты ИТФ им. Л.Д. Ландау и других научных организаций РФ (см. Рис. 7). В рамках конференции были представлены доклады по новым научным достижениям в области современной физики конденсированного состояния, гидродинамики и физики неравновесных процессов. Материалы конференции доступны на сайте конференции http://riw2024.itp.ac.ru/prog_conf2024.html.

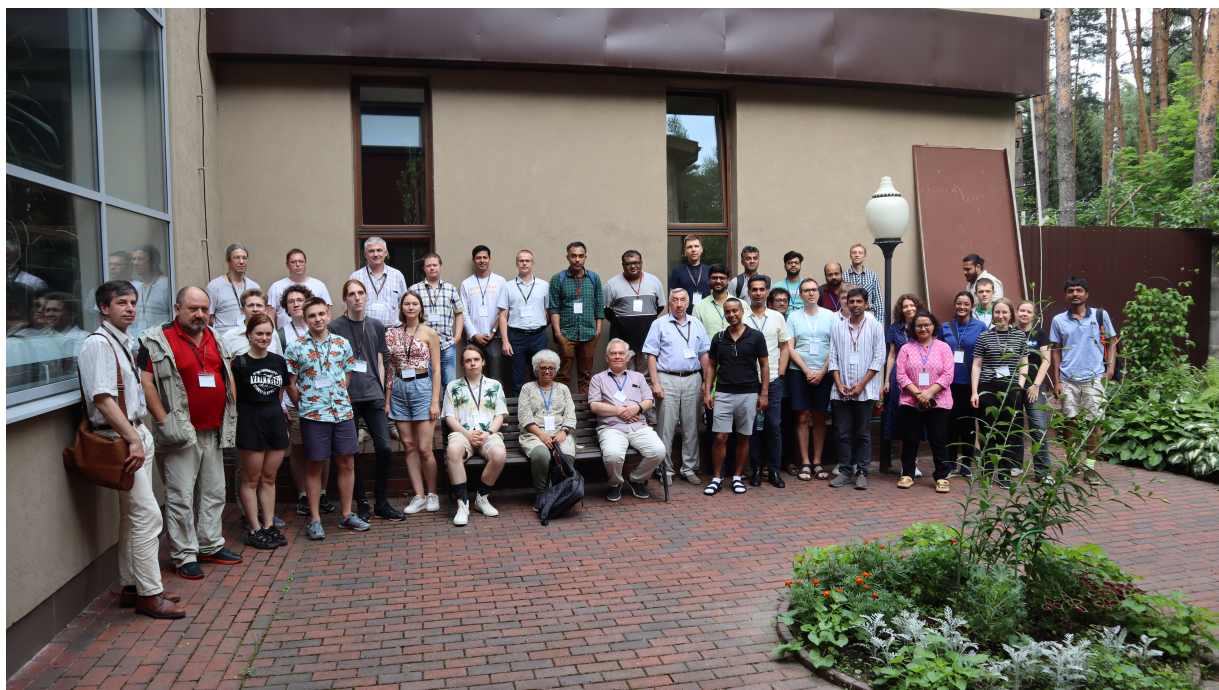


Рис. 7: Участники международной конференции “Russian-Indian Workshop Froniters of Theoretical Condensed Matter Physics” во внутреннем дворе ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН.

В конце августа 2024 г. в институте состоялась школа-конференция “Современная гидродинамика”. Тематика школы охватывала различные направления современной гидродинамики, в том числе, когерентные турбулентные течения в двумерном потоке и в трёхмерном потоке вращающейся жидкости; геофизические течения: поверхностные волны, мезоскопические вихри в океане и тропи-

ческие циклоны; турбулентные течения, магнитная гидродинамика и сверхтекучая жидкость; жидкие кристаллы. Школа проходила уже второй раз. Если в прошлый раз с докладами выступали почти только ведущие учёные, вторая школа изменила формат – на этот раз после продолжительного доклада ведущего учёного следовали схожие по тематике короткие доклады молодых участников. С докла-

дами выступили сотрудники лаборатории “Современная гидродинамика” ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, Института океанологии РАН, Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН (Нижний Новгород) и Института механики сплошных сред РАН (Пермь). Общее число участников школы составило чуть больше 45 человек. Из них – 12 ведущих и 30 молодых учёных. Материалы школы доступны на сайте <https://hydrodynamics.itp.ac.ru/conferences/>.

В начале октября 2024 г. в институте прошла юбилейная международная конференция, приуроченная к 60-летию ИТФ им. Л.Д. Ландау. 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, которые работают в научных центрах и университетах по всему миру, в том числе во Франции, Англии, США, Канаде, Израиле. Старейшие сотрудники ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, В.Л. Покровский и Д.Е. Хмельницкий представили на конференции свои воспоминания о событиях и сотрудниках института за прошедшие 60 лет. С материалами юбилейной конференции можно ознакомиться на сайте http://60.itp.ac.ru/prog_itp60.html.

Традиционно сотрудники ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН активно привлекаются к участию в программных и организационных комитетах российских и международных конференций. В 2024 г. при таком участии сотрудников института прошли XXVIII симпозиум “Нанофизика и наноэлектроника” (Нижний Новгород), школа-конференция по “Теоретической физике конденсированного состояния и неравновесных процессов” (Саров), 39-е Совещание по физике низких температур (Черноголовка), XXV Уральская международная зимняя школа по физике полупроводни-

ков (Екатеринбург), Международная школа по теоретической физике “Nor-Amberd School in Theoretical Physics” (Армения).

В 2024 г. сотрудники института активно представляли свои результаты на российских и международных научных мероприятиях, в том числе на международной конференции “Quasilinear Equations, Inverse Problems and Their Applications” (Москва), X Международной конференции “Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2024” (Москва), XXXIX Fortov International Conference on Equations of State for Matter (Кабардино-Балкария), XXV Харитоновских тематических научных чтениях “Современные лазерные технологии” (Саров), 20th International Workshop “Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation” (Москва), 4th International Conference on Matter and Radiation at Extremes (Китай), International Seminar “New trends in photonic technology” (Москва), XL Международной конференции физиков теоретиков “Коуровка” (Новоабзаково, Башкортостан), 30th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (Египет), APS March Meeting 2024 (США), XIX Международной конференции “Супервычисления и математическое моделирование” (Саров), The Fifth Russian Conference on Magnetohydrodynamics (Пермь), Международной юбилейной конференции, посвященной 100-летию академика Е.С. Фрадкина (Москва), 11th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (Китай), XIX Международной конференции по методам симметрии в физике (Армения), The 31st International conference Advanced Laser Technologies ALT 2024 (Владивосток), V Международной конференции “Газоразрядная плазма и синтез наноструктур” (Казань), XI-th International

Conference “SOLITONS, COLLAPSES AND TURBULENCE: Achievements, Developments and Perspectives (SCT-2024)” (Сербия), Международной конференции “Интегрируемые системы и их приложения” (Сочи), Международной конференции “Continuous and Discrete Integrable Systems, Nonlinear PDEs and Dynamical Systems” (Италия), Международной конференции “Интегрируемые системы и квантовая теория” (Санкт-Петербург), 5-th International Conference on “Integrable Systems & Nonlinear Dynamics” (Ярославль), International Conference “Quasilinear Equations, Inverse Problems and their Applications” (Сочи), Международной конференции “Конструктивные методы теории римановых поверхностей и приложения” (Сочи), Международной конференции “Frontiers of Nonlinear Physics 2024” (Москва-Кострома-Москва), Международном симпозиуме “Неравновесные процессы в сплошных средах” (Пермь), Международной конференции “Современные проблемы теории конденсированных сред” (Дубна), 25th Leipzig Workshop on New Developments in Computational Physics (Германия), All-Russian conference “Mathematical problems of mechanics of continuous media” (Новосибирск), Конференции “50 лет конечнозонному интегрированию” (Москва), XXI Научной школе “Нелинейные волны - 2024” (Нижний Новгород), XXXIII научной сессии Совета РАН по нелинейной динамике (Москва), 4-ой Международной школе “Сверхпроводниковые технологии для обработки квантовой информации” (Сухая, Бурятия), XII Семинаре Д.Н. Клышко (Челябинск), Всероссийской конференции “Dynamics in Siberia” (Новосибирск), Школе “Современные проблемы физики конденсированного состояния” (Звенигород), XVI Российской конференции по физике полупроводников (Санкт-Петербург), Школе по теоретической физике МФТИ (Долгопрудный), XXI Конференции “Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления” (Москва), XXIII Всероссийской конференции “Проблемы физики твердого тела и высоких давлений” (Сочи), Научной сессии Секции ядерной физики Отделения физических наук РАН (Дубна), 66 Всероссийской научной конференции МФТИ (Москва) 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 области. Дополнительно сотрудники инсти-

тута ведут занятия, в том числе читая оригинальные курсы лекций, со студентами в МФТИ, МГУ и МИСиС.

Летом 2024 г. на базовых кафедрах успешно прошли защиты 4 магистерских и 5 бакалаврских дипломов. В 2024 г. в институт были приняты 3 аспиранта.

В 2024 г. продолжался прием экзаменов по программе теорминимума Ландау. В 2024 г. успешно были сданы экзамены “Математика-1” (5 студентов), “Механика” (1 студент), “Теория поля” (4 студента), “Квантовая механика” (6 студентов), “Квантовая электродинамика” (1 студент).

4 Награды

8 февраля 2024 г. Российская академия наук отметила 300-летний юбилей. Заслуженные сотрудники института, член-корр. РАН Н.А. Иногамов, академик РАН Е.А. Кузнецов, член-корр. РАН Ю.Г. Махлин, член-корр. РАН В.В. Лебедев были отмечены государственными наградами - медалью ордена “За заслуги перед отечеством” II степени. Также ряд сотрудников института были награждены юбилейными медалями “300 лет Российской академии наук”.

Ведущему научному сотруднику института А.Б. Замолодчикову была присуждена престижная международная премия 2024 Breakthrough Prize in Fundamental

Physics за глубокий вклад в статистическую физику и квантовую теорию поля с разнообразными и далеко идущими приложениями в различных областях физики и математики.

Один из старейших сотрудников института, А.М. Финкельштейн, работающий в настоящее время за рубежом, в 2024 г. был награжден премией имени А.И. Ларкина за 2024 г. за вклад в теоретическую физику.

Выпускник кафедры Проблемы теоретической физики (теоргруппа Горькова) и бывший сотрудник института Д.Э. Фельдман был избран членом Американского Физического Общества (APS Fellow).

5 СМИ об институте

В 2024 г. усилиями пресс-секретаря института Е. Грек было подготовлено интервью с главными научными сотрудниками института В.П. Минеевым и Н.Н. Николаевым. Оно было опубликовано на новостном портале МФТИ <https://mipt.ru/news/k-60-letiyu-instituta-teoreticheskoy-fiziki-im-l-d-landau-ran>. Ниже это интервью приведено в редакции Е. Грек.

Сегодня, в преддверии юбилея нашего института, мы вспоминаем самые яркие страницы его истории, вспоминаем своих товарищей, отдавших институту многие годы, вспоминаем самих себя. Вспоминая, мы смеёмся, радуемся, гордимся. Немножко грустим. О тех, кто ушёл, о том, что утрачено и не повторится. Но институт – это не только научные открытия и выведенные формулы. Институт – это его люди. Вот о них мы сегодня и расскажем. О том, как, кем и когда был открыт институт теоретической физики, рассказывают главный научный сотрудник ИТФ, доктор физ.-мат. наук, профессор Владимир Петрович Минеев и главный научный сотрудник ИТФ доктор физ.-мат. наук Николай Николаевич Николаев.

Откуда есть пошёл институт Ландау – “Мы отмечаем 60-летие института, - говорит Владимир Петрович Минеев, - но, на самом деле, лишь решение о его создании было принято Госкомитетом по науке и технике и Президиумом Академии наук 14 сентября 1964 года. А сам институт начал работать в 1965 году. Но, говоря о создании института, правильнее начать с легенды о том, как Ландау предрёк открытие ИТФ, сказав: “когда я умру, Халатников с Абрикосовым откроют новый институт – институт патологии, и назовут его моим именем”. Институт действительно был открыт, и произошло это благодаря Исааку Халатникову, ученику Льва Давидовича, – не только блестящему учёному, но и человеку, обладавшему настоящим даром видеть в человеке талант. Он собрал круг людей – необыкновенных, та-

лантливых, одарённых. Они приехали в Черноголовку из разных мест – Эммануил Рашба, к тому моменту уже лауреат Ленинской премии, прибыл из Киева, Алексей Абрикосов, Лев Горьков, Игорь Дзялошинский - из Москвы, из Долгопрудного приехал Юрий Бычков, из Вильнюса – Йошуа Левинсон, из Новосибирска – Валерий Покровский и Александр Казанцев, из Ленинграда – Герасим Элиашберг (он, правда, уже до этого переехал в Черноголовку). Они и стали первым составом нашего института. Когда открывался ИТФ, Капица на ученом совете Физпроблем выступил с речью, где прозвучали такие слова: “На охоте можно уметь хорошо стрелять, но ничего не добыть, поскольку нужны угодья. А где у вас угодья? Где экспериментальная физика?” Потом Пётр Леонидович добавил, что работать в новом институте будут “птенцы нашего гнезда”. А во главе института будет стоять Халатников и ему придётся не только заниматься организацией научной работы, но и устраивать людей в дома отдыха, воспитывать своих птенцов и смотреть, чтобы кукушка не украла яйца. На что Халатников отвечал: “В Черноголовке имеются экспериментальные угодья. А, смотреть будем, вокруг иногда не только кукушки, но и орлы летают”.

Николай Николаев: “Когда в 1964 год я поступал на Физтех, то набрал 16 баллов. Когда меня вызвали на собеседование, я увидел маститых учёных, заведующих кафедрами, которые сидели за длинным столом. А в центре разместился лысоватый ничем не примечательный чело-

век, который, как мне показалось, спал. И это меня задело. Когда были оглашены мои жалкие достижения, этот человек вдруг открыл глаза и удивлённо спросил: “Как могло произойти, что вы окончили 10 классов, а не 11?” Я объяснил, что это было связано с реорганизацией школы в целом, и в нашей деревне в частности. Тогда лысоватый спрашивает: “А почему вы решили поступать на Физтех?” Я отвечаю: “Знаете, я, конечно, собирался в Горьковский политех, ведь у нас в деревне поступление в него считается высшим пилотажем. Но в конце марта пришла газета “Комсомольская правда”, в которой было объявление о том, что наложенным платежом рассылаются вступительные задачи в МФТИ за предыдущие годы. В мае я получил бандероль, потренировался решать задачи, и, вот, приехал в Долгопрудный, поступать”. Поселили меня в общежитии, где мы спали в коридоре прямо на полу, на матрасах. Эти недели стали для меня периодом фантастического образования. Например, тогда я впервые увидел сборник “Задачи по физике” Зубова и Шальнова. Я решал, читал, слушал. Экзамены сдавал в третьем потоке. А тем временем лысоватый человек продолжил собеседование: “А чем вы занимались в школе помимо учебы?” “Фотографией, - говорю, - занимался и радио-любительством, А ещё работал на комбайне”. Дело в том, что поток техники, поставляемой в деревню, был таким мощным, что не успевали подготовить механизаторов. И старший комбайнер позвал меня в помощники. Примерно это я рассказал лысоватому, и он задал ещё пару вопросов по радиотехнике. Ответы его вполне устроили. Напоследок кто-то другой из уважаемой комиссии спросил: “Что будете делать, если не примем?” “Годик поработаю у себя в деревне и опять приеду”. Но меня приняли. И главную роль в этом решении сыграл лысоватый – им был сам Пётр Леонидо-

вич Капица, председатель приемной комиссии МФТИ, и я оказался на его базовой кафедре. После 1-го курса я пришел к Петру Леонидовичу подписывать заявление о переводе на базовую кафедру в ИТЭФ и вместо недовольства услышал: “Молодой человек должен сам решать свою судьбу”. И заявление было подписано.

На Физтехе я учился на ФОПФе, и почему-то меня тянуло в ИТЭФ, - Николай Николаев улыбается, - и вот, в 1965 году в сентябре на Физтехе выступали Дзялошинский, Горьков и Халатников. Они рассказывали о том, что создан новый институт – теоретической физики. Я их тогда с большим интересом послушал, но факт создания ИТФ близко к сердцу не принял. Кроме ИТЭФ другие варианты я не рассматривал. И только потом, после первой зимней школы ИТЭФ, где я был в числе лекторов и познакомился с Анатолием Ивановичем Ларкиным, я круто изменил своё мнение. Ларкин рассказал мне об ИТФ, и когда он предложил: “Да ты приходи к нам, Коля!”, я понял – это и есть моя судьба. Можно сказать, что Анатолий Иванович - мой крёстный отец. Это выдающийся человек, воспитавший таких учеников, как Павел Вигман, Константин Ефетов и многих других. Из ИТЭФ сюда пришли Евгений Богомольный, Александр Замолотчиков, Александр Поляков и Александр Мигдал, из МИФИ – Владимир Фатеев. Но в основном, институт наш пополнялся студентами из МФТИ, факультета общей и прикладной физики. Действительно, была у Халатникова такая особенность – смотрел по сторонам, и присматривал самых способных студентов. Мы все знали: мимо Халата не пройдёшь”.

Каждый был личностью – Рассказывает Владимир Минеев “У Ландау была уникальная особенность, он сразу видел все сильные и слабые места работы, как будто был знаком с ней заранее. Когда

Лев Давидович попал в катастрофу, Юрий Васильевич Шарвин, замечательный учёный из института П.Л. Капицы (ИФП) сказал: “Теперь мы как все”. Гения не стало. Так вот теперь того института, который был в начале 90-х тоже уже нет. Но мы находимся на хорошем профессиональном уровне. Сейчас значительно меньше физики конденсированных сред, но значительно больше гидродинамики. После ухода Ландау, Халатников говорил, что теперь нам нужен коллектив, который будет играть роль Ландау – критиковать друг друга, слушать друг друга. Он сравнивал это с персимфансом – первым симфоническим оркестром, который выступал без дирижёра. Обычно без дирижёра ничего не получается, за исключением тех редких случаях, когда собираются одни солисты. Вот так и в нашем институте – были одни солисты, исключительные личности. 1995 году вышла книга “30 лет институту Ландау”. Состоит она из 75 статей, принадлежащих перу 70 авторов. Из этих 70 авторов многие уехали за границу, некоторые умерли или перешли на другую работу. В институте осталось 14 человек. Цитируемость статей была высокая, чем очень гордился наш первый директор Исаак Маркович Халатников. Какой-то известный американский журнал в начале девяностых годов опубликовал рейтинг научных организаций по индексу цитируемости статей, нормированному на число сотрудников института. Наш институт там стоял на первом месте, за ним Ecole Normale Supérieure.... А список был длинный, из наших – туда входили и ФИАН, и МГУ, и ИТЭФ, и несколько химических институтов”.

Об этом можно говорить бесконечно, и этому существует невероятное количество подтверждений. Например, руководство немецкого института Макса Планка, имеющего ряд небольших институтов в разных университетских городах Гер-

мании, пригласило нашего выдающегося учёного Константина Борисовича Ефетова в один из своих институтов в качестве директора. И было это в 80-х прошлого века, еще до развала СССР и до всякой перестройки. Халатников говорил: “Если мы выставим команду из ИТФ, а американцы соберут сборную со всего Восточного побережья, эти две команды будут сопоставимы по уровню”. Думаю, этой фразой всё сказано”.

Как работали – “В основном, сотрудники института работали дома, - продолжает рассказ Владимир Петрович, - но были у нас и присутственные дни – четверг и пятница. В четверг проходил теоретический семинар в институте Капицы, а в пятницу – здесь, у нас, в Черноголовке. И вот в пятницу, когда приходил автобус, ещё до начала семинара шли всевозможные обсуждения. Весь коридор был завешен досками, толпа была как в вагоне метро в час пик, и наши сотрудники делились с коллегами тем, что придумали за неделю. На посторонних это производило фантастическое впечатление. Все что-то доказывали друг другу, писали на досках формулы, говорили и спорили одновременно. А сейчас всё онлайн. Даже на юбилейной конференции в зале иной раз сидело четыре слушателя, председатель и я. Остальные – на связи”. “А я вот всегда работал только в институте, – добавляет Николай Николаевич. - Два сдвинутых стола на четверых: Ларкин, Овчинников, Хмельницкий и я. Компьютеров не было, докторскую диссертацию в двести страниц писали вручную, вручную вписывали туда формулы... Вот так мы и работали”.

Учёные и старейшины – В Институте право на защиту диссертаций решалось тайным голосованием Ученого совета. Когда наше поколение подросло, - вспоминает Николай Николаевич, - и в 81-83 годах мы защитили свои докторские диссертации, из молодых докторов был органи-

зован малый ученый совет - “совет старейшин”, который вырабатывал рекомендации для Ученого совета, кому пора защищаться, а кому нет. Не было ни одного случая, когда последующее тайное голосование не подтверждало вердикта “совета старейшин”. Так это работало. Идея Халатникова была не только в том, чтобы просто сохранить высокий научный уровень Института, но перенести ответственность за его будущее на наше поколение и, тем самым, воспитать нас. В малый совет входили: Александр Замолотчиков, Григорий Воловик, Константин Ефетов, Давид Хмельницкий, Сергей Бразовский, Николай Николаев, Юрий Овчинников, Павел Вигман, Борис Ивлев, а председателем был Владимир Минеев. А в Старшем Учёном совете состояли люди с мировыми именами – Исаак Маркович Халатников, Лев Петрович Горьков, Валерий Леонидович Покровский, Анатолий Иванович Ларкин, Герасим Матвеевич Элиашберг, Алексей Алексеевич Абрикосов, Эммануил Иосифович Рашба, Марк Яковлевич Азбель, Аркадий Бейнусович Мигдал, Сергей Петрович Новиков, Яков Григорьевич Синай, Игорь Ехиельевич Дзялошинский, Владимир Наумович Грибов, Сергей Викторович Иорданский и Сергей Иванович Анисимов”.

Как мы боролись – “В 90-х годах прошлого века, - продолжает Владимир Петрович, - наш институт хотели закрыть. Или хотя бы вернуть туда, откуда он вышел, а именно - в теоретический отдел Института физических проблем. Когда-то наши отцы-основатели (И.М. Халатников, А.А. Абрикосов, Л.П. Горьков и И.Е. Дзялошинский) работали в ИФП, созданном П.Л. Капицей. Кому-то захотелось повернуть время вспять, и загнать разросшийся самостоятельный институт в рамки отдела. Директором нашего института был тогда выдающийся учёный Владимир Захаров, а я был вице директором (такой долж-

ности в других академических институтах нигде больше не было). Обоих назначало Общее собрание Отделения Физики и Астрономии РАН. Захаров тогда временно работал в Японии, и этот факт очень раздражал недоброжелателей. Как же институт может существовать без директора? Надвигалась буря. Состоялось специальное заседание Президиума Академии наук, где Виталий Лазаревич Гинзбург выступил против ИТФ. После этого слово взял я и стал сравнивать текущие показатели работы (дипломники, аспиранты, защиты диссертаций, конференции...) теоретдела ФИАН и ИТФ им. Ландау. Оказалось, что ИТФ однозначно опережает теоретдел Физического института. Возразить на это было нечего”. Владимир Петрович философски замечает: “В науке кипят такие же страсти, как и везде, а у академиков тоже временами возникает желание разделаться с соперниками. Учёные, хоть и ищут истину, но остаются просто людьми”.

Про наши идеологические семинары – Рассказ Владимира Минеева “В те времена в любом учреждении ежемесячно проводились идеологические семинары. У нас они тоже были, только вместо того, чтобы обсуждать решения съездов КПСС, мы слушали очень интересные лекции по литературе, культуре и истории. Просвещать нас приезжали прославленные гуманитарии, поскольку у наших руководителей, физиков с мировыми именами, были соответствующие знакомые в гуманитарных кругах. Однажды к нам в институт приехал Сергей Сергеевич Аверинцев – филолог, библиист, переводчик, знаток древних языков, личность знаменитая и выдающаяся. Он рассказывал нам о классической филологии - науке, несущей знания о жизни, верованиях, культуре людей предшествующих цивилизаций. По окончании лекции Исаак Маркович Халатников в своем благодарственном сло-

ве попросил докладчика приезжать ещё и в следующей лекции рассказать нам о Фройте (почему-то он так назвал его на немецкий лад). “Расскажите, Сергей Сергеевич, а то мы об этом совсем ничего не знаем” – сказал Халатников. В наступившей тишине, раздался голос Дзялошинского: “Ты...ты...ты... (от заикался), Исаак, это ТОЧНО”. Зал захлебнулся смехом. Через месяц лекцию про учение Фрейда прочел сам Игорь Ехиельевич Дзялошинский – научный редактор книги “Основы психоанализа”, изданной тогда в академической серии “Литпамятники”. Фрейд не издавался у нас в стране с 20-х годов и появление этой книги, обязано настойчивости Игоря Ехиелиевича и поддержке члена редколлегии Литпамятников Петра Леонидовича Капицы”.

Как Коля Николаев проводил в Америке “Ленинский урок” – Рассказ Николая Николаева “В 1991 году я поехал в командировку в Сиэтл в институт ядерной физики. Там проходила школа, на которой я выступал с докладом. И вот как-то утром я пришёл на работу, а коллеги мне говорят: “Коля! Что там у вас в Москве происходит?! Путч?! Переворот?!” Я, конечно, страшно удивился – сижу у себя в общаге, в крохотной комнатке без телевизора и даже приёмника, думаю только о своей работе и ни о чём другом понятия не имею. Полный информационный вакуум. На кухоньке, где мы пили кофе, стоял маленький телевизор. Я побежал к нему, рассчитывая хоть немного разобраться в ситуации. Включаю и сразу вижу на экране Геннадия Янаева. Для тех, кто забыл, это – член Политбюро, секретарь ЦК КПСС, являлся и.о. президента СССР. По сути, это он был руководителем ГКЧП. Когда я его увидел, то первая мысль была: “Если этого человека выставили вперёд, то ничего серьёзного произойти не могло”. Сел я к компьютеру и поразился! Несмотря на то, что интернета в нашей стране в то время

практически не было, я получил несколько десятков сообщений из разных городов СССР, в которых люди рассказывали о том, что произошло в Москве и в Новосибирске, и обсуждали события. Кто-то включил меня в рассылку, и я невольно погрузился в тему переворота просто с головой. Был и один знакомый, который жил на Калининском проспекте, и из окон его квартиры открывался вид на площадь перед Белым домом. К тому же у него дома имелся модем, что было несказанной редкостью по тем временам. И этот знакомый в красках живописал всё, что видел со своего балкона. Словом, почитав и посмотрев на происходящее дома, я сделал кое-какие выводы и вернулся к работе. Но тут меня разыскала секретарь и говорит: “Коля, тут одна газета хочет взять у тебя интервью по поводу происходящего в Советском Союзе”. Я согласился, и вскоре корреспондент с круглыми от возбуждения глазами задал мне вопрос: “Каково ваше мнение о происходящем в Москве?” Предполагалось, что я буду говорить о всяких ужасах, но я спокойно ответил: “Как учил товарищ Ленин, первым делом нужно брать почту, телеграф, вокзалы и банки. Ничего из этого путчисты в Москве не взяли, да и интернет не перекрыли. Поэтому, мой прогноз таков: всё это кончится ничем”. Корреспондент скис. Конечно, американская пресса рассчитывала на совершенно другие ответы, но порадовать их мне было нечем. В результате в вечерней сиэтлской газете вместо большой скандальной статьи вышла заметка в шестнадцать строк, в которой говорилось примерно следующее: “Как сказал советский профессор Николаев, путчисты не выполнили условий, которые согласно Владимиру Ленину, должны осуществить все заговорщики, стремящиеся захватить власть. Поэтому об успехе переворота в Москве говорить не приходится”. На следующий день это подтвердилось”.

Мы пойдём другим путём – Рассказ Николая Николаева “Сотрудники института понимали друг друга с полуслова, но порой научная идиллия нарушалась, бывали у нас и малоприятные истории. И нашему руководству приходилось решать сложные задачи, не связанные с теоретической физикой. Так, один довольно слабый с точки зрения теорфизики аспирант понял, что его шансы попасть в ИТФ на работу равны нулю. К тому же ставки в штатном расписании под этого не слишком способного человека в институте всё равно не было. Это показалось ему несправедливым, и юноша, бывший у нас секретарём комсомольской организации, решил непременно использовать своё положение при достижении цели. В один прекрасный день он явился к Халатникову и спросил: “А как вы думаете, Исаак Маркович, что скажут в Октябрьском райкоме (мы, как все академические институты, были к нему приписаны), когда узнают, что вы отказываетесь принимать на работу единственного кандидата в члены КПСС?” Директор, который никак не ожидал такого поворота, прекрасно знал, что допускать конфликт с райкомом партии никак нельзя! Тогда это могло привести к огромным неприятностям для института. Он бросился к товарищу Чахмахчеву, управляющему делами Академии наук, всесильному человеку и буквально вымолил у него недостающую ставку. Заняло это три дня, что стало своеобразным рекордом. Юношу в институт взяли на ставку стажёра, но поскольку он не смог за определённый период времени предъявить коллегам никаких достижений, проще говоря, вообще ничего не сделал, то Исаак Маркович уволил его

чистой совестью и совершенно законно. Здесь и райком бы придрататься не смог”.

Как институт стал больше – На заре Института все заседания Учёного совета проходили в обычной квартире на девятом этаже жилого дома. Большую доску устанавливали на стульях, которые были в дефиците, поэтому все участники заседания просто укладывались перед доской на полу. Лежали, курили и обсуждали научные вопросы. Называлось это помещение “лежбищем”. Потом для наших нужд был выделен флигелек бухгалтерии филиала Института химфизики, а заседания Ученого совета и семинары проходили в конференц-зале дружественного Института физики твердого тела, а до и после семинара 64 сотрудника развивали чувство локтя в коридоре нашего крохотного флигеля. На время лекций студентам директора выгоняли из его кабинета, и так продолжалось почти полвека. Около десяти лет назад после долгих мытарств в поисках средств и юридического решения о выделении земли началось строительство, и довольно быстро институт получил новое полноценное помещение со своим конференц-залом. Есть светлые кабинеты, есть внутренний дворик. Удобно, красиво! Даже кухня есть, где мы пьём кофе и потом обязательно моем за собой посуду. Но самое главное то, что: на нашу кафедру при МФТИ приходят, как и раньше, очень хорошие студенты, и не всех впоследствии высасывают западные пылесосы. Институт жив, его научный статус остается привечно высоким. И нельзя не отметить, что финансирование института с нищенского выросло до сравнительно разумного. В общем, смотрим в будущее с обоснованным оптимизмом.

В связи с 60-летним юбилеем ИТФ им. Л.Д. Ландау в Независимой Газете была опубликована авторская колонка член корр. РАН Д.Х. Квона “Институт теоретической физики как идеальный имперский продукт (Место, где правит интеллект)”. Ниже приведено несколько выдержек из этой статьи:

... Достижений же, равных по уровню нобелевским работам или даже превышающих их, еще больше. “Флуктуационная сверхпроводимость” Асламатова-Ларкина, “Методы квантовой теории поля в статистической физике” Абрикосова, Горькова, Дзялошинского, “Коллапс ленгмюровских волн” Захарова, “Флуктуационная теория фазовых переходов” Покровского и Паташинского, “Квантовые поправки к проводимости и аномальное магнитосопротивление” Альтшулера, Аронова, Горькова, Ларкина и Хмельницкого, “инстантоны” Белавина-Полякова, теория “ранней Вселенной” Линде и Старобинского, “биллиарды” Синая, “майорановские фермионы и топологические сверхпроводники” Китаева... Вот далеко не полный список физических понятий и

настоющих книг, без которых немыслима работа современного физика.

“Если выпало в империи родиться, лучше жить в провинции, у моря”, – отчеканил в одном из своих стихотворений Иосиф Бродский. Гению Ландау суждено было жить не в провинции, а в столице тоталитарной советской империи. И фантастическим образом именно этот факт привел к рождению его школы, повторяем, не имеющей аналогов в истории мировой науки. И ее современный успех отражает не только распространение по всему цивилизованному миру ее учителей, детей и внуков, но и Федеральное государственное бюджетное учреждение науки – Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук.

Полностью статья доступна по ссылке https://www.ng.ru/vision/2024-11-26/15_9143_product.html.

ссылке https://www.ng.ru/vision/2024-11-26/15_9143_product.html.

6 Научные результаты

В 2024 г. научные исследования в ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН проводились в рамках нескольких государственных заданий: “Новые эффекты 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”, “Сильные взаимодействия, релятивистская астрофизика, гравитация, космология”, “Транспорт в неупорядоченных системах: от наноструктур до турбулентной атмосферы”, и грантов РФ: “Мультифрактальность и взаимодействие на локализационных переходах между топологическими фазами в сверхпроводя-

щих системах”, “Сверхпроводящий диодный эффект”, “Взаимодействие когерентных структур и флуктуаций в гидродинамических системах”, “Взаимодействие ультрахолодных нейтронов и ионов с поверхностью жидкого гелия”, “Теория сверхтоковых состояний в неупорядоченных сверхпроводниках”, “Стохастические структура и динамика в неравновесных процессах физики биополимеров”, “Интегрируемые модели квантовой теории поля и теории струн”.

В 2024 г. ИТФ им. Л.Д. Ландау сохранил лидирующее положение по широкому кругу вопросов в перечисленных выше областях исследований. Более детально с полученными в 2024 г. результатами можно ознакомиться далее.

6.1 Новые эффекты в физике конденсированного состояния вещества

В рамках данной темы в 2024 году проводились исследования в области теории сверхпроводимости и волн зарядовой плотности, квантовых жидкостей, топологической материи, жидких кристаллов, коллоидных систем, полимеров и мембран и других вопросов физики конденсированного состояния. Ниже приводятся результаты, полученные в 2024 году.

Электроны в сильных магнитных полях, магнитоэлектрические эффекты и волны зарядовой плотности

Проведено совместное (теоретическое и экспериментальное) исследование магнитных квантовых осцилляций (МКО) коэффициента Холла на примере трителлуридов редкоземельных металлов. МКО предоставляют общий инструмент для исследования электронной структуры различных проводников. Поверхность Ферми большинства металлов теперь известна благодаря МКО. Этот инструмент более точен, чем его альтернативы, но требует низких температур, чистых образцов и довольно сильных магнитных полей. В этой статье МКО коэффициента Холла измеряются в редкоземельном трителлуриде TmTe_3 и показано, что они намного сильнее и сохраняются до более высокой температуры, чем осцилляции Шубникова-де Гааза. Это усиление амплитуды упрощает эксперименты МКО и является очень общим для сильно анизотропных металлов. Объединенные измерения коэффициента Холла и диагонального магнитосопротивления предоставляют дополнительную полезную информацию. Отношение их амплитуд МКО линейно зависит от магнитного поля, а его наклон дает простой и точный инструмент измерения среднего свободного времени электрона и его температурной зависимости, недостижимой с помощью обычного графика Дингла. Наши результаты расширяют использование и применение МКО как мощного инструмента для исследования электронной структуры.[1] (П.Д. Григорьев)

Магнитные квантовые осцилляции (МКО) традиционно применяются для исследования электронной структуры металлов. В слоистых квазидвумерных (Q2D) материалах МКО обладают рядом качественных особенностей, дающих дополнительную полезную информацию при условии разработки их теоретического описания. В рамках формулы Кубо и самосогласованного приближения Борна пересмотрена фаза биений в амплитуде осцилляций Шубникова межслоевой проводимости в Q2D металлах. Мы показываем, что сдвиг фазы биений осцилляций Шубникова (проводимости) относительно осцилляций де Гааза–ван Альфена (намагниченность) больше, чем можно было бы ожидать, и при определенных условиях может достигать значения $\pi/2$, как это наблюдается экспериментально. Мы объясняем инверсию фазы МКО во время кроссовера 3D–2D и предсказываем уменьшение относительной амплитуды МКО межслоевого магнитосопротивления в сильном магнитном поле, большем, чем частота биений. [2] (П.Д. Григорьев)

Проанализированы различные версии влияния давления на поведение неосциллирующей части магнитосопротивления квазидвумерного органического металла $\kappa - (\text{BEDT} - \text{TTF})_2\text{Hg}(\text{SCN})_2\text{Cl}$. Квазидвумерный органический металл $\kappa - (\text{BEDT} -$

$\text{TTF})_2\text{Hg}(\text{SCN})_2\text{Cl}$ при охлаждении ниже $T = 30\text{K}$ переходит в состояние моттовского изолятора. Внешнее гидростатическое давление $P > 0.7\text{кбар}$ восстанавливает металлическое состояние и дает возможность исследовать поведение сопротивления, магнетосопротивления и осцилляций Шубникова-де Гааза при гелиевых температурах в интервале внешних давлений $P = 1\text{--}8\text{кбар}$. Спектр наблюдаемых осцилляций Шубникова-де Гааза хорошо согласуется с теоретическими расчетами зонной структуры. В то же время характеристики осцилляций (циклотронная масса, частота, амплитуда) испытывают существенное влияние электронных корреляций. Сильнокоррелированным системам свойственна также специфическая температурная зависимость сопротивления. При этом давление является основным инструментом, управляющим силой корреляций. [3] (П.Д. Григорьев)

Магнитоэлектрический эффект, то есть появление намагниченности, индуцированной электрическим током, может иметь место в металлах, не обладающих симметрией относительно пространственной инверсии. Природа этого эффекта обусловлена спин-орбитальным взаимодействием электронов с кристаллической решеткой, снимающим спиновое вырождение состояний и смешивающим спиновые и орбитальные степени свободы. Представленное в работе вычисление намагниченности, индуцированной током, проделано с помощью кинетического уравнения для матричной функции распределения электронов по состояниям в двух энергетических зонах, расщепленных спин-орбитальным взаимодействием. [4] (В.П. Минеев)

Исследовались особенности динамики электронов в кристаллах в достаточно сильных магнитных полях. Одним из наиболее нетривиальных направлений этой тематики является задача Новикова, а именно задача классификации незамкнутых траекторий для частиц с произвольным законом дисперсии в присутствии магнитного поля. В то же время изучение динамики электронов на поверхности Ферми может осуществляться и в более общей постановке, а именно как изучение топологии соответствующей динамической системы и связанных с ней физических явлений. Такой подход фактически связан с задачей Новикова, но включает в себя изучение более широкого круга вопросов, а также более широкого круга экспериментально наблюдаемых явлений. Был описан ряд общих принципов, связывающих изменения топологической картины траекторий на поверхности Ферми с наблюдаемыми явлениями в сильных магнитных полях. Можно отметить при этом, что изучение описанных эффектов может быть полезным инструментом для экспериментального изучения дисперсионных соотношений в проводниках в самом общем случае. [5] (С.П. Новиков, А.Я. Мальцев)

Описано особое поведение магнитопроводимости металлов, возникающее при появлении хаотических электронных траекторий на поверхности Ферми. Такое поведение обусловлено рассеянием электронов на особых точках динамической системы, описывающей динамику электронов в p -пространстве, и вызываемым малоугловым рассеянием электронов на фононах. В этой ситуации, система описывается “нестандартным” временем релаксации, которое и играет основную роль в определенном интервале значений температуры и магнитного поля. [6] (А.Я. Мальцев)

Исследовалась задача Новикова об описании геометрии линий уровня квазипериодических функций на плоскости. В исследовании был рассмотрен наиболее общий

случай, когда число квазипериодов функции не ограничено. Главным предметом исследования являлось при этом появление открытых линий уровня, либо замкнутых линий уровня сколь угодно больших размеров, играющих важную роль во многих динамических системах, связанных с задачей Новикова. В результате исследования получены наиболее общие результаты, описывающие общую картину появления таких линий уровня для любого числа квазипериодов. Как можно показать при этом, результаты, полученные для квазипериодических функций на плоскости, могут быть обобщены и на многомерный случай. В этом случае мы имеем дело с обобщенной задачей Новикова, а именно, задачей описания поверхностей уровня квазипериодических функций в пространстве произвольной размерности. Как и задача Новикова на плоскости, обобщенная задача Новикова играет важную роль во многих системах, содержащих квазипериодические модуляции. [7] (А.Я. Мальцев)

Проведено совместное (теоретическое и экспериментальное) исследование зависимости волны зарядовой плотности (ВЗП) от деформации кристалла на примере трителлуридов редкоземельных металлов. Показано, что небольшая деформация TbTe₃ может оказать существенное влияние на его волну зарядовой плотности, с ориентационным переходом между двумя перпендикулярными направлениями волнового вектора, управляемым параметром a/c – отношением постоянных кристаллической решетки вдоль двух главных осей, с крошечной областью сосуществования вблизи $a = c$ и без изменения пространственной группы. Температура перехода CDW T_c показывает линейную зависимость от $|a - c|$, в то время как щель насыщается вдали от области сосуществования. Дано теоретическое объяснение этим результатам. Такое поведение хорошо объясняется в рамках модели сильной связи. Наши результаты ставят под сомнение связь между щелью и T_c в системах RTe₃. Работа открывает новый путь к изучению сосуществующих или конкурирующих электронных порядков в конденсированном веществе. [8] (П.Д. Григорьев)

Сверхпроводимость и магнетизм

В работе развита теория сверхпроводимости в соединениях урана, основанная на межэлектронном взаимодействии посредством обмена магнитными флуктуациями, описываемом зависящей от частоты магнитной восприимчивостью. Зависимость эффективной массы электронов от магнитного поля выражена через полевую зависимость компонент восприимчивости. Показано, что интенсивность триплетного спаривания и, тем самым, температуры перехода в сверхпроводящее состояние также определяется зависящей от поля магнитной восприимчивостью. Результаты сравниваются с экспериментально наблюдаемыми свойствами ферромагнитных сверхпроводников URhGe и UCoGe, а также недавно открытого соединения UTe₂. [9] (В.П. Минеев)

Развита теория сверхпроводящих состояний в металлах с тороидальной симметрией. Развита симметричный подход к описанию сверхпроводящих состояний в материалах этого типа. Это сделано на примере орторомбического антиферромагнетика с точечной группой симметрии $D_2h(D_2)$. Развита модификация стандартного БКШ подхода для металлов на случай тороидального порядка. Развита теория допускает обобщения на случаи многозонных структур и сверхпроводящих состояний,

соответствующих многомерным представлениям, а также веществ с более сложным мультипольным порядком. [10] (В.П. Минеев)

Все сверхпроводники, находящиеся в магнитном поле, характеризуются тремя критическими магнитными полями: нижним критическим H_{c1} , верхним критическим H_{c2} и термодинамическим критическим полем H_c . В однокомпонентном сверхпроводнике возможны только два набора неравенств: $H_{c2} > H_c > H_{c1}$ или $H_{c2} > H_c > H_{c1}$. Проведено исследование критических полей в многокомпонентных сверхпроводниках с двумя сверхпроводящими компонентами в рамках функционала Гинзбурга-Ландау. Выведена зависимость между фазами компонентов сверхпроводящего комплексного параметра порядка из закона сохранения заряда в явном виде и функционал Гинзбурга-Ландау. Используя модифицированное уравнение Гинзбурга-Ландау, получено состояние одиночного вихря, включая аналитическое выражение для асимптотики. Также получена аналитическая форма для состояния при верхнем критическом поле. Обнаружено, что в некоторых случаях в многокомпонентных сверхпроводниках может быть реализована необычная последовательность критических полей $H_{c1,c2} > H_c$. [11] (Ю.Н. Овчинников)

Развита теория стабильных конфигураций скирмиона типа Нееля в магнитном поле рассеяния пары сверхпроводящих вихрей (вихря и антивихря). Показано, что в таких конфигурациях скирмион стабилизирует пару вихрь-антивихрь от аннигиляции, удерживая их на конечном расстоянии, сравнимом с шириной доменной стенки. Получены условия, в которых такая конфигурация стабильна, а также определены критические значения материальных параметров гетероструктуры, при которых вихрь (антивихрь) отталкивается от пары скирмион-антивихрь (скирмион-вихрь). Также изучены конфигурации нескольких скирмионов в магнитном поле сверхпроводящего вихря. Проведено микромагнитное моделирование и показано, что несколько скирмионов могут формировать устойчивые симметричные конфигурации, находясь на некотором расстоянии от вихря. Основываясь на методе стереографической проекции и подходе Белавина-Полякова, предложен новый тип анзаца для таких конфигураций. [14] (С.С. Апостолов)

Изучен магнонный спектр в тонкой гетероструктуре ферромагнетик-сверхпроводник в присутствии сверхпроводящего вихря. Для этого используется гамильтониан типа Боголюбова-Де Жена, описывающий магноны в присутствии внешнего магнитного поля и неоднородного профиля намагниченности, создаваемого этим вихрем. Показано, что на вихре образуются связанные состояния магнонов подобно тому, как заряженный центр создает связанные состояния электронов из-за экранированного кулоновского взаимодействия в двумерном электронном газе. Число этих локализованных состояний определяется только материальными параметрами ферромагнитной пленки. Также решена задача рассеяния для плоской падающей спиновой волны и вычислены полное и транспортное сечения рассеяния. Показано, что профиль намагниченности, создаваемый вихрем в пленке кирального ферромагнетика приводит к асимметричному рассеянию магнонов. Обсуждены особенности квантовой задачи рассеяния, соответствующие орбитальному обращению в классическом пределе. [12] (Д.С. Катков, С.С. Апостолов)

Развита теория для (мета)стабильных состояний неелевских скирмионов в слабых

неоднородных магнитном поле с использованием нового анзаца для моделирования несимметричной намагниченности. Наша теория учитывает изменения параметров скирмиона и его искривление относительно центрально-симметричной формы, упрощая расчет свободной энергии скирмиона. Минимизируя свободную энергию в два этапа, мы можем идентифицировать стабильные и метастабильные состояния. Теория используется для изучения скирмиона в полях рассеяния, создаваемых вихрем Пирла. Наш метод показывает, как параметры скирмиона зависят от эффективной силы магнитного поля и предоставляет фазовую диаграмму, указывающую области с метастабильными конфигурациями. [13] (С.С. Апостолов)

Квантовые жидкости и топологические материалы

Для электронов, распространяющихся по краевым состояниям двухмерного (2D) топологического изолятора, изучено рассеяние на краевых дефектах, неизбежно присутствующих в реалистичных образцах 2D топологического изолятора, в присутствии внешнего однородного магнитного поля. Магнитное поле нарушает симметрию обращения времени, разрушая топологическую защиту фермионных состояний. Независимо от формы краевой деформации и величины магнитного поля, рассеяние всегда является надбарьерным. В такой ситуации был использован квазиклассический метод Покровского-Халатникова. Для широких классов аналитических профилей деформации это позволило теоретически рассчитать не только основной экспоненциальный вклад в амплитуду рассеяния, но и предэкспоненциальный множитель. [15] (П.Д. Григорьев)

Мы обсуждаем двухступенчатые переходы в сверхпроводниках, где промежуточным состоянием между состоянием куперовской пары и нормальным металлом является конденсат из 4 фермионов, который называется переплетенным порядком. Мы обсуждаем различные типы переплетенного порядка, которые возможны в спинтриплетной сверхтекучей жидкости ^3He , и топологические объекты в переплетенных фазах. Поскольку в ^3He параметр порядка представляет собой аналог гравитационных тетрад, мы предполагаем, что переплетенные состояния возможны в квантовой гравитации. Как и в сверхпроводниках, фермионный вакуум может испытывать два последовательных фазовых перехода. При первом переходе метрика появляется как билинейная комбинация тетрад, в то время как параметр порядка тетрады все еще отсутствует. Это соответствует бозонной общей теории относительности Эйнштейна, которая возникает в фермионном вакууме. Ненулевые тетрады появляются при втором переходе, где образуется тетрадная гравитация Эйнштейна-Картана-Скиамы-Киббла. Это говорит о том, что на уровнях частиц гравитация действует с разной силой на фермионы и бозоны. [16] (Г.Е. Воловик).

Исследован переход в сверхтекучее состояние в двухкомпонентном атомарном Ферми-газе с дипольным взаимодействием атомов, помещенном в двумерную оптическую решетку со слабым беспорядком. Нелокальность взаимодействия приводит к нарушению теоремы Андерсона и увеличению температуры перехода в присутствии беспорядка. Найдена численно и аналитически температура сверхтекучего перехода. [17] (С. И. Матвеев)

Физика жидких кристаллов и мембран

Изучены самоорганизующиеся модулированные структуры, образующиеся за счет возникновения топологических дефектов в холестерических и смектических жидких кристаллов. Главную роль играют так называемые конфокальные домены. Нами обнаружен новый тип таких двумерно модулированных текстур, возникающих в окрестности фазового перехода из изотропной жидкости в холестерик. В этих текстурах модулирован не только директор, но и направление оси холестерической спирали. Эти периодические двумерные холестерические домены очень интересны с точки зрения фотоники, так как обладают двумя зонами селективного отражения света. Физической причиной таких структур являются геометрические фрустрации, возникающие при минимизации энергии деформации холестерического жидкого кристалла. Нами изучены сложные оптические свойства таких текстур с нетривиальной зависимостью от поляризации света и геометрии наблюдения в пропускании и отражении. [18] (Е.И. Кац)

Дан обзор физических свойств относительно недавно открытого типа жидких кристаллов, так называемых твист-бенд N_{TB} нематиков. А именно: (i) Теория Ландау N_{TB} нематиков; (ii) Рассеяние света в N_{TB} жидких кристаллах; (iii) Реологическое поведение упорядоченных образцов N_{TB} ; (iv) Аномально большой сдвиг точки фазового перехода $N - N_{TB}$ под действием внешнего магнитного поля (где N обозначает обычный нематический жидкий кристалл). Показано, что предложенный в этой работе простой феноменологический подход успешно объясняет имеющиеся экспериментальные данные. [19] (Е.И. Кац)

Ультрахолодные нейтроны в материальных ловушках

Наиболее точные измерения времени жизни нейтронов сейчас используют материальные или магнитные ловушки ультрахолодных нейтронов (УХН). Точность этих экспериментов определяется точностью оценки скорости потери нейтронов. В материальных ловушках УХН основным источником потерь нейтронов является поглощение стенками ловушки. В этой статье мы анализируем стандартные методы и их приближения для расчета скорости поглощения УХН стенками материальных ловушек. Мы подчеркиваем приближения, используемые как в стандартных аналитических формулах, так и в численном моделировании Монте-Карло. Для двух простейших геометрий ловушек, прямоугольной и цилиндрической, мы получаем точные аналитические формулы для этой скорости поглощения и сравниваем их со стандартными методами оценки. Разница оказалась значительной и особенно важной для процедуры экстраполяции размера, всегда используемой в стандартных оценках потерь УХН. Наши результаты могут частично разрешить загадочное четырехсекундное расхождение между магнитными и материальными измерениями времени жизни нейтрона. (П.Д. Григорьев, А.М. Дюгаев) [20]

Пленка жидкого гелия на поверхности материальных ловушек для ультрахолодных нейтронов защищает нейтроны от поглощения стенками ловушки. Используя шероховатость поверхности и электростатическое поле, можно поддерживать гелиевую пленку достаточной толщины по всей высоте ловушки. Рассчитано распределение по-

ля вблизи кончика такой шероховатости стенки ловушки и оценено влияние этого поля на удержание гелиевой пленки. [21] (П.Д. Григорьев)

Моделирование движения ультрахолодных нейтронов (УХН) важно для оценки их потерь, точного измерения их времени жизни и для описания других экспериментов. В материальных ловушках необходимо учитывать не только зеркальное, но и диффузное упругое отражение УХН от стенок ловушки. Обычно для описания такого диффузного рассеяния применяют косинусоидальный закон Ламберта для углового распределения рассеявшихся нейтронов, который не имеет строгого теоретического вывода и часто нарушается. В нашей работе предложен эксперимент, позволяющий измерить величину отклонения углового распределения УХН при диффузном рассеянии от закона Ламберта. Это отклонение можно определить по разнице числа нейтронов, вылетающих через центральное и торцевое окно длинной узкой ловушки УХН. Проведены Монте-Карло расчёты, соответствующие возможному эксперименту и показывающие значительную величину эффекта для разных форм ловушки. [22] (П.Д. Григорьев)

Численные методы исследования твердотельных систем

Мы применили глубокую нейронную сеть для изучения вопроса переносимости знания между моделями статистической механики. Был проведен следующий компьютерный эксперимент. Сверточная нейронная сеть была обучена для решения задачи бинарной классификации моментальных снимков расположения спинов модели Изинга на двумерной решетке. При тестировании на вход нейронной сети подавались моментальные снимки расположения спинов модели Изинга на решетке с диагональными ферромагнитными и антиферромагнитными связями. По выходам тестируемой сети были получены оценки вероятности принадлежности образцов к парамагнитной фазе. Анализ этих вероятностей позволил оценить критическую температуру и критический показатель корреляционной длины. Выяснилось, что при слабой анизотропии нейронная сеть удовлетворительно предсказывает точку перехода и значение показателя корреляционной длины. Сильная анизотропия приводит к заметному отклонению предсказанных величин от точно известных. Качественно сильная анизотропия связана с наличием осцилляций корреляционной функции выше температуры возникновения беспорядка по Стефенсону и дальнейшим приближением к точке полностью фрустрированного случая. [23] (Л.Н. Щур)

Разработка новых алгоритмов для моделирования в физике так же важна, как и разработка новых аналитических методов. В данной работе мы приводим сравнение недавно разработанного алгоритма микрoканонического популяционного отжига (МСРА) с достаточно зрелым алгоритмом Ванга-Ландау. Сравнение проводится для двух случаев модели Поттса, в которых наблюдается фазовый переход первого порядка. Мы сравниваем результаты моделирования обоими методами с точно известными результатами, включая конечно-размерную зависимость максимума удельной теплоемкости. Мы оцениваем кумулятивный минимум Биндера, отношение пиков в распределении энергии при критической температуре, энергии упорядоченной и неупорядоченной фаз, а также межфазное натяжение. Оба метода демонстрируют схожую точность при выбранных наборах параметров моделирования. [24] (Л.Н. Щур)

Мы разработали модификацию алгоритма Роуза-Махта [N. Rose and J. Machta, Phys. Rev. E 100, 063304(2019)] и оцениваем плотность состояний для двумерной модели Блюма-Капеля, параллельно моделируя 105 реплик для каждого набора параметров. Проведен конечно-размерный анализ удельной теплоемкости и кумулянтов Биндера, определена критическая температура вдоль критической линии и оценены критические экспоненты. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными ранее с помощью различных методов - моделирования с цепью Маркова Монте-Карло, моделирования Ванга-Ландау, матрицы переноса и разложения в ряд. Результаты моделирования наглядно демонстрируют типичное поведение удельной теплоемкости вдоль критических линий и через трикритическую точку. [25] (Л.Н. Щур)

Машинное обучение - новый инструмент для исследования физических моделей. Одно из возможных применений - изучение фазовых переходов, анализ распределения спинов на регулярных решетках с помощью подхода супервизорного обучения. Новый вопрос - применимость трансферного обучения, когда сеть, контролируемая на определенной модели, используется 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 полносвязная нейронная сеть (FCNN), сверточная нейронная сеть (CNN) и остаточная нейронная сеть (ResNet). Три двумерные спиновые модели - модель Изинга, четырехсоставная модель Поттса и модель Бакстера-Ву - используются для оценки критической температуры фазового перехода и экспоненты корреляционной длины. Основной вывод заключается в том, что обучение с переносом зависит от класса универсальности модели, использующей как спиновые, так и корреляционные распределения, и поэтому не является робастным. [26] (Л.Н. Щур)

Список публикаций

- [1] A.A. Sinchenko, P.D. Grigoriev, A.V. Frolov, A.P. Orlov, V.N. Zverev, A. Hady-Azzem, E. Pachoud, P. Monceau, “Comparative study of magnetic quantum oscillations in Hall and transverse magnetoresistance”, *Phys. Rev. B* 110, L161108 (2024).
- [2] T.I. Mogilyuk, P.D. Grigoriev, V.D. Kochev, I.S. Volokhov, I.Ya. Polishchuk, “3D - 2D crossover and phase shift of beats of quantum oscillations of interlayer magnetoresistance in quasi-2D metals”, *Physics* 6(3), 999-1012 (2024).
- [3] С.И. Песоцкий, Р.Б. Любовский, В.Н. Зверев, П.Д. Григорьев, Т.И. Могилюк, С.А. Торунова, Е.И. Жилиева, “Влияние внешнего давления на поведение металлической фазы органического квазидвумерного проводника $\kappa - (\text{BEDT} - \text{TTF})_2\text{Hg}(\text{SCN})_2\text{Cl}$. Вклад корреляционных эффектов”, *ЖЭТФ* 165(5), 710-717 (2024).
- [4] V.P. Mineev, “Current-Induced Magnetization in Metal Without Space-Inversion Symmetry”, *J. Low Temp. Phys.* 217, 223-230 (2024).
- [5] A.Ya. Maltsev, S.P. Novikov, “Topology of dynamical systems on the Fermi surface and galvanomagnetic phenomena in normal metals”, *J. Math. Phys.* 65(7), 073504 (2024).
- [6] А.Я. Мальцев, “Особенности τ - приближения для хаотических электронных траекторий на сложных поверхностях Ферми”, *ЖЭТФ* 166(3), 409-421 (2024).
- [7] А.Я. Мальцев, “О задаче Новикова с большим числом квазипериодов и ее обобщениях, Труды Математического института имени В. А. Стеклова” 325, 175–189 (2024).
- [8] A. Gallo-Frantz, A.A. Sinchenko, D. Ghoneim, L. Ortega, P. Godard, P.-O. Renault, P. Grigoriev, A. Hady-Azzem, P. Monceau, D. Thiaudière, E. Bellec, V.L.R. Jacques, D. Le Bolloc’h, “Charge density waves tuned by biaxial tensile stress”, *Nat. Comm.* 15, 3667 (2024).
- [9] V.P. Mineev, “Effective Mass and Field-Reinforced Superconductivity in Uranium Compounds”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 93, 064705 (2024).
- [10] В.П. Минеев, “Сверхпроводящие состояния в металлах с тороидальным порядком”, *Письма в ЖЭТФ* 120(4), 247–251 (2024).
- [11] Y. Ovchinnikov, D. Efremov, “Unusual Sequence of the Critical Magnetic Fields, H_{c1} , H_{c2} , and H_c in Multicomponent Superconductors”, *J. Supercond. Nov. Magn.* 37, 325 (2024).

- [12] D.S. Katkov, S.S. Apostoloff, I. S. Burmistrov, “Bound states and scattering of magnons on a superconducting vortex in ferromagnet-superconductor heterostructures”, *Pis'ma v ZhETF* 120, 681 (2024).
- [13] S. S. Apostoloff, E. S. Andriyakhina, I.S. Burmistrov, “Deformation of a Néel-type Skyrmion in a Weak Inhomogeneous Magnetic Field: Magnetization Ansatz and Interaction with a Pearl Vortex”, *Phys. Rev. B* 109, 104406 (2024).
- [14] S.S. Apostoloff, E.S. Andriyakhina, I.S. Burmistrov, готовится к печати.
- [15] А.Ш. Дотдаев, Я.И. Родионов, А.В. Рожков, П.Д. Григорьев, “Квазиклассическое рассеяние на краевых дефектах в топологических изоляторах в магнитном поле”, *Письма в ЖЭТФ* 120(9), 701-713 (2024).
- [16] G.E. Volovik, “Fermionic quartet and vestigial gravity”, *Письма в ЖЭТФ* 119, 317-318 (2024); *JETP Lett.* 119, 330-334 (2024).
- [17] V. Y. Pinchenkova, S. I. Matveenko, and G. V. Shlyapnikov, “Superfluid transition of disordered dipolar Fermi gases in a 2D lattice”, *arXiv:2402.06977* (2024).
- [18] P. V. Dolganov, K. D. Baklanova, V. K. Dolganov, E. I. Kats, “Photonics of two-dimensional structures formed by cholesteric liquid crystals”, *JETP Lett.* 120(10), 808, (2024).
- [19] E.I. Kats, “Bird’s-eye view to the realm of N_{TB} liquid crystals”, *arXiv:2409.16303* (2024).
- [20] P.D. Grigoriev, V.D. Kochev, V.A. Tsyplukhin, A.M. Dyugaev, I.Ya. Polishchuk, “Loss rate of ultracold neutrons due to the absorption by trap walls in large material traps”, *arXiv:2407.03207* (2024).
- [21] V.D. Kochev, T.I. Mogilyuk, S.S. Kostenko, P D. Grigoriev, “Numerical Calculation of Electric Field Enhancement in Neutron Traps with Rough Walls Coated with Superfluid Helium”, *Bull. RAS: Physics*, 88(9), 1472–1477, (2024).
- [22] П.Д. Григорьев, В.Д. Кочев, В.А. Цыплухин, А.М. Дюгаев, И.Я. Полищук, “Метод измерения отклонения от закона Ламберта при диффузном рассеянии ультрахолодных нейтронов на материальных стенках”, *Письма в ЖЭТФ* 120(12), 911 (2024).
- [23] Д.Д. Суховерхова, Л.Н. Щур, “Влияние анизотропии на исследование критического поведения спиновых моделей методами машинного обучения”, *Письма в ЖЭТФ* 120(8), 644-649 (2024) [Diana Sukhoverkhova, Lev N. Shchur, “Influence of anisotropy on the study of critical behavior of spin models by machine learning methods”, *arXiv:2410.14523*].
- [24] V. Mozolenko, M. Fadeeva, L. N. Shchur, “Comparison of the microcanonical population annealing algorithm with the Wang-Landau algorithm”, *Phys. Rev. E* 110, 045301 (2024); *arXiv:2405.10865*.
- [25] Vyacheslav Mozolenko, Lev Shchur, “Blume-Capel model analysis with a microcanonical population annealing method”, *Phys. Rev. E* 109, 045306 (2024); *arXiv:2402.18985*.

- [26] Vladislav Chertentkov and Lev Shchur, Supervised and Transfer Learning for Phase Transition Research, accepted to Springer LNCS (Lecture Notes in Computer Science).

6.2 Квантовые явления в наноструктурах и новых материалах

В рамках данной темы в 2024 году в ИТФ им. Л.Д. Ландау проводились исследования в области теории мезоскопических сверхпроводников, теории двумерных, квазиодномерных систем (квантовых проволок) и квантовых точек, теории многочастичной локализации, мезоскопической спинтроники, физики квантовых вычислений и других вопросов нанофизики и квантовой мезоскопии.

Ниже приводятся результаты, полученные в 2024 году.

Неупорядоченные среды

Мы исследовали электронные состояния, возникающие благодаря флуктуациям случайного потенциала в системах с далекими прыжками. В отличие от систем с короткими прыжками, оптимальные флуктуации случайного потенциала, ответственные за образование состояний в запрещенной зоне, не становятся мелкими и широкими, когда соответствующая энергия связи приближается к границе разрешенной зоны: напротив, они остаются глубокими и узкими. Пространственные размеры соответствующих электронных волновых функций также остаются малыми при всех $E < 0$. При этом поведение состояний внутри разрешенной зоны, вблизи ее края, также оказываются чрезвычайно необычными. С помощью рассмотрения большой, но конечной системы мы показали, что при пересечении края зоны истинно локализованные (при $E < 0$) состояния превращаются при $E > 0$ в «квазилокализованные», образуя резонансы на фоне непрерывного спектра. Волновые функции квазилокализованных состояний состоят из узкого «кора», практически не отличающегося от истинно локализованной функции при $E < 0$, и делокализованного «хвоста», простирающегося вплоть до границ системы. При малом положительном E амплитуда хвоста мала, но он спадает с расстоянием настолько медленно, что не может быть нормирован. В результате, при $L \ll L_c(E) \sim E^{2-2(D+1)/\alpha} \gg 1$ в нормировке волновой функции доминирует кор (квазилокализованное состояние), а при $L \gg L_c(E)$ – доминирует хвост (делокализованное состояние). Также весьма необычными свойствами обладает Inverse Participation Ratio (IPR) $P_q(E)$. В частности, возможна ситуация, когда нормировка волновой функции определяется хвостом (т.е., в этом смысле состояние делокализовано), а в $P_q(E)$ доминирует вклад кора. Мы также численно исследовали форму оптимальной флуктуации и соответствующей локализованной волновой функции кора. Оказалось, что с точностью до нескольких процентов они сосредоточены на одном узле. Поэтому одноузельное приближение, позволяющее решить задачу полностью аналитически, хотя и не является точным, но может служить отличным приближением. [1] (А.С. Иоселевич)

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. Работа готовится к публикации. [2] (М. А. Скворцов)

Квантовые проволоки и квантовые точки

Изучена одномерная расширенная модель Китаева, в которой перескоки и сверхпроводящие спаривания реализуются между произвольными соседями, и, одновременно с этим, цепочка взаимодействует с произвольным количеством резервуаров (бань) и ферми-контактов. Первые описываются линейными неоднородными операторами Линдблада. На основе квантово-полевого описания эволюции на контуре Келдыша проанализирована зависимость размерности пространства неравновесных стационарных состояний от числа бань, контактов и значения топологического инварианта, задающего количество краевых майорановских мод в изолированной системе. Для случая с одной баней и одним контактом, взаимодействующим с крайним узлом проволоки, получены выражения для электронного тока в контакте и заселенности узлов проволоки. На основе этих результатов, принимая во внимание возросший интерес к одномерным системам квантовых точек как к структурам, перспективным для реализации майорановских возбуждений, исследованы особенности транспортных свойств проволоки Китаева, состоящей из нескольких узлов и подверженной влиянию диссипативных полей. Публикация в журнале WoS/Scopus планируется в 2025 году. (С.В. Аксенов, И.С. Бурмистров)

Влияние многочастичных взаимодействий на топологические фазы - одна из проблем, которая все еще остается актуальной в современной теории конденсированных сред. В работе этот вопрос рассмотрен в рамках теории возмущений для описания топологических фазовых переходов, связанных с зарядовыми корреляциями, в модели расширенной цепочки Китаева, которая относится к классу симметрии BDI. Полученные поправки к функции Грина для квазичастиц нулевой частоты позволяют разделить средне-полевые вклады и флуктуационные вклады в общее число намоток (топологический инвариант). В результате появляются фазовые переходы, вызванные исключительно флуктуационными вкладами. Тщательно проанализирован механизм таких переходов с точки зрения узловых точек, вызванных флуктуациями, и перенормировки спектра. Кроме того, в контексте топологических фазовых переходов обсуждаются особенности других свойств квазичастиц, такие как эффективная масса и затухание. [3] (С.В. Аксенов, М.С. Шустин, И.С. Бурмистров)

Двумерные материалы

Разработана теория динамики изгибных деформаций в гибких двумерных материалах. Изучено затухание изгибных фононов в свободно подвешенных кристаллических мембранах. Продемонстрировано, что перенормировка динамических свойств не включает в себя расходящиеся на ультрафиолете логарифмические вклады, в отличие от статических. Этот факт позволяет найти скейлинговый вид затухания, определить его асимптотическое поведение на малых и больших частотах и получить точное выражение для динамического показателя изгибных фононов в длинноволновом пределе: $z = 2 - \eta/2$. Здесь η — универсальный показатель, управляющий статической перенормировкой изгибной жесткости. Также определен динамический показатель для

длинноволновых плоскостных фононов: $z' = (2 - \eta/2)/(1 + \eta/2)$. Полученные результаты сравнены с экспериментами по изучению фононных спектров в графене. [4, 5] (И. С. Бурмистров, А. Д. Коковин)

Исследовано упругое поведение двумерной кристаллической мембраны, вложенное в пространство большой размерности, в котором возникает произвольное число изгибных фононных мод d_c . Показатель изгибной жесткости $\eta(d_c)$ вычислен с помощью численного моделирования поведения системы в универсальном режиме с использованием метода Фурье-Монте-Карло. Эта универсальная величина определяет корреляционную функцию внеплоскостных деформаций в длинноволновом пределе и поведение перенормированной изгибной жесткости на малых волновых векторах, $\kappa \sim q^{-\eta}$. Полученные численные оценки показателя η для различных значений d_c сравниваются с результатами, полученными с помощью приближенных аналитических методов. [6] (И.С. Бурмистров)

В работе исследуется энергетический спектр экситонов и их распространение в муаровых сверхрешетках, сформированных в гетеробислоях дихалькогенидов переходных металлов. В таких структурах в результате слабого межслоевого взаимодействия возникает эффективный муаровый потенциал, действующий на экситоны. Обычно экситоны считаются локализованными в таком потенциале. В настоящей работе показано, что связь оптически активных экситонов с индуцированным электромагнитным полем приводит к линейной по волновому вектору дисперсии энергии даже при подавлении квантово-механического туннелирования между местами локализации. Эффект может быть описан как результат процессов виртуальной генерации-рекомбинации экситонов в местах локализации, что приводит к r^3 зависимости матричного элемента переноса от межузлового расстояния r . На основе рассчитанного энергетического спектра исследуется распространение экситонов в муаровых сверхрешетках с учетом взаимодействия света с экситонами. Рассматривается полуклассическая диффузия экситонов с учетом рассеяния экситон-фонон и экситон-статический дефект. Для этих механизмов коэффициент диффузии уменьшается с ростом температуры. Мы также анализируем прыжковый режим распространения и демонстрируем, что температурная зависимость коэффициента диффузии экситона описывается степенным законом, а не экспоненциальной функцией температуры. [7] (А.М. Шенцев)

Многочастичная локализация

Взаимодействие между электрон-электронными взаимодействиями и явлениями слабой локализации (или антилокализации) в двумерных системах может значительно повысить температуру сверхпроводящего перехода. Развита теория квантовых флуктуаций в таких мультифрактально усиленных сверхпроводящих состояниях в тонких пленках. В условиях слабого беспорядка с использованием нелинейной сигма-модели Финкельштейна получено эффективное действие, описывающее поведение параметра сверхпроводящего порядка и квазиклассической функции Грина. Это эффективное действие, применимое для взаимодействий любой силы, показывает физический смысл хорошо известных коллективных мод в грязном сверхпроводнике, а анализ седловой точки приводит к модифицированным уравнениям Узаделя и самосогласования. Эти уравнения учитывают перенормировки, связанные с наличием и

взаимодействия и беспорядка, что приводит к нетривиальной энергетической зависимости функции щели. Установлена прямая связь между самосогласованным уравнением для щели при температуре сверхпроводящего перехода и известными уравнениями ренормгруппы для параметров взаимодействия в нормальном состоянии. [8] (И.С. Бурмистров)

Физика квантовых вычислений

В сверхпроводниковых гетероструктурах возможно возникновение связанных подщелевых мод, известных как андреевские состояния. В системах с топологической сверхпроводимостью были открыты подобные состояния нового типа, получившие название майорановских нулевых мод. Локализованные майорановские состояния могут служить основой для реализации топологических квантовых вычислений, а краевые киральные майорановские моды в двумерных материалах способны переносить квантовые состояния. Показано, как этот подход может быть реализован с краевыми состояниями в топологической фазе шестиугольной модели Китаева. Исследована процедура передачи квантовых состояний между внешними кубитами и её точность. [9] (Ю.Г. Махлин)

Проанализированы свойства бифуркационных квантовых детекторов, основанных на слабо-нелинейных сверхпроводниковых резонансных системах, и их использование для квантовых измерений. Развитый количественный подход показывает существенное влияние высших гармоник на характеристики детектора. Основное внимание уделяется анализу бифуркационного детектора с удвоением периода под действием накачки, однако, подобный эффект имеет место и для более широкого класса систем, в том числе для джозефсоновского бифуркационного усилителя. Бифуркация возникает из-за номинально квадратичной нелинейности, которая обеспечивает параметрическое рассеяние сигнала накачки вблизи удвоенной частоты основной моды резонатора. Проанализировано влияние высших гармоник на динамику основной моды, в первую очередь с приложением к системе, основанной на джозефсоновском контакте с синусоидальным ток-фазовым соотношением. Вычислен вклад за пределами монохроматического приближения и показано, что он значительно изменяет характеристики устройства. Благодаря высокой чувствительности системы к малым изменениям параметров она может служить эффективным детектором квантового состояния сверхпроводниковых кубитов. [10] (Ю.Г. Махлин)

Рассмотрен интерферометр на основе киральных одномерных майорановских и дираковских нулевых мод в гибридных структурах сверхпроводник/ферромагнетик/сверхпроводник на поверхности топологического материала. Такие одномерные краевые моды могут переносить джозефсоновский ток, что приводит к необычному ток-фазовому соотношению для топологического контакта с магнитной прослойкой. Получено выражение для сверхтекучего тока и исследованы его свойства. Доменные стенки в магнетике и сверхток влияют друг на друга, что приводит, с одной стороны, к зависимости тока от магнитной структуры, а с другой стороны, к эффективному взаимодействию доменных границ посредством майорановских мод, что в свою очередь влияет на магнитную динамику в структуре. [11] (Ю.Г. Махлин, К. Е. Турышев)

Гетероструктуры со сверхпроводником

Асимметричные СКВИДы, в рукавах которых находятся разные джозефсоновские контакты с высшими джозефсоновскими гармониками в ток-фазовых соотношениях, демонстрируют (джозефсоновский) диодный эффект. Сила и знак эффекта зависят от магнитного потока через петлю интерферометра. Мы исследуем влияние конечной емкости контактов и температуры на различные проявления джозефсоновского диодного эффекта в асимметричном СКВИДе. Основное внимание уделяется «минимальной модели», в которой один контакт имеет синусоидальную ток-фазовую характеристику, а другой помимо этого имеет дополнительную вторую гармонику. В рамках этой модели мы аналитически и численно находим вольт-амперную характеристику (без и под воздействием внешнего излучения) и показываем, что наличие емкости приводит к асимметрии гистерезисного поведения СКВИДа. В частности, оказывается возможным односторонний гистерезис (гистерезисное поведение только при одном направлении тока). В случае малой конечной температуры и нулевой емкости контактов мы определяем асимметрию вольт-амперной характеристики, которая в данном режиме оказывается экспоненциально сильной. В случае же конечной емкости контактов и малой температуры мы вычисляем асимметрию токов переключения как под действием температурных флуктуаций, так и в условиях синхронизации с внешним переменным током. Обсуждается выбор оптимальных параметров контактов для максимизации диодного эффекта и эффективного управления состоянием диода. [12] (Г.С. Селезнев, Я.В. Фоминов)

Проведен теоретический анализ недавних экспериментов, выполненных в Казанском физико-техническом институте им. Е.К.Завойского РАН при участии коллег из Института Лейбница (Дрезден, Германия). Экспериментаторам удалось добиться проявления сильного эффекта сверхпроводящего спинового клапана (ССК) в структурах различной конфигурации. В работе [13] исследовалась структура F1/F2/S, в которой в качестве ферромагнетика использовался сплав Гейслера. Магнитные свойства такого вещества существенно зависят от способа приготовления, что позволяет один и тот же сплав использовать в качестве ферромагнетиков разной силы. Это в свою очередь приводит к выраженной зависимости критической температуры сверхпроводящего перехода от взаимной ориентации слоев F1,2 при непрерывном вращении намагниченности, особенно в случае, когда F1 — сильный ферромагнетик. В работах [14, 15] исследовались структуры типа F1/S/F2. Для наблюдения эффекта ССК в таких структурах экспериментаторы обычно стремятся сделать границы как можно более прозрачными. Однако в рамках данных экспериментов границы намеренно были сделаны неидеальными, в духе работы Дойчера и Менье [G. Deutscher and F. Meunier, Phys. Rev. Lett. 22, 395 (1969)]. Несмотря на неполную прозрачность границ обнаружен существенный эффект ССК между параллельной и антипараллельной ориентациями ферромагнетиков. 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. Для структур типа F1/S/F2 с неидеальными границами предложено объяснение эффекта, связанное с реализацией в системе “хрупкой” сверхпроводимости, не подавленной

именно из-за наличия границ и на этом фоне чувствительной к ориентации намагниченностей. [13, 14, 15] (Я.В. Фоминов).

Электроны в магнитном поле

Изучен эффект де Гааза–ван Альфена в изоляторах. Мы были мотивированны экспериментом на тяжелофермионном материале SmB_6 , который является изолятором. В эксперименте был наблюдён эффект де Гааза–ван Альфена.

В работе [16] были получены оригинальные результаты поведения формулы Лифшица-Косевича в изоляторах. Наша модель изолятора состояла из двух фермионов, один дисперсионный, а другой без, которые гибридизируются в точке пересечения их спектров, чтобы открыть энергетическую щель на Фермиевской поверхности дисперсионных фермионов. Мы аналитически получили немонотонное поведение амплитуды осцилляций как функция температуры. Мы назвали это как “quantum oscillations as a function of temperature” по аналогии с осцилляциями в магнитном поле. Мы аналитически оценили первый максимум осцилляций по температуре, аналитически оценили высоту его пика. (В.А. Зюзин)

В работе [17] мы слегка обобщили модель работы [16] и применили её для описания экспериментов в SmB_6 . Бездисперсионный фермион в нашей обобщенной модели стал дисперсионным, электрон-подобным, с массой гораздо тяжелее, чем второй фермион. Опять таки два фермиона гибридизируются, но на Фермиевской поверхности теперь всегда остаётся тяжелый фермион, который представляет из себя гибрид из двух. Нам удалось качественно объяснить эксперимент на SmB_6 . В частности, мы нашли гигантский температурный пик в поведении амплитуды осцилляций, который возникает на очень низких температурах ($<1\text{K}$). Было показано, что этот гигантский пик отвечает осцилляциям тяжелофермионного гибрида. Мы применили результаты работы [16] (позиция первого пика температурных осцилляций) для оценки энергетической щели легких фермионов. Она оказалась практически равной той, которая на эксперименте вытаскивалась из активационного поведения сопротивления материала. С этой щелью мы оценили температуру, при которой гигантский низкотемпературный пик начинает расти. Она соответствовала экспериментальной. Масса тяжелого фермиона (до гибридизации) оказалась в 200 раз тяжелее, чем лёгкого. (В.А. Зюзин)

Теоретически предсказан новый класс аномального эффекта Холла, который может существовать в антиферромагнитном металле [18]. Эффект квадратичен и имеет d -волновую симметрию по магнитному полю. Более того электрический ток, поперечная току разница электрического напряжений и магнитное поле находятся в одной плоскости. Мы также предсказали новый тип линейного магнетосопротивления, которое тоже имеет d -волновую симметрию, но по направлению электрического поля. Этот эффект, похоже, недавно был экспериментально наблюдён.

В работе [19] исследовано спиновое расщепление электронов проводимости типа Зеемана в металлических антиферромагнетиках с волной зарядовой плотности. Мы изучили несколько вариантов спин-орбитального взаимодействия и получили условия возникновения аномального эффекта Холла в таких антиферромагнетиках. Как результат мы предложили объяснение наблюдаемого в псевдощелевой фазе купратов полярного эффекта Керра. Интерес этой работы состоит в том, что обычно предпола-

гается, что электроны проводимости не испытывают спинового расщепления в антиферромагнетиках. Это правда только, когда есть определенные симметричные операции, под действием которых подрешетки переходит одна в другую. Если же нарушать эти симметрии, то будет появляться спиновое расщепление электронов проводимости. (В.А. Зюзин)

Развивая идею работы [19], нами рассмотрена система, в которой нарушены все симметрии, соединяющие подрешетки, путём несимметричного орнамента немагнитных атомов, которые окружают две подрешетки. При этом элементарная ячейка с двумя атомами сохраняется этим орнаментом. Найдено спиновое расщепление электронов проводимости. (В.А. Зюзин)

Доменные стенки в ферроэлектриках

Недавнее открытие и исследование проводимости доменной стенки в сегнетоэлектриках обещает существенно изменить концепцию инверсии поляризации. Мы показываем на примере ниобата лития, что наличие проводимости доменной стенки не только решает давнюю проблему нереалистично высокой энергии образования доменов, но и приводит к экспоненциальным зависимостям электрического поля для скоростей зародышеобразования и латерального роста с характерными полями 75 и 15 кВ/мм. Кинетика инверсии поляризации показывает отдельные стадии зародышеобразования, латерального роста и коалесценции отдельных доменов. Она соответствует, в соответствии с экспериментом, общему экспоненциальному закону для времени инверсии. Насколько нам известно, это исследование является первым, теоретически объясняющим этот закон. [20] (Н.Г. Маснев)

Список публикаций

- [1] V. Temkin, A.S. Ioselevich, “Coexistence of localized and extended states in the Anderson model with long-range hopping”, *Annals Phys.* 462, 169620 (2024).
- [2] M. A. Skvortsov, O. B. Zuev, and D. I. Fazlizhanova, “Supercurrent flow in inhomogeneous superconductors”, arXiv:2412.00203.
- [3] M.S. Shustin, S.V. Aksenov, I.S. Burmistrov, “Topological phases induced by charge fluctuations in Majorana wires”, *Phys. Rev. B* 109, 075435 (2024).
- [4] A. D. Kokovin, V. Yu. Kachorovskii, I. S. Burmistrov, “Narrowing of the flexural phonon spectral line in stressed crystalline two-dimensional materials”, *Phys. Rev. Lett.* 133, 136203 (2024).
- [5] A. D. Kokovin, I. S. Burmistrov, “Attenuation of flexural phonons in free-standing crystalline two-dimensional materials”, *Phys. Rev. B* 110, 125432 (2024).
- [6] D. A. Ivanov, A. Kudlis, I. S. Burmistrov, “The bending rigidity exponent of a two-dimensional crystalline membrane with arbitrary number of flexural phonon modes”, *Phys. Rev. E* 110, L022104 (2024).
- [7] A.M. Shentsev, M.M. Glazov, “Electromagnetic field assisted exciton diffusion in moiré superlattices”, arXiv:2409.04284.
- [8] E. S. Andriyakhina, P. A. Nosov, S. Raghu, I. S. Burmistrov, “Quantum fluctuations and multifractally-enhanced superconductivity in disordered thin films”, *J. Low Temp. Phys.* 217, 187 (2024).
- [9] I. Timoshuk and Yu. Makhlin, “Quantum information transmission with topological edge states”, *J. Low Temp. Phys.* 217, 167 (2024).
- [10] Yu.Makhlin and A.B.Zorin, “Josephson bifurcation readout: beyond the monochromatic approximation”, *ЖЭТФ* 109, 98 (2024).
- [11] К.Е. Турышев, Ю.Г. Махлин, Взаимное влияние доменных стенок и сверхтока в топологическом джозефсоновском контакте, *Письма в ЖЭТФ*, 121(1), 57 (2025).
- [12] G. S. Seleznev, Ya. V. Fominov, “Influence of capacitance and thermal fluctuations on the Josephson diode effect in asymmetric higher-harmonic SQUIDs”, *Phys. Rev. B* 110, 104508 (2024).
- [13] A. A. Kamashev, N. N. Garif’yanov, A. A. Validov, V. Kataev, A. S. Osin, Ya. V. Fominov, I. A. Garifullin, “Expanding the operational temperature window of a superconducting spin valve”, *Phys. Rev. B* 109, 144517 (2024).

- [14] Andrey A. Kamashev, Nadir N. Garif'yanov, Aidar A. Validov, Vladislav Kataev, Alexander S. Osin, Yakov V. Fominov, Ilgiz A. Garifullin, "Superconducting spin valve effect in Co/Pb/Co heterostructures with insulating interlayers", Beilstein J. Nanotechnol. 15, 457 (2024).
- [15] А. А. Камашев, Н. Н. Гарифьянов, А. А. Валидов, В. Е. Катаев, А. С. Осин, Я. В. Фоминов, И. А. Гарифуллин, "Эффект сверхпроводящего спинового клапана в гетероструктуре Co/Pb/Co с изолирующими прослойками", Письма в ЖЭТФ 119, 296 (2024).
- [16] V.A. Zyuzin, "De Haas-van Alphen effect and quantum oscillations as a function of temperature in correlated insulators", Phys. Rev. B 109(23), 235111 (2024).
- [17] V.A. Zyuzin, "De Haas-van Alphen effect and a giant temperature peak in heavy fermion SmB₆ compound", JETP Lett. 120, 802 (2024).
- [18] D.L. Vorobev and V.A. Zyuzin, "d-Wave Hall effect and linear magnetoconductivity in metallic collinear antiferromagnets", Phys. Rev. B 109(18), L180411 (2024).
- [19] V.A. Zyuzin, "Anomalous Hall effect in metallic collinear antiferromagnets with charge-density wave order", Phys. Rev. B 110, 174426 (2024).
- [20] E. Podivilov, N. Masnev, B. Sturman, "Impact of Domain Wall Conduction on Ferroelectric Domain Reversal Kinetics", Pis'ma v ZhETF 119, 766 (2024).

6.3 Нелинейные режимы взаимодействия вещества и излучения

В 2024 году были продолжены исследования в области физики лазерного воздействия, синхротронного детектирования, плазмоники, нелинейных оптических сред.

Объектами исследований являются современные проблемы нелинейных взаимодействий излучения и вещества и нелинейные волновые теории. Полученные данные существенны для технологий плазмоники, оптоакустики и оптоволоконной передачи информации. Значительно продвинуты вперед теоретические представления о нелинейных волновых процессах.

Ниже приводятся результаты, полученные в 2024 году.

Взаимодействие лазерного излучения с веществом

Фемтосекундные импульсы широко используются в научных исследованиях и современных технологиях. При воздействии на металлы ультракороткое оптическое лазерное воздействие формирует выраженное двухтемпературное состояние с горячими электронами: $T_e \gg T_i$, где T_e и T_i — температуры электронной и решеточной подсистем. Представлены теоретические и численные описания экспериментальных измерений, выполненных с помощью техники фазочувствительного или синхронного детектирования (применяется lock-in усилитель) на объемной и пленочной (толщина 100 нм) мишенях из золота и мишени из пленки никеля на стеклянной подложке.

Благодаря тому, что в анализируемых нами опытах частота повторений нагревающих импульсов снижена до 31 Гц, нам удалось достичь температур около температуры плавления золота. Такая температура достигается в процессе электрон-фононной релаксации на финише двухтемпературной (2Т) стадии в объемной мишени из золота. Как известно, по окончании 2Т стадии температуры сближаются, $T_e \sim T_i$.

В объемных мишенях при наибольших достигнутых нами флюенсах пиковая электронная температура повышается до значений около 20 кК. Теоретические расчеты, имеющиеся в литературе, дают определенные зависимости для параметра электрон-фононного взаимодействия α и коэффициента электронной теплопроводности κ — ключевых параметров, характеризующих двухтемпературную стадию. Наше численное моделирование результатов экспериментальных измерений терморефлектанса показали, что в диапазоне флюенсов с пиковыми температурами T_e выше 10 кК и до 20 кК измеренные значения α и κ существенно ниже тех значений, которые дают теории.

Ниже этого диапазона флюенсов, т. е. когда пиковые T_e меньше 10 кК, измеренные нами значения согласуются с прежними данными. Это первый результат статьи. Кроме того, показано, что на однотемпературной стадии, когда тепловая энергия, запасенная в электронах, весьма мала, имеется значительное влияние принципиально двухтемпературного коэффициента α на теплоотвод из скин-слоя. Это связано с относительно малой толщиной прогретого слоя, которая в золоте составляет величину порядка 200–300 нм. [1] (Иногамов Н.А., Хохлов В.А., Петров Ю.В.).

Для развития микроэлектроники существенное значение имеют исследования физики индуцированных лазером сверхбыстрых процессов в тонких пленках. К таким процессам относятся: нагрев электронной подсистемы, релаксация и транспорт поглощенной энергии, а также генерация и распространение пикосекундных акустических волн. В этой связи в работе изучена динамика изменения дифференциального

коэффициента отражения $R(t)/R_0$ пленки никеля (Ni) толщиной 73 нм на подложке из стекла.

Измерения выполнены в схеме “возбуждение–зондирование” (pump-probe) с синхронным детектированием сигнала $R(t)/R_0$. За счет увеличения периода следования t_{cool} последовательности нагревающих (возбуждающих) импульсов достигнуты высокие значения поглощенного флюенса до 11 мДж/см². Увеличение t_{cool} позволяет лучше охлаждать пленку после нагревающего воздействия.

В результате получены рекордные значения температур ($T_e \approx 3$, $T_i \approx 1$ кК) и напряжений (до 7 ГПа). В литературе отсутствуют данные при таких высоких температурах и давлениях; высокими эти параметры являются для используемой техники синхронного детектирования. Именно при этих повышенных значениях удастся заметить влияние нелинейных эффектов — впервые в опытах с синхронным детектированием. [2] (Н.А. Иногамов, В.А. Хохлов)

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.

Продемонстрировано, что один рентгеновский импульс 9 кэВ лазера на свободных электронах может сформировать цилиндрическую полость диаметром менее микрона и длиной порядка 1 мм (!) в LiF, окруженную ударно-трансформированным материалом.

Генерируемая плазмой ударная волна с давлением на уровне ТПа 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.

Распространение волн давления в LiF, радиальное течение материала, образование трещин и пустот анализируются с помощью континуального и атомистического моделирования, выявляющего последовательность процессов, приводящих к конечной структуре с длинной полостью. Аналогичные результаты могут быть получены с полупроводниками и керамикой, что открывает новый путь для развития лазерной обработки материалов жесткими рентгеновскими импульсами. (Н.А. Иногамов, В.А. Хохлов, Ю.В. Петров) [3]

Технологии, связанные с ультратонкими пленками, имеют важное значение для микроэлектроники. В этой связи много внимания обращают на механические и оптические свойства пленок. В настоящей работе исследованы пленки никеля на подложке из стекла. Обнаружен неожиданный (аномальный) эффект прозрачности пленок для света с пропусканием 1-10% падающего излучения. При этом пленки, во-первых, имеют толщину достаточно большую по отношению к толщине скин-слоя, которая составляет 12-13 нм; поэтому такое пропускание названо “аномальным”. И, во-вторых, сохраняют свои упругие механические характеристики, которые не отличаются от свойств абсолютно однородных и с фиксированной толщиной пленок. Соответственно наши пленки действуют стандартно в качестве акустических резонаторов и в качестве излучателей акустических волн в подложку (трансдьюсеры). Аномальное пропускание света объясняется неоднородной структурой пленки. При этом пропус-

кание света позволяет видеть через пленку Бриллюэновские интерференционные осцилляции, связанные с распространением акустических волн в подложке. (Н.А. Иногамов, В.А. Хохлов, Ю.В. Петров) [4]

Волновые структуры в нелинейных оптических средах

Рассмотрено параксиальное распространение квазимонохроматической световой волны с двумя круговыми поляризациями в дефокусирующей Керровской среде с аномальной дисперсией внутри волновода кольцевого сечения. В режиме разделения фаз динамика подобна течению несмешивающихся жидкостей. При некоторых начальных условиях с относительным скольжением жидкостей вдоль границы их соприкосновения в системе развивается неустойчивость Кельвина-Гельмгольца в ее “квантовом” варианте. Численное моделирование соответствующих связанных нелинейных уравнений Шредингера показало формирование характерных структур на нелинейной стадии неустойчивости. Подобные структуры известны в теории бинарных бозеконденсатов, но для оптики они предъявлены впервые. [5] (В. П. Рубан)

Для локально изотропной фокусирующей Керровской среды с аномальной хроматической дисперсией численно промоделированы столкновения лево- и правополяризованных пространственно-временных оптических солитонов. Устойчивое распространение таких “световых пуль” в умеренно нелинейном режиме обеспечивается поперечным параболическим профилем показателя преломления внутри многомодового волновода. В таких системах поперечное движение центров масс волновых пакетов происходит по классическим траекториям двумерного гармонического осциллятора, а продольное движение — равномерно. Поэтому столкновения двух солитонов могут быть не только “лобовыми”, но и “касательными”. Результатом неупругого столкновения солитонов с противоположными круговыми поляризациями могут оказаться как две разлетающиеся бинарные световые пули, содержащие в себе правую и левую поляризации в некоторой пропорции, так и более сложные связанные структуры. [6] (В. П. Рубан)

Численно показано, что в световоде с винтовой симметрией связанные нелинейные уравнения Шредингера, описывающие взаимодействие левой и правой круговых поляризаций параксиальной оптической волны в дефокусирующей Керровской среде с аномальной дисперсией, имеют устойчивые решения в виде стационарно вращающихся продолговатых пузырей с присоединенными на концах несколькими оптическими вихрями. Пузырь представляет собой произвольно длинную квазицилиндрическую трехмерную полость в одной из компонент, заполненную противоположной компонентой. Поперечный профиль пузыря определяется формой сечения световода, шагом винта, количеством вихрей и фоновой интенсивностью окружающей компоненты, но не полным количеством заполняющей компоненты. [7] (В. П. Рубан)

Для монохроматической слабонелинейной световой волны в Керровской среде предложена система уравнений, которая до третьего порядка по амплитуде электрического поля эквивалентна известному уравнению $\text{rot rot } \mathbf{E} = k_0^2 [\mathbf{E} + \alpha |\mathbf{E}|^2 \mathbf{E} + \beta (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{E}^*]$, но при этом новые уравнения гораздо более удобны для численного счета. В рамках этой системы промоделированы оптические поля с мелкими структурами всего в две-три длины волны. Обнаружено, что в некоторой области параметров возможен устой-

чивый самосфокусированный световой пучок (двумерный векторный солитон), и для этого модификация нелинейности совсем не обязательна. Рассчитаны “неупругие” столкновения двух таких тонких лучей, имеющих противоположные круговые поляризации. Кроме того, для дефокусирующей нелинейности приведены примеры взаимодействующих оптических вихрей, пространственного разделения круговых поляризаций, а также неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. [8] (В. П. Рубан)

Неодномерные гравитационные волны на поверхности жидкости

Исследована модуляционная неустойчивость двух встречных волн на поверхности 3D глубокой жидкости. Получено выражение для инкремента этой неустойчивости. Также показано, что приближенные уравнения (уравнение Захарова) являются неустойчивыми относительно мелкомасштабных возмущений. Вычислен порог этой неустойчивости. [9] (А.И. Дьяченко)

Частичная прозрачность в задачах рассеяния волн

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 данной работе приведен обзор результатов по описанной тематике. [10] (П.Г. Гриневич)

Смежные проблемы взаимодействия вещества и излучения

Мы обсуждаем последствия уникальной симметрии пространства-времени де Ситтера, которая инвариантна относительно модифицированных трансляций. Благодаря этой симметрии все сопутствующие наблюдатели в любой точке пространства де Ситтера воспринимают среду де Ситтера как термальную баню с температурой $T = H/\pi$, которая вдвое больше температуры Гиббонса-Хокинга космологического горизонта. Это приводит к теплообмену между гравитацией и материей и к неустойчивости состояния де Ситтера по отношению к созданию материи, ее дальнейшему нагреву и, в конечном итоге, к распаду состояния де Ситтера. Температура $T = H/\pi$ определяет различные процессы в среде де Ситтера, которые невозможны в вакууме Минковского, такие как процесс ионизации атома. Эта температура также определяет локальную энтропию вакуумного состояния де Ситтера, и это позволяет нам вычислить полную энтропию внутри космологического горизонта. Результат воспроизводит

энтропию Гиббонса-Хокинга, которая связана с космологическим горизонтом: полная энтропия в объеме, окруженном космологическим горизонтом, оказывается равной $A/4G$. Это подтверждает голографические свойства космологического горизонта. Мы расширяем рассмотрение локальной термодинамики состояния де Ситтера, используя гравитацию $f(R)$. В этой термодинамике скалярная кривизна Риччи R и эффективная гравитационная константа связи K являются термодинамически сопряженными переменными. Голографическая связь между объемной энтропией объема Хаббла и поверхностной энтропией космологического горизонта остается прежней. Мы также рассматриваем термодинамику черных и белых дыр. [11] [12] (Г.Е. Воловик)

Доказано, что в изучаемой С.Н. Вергелесом 4D решёточной модели гравитации существует высокотемпературная фаза, которая характеризуется обращением в нуль среднего тензора энергии-импульса материи и коллапсом пространства в точку. Показано также существование низкотемпературной фазы в длинноволновом пределе, геометрические свойства которой и динамика соответствуют известным представлениям: расширение Вселенной сначала идёт по экспоненциальному закону, и затем плавно переходит на степенной режим. [13] (С.Н. Вергелес)

Список публикаций

- [1] Н.А. Иногамов, В.А. Хохлов, С.А. Ромашевский, Ю.В. Петров, М.А. Овчинников, С.И. Ашитков, “Сильное возбуждение электронной подсистемы золота ультракоротким лазерным импульсом и процессы релаксации около температуры плавления”, ЖЭТФ 165, 165-190 (2024).
- [2] В.А. Хохлов, С.А. Ромашевский, С.И. Ашитков, Н.А. Иногамов, “Синхронное детектирование нелинейных явлений в оптоакустических осцилляциях нанопленки, инициированных фемтосекундным лазерным импульсом”, Письма в ЖЭТФ 120, 550-559 (2024).
- [3] S.S. Makarov, S.A. Grigoryev, V.V. Zhakhovsky, P. Chuprov, T.A. Pikuz, N.A. Inogamov, V.V. Khokhlov, Y.V. Petrov, E. Perov, V. Shepelev, T. Shobu, A. Tominaga, L. Rapp, A.V. Rode, S. Juodkazis, M. Makita, M. Nakatsutsumi, T.R. Preston, K. Appel, Z. Konopkova, V. Cerantola, E. Brambrink, J.-P. Schwinkendorf, I. Mohacsi, V. Vozda, V. Hajkova, T. Burian, J. Chalupsky, L. Juha, N. Ozaki, R. Kodama, U. Zastrau, and S.A. Pikuz, “Formation of high-aspect-ratio nanocavity in LiF crystal using a femtosecond of x-ray FEL pulse”, arXiv:2409.03625 [physics.plasm-ph] (2024).
- [4] Ю. В. Петров, С. А. Ромашевский, А. В. Дышлюк, В. А. Хохлов, Е. М. Еганова, М. В. Поляков, С. И. Ашитков, О. Б. Витрик, Н. А. Иногамов, “Аномальное пропускание света пленками толщиной до 5-7 толщин скин-слоя при сохранении их механических характеристик по отношению к оптоакустике”. Статья готовится к печати.
- [5] В. П. Рубан, “Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца в нелинейной оптике”, ЖЭТФ 165, 294 (2024).
- [6] В. П. Рубан, “Столкновения световых пучков разной круговой поляризации”, Письма в ЖЭТФ 119, 579 (2024).
- [7] В. П. Рубан, “Стабилизация оптических пузырей вблизи оси винтового световода”, Письма в ЖЭТФ 120, 104 (2024).
- [8] В. П. Рубан, “Мелкомасштабные световые структуры в керровской среде”, Письма в ЖЭТФ 120, 745-751 (2024).
- [9] А.И. Дьяченко, Д.И. Качулин, Instability of the counter streaming gravity waves. Статья готовится к печати.
- [10] P.G. Grinevich and R.G. Novikov “Transparent scatterers and transmission eigenvalues”, arXiv:2407.16451 (2024).

- [11] G.E. Volovik, “Thermodynamics and decay of de Sitter vacuum”, *Symmetry* 16, 763 (2024).
- [12] G.E. Volovik, “de Sitter local thermodynamics in $f(R)$ gravity”, *Pis'ma v ZhETF* 119, 560–561 (2024); *JETP Letters* 119, 564–571 (2024).
- [13] С.Н. Вергелес, “Фазовый переход в точке Большого Взрыва в решёточной теории гравитации”, *ЖЭТФ* 166, 781 (2024).

6.4 Хаотическая и регулярная динамика систем гидродинамического типа

В 2024 году проводились исследования в области гидродинамики, волновой турбулентности и турбулентных спектров, трёхмерной статистически изотропной турбулентности, нелинейного уравнения Шредингера и методов его решения, переноса и перемешивания в турбулентных и хаотических потоках, статистики турбулентных пульсаций в когерентных двумерных потоках в режимах слабой и сильной нелинейности, распространения электромагнитных волн в турбулентной среде, динамики растворов полимеров и жидких кристаллов, а также развития подходов решения уравнений динамики систем гидродинамического типа.

Ниже приводятся результаты, полученные в 2024 году.

Волновая турбулентность и турбулентные спектры

В работе [1] численно и аналитически исследована звуковая турбулентность в режимах слабой и сильной нелинейности. На основе прямого численного моделирования акустической турбулентности показано, что в рамках слабой нелинейности реализуется спектр Захарова-Сагдеева $E(k) \propto k^{-3/2}$ не только для случая слабой дисперсии, но также и в бездисперсионном пределе. Такие спектры сопровождаются появлением в k -пространстве струй в виде узких конусов. При слабой дисперсии струи сосредоточены в области малых волновых чисел k , при больших волновых числах распределение стремится к изотропному благодаря дисперсии. Спектр турбулентности как усредненное по углам распределение зависит от потока энергии по масштабам как $\epsilon^{1/2}$, в полном соответствии с теорией слабой волновой турбулентности. В бездисперсионном пределе спектр турбулентности при малом уровне накачки представляет собой набор непересекающихся струй. Для каждой такой струи дифракционные эффекты оказываются сильнее нелинейных, благодаря чему спектр звуковой турбулентности приобретает вид спектра Захарова-Сагдеева. Увеличение амплитуды накачки в трехмерном случае в отсутствии дисперсии приводит к доминированию нелинейных эффектов, ответственных за формирование ударных волн. В результате акустическая турбулентность представляет собой ансамбль случайных ударных волн со спектром Кадомцева-Петвиашвили: $E(k) \propto k^{-2}$. Переход от слабой турбулентности к сильной сопровождается изменением в структуре плотности функции распределения для градиентов: от почти гауссового распределения к распределению со степенными хвостами. (Е.А. Кузнецов)

В работе [2] рассмотрен вопрос о формировании и устойчивости магнитных филаментов в конвективной зоне Солнца. Магнитные филаменты формируются в гиперболических областях поля скорости, которые представляют собой своеобразные аттракторы для магнитного поля. Показана устойчивость двумерных филаментов, сосредоточенных в областях нисходящих конвективных потоков, относительно трехмерных возмущений. Это объясняет наблюдаемые сплюснутые формы филаментов, ориентированных вдоль поверхностей соприкосновения конвективных ячеек. Исследовано влияние нарастающего магнитного поля на конвективное течение. Выяснено, что это влияние сильно подавлено, во-первых, благодаря тому, что магнитное поле в фила-

ментах достигает максимального значения в стационарной гиперболической точке, где скорость равна нулю, и, во вторых, из-за того, что в окрестности этой точки магнитное поле перпендикулярно вектору скорости. Численный эксперимент подтвердил эти выводы. (Е.А. Кузнецов)

Формирование когерентных вихревых структур в виде тонких блинов для трехмерных течений изучается на режиме больших чисел Рейнольдса, когда в главном порядке развитие таких структур может быть описано в рамках уравнений Эйлера для идеальных несжимаемых жидкостей [3]. Численно и аналитически на основе представления вихревых линий показано, что сжатие таких структур и, соответственно, увеличение их амплитуд возможно из-за сжимаемости завихренности в трехмерном случае. Показано, что этот рост имеет экспоненциальный характер и может рассматриваться как процесс формирования складки для бездивергентных полей завихренности. При больших амплитудах этот процесс в трехмерном случае имеет автомодельное поведение, связывающее максимальную завихренность и ширину блина соотношением универсального типа. (Е.А. Кузнецов)

В работе [4] рассмотрена проблема интегрируемости одномерного нелинейного уравнения Шредингера с периодическими граничными условиями. Получено каноническое преобразование к новым гамильтоновым переменным. В этих новых переменных нелинейное уравнение Шредингера становится линейным. Его решение в Фурье-гармониках представляет собой набор линейных осцилляторов. Частота каждого из них зависит от начальных условий. Каноническое преобразование представляется в виде бесконечного ряда. обсуждаются условия сходимости этого ряда. Проведено численное моделирование распространения слабонелинейных сигналов в оптоволокне. (А.И. Дьяченко)

Исследована одноточечная статистика спиральных турбулентных пульсаций в трехмерном крупномасштабном геострофическом вихре вращающейся жидкости. Предполагается, что спиральное течение создается с помощью статистически аксиально-симметричной случайной силы с нарушением зеркальной симметрии. Проводятся аналитические вычисления парных корреляторов компонент скорости и завихренности, на основе которых вычисляется средняя спиральность течения. Для проводящей жидкости аналитически вычисляется α -эффект в данной системе. Элементы α -тензора существенно зависят от соотношений между числами Россби Ro , Экмана Ek и магнитным числом Прандтля Pr_m . Также в терминах данных чисел устанавливается критерий, показывающий, когда α -эффект приводит к неустойчивости крупномасштабного среднего магнитного поля. [6] (Л.Л. Огородников, С.С. Вергелес)

Мы рассматриваем классическую задачу о динамической неустойчивости, приводящей к ленгмюровской циркуляции. В постановке задачи предполагается, что первоначально имеется сдвиговое течение, порождённое ветром, и плоская поверхностная волна, распространяющаяся в направлении потока. Неустойчивая мода представляет собой суперпозицию сдвигового течения и поверхностной волны, модулированных в горизонтальном направлении по размаху, и циркуляции, представляющей собой вихри в виде приповерхностных валков с осями, ориентированными вдоль сдвиговых линий тока и поперечными размерами, соответствующими периоду модуляции. Новизна нашего подхода заключается в том, что мы учитываем рассеяние исходной поверх-

ностной волны на медленной потоковой составляющей неустойчивой моды, порождающее модулированную волну, интерференцию рассеянной и начальной волн, вызывающую модуляцию стока дрейфа в поперечном направлении и последующим дополнительным усилением циркуляции вихревой силой, возникающей в результате нелинейного взаимодействия исходного сдвигового потока и модулированной части стока дрейфа. Ранее С. Лейбовичем и А.Д.Д. Крейком было показано, что третья часть выше описанного механизма может поддерживать ленгмюровскую циркуляцию. Мы вычисляем инкремент неустойчивости, который оказывается больше, чем полученный А.Д.Д. Крейком. Рассматривая рассеяние волн, мы описываем быстрое волновое движение как потенциальное течение с относительно слабой вихревой поправкой. Применение развитого нами метода может быть расширено и на другие течения, где быстрые осциллирующие поверхностные волны сосуществуют с медленным течением. [7] (И.А. Воинцев, С.С. Вергелес)

Экспериментально обнаружен новый турбулентный режим во вращающейся жидкости. Кубический аквариум с ребром 1 м заполнялся дистиллированной водой и устанавливался на вращающуюся платформу. Турбулентность возбуждалась вертикально неоднородными мешалками, установленными в четырёх углах куба. При фиксированной интенсивности воздействия мешалок был найден определенный диапазон частоты вращения аквариума, в котором в центре аквариума наблюдался устойчивый крупномасштабный антициклон, вокруг которого формировалось периферийное циклоническое течение. Измерены параметры полученного турбулентного режима для различных частот вращения куба. Предложена модель, согласно которой антициклоническое течение поддерживается поглощением инерционных волн, распространяющихся к оси вихря из периферийной области и несущих антициклонический угловой момент. Такая волна с фиксированной частотой, волновым числом по вертикали и аксиальным числом поглощается на определенном расстоянии от оси вихря в критическом слое. Напротив, волны, несущие циклонический импульс, отражаются и, следовательно, в конечном итоге передают свой угловой момент периферийному циклоническому течению. Такое разделение волн в ансамбле приводит к образованию касательного напряжения Рейнольдса, которое поддерживает антициклон. Процесс разделения имеет общую природу, поэтому способ формирования напряжений должен быть актуален во всех вращающихся турбулентных течениях с осесимметричным средним течением. [8] (С.С. Вергелес)

Перенос и перемешивание в турбулентных и хаотических потоках

Хаотические колебания потока ускоряют перемешивание скалярных полей за счет интенсивного перемешивания. В работе [9] (Н.А. Ивченко, В.В. Лебедев, С.С. Вергелес) рассматриваются статистические свойства пассивного перемешивания скалярных полей в однородном сдвиговом потоке со случайными гладкими флуктуациями на его фоне. Мы рассматриваем двумерный поток, в котором сдвиговая составляющая преобладает над плавными флуктуациями. Предполагается, что такой поток моделирует пассивное скалярное перемешивание, например, внутри крупномасштабного когерентного вихря, образующегося в двумерной турбулентности, или в эластичном турбулентном течении в микроканале. Мы рассмотрели как распадную задачу, так и случай непрерывного возбуждения флуктуация скаляра. В обоих случаях дина-

мика обладает сильной перемежаемостью, которую можно охарактеризовать с помощью одноточечных моментов и корреляционных функций, рассчитанных в нашей работе. Мы получили общие качественные свойства парной корреляционной функции. Кроме того мы провели более детальное исследование в рамках модели с короткокоррелированными во времени флуктуаций градиента скорости, получив количественные результаты.

Когерентные течения в двумерной турбулентности

Мы аналитически исследуем флуктуации завихренности, возбуждаемые внешней случайной силой в двумерной жидкости, и развиваем теорию возмущений, позволяющую вычислять нелинейные поправки к корреляционным функциям флуктуаций потока, найденным в линейном приближении. В частности, мы вычисляем поправки к парной и тройной корреляционным функциям завихренности. Это позволяет нам установить критерий применимости теории возмущений для различных соотношений между вязкостью жидкости и коэффициентом трения о дно. Мы обнаружили, что поправки ко второму моменту аномально слабы в случаях малого трения о дно и малой вязкости, и связали эту малость с балансами энергии и энстрофии в системе. Также мы показали, что при малом коэффициенте трения о дно тройная корреляционная функция завихренности характеризуется универсальным степенным поведением в некоторой области масштабов. Разработанный метод теории возмущений был проверен и подтвержден прямым численным моделированием. [10] (И.В. Колоколов, В.В. Лебедев, В.М. Парфеньев)

Исследуются флуктуации завихренности, возбуждаемые внешней случайной силой в двумерной жидкости в присутствии сильного внешнего сдвигового потока. Задача мотивирована анализом больших когерентных вихрей, возникающих в результате обратного энергетического каскада в конечной ячейке при больших числах Рейнольдса. Развивается теория возмущений для расчета нелинейных поправок к корреляционным функциям флуктуаций потока в предположении, что внешняя сила имеет малое время корреляции. Проанализированы поправки к парной корреляционной функции завихренности и некоторым моментам. Проведенный анализ позволяет установить достоверность теории возмущений для лабораторных экспериментов и численного моделирования. [11] (И.В. Колоколов, В.В. Лебедев)

Представлена теория двумерной турбулентности, возбуждаемой внешней силой в тонких пленках жидкости на масштабах, превышающих толщину пленки. Основной особенностью двумерной турбулентности является тенденция к генерации движений все большего и большего масштаба благодаря нелинейному взаимодействию. Тенденция приводит к образованию так называемого обратного каскада и, при некоторых условиях, больших когерентных вихрей. Мы обсуждаем профиль средней скорости когерентных вихрей и флуктуации потока на фоне средней скорости для различных режимов. Мы демонстрируем, что режим сильно взаимодействующих флуктуаций приводит к анизотропному скейлингу внутри когерентных вихрей. [12] (И.В. Колоколов, В.В. Лебедев)

Обратный турбулентный каскад в периодической квадратной ячейке приводит к образованию когерентного вихревого диполя размером с систему. Мы изучаем стати-

стику его движения путем проведения прямого численного моделирования при различных значениях коэффициента трения о дно α , интенсивности накачки ϵ и гипервязкости жидкости ν . В главном приближении когерентные вихри можно рассматривать как точечные вихри, и в рамках этой модели они дрейфуют с одинаковой дипольной скоростью, которая определяется их циркуляцией и взаимным расположением. Характерное значение дипольной скорости более чем на порядок меньше полярной скорости внутри когерентных вихрей. Турбулентные флуктуации приводят к появлению относительной скорости между вихрями, которая изменяет расстояние между ними. Мы обнаружили, что для сильного конденсата функция плотности вероятности вектора ρ , описывающего отличие во взаимном расположении когерентных вихрей от половины диагонали расчетной области, имеет вид кольца. Радиус кольца слабо зависит от контрольных параметров, а ширина кольца пропорциональна безразмерному параметру $\delta = \epsilon^{-1/3} L^{2/3} \alpha$, где ϵ — поток энергии в обратном каскаде, а L — размер системы. Случайное блуждание по кольцу, вызванное турбулентными флуктуациями, имеет супердиффузионный характер на промежуточных временах. Оно приводит к конечному времени корреляции дипольной скорости, которое оказывается порядка времени оборота $\tau_K = L^{2/3} \epsilon^{-1/3}$ крупномасштабных флуктуаций, образованных обратным турбулентным каскадом. Полученные результаты углубляют понимание процессов, управляющих движением когерентных вихрей.[5] (В.М. Парфеньев)

Электромагнитные волны в турбулентной среде

Дифракция световой волны на флуктуациях показателя преломления в турбулентной среде приводит к ее искажениям. Их анализ позволяет извлечь основные параметры турбулентности. В настоящей работе мы предлагаем новый метод, основанный на измерениях корреляционной функции градиентов фазы световой волны, который позволяет независимо находить параметр Фрида r_0 и затем внешний масштаб турбулентности L_0 . Метод успешно протестирован на данных измерений, полученных при прохождении лазерного излучения через газовую среду с искусственно созданной турбулентностью. [13] (И.В. Колоколов, В.В. Лебедев)

Мы исследуем статистику флуктуаций интенсивности светового пучка при его распространении в турбулентной атмосфере. Нас интересует вероятность относительно больших значений интенсивности пучка. Рассматривается модель единичного фазового экрана. Найден хвост функции плотности вероятности, характеризующийся показателем растянутой экспоненты $7/12$. Устанавливаются условия реализации этого хвоста и обсуждается общая картина.[14] (И.В. Колоколов, В.В. Лебедев)

Динамика растворов полимеров и жидких кристаллов

Электрогидродинамические явления в жидких кристаллах представляют собой старую, но все еще очень активную область исследований. Причина в том, что эти явления играют ключевую роль в различных областях применения жидких кристаллов, а также в общем интересе физического сообщества к неравновесным системам. Нематические жидкие кристаллы (НЖК) идеально подходят для таких исследований. Целью нашей статьи является теоретическое изучение линейной динамики НЖК. Мы учитываем ориентационную упругую энергию, гидродинамическое движение, внешнее

переменное электрическое поле, электропроводность и флексоэлектрическую поляризацию. Мы анализируем линейную устойчивость пленки NLC, определяя динамику возмущений относительно однородного исходного состояния NLC. Для этой цели мы вычисляем собственные значения матрицы эволюции за период действия внешнего переменного электрического поля. Эти собственные значения определяют коэффициенты усиления для мод в течение периода. Нестабильность возникает, когда основное собственное значение матрицы эволюции становится равным единице по абсолютной величине. Условие определяет порог (критическое поле) неустойчивости однородного состояния. Оказывается, что можно ожидать различных типов неустойчивости, которые лишь частично известны и исследованы в литературе. В частности, мы обнаружили, что флексоэлектрическая неустойчивость может приводить к двумерно-пространственной модуляции паттернов, проявляющих колебания во времени. Этот тип сооружений был как-то упущен из виду в предыдущих работах. [15] (Е.С. Пикина, В.В. Лебедев)

Предложен численный метод аппроксимации уравнений динамики течения полимерного раствора. Предлагаемый метод основан на гибридном подходе. Гидродинамическая составляющая потока описывается системой уравнений Навье–Стокса и численно аппроксимируется с использованием линеаризованного метода Годунова. Полимерная составляющая потока описывается системой уравнений для вектора растяжения полимера и численно аппроксимируется методом Курганова–Тадмора. С использованием этой схемы исследована устойчивость течения раствора полимера при малых числах Рейнольдса в квадратной ячейке под действием внешней периодической силы. Нестабильность этого типа течения, характеризующегося нарушением его ламинарности, изучена с помощью численного эксперимента. Построены спектральные характеристики раствора полимера при низких числах Рейнольдса. [16] (И.В. Колоколов, В.В. Лебедев)

Рассмотрена задача о двумерном течении вязкой слабосжимаемой жидкости в квадратной ячейке, возбуждаемой пространственно-периодической статической внешней силой (течение Колмогорова). Представлен новый метод определения структуры течения. Он основан на анализе поля завихренности в разное время. Этот метод используется для классификации типов течений, характеристики которых были получены с помощью численного моделирования. В зависимости от значений коэффициента трения о дно и силы нагнетания выделены основные режимы течения: ламинарный, хаотический и вихревой. Отдельно изучаются переходные типы течения: квазипериодический режим, возникающий в результате последовательности бифуркаций при смене ламинарного и хаотического режимов течения, и режим чередования, возникающий при переходе от хаотического течения к вихревому. Фазовые диаграммы строятся в пространстве амплитуда внешней силы–коэффициент трения о дно, что позволяет классифицировать тип течения на основе значений коэффициента трения о дно и силы нагнетания. [17] (И.В. Колоколов, В.В. Лебедев)

Уравнения динамики систем гидродинамического типа

Опубликовано английское издание задачника „Mathematical Methods of Physics: Problems with Solution“ [18]. Аннотация издания: Эта книга является английским пе-

реводом весьма особого сборника задач по математическим методам физики, который уже выдержал множество изданий на русском языке. Авторы этой книги — профессиональные физики-теоретики, много лет читающие курс методов математической физики на физическом факультете Новосибирского государственного университета. Методы математической физики традиционно считаются разделом математики и преподаются математиками. При преподавании физики очень важно делать акцент на качественном анализе задач и умении использовать разнообразные способы их решения. Кроме того, с нашей точки зрения, конкретные математические методы должны быть привязаны к решению физических задач, но физические задачи не должны быть привязаны к используемым математическим методам. Поэтому в нашей книге обсуждается очень широкий спектр математических методов и их применение к самым разным физическим задачам. Каждый раздел содержит теоретическое введение и большое количество задач и примеров разного уровня. Почти все задачи содержат решения и указания по их решению. Это делает книгу очень полезной для самостоятельного изучения. Многочисленные беседы с молодыми исследователями, которые в настоящее время успешно работают в области теоретической физики, физики плазмы, гидродинамики и других и изучали математические методы физики по нашему учебнику, полностью подтвердили правильность выбранной методики преподавания. Мы уверены, что освоение современных методов математической физики с помощью нашей книги принесет большую пользу и читателям английского издания. (Е.А. Кузнецов)

Список публикаций

- [1] E.A. Kuznetsov, E.A. Kochurin, “Three-Dimensional Acoustic Turbulence: Weak Versus Strong”, *Phys. Rev. Lett.* 133, 207201 (2024).
- [2] E.A. Kuznetsov, E.A. Mikhailov, “Magnetic filaments: formation, stability and feedback”, Special Issue “Numerical and Analytical Study of Fluid Dynamics”, *Mathematics* 12, 677 (1-14) (2024).
- [3] E.A. Kuznetsov, D.S. Agafontsev and A.A. Mailybaev, *Folding in fluids*, Chapter in BOOK “Mathematical Models and Integration Methods. Seminar Proceedings on Applications to Mechanics and Physics”, pp. 19-36 (2024).
- [4] A.I. Dyachenko, “The Nonlinear Schrödinger Equation and Canonical Transformation”, отправлена в печать.
- [5] V. Parfenyev, “Statistical analysis of vortex condensate motion in two-dimensional turbulence”, *Physics of Fluids* 36, 015148 (2024).
- [6] L.L. Ogorodnikov and S.S. Vergeles, “ α -effect in three-dimensional vortex of conducting rotating liquid”, *Phys. Rev. E* 110, 055107 (2024).
- [7] S. S. Vergeles, I. A. Vointsev, Role of wave scattering in instability-induced Langmuir circulation, *Physics of Fluids* 36, 034119 (2024).
- [8] D.D. Tumachev, A.A. Levchenko, S.S. Vergeles, and S.V. Filatov, “Observation of a large stable anticyclone in rotating turbulence”, *Physics of Fluids* 36, 126620 (2024).
- [9] N.A. Ivchenko, V.V. Lebedev, S.S. Vergeles, “Mixing in two-dimensional shear flow with smooth fluctuations”, *Phys. Rev. E* 110, 015102 (2024).
- [10] I.V. Kolokolov, V.V. Lebedev, V.M. Parfenyev, “Correlations in a weakly interacting two-dimensional random flow”, *Phys. Rev. E* 109 035103 (2024).
- [11] И.В. Колоколов, В.В. Лебедев, “Корреляции флуктуаций течения, возбуждаемых случайной силой на фоне сдвигового потока”, *ЖЭТФ* 165(1), 128-140 (2024).
- [12] И.В. Колоколов, В.В. Лебедев, “Двумерная турбулентность в ограниченной ячейке”, *ЖЭТФ* 166(1), 110-120 (2024).
- [13] В.А. Богачев, И.В. Колоколов, В.В. Лебедев, Ф.А. Стариков, “Матрица корреляций градиентов фазы световой волны как способ измерения основных параметров турбулентности”, *Письма в ЖЭТФ* 120(8), 598-604 (2024).

- [14] И.В.Колоколов, В.В.Лебедев, “Экстремальные флуктуации интенсивности излучения в турбулентной атмосфере”, Письма в ЖЭТФ 120(11), 844 (2024).
- [15] E.S. Pikina, E.I. Kats, A.R. Muratov, V.V. Lebedev, “Dynamic flexoelectric instabilities in nematic liquid crystals”, Phys. Rev. E 110, 024701 (2024).
- [16] V. V. Denisenko, S. V. Fortova, V. V. Lebedev, and I. V. Kolokolov, “Numerical Simulation of Flow of a Polymer Solution for Kolmogorov Flow”, Computational Mathematics and Mathematical Physics 64, 2141–2150 (2024).
- [17] A. O. Posudnevskaya, S. V. Fortova, A. N. Doludenko, I. V. Kolokolov, and V. V. Lebedev, “Numerical Study of Transient Regimes of Kolmogorov Flow in a Square Cell”, Computational Mathematics and Mathematical Physics 64, 2102–2110 (2024).
- [18] Igor V. Kolokolov, Evgeny A. Kuznetsov, Alexander I. Milstein, Evgeny V. Podivilov, Alexander I. Chernykh, David A. Shapiro and Elena G. Shapiro, *Mathematical Methods of Physics: Problems with Solutions* English Edition, Jenny Stanford Publishing, Singapore, 2024.

6.5 Квантовая теория поля, теория струн и математическая физика

В 2024 году были продолжены исследования в области квантовой теории поля, теории интегрируемых систем и математической физики. Исследования в рамках данной темы были сфокусированы на развитии теории двумерных моделей квантовой теории поля, теории возбужденных состояний в интегрируемых квантовых теориях поля, а также теории интегрируемых систем и ее применениям к квантовой теории поля и другим разделам математической физики.

Ниже приводятся результаты, полученные в 2024 году.

Квантовая теория поля

Мы исследуем деформации петлевых и цепочных зеркал Берглунда Хюбша, где исходные многообразия определены в одном и том же весовом проективном пространстве. Показано, что деформации эквивалентны двумя способами.[1] (А.А. Белавин)

Исходя из требований пространственно-временной суперсимметрии и взаимной локальности, мы строим полный набор физических полей орбифолдов моделей Гепнера. Чтобы технически реализовать это, мы используем генераторы спектральных потоков для построения всех физических полей из киральных первичных полей.[2] (А.А. Белавин, С.Е. Пархоменко)

В данной работе мы показываем, что требование одновременного выполнения взаимной локальности левых вершин физических состояний с генераторами симметрии пространства-времени и правых вершин с генераторами $E(8) \times E(6)$ -Калибровочная симметрия, возникающая после некоторой специальной редукции вместе с требованием взаимной локальности полных (левых-правых) вершин физических состояний между собой, приводит к одним и тем же моделям Гепнера.[3] (А.А. Белавин, С.Е. Пархоменко)

Рассмотрены две явные конструкции состояний в орбифолдах произведения $N=(2,2)$ суперконформных Минимальных моделей, которые основаны на твистовании спектральным потоком, требовании взаимной локальности полей и замкнутости операторной алгебры. Показано, что эти конструкции приводят к дуальным группам орбифолдов Берглунда-Хюбша-Кравица, которые определяют зеркальные пары изоморфных моделей. Затем мы обобщаем эту конструкцию для моделей Гепнера компактификации суперструны и явно строим отображение изоморфизма состояний IIA суперструны на состояния IIB суперструны, используя калибровку светового конуса. [4] (С.Е. Пархоменко)

Модели квантовой теории поля на многослойных поверхностях с точками ветвления интересны и сами по себе и как возможность применения метода реплик к вычислению энтропии запутанности между состояниями, определенными на непесекающихся интервалах. С обеих точек зрения важно научиться вычислять корреляционные функции между операторами в таких моделях, в частности, операторах, расположенных в точках ветвления. Один из способов вычисления корреляционных

функций основан на вычислении формфакторов (матричных элементов в базисе собственных состояний) локальных операторов. Если для операторов в точках общего положения формфакторы в многослойной модели тривиально выражаются через формфакторы в модели на плоскости, то формфакторы операторов в точках ветвления требуют отдельного рассмотрения. В литературе на данный момент имеются результаты для формфакторов "чистой" точки ветвления и для экспоненциальных операторов в точке ветвления. Нас интересуют формфакторы так называемых фоковских потомков экспоненциальных операторов.

Мы вычисляем формфакторы операторов в точках ветвления двумя способами. Первый способ состоит в том, чтобы вычислить формфакторы в пределе малой константы связи. Этот предел представляет собой квазиклассический предел, так что поле раскладывается в сумму классического радиального решения и квантовых флуктуаций вблизи этого решения. Формфакторы для экспоненциальных операторов в ведущем приближении выражаются через асимптотики классических решений. Формфакторы для фоковских потомков даже в ведущем приближении требуют учета квантового вклада, причем с учетом взаимодействия. Не чисто киральные фоковские потомки требуют перенормировок добавлением операторов низшей масштабной размерности.

Второй способ состоит в точном решении бутстрапных уравнений для формфакторов. Мы предлагаем такое решение для произвольного локального оператора в точке ветвления. Трудность этого способа состоит в том, что нет простого и общего способа связать данное решение бутстрапных уравнений с конкретным оператором, определенным в терминах базового поля теории. Мы не можем полностью решить последнюю задачу, но сравнение с квазиклассическими ответами дает возможность ограничить выбор. (М.Ю. Лашкевич)

В работе Литвинова и Мещерякова была рассмотрена $1 + 1$ -мерная версия КХД в планарном пределе, так называемую модель 'тХоофта. Эта теория является одной из простейших известных игрушечных моделей, демонстрирующих явление конфайнмента. Следуя подходу Фатеева, Лукьянова и Замолотчикова, была рассмотрена задача о нахождении спектра мезонов в модели 'т Хоофта для кварков с равными массами. Было выведено ТQ уравнение Бакстера и рассмотрено два предельных случая малых и больших значений спектрального параметра. Из этого рассмотрения удалось вывести аналитические выражения для первых нескольких спектральных сумм, а также квазиклассическую формулу для спектра. (А.В. Литвинов)

В четырехмерной самодуальной калибровочной теории вычислен однопетлевой вклад от массовых членов регуляторов при дилатациях и конформных бустах. Эти конформные преобразования при этом сопровождаются калибровочными преобразованиями. Эта аномалия вычислена в специальной регуляризации Паули-Вилларса. Регуляторы Паули-Вилларса вкладываются в (скалярное) суперполе, которое содержит и физические степени свободы. Эта специальная суперсимметрия нарушается массовыми членами для регуляторов. При стремлении масс регуляторов в бесконечность остается конечный (аномальный) вклад, который можно устранить перенормировкой полей специального вида. Эффективное действие в терминах перенормированных полей оказывается инвариантным относительно таких преобразований. Получены модифицированные конформные тождества Уорда на корреляционные функции. (И.В.

Полюбин)

Развита связь между характеристиками вершинных операторных алгебр, с одной стороны, и инвариантами q -серии многообразий в низкоразмерной топологии, с другой стороны. Разработан словарь между $3d$ многообразиями и вершинными алгебрами на основе анализа свойств $\hat{Z}$ -инвариантов q -серии. Обобщены уже известные записи словаря на группы Ли более высокого ранга, на $3d$ многообразия с торическими границами и на BPS статистические суммы с линейными операторами. Как следствие, найдена новая физическая реализация логарифмических вершинных алгебр для $3d$ - $3d$ соответствия. Показано возникновение множества бесконечных семейств новых фермионных формул для характеров вершинно-операторной алгебры за счет использования свойства $\hat{Z}$ -инвариантов. [5] (Б.Л. Фейгин)

В контексте недавнего прогресса в изучении дуальности между матричными моделями и моделями двумерной гравитации рассматриваются некоторые свойства $(2, 2p+1)$ минимальной струны. Замечено ранее не описанное в литературе совпадение между корреляционными числами в определённой области пространства параметров и "р-деформированными объемами" получаемыми некоторым интегральным преобразованием из формул топологической рекурсии. Эта идентификация позволяет систематически изучать корреляционные числа при конечном центральном заряде материи. В частности, получена формула для корреляционных чисел в терминах таубологических классов когомологий на пространстве модулей кривых и простейшие рекуррентные уравнения, аналогичные недавно выведенным в теории "Вирасоро-минимальной струны". Мы надеемся применить эти формулы для углубления понимания соответствия между матричной-модельным и конформно-теоретико-полевым подходом для этой теории. [6] (А.А. Артемьев)

Теория интегрируемых систем и ее применения к квантовой теории поля и другим разделам математической физики

В статье [7] дано определение свойства 3D-совместности для интегрируемых уравнений вида $u_{xxz} = f(u, u_x, u_{xx}, u_z, u_{xz})$, определяющих негативные симметрии для эволюционных уравнений третьего порядка. Поскольку сами негативные симметрии неэволюционны, свойство коммутативности для них формулируется не на привычном языке векторных полей, а в более сложной форме, как совместность тройки дополняющих друг друга уравнений. Разобран ряд примеров, связанных с уравнениями Кортевега–де Фриза, Дима и Кричевера–Новикова. Также показано, что уравнения данного вида ассоциированы с дифференциально-разностными уравнениями типа одевающей цепочки и цепочки Вольтерры. Это устанавливает связь полученных результатов с лучше изученным свойством 3D-совместности для дискретных уравнений, которому посвящено много работ, и показывает, что негативные симметрии могут быть согласованно заданы на многомерной решётке. (В.Э. Адлер)

В целом, работы [7, 8, 9, 10] посвящены изучению так называемых негативных симметрий для уравнений, интегрируемых методом обратной задачи рассеяния, и их приложениям к задаче построения точных решений. Негативные симметрии определяют расширение иерархии высших эволюционных симметрий и записываются как гиперболические уравнения либо уравнения с нелокальными переменными. Они пред-

ставляют интерес и как самостоятельные уравнения, и как производящие функции для высших симметрий. В статье [8] предложена конструкция негативных потоков для интегрируемых систем на основе представления Лакса и метода квадратов собственных функций. Рассмотренные примеры включают уравнение Буссинеска и систему Дринфельда–Соколова, также рассмотрены их редукции к уравнениям Савады–Котеры, Каупа–Купершмидта и Кричевера–Новикова. (В.Э. Адлер)

С точки зрения приложений, привлечение негативных симметрий расширяет возможности построения конечномерных редукций интегрируемых систем и получения точных решений. Предложен метод построения семейства редукций типа Пенлеве произвольной размерности, как стационарных уравнений для суммы произвольного числа негативных потоков и одной классической симметрии типа растяжения. Статьи [9, 10] посвящены реализации этой идеи для дифференциально-разностных уравнений. В [9] построена негативная симметрия для цепочки Вольтерры и с ее помощью определены конечномерные редукции типа Пенлеве (многокомпонентные обобщения уравнений dP-1 и dP-34. Для этих редукций построены изомонодромные пары Лакса и преобразования Бэклунда. Представляют интерес также решения на полупрямой с дополнительным условием нулевого обрыва, что позволяет выделить более простой класс решений, описывающих, в частности, распад начального условия в виде единичной ступеньки. В статье [10] этот класс решений изучен для цепочки Богоявленского, обобщающей цепочку Вольтерры. В отличие от редукций общего вида, отвечающих уравнениям типа Пенлеве, динамика на полупрямой с нулевым обрывом линеаризуется и решения выражаются более явно в терминах обобщённых гипергеометрических функций. Это устанавливает интересные связи этой задачи с известными в комбинаторике обобщёнными числами Каталана, производящие функции для которых также связаны с этими функциями. (В.Э. Адлер)

Недавно предложенная схема матричного расширения бездисперсионных интегрируемых систем применяется для абелевого случая, в котором она приводит к линейным уравнениям, связанным с первоначальной бездисперсионной системой. В рассмотренных примерах эти уравнения могут быть интерпретированы в терминах абелевых калибровочных полей на геометрическом фоне, определяемом бездисперсионной системой. Они также связаны с линеаризацией начальных систем. Построены решения этих линейных уравнений в терминах волновых функций пары Лакса бездисперсионных систем, которая представляется в виде некоторых векторных полей [11]. (Л.В. Богданов)

Применение методов математической физики к задачам комбинаторики и теории игр

Показано, что для любой цикловой трансверсали W орграфа субстохастической неразложимой матрицы S максимум диагональных элементов ее резольвенты $(I - S)^{-1}$ не больше значения любого элементарного симметрического многочлена (от $|W|$ переменных), принимаемого на диагональных элементах резольвенты $(I - S)^{-1}$, соответствующих вершинам W . Для "истинного" субстохастического взвешивания S бесконечного сильно связного орграфа D изучается скорость сходимости супремума $r_n(S)$ спектральных радиусов взвешенных матриц смежности подографов порядка n к своему пределу $r(S)$ при $n \rightarrow \infty$. С помощью полученного выше результата доказано, что

разница $1 - r_n(S)$, умноженная на n , всегда (т.е. для любого такого S) отделяется от нуля, если и только и если D допускает конечную цикловую трансверсаль. Сама же разность $1 - r_n(S)$ всегда отделяется от нуля тогда и только тогда, когда D не только имеет конечную цикловую трансверсаль W , но длины всех его циклов равномерно ограничены некоторой положительной константой L . Такой D наиболее близок по своим спектральным свойствам к конечному орграфу. В частности, показано, что в этом случае детерминант фредгольмова типа $\det(I - zS)$ взвешенной матрицы смежности, которую мы также обозначим через S , является полиномом степени не выше, чем $|W|L$, с простым нулем в точке $z = 1/r(S)$. [12] (С.В. Савченко)

Получена формула для числа $s_5(T)$ сильно связных подтурниров порядка 5 в произвольном турнире T порядка n . С ее помощью найдены все максимайзеры величины $s_5(T)$ в классе всех турниров нечетного порядка n и все минимайзеры в классе всех регулярных турниров (нечетного) порядка n . В свою очередь, с помощью формулы для числа $c_5(T)$ циклов длины 5 в T , полученной недавно Mackey и Komarov, доказано, что для произвольного турнира T нечетного порядка $n \geq 5$ величина $c_5(T)$ не превосходит математического ожидания числа 5 циклов в случайном турнире порядка $n + 1$, причем равенство имеет место тогда и только тогда, когда T дважды регулярен (т.е. не только он сам, но окрестности его вершин также порождают регулярные турниры). Высказаны некоторые замечания и гипотезы относительно величин $s_m(T)$ и $c_m(T)$ в случае произвольного порядка m . [13] (С.В. Савченко)

Определены выражения для числа $c_8(DR_n)$ циклов длины 8 в дважды регулярном турнире DR_n порядка n и для числа $c_8(RLT_n)$ таких циклов в регулярном локально транзитивном турнире RLT_n порядка n . Оба они являются полиномами степени 8 по n . Сравнение $c_8(DR_n)$ с $c_8(RLT_n)$ приводит к неравенству $c_8(DR_n) > c_8(RLT_n)$ при $11 \leq n \leq 35$, хотя $c_8(RLT_n) > c_8(DR_n)$ при $n \geq 39$. Полученные ранее различными авторами результаты позволяют предположить, что для любого турнира T порядка n имеем $c_8(T) \leq c_8(RLT_n)$ при достаточно больших нечетных n . Однако проведенный нами численный счет показывает, что при $n = 9, 11$, и 13 максимум числа 8-циклов достигается на турнирах с регулярной структурой окрестностей их вершин (в частности, при $n = 11$ ровно на единственном DR_{11}). Все это позволяет рассматривать значение $n = 39$ как точку "фазового перехода" в локальных свойствах максимайзеров и минимайзеров величины $c_8(T)$ в классе всех регулярных турниров порядка n . [14] (С.В. Савченко)

Сопутствующие проблемы развития квантовой теории поля

В работе [15] (А.Мельников, Н. Николаев) впервые из первых принципов развития теории декогеренции поляризации пучка в процессе компенсации методом обратной связи дрейфа частоты прецессии спина с из-за нестабильности магнитных полей в ускорителе. Изучена роль декогеренции в измерении ЭДМ дейтронов в магнитном накопителе методом сканирования по частоте спин-флипа, развитым ранее Н. Николаевым с соавторами. Впервые дано теоретическое решение задачи о распределении поляризации по фазовому объему пучка, вызванному зависимостью частоты спин-флипа от амплитуды синхротронных колебаний частицы. Это решение имеет практическое значение для моделирования зависящей от поляризации компоненты светимости на коллайдере НИКА.

Предложено струнное описание системы, состоящей из двух тяжелых и четырех легких кварков, в Квантовой Хромодинамике (КХД) для случая двух легких ароматов равной массы. Найдены три низколежащих потенциала Борна-Оппенгеймера и их зависимость от расстояния между тяжелыми кварками. Показано, что потенциал основного состояния описывается в терминах как адрокваркония, так и адронных молекул. Показано, что связанная струнная конфигурация вносит доминирующий вклад в один из возбужденных потенциалов на малых расстояниях. При этом на расстояниях превышающих $0,1$ ферми, она демонстрирует структуру типа дикварк-дикварк-дикварк $[Qq][Qq][qq]$. Для лучшего понимания организации кварков внутри системы предложено определение нескольких критических расстояний, связанных с процессами пересоединения струн, разрыва и аннигиляции струнных вершин. Также рассмотрены простейшие струнные конфигурации с пяти-струнными вершинами и их роль в возникновении составных кварковых объектов отличных от дикварков. [16] (О.Д. Андреев)

Несколько подходов к квантовой гравитации (включая модель сверхпластичного вакуума, тетрады Дзяконова, возникающие как билинейные комбинации полей фермионов, BF-теорию гравитации, и др.), несмотря на существенно разные механизмы эффективной гравитации, имеют важные общие свойства. Во всех этих сценариях возникающей гравитации тетрады являются первичными возникающими объектами, а метрика — вторичным объектом, который представляет собой билинейную форму тетрад. Это предполагает, что геометрия является вторичным возникающим явлением. Какой бы сценарий ни был бы выбран Природой, гравитация не описывается метрической теорией Эйнштейна и требует расширенной теории в терминах тетрад, такой как теория Эйнштейна-Картана-Скиамы-Киббла.

Квинтет матриц Дирака 4×4 предполагает, что фундаментальная размерность внутреннего (спинового) пространства равна $n = 5$ вместо обычной размерности $n = 4$. Тогда вместо обычных тетрад 4×4 (vierbein) гравитация описывается в терминах 5-bein (fünfbein или пятиножка). Мы обсуждаем свойства геометрии пространства-времени, индуцированной из этой спинорной теории Дирака, где спиновая связность содержит $10 \times 4 = 40$ элементов вместо 24 элементов в тетрадной формулировке общей теории относительности. [17] (Г.Е. Воловик)

Список публикаций

- [1] A.A. Belavin, D.R. Gepner, “Equivalence of Deformations of Berglund Hübsch Mirror Pairs”, Nucl. Phys. B 1008, 116695 (2024), [arXiv:2408.15182 [hep-th]].
- [2] A. Belavin, S. Parkhomenko, “Mirror symmetry and new approach to constructing orbifolds of Gepner models”, Nuclear Physics B 998, 116431 (2024).
- [3] A. Belavin, S. Parkhomenko, “Conformal bootstrap and Heterotic string Gepner models”, Nuclear Physics B 1006, 116654 (2024); arXiv:2406.15144.
- [4] S. Parkhomenko, “Conformal Bootstrap and Mirror symmetry of states in Gepner models”, J. High Energ. Phys. 2024, 104 (2024), [arXiv:2407.07555 [hep-th]].
- [5] M.C.N. Cheng, S. Chun, B. Feigin, F. Ferrari, S. Gukov, S.M. Harrison, D. Passaro, “3-Manifolds and VOA Characters”, Commun. Math. Phys. 405, 44 (2024).
- [6] A. Artemev, I. Chaban, “(2, 2p + 1) minimal string and intersection theory I”, arXiv:2403.02305.
- [7] В.Э. Адлер, “3D-совместность негативных потоков”, ТМФ 221(2), 280–297 (2024).
- [8] V.E. Adler, “Negative flows for several integrable models”, J. Math. Phys. 65, 023502 (2024).
- [9] V.E. Adler. “Negative flows and non-autonomous reductions of the Volterra lattice”, Open Commun. Nonl. Math. Phys., 11597 (2024).
- [10] V.E. Adler, “Bogoyavlensky lattices and generalized Catalan numbers”, Russian J. of Math. Phys. 31(1), 1-23 (2024).
- [11] Л.В. Богданов, “О некоторых линейных уравнениях, связанных с бездисперсионными интегрируемыми системами”, ТМФ 221(1), 3-17 (2024).
- [12] S.V. Savchenko, “On substochastic and transient weightings of infinite strong digraphs”, Linear Algebra and its Applications (accepted), arXiv:2311.13340
- [13] S.V. Savchenko, “On 5-cycles and strong 5-subtournaments in a tournament of odd order n ”, Journal of Graph Theory (accepted); arXiv:2403.19555.
- [14] S.V. Savchenko, “On the number of 8-cycles for two particular regular tournaments of order n with diametrically opposite local properties”, will be submitted to Journal of Algebraic Combinatorics or the Electronic Journal of Combinatorics, arXiv:2403.07629.

- [15] N.N. Nikolaev, F. Rathmann, J. Slim, A. Andres, V. Hejny, A. Nass, A. Kacharava, P. Lenisa, J. Pretz, A. Saleev, V. Shmakova, H. Soltner, F. Abusaif, A. Aggarwal, A. Aksentev, B. Alberdi, L. Barion, I. Bekman, M. Beyß, C. Böhme, B. Breitzkreutz, N. Canale, G. Ciullo, S. Dymov, N.-O. Fröhlich, R. Gebel, M. Gaisser, K. Grigoryev, D. Grzonka, J. Hetzel, O. Javakhishvili, V. Kamerdzhev, S. Karanth, I. Keshelashvili, A. Kononov, K. Laihem, A. Lehrach, N. Lomidze, B. Lorentz, G. Macharashvili, A. Magiera, D. Mchedlishvili, A. Melnikov, F. Müller, A. Pesce, V. Poncza, D. Prasuhn, D. Shergelashvili, N. Shurkhno, S. Siddique, A. Silenko, S. Stassen, E.J. Stephenson, H. Ströher, M. Tabidze, G. Tagliente, Y. Valdau, M. Vitz, T. Wagner, A. Wirzba, A. Wrońska, P. Wüstner, M. Żurek (JEDI collaboration), “Spin decoherence and off-resonance behavior of radiofrequency-driven spin rotations in storage rings”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 27, 111002 (2024).
- [16] O. Andreev, “Doubly heavy dibaryons as seen by string theory”, *Phys. Rev. D* 109, 106001 (2024).
- [17] Yuri N. Obukhov and G.E. Volovik, “Spacetime geometry from Dirac spinor theory”, *Phys. Rev. D* 109, 064076 (2024).

6.6 Сильные взаимодействия, релятивистская астрофизика, гравитация, космология

Главными направлениями исследований в области релятивистской астрофизики и космологии являлись: классическая и квантовая динамика скалярных полей в космологии и теории инфляционных Вселенных, космология ранней Вселенной, космология современной Вселенной и теории черных дыр, моделирование эффектов квантовой теории поля и классической и квантовой гравитации в конденсированных средах

Исследования в области физики сильных взаимодействий были сфокусированы на исследовании процессов взаимодействия жестких струй с кварк-глюонной плазмой; изучении струнной структуры мультикварковых состояний с тяжелыми и легкими кварками; теории спиновой динамики в накопителях и коллайдерах, поиску электрического дипольного момента протона и дейтрона и приложения к бариогенезису ранней Вселенной.

Ниже приводятся результаты, полученные в 2024 году.

Релятивистская астрофизика

Было обнаружено, что яркие блазары являются важными источниками нейтрино, и с ними был связан ряд событий IceCube. Оценка излучения высокоэнергетических фотонов такими блазарами имеет решающее значение для лучшего понимания процессов и областей, где производятся нейтрино. Здесь мы сосредоточимся на жестком рентгеновском излучении, наблюдаемом телескопом SRG/ART-XC, имиджером Swift/BAT и телескопом INTEGRAL/IBIS. Их энергетический диапазон $\gtrsim 10$ кэВ хорошо подходит для зондирования фотонов, которые потенциально участвуют в производстве нейтрино, взаимодействуя с ультрарелятивистскими протонами. Мы обнаружили, что блазары, связанные с нейтрино, имеют тенденцию демонстрировать необычайно сильное рентгеновское излучение по сравнению с другими блазарами VLBI в небе. Обнаружено, что как нейтрино, так и жесткое рентгеновское излучение исходят от блазаров на космологических расстояниях $z \sim 1$ и усиливаются релятивистским излучением, что позволяет обнаружить их на Земле. Наши результаты показывают, что нейтрино производятся внутри компактных струй блазара, а целевые рентгеновские фотоны испускаются из ускоренных областей струй. [1] (А.А. Старобинский)

Мы изучаем долгосрочную (временные масштабы покоящегося кадра от нескольких месяцев до ~ 20 лет) рентгеновскую переменность выборки из 2344 ярких рентгеновских квазаров из каталога квазаров Sloan Digital Sky Survey (SDSS), выпущенного в 14-м выпуске (DR14Q), на основе данных Spectrum-Roentgen-Gamma (SRG)/eROSITA All-Sky Survey, дополненных для ~ 7 процентов выборки архивными данными из каталога источников XMM-Newton Serendipitous. Мы характеризуем переменность структурной функцией $SF^2(\Delta t)$. Мы подтверждаем ранее известную антикорреляцию амплитуды рентгеновской переменности со светимостью. Мы также изучаем зависимость рентгеновской переменности от массы черной дыры M_{BH} и от основанного на рентгеновском излучении прокси-фактора отношения Эддингтона λ_X . Менее массивные черные дыры оказываются более изменчивыми для заданного отношения Эддингтона и временной шкалы. Рентгеновская переменность также растет с

уменьшением отношения Эддингтона и становится особенно сильной при λ_X менее нескольких процентов. Мы подтверждаем, что амплитуда рентгеновской переменности увеличивается с увеличением временной шкалы. Зависимость $SF^2(\Delta t)$ можно удовлетворительно описать степенным законом с наклоном в диапазоне от ~ 0 до ~ 0.4 для различных (M_{BH}, λ_X) подвыборок (за исключением подвыборки с наименьшей массой черной дыры и отношением Эддингтона, где он равен 1.1 ± 0.4). [2] (А.А. Старобинский)

В этой главе мы рассмотрим последние разработки по реализации инфляции типа R^2 в рамках наиболее общего нелокального расширения общей теории относительности Эйнштейна в ультрафиолетовом диапазоне. Это хорошо мотивированный надежный подход к квантовой гравитации. В последние десятилетия нелокальные гравитационные теории, квадратичные по кривизне, считались свободными от призраков и суперперенормируемыми вокруг максимально симметричных пространств-времен. Однако в контексте ранней космологии Вселенной мы показываем, что необходимо выйти за рамки нелокальной гравитации квадратичной кривизны, чтобы достичь последовательной свободной от призраков структуры эволюции Вселенной от квазиде-ситтеровского до пространства-времени Минковского. В этой связи мы обсуждаем конструкцию наиболее общего нелокального гравитационного действия, которое приводит к инфляции типа R^2 , и обсуждаем соответствующие наблюдательные предсказания для наклонов спектра скаляра и тензора, отношения тензора к скаляру и изначальных негауссовостей. Мы представляем анализ того, как нелокальная инфляционная космология выходит за рамки устоявшихся представлений об эффективных полевых теориях инфляции. Наконец, мы комментируем некоторые открытые вопросы и перспективы нелокальной гравитации с более высокой кривизной на ее пути к достижению UV-завершения. [3] (А.А. Старобинский)

Классическая и квантовая динамика гравитации

Мы рассматриваем дискретную Z_4 -симметрию, которая имеет место в сценарии квантовой гравитации, где гравитационные тетрады возникают как параметр порядка. При этой операции симметрии возникающие тетрады умножаются на мнимую единицу. Существование такой симметрии и спонтанное нарушение этой симметрии также подтверждается рассмотрением схемы нарушения симметрии в топологической сверхтекучей жидкости ${}^3\text{He-B}$. Параметр порядка ${}^3\text{He-B}$ является аналогом поля тетрады, но имеет комплексные значения. Операция симметрии изменяет фазу комплексного параметра порядка на $\pi/2$, что соответствует дискретной симметрии Z_4 в квантовой гравитации. Мы также рассмотрели альтернативный сценарий нарушения этой Z_4 -симметрии, в котором операция симметрии меняет знак скалярной кривизны и, таким образом, действие Эйнштейна-Гильберта спонтанно нарушает симметрию. [4] (Г.Е. Воловик)

Показано, что температуры, характеризующие эффект Унру, излучение Гиббонса-Хокинга от космологического горизонта де Ситтера и излучение Хокинга от горизонта черной дыры, приобретают дополнительный фактор 2 по сравнению с их традиционными значениями. Причиной этого является когерентность различных процессов. Объединение когерентных процессов также позволяет нам установить связь между рождением пар Швингера и эффектом Унру. [5] (Г.Е. Воловик)

Применение неэкстенсивной энтропии Цаллиса-Чирто 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 равна N^2 . [6] (Г.Е. Воловик)

Вакуум де Ситтера служит тепловой баней для материи с локальной температурой. Эта локальная температура приводит к нагреву материи. Здесь мы рассматриваем компонент, который связан с гравитационными степенями свободы и участвует в термодинамике состояния де Ситтера. Этот гравитационный компонент ведет себя как жесткая материя Зельдовича. Энергия вакуума и аналог жесткой материи Зельдовича представляют соответственно темную энергию и темную материю. В равновесии положительное парциальное давление темной материи компенсирует отрицательное парциальное давление квантового вакуума. Вот почему в полном равновесии полное давление равно нулю. Это довольно похоже на соответственно сверхтекучую и нормальную компоненты сверхтекучей жидкости, 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 оба темных компонента испытывают степенное затухание из-за обмена энергией между этими компонентами. В результате их значения в настоящее время имеют правильный порядок величины. [7] (Г.Е. Воловик)

Состояние де Ситтера и статическая вселенная Эйнштейна являются уникальными состояниями, которые имеют постоянную скалярную кривизну Риччи. Мы рассматриваем вселенную Эйнштейна, которая имеет границу. Оказывается, статическая вселенная Эйнштейна с границей характеризуется той же локальной температурой $T = 1/(\pi R)$, что и состояние де Ситтера. Термодинамика вселенной Эйнштейна с границей также похожа на термодинамику де Ситтера. Если эта вселенная содержит жесткую материю Зельдовича, то существует голографическая связь между энтропией вселенной и поверхностной энтропией $A/4G$ границы. Это означает, что в термодинамике физическая граница статической вселенной Эйнштейна играет роль космологического горизонта де Ситтера. [8] (Г.Е. Воловик)

Космология ранней Вселенной

Предложен альтернативный сценарий возникновения барионной асимметрии во Вселенной. Этот сценарий реализуется в модели решёточной гравитации, связанной с дираковским полем, следующим образом. При сверхвысоких температурах порядка Великого Объединения $T_c \sim 10^{18}$ ГэВ и выше система находится в РТ-симметричной фазе. Но при понижении температуры происходит фазовый переход в несимметричную фазу, в которой появляется ненулевая тетрада, то есть пространство-время с метрикой Минковского, и волновая функция системы распадается на две: $|\rangle = |+\rangle + |-\rangle$. Поля тетрад в состояниях $|+\rangle$ и $|-\rangle$ различаются знаком. В самый первый момент времени длительностью порядка планковского возможен переход фермионов между этими состояниями. Эти переходы в разных участках пространства не скоррели-

рованы между собой. Поэтому окончательная асимметрия фермионного заряда между этими состояниями относительно чрезвычайно мала и она сохраняется во времени, так как взаимодействие состояний $|+\rangle$ и $|-\rangle$ прекращается на временах больше планковского.[9] (С.Н. Вергелес)

Прецизионная спиновая динамика на накопителях поляризованных частиц: поиск электрического дипольного момента и приложения к бариогенезису ранней Вселенной

Работа за отчетный 2024 г. была посвящена разным аспектам спиновой динамики в накопителях, тесно связанным с планами поляризационных экспериментов на ускорительно-накопительном комплексе НИКА в ОИЯИ, г. Дубна. В первую очередь это разработки расширения первоначальной программы экспериментов в детекторе SPD в новую для НИКА область фундаментальных симметрий. Изучались возможности поиска электрического дипольного момента (ЭДМ) дейтронов методом квазизамороженного спина как индикаторов новых механизмов CP-несохранения вне Стандартной Модели электрослабых взаимодействий, и поиска аксионов и аксионоподобных частиц со спином частиц в накопителях как аксионной антенны. CP несохранение вне стандартной модели диктуется невозможностью количественно описать наблюдаемую барионную асимметрию Вселенной с рамках Стандартной Модели, аксионы были предложены для разрешения загадки CP в квантовой хромодинамике. Ключевой для этих поисков является разработка кардинальной модернизации Нуклотрона добавлением прямых секций или колец коллайдера НИКА байпасами.

Решена задача об эволюции тензорной поляризации дейтрона в процессе спин-флина в накопителе [10]. Рассмотрены два режима: наблюдение прецессирующей тензорной поляризации по временной метке фазы прецессии, и усредненной по прецессии поляризации. Работа является частью разработки тензорной поляриметрии для изучения тензорной поляризации плотности глюонов в детекторе SPD — эта проблема не имеет экспериментально апробированного решения.

Рассмотрена возможность прецизионного поиска ЭДМ дейтронов на комплексе НИКА [11]. Широко обсуждаемый метод замороженного в чисто электростатических накопителях спина протонов с положительной магнитной аномалией может быть распространен на дейтроны с отрицательной магнитной аномалией. Универсальным подходом к поиску ЭДМ частиц как с положительными, так и отрицательными магнитными аномалиями возможен в новом классе структур типа квази-замороженного спина (QFS). Она может быть реализована на основе существующего синхротрона с магнитными арками, например NICA или Нуклотронв, с добавлением элементов со скрещенными E+B полями на прямых участках. В таких структурах вращение спин-вектора в магнитных арках компенсируется вращением в E+B фильтрах Вина, и реализуется накопление сигнала ЭДМ аналогично методу замороженного спина (FS).

В управлении спинами сталкивающихся пучков, которое является ключевым аспектом для работы коллайдеров поляризованных частиц NICA (ОИЯИ, Дубна, Россия) и EIC (BNL, Брукхейвен, США), есть открытые вопросы. Единственно реалистичный для управления поляризацией дейтронов режим спиновой прозрачности все еще не апробирован экспериментально. При существующей конфигурации ускорительных

колец в ОИЯИ пилотный эксперимент по спиновой прозрачности возможен с протонами на синхротроне Нуклотрон на целом спиновом резонансе. Анализируется динамика поляризации протонов при быстром пересечении целого резонанса с управляющими спиновыми навигаторами на основе штатных корректирующих орбиту диполей. Разработана схема компенсации когерентного влияния на спин ошибок установки и изготовления магнитных элементов структуры Нуклотрона, основанная на измерении спинового поля несовершенства структуры по адиабатическому отклонению спинов в области резонанса с учетом синхротронной модуляции энергии. Компенсация мощности целых резонансов возможна вплоть до ограничений, связанных с орбитальными эмиттантами пучка. Результаты проведенного численного моделирования предлагаемого спинового компенсатора подтверждают возможность экспериментальной верификации режима спиновой прозрачности в присутствии сильного искажения замкнутой орбиты несовершенством структуры Нуклотрона. [12] (А. Мельников, Н. Николаев)

В серии работ [13, 14] (А. Мельников) дан детальный анализ возможностей реализации режима QFS на коллайдере НИКА. Дополнение коллайдера обходными каналами bypass [13] с дополнительной аппаратурой для поиска ЭДМ и/или аксионов позволит проводить эти эксперименты. Проведение данных экспериментов не затрагивает основную физическую программу комплекса при работе на детекторы SPD и MPD благодаря наличию обходных каналов bypass [13]. Также изучена возможность модернизации Нуклотрон с добавлением электростатических элементов с целью соблюдения условия QFS для измерения ЭДМ дейтронов и поиска аксиона [14]. Проведена соответствующая магнитооптическая оптимизация структур накопительных колец. Изучена спин-орбитальная динамика пучка частиц в накопителях, подтверждающая возможность прецизионного поиска ЭДМ как в коллайдере NICA, так и в Нуклотроне с прямыми секциями.

В работах [15, 16] изучено, как величину ЭДМ частицы в накопителе можно получить, измеряя полную частоту прецессии спина на поляриметре. Так как радиальные возмущения в структуре являются основным источником систематических ошибок, были исследованы различия и свойства структур типа замороженного и квазизамороженного спина в этом отношении. Для проведения прецизионных экспериментов по поиску ЭДМ была получена точная форма связи интегральной частоты прецессии с локальными поворотами спина для оценки ЭДМ сигнала. Были исследованы особенности суммирования частот в FS и QFS структурах. В рамках спинорного формализма получены выражения для спин-тьюна и направления инвариантной оси прецессии для обоих типов структур.

Необходимое условие для проведения экспериментов по поиску ЭДМ заряженных частиц на накопительном кольце есть когерентное вращение спин-векторов. Были проанализированы основные источники декогеренции, такие как спиновая хроматичность, бетатронное удлинение орбит и спиновые резонансы [17] (А. Мельников). Было показано, что большое время спиновой когерентности ассоциируется с положением равновесных уровней энергии частиц. Спиновые резонансы действуют как дополнительный источник декогеренции спина. Их влияние должно быть учтено во всём энергетическом диапазоне накопителя. Оценки влияния спиновых резонансов на вре-

мя когерентности спинов для накопителя подтверждаются предварительными экспериментальными данными, полученными на COSY? и подчёркивают важность данного эффекта.

Изучена возможность достижения большого времени когерентности дейтронного пучка в структуре коллайдера NICA с электростатическими вставками для выполнения условия QFS [18] (А. Мельников). Было показано, что в регулярной оптической структуре арок коллайдера возможно размещение 2-х семейств секступолей позволяет минимизировать бетатронную хроматичность.

Физика сильных взаимодействий

Впервые исследовано явление охлаждения струй (jet quenching (JQ)) в соударениях протон-ядро (pA) для фактора модификации I_{pA} функций фрагментации меченых адронами струй для сценария с рождением кварк-глюонной плазмы (КГП) в pp и pA -соударениях. 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 (А. 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 LHC. При вычислении фактора I_{pA} для заданной множественности адронов необходимо учитывать что в pA соударениях значительная часть наблюдаемой множественности мягких адронов (underlying event (UE) multiplicity) может быть связана с взаимодействием налетающего протона с нуклонами ядра на поперечных расстояниях 1-2 фм, которые могут генерировать плотность энтропии/энергии недостаточную для рождения КГП (и поэтому на приводят к модификации струй). Этот факт должен учитываться при определении параметров файерболла КГП по множественности UE. Мы разработали схему для расчета параметров файерболла КГП в струйных pA событиях, используя Монте-Карло модель Глаубера поврежденных нуклонов, развитую ранее (B.G. Zakharov, Eur.Phys.J.C 78 (2018) 5, 427; JETP 124, 860 (2017)). Монте-Карло моделирование струйных $p+Pb$ событий было выполнено для двух значений гауссовской ширины источников энтропии соответствующих поврежденным нуклонам равным 0.7 и 0.4 фм. Первое значение использовалось ранее в наших работах по анализу данных LHC, второе значение часто используется в Монте-Карло генераторе GLISSANDO (P. Bozek et al., Comput. Phys. Commun. 245, 106850 (2019) [arXiv:1901.04484]). Граница плазменного файерболла определялась по линии температуры больше некоторого минимального значения порядка температуры деконфайнмента/кроссовера $T_c = 160$ МэВ. Использовались два значения $T_{min} = 160$ и 200 МэВ. Параметры файерболла КГП в pp , pA и AA соударениях определялись используя отношение плотности энтропии к зарядовой множественности равное 7.67, полученное в работе B. Muller and K.Rajagopal, Eur. Phys. J. C43, 15 (2005) [hep-ph/0502174]. Расчеты по-

казали что результаты для I_{pA} практически не чувствительны к вариации гауссовской ширины источников энтропии в Монте-Карло моделировании. Вариация T_{min} также дает малое изменение I_{pA} . Наши расчеты показывают, что JQ ведет к уменьшению отношения $I_{pA} / \langle I_{pp} \rangle$ от 1.03 при UE множественности около 10 до значения 0.95 для UE множественности около 60. Это в пределах ошибок согласуется с данными ALICE (Acharya et al. [ALICE Collaboration], Phys. Lett. B843,137649 (2023) [arXiv:2204.10157]). Однако нельзя сделать окончательный вывод о присутствии или отсутствии эффекта JQ, так как ошибки данных ALICE в факторе I_{pA} слишком велики. Наши расчеты показывают что для этого требуется уменьшение экспериментальных ошибок в факторе I_{pA} в несколько раз. Результаты работы опубликованы в журнале JETP Letters. [19] (Б.Г. Захаров)

Впервые изучено влияние цветовой рандомизации партона в КПП на p_T уширение для быстрого партона в неравновесной КПП при наличии турбулентных коллективных цветных полей, связанных с плазменными неустойчивостями Вейбеля для КПП с анизотропией начальных партонных распределений. В отсутствии цветовой рандомизации p_T уширение быстрого партона в КПП при наличии флуктуирующих коллективных цветных полей рассматривалось ранее в ряде работ (см. A. Majumder, B. Muller, and X.-N. Wang, Phys. Rev. Lett. **99**, 192301 (2007); M.E. Carrington, S. Mrowczynski, and B. Schenke, Phys. Rev. C95, 024906 (2017) [arXiv:1607.02359]; A. Ipp, D.I. Müller, and D. Schuh, Phys. Rev. D102, 074001 (2020)). Было показано, что среднеквадратичный поперечный импульс партона $\langle p_T^2 \rangle$ может быть выражен через коррелятор напряженности глюонного поля в КПП на световом конусе. При этом транспортный коэффициент $\hat{q}$ определяющий L -зависимость p_T уширения ($\langle p_T^2 \rangle = L\hat{q}$) оказывается пропорционален произведению средней энергии поля на корреляционную длину r_c . Расчеты, выполненные в предыдущих работах, не учитывают возможность вращения быстрого партона в цветовом пространстве группы SU(3) из-за перерасяния партона на конstituентах КПП, которое должно приводить к рандомизации цветового состояния быстрого партона. С точки зрения взаимодействия быстрого партона с коллективным глюонным полем в КПП, рандомизация цветовой волновой функции партона эквивалентна уменьшению корреляционного радиуса для турбулентного глюонного поля в КПП, т.е. должна приводить к уменьшению транспортного коэффициента $\hat{q}$. Мы провели количественный анализ этого эффекта для модели флуктуирующего цветного поперечного магнитного поля в виде последовательности слоев одинаковой толщины ΔL (электрическое поле также может быть учтено, однако вклад магнитного поля в энергию в КПП является доминирующим, в любом случае критической величиной является случайная сила Лоренца испытываемая партоном, поэтому вид поля не важен). Так как продольные поля не участвуют в p_T уширении, то данная модель представляется вполне разумной для анализа эффекта цветовой рандомизации на $\hat{q}$. Усреднение по случайным цветовым полям может быть выполнено путем интегрирования по группе SU(3) независимым образом для различных слоев с однородными полями и с усреднением по абсолютной величине поля. $\langle p_T^2 \rangle$ для партона p выражался через произведение вильсоновских факторов для партона p и антипартон $\bar{p}$ для свето-подобных траекторий. Используя тот факт, что начальное и конечное состояние фиктивной системы $p\bar{p}$ являются цветовыми синглетами $\{1\}$, было показано, что вычисление полного $\langle p_T^2 \rangle$ можно свести к вычислению $\langle p_T^2 \rangle$ для одного слоя с усреднением только по картановским компонентам внешнего поля H^a с $a = 3$ и 8. Это усреднение выполнялось с гауссовским распределе-

нием энергии поля.

Для одного слоя эффект рандомизации изучался численно путем вычисления суммы по всем путям в цветовом пространстве системы $p\bar{p}$ (для случая глюонов имеется 10 возможных типов промежуточных состояний gg , а для кварков 3 $q\bar{q}$ состояния). Наши численные расчеты показывают что для корреляционной длины глюонного поля ~ 1 фм цветовая рандомизация может уменьшать $\hat{q}$ на фактор $\sim 0.7(0.6)$ для отношения электрической и магнитной дебаевских масс $m_E/m_M = 2(3)$, которое представляется разумным в свете имеющихся решеточных расчетов (Y. Maezawa *et al.* [WHOT-QCD Collaboration] Phys. Rev. D **81**, 091501 (2010) [arXiv:1003.1361]). [20] (Б.Г. Захаров)

Список публикаций

- [1] A.V. Plavin, R.A. Burenin, Y.Y. Kovalev, A.A. Lutovinov, [A.A. Starobinsky](#), S.V. Troitsky and E.I. Zakharov, “Hard X-ray emission from blazars associated with high-energy neutrinos”, J. Cosmology and Astroparticle Physics 2024(05), 133 (2024).
- [2] S.A. Prokhorenko, S.Yu. Sazonov, M.R. Gilfanov, S.A. Balashev, I.F. Bikmaev, A.V. Ivanchik, P.S. Medvedev, [A.A. Starobinsky](#), R.A. Sunyaev, “X-ray variability of SDSS quasars based on the SRG/eROSITA all-sky survey”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 528(4), 5972-5989 (2024).
- [3] A.S. Koshelev, K. Sravan Kumar, [A.A. Starobinsky](#), “Cosmology in Nonlocal Gravity”. In: C. Bambi, L. Modesto, I. Shapiro (eds) Handbook of Quantum Gravity. Springer, Singapore (2024).
- [4] G.E. Volovik, “Discrete Z_4 symmetry in quantum gravity”, Symmetry 16, 1131 (2024).
- [5] G.E. Volovik, “Schwinger vs Unruh”, Pis'ma ZhETF 120, 659 (2024); JETP Letters 120, 631 (2024)
- [6] G.E. Volovik, “Tsallis-Cirto entropy of black hole and black hole atom”, arXiv:2409.15362
- [7] G.E. Volovik, “Two dark components of de Sitter Universe”, arXiv:2410.04392.
- [8] G.E. Volovik, “Thermodynamics of Einstein static Universe with boundary”, arXiv:2410.10549.
- [9] С.Н. Вергелес, “Альтернативная идея об источнике барионной асимметрии во Вселенной”, Письма в ЖЭТФ 120, 481 (2024).
- [10] N.N. Nikolaev, F. Rathmann, J. Slim, “Alternating Spin Polarity Bunches in Storage Rings”, Phys. Atom. Nucl. 87(4), 442-446 (2024).
- [11] Yu. Senichev, A. Aksentyev, S. Kolokolchikov, A. Melnikov, N. Nikolaev, V. Ladygin, E. Syresin, “NICA facilities for the search for EDM light nuclei”, Phys. Atom. Nucl. 87(4), 436-441 (2024).
- [12] Ю.Н. Филатов, А.М. Кондратенко, Н.Н. Николаев, Ю.В. Сеничев, М.А. Кондратенко, С.В. Виноградов, Е.Д. Цыплаков, А.И. Чернышов, А.В. Бутенко, С.А. Костромин, В.П. Ладыгин, Е.М. Сыресин, Е.А. Бутенко, И.Л. Гурылева, А.А. Мельников, А.Е. Аксентьев, “Компенсация влияния несовершенства структуры Нуклотрона/ОИЯИ на поляризацию протонов в области целого спинового резонанса (Миниобзор)”, Письма в ЖЭТФ 120(10), 810-819 (2024).

- [13] S. Kolokolchikov, A. Aksentyev, A. Melnikov, Y. Senichev, E. Syresin, V. Ladygin, “ByPass optics design in NICA storage ring for experiment with polarized beams for EDM search”, J. Phys.: Conf. Ser. 2687, 022026 (2024).
- [14] Yu.V. Senichev, A.E. Aksent’ev, S.D. Kolokolchikov, A.A. Melnikov, V.P. Ladygin, E.M. Syresin, “Magneto-Optical Structure of the Nuclotron for Searching for the Electric Dipole Moment of Light Nuclei”, Phys. Part. Nuclei Lett. 21(3), 266-270 (2024).
- [15] A. Melnikov, A. Aksentyev, Yu. Senichev, S. Kolokolchikov, “Quasi-frozen spin concept at NICA for EDM search and its matrix analysis”, Phys. Atom. Nuclei 87(4), 447–450 (2024).
- [16] A. Melnikov, Yu. Senichev, A. Aksentyev, S. Kolokolchikov, “Spinor description of frozen and quasi-frozen spin structures for the EDM measurement in a frequency domain”, Phys. Atom. Nuclei 87, N°10 (2024) (accepted).
- [17] A. Melnikov, A. Aksentyev, Yu. Senichev, S. Kolokolchikov, “Studies of the spin coherence time of protons at COSY”, J. Phys.: Conf. Ser. 2687, 052025 (2024).
- [18] S. Kolokolchikov, A. Aksentyev, A. Melnikov, Yu. Senichev, “Spin coherence and betatron chromaticity of deuteron beam in NICA storage ring”, J. Phys.: Conf. Ser. 2687, 022027 (2024).
- [19] B.G. Zakharov, “Jet quenching for hadron tagged jets in pA collisions”, JETP Lett. 120(3), 169 (2024).
- [20] B.G. Zakharov, “Effect of parton color randomization on p_T broadening in quark-gluon plasma with turbulent color fields”, ЖЭТФ 166(2), 216-231 (2024).

6.7 Транспорт в неупорядоченных системах: от наноструктур до турбулентной атмосферы

Работа лаборатории перспективных исследований в физике конденсированного состояния сфокусирована на трех актуальных направлениях исследований (транспорт в низкоразмерных системах и наноструктурах, процессы переноса в турбулентных средах, стохастическая динамика в физике мягкой материи), объединенных рамками общей тематики — транспорт в неупорядоченных системах. Целью проводимой научно-исследовательской деятельности является построение аналитических и полуаналитических моделей процессов транспорта специфических для каждого указанного направлений.

Ниже приводятся результаты, полученные в 2024 году.

Процессы переноса в турбулентных средах

Мы рассмотрели перемешивание пассивной примеси в случайном потоке в пределе слабой молекулярной диффузии, для которого существует диапазон масштабов между малым диффузионным масштабом и относительно большой корреляционной длиной градиента поля скорости потока. В этом диапазоне масштабов при описании эволюции исходного распределения примеси в пространстве в окрестности некоторой лагранжевой траектории поле скорости достаточно приблизить линейным профилем. Мы связали корреляционные функции концентрации примеси второго и четвертого порядка со статистикой аффинной деформации малого элемента объема жидкости. Тогда как парная корреляционная функция отображает статистику растяжения только по главному направлению, корреляционная функция четвертого порядка на своих угловых особенностях отображает полную статистику растяжений в трёх-мерном течении. Корреляционная функция четвертого порядка обладает угловыми особенностями, которые описывают слоистую пространственную структуру распределения скаляра на малых масштабах. В двумерном течении поведение на угловых особенностях корреляционной функции четвертого порядка обладает другими свойствами и существенно зависит от коэффициента диффузии. Наши выводы применимы для любого статистически однородного во времени градиента поля скорости, что делает их практически значимыми с точки зрения измерения этой статистики. Результаты исследований по этой теме легли в основу публикации [11]. (С.С. Вергелес)

Определение параметров и реконструкция течений с помощью физически-информированных нейронных сетей

Решение задачи о теоретической аппроксимации экспериментальных данных широко востребовано в практических приложениях. Речь идет о ситуации, когда физическая модель явления хорошо проработана (известны динамические уравнения) и нам нужно найти такое (численное) решение этих уравнений, которое бы отличалось от экспериментальных данных минимально возможным образом. Такой подход позволяет решать обратные задачи (т.е. определять неизвестные параметры системы, которые фигурируют в динамических уравнениях, по экспериментальным данным), задачи супер-разрешения (увеличение пространственного и/или временного разре-

ния для измеряемых величин), а также задачи о восстановлении динамики «скрытых» полей (т.е. величин, которые не были измерены в эксперименте напрямую, но которые могут существенно влиять на динамику рассматриваемой системы). В ходе работы над проектом мы разработали метод, основанный на обучении физически-информированных нейронных сетей, который способен эффективно решать все вышеуказанные задачи и отличается простотой имплементации. Апробация метода была произведена на примере двумерного турбулентного течения, которое описывается уравнением Навье-Стокса с возбуждающей течение внешней силой и дополнительным диссипативным слагаемым (линейное трение о дно). Для генерации данных уравнение было проинтегрировано численно, после чего мы смоделировали процесс измерения поля скорости с относительно небольшим пространственным разрешением. Такие данные для поля скорости соответствуют типичным измерениям в гидродинамических экспериментах, проводимых методами PIV/PTV. Наша задача состояла в определении параметров системы (кинематической вязкости жидкости, коэффициента трения о дно, амплитуды и пространственной структуры внешней силы), увеличении пространственного разрешения для поля скорости и определении динамики поля давления по имеющимся разреженным (и искусственно зашумленным) данным для поля скорости. Кроме того, мы исследовали как эффективность решения обозначенных выше задач зависит от степени разреженности и уровня шума в исходных данных. Отметим, что для характерных экспериментальных параметров ошибка в восстановлении поля скорости с высоким пространственным разрешением составила около 0.5%, поля давления и внешней силы были реконструированы с точностью 2%, а диссипативные коэффициенты были определены с точностью в несколько процентов. Проведенный анализ демонстрирует, что разработанный метод позволяет извлекать дополнительную информацию из PIV/PTV измерений поля скорости в гидродинамических экспериментах. Исходный код алгоритма выложен в свободный доступ <https://github.com/parfenyev/2d-turb-PINN>, и он легко может быть адаптирован для анализа любых других систем (не обязательно гидродинамического типа). По материалу исследования опубликована статья в рецензируемом журнале [6]. (В.М. Парфеньев)

Транспорт в неупорядоченных электронных системах

Основным направлением работы в 2024 году было исследование кроссоверов между системами с нетривиальными топологическими свойствами. Одним из главных примеров таких систем является двумерный электронный газ в режиме целочисленного квантового эффекта Холла, в котором наличие делокализованных краевых киральных мод приводит к квантованию поперечной проводимости. Из-за топологической защиты таких состояний по отношению к беспорядку (так называемое отсутствие рассеяния назад) такое квантование сохраняется и в неупорядоченном случае. Объемное поведение неупорядоченной системы в режиме ЦКЭХ описывается эффективной теорией диффузионных мод – нелинейной сигма-моделью, где в отличие от случая обычного металла возникает дополнительный вклад, отвечающий за нетривиальные топологические свойства системы. Наличие топологического члена Пруескиновского типа приводит к возникновению дополнительных седловых решений с конечным действием – инстантонов (или антиинстантонов). Основное свойство таких решений – их топологический заряд квантуется. Нетривиальные топологические свойства проявля-

ются не только в системах ЦКЭХ, например, в двумерных грязных сверхпроводниках с необычным d -типом спаривания и нарушенной симметрией по отношению к обращению времени оказывается возможным образование состояния спинового квантового эффекта Холла (СКЭХ), когда из-за наличия когерентных краевых частично-дырочных мод возникает квантование поперечной спиновой проводимости целыми четными числами. Наше исследование направлено на изучение кроссовера между СКЭХ и ЦКЭХ. Такой кроссовер может быть реализован с помощью учета Зеемановского магнитного поля, что приводит к расщеплению краевых частично-дырочных мод, а значит к нарушению их когерентности, что в свою очередь означает возникновение фаз с нечетным значением проводимости. С помощью упрощенной модели двумерного электронного газа в квантующем магнитном поле при наличии наведенного сверхпроводящего параметра порядка мы показываем, что для корректного описания такого кроссовера оказывается недостаточным рассматривать эффекты, происходящие на краю, а надо учитывать поведение объемного спектра системы. В неупорядоченном (диффузном случае) преобразование объемной теории связаны с деформацией седловых решений — инстантонов при увеличении амплитуды Зеемановского поля: инстантоны с нечетным значением топологическим зарядом исчезают из теории, а инстантоны с четным топологическим зарядом преобразуются в инстантоны Пруескина. Также, мы показываем, что наличие кроссовера проявляется в наблюдаемой ширине плато КЭХ, а именно в зависимости ширины от Зеемановского поля. [7, 8] (М.В. Парфенов)

Было проведено исследование истории развития микроскопического подхода к описанию спиновых моментов в двумерных ферромагнетиках Рашбы. Было выяснено, что в недавнем обзоре А.А. Первишко и Д.И. Юдина [УФН 192, 233 (2022)] приоритет результатов указан не правильно. Был подготовлен комментарий с правильным указанием приоритета основных результатов микроскопического подхода к описанию спиновых моментов в двумерных ферромагнетиках Рашбы. [9] (И.С. Бурмистров)

Кроме того, в 2024 году было проведено исследование динамики сверхпроводящих контактов на больших временах. На примере нульмерного SINIS-контакта, где S – сверхпроводник, I – изолятор, N – нормальный металл, было показано, что при учёте квазичастичных степеней свободы джозефсоновского контакта особенную роль играет неупругая релаксация связанных андреевских состояний, приводящая к изменению вида слагаемых в получающемся уравнении на фазу сверхпроводников, эквивалентному модели resistively shunted junction (RSJ). В частности, неупругое время релаксации изменяет явный вид слагаемого, соответствующего сопротивлению в стандартной RSJ-модели, тем самым определяя характерный временной масштаб, например, оптимальных флуктуаций, соответствующих тепловому проскальзыванию фазы.

В случае равновесной конфигурации характерное время оптимальной флуктуации не влияет на значение темпа проскальзываний фазы, которое совпадает со значением, получающимся из термодинамики. Однако, для системы вне равновесия ситуация иная. В частности, было получено, что для контакта, под воздействием микроволнового излучения темп тепловых проскальзываний фазы приобретает явную функциональную зависимость как от частоты микроволнового излучения, так и от времени неупругой релаксации. (М. А. Скворцов, А. В. Польшкин)

Открытые диссипативные квантовые системы

Коррелированные квантовые многочастичные состояния могут создаваться и контролироваться с помощью диссипативных протоколов. Среди них протоколы, сохраняющие число частиц, особенно привлекательны из-за их способности стабилизировать топологически нетривиальные фазы. Есть ли какие-либо фундаментальные ограничения на их возможности? На этот актуальный вопрос был представлен ответ в широком классе моделей, включающих двухзонную фермионную систему, подверженную диссипации, которая переводит фермионы из верхней зоны в нижнюю. По своей конструкции эти модели имеют гарантированное устойчивое состояние - темное состояние - с полностью заполненной нижней зоной и пустой верхней зоной. В пределе слабой диссипации были выведены уравнения, управляющие динамикой плотностей фермионов на больших расстояниях и во времени. Эти уравнения относятся к классу универсальных уравнений реакции-диффузии Фишера-Колмогорова-Петровского-Пискунова. Наш анализ показывает, что желаемое темное состояние в целом нестабильно, в то время как протокол стабилизирует новое устойчивое состояние с конечной плотностью частиц в верхней зоне. Полученные результаты показывают, что сохраняющие число частиц диссипативные протоколы не могут быть надежным универсальным инструментом для стабилизации темновых состояний типа зонного изолятора. [10] (А.А. Люблинская)

В последнее время возрос интерес к исследованию топологических сверхпроводников в условиях диссипации в связи с перспективами создания управляемых неравновесных состояний. В таком рассмотрении наибольший интерес представляет изучение состояний, являющихся стационарными решениями уравнения Горини-Коссаковского-Сударшана-Линдблада (ГКСЛ). Мы исследовали возможность реализации таких стационарных состояний (нулевых мод линдбладиана или т.н. темновых состояний) для топологических сверхпроводников класса BDI, в которых может реализоваться произвольное количество, NBDI, майорановских мод. Нами найдены условия реализации темновых состояний в терминах гибридизации майорановских волновых функций и линейных диссипативных полей от термостатов. Показано, что в общем случае действие диссипативного поля от NB термостатов приводит к сокращению числа темновых состояний, $NDS = 2(NBDI - NB)$, но такое редуцирование можно сделать управляемым. В частности, нами показано, что необходимым и достаточным условием на то, чтобы количество нулевых мод топологического сверхпроводника не изменилось под действием диссипации является принадлежность диссипативных полей к линейной оболочке волновых функций, ортогональных всем волновым функциям майорановских мод. (М.С. Шустин, И.С. Бурмистров)

Стохастическая динамика в физике мягкой материи

В стандартной формулировке задачи первого прохождения событие прохождения связано с моментом первого входа процесса в определенное состояние или первого касания им границы некоторого множества состояний и, таким образом, характеризуется нулевой длительностью. Скажем, для процесса Бернулли событие первого прохождения соответствует появлению первого успеха (или неудачи) в серии испытаний, а плотность вероятности времени ожидания такого события описывается геометрическим распределением. В качестве еще одного классического примера приведем од-

номерное броуновское движение, где событие первого прохождения связано с попаданием частицы в поглощающую точку, а результирующая статистика описывается распределением Леви-Смирнова.

В более сложных модификациях обсуждаемой задачи рассматривается время ожидания некоторого «неточечного» события прохождения. Под последним понимается первое прохождение случайного процесса через заданную последовательность состояний за интервал времени фиксированной продолжительности. К примеру, ранее для вычисления среднего времени ожидания первого появления слова ABRACADABRA в случайной последовательности букв, генерируемой в мысленном эксперименте с печатающей обезьяной была применена теория мартингалов. Совсем недавно при помощи более прозрачного обратного метода Колмогорова была рассмотрена статистика времени ожидания некоторых простых серий исходов фиксированной длины в эксперименте с подбрасыванием симметричной монеты. В качестве схожего примера, но с непрерывным временем, можно вспомнить исследование статистики времени ожидания первого интервала заданной длины в пуассоновском потоке, что имеет значение для моделирования времени, требуемого пешеходам для пересечения транспортного потока, и для моделирования продолжительности мертвой эпохи в работе счетчиков Гейгера.

Вышеупомянутые сценарии являются наиболее простыми с точки зрения аналитических вычислений, поскольку и испытания Бернулли, и поток Пуассона, представляют собой декоррелированные во времени процессы. Существует также ряд работ, посвященных времени ожидания первого наблюдения паттерна определенной продолжительности в моделях с временными корреляциями, простейшими примерами которых являются цепи Маркова первого порядка и системы с восстановлением. В частности, статистика времени ожидания некоторых достаточно простых цепочек исходов в последовательности, генерируемой цепью Маркова первого порядка с двумя состояниями, была рассмотрена в литературе на основе построения аналогии с азартными играми. Более общо, было также предложено решение задачи определения статистического распределения времени ожидания любой наперед заданной цепочки исходов в дискретных коррелированных во времени данных, генерируемых цепями Маркова первого порядка и процессами восстановления (также известными как полумарковские процессы) с произвольным числом состояний. Основной областью применения этих результатов является анализ распределения определенных паттернов в длинных последовательностях ДНК. Важным является также вклад работы, где исследовалась статистика времени ожидания достаточно длительного периода непрерывного пребывания в заданном состоянии чередующегося (т. е. обладающего двумя состояниями) процесса восстановления, представляющего популярную модель в анализе надежности.

Подводя итог, скажем, что различные версии задачи описания статистики времени ожидания события ненулевой длительности рассматривались разными методами в чисто математической литературе, в прикладной теории вероятностей и в физических журналах.

Целью проведенной нами работы являлась демонстрация наиболее прямого и интуитивно понятного (по крайней мере, для исследователей, работающих в области статистической физики) аналитического метода определения статистики времени ожидания в моделях прыжковых процессов со статистически независимыми интервала-

ми между прыжками. Для изложения ключевых идей и вычислительных аспектов мы выбрали модель с всего двумя состояниями и рассмотрели самое простое возможное событие в качестве порогового — постоянное пребывание процесса в заданном состоянии в течение интервала времени фиксированной длины. Статистические характеристики времени ожидания в такой постановке задачи могут быть получены путем усреднения специфического представления случайной реализации этой величины — подход, который может быть назван методом стохастического уравнения обновления. Помимо методологических вопросов, особое внимание мы уделили пределу событий большой длительности, в котором, как оказалось возникает универсальное статистическое поведение. Другим важным аспектом проведенного анализа является сравнение результатов для различных типов распределений интервалов времени между прыжками.

Перейдем к формулированию конкретных моделей и описанию полученных результатов. Рассмотрим цепь Маркова с двумя состояниями, характеризующуюся вероятностями перехода p и q за один шаг дискретного времени. Траектория такого прыжкового процесса может быть закодирована бинарной динамической переменной x_t . Более конкретно, мы будем говорить, что $x_t = 1$, где $t = 0, 1, 2, \dots$, если процесс находится в состоянии 1 на шаге t , и $x_t = 0$, если процесс в состоянии 2. Через k обозначим время, требуемое чтобы впервые встретить N единиц подряд в ряду значений переменной x_t .

В нашем исследовании мы показали, как получить статистику k на основе метода стохастического уравнения обновления. Кратко опишем суть данного метода. Вводя индикаторные функции, аргументы которых задают условия на начальное состояние и на момент первого перехода между парой состояний, мы можем разделить множество возможных наблюдений на взаимно исключающие сценарии, которые, будучи вместе взятыми, учитывают все возможные траектории процесса. Такое представление приводит к набору так называемых уравнений обновления на случайное время ожидания, а также на случайные переменные, входящие в декомпозицию этого времени по альтернативным историям динамики процесса. Благодаря марковскому свойству процесса, эти уравнения рекурсивны в том смысле, что они выражают некоторые случайные переменные через их статистически независимые копии. Строго говоря, число неизвестных при этом превосходит число уравнений, однако используя статистическую независимость можно получить замкнутые выражения для усредненных характеристик случайного времени ожидания. Следуя этой логике ниже мы вычислили характеристическую функцию, определенную как среднее $\langle e^{isk} \rangle$, и математическое ожидание $\langle k \rangle$.

Перейдем теперь к случаю бинарного случайного процесса с немарковскими корреляциями. А именно, рассмотрим стохастические прыжки между двумя состояниями согласно следующим простым правилам. Если процесс перешел в состояние 1, то он остается там случайное время t_1 , имеющее плотность распределения общего вида $\rho_1(t_1)$. Схожим образом, время пребывания t_2 процесса в состоянии 2 также представляет собой случайную переменную с произвольной плотностью распределения $\rho_2(t_2)$. Случайные длительности интервалов времени между прыжками являются статистически независимыми. Прыжковые процессы с такими свойствами известны в литературе как полумарковские процессы или марковские процессы обновления.

Пусть $x(t)$ это бинарная функция, для которой значение $x(t) = 1$ означает, что про-

цесс находится в состоянии 1 в момент времени t , в то время как значение $x(t) = 0$ соответствует состоянию 2. Мы начинаем наблюдать за этим процессом в случайный момент времени и хотим описать статистику времени ожидания T первого промежутка времени длины τ , в течении которого процесс не покидает состояния 1. Для упрощения анализа, в этом разделе будет предполагаться, что τ - это дискретная переменная. Отметим, что если исходно имеется дискретная модель, то переход к непрерывному пределу оправдан, если все релевантные масштабы времени велики в сравнении с дискретным шагом, то есть $\langle t_1 \rangle, \langle t_2 \rangle, \tau \gg 1$. В данной модели, так же следуя методу стохастического уравнения обновления, мы получили аналитическое выражение для среднего времени ожидания требуемого события ненулевой длительности.

Сравнение аналитических предсказаний со случаем декоррелированного во времени процесса показывает, что корреляции могут как уменьшать, так и увеличивать соответствующее среднее время ожидания. Кроме того, сопоставляя экспоненциальные, субэкспоненциальные и модели с тяжелыми хвостами, характеризующиеся равными вероятностями наблюдения интересующего нас события, мы обнаружили, что более быстрое убывание плотности вероятности интервалов времени между прыжками подразумевает меньшее среднее время ожидания. Интересно, что независимо от деталей конкретной модели для рассматриваемых здесь прыжковых процессов как с дискретным, так и непрерывным временем, случайное время ожидания демонстрирует универсальность, становясь экспоненциально распределенным в пределе большой длительности ожидаемого события.

Обсудим теперь потенциальные приложения полученных результатов в областях исследований, где подобные вопросы, насколько нам известно, пока не рассматривались.

Прежде всего, марковская цепь с двумя состояниями представляет собой полезный инструмент теоретического моделирования паттернов выпадения осадков. Если, скажем, состояние 1 соответствует сухому дню в некоторой местности (отсутствие осадков), а состояние 2 - дождливому дню (ненулевое количество выпавших осадков), то событие прохождения в контексте принятой нами здесь модели будет представлять собой засушливый период определенной длительности. Таким образом, проделанный нами анализ вместе с предшествующими исследованиями аналогичной тематики может дать предсказания касательно статистики времени ожидания периодов персистентных метеорологических условий, включая сценарий экстремально долгих засух, что представляет интерес для оценки рисков в агропромышленном планировании.

Во-вторых, мы ожидаем, что рассмотренный нами прыжковый процесс с двумя состояниями в непрерывном времени может воспроизводить свойства статистически-стационарного турбулентного сигнала в рамках телеграфного приближения, представляющего собой разновидность огрубленного описания данных. При таком описании из сигнала исключают информацию об его амплитуде, оставляя только информацию о знаке флуктуирующей переменной. Проще говоря, мы приписываем значение 1 телеграфной динамической переменной, если интересующая нас компонента поля скорости турбулентной жидкости в рассматриваемой точке положительна в заданный момент времени, и значение 0 в противоположном случае. Пересечение сигналом нуля тогда соответствует переходу между парой огрубленных состояний турбулентной скорости. Если известны плотности распределения интервалов времени между после-

довательными пересечениями нуля турбулентным сигналом, то результаты представленного анализа могут быть использованы для извлечения теоретических предсказаний касательно статистики времени ожидания периодов персистентности сигнала.

Аналогично, можно ввести телеграфное приближение для флуктуаций температуры в турбулентной конвекции и для флуктуаций концентрации пассивного скаляра, переносимого турбулентным течением. Кроме того, телеграфный подход может быть применен для анализа статистики флуктуаций в хаотических состояниях движения бактериальных суспензий, являющихся одним из интересных предметов исследований в физике мягкой материи. Результаты работы по этой теме легли в основу публикации [1]. (С.А. Белан)

Активная экструзия петель — процесс образования динамически растущих петель хроматина за счет двигательной активности ДНК-связывающих белковых комплексов — является твердо установленным механизмом, ответственным за пространственную организацию хроматина на разных стадиях клеточного цикла у эукариот и бактерий. Теоретическое понимание влияния экструзии петель на экспериментально измеряемую статистику конформации хроматина может быть получено с помощью правильно выбранной модели полимера. Здесь мы рассматриваем простейшую аналитически решаемую модель интерфазной хромосомы, которая рассматривается как идеальная цепь с беспорядком достаточно редких случайных петель, конформации которых выбираются из равновесного ансамбля. Этот подход позволяет нам получить аналитическое выражение для среднеквадратичного расстояния между парами геномных локусов, которое справедливо за пределами однопетлевого приближения в диаграммном представлении. Кроме того, мы анализируем вызванное петлями отклонение конформаций цепи от гауссовой статистики путем расчета эксцесса плотности вероятности расстояния между двумя точками, разделенными фиксированной контурной длиной. Представленные результаты позволяют предложить возможные пути оценки характеристик процесса экструзии петель на основе экспериментальных данных по масштабно-зависимой статистике внутрихромосомных парных расстояний. [2] (С.А. Белан, В.М. Парфеньев)

Усредненные по большим популяциям клеток карты контактов, полученные с помощью метода определения конформации хромосом, предоставляют важную информацию о средней частоте контактов между парами локусов хроматина в зависимости от генетического расстояния между ними. Однако эти наборы данных ничего не говорят нам о совместной статистике одновременных контактов между геномными локусами отдельно взятой хромосомы. Такого рода статистическая информация может быть извлечена с помощью Hi-C метода, который способен обнаруживать большую долю одновременных контактов в пределах одной клетки, а также с помощью сочетания современных методов флуоресцентного окрашивания и микроскопии высокого разрешения. Мотивированные перспективой скорого появления соответствующих экспериментальных данных, в данной работе мы теоретически промоделировали совместную статистику пар контактов, расположенных вдоль линии, перпендикулярной главной диагонали карты контактов отдельной хромосомы. Анализ проводится в рамках модели идеальной полимерной цепи с подавленным беспорядком случайных петель, что, как показали предыдущие исследования, позволяет учитывать влияние процесса экструзии петель на конформационные свойства интерфазного хроматина.

[3] (С.А. Белан)

Оптимизация случайных процессов путем перезапуска является предметом активных теоретических исследований в статистической физике и уже давно нашла практическое применение в информатике. Между тем, один из ключевых вопросов остается по большей части нерешенным: как именно следует перезапускать процесс, точная статистика которого неизвестна, чтобы гарантировать, что наше вмешательство улучшит производительность? Обращаясь к этому вопросу, мы предлагаем несколько конструктивистских критериев эффективности различных протоколов немгновенного перезапуска в задаче оптимизации среднего времени завершения и в задаче оптимизации вероятности успеха. Будучи выраженными через небольшое число легко оцениваемых статистических характеристик исходного процесса, эти критерии позволяют выбрать гарантированно эффективную стратегию перезапуска на основе частичной информации. [4] (С.А. Белан)

Пуассоновский перезапуск предполагает, что случайный процесс прерывается и запускается снова в случайные моменты времени. Ряд исследований продемонстрировал, что эта стратегия может минимизировать ожидаемое время завершения в некоторых классах задач случайного поиска. Более того, оказалось, что при оптимально настроенной частоте перезапуска любой случайный процесс, независимо от его природы и статистических деталей, удовлетворяет ряду универсальных соотношений на статистические моменты времени завершения. В этой статье мы описали несколько новых универсальных свойств оптимально перезапускаемых процессов. Также мы получили универсальное неравенство для квадратичных статистических моментов времени завершения в задаче оптимизации, где случайный процесс имеет несколько возможных сценариев завершения. [5] (С.А. Белан)

Нелинейная динамика везикул

Было проведено исследование динамики везикул - замкнутых оболочек из липидного бислоя, представляющего собой удивительно гибкую и при этом слабосжимаемую жидкую поверхность. Наше рассмотрение динамики бислоев основано на гидродинамическом подходе, в рамках которого бислой рассматривается как бесконечно тонкая жидкая пленка, на которой сосредоточены зависящие от формы силы, приложенные к окружающей вязкой жидкости. Хотя речь идет о течениях с малыми числами Рейнольдса, которые описываются линейным гидродинамическим уравнением, форма везикулы со временем существенно изменяется. Это делает систему динамических уравнений сильно нелинейной и приводит к необходимости численного моделирования процесса.

Получены результаты, касающиеся так называемой «жемчужной» неустойчивости, при которой цилиндрическая везикула при поверхностном натяжении выше критического значения переходит в форму «ожерелья» – набора шариков, соединённых тонкими длинными трубочками.

Более конкретно, для динамики в растягивающем потоке определена зависимость первой критической интенсивности внешнего потока в зависимости от вытянутости везикулы, являющейся границей существования стационарной формы. То же самое было сделано затем для второй критической интенсивности - когда образуются жем-

чужины в центральной части. Кроме того, была исследована медленная динамика системы, реализующаяся после образования жемчужин.

Далее, для динамики под действием внешней растягивающей силы в рамках линейной теории устойчивости определен спектр нормальных мод, определена величина критического поверхностного натяжения. Также исследована динамика (как в сильно нелинейной фазе развития неустойчивости, так и медленная) после образования жемчужин, и изучены процессы рассасывания жемчужин. (М.А. Шишкин)

Непадающие траектории

Изучение никогда не падающей траектории маятника [N.A. Stepanov, M.A. Skvortsov, SciPost Phys. 13(2), 021 (2022)], проведенное ранее, поставило вопрос о не падающих траекториях за конечное время. В такой постановке возникает ряд задач, таких как: существует ли решение 1) имеющее заданную начальную и конечную координаты в начальный и конечный моменты времени соответственно 2) имеющее заданную начальную координату и конечный импульс 3) имеющий заданные начальный и конечный импульсы. Разработанный ранее метод Паризи-Сурла [G. Parisi and N. Sourlas, Nucl. Phys. B 206, 321 (1982)] был модифицирован дискретным образом, для связи граничных условий с начальными и конечными условиями для вспомогательных супер симметричных функций, на языке которых описывается эволюция. Это позволило обобщить схему на самые общие начальные и конечные граничные условия. Также был выяснен смысл вспомогательных супер симметричных функций — они оказались условными вероятностями для траектории. А также была обнаружена связь с одномерной гидродинамикой. Используя полученное обобщение, были решены задачи 1) про перевернутый маятник с фиксированным начальным импульсом, 2) а также задача о движении массивной частицы под действием случайной силы (Random Acceleration Model) в присутствии поглощающих стенок. Общий характер поведения такой, что решений с фиксированным импульсом меньше чем с фиксированной координатой. (М.А. Скворцов, Н.А. Степанов)

Список публикаций

- [1] С.А. Белан, “Метод стохастического уравнения обновления в определении статистики времени ожидания первого появления определенной последовательности состояний, последовательно посещенных чередующимся процессом обновления”, Письма в ЖЭТФ 120(9), 733-741 (2024).
- [2] S. Belan and V. Parfenyev, “Footprints of loop extrusion in statistics of intrachromosomal distances: an analytically solvable model”, J. Chem. Phys. 160(12), 124901 (2024).
- [3] D. Starkov, S. Belan, “Effect of active loop extrusion on the two-contact correlations in the interphase chromosome”, J. Chem. Phys. 161, 074903 (2024); arXiv:2404.04853.
- [4] Ilya Nikitin, Sergey Belan, “Constructing efficient strategies for the process optimization by restart”, Phys. Rev. E 109, 054117 (2024).
- [5] Sergey Belan, On the universal properties of stochastic processes under optimally tuned Poisson restart, arXiv:2403.08409.
- [6] В. Парфеньев, М. Блуменау, И. Никитин, “Реконструкция двумерных турбулентных течений и их параметров с помощью физически-информированных нейронных сетей”, Письма в ЖЭТФ 120(8), 627-635 (2024).
- [7] M. V. Parfenov, I. S. Burmistrov, “Instanton analysis for the spin quantum Hall symmetry class: Non-perturbative corrections to physical observables and generalized multifractal spectrum”, Phys. Rev. B 110, 165431 (2024).
- [8] M.V. Parfenov, I.S. Burmistrov, “Bulk topological excitations on crossover from spin to integer quantum Hall effect”, готовится к публикации.
- [9] И.С. Бурмистров “К вопросу о микроскопическом подходе к описанию спиновых моментов в двумерных ферромагнетиках Рашбы”, принято к печати в УФН.
- [10] A. A. Lyublinskaya, P. A. Nosov, I. S. Burmistrov, “Instability of the engineered dark state in two-band fermions under number-conserving dissipative dynamics”, arxiv:2408.04987, на рецензии в Phys. Rev. Lett.
- [11] С.С. Вергелес, “Корреляционные функции пассивного скаляра как мера статистики градиента скорости”, Письма в ЖЭТФ 120, 288 (2024).

