

## Необычная сверхпроводимость и сверхтекучесть

К настоящему времени физические механизмы, приводящие к сверхпроводимости и сверхтекучести, хорошо поняты и являются общепризнанными. Речь прежде всего идет о низкотемпературной сверхпроводимости металлов и сплавов, а также о сверхтекучести  $^4\text{He}$ . Однако некоторое число фундаментальных вопросов все еще остается без ответа. Значительное внимание привлекает изучение возможности сверхпроводимости и сверхтекучести в экзотических для этих явлений системах. К ним относятся двухслойные системы со спариванием пространственно разделенных электронов и дырок, магнетики, где предсказывается протекание спиновых сверхтоков, ультрахолодные газы в оптических решетках. Интерес вызывает также явление, называемое «суперсолид», состоящее в сосуществовании периодической кристаллической структуры и сверхтекучести. При этом к системам, в которых может иметь место фаза «суперсолид», относятся как твердый  $^4\text{He}$ , так и ультрахолодные дипольные газы и системы со спариванием электронов и дырок. Экспериментальный и теоретический интерес к «классической» сверхтекучей системе  $\text{He II}$  в последнее время в значительной мере связан с изучением влияния на сверхтекучесть вихревых структур, таких как вихревые нити и вихревые клубки.

Продолжает вызывать интерес проблема электрической активности сверхтекучего гелия. Внимание уделяется и явлению бездиссипативного увлечения в многокомпонентных сверхтекучих системах при наличии относительного движения компонент. В связи с открытием ряда железосодержащих и водородосодержащих сверхпроводников возникает необходимость проведения экспериментальных и теоретических исследований, направленных на выяснение природы сверхпроводимости в таких соединениях. Отметим, наконец, что в последнее время активно обсуждается использование традиционных и высокотемпературных сверхпроводников для создания новых метаматериалов. Перечисленному кругу вопросов посвящен настоящий выпуск.

Выпуск открывается обзором Э.Б. Сониной, в котором рассматривается теория сверхтекучего спинового транспорта в ферро- и антиферромагнетиках. Излагаются основные понятия теории сверхтекучей жидкости. Обсуждается, каким образом подходы теории сверхтекучести можно адаптировать для описания магнитоупорядоченных систем. Показано, что аналогия между уравнениями гидродинамики сверхтекучей жидкости и уравнениями движения для магнитного момента, которая следует из уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта, является не

просто формальной (как считалось ранее), а приводит к важному физическому эффекту — бездиссипативному протеканию спинового тока через магнитоупорядоченную систему. При описании такого протекания можно применять критерий Ландау и концепцию проскальзывания фазы. Обсуждается физический смысл спинового сверхтекучего потока, излагается теория его устойчивости, основанная на оценке вероятности рождения линейных дефектов — аналогов сверхтекучих вихрей. Предлагаются эксперименты по наблюдению спиновых сверхтекучих потоков.

Обзор А.И. Безуглого посвящен теоретическому описанию природы острого пика дифференциальной туннельной проводимости при нулевом напряжении, наблюдаемого в двухслойных системах со спариванием электронов и дырок:  $n$ - $p$  системах без перпендикулярного магнитного поля и  $n$ - $n$  квантовых холловских системах с суммарным фактором заполнения, равным единице. Рассмотрение основано на динамическом уравнении для параметра порядка «грязных»  $n$ - $p$  систем. Описано влияние температуры и параллельного магнитного поля на туннельную проводимость фазово-когерентной двухслойной системы. Показано, что такое поле изменяет высоту пика, а при отличной от нуля температуре зависимость проводимости от поля существенно немонотонная. При этом пик полностью подавляется, когда магнитный поток в межслоевой области становится равным целому числу квантов потока.

В статье А.Б. Куклова, Н.В. Прокофьева и Б.В. Сви-стунова обсуждаются теоретические и экспериментальные открытия в области супертранспорта и пластичности в твердом  ${}^4\text{He}$ . Предлагаются несколько экспериментов, которые должны помочь установить природу супертранспорта через твердый  ${}^4\text{He}$  и его связь с пластичностью. К таким экспериментам относятся изучение влияния напряжений на супертранспорт, обнаружение сдвиговых деформаций при приложении одноосного напряжения, динамическое создание сверхтекучих путей при «впрыскивании» атомов  $\text{He}$  в кристалл, создание сверхтекучих путей пластической деформацией. Обсуждается вопрос о возможности контролировать ответственный за сверхтекучие свойства беспорядок по специальному протоколу «холоднойковки» — созданию больших механических деформаций образцов  ${}^4\text{He}$  при температуре ниже 0,5 К.

В работе Д.В. Филя и С.И. Шевченко в рамках формализма когерентных состояний Л.В. Келдыша описан переход в состояние «суперсолид» в разреженном двумерном газе электрон-дырочных пар с пространственно разделенными компонентами. Построена фазовая диаграмма системы в переменных «химический потенциал пар–расстояние между слоями». Показано, что при фазовом переходе происходит скачок средней плотности

конденсата, т.е. имеет место переход первого рода. Установлено, что при увеличении химического потенциала неоднородная фаза разбивается на области с большой плотностью, окруженные линиями, на которых плотность обращается в нуль, причем эти линии образуют сплошную сетку.

В статье С.К. Немировского обсуждается проблема стохастической динамики квантовых вихревых нитей под действием случайной силы Ланжевена. Разработанный в статье формализм предназначен для исследования различных задач по динамике вихревых нитей в термодинамическом приближении. Изучаются случаи непрерывного и дискретного подходов. Формулировка проблемы в рамках дискретного подхода является важным элементом, поскольку соответствующие задачи описываются сложными нелинейными дифференциальными уравнениями и возникает необходимость численного рассмотрения. Обсуждается возможность применения развитого формализма для изучения роли вихрей в динамике фазового перехода, а также механизма роста вихревых зародышей под действием термических флуктуаций.

S.H. Abedinpour и В. Tanatar исследуют в своей работе особенности бездиссипативного увлечения в двухслойных ультрахолодных бозе-газах в зависимости от типа взаимодействия между частицами. Рассматриваются кулоновское, дипольное и контактное взаимодействия. В случае дипольного взаимодействия изучается система, в которой дипольные моменты частиц в соседних слоях антипараллельны. Найдена зависимость коэффициента увлечения от расстояния между слоями и показано, что эта зависимость степенная с показателем степени  $-7/2$ ,  $-5$  и  $-4$  для кулоновского, дипольного и контактного взаимодействий соответственно.

В работе В.М. Конторовича дается гидродинамическое и термодинамическое описание фазового перехода  $\text{He II}$  в  $\text{He I}$  при наличии относительного движения сверхтекучей и нормальной компонент. Показано, что во вращающемся гелии такой переход является переходом первого рода, аналогично сверхпроводящему фазовому переходу в магнитном поле.

Статья М.Д. Томченко посвящена рассмотрению колебаний плотности в нормальной и сверхтекучей бозе-жидкости, возбуждаемых переменным электрическим полем. В энергии взаимодействия атомов с полем учтены слагаемые, линейные по полю. Установлено, что в присутствии поля меняются фазовые скорости первого и второго звуков. Предсказано, что в системе могут возбуждаться гибридные (акусто-электрические) волны.

В работе Р.В. Вовка и К.Э. Немченко рассматривается нелинейный этап эволюции анизотропных пучков высокоэнергетических и низкоэнергетических фононов

в сверхтекучем гелии. Проводится анализ результатов наблюдений и теоретическое рассмотрение пространственной и временной эволюции пучков в случае, когда они ограничены в продольном и поперечном направлениях. Система уравнений для параметров пучка сведена к одному нелинейному уравнению, описывающему и продольную, и поперечную эволюцию пучка. Численное решение этого уравнения позволило объяснить характерные особенности движения и деформации пучков, а также определить их основные параметры и этапы эволюции.

Статья А.А. Звягина посвящена изучению незатухающих токов в двухцепочечном электронном кольце, которое описывается точно решаемой моделью с анизотропным спин-спиновым и спин-орбитальным взаимодействием. Показано, что рассматриваемая система в основном состоянии проявляет особенности, характерные для сверхпроводников второго рода. Незатухающий зарядовый ток в кольце возникает при отличном от нуля магнитном потоке через кольцо. Зависимость незатухающего тока от магнитного потока представляет собой интерференцию двух вкладов, связанных с куперовскими парами и несвязанными электронами с периодами  $\Phi_0/2$  и  $\Phi_0$  соответственно, где  $\Phi_0$  — квант потока для электронов. Спин-орбитальное взаимодействие влияет на фазу осцилляций с периодом  $\Phi_0$ . Осцилляции максимальны в основном состоянии, а при ненулевой температуре незатухающие токи становятся экспоненциально малыми с увеличением длины окружности кольца. В основном состоянии осцилляции имеют пилообразную форму, которая сменяется на синусоидальную при отличной от нуля температуре.

Z. Kořin изучает в своей работе коллективные моды в модели Кейна–Меле с локальным притяжением между фермионами в сверхтекучем состоянии. Модель описывает ферми-газ, помещенный в оптическую решетку с геометрией пчелиных сот. Рассмотрена сверхтекучесть фермионных пар. Дисперсия коллективных мод определяется из решения уравнения Бете–Солпитера (БС) в обобщенном приближении случайных фаз. Рассчитанная в рамках формализма БС скорость звука сравнивается с соответствующими результатами, полученными ранее в приближении  $T$ -матрицы, в котором учитываются только лестничные диаграммы, но пренебрегается пузырьковыми. Показано, что приближение  $T$ -матрицы дает заниженную примерно на 4% скорость звука.

В работе В.В. Михайловского и В.И. Сугакова исследуется возбуждение экситонов в двойной квантовой яме. Рассматривается случай, когда образуется конденсированная фаза экситонов. Показано, что конечность времени жизни экситонов приводит к возникновению периодической структуры, которая перемещается в пространстве под действием внешней тянущей силы. Про-

демонстрировано, что, изменяя интенсивность возбуждения в одной части двойной квантовой ямы, можно управлять периодом решетки движущихся пакетов конденсированных экситонов в другой части ямы.

Работа S. Cortés-López и F. Péres-Rodríguez посвящена теоретическому изучению джозефсоновских плазменных волн (ДПВ) в пластине слоистого сверхпроводника с учетом нарушения электронейтральности сверхпроводящих слоев. Показано, что нарушение электронейтральности приводит к эффектам сильной пространственной дисперсии ДПВ и оказывает существенное влияние на их спектр в окрестности частоты плазменного резонанса (джозефсоновской плазменной частоты). Найден нелокальный оптический отклик слоистой высокотемпературной сверхпроводниковой пластины, встроенной в диэлектрическую среду. С использованием тензора усредненной диэлектрической проницаемости, зависящей от частоты и волнового вектора электромагнитной волны, рассчитаны оптические спектры для  $p$ -поляризации. Показано, что в спектрах наблюдаются заметные провалы, отвечающие подавлению полного внутреннего отражения.

В работе международного коллектива авторов (А.Л. Соловьев, Е.В. Петренко, Л.В. Омельченко, Е. Nazarova, K. Buchkov, K. Rogacki) экспериментально исследована температурная зависимость избыточной проводимости поликристаллических образцов сверхпроводника  $\text{FeSe}_{0.94}$ . Найдена функция  $\Delta^*(T)$ , через которую выражается избыточная проводимость и которую можно ассоциировать с псевдощелью. Установлено, что при высоких температурах функция  $\Delta^*(T)$  демонстрирует высокий узкий максимум, типичный для магнитных сверхпроводников. В образце, приготовленном методом твердотельной реакции и не содержащем примеси, в интервале температур от структурного (85 К) до сверхпроводящего перехода наблюдается нетипичный широкий максимум  $\Delta^*(T)$ . Это позволяет говорить об открытии псевдощели в этом образце ниже 85 К. Для образцов, приготовленных методом частичного плавления, одного с примесью 4 мас.% Ag и другого с номинальным составом, но с включениями несверхпроводящей фазы, полученная зависимость  $\Delta^*(T)$  содержит особенности при температурах, при которых коэффициент Холла меняет знак. Обсуждается возможность интерпретации полученных зависимостей в рамках модели локальных пар.

В работе Т.В. Сухаревой и В.А. Финкеля анализируются результаты измерений магнитосопротивления и вольт-амперных характеристик (ВАХ) гранулярных сверхпроводников  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . Полученные изотермы магнитосопротивления носят аномальный характер — при увеличении магнитного поля они демонстрируют резкий рост сопротивления. При понижении температуры такие аномалии на изотермах не наблюдаются. Температура, при которой происходит переход от ано-

мальной к нормальной зависимости, рассматривается как температура некоторого фазового перехода. На рассчитанных из ВАХ температурных зависимостях джоузефсоновского критического тока при определенной температуре наблюдается скачок, что также можно связать с фазовым переходом. Точки фазового перехода, полученные из измерений магнитосопротивления и ВАХ, представленные в  $H$ - $T$ -координатах, приблизительно укладываются на одну прямую, что рассматривается в качестве доказательства общей природы наблюдаемых аномалий. Авторы связывают эти особенности с переходом Березинского–Костерлица–Таулесса.

В работе Ю.И. Бойко, В.В. Богданова и Р.В. Вовка в рамках теории коллективизации валентных электронов сделаны оценки характерной величины давления, которое может привести к сверхпроводимости  $\text{LaH}_{10}$  при рекордно высокой температуре ( $T_c \approx 250$  К). Найдено, что коллективизация электронов в данных соединениях должна происходить при  $P = 150$  ГПа, что примерно соответствует давлению ( $P = 170$  ГПа), при котором достигнута рекордная критическая температура.

*Д.В. Филь, С.И. Шевченко*