Физика низких температур, 1995, т. 21, № 3, с. 347–351 УДК 538.945:532.132:536.48

30-е Совещание по физике низких температур (НТ-30)

(Россия, Дубна, 6–8 сентября 1994 г.)

Е. В. Безуглый, В. Г. Песчанский, М. А. Стржемечный

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47

Статья поступила в редакцию 28 октября 1994 г

Очередное 30-е Совещание по физике низких температур продолжило традицию проведения Всесоюзных криогенных совещаний, первые два из которых состоялись в г. Харькове еще в довоенные годы. На совещании НТ-30 в Дубне присутствовало около 250 человек. Благодаря финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в работе совещания смогли принять участие много молодых исследователей, а также представители Украины, Молдавии, Польши.

Отбор докладов не доставил больших хлопот оргкомитету Совещания. Почти все представленные доклады были включены в программу конференции. В одиннадцати пленарных докладах, носящих в основном обзорный характер, были изложены результаты исследований в наиболее актуальных направлениях физики низких температур. В программу конференции были включены 107 устных и 230 стендовых сообщений на секционных сессиях по сверхпроводимости, квантовым жидкостям и кристаллам, электронным явлениям при низких температурах, низкотемпературной физике твердого тела.

Выбор места проведения совещания не был случайным, поскольку в Международном научном центре ядерных исследований (ОИЯИ) и в Институте физико-технических проблем, находящихся в Дубне, широко используются разнообразные методы изучения физических свойств конденсированных сред при низких температурах. Физика высоких энергий и физика низких температур, как отметил, открывая совещание, председатель оргкомитета В. Л. Аксенов (ОИЯИ), занимаются исследованием веществ в экстремальных условиях, когда становятся существенными квантовые явления. Общность интересов этих, на первый взгляд, принципиально различных областей физики была продемонстрирована и тремя пленарными докладами: Ж. А. Козлов с соавт. «Нейтронные исследования спектра возбуждений в сверхтекучем ^{4}He», Б. С. Неганов, В. Н. Полушкин, В. Н. Трофимов «Применение сверхнизких температур в ядерной физике», В. Н. Дугинов, А. Н. Пономарев «Мюонные исследования глубины проникновения магнитного поля в слоистые ВТСП». О работе, выполненной в соавторстве с группой исследователей из Харьковского и Донецкого физико-технических институтов (Л. С. Лазаревой, Н. А. Черняком, А. А. Чупиковым, П. А. Куценко, Б. К. Прядкиным, В. З. Спусканюком, М. М. Коваленко) сообщил участник еще довоенных совещаний академик НАН Украины Б. Г. Лазарев в интересном докладе «Предельно высокие ферромагнитные свойства гидроэкструзированного диспрозия». Помимо важных научных результатов, он также изложил аспекты использования этого материала для создания сверхпроводящих соленоидов с высокими параметрами.

В пленарном докладе Ж. А. Козлова изложены результаты нейтронографических исследований сверхтекучего гелия, среди которых следует отметить изучение спектров стандартных и «фантомных» возбуждений, выполненное в ОИЯИ совместно с Харьковским физико-техническим институтом и Физико-энергетическим институтом в Обнинске. В эксперименте использовались потоки нейтронов с высокой энергией, полученные на реакторе ИБР-2. Кроме пика Ландау, обнаружен еще широкий пик в поглощении нейтронов, что свидетельствует о существовании в гелии, помимо фононов и ротонов, третьего типа элементарных возбуждений. Эксперименты обладали хорошим разрешением, вполне достаточным для статистического анализа. В возникшей дискуссии о возможности обнаружения еще одного нового типа квазичастиц в гелии при увеличении энергии нейтронов, используемых в эксперименте, докладчик отметил, что при этом возникнет лишь некоторая коррекция в интерпретации экспериментальных результатов, однако останутся только три типа элементарных возбуждений в ^{4}He.

Большой интерес вызвал обзорный доклад Б. С. Неганова, В. Н. Полушкина, В. Н. Трофимова (ОИЯИ). Докладчик (В. Н. Трофимов) сооб-

© Е. В. Безуглый, В. Г. Песчанский, М. А. Стржемечный, 1995

щил о разнообразных методах использования низких температур в ядерной физике. При низких температурах, получаемых методом растворения ^{4}He в ^{3}He, можно изучать свойства реликтированных радиоактивных ядер, сверхизлучение ядерных спинов, спин-спиновые взаимодействия с помощью создания поляризованных мишеней и др.

Сравнительно недавно начаты работы по использованию низких температур для детектирования ядерных частиц тепловыми методами. Большая часть энергии, теряемой частицей в веществе, переходит в тепло, и создание криодетекторов позволяет наблюдать редкие процессы с малой передачей энергии. При этом весьма важны основные характеристики криодетекторов — порог разрешимости и энергетическая разрешаемость. Созданные в ОИЯИ ионизационные и полупроводниковые криодетекторы с высокими характеристиками существенно расширили возможности изучения ядерных процессов и низкоэнергетических возбуждений в конденсированных средах.

В пленарном докладе В. Н. Дугинова и А. Н. Пономарева (ОИЯИ) были изложены результаты исследования проникновения магнитного поля в высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП) на основе висмута методом мюонной спектроскопии (μSR). Этот метод, обладая высокой разрешающей способностью, становится в последние годы весьма привлекательным. Пучок поляризованных мюонов из ускорителя, проникая в вещество, через некоторое время распадается, а позитроны регистрируются датчиком. За время $10^{-10}-10^{-5}$ с можно проследить спиновую динамику мюонов в магнитном поле, параллельном спину поляризованных мюонов. Глубина проникновения в сверхпроводник мюонов $\lambda(T)$ предоставляет информацию о свойствах энергетической щели и механизме спаривания носителей заряда. Уемура в 1990 году, анализируя эксперименты с ВТСП на основе иттрия, предложил универсальное соотношение между температурой перехода в сверхпроводящее состояние T_c и величиной $\lambda^{-2}(0)$, пропорциональной скорости релаксации спина. Однако эксперименты по измерению $\lambda(T)$ методом μSR в сверхпроводнике $Bi_{2-x}Pb_xSr_2Ca_{1-z}Y_zCu_2O_{8+\delta}$, проведенные на спектрометре «МЮСПИН» ЛЯП ОИЯИ, не подтвердили предположение Уемуры. Результаты эксперимента не укладываются на универсальную кривую при допировании свинцом. Концентрация носителей заряда при этом изменяется почти в два раза, а T_c остается той же самой. Однако для соединений, допированных иттрием (в эксперименте варьировались x и z), глубина проникновения λ коррелирует с концентрацией дырок.

Наибольшее количество докладов на НТ-30 было представлено в секции «Сверхпроводимость» (130 докладов). Значительная часть этих сообщений имела технологический или методический характер (более 30 докладов) либо была посвящена исследованию влияния различных внешних факторов (радиационных повреждений, легирования и т.п.) на сверхпроводящие свойства ВТСП. Проведение конференции в центре ядерных исследований СНГ — Дубне — обусловило большое число работ, в которых изучение ВТСП проводилось с помощью методов ядерной физики — мюонного облучения, нейтронной спектроскопии упругих и магнитных возбуждений в ВТСП, γ- и позитронного облучения.

На конференции широко обсуждались также различные аспекты «сильноточных» свойств ВТСП: формирование вихревой решетки, пиннинг и крип магнитного потока, токовые неустойчивости и шумы в ВТСП.

Несмотря на то что с момента открытия ВТСП прошло уже почти восемь лет, общепринятая точка зрения на ее природу и механизмы до настоящего времени отсутствует. Оживленную дискуссию, продолжавшуюся на протяжении всей конференции, вызвал пленарный доклад Е. Г. Максимова (ФИРАН), в котором утверждалось, что металлическая фаза ВТСП представляет собой «почти обычный» металл с сильным электрон-фононным взаимодействием и высокой дебаевской частотой $\omega_D \sim 600$ K, которые обусловлены легкостью ионов кислорода и жесткостью межатомных связей, приближающихся по своим свойствам к ионно-ковалентным. Зонные расчеты электронной структуры ВТСП показывают, что роль допирования сводится к обеспечению перехода из диэлектрической фазы в металлическую с собственной проводимостью и хорошо определенной поверхностью Ферми, почти не зависящей от степени допирования. Эти расчеты подтверждаются фотоэмиссионными измерениями закона дисперсии носителей как в лантановых, так и в содержащих иттрий ВТСП. Результаты расчета оптических свойств ВТСП согласуются с экспериментом не хуже, чем в стандартных переходных металлах, и показывают, что в области характерных зонных энергий отсутствуют аномально сильные электронные корреляции. Наконец, линейный по температуре ход сопротивления, по утверждению докладчика, характерен для большинства металлов при $T > \omega_D/4$ и не является специфичным для ВТСП.

В то же время в пленарном докладе Л. А. Фальковский (ИТФ РАН) утверждал, что, хотя стандартная теория неупругого рассеяния света с учетом реального фононного спектра ВТСП в целом объясняет наблюдаемые оптические спектры, их поведение при малых частотах может указывать на возможное наличие нулей параметра порядка на поверхности Ферми, т.е. на нестандартный тип спаривания, обсуждавшийся также в докладе

Д. Н. Аристова с соавт. (ПИЯФ РАН). Теоретические представления о сильно коррелированной электронной структуре ВТСП были изложены в докладах Г. В Уймина (ИТФ РАН), Е. В. Холопова (ИНХ СО РАН), В. А. Борисюка (НИФТИ КГУ) и др.

Аномальное поведение эффекта Холла в сверхпроводниках II рода, проявляющееся в изменении знака эффекта при переходе в сверхпроводящее состояние, обсуждалось в пленарном докладе Н. Б. Копнина (ИТФ РАН). На основании обзора экспериментальных данных сделан вывод о том, что наличие аномалий зависит от состава образца, способа его приготовления и уровня легирования. Величина эффекта Холла в сверхпроводниках обычно невелика, типичное значение угла Холла порядка 10^{-3}–10^{-2}, и лишь в некоторых образцах с достаточно большой длиной свободного пробега носителей заряда он может достигать величины порядка единицы. В докладе предложена теория, описывающая это явление. Рассмотрены две области температур — вблизи критической температуры и область весьма низких температур. Вблизи T_c использованы модифицированные временные уравнения Гинзбурга—Ландау с комплексным временем релаксации, мнимая часть которого связана с кривизной поверхности Ферми. При низких температурах решено кинетическое уравнение с учетом спектра связанных состояний в остовах вихрей. Показано, что знак эффекта Холла в сверхпроводниках, как и в металлах в нормальном состоянии, зависит от формы поверхности Ферми, а изменения температурной зависимости постоянной Холла при различных степенях допирования объясняются анизотропией электронного энергетического спектра.

Проблемы тяжелофермионной сверхпроводимости в UPt_3 обсуждались в пленарном докладе В. П. Минеева (ИТФ РАН), основной из которых является выбор модели для описания многофазного сверхпроводящего состояния и расщепления сверхпроводящего перехода, напоминающего поведение ^{3}He. Были представлены результаты теоретического вычисления анизотропии верхнего критического поля в базисной плоскости, изменяющей знак при температурах ниже тетракритической в фазовой плоскости магнитное поле — температура. Сверхпроводящее состояние UPt_3 наиболее адекватно описывается в терминах смеси двух состояний, относящихся к различным одномерным представлениям гексагональной группы. Сделан обзор экспериментов, в которых определена фазовая диаграмма сверхпроводящих фаз , и подчеркнуты остающиеся пока трудности в интерпретации экспериментальных данных.

Результаты изучения экзотического поведения аморфных систем M_xSb_y (M = Cd, Ga, Zn) при сверхпроводящем переходе (изменение температурного хода проводимости при $T < T_c$ от сверхпроводящего к полупроводниковому при различной степени аморфизации) были изложены в пленарном докладе В. Ф. Гантмахера (ИФТТ РАН) и объяснялись переходом от джозефсоновской к туннельной связи между отдельными гранулами вещества. С новой точки зрения проблема гранулированных сверхпроводников обсуждалась в вызвавшем большой интерес докладе С. Л. Гинзбурга (ПИЯФ РАН). Он указал на возможность самоорганизованного поведения джозефсоновской среды, для которого характерны крупномасштабные флуктуации полей и токов, приводящие к турбулентности течения магнитного потока. Новые данные о динамике центров проскальзывания фазы и связанных с ними коллективных эффектов (плазменных колебаний, интерференции взаимодействующих центров) были приведены в докладах А. Г. Агафонова с соавт. (ФТИНТ НАНУ) и К. Ю. Арутюнова с соавт. (МГУ, ИПФ АНМ). Весьма ограниченым на секции «Сверхпроводимость» оказалось число докладов, содержание которых выходило за рамки тематики ВТСП даже в таких актуальных областях, как сверхпроводимость органических металлов и фуллеренов, точечные, туннельные и *SNS*-контакты, наноэлектроника и мезоскопика, неравновесные кинетические явления. По-видимому, это можно объяснить проведением специализированных конференций по этим вопросам одновременно с НТ-30.

В секции «Квантовые жидкости и кристаллы» достаточно полно была представлена тематика, традиционная для этой области физики низких температур. Большая часть сообщений была посвящена сверхтекучему ^{4}He и его слабым растворам с примесью ^{3}He.

В пленарном докладе И. А. Фомина (ИФП РАН) «Прецессирующие домены в сверхтекучей и нормальной ферми-жидкости» был сделан обзор работ по исследованию прецессирующих пространственно неоднородных структур в сверхтекучем ^{3}He и в растворах ^{3}He в ^{4}He. Такие структуры ранее не наблюдались и физической причиной их возникновения является необычный характер переноса спина в указанных веществах. Первой была обнаружена и изучена двухдоменная структура в сверхтекучей β-фазе гелия-3 (^{3}He-*B*). Основные эксперименты были проведены в ИФП им. П. Л. Капицы РАН А. С. Боровиком-Романовым, Ю. М. Буньковым, В. В. Дмитриевым и Ю. М. Мухарским, теоретическая часть работы была выполнены И. Ф. Фоминым. В ^{3}He-*B* наряду со спиновой диффузией возможен недиссипативный перенос спина конденсатом куперовских пар, или «сверхтекучий спиновый ток». По этой причине намагниченный ^{3}He-*B* аномально сильно реагирует на неоднородность магнитного поля, подобно тому как

сверхтекучий ^{4}He реагирует на разность температур. В условиях импульсного ЯМР даже слабая неоднородность магнитного поля приводит к возрастанию со временем разности фаз прецессии в разных точках экспериментального объема. Эта разность возбуждает спиновый ток так же, как разность фаз параметра порядка возбуждает массовый сверхтекучий ток в ^{4}He или электрический сверхтекучий ток в сверхпроводнике. Спиновый ток перераспределяет намагниченность по объему ячейки. В результате возникает стационарная прецессирующая структура. В случае постоянного градиента напряженности поля она состоит из двух доменов — в одном из них, расположенном в области относительно более сильных полей, намагниченность имеет равновесную величину и ориентацию, в другом домене намагниченность также имеет равновесную величину, но отклонена от направления поля на угол $\approx 104°$ и прецессирует с одной и той же частотой и фазой. Синфазность прецессии поддерживается сверхтекучим спиновым током.

Во многом похожая структура была обнаружена недавно в растворах ^{3}He в ^{4}He при температуре около 1 мК. Растворенный ^{3}He образует в таких условиях нормальную ферми-жидкость. В магнитном поле в несколько сотен эрстед частота прецессии спина превышает частоту столкновений квазичастиц, при этом вследствие фермижидкостного взаимодействия спиновый ток приобретает недиссипативную компоненту (эффект Леггетта и Райса). Эта компонента тока, как и сверхтекучий ток в ^{3}He-B, может обратимым образом перераспределять прецессирующую намагниченность в условиях импульсных ЯМР-экспериментов. Такое перераспределение приводит к образованию прецессирующей структуры, также состоящей из двух доменов, с той разницей, что в неравновесном домене намагниченность отклонена на угол 180° и не обязана иметь равновесную величину. В докладе были изложены результаты последних экспериментов В. В. Дмитриева, В. В Мороза, А. С. Высоцкого и С. Р. Заказова (ИФП РАН) по исследованию двухдоменной структуры в растворах и представлены численные модели этих экспериментов,а также дана теоретическая интерпретация некоторых результатов. Было проведено сравнение прецессирующих структур в ^{3}He-B и в растворах и указаны другие объекты, в которых могут существовать когерентно прецессирующие структуры.

Довольно большое число сообщений касалось различных фазовых превращений в конденсированных фазах ^{4}He и его растворах с ^{3}He, исследования вакансионных возбуждений в твердых ^{3}He и ^{4}He с помощью метода диффузионного течения сквозь пористую перегородку. Оптические методы исследования конденсированных фаз гелия обсуждались в докладе А. Я. Паршина (ИФП РАН). Особенности кристаллизационного процесса в ^{4}He рассмотрены в двух докладах В. Л. Цымбаленко (РНЦ «Курчатовский институт»). И. Л. Солодовников и Н. В. Заварицкий (ИФП РАН) исследовали взаимодействие спинов атомов жидкого ^{3}He с протонами в стенках контейнера. Два сообщения были посвящены вопросам, относящимся к физике вращающегося твердого гелия (А. Я. Паршин, ИФП РАН) и жидкого гелия (Т. И Зуева, ФТИНТ НАНУ).

Большой интерес вызвали сообщения о результатах, полученных на новых квантовых конденсированных системах. А. И Сафонов, С. А. Васильев, И. И. Лукашевич (РНЦ «Курчатовский институт») и S. M. Jaakola, P. H. Azveka, E. J. Tjukanov (Университет Турку, Финляндия) использовали калориметрический метод для установления факта существования двумерной системы спин- поляризованных атомов водорода, которая весьма перспективна для обнаружения перехода типа Березинского-Костерлица-Таулесса. Сводный доклад Е. Б. Гордона (ФИЭПФХ, Черноголовка) содержал последние результаты по элементному составу, объемам и другим свойствам недавно открытой конденсированной фазы, состоящей из ван-дер-ваальсовских комплексов HeA (A = N, Ne, Ar...). Аргументы в пользу существования таких комплексов в неравновесных разбавленных растворах Ne в твердом параводороде сообщены в докладе А. С. Барыльника и др. (ФТИНТ НАНУ).

А. А. Левченко и Л. П. Межов-Деглин (ИФТТ РАН) исследовали прохождение заряженных частиц, образующихся в жидкости под действием ионизирующего излучения, через границу жидкость–пар в водороде. Измерения проведены при давлении 1 атм в области 14–20 К. Обнаружено, что в электрических полях $E \leq 10^3$ В/см положительные заряды почти не проникают из жидкости в пар. Ток отрицательных зарядов через поверхность уменьшается с понижением температуры и ниже 17 К может быть описан экспоненциальным законом. Результаты измерения полевых зависимостей тока отрицательных зарядов через поверхность подтвердили существование двух типов отрицательных зарядов в жидком H_2 — электронных пузырьков и заряженных кластеров. Отрицательные кластеры подобно положительным скапливаются под поверхностью жидкости. В полях $E > 10^3$ В/см появляются квазипериодические осцилляции тока, что связано с отрывом от поверхности заряженных капелек, содержащих 10^6–10^7 элементарных зарядов. В переменных полях на поверхности заряженной жидкости возникают цилиндрические волны. Обнаружено возникновение стоячих волн в цилиндрической ячейке и сдвиг резонансных частот с изменением величины тяну-

щего статического поля, направленного перпендикулярно поверхности.

Пленарные доклады М. Е. Гершензона (ИРЭ РАН) «Нелокальные эффекты в проводимости проводников с боковыми отростками и перколяционных сетей» и В. Т. Долгополова (ИФТТ РАН) «Переход металл — диэлектрик в двумерном электронном газе» посвящены актуальной проблеме фазовых переходов в системе носителей заряда. М. Е. Гершензон сообщил об экспериментальном исследовании зависимости от температуры и магнитного поля электросопротивления пленок золота шириной 65 нм и длиной 340 мкм с периодически расположенными через расстояние L боковыми ответвлениями длиной 4 мкм. Эксперименты были проведены в Москве (ИРЭ РАН), Гетеборге (Чалмерский технологический университет) и Лос-Анджелесе (Университет Южной Калифорнии) в интервале температур 0,1–5 К и магнитных полей до 600 Э. Варьируя L, удалось определить характерную длину сбоя фазы L_φ = 1,7 мкм. В интервале L = 0,2–3,6 мкм обнаружено уменьшение магнитосопротивления при $L < L_\varphi$ (в 10 раз при L = 0,2 мкм). Анализ температурной и полевой зависимостей сопротивления исследованных пленок золота позволил изучить существенно нелокальные в таких системах эффекты слабой локализации и электрон-электронного взаимодействия.

В. Т. Долгополов (ИФТТ РАН) от имени большой группы авторов (А. А. Шашкин, Г. В. Кравченко, M. Weadel, R. Schuster, J. P. Kotthaus, R. J. Hang, K. von Klitzing, K. Ploog, H. Nickel, and W. Schlapp) сообщил об исследовании явлений переноса в двумерной электронной системе гетероструктур AlGaAs/GaAs и в Si-MOSFET при весьма низких температурах в условиях квантового эффекта Холла. Основное внимание было уделено поведению этих структур вблизи перехода металл — диэлектрик, когда в диэлектрической фазе появляется некоторая доля делокализованных электронов. Характерные длины определялись с помощью измерения энергии активации и критического электрического поля, при котором уже проявляется нелинейность вольт-амперной характеристики. Получен критический индекс локализационной длины S = 1, который близок к величине S = 1,3 в случае классической перколяции. Вопреки предсказанию скейлинговой теории, из экспериментальных результатов следует существование порога подвижности в двумерной электронной системе в отсутствие магнитного поля.

На секционных заседаниях были обсуждены наиболее актуальные проблемы электронных явлений при низких температурах. Большое внимание было уделено исследованиям акусто-электронных явлений и электронно-звуковых волн в нормальных металлах, проведенным в Харькове (Е. В. Безуглый, Н. Г. Бурма, В. Д. Филь, О. В. Кириченко, В. Г. Песчанский — ФТИНТ НАНУ) и Екатеринбурге (А. Б. Ринкевич, В. В. Устинов — ИФМ РАН). Интерес вызвали теоретические доклады И. М. Суслова (ИФП РАН) «Плотность состояний вблизи перехода Андерсона в четырехмерном пространстве» и Р. О. Зайцева (РНЦ «Курчатовский институт») «Особенности $1/f$-шумов в металлах». Е. А. Кравцов, В. И. Окулов и В. В. Устинов (ИФМ РАН) предложили квазиклассическую кинетическую теорию, объясняющую гигантское магнитосопротивление в металлических магнитных сверхрешетках. В. А. Кульбачинский (МГУ) сообщил о наблюдаемых особенностях низкотемпературного транспорта в системе множественных квантовых ям GaAs/GaAlAs с δ-легированием.

Исследованию электронных свойств низкоразмерных структур было посвящено большое количество докладов: это и эффект Шубникова—де Гааза в инверсионных слоях, и определение критического импульса длины локализации носителей заряда в условиях квантового эффекта Холла, и роль межэлектронного взаимодействия в кинетике, и нелинейные волны в условиях эффекта Шенберга.

На секции «Низкотемпературная физика твердого тела», как и на предыдущих криогенных совещаниях, в основном обсуждались проблемы низкотемпературного магнетизма. Должное внимание было уделено изучению фазовых переходов в фуллерене (В. Б. Ефимов, Л. П. Межов-Деглин — ИФТТ РАН; В. П. Шпаков и Белослудовы — ИНХ РАН, Новосибирск; Т. Галбатар — ОИЯИ, В. С. Шахматов — ФЭИ, Обнинск; Ш. Л. Дрексолер — ИФТТ, Дрезден).

Совещание НТ-30 было завершено открытым заседанием академического Совета по физике низких температур, на котором были заслушаны отчеты председателей секций, подведены итоги совещания и намечен план мероприятий на следующие два года. 31-е Совещание по физике низких температур запланировано провести в 1996 году в Нижнем Новгороде.