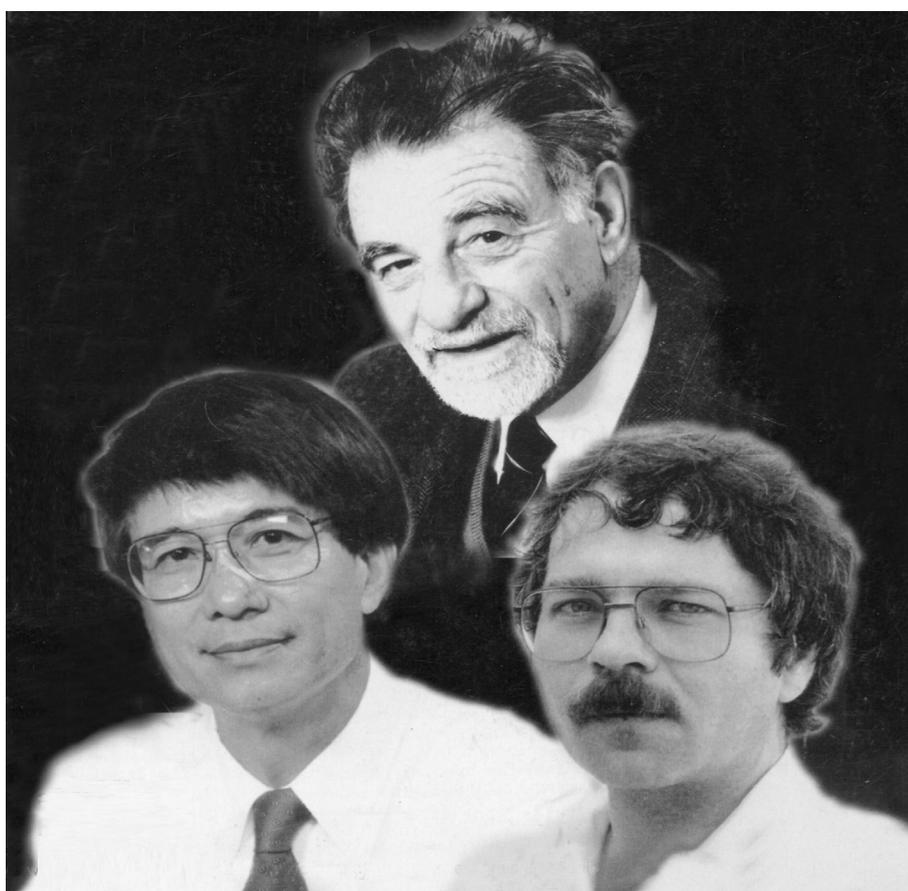


## К 30-летию открытия высокотемпературной сверхпроводимости



Профессор Пол Чу и лауреаты Нобелевской премии Карл Александр Мюллер и Йоханнес Георг Беднорц, открывшие высокотемпературную сверхпроводимость

30 лет назад швейцарские физики Мюллер и Беднорц сообщили о наблюдении сверхпроводимости в соединении  $\text{La-Ba-Cu-O}$  с рекордной на тот момент критической температурой (температурой сверхпроводящего перехода)  $T_c \sim 36$  К. Работа означала настоящий прорыв в физике сверхпроводимости и стимулировала невероятную активность исследователей по всему миру. Начался бум в сверхпроводящей науке, в

котором посчастливилось участвовать многим из читающих эту заметку.

Стало очевидно, что сверхпроводимость возникает в сложных соединениях с активной плоскостью  $\text{CuO}_2$ , получивших название высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), или купратов. Начался интенсивный поиск соединений с еще более высокими  $T_c$ , и примерно через три месяца Чу сообщил о наблюдении сверх-

проводимости в соединении  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (Y123) с  $T_c \sim 91$  К при оптимальном допировании. Вскоре последовало открытие сверхпроводимости в соединениях  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2223) и Tl2223 с  $T_c \sim 115$  К. А затем была обнаружена сверхпроводимость в  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  (Hg1223) с  $T_c \sim 135$  К, которая под давлением возрастала до 156 К (а это уже практически половина от комнатной температуры).

Постепенно стало понятно, что помимо высокой  $T_c$  ВТСП обладают рядом других необычных свойств. Это малая плотность носителей заряда  $n_f$ , которая даже в оптимально допированных образцах на порядок меньше, чем в классических сверхпроводниках, сильные электронные корреляции, квазидвумерность, обусловленная проводимостью по плоскостям  $\text{CuO}_2$ , и, как следствие, сильная анизотропия электронных свойств. Одним из наиболее интригующих свойств купратов является псевдощелевое состояние, или псевдощель (ПЩ), которое возникает при температурах ниже некоторой характеристической температуры  $T^* \gg T_c$  и характеризуется пониженной (но не до нуля) плотностью электронных состояний на уровне Ферми. Считается, что правильное понимание природы ПЩ позволит получить ответ на вопрос о механизме сверхпроводящего спаривания в ВТСП, который по-прежнему остается дискуссионным. А это важно для поиска новых сверхпроводников с еще более высокими  $T_c$ .

Однако мнения по поводу природы ПЩ разделились. Одни ученые считают, что ПЩ в купратах обусловлена сверхпроводящими флуктуациями, которые приводят к образованию локальных пар (ЛП) при  $T_c \leq T \leq T^*$ , и, таким образом, является предвестником перехода ВТСП в сверхпроводящее (СП) состояние. Другие считают, что ПЩ обусловлена магнитным взаимодействием. Мы разделяем первую точку зрения, но считаем, что связь, приводящую к формированию ЛП, наиболее вероятно, обеспечивает взаимодействие, имеющее магнитную природу. Следует подчеркнуть, что число теорем для описания ПЩ исключительно велико, что указывает на то, что общепринятая точка зрения по этому вопросу по-прежнему отсутствует.

Невыясненной остается и роль электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ) в механизме СП спаривания. Этому вопросу посвящена работа Э. Зубова (*ФНТ*, №11 (2016)), в которой показано, что специфика ЭФВ в ВТСП обуславливает сильное корреляционное сужение электронной зоны  $W$ . Это приводит к тому, что химический потенциал  $\mu \sim W \gg J$ , где  $J$  — константа обменного взаимодействия электронов. Выполнение такого условия может являться определяющим для формирования синглетных электронных пар в купратах, связанных сильным эффективным кинематическим полем.

Спектр работ, приведенных в юбилейном выпуске, весьма широк. Фактически работы содержат результаты многих научных групп, давно занимающихся раз-

личными проблемами ВТСП, и отражают современное состояние дел по той или иной конкретной проблеме. В работе Хабермайера приведен обзор развития метода лазерного напыления и анализа структуры высококачественных тонких пленок различных ВТСП материалов, начиная с момента открытия купратов. Влияние волн зарядовой плотности на СП параметр порядка и, как следствие, на квазичастичный туннельный ток рассмотрено в работе Габовича и Войтенко. Близкая проблема, но с учетом возможного магнон-фононного взаимодействия изложена в работе Стружкина и Чена, которая также содержит значительное количество экспериментальных результатов. Магнитный эффект близости и возможные сверхпроводящие триплетные корреляции на границе купратного сверхпроводника и оксидного спинового клапана рассматриваются в работе Овсянникова с соавторами. В мезо-структурах, на основе купратного сверхпроводника, содержащего слои с прослойкой из спинового клапана LSMO/SRO, обнаружен ряд новых необычных эффектов. В работе Доманского с соавторами теоретически, а в работе Алиева с соавторами экспериментально, исследовано влияние флуктуаций на образование локальных пар и формирование ПЩ в ВТСП. Влияние диффузии ионов кислорода на транспортные свойства соединений  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  в тетрагональной фазе изучено в работе Бойко с соавторами. В работе Савченко рассматривается эффект обменного усиления эффективного ЭФВ в ВТСП. Предполагается, что эффект возможен при реализации спин-фононного взаимодействия в ВТСП фазе. Обширный обзор экспериментальных результатов по изучению андреевских спектров, получаемых с помощью техники «break-junction» в контактах из ВТСП, приведен в обзоре Кузьмичевых (*ФНТ*, №11 (2016)). Соответственно аналитическое рассмотрение особенностей туннельных контактов ВТСП — нормальный металл приведено в работе Белоговловского с соавторами. В этом же номере в работе Джуманова с коллегами предлагается и анализируется поляронная модель для возможного объяснения возникновения ПЩ в купратах. Работы Некрасова с соавторами и Пустовит–Кордюк посвящены относительно недавно открытым железосодержащим сверхпроводникам. В обеих работах рассматриваются различные модификации электронной структуры сверхпроводящего соединения FeSe, которое интенсивно исследуется в последнее время.

В выпуске имеется несколько работ, посвященных нетривиальным эффектам в классических сверхпроводниках. Так, в работе Кушнир и Куприянова дана теоретическая трактовка результатов экспериментов по исследованию спин-вентильного эффекта в эпитаксиальных структурах Nb/Но и установлена причина их квазиметаллического поведения. Безуглый и Шкловский теоретически исследовали воздействие высокочастотного (ВЧ) тока большой амплитуды и произвольной

формы на неизотермическое равновесие колеблющейся межфазной границы в длинном сверхпроводнике. Применительно к экспериментам по воздействию СВЧ излучения большой мощности на вольт-амперные характеристики (ВАХ) СП пленок в работе проведена классификация и построены семейства ВАХ для неоднородных сверхпроводников, по которым пропускается ВЧ ток большой амплитуды. Рохманова с коллегами исследовали трансформацию поляризации электромагнитных волн при отражении от слоистых сверхпроводников (как классических, так и ВТСП) во внешнем постоянном магнитном поле. Показано, что внешнее магнитное поле может служить удобным инструментом для управления трансформацией поляризации волн. Кумзеров и Набережнов изучали нанопроволоки легкоплавких сверхпроводников (Hg, Pb, Sn, In, Ga), получаемые внедрением расплавленных металлов под давлением в пористые матрицы двух типов: каналы структуры на основе хризотилых асбестов и пористые щелочно-боросиликатные стекла. Изучено влияние ограниченной геометрии на сверхпроводящие свойства таких структур.

Появление работ, посвященных классическим сверхпроводникам, в нашем выпуске не случайно, поскольку он также посвящен памяти Виталия Михайловича Дмитриева.



11 октября 2016 года исполняется 80 лет со дня рождения замечательного физика, доктора физико-математических наук, профессора Виталия Михайловича Дмитриева (1936–2009).

Виталий Михайлович — коренной харьковчанин. В 1958 г. он окончил Харьковский государственный университет. А начиная с 1962 г. его жизнь и научная деятельность были полностью связаны с Физико-техническим институтом низких температур. Являясь одним из соратников основателя Института академика Б.И. Веркина, он внес заметный вклад в становление и развитие ФТИНТа. 41 год В.М. Дмитриев бесценно возглавлял отдел сверхпроводимости, с 1988 по 1998 гг. одновременно являлся заместителем директора Института по науке. Он — доктор физико-математических наук с 1979 г., профессор с 1982 г. Большое внимание В.М. Дмитриев уделял воспитанию молодежи, читая курсы физики сверхпроводимости в ХГУ, где по совместительству являлся профессором кафедры экспериментальной физики с 1980 по 1988 гг. Он соавтор более 300 научных работ и 20 изобретений. В 1998 г. ему присвоено звание Заслуженный деятель науки и техники Украины. В.М. Дмитриев — лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники (2000 г.), награжден медалью «За доблестный труд».

Виталий Михайлович поддерживал активное сотрудничество с ведущими учеными Англии, США, Франции, Германии, Польши, России. Более 10 лет В.М. Дмитриев являлся представителем Украины в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (Вроцлав, Польша). Его сотрудничество с польскими коллегами способствовало заметному развитию Лаборатории.

Совместно с английскими учеными В.М. Дмитриеву принадлежит честь открытия явления стимуляции сверхпроводимости электромагнитным излучением. Это явление, которое всесторонне изучалось В.М. Дмитриевым с сотрудниками в различных типах слабосвязанных сверхпроводников, в дальнейшем получило объяснение в работах Г.М. Элиашберга и способствовало развитию теории неравновесной сверхпроводимости. Спектр научных интересов Виталия Михайловича был необычайно широк. Им развиты основы теории нерегулярных волноводов и резонаторов. Под руководством и при непосредственном участии В.М. Дмитриева проводились исследования сверхпроводящих болометров и разрабатывались физические основы сверхпроводящей электроники. Впервые было обнаружено образование высокочастотных центров проскальзывания фазы в узких сверхпроводящих каналах, открыта и исследована неджозефсоновская генерация в центрах проскальзывания фазы. После открытия высокотемпературных сверхпроводников В.М. Дмитриев с коллегами занялся изучением такого необычного явления, как псевдощель, понимание которого должно способствовать выяснению механизма сверхпроводящего спаривания в ВТСП. Когда стало понятно, что взаимодействие сверхпроводимости и магнетизма играет определяющую роль в этом процессе, В.М. Дмитриев большое внимание уделил

поиску и изучению новых сложных магнитных сверхпроводников.

До конца дней В.М. Дмитриев поражал своей неисчерпаемой энергией. Он был человеком пытливого мысли, высокой ответственности, исключительной требовательности к уровню научных исследований. В его работах сочетались как талант экспериментатора, так и широта обобщения и оригинальность научного подхода. Научная интуиция и способность видеть проблему в целом несомненно способствовали успеху его науч-

ной деятельности. Он был ученым, глубоко понимавшим и любившим науку.

Активное участие В.М. Дмитриев принимал и в работе журнала «Физика низких температур». В течение многих лет он был членом редколлегии журнала.

Мы выражаем признательность всем авторам, призвавшим статьи в этот спецвыпуск.

*А.Л. Соловьев*

*Р.В. Вовк*