**Новый безмедный сверхпроводник K-Bi-O**Хорошо известно семейство сверхпроводящих соединений BaBi(Pb)O3. Все эти сверхпроводники являются "четверными": Ba-Pb-Bi-O или Ba-K-Bi-O. В Японии (ISTEC, Токио) путем синтеза при высоком давлении впервые получили *тройной* сверхпроводник K1-xBi1+xO3 [N.R.Khasanova *et al*., Physica C 305 (1998) 275]. Величина *Tc* составляет около 10К при 0? *x?* 0.1 и почти не зависит от *x* в этом диапазоне, а увеличение *x*>0.1 ведет к потере сверхпроводимости. По данным рентгеновской и электронной дифракции кристаллическая структура представляет собой кубический перовскит.

**Ревизия симметрии параметра порядка в "электронных" ВТСП**Большинство (хотя и не все) экспериментальных данных говорит о том, что в ВТСП с дырочным типом проводимости параметр сверхпроводящего порядка D имеет *d*-волновую симметрию. Таких ВТСП подавляющее большинство (YBa2Cu3O7,
La2-xSrxCuO4, Bi2Sr2CaCu2O8 и т.д.). Что касается немногочисленных известных на сегодня ВТСП с электронным типом проводимости, наиболее изученным из которых является Nd2-xCexCuO4, то долгое время считалось, что в них D имеет *s*-волновую симметрию.

Группа японских физиков из Nagoya University, Tohoku University и Japan Science and Technology Corporation выполнила исследования квазичастичных спектров возбуждений в монокристаллах
Nd2-xCexCuO4 методом STM/STS [1]. Полученные результаты показали, что D не только анизотропен в импульсном пространстве, но и имеет
*d*-волновую симметрию. Авторы [1] обсуждают, тип этой симметрии – *dxy*-волна или *dx2-y2*-волна – и склоняются в пользу последней.

*[1] F.Hayashi et al., J. Phys. Soc. Jap., 1998,* ***67****, p.3234*

**Сверхпроводимость Tl1.8Ba2.0Ca2.6Cu3.0O10+d в морозную погоду при высоком давлении**Известно, что критическая температура *Tc* большинства ВТСП увеличивается под давлением, достигая рекордной величины *Tc”* 160К в HgBa2Ca2Cu3Ox при *P”* 30ГПа. Недавно появилось сообщение [1] об аномальном росте *Tc* поликристаллических образцов ВТСП Tl1.8Ba2.0Ca2.6Cu3.0O10+d при *P”* 5ГПа. Авторы [1] обнаружили, что *Tc*быстро увеличивается с ростом *P* от своего начального значения *Tc*=129К при *P*=0 и достигает величины *Tc*=255К (обычная для русской зимы температура!) при *P*=4.3ГПа. Вот только *Tc*, измеренная в [1], к сожалению, представляет собой не температуру нулевого сопротивления, а лишь температуру начала уменьшения (хотя и очень резкого) *R*(*T*) при охлаждении образца. Заметим, что статья [1] представляет собой своеобразный "интернациональный винегрет": она написана *китайскими* физиками на *английском* языке и опубликована в *украинском* журнале.

*[1] C.Y.Han et al., ФНТ, 1998,* ***24****, p.305*

**Завершена сборка магнитной системы RHIC (Brookhaven)**1800 сверхпроводящих магнитов установлены и частично испытаны в единой магнитной системе коллайдера тяжелых релятивистских ионов (RHIC). На их изготовление потребовались 21млн. метров сверхпроводящего проводника и 900 тысяч часов рабочего времени. Планируется, что первый испытательный “пуск” пучка ионов будет произведен в марте 1999 года, а в июле ожидаются эксперименты по первому столкновению пучков. Поставщиком первичного пучка ионов для RHIC станет старейший брукхэвенский синхротрон (AGS), построенный еще в 1960 году.

*CERN Courier, December 1998*

**Сверхпроводящий фильтр**Ученые International Superconductivity Technology Center (Tokyo) совместно с NEC Corp. (Tokyo) разработали ВТСП фильтр для использования в спутниковых системах связи и на базовых станциях сотовых телефонов. В процессе разработки преодолена проблема, стоявшая перед такими фильтрами. Прежние конструкции ВТСП фильтров не совместимы с высокими уровнями мощности, характерными для систем космической связи. ВТСП фильтр, анонсированный ф. NEC, выдерживает в 10 раз более высокие уровни мощности в сравнении с другими ВТСП фильтрами.

Контакт:
G. Pindoria, e-mail: mailto:govind@inJapan.net

**Гигантский изотоп-эффект в сверхпроводнике La2-xSrxCuO4**
Лантановая керамика уже принесла Alex’у Muller’у нобелевскую премию. И вот – новый подарок. Muller с соавторами обнаружил в сверхпроводнике La2-xSrxCuO4 гигантский изотоп-эффект.

Две группы экспериментаторов, возглавляемые A.Bianconi (Римский университет) и K.A.Muller’ом (Цюрихский университет) исследовали структуру спектральных линий в La1.94Sr0.06CuO4 вблизи края рентгеновского поглощения (методом XANES, чувствительным к локальным искажениям кислородного окружения атомов меди). Эксперименты проводились на источнике синхротронного излучения в Гренобле.

Вид спектра определяется статистическим распределением “мгновенных фотографий” кристаллической решетки (с характерным временем 10-15с) на масштабах порядка 5A. В эксперименте для образца La2-xSrxCuO4 ниже некоторой температуры Т\* форма спектральных линий резко изменялась, что авторы связывают с замораживанием флуктуаций и возникновением поляронного упорядочения типа полос (lattice-charge stripes). При замене 16O на 18O температура Т\* возрастает со 110К до 170К. При этом изотоп-эффект для температуры сверхпроводящего перехода Тс гораздо меньше и другого знака: для образца с 16O Тс”8К, а у образца с 18O Тс примерно на 1К ниже. Столь огромный изотопический сдвиг температуры Т\* авторы объясняют важной ролью поляронных эффектов в образовании полос. Такая интерпретация накладывает определенные ограничения на возможные микроскопические механизмы, ответственные за возникновение, как полосчатой структуры, так и сверхпроводящего состояния.
<http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9812425>, версия от 5.01.99

**Верхнее критическое поле борокарбида YNi2B2C**Измерения верхнего критического поля *Hc2* в сверхпроводниках осложняются наличием “паразитного” парамагнитного сигнала, обусловленного несовершенством образца (наличием областей нормальной фазы). Поэтому в ходе экспериментов по определению *Hc2*(T) в борокарбиде YNi2B2C группа американских и южнокорейских физиков уделила особое внимание качеству исследованных ими монокристаллов [M.-O.Mun *et al*., Physica C **303** (1998) 57]. Им удалось понизить парамагнитный сигнал до уровня 10% от минимального приводимого в литературе и получить таким образом более достоверные значения *Hc2*. Оказалось, что во всем изученном диапазоне температур 9K < *T* < *Tc* ” 15K (0 < *Hc2* < 3Тл) зависимость *Hc2*(*T*) имеет *положительную кривизну*. Иными словами, скорость роста *Hc2* при понижении температуры увеличивается, а признаки выхода *Hc2* на константу при *T* ® 0 отсутствуют. Интересно, что точно такой же вид кривая *Hc2*(*T*) имеет и в “overdoped” ВТСП. Это “совпадение” может быть следствием сходства механизмов сверхпроводимости борокарбидов и ВТСП.

**Легированная Си-О плоскость: еще одна попытка описать основное состояние**Проблема основного состояния слаболегированных 2D купратов до сих пор активно дискутируется при множестве разноречивых экспериментальных результатов и теоретических моделей. Картину усложняют два обстоятельства (к слову, они же обуславливают разнородность экспериментальных данных):

наличие дальнего и/или ближнего магнитного порядка и

существенно различная подвижность дырок при легировании исходной диэлектрической матрицы различными типами допантов.

Так, например, модельное соединение La2CuO4 можно легировать тремя принципиально разными способами: примесью замещения в позицию La (1) или Cu (2) а также примесью внедрения в виде сверхстехиометрического кислорода (3). В последнем случае из-за большой подвижности кислорода система демонстрирует макроскопическое фазовое расслоение на дырочно-богатую и дырочно-бедную фазы, размеры которых могут достигать масштаба нескольких микрон. При всем многообразии ВТСП систем, система La2CuO4+х – единственная, где явление фазового расслоения происходит на *макроскопических* масштабах. Именно это явление легло в основу представления о легированной Сu-О плоскости, как о нестабильной относительно фазового расслоения. При этом следует иметь в виду, что в случае “тяжелых” примесей (Sr вместо La и Li вместо Cu) система может расслаиваться только на микроуровне. В первом приближении размеры возникающих “фаз” определяются выигрышем в магнитной энергии и проигрышем в кинетической.

Какая форма зарядовых флуктуаций будет реализовываться на практике, опять же зависит от типа конкретной системы**.** Например, магнитная восприимчивость La(Sr)CuO4 системы трактовалась [1] как система антифазных доменов, где носители тока сконцентрированы на границах доменных стенок. Система La2CuO4+x с низкой подвижностью кислорода и, как следствие, с отсутствием макроскопического расслоения не укладывается в модель с дырочно-богатыми доменными стенками, а более адекватно описывается в модели дырочно-богатых капель с размерами, зависящими от подвижности кислорода [2]. Кроме этого, значительный блок работ (в основном по упругому рассеянию нейтронов) теперь уже на кристаллах с большой подвижностью избыточного кислорода посвящен обнаружению и исследованию кислородной сверхструктуры и структурам, связанным с кислородным упорядочением (stripes, stagers etc.).

Наконец, недавно появилась еще одна работа, касающаяся вопроса о том, как же выглядит допированная Сu-О плоскость с точки зрения распределения в ней избыточного заряда. Изучалась система La2Cu(Li)O4. Известно, что замещение меди литием дает самую низкую подвижность дырок в La2CuO4 (сопротивление dR/dT<0 во всей области концентраций и температур!). ЯКР исследования на 139La в этой системе [3] и сравнение результатов с данными для La(Sr) системы с аналогичным поведением привели авторов к заключению, что нечувствительность результатов эксперимента к характеру допирующей примеси и подвижности избыточных дырок требует пересмотра представлений об основном состоянии легированной Сu-О плоскости. В работе сделана попытка ввести представление о новой коллективной структуре избыточных дырок. Хотя идея нова и безусловно заслуживает внимания, но предстоит еще ответить на вопрос, насколько она применима ко всем системам и насколько, в связи с этим, можно говорить об универсальном поведении легированной Сu-О плоскости. *А.Захаров*

*J.Cho et al. Phys. Rev. Lett., 1993,* ***70****, p.222*

*V.Pomjakushin et al. Phys. Rev. B, 1998,* ***58****, p.12350*

*B.Suh et al. Phys. Rev. Lett.,1998,* ***81****, p.2791*

**Сверхпроводниковый магнит для LHC**16 июля 1998 года в CERN’е продемонстрирована успешная работа сверхпроводникового дипольного магнита для будущего коллайдера LHC. В разработке и изготовлении магнита принимали участие итальянский INFN (Национальный институт ядерной физики) и промышленная компания Ansaldo Energia. INFN в содружестве с CERN разработали конструкцию сверхпроводящего магнита, а Ansaldo Energia изготовила его.

Магнит был установлен на испытательном стенде в LHC в начале июня и охлажден до температуры 1.8К, при этом было достигнуто проектное значение магнитного поля 8.3Тл. После увеличения поля до значения 8.6Тл сверхпроводниковый магнит перешел в нормальное состояние.

При весе около 26т и длине 15 –16м магнит имеет длину магнитного участка 14.2м при 1.9К, внутренний диаметр каждой из двух апертур - 56мм.

Июньская демонстрация стала частью из серии испытаний магнита, при которых магнит термоциклировали и исследовали качество магнитного поля и системы защиты магнита при его переходе в нормальное состояние.

*CERN Courier, 1998,* ***38****(6), p.17*

**Новая серия ВТСП (на этот раз с хромом)**Японские физики из National Institute for Research in Inorganic Materials (Tsukuba, Ibaraki) синтезировали девять соединений, относящихся к новому гомологическому ряду (Cu0.5Cr0.5)Sr2Can-1CunO2n+3+d (n=1? 9), где n представляет собой, по сути дела, число слоев CuO2 в элементарной ячейке. Все эти соединения имеют тетрагональную структуру с периодами *a”* 0.39нм и *c”* 0.8+0.32? (n-1)нм. *Tc*=81К, 103К, 71К, 65К, 32К, 10К при n=2; 3; 4; 5; 6; 7 соответственно. При n=1; 8; и 9 сверхпроводимость отсутствует. По данным электронной микроскопии высокого разрешения кристаллографические слои (перпендикулярные оси *c*) чередуются в порядке SrO-(Cu0.5Cr0.5)O-SrO-CuO2-(Ca-CuO2)n-1. Атомы ме-ди и хрома в слоях (Cu,Cr)O распределены случайным образом (если какое-то упорядочение и имеет место, то оно локальное и неполное). Источниками дырочных носителей являются избыточные атомы кислорода и/или вакансии атомов меди в слоях (Cu,Cr)O.

**Транспортные измерения Hc2 в YBa2Cu3O7-x при низких температурах**При *T*<<*Tc* величина верхнего критического поля *Hc2* в ВТСП существенно превышает максимальные значения *H* *постоянного* магнитного поля, генерируемого современными магнитами. Поэтому для измерения *Hc2* приходится использовать *импульсные* магнитные поля. Именно так была найдена величина *Hcc2*=(110? 135)Тл для ВТСП YBa2Cu3O7-x при *T*=(2 ? 4)K и параллельном кристаллографической оси *с* направлении магнитного поля [1-3]. В работе [4] международного коллектива австралийских (University of New South Wales; CSIRO), японских (University of Tokyo; International Technology Center), американских (Los Alamos National Laboratory) и российских (Арзамас-16) физиков было исследовано воздействие на тонкие пленки YBa2Cu3O7-x перпендикулярного оси *с* магнитного поля с *H*~300Тл. Было установлено, что диссипация начинается при *Hab* =150Тл. Это существенно меньше оценки *Habс2*=670Тл, сделанной на основании экспериментальных значений длины когерентности x в Y-123. Следовательно, причиной нарушения сверхпроводимости является достижение “парамагнитного предела”, а не уменьшение характерной магнитной длины ниже масштаба x .

*H.Nakagawa et al., to be published.*

*J.L.Smith et al., J. Low Temp. Phys.,1994,* ***95****, p.75*

*J.D.Goettee et al., Physica B, 1994,* ***194-196****, p.1805*

*A.S.Dzurak et al., Phys. Rev. B, 1998,* ***57****, p.14084*

**Сверхпроводимость 2DEG**Эксперименты С.В.Кравченко, выполненные за границей, имели большой резонанс в научном мире. Об этом уже неоднократно сообщал ПерсТ. Наблюдаемое металлическое состояние двумерного электронного газа (2DEG) в кремниевом полевом транзисторе (MOSFET) при очень низких температурах противоречило общепринятой теории металлов, согласно которой двумерные металлы при нулевой температуре обращаются в изоляторы.

Подробная теория наблюдаемого явления сейчас только разрабатывается, но уже можно сделать некоторые несомненные утверждения. Главное из них состоит в том, что теория ферми-жидкости не применима к достаточно разреженному 2DEG, у которого среднее расстояние между электронами велико по сравнению с боровским радиусом. В этом случае (учитывая ферми-статистику электронов) энергия кулоновского взаимодействия электронов превышает их кинетическую энергию. Подходящей для этого случая моделью является латтинжерова жидкость (Luttinger liquid), но ее применение даже к одномерным проводникам дает то согласие, то противоречие с экспериментом. Возможно, главным ее недостатком является игнорирование спина электрона, а значит, и обменного взаимодействия.

Поэтому ученые из University of Illinois at Urbana-Champaign (США) предлагают обойтись хорошо известными средствами, а не привлекать пока слабо изученные модели. Они считают, что наблюдаемый Кравченко эффект является переходом изолятор (большая доля фазы вигнеровского кристалла в неупорядоченном 2DEG)-сверхпроводник. По мнению авторов, все основания для этого имеются: прежде всего, критическое поведение от внешних магнитного и электрического полей. Хорошо известно, что магнитное поле разрушает синглетную сверхпроводимость, когда спаренные электроны имеют нулевой суммарный спин. Возможным кандидатом для спаривания электронов называется поверхностный плазмон. В отличие от своего трехмерного собрата он имеет бесщелевой спектр, т.е. существует на любой частоте. К сожалению, это остается только гипотезой, т.к. конкретные расчеты не выполнены. Заметим попутно, что на огромное влияние поверхностных плазмонов на проводимость 2DEG неоднократно указывал в своих работах В.А.Волков (ИРЭ РАН, Москва).

*Nature, 1998,* ***395****, р.253*

**Какова же симметрия сверхпроводящего параметра порядка в ВТСП?**За последние несколько лет опубликовано много экспериментальных работ, посвященных орбитальной симметрии сверхпроводящего параметра порядка  в ВТСП. Основное внимание было уделено следующим соединениям: YBa2Cu3O7-x, Tl2Ba2CuO6+x, Bi2Sr2CaCu2O8+x и Nd1.85Ce0.15CuO4. При интерпретации экспериментальных данных мнения разделились. Одни эксперименты были объяснены *d*-волновой симметрией  , а другие - более "прозаичной" *s*-волновой симметрией. Подробный анализ экспериментальной ситуации и причин имеющихся противоречий дан в работе Richard'а Klemm'а (Argonne National Laboratory), которая готовится к публикации в International Journal of Modern Physics B (и, возможно, уже опубликована к моменту выхода в свет этого номера ПерсТ’а). R.Klemm отмечает, что все эксперименты можно условно разделить на 3 категории: 1) измерения термодинамических и транспортных характеристик; 2) фотоэмиссионная спектроскопия с угловым разрешением (ARPES); 3) джозефсоновское туннелирование. После этого он "по косточкам" разбирает каждую из этих категорий.

1. Термодинамические и транспортные характеристики

1.1. *Парамагнитный эффект Мейснера*Он наблюдается в неоднородных образцах, причем не только в ВТСП, но и, например, в ниобии. Его причина, по-видимому, никак не связана с симметрией  .

1.2. *Нелинейный эффект Мейснера*Этот эффект должен наблюдаться в *d*-волновом сверхпроводнике, поскольку наличие у  нулей на поверхности Ферми приводит к появлению избыточной плотности квазичастичных состояний. При направлении магнитного поля, параллельном плоскости *a-b,* вращение образца вокруг оси *c* должно приводить к периодической зависимости намагниченности от угла поворота с периодом  /2. Намеки на такую периодичность имелись в ранних экспериментах. Позднее было установлено, что при низких температурах период равен  , как и в ниобии.

1.3. *Теплоемкость*При низких температурах и сильных магнитных полях удельная теплоемкость *C* ~ *TH*1/2, что говорит в пользу *d*-волновой симметрии. Однако такая же зависимость *C*(*T*,*H*) имеет место в V3Si (предположительно, из-за спиновых флуктуаций).

1.4. *Глубина проникновения*Температурная зависимость глубины проникновения магнитного поля  ab в плоскости *a-b* говорит о наличии нулей  на поверхности Ферми, тогда как зависимость  c(*T*) вдоль оси *c* описывается в рамках *s*-волновой модели. Таким образом, вся совокупность экспериментальных данных для  ab и  c не согласуется ни с "чистой" *d*-волновой, ни с "чистой" *s*-волновой симметрией  .

1.5. *Сканирующая туннельная микроскопия*Экспериментально обычно измеряют *изменение* плотности электронных состояний на уровне Ферми при понижении температуры ниже *Tc*, и это изменение объявляется сверхпроводящей щелью. Для Hg-1201 результаты согласуются с *s*-волновой симметрией  , для Tl-2201 - с *d*-волновой симметрией, для Y-123 и Bi-2212 - и с той, и с другой (по данным разных авторов), причем иногда противоречивые данные получаются даже при измерениях *в различных точках одного и того же образца*! Не исключено, что за сверхпроводящую щель принимается щель, обусловленная волной зарядовой плотности, как в 2H-TaSe2.

2. Псевдощель

При *Tc*<*T*<*T\** в ВТСП с пониженной концентрацией носителей наблюдается так называемая "псевдощель", обладающая, по-видимому, *d*-волновой симметрией.

2.1. *Фотоэмиссионная спектроскопия (ARPES)*Эксперимент свидетельствует о резкой анизотропии  на поверхности Ферми и возможном наличии у  нулей, что согласуется с *d*-волновой симметрией.

2.2. *Рассеяние нейтронов*Получено непосредственное доказательство формирования волны спиновой/зарядовой плотности при *T*<*T\**. Анизотропная псевдощель "имитирует" *d*-волновую сверхпроводящую щель. Таким образом, за *d*-волновую сверхпроводимость могут ошибочно приниматься эффекты, связанные с конкурирующими волнами спиновой/зарядовой плотности, сохраняющимися вплоть до низких температур.

2.3. *Аналогия с 2H-TaS2*Около 30 лет назад в литературе появилось сообщение о сверхпроводящих флуктуациях в 2H-TaS2 (pyridine)1/2, существующих вплоть до 30К (10*Tc*!). Позднее оказалось, что за сверхпроводящие флуктуации было ошибочно принято "не полностью разрушенное состояние" с волной зарядовой плотности. Аналогия с псевдощелью в ВТСП очевидна.

3. Джозефсоновское туннелирование

Эти эксперименты наиболее интересны, поскольку дают информацию о *фазе* сверхпроводящего параметра порядка, а не только о его *величине*, то есть щели, но они же и наиболее противоречивы.

3.1. *Бикристаллические границы зерен Y-123*Измерения критического тока между зернами различной формы и окружающей их матрицей являются наиболее убедительным доказательством анизотропии  , но не могут быть объяснены *d*-волновой симметрией  .

3.2. *Контакты между Pb и Y-123 по оси c*Имеющиеся в литературе данные говорят о том, что *s*-волновая компонента составляет по крайней мере 30% от  . Какую симметрию имеют остальные 70%  , на основании этих экспериментов сказать нельзя. Не исключено, что и *d*-волновую.

3.3. *Контакты между Pb и Y-123 в плоскости a-b*Обнаружен сдвиг фаз на  , что считается доводом в пользу *d*-волновой симметрии. Однако есть и другое возможное объяснение: захват магнитного потока на краях образца (что и подтвердили недавние эксперименты, выполненные с помощью СКВИДа). Была сделана попытка устранить захваченный магнитный поток. Она оказалась удачной, а полученные при этом результаты добавили уверенности сторонникам *d*-волновой симметрии. Однако более тщательные повторные эксперименты лучше всего могут быть объяснены *p*-волновой (!) симметрией, хотя их авторы и делают вывод о *d*-волновом спаривании, "отбрасывая" при этом, по утверждению R.Klemm'а, большую часть данных.

3.4. *Контакты на границах двойников*Зарегистрирован сдвиг фазы *s*-волновой компоненты (единственной, наблюдаемой в этих экспериментах) на  при пересечении границы двойника. Из этого был сделан вывод, что по разные стороны от границы  имеет (*d*+*s*)-волновую и (*d*-*s*)-волно-вую форму. Но разве можно на основании изменения фазы *s*-волновой компоненты заключать, что в  есть еще и *d*-волновая составляющая? Кроме того, интерпретация эксперимента осложняется возможным наличием на границе двойника локализованной волны спиновой/зарядовой плотности.

3.5. *Трикристаллические границы зерен Y-123*Экспериментальные данные согласуются с *d*-волновым сценарием, однако и здесь не исключен паразитный эффект от магнитного потока, захваченного между слоями CuO2. Кроме того, на интерпретацию эксперимента влияет "извилистость" двойниковых границ, о чем свидетельствует просвечивающая электронная микроскопия.

3.6. *"Внутренние" джозефсоновские контакты*Контакты между параллельными слоями CuO2 в ВТСП представляют собой "внутренние" (intrinsic) джозефсоновские контакты. Информацию об их характеристиках можно получить, анализируя ВАХ. Результаты должны зависеть от симметрии  . Имеющиеся на сегодняшний день данные говорят в пользу *s*-волновой симметрии.

3.7. *Контакты на границе разлома*Если расколоть монокристалл ВТСП на две половинки вдоль проводящих кристаллографических слоев, а затем повернуть одну из половинок на некоторый угол a и вновь прижать эти половинки друг к другу, то можно ожидать наличие зависимости *Ic* такого контакта от  . В частности, для *d*-волнового сверхпроводника должно быть *Ic*=0 при a =450. Однако на эксперименте зависимости *Ic* от  не было обнаружено.

Выводы
Эксперименты очень противоречивы. Одни могут быть лучше всего объяснены *d*-волновой симметрией  , другие - *s*-волновой, третьи - смешанной (*d*+*s*)-волновой симметрией с существенным вкладом каждой волны. Пока даже не ясно, одинакова ли симметрия  во всех ВТСП или же различна. Не исключено, что во многих экспериментах параметры зарядового и/или спинового порядка могут быть ошибочно приняты за сверхпроводящий параметр порядка.

Для тех, кто хочет подробнее ознакомиться с состоянием экспериментальных исследований по затронутой проблеме, отметим, что работа R.Klemm'а содержит cсылки на все ключевые эксперименты.

**Команда Лихарева из Stony Brook изготовила самую быструю в мире схему**Сотрудники State University of New York (Stony Brook, США) продемонстрировали устойчивую работу цифрового делителя частоты до частот 750ГГц при рассеиваемой мощности 10мкВт (рабочая температура 1.8К). Это - самая быстрая из известных твердотельных цифровых схем. Полупроводниковые схемы с аналогичными функциями, по крайней мере, на порядок медленнее и рассеивают в 105 (!) раз большую мощность. Работа схемы основана на принципах RSFQ (Rapid Single Flux Quantum) логики, обеспечивающих максимальное для сверхпроводниковых схем быстродействие. На одном чипе размещены 8 делителей частоты, каждый из которых включает 68 джозефсоновских переходов (Nb/AlOx/Nb) с площадью каждого - 0.25мкм2 при толщине электродов 150нм. Схема изготовлена с применением электронно-лучевой литографии для формирования рисунка. Разброс параметров переходов не превышает ± 10% (при этом в RSFQ схемах принципиально допускается 30% разброс). Схема содержит переходы с резистивным шунтом (Jc=0.5мА/мкм2, IcRn=1.8мВ) и нешунтированные (Jc=2мА/мкм2).

**Кавитация Евгения Подклетнова**В 1899 году в романе “Путешествие на Луну” (“The First Men in the Moon”) Герберт Уэлс рассказал о том, как ученый Кавор открыл некоторое антигравитирующее вещество в виде минеральной пасты и назвал его каворитом. Покрыв им поверхность сферы, он отправился с друзьями на Луну. Российский ученый Е.Подклетнов претендует на открытие в наши дни реального каворита в виде сверхпроводящего материала YBCO. Схема установки, на которой в 1992г. в Финляндии Е.Подклетнов наблюдал уменьшение веса образца, размещенного над вращающимся в переменном магнитном поле сверхпроводящим диском, представлена на рисунке. Без вращения потеря в весе составляла 0.05%. Максимальная потеря в весе при вращении диска составляла 0.3%.

<>С тех пор не удается ни надежно подтвердить этот эффект, ни надежно его закрыть. Было проведено множество экспериментов, которые давали попеременно то положительный, то отрицательный результат. NASA выделила большие деньги на проведение эксперимента и для консультаций пригласила самого автора, но итог пока отрицательный. Главная сложность состоит в том, что изменение веса настолько мало, что трудно избежать посторонних воздействий. Кроме того, сам Подклетнов упирает на особую структуру полученного материала, которую трудно воспроизвести.

Как бы то ни было, большинство физиков скептически восприняло результаты Подклетнова, основываясь на положениях общей теории относительности, согласно которой гравитация вообще не сила, а искривление 4-х мерного пространства-времени, что является следствием совпадения гравитационного заряда с инерционной массой.

Но самое поразительное в этой истории то, что еще до опыта Подклетнова Li и Torr опубликовали две работы, в которых предсказывали генерацию гравитации при вращении сверхпроводящего диска в переменном магнитном поле.

За дальнейшим развитием событий можно проследить на странице в Интернете:

<http://www.inetarena.com/~noetic/pls/gravity/html>

**Превращение тепловой энергии в электрическую в неоднородном сверхпроводящем кольце**Хотелось бы обратить внимание читателей ПерсТ'а на интересный результат работы [1], в которой рассматривается эффект Литтла-Паркса в неоднородном сверхпроводящем кольце. Еще в 1962 году Литтл и Паркс [2] обнаружили, что температура перехода тонкостенного цилиндра малого радиуса в сверхпроводящее состояние периодически (с периодом равным кванту потока) зависит от величины магнитного потока. Этот эффект был объяснен М.Тинкхамом [3], как одно из проявлений макроскопической квантовой природы сверхпроводимости (см. также [4]). Периодическое смещение критической температуры связано с квантованием скорости сверхпроводящих электронов, аналогично тому, как это имеет место в атоме. Скорость стремится приобрести минимально возможное значение. При потоке внутри цилиндра, кратном кванту потока, минимально возможное значение скорости равно нулю. Но при потоке, не кратном кванту, скорость не может быть равна нулю. Это приводит к зависимости энергии сверхпроводящего состояния от потока и, как следствие, к периодическому смещению критической температуры в магнитном поле. Это смещение имеет заметную величину в кольце (цилиндре), радиус которого сравним с корреляционной длиной [4].

М.Тинкхам [3] рассматривал однородное кольцо. В случае неоднородного кольца, один участок которого имеет пониженную критическую температуру в сравнении с другим [1], вследствие термодинамических флуктуаций на участке с меньшим Тс при температурах, соответствующих резистивному переходу этого участка, появляется напряжение, величина которого периодически зависит от величины потока внутри кольца, с периодом, равным кванту потока. При переходе в сверхпроводящее состояние участка с наименьшей Тс в кольце возникает ток фиксированного направления, а при обратном переходе в нормальное состояние на рассматриваемом участке появляется напряжение, так как вследствие конечной индуктивности кольца ток не может затухнуть мгновенно. При периодическом или хаотическом переводе участка с наименьшим Тс из нормального состояния в сверхпроводящее и обратно на нем возникнет напряжение с постоянной составляющей, зависящей периодически от величины магнитного потока внутри кольца. Итак, сверхпроводящее кольцо является тепловой машиной, в которой тепловая энергия может быть преобразована в электрическую энергию постоянного тока. Без учета флуктуаций максимальный коэффициент полезного действия тепловой машины, реализуемый в цикле Карно, пропорционален амплитуде изменения температуры [5].

Однако переход из нормального состояния в сверхпроводящее и обратно может происходить и без изменения температуры вследствие флуктуаций, если разность энергий рассматриваемого участка в нормальном и сверхпроводящем состояниях не превышает kBT. Это возможно вблизи критической температуры, так как при Т=Тс эта разность равна нулю. Следовательно, постоянное напряжение может возникать в неоднородном сверхпроводящем кольце и при постоянной температуре, близкой к критической. Авторы дают подробное объяснение необычному явлению.

*A.V.Nikulov and I.N.Zhilyaev, "The Little-Parks Effect in an Inhomogeneous Superconducting Ring." J. of Low Temp.Phys. 1998,****112****(3/4), p.227-236*

*W.A.Little and R.D.Parks, Phys.Rev.Lett.,1962,* ***9****, p.9*

*M.Tinkham, Phys.Rev. 1963,****129****, p.2413*

*М.Тинкхам, Введение в сверхпроводимость. Атомиздат М.1980*

*Ч.Киттель, Статистическая термодинамика. "Наука", М., 1977*

**Резкий рост критической температуры "нового" ВТСП PrBa2Cu3Ox под давлением**В течение очень длительного времени после открытия ВТСП в 1986 году господствовало мнение, что соединение PrBa2Cu3Ox является "несверхпроводящим исключением" из ВТСП-серии ReBa2Cu3Ox (Re - редкоземельный элемент). Какие только версии не выдвигались для объяснения этого "факта": разрыв куперовских пар магнитными моментами атомов празеодима, уменьшение концентрации носителей заряда или их локализация и т.д. Эти споры закончились в 1996 году после открытия сверхпроводимости в тонких пленках PrBa2Cu3Ox [1] и его последующего подтверждения другими авторами [2]. Сверхпроводимость наблюдалась также и в монокристаллах PrBa2Cu3Ox [3]. Причина того, почему один из двух (одинаковых на первый взгляд) образцов PrBa2Cu3Ox является полупроводником, а другой - сверхпроводником, пока однозначно не установлена, хотя и выяснено, что их структуры несколько различаются (но весьма незначительно).

В этом году PrBa2Cu3Ox преподнес очередной сюрприз. Японские физики из National Research Institute for Metals, Electrotechnical Laboratory и Ibaraki University исследовали влияние высокого давления *P* на *Tc* монокристалла PrBa2Cu3Ox с различным содержанием кислорода [4,5]. Величина *Tc* определялась по нулю электросопротивления и при *P*=0 составляла 56.5 и 81К для *x* = 6.6 и 6.8 соответственно. Увеличение *P* привело к резкому росту *Tc* образца с *x* = 6.6. На начальном этапе скорость роста *Tc* составляла d*Tc*/d*P* = 7.4К/ГПа. При *P* = 9.3ГПа (максимальное давление в этом эксперименте) величина *Tc* возросла до 105К, причем производная d*Tc*/d*P* при таких высоких давлениях хоть и уменьшилась, но осталась положительной, то есть максимум *Tc* еще не был достигнут. Этот результат резко контрастирует с данными для ВТСП YBa2Cu3Ox, у которого при *x* = (6.8 ? 7) величина *Tc* почти не зависит от *P* и остается на уровне около 90К вплоть до *P* = 10ГПа. По мнению авторов [4,5] причина разного отклика PrBa2Cu3Ox и YBa2Cu3Ox на высокое давление кроется в различном характере распределения носителей заряда между структурными единицами элементарной ячейки и, соответственно с его различным *перераспределением* под давлением. Интересно, что *Tc* монокристалла PrBa2Cu3Ox с *x* = 6.8 увеличивается под давлением не так быстро, как при *x* = 6.6, хотя и превышает 100К при *P* = 10ГПа.

H.A.Blackstead et al., Phys. Rev. B 54, 6122 (1996)

T.Usagawa et al., Jpn. J. Appl.Phys. (Part 2) 36, L1583 (1997)

Z.Zou et al., Jpn. J. Appl.Phys. (Part 2) 36, L18 (1997)

Z.Zou et al., Phys. Rev. Lett. 80, 1074 (1998)

J.Ye et al., Phys. Rev. B 58, 619 (1998)

**Круглов нашел заменитель золота**Оговоримся, что в данном случае речь идет только о ВТСП токовводах. Металлическая оболочка для ВТСП токовводов является предметом озабоченности и технологов, и конструкторов. На сегодня ее оптимальный состав состоит из серебра с 10%(!) золота. Дорого. А новую более дешевую оболочку ждут 1кА токовводы, разработанные тандемом Кейлин-Шиков (см. ПерсТ, выпуск 7 текущего года). Поиском “заменителя золота” упорно занимались В.С.Круглов (ИСФТТ РНЦ КИ) и И.И.Акимов (ВНИИНМ). И, как видно из представленной ниже таблицы, их поиск завершился успехом. Даже 1% найденного заменителя достаточно, чтобы составить здоровую конкуренцию золотосодержащим сплавам.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Материал | r 300 /r 77 | r 300 /r 4.2 |
| Ag | 6.0 | 102-103 |
| Ag+1% Au | 2.9 | 4.9 |
| Ag+10% Au | 1.4 | 2.0 |
| Ag+1%X (без термообработки) | 1.1 | 1.67 |
| Ag+1%X (600оС, 0.5 час.) | 2.1 | 7.1 |

Известно, что токовводы – одно из (очень!) **не**многочисленных рыночных ресурсосберегающих ВТСП изделий. По оценкам, применение ВТСП токоввода увеличивает на 70% ресурс холодильного устройства. В конструкциях токовводов из нормального металла существует два механизма теплопритока в холодильник – джоулево тепло (особенно в длинных и тонких конструкциях) и теплопроводность (особенно в толстых и коротких конструкциях). ВТСП токоввод исключает часть теплопритока, обусловленную джоулевым теплом (во всяком случае, в наиболее критической низкотемпературной части токоввода). Этот факт сильно развязывает руки конструктору, допуская длинные и тонкие конструкции. Однако, все ВТСП составы - очень хрупкие, для придания прочности и гибкости их необходимо заключать в соответствующую оболочку. Известна также привязанность ВТСП составов к хорошо теплопроводящему серебру или сплавам на его основе. В частности, для оболочки токовводов, как правило, используются сплавы Ag+N%Au. Поиски заменителя серебра пока не найдены, но вот для золота, похоже, нашли. Из предложенного В.С.Кругловым и И.И.Акимовым сплава Ag+1%X уже изготовлена стандартная трубка, которая будет служить оболочкой для получения протяженного куска ВТСП ленты. Подождем дальнейших результатов.

**Продвижение накопителей в энергосистему штата Каролина**Недавно подписано соглашение между American Superconductor Corp. (ASC) и Carolina Power & Light (CP&L) о поиске решений, основанных на использовании сверхпроводниковых магнитных накопителей электроэнергии (SMES’ов) для промышленных линий электропередач. Неблагоприятные погодные условия, инциденты на транспорте и непредсказуемый выход из строя оборудования может приводить к перерывам в подаче электроэнергии или к скачкам напряжения в сети. Согласно оценкам, такие выходы из строя в электросети обходятся американской промышленности ежегодно в миллиарды долларов за счет повреждения оборудования и прерывания непрерывных производственных циклов. Ситуацию могут в корне изменить сверхпроводниковые накопители. Серию таких накопителей (SMES’ов) на основе электромагнитов из низкотемпературных сверхпроводников на разные диапазоны мощности выпускает ф. ASC. Ее продукция размещается на портативном трейлере длиной около 12м. Используемая мощная электроника “чувствует” мгновенное перераспределение мощности в сети и в течение 2 сек переключает сеть на питание от накопителя. После стабилизации электрической мощности в сети осуществляется обратное переключение. В текущем году ф. ASC успешно внедрила в НТСП накопители ВТСП токовводы, уменьшив ежегодные эксплуатационные расходы для потребителя на 55%.

В рамках подписанного соглашения ф. CP&L, электросистемой которой пользуются более 1млн жителей штата Каролина, берет на себя маркетинговые услуги по продвижению накопителей, а
ф. ASC – поставку устройств, обучение персонала и техническую поддержку эксплуатации накопителей.

Для более полной информации контакт:
Kathy Cadigan
Corporate Communications,
American Superconductor Corporation,
Two Technology Drive,
Westborough, MA 01581;
phone (508) 836-4200 ext. 222.

**Споры о биполяронной сверхпроводимости в ВТСП**Электрон-фононное взаимодействие проявляет себя по-разному: от сравнительно слабой перенормировки массы носителей заряда (в металлах) до формирования почти локализованных квазичастиц (в ионных кристаллах и оксидах). Такие квазичастицы называют *поляронами малого радиуса*. Концепция полярона восходит еще к работам Ландау начала 30-х годов. Полярон образуется вследствие сильного взаимодействия электрона с акустическим или локальным фононом (то есть с искажением кристаллической решетки, локализованным на расстоянии порядка размера одной элементарной ячейки).

Для того чтобы объяснить некоторые необычные свойства халькогенидов, Ф.Андерсон в 1975 году ввел понятие *биполярона малого радиуса* [1]: квазичастицы, представляющей собой два электрона, локализованных в непосредственной близости друг от друга. Причиной образования биполярона является (как и для полярона) сильное локальное искажение решетки электронами. Значительный вклад в науку о биполяронах внес известный французский физик Б.Чакраверти, который сначала в рамках биполяронной теории объяснил ряд необычных свойств оксида Ti4-xVxO7 [2], а затем показал, что при увеличении константы электрон-фононного взаимодействия основное состояние системы большого числа электронов непрерывным образом эволюционирует от *сверхпроводящего* состояния типа БКШ к *диэлектрическому* состоянию, в котором куперовские пары локализованы в форме массивных биполяронов.

Хотя открытие высокотемпературной сверхпроводимости Дж.Беднорцем и К.Мюллером в 1986 году обязано отчасти "поляронной идеологии" (два упомянутых нобелевских лауреата полагали, что медно-оксидные соединения могут иметь высокую критическую температуру *Tc* вследствие наличия в них поляронов), в те годы вопрос о бозе-эйнштейновской конденсации биполяронов как причины высокотемпературной сверхпроводимости всерьез не рассматривался. Однако еще в 1981 году А.Александров и Д.Раннингер опубликовали статью [4], где выдвинули идею, что биполяроны малого радиуса могут рассматриваться как подвижные бозоны, которые могут переходить в сверхтекучее состояние, то есть образовывать бозе-конденсат. В то время эта работа считалась методической. Но несколько лет спустя один из ее авторов (А.Александров) и известный английский теоретик Н.Мотт на полном серьезе заявили, что высокотемпературная сверхпроводимость есть не что иное как бозе-конденсация биполяронов малого радиуса [5,6]. В пользу такого сценария сверхпроводимости ВТСП свидетельствовала, по их мнению, низкая (~ 1021 см-3) концентрация носителей заряда и малая (~ нескольких нанометров) длина когерентности.

Такое "обобщение" теории биполяронной сверхпроводимости на ВТСП вызвало резкое возражение со стороны Б.Чакраверти (одного из основоположников теории биполяронов [2,3]) и Д.Раннингера (соавтора А.Александрова по работе [4], с которой все начиналось). Их аргументы приведены в недавно опубликованной работе [7] (отметим, что "терпели" они довольно долго - несколько лет). Этих аргументов несколько, но все они имеют одинаковую суть: если мы берем экспериментальное (для ВТСП) значение какой-то физической величины A и подставляем его в одну из формул теории сверхпроводимости биполяронов, то для другой величины (назовем ее B) мы получаем значение, которое примерно на порядок отличается от экспериментального. Если мы теперь возьмем другую формулу этой теории, связывающую B не с A, а, скажем, с величиной C, то мы получим *другое* значение B (иными словами, в теории отсутствует "внутреннее согласование"), причем оно опять же будет далеко от экспериментального. Наиболее наглядно это проявляется при определении эффективной массы носителей *m\** по экспериментальным значениям *Tc*, с одной стороны, и глубине проникновения магнитного поля, с другой. Кроме того, условие формирования биполяронов настолько жесткое (а конкретно - требует такой большой величины *m\**), что максимально возможная температура сверхпроводящего перехода (бозе-конденсации биполяронов) оказывается крайне низкой - в лучшем случае 10-2 К, что, конечно, слишком мало для объяснения высокотемпературной сверхпроводимости.

Итак, согласно работе [7], *бозе-конденсация биполяронов как причина сверхпроводимости ВТСП исключается*. Но авторы [7] пошли дальше. Они поставили вопрос так: согласуется ли теория бозе-конденсации локальных электронных пар (какова бы ни была физическая причина их образования) с экспериментальными данными для ВТСП? Ответ оказался отрицательным: нет, не согласуется. Дело в том, что один "когерентный объем" в ВТСП включает, согласно разным оценкам, от 6 до 10 носителей заряда, тогда как теория бозе-эйнштейновской конденсации локальных пар работает, если расстояние между парами больше длины когерентности. В противном случае само понятие локальных пар теряет смысл, так как взаимодействие ("перекрытие" по терминологии авторов [7]) между электронами разных "пар" сравнимо с взаимодействием электронов в одной отдельной "паре".

Не выдерживают критики, как утверждается в [7], и попытки привлечь локальные пары для объяснения псевдощели, наблюдаемой в ВТСП при *T*>*Tc*. При этом сторонники локальных пар полагают, что величина псевдощели, наблюдаемой в некоторых областях зоны Бриллюэна методом фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES), есть не что иное как энергия распада локальной пары на два электрона (или биполярона на два полярона). Такая интерпретация полностью противоречит эксперименту, ибо ARPES свидетельствует о сильной зависимости псевдощели от квазиимпульса. Но если бы псевдощель появлялась из-за распада локальных пар, то ее величина (равная энергии связи электронов в одной паре) не зависела бы от импульса. Более того, сейчас уже можно считать доказанным наличие в ВТСП четко определенной поверхности Ферми (на которой и образуется псевдощель), а локальные пары, будучи бозонами, не имеют поверхности Ферми.

Следует отметить, что статья [7] написана в исключительно "живом" стиле, более характерном для популярного журнала, нежели для "сухих" Physical Review Letters. Процитируем ее заключительный абзац, стараясь при переводе быть по возможности ближе к оригиналу: "В этом сообщении мы позаботились о том, чтобы раз и навсегда показать, что сценарий биполяронной сверхпроводимости ВТСП не удовлетворяет экспериментальным ограничениям и является теоретически противоречивым. Хотя бозе-эйнштейновская конденсация сильно связанных электронных пар в принципе возможна, в отношении ВТСП экспериментальные ограничения таковы, что этот сценарий не реализуется. Что касается вопроса о том, могут ли биполяроны играть роль в формировании бозонных квазичастиц и их конденсации, мы исключаем такую возможность. Как однажды заметил Aldous Huxley, трагедия прекрасных теорий заключается в том, что они часто разрушаются безобразными фактами. К этому стоит добавить, что трагедия не столь прекрасных теорий состоит в том, что они даже не могут быть разрушены: подобно персонажам мультипликационных фильмов, они продолжают наслаждаться своим прелестным существованием, пока не кончится пленка."

Ответ А.Александрова не заставил себя долго ждать (к сожалению, к нему не смог присоединиться недавно ушедший из жизни Н.Мотт). Буквально в день выхода в свет номера Physical Review Letters со статьей [7] А.Александров поместил "comment" к ней в лос-аламосовском банке электронных препринтов [8]. Он утверждал, что возражения авторов [7] против биполяронной сверхпроводимости ВТСП "есть результат неправильного приближения для энергетического спектра биполяронов и неправильного применения теории биполяронов".

Используя развитую им недавно *двухзонную* модель, А.Александров получил формулу для *Tc*, которая свободна от подгоночных параметров и включает в себя, кроме фундаментальных констант, концентрацию носителей *n* и глубины проникновения магнитного поля l ab и l c вдоль взаимно перпендикулярных кристаллографических направлений. При подстановке в эту формулу экспериментальных (для Y-123) значений *n*, l ab и l c получается *Tc ”* 100 K, что говорит о самосогласованности биполяронного подхода и свидетельствует, по мнению А.Александрова, о том, что ВТСП находятся в режиме бозе-эйнштейновской конденсации.

А.Александров также подчеркнул, что он с Н.Моттом неоднократно отмечали, что биполяроны малого радиуса в медно-оксидных купратах представляют собой не “*onsite*”, а ”*intersite*” образования. Это является следствием неэкранированного электрон-фононного взаимодействия и очень существенно, поскольку именно для “onsite“ биполяронов авторы [7] дают оценку эффективной массы биполярона, завышенную на два порядка по сравнению с экспериментом.

Кроме того, А.Александров отметил, что длина когерентности в заряженном бозе-газе, о которой идет речь в [7], не имеет ничего общего с размером бозона. Она, в частности, может быть такой же большой, как и в БКШ-сверхпроводнике. Следовательно, приводимые в [7] аргументы неверны. Неправильным считает А.Александров и утверждение авторов [7] о “бездисперсионности” фотоэмиссионной спектральной функции биполяронного соединения, поскольку дырка (которая образуется при фотостимулированном разрыве биполярона и испускании электрона) движется в *поляронной зоне*, обладающей дисперсией (что и “видит” ARPES).

К основным же экспериментальным аргументам в пользу биполяронной сверхпроводимости ВТСП А.Александров причисляет поведение *Hc2* и удельной теплоемкости в окрестности сверхпроводящего перехода. Он делает вывод, что *нет однозначных экспериментальных свидетельств против биполяронной теории*. Свой комментарий А.Александров закончил так: "Ясно, однако, что любая теория, прекрасна она или нет, не может быть разрушена “безобразными” артефактами, подобными тем, что приведены в [7]".

О том, что произошло после этого "обмена любезностями", рассказал P.Rodgers в заметке [9]. Ниже дано ее краткое изложение.

В одном из интервью А.Александров назвал последний (цитированный выше) абзац статьи [7] "нездоровым и немотивированным" и отметил, что такого же мнения придерживаются многие другие физики. На это Д.Раннингер возразил, что упомянутый абзац был добавлен к статье [7] "для того, чтобы успокоить ситуацию", а не с провокационными целями. Реакция "ВТСП-сообщества" на работу [7] оказалась неоднозначной. Например, А.Абрикосов написал Д.Раннингеру письмо, в котором были такие слова: "Я получил удовольствие от чтения вашей статьи про биполяронную сверхпроводимость. Я полностью согласен с ней и оценил два последних предложения". В то же время А.Бишоп назвал тон статьи [7] "бесполезно полемическим". "Я мог бы заметить в том же духе", - сказал А.Бишоп, - "что красота находится в глазах зрителя. В создавшейся же ситуации есть несколько зрителей".

В качестве эпиграфа к своей "обобщающей" заметке [9] P.Rodgers выбрал высказывание Д.Раннингера: "Мир теорий ВТСП - очень деликатный, с большим количеством плохой крови и рукопашного боя". Важно, что физики бранятся только… в поисках истины.

*По материалам следующих публикаций:*

*P.W.Anderson, Phys. Rev. Lett., 1975,* ***34****, p.953*

*B.K.Chakraverty et al., Phys. Rev. B, 1978,* ***17****, p.3780*

*B.K.Chakraverty, J. Phys. (Paris) Lett., 1979,* ***40****, L-99*

*A.S.Alexandrov and J.Ranninger, Phys. Rev. B, 1981,* ***23****, p.1796*

*N.F.Mott, Physica C, 1993,* ***205****, p.191*

*A.S.Alexandrov and N.F.Mott, "High Temperature Superconductors and Other Superfluids", London, 1994*

*B.K.Chakraverty, J.Ranninger, D.Feinberg, Phys. Rev. Lett., 1998,* ***81****, p.433*

*A.S.Alexandrov, cond-mat/9807185*

*P.Rodgers, Science, 1998,* ***281****, p.1427*

**Квантово-классический металл**В основе современных представлений о свойствах металлов лежит теория ферми-жидкости Ландау. Согласно этой теории, существует взаимно однозначное соответствие между основным и низколежащими возбужденными состояниями системы *взаимодействующих* электронов (то есть ферми-*жидкости*) и соответствующими состояниями системы *невзаимодействующих* электронов (то есть ферми-*газа*). При наличии сколь угодно сильного взаимодействия между образующими ферми-жидкость *частицами* оказывается, что взаимодействие между *квазичастицами* (элементарными возбуждениями над основным состоянием) является очень слабым в меру малости энергии этих возбуждений e : Интенсивность рассеяния квазичастиц друг на друге (то есть их обратное время жизни) пропорциональна e 2, то есть становится меньше e при достаточно малых e.

Теория ферми-жидкости применима к системам с размерностью два и более. В одномерных системах она не работает, и поиск такого типа систем был предметом интенсивных исследований. Но ведь образцы и материалы, которые исследуются экспериментально, не могут быть "чисто" одномерными! Они "в лучшем случае" сильно анизотропны, и поэтому одномерные модели, строго говоря, неприменимы к описанию их свойств. Ведь необходимо учитывать, по крайней мере, взаимодействие между "одномерными компонентами" таких образцов. А это взаимодействие может приводить к "восстановлению" ферми-жидкостных характеристик. Другими словами, надо еще доказать, что в *реальных* (а не модельных) и, вообще говоря, *объемных* образцах возможно нарушение теории ферми-жидкости.

Такое доказательство представлено в работе [D.G.Clarke *et al*., Science **279** (1998) 2071] сотрудников Joseph Henry Laboratories of Physics, Princeton University. Они исследовали влияние сильного магнитного поля на органический проводник (TMTSF)2PF6. Это соединение обладает очень сильной анизотропией электросопротивления (1:100:100000) при комнатной температуре. При нормальном давлении оно является диэлектриком с волной спиновой плотности, а при *P*>6кбар становится сверхпроводником с *Tc”* 1К. Увеличение магнитного поля до *H*>*H*\*” 7Тл приводит не только к исчезновению сверхпроводимости, но и к полной потери когерентности в движении электронов перпендикулярно проводящим кристаллографическим слоям, тогда как когерентность сохраняется в каждом отдельно взятом слое. Это состояние не является ферми-жидкостным. Авторы назвали его "квантово-классическим металлом", который характеризуется квантовым характером переноса заряда в слоях и классическим - перпендикулярно слоям. Поскольку величина *H*\* уменьшается с ростом *P*, то не исключено, что такое состояние может реализоваться и в отсутствие магнитного поля, но при очень высоких давлениях.

**Изменение симметрии параметра порядка ВТСП при допировании**Любопытные результаты получены при исследовании ВТСП Bi2Sr2CaCu2O8+d с различным содержанием кислорода методом фотоэмиссионной спектроскопии (ARPES). Нули параметра сверхпроводящего порядка D , которые присутствуют в “оптимально допированных” образцах с максимальной *Tc*, отсутствуют в образцах с “избыточным допированием” (overdoped). Это довольно удивительно еще и потому, что электронная зонная структура обоих типов образцов практически одинакова. Полученные данные противоречат гипотезе о “чистой” *dx2-y2*-симметрии D . По-видимому, D является двухкомпонентной (по крайней мере) величиной, причем “удельный вес” каждой компоненты изменяется при допировании.

(По материалам “High-Tc Update”).

*R.Gatt et al., “Superconducting Gap Symmetry and Doping in Bi2Sr2CaCu2O8+x“, preprint.*

*I.Vobornik et al., “Electronic Structure of Overdoped Bi2Sr2CaCu2O8+x“, preprint.*

*(тексты обоих препринтов могут быть получены по запросу у M.Onellion; e-mail: onellion@comb.physics.wisc.edu).*

**Сверхпроводниковый накопитель для комфортного бомоубежища от Intermagnetics**Intermagnetics General Corp. поставила и установила сверхпроводящую магнитную накопительную систему мощностью 6МДж (6MJ microSMES) на базе ВВС США в Tyndall (Florida). Cистема IPQ-750TM включает также рефрижератор (сryocooler), ВТСП токовводы, мощную электронику с коммерческой системой бесперебойного питания (UPS). Накопитель интегрирован в автономный комплекс передвижного бомбоубежища (“Mobile/Relo-catable Shelter”) и рассчитан на бесперебойную работу в течение 24 часов в сутки. Компактное бомбоубежище имеет размеры 16 x 2.8 x 2.8м3.

ВВС США является лидером в продвижении накопителей в военную технику. На сегодня, кроме Intermagnetics, коммерческие накопители изготавливает и устанавливает American Superconductor.

**"Разрушение" поверхности Ферми в высокотемпературных сверхпроводниках с низким уровнем допирования**Электроны являются фермионами, поэтому ни одно квантовое состояние не может быть занято сразу двумя электронами (принцип Паули). Это, собственно, и приводит к разнообразию свойств индивидуальных атомов в Периодической Таблице. Что касается больших атомных систем, то именно в силу принципа Паули электроны не "сваливаются" в одно состояние с минимальной энергией, а однородно распределяются по импульсному пространству, занимая состояния с энергиями, не превышающими некоторую минимальную энергию, которая называется энергией Ферми. Таким образом, электроны как бы формируют в импульсном пространстве (в периодических системах - в зоне Бриллюэна) некое подобие "капли". Энергия электронных состояний на поверхности этой "капли" (поверхности Ферми) равна энергии Ферми. Деформация и колебания поверхности Ферми определяют коллективные свойства металлов.

ВТСП, открытые 12 лет назад, представляют собой качественно новый тип металлов: перемещение электронов в ВТСП ограничено проводящими слоями CuO2; в направлении, перпендикулярном этим слоям, проводимость очень низкая, а зона Бриллюэна является практически двумерной. Многие необычные свойства ВТСП проистекают, по-видимому, из коррелированного движения электронной жидкости в пределах слоев CuO2. Специфические особенности этого движения формируются при температуре, превышающей температуру сверхпроводящего перехода *Tc,* и "оставляют свои следы" на поверхности Ферми.

Единственный, известный на сегодня надежный способ экспериментального определения параметров поверхности Ферми в ВТСП - это фотоэмиссионная спектроскопия с угловым разрешением. Когда высокоэнергетичный фотон рассеивается на исследуемом образце, он "выселяет" электрон из занятого им состояния, в результате чего в электронной жидкости образуется "дырка". Анализ интенсивности выбитых электронов дает информацию об изначальном распределении электронов по энергии и импульсу. Этим методом было установлено, что в ВТСП с оптимальным уровнем допирования (то есть с такой концентрацией носителей заряда, при которой *Tc* конкретной системы максимальна) двумерная поверхность Ферми имеет форму квадрата со скругленными краями [1,2].

По-другому обстоят дела в “underdoped” ВТСП, где уровень допирования (концентрация носителей) ниже оптимальной величины. Если при температуре выше некоторой температуры *T\**>*Tc* также наблюдается "квадратоподобная" поверхность Ферми, то понижение температуры ниже *T\** ведет к появлению в плотности электронных состояний на уровне Ферми так называемой "псевдощели", то есть, число электронов на поверхности Ферми резко уменьшается. При дальнейшем охлаждении образца до *Tc* происходит переход в сверхпроводящее состояние, то еcть на поверхности Ферми возникает не псевдо-, а сверхпроводящая щель. Пока не понятно, связано ли наличие псевдощели со *сверхпроводящими* корреляциями электронов, которые развиваются еще в нормальном состоянии, или же псевдощель имеет другое происхождение (например, она может быть обусловлена *спиновыми* корреляциями в соседних слоях CuO2).

В недавней работе [3] большого коллектива американских, индийских и японских физиков (Argonne National Laboratory, University of Illinois at Chicago; Tata Institute of Fundamental Research; Tohoku University, Nagoya University, National Research Institute for Metals, University of Tsukuba) была детально промерена поверхность Ферми "under-doped" монокристалла ВТСП Bi2Sr2CaCu2O8+d с *Tc*=85К. Выяснилось, что формирование псевдощели ведет к "разрыву" поверхности Ферми. А происходит это так. Псевдощель при *T\**=180K возникает первоначально в четырех точках поверхности Ферми, которые находятся в центрах сторон "скругленного квадрата". При этом непрерывность поверхности Ферми оказывается нарушенной. По мере понижения температуры псевдощель "расползается" по направлению к скругленным углам (дугам). Поверхность Ферми при этом представляет собой четыре не связанные друг с другом дуги, размеры которых по мере охлаждения уменьшаются (но форма дуг при этом не изменяется!). Полностью дуги исчезают лишь при *T*=*Tc*. При температуре ниже *Tc* на поверхности Ферми имеется *сверхпроводящая* щель. Но не на всей поверхности Ферми. Дело в том, что сверхпроводящая щель сильно анизотропна и равна нулю в четырех точках поверхности Ферми. Интересно, что это именно те точки, в которых "схлопнулись" четыре дуги при подходе к *Tc* "сверху"!

Аналогичные результаты были получены и для другого "underdoped" образца с *Tc*=77К. А вот в "overdoped" монокристаллах с *Tc*=82 и 87К, у которых концентрация носителей выше оптимальной, псевдощели при *T*>*Tc* обнаружено не было. По-видимому, между псевдощелью и сверхпроводящей щелью в ВТСП имеется какая-то связь, которая может оказаться весьма нетривиальной, как нетривиальна и необычная (зависящая от температуры) анизотропия псевдощели. Не исключено, что в нормальном состоянии ВТСП присутствуют виртуальные электронные пары, время жизни которых t связано с неопределенностью их энергии связи D e соотношением t D e ~*h* [4]. Когда величина D e становится сравнима со сверхпроводящей щелью в определенной точке поверхности Ферми, то в этой точке "открывается" псевдощель.

Как бы то ни было, приведенные в [3] результаты позволяют примирить большое количество имеющихся в литературе противоречивых данных, полученных при исследовании псевдощели различными методами. Действительно, поскольку псевдощель сильно анизотропна в импульсном пространстве, то температурная зависимость конкретной физической величины (электрической проводимости, удельной теплоемкости, туннельного тока и т.д.) определяется конкретной зависимостью соответствующего матричного элемента от импульса, а эти матричные элементы для разных физических величин могут существенно различаться.

В электронном Банке препринтов уже появились первые теоретические работы [5-7], посвященные объяснению данных работы [3] и формулировке соответствующих моделей.

Аналогичные результаты были получены и для другого "underdoped" образца с *Tc*=77К. А вот в "overdoped" монокристаллах с *Tc*=82 и 87К, у которых концентрация носителей выше оптимальной, псевдощели при *T*>*Tc* обнаружено не было. По-видимому, между псевдощелью и сверхпроводящей щелью в ВТСП имеется какая-то связь, которая может оказаться весьма нетривиальной, как нетривиальна и необычная (зависящая от температуры) анизотропия псевдощели. Не исключено, что в нормальном состоянии ВТСП присутствуют виртуальные электронные пары, время жизни которых t связано с неопределенностью их энергии связи D e соотношением t D e ~*h* [4]. Когда величина D e становится сравнима со сверхпроводящей щелью в определенной точке поверхности Ферми, то в этой точке "открывается" псевдощель.

Как бы то ни было, приведенные в [3] результаты позволяют примирить большое количество имеющихся в литературе противоречивых данных, полученных при исследовании псевдощели различными методами. Действительно, поскольку псевдощель сильно анизотропна в импульсном пространстве, то температурная зависимость конкретной физической величины (электрической проводимости, удельной теплоемкости, туннельного тока и т.д.) определяется конкретной зависимостью соответствующего матричного элемента от импульса, а эти матричные элементы для разных физических величин могут существенно различаться.

В электронном Банке препринтов уже появились первые теоретические работы [5-7], посвященные объяснению данных работы [3] и формулировке соответствующих моделей.

*C.G.Olson et al., Science 1989,* ***245,*** *p.731*

*J.C.Campuzano et al., Phys. Rev. Lett. 1990,* ***64,*** *p.2308*

*M.R.Norman et al., Nature 1998,* ***392,*** *p.157*

*P.Coleman, Nature 1998,* ***392,*** *p.134*

*G.Preosti et al.,*http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9808298

*J.Kishine and K.Yonemitsu,****…***/cond-mat/9808303

*V.J.Emery and S.A.Kivelson,****…***/cond-mat/9809083

**Аномалии спектра одночастичных возбуждений в Bi2Sr2CaCu2O8+d**Согласно стандартной теории сверхпроводимости БКШ, величина критической температуры *Tc* определяется величиной сверхпроводящей щели D , которая, в свою очередь, обусловлена характерной энергией фононов (или каких-то других "спаривающих бозонов"). Переход в сверхпроводящее состояние приводит к модификации только тех одночастичных возбуждений, энергия которых меньше или порядка D (то есть ” 2*kBTc*, так как 2D /*kBTc”* 3.5 в модели БКШ). В обычных сверхпроводниках D на несколько порядков меньше энергии Ферми, поэтому требование совместного выполнения законов сохранения энергии и импульса при взаимодействии двух электронов приводит к тому, что спариваются электроны, находящиеся в очень узкой области импульсного пространства: полный импульс двух электронов в куперовской паре **K”** 0, так что фактически спариваются лишь электроны с импульсами **k”** -**k?** .

Совершенно другая картина открылась группе американских, австралийских и японских ученых при исследовании одночастичной спектральной плотности оптимально допированных монокристаллов Bi2Sr2CaCu2O8+d методом фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением. Оказалось, что при понижении температуры ниже *Tc* одночастичный спектр изменяется в очень широком интервале энергий, вплоть до 300мэВ (или 40*kBTc*) при некоторых значениях импульса. Это говорит о том, что в ВТСП, вероятно, в спаривании участвуют практически все электроны, а не только те из них, которые находятся в узкой "корочке" вблизи поверхности Ферми. Как следствие, не исключено, что величина *Tc* в ВТСП ограничивается не силой спаривающего взаимодействия электронов, а какими-то другими, пока нам неизвестными факторами. Полученные результаты ставят под сомнение применимость каких бы то ни было теорий среднего поля к ВТСП.

Кроме того, оказалось, что имеет место аномально большой (величиной **Q”** (0.45p ;0)) перенос спектрального веса от одного импульса к другому. По мнению авторов, этот эффект может быть связан с "полосками" (stripes), то есть с микроскопическими неоднородностями распределения заряда в ВТСП.

*Z.-X.Shen et al., Science, 1998,* ***280,*** *259*

**Примеси в слоях CuO2 и между ними**Исследование влияния различных типов примесей на свойства ВТСП YBa2Cu4O8 выполнено в работе новозеландских ученых из New Zealand Institute for Industrial Research [1]. Они показали, что частичное замещение Y на Ca и Ba на La практически не влияет на *Tc*, тогда как замещение Cu на Zn или Ni приводит к быстрой деградации сверхпроводимости. Полученные результаты полностью согласуются с двумерной картиной, согласно которой высокотемпературная сверхпроводимость обусловлена спариванием в слоях CuO2. Если целостность последних нарушается (как при замещении атомов меди), то *Tc* падает. Если же атомный беспорядок возникает за пределами этих слоев (как при замещении атомов иттрия и бария), то *Tc* не меняется. Полученные результаты говорят еще и о слабой роли взаимодействия *между* слоями CuO2 для сверхпроводимости ВТСП.

И тем не менее, это межслоевое взаимодействие все же надо учитывать. Эксперименты по замещению Bi ® Bi0.6Pb0.4 (атомы свинца располагаются вне слоев CuO2) в монокристаллах ВТСП Bi2Sr2CaCu2O8, проведенные в University of Kentucky, США [2], свидетельствуют, что *Tc* при таком замещении уменьшается весьма прилично - на ~20К (хотя сверхпроводящая щель остается неизменной!). Значит, межплоскостное взаимодействие, которое нарушают атомы свинца при таком замещении, все же оказывает определенное влияние на высокотемпературную сверхпроводимость.

*G.V.M.Williams and J.L.Tallon,
Phys. Rev. B 1998,* ***57,*** *10984*

*J.Kane, Physica C 1998,* ***294,*** *176*

**ВТСП провода прошли первый километр**В отделении Cables and Component фирмы Alcatel изготовлены ВТСП проводники прямоугольного сечения (конструкция запатентована фирмой) на основе Bi-2212 и Bi-2223 длиной 1000м и 400м соответственно. Проводники изготовлены на заводе фирмы (Jeumont, Франция) по технологии "порошок-в трубе". Alcatel, работающая совместно с немецкой фирмой Hoechst AG, использовала прекурсоры собственного производства. Фирма заявляет, что ее производственные мощности достаточны для производства до 150км проводников в год. Критическая плотность тока достигает 20кА/см2 (77К, Bi-2223) и 60кА/см2 (4.2К, Bi-2212). Alcatel готовится изготовить из произведенных проводников ВТСП соленоид и плоский магнит с полем в несколько тесла.

В процессе "порошок-в-трубе" наиболее дорогой компонент - серебряная трубка. По оценкам специалистов Texas Center for Superconductivity, стоимость Bi-проводника в серебряной трубке составляет 19.2долл./кА-метр, в то время как стоимость аналога в никелевой трубке - только 0.12долл./кА-метр. По этой причине техасский центр сосредоточился на технологии Bi-2212 покрытий на Ni подложке. Усилия - не бесплодны: на сегодня достигнута плотность критического тока 5? 105А/см2 (4.2К, собственное поле) и 3? 105А/см2 (4.2К, 8Т). Эти результаты близки к лучшим полученным методом "порошок-в-трубе" с серебряной трубкой. Для своих покрытий техасцы используют двухступенчатый процесс "распыление/прессование" (two step spray/press), значительно более производительный и дешевый в сравнении с процессом "порошок-в-трубе". Процесс состоит в распылении слоя BSCCO/спирт на Ni подложку, сушке, первому прессованию и прокатке, текстурированию в атмосфере O2/Ar. Для усиления адгезии никелевая подложка предварительно покрывалась слоем Ag-Pd толщиной 200нм. Контроль методом рентгеновской дифракции выявляет чистую Bi-2212 фазу (Тс в диапазоне 66-77К) с хорошо ориентированными зернами вдоль *c*-оси. Некоторая модификация процесса позволяет также осаждать Bi-2223 фазу. Тестируются также и другие дешевые магнитные и немагнитные подложки.

О разработке длинных ВТСП лент сообщает MM Cables, отделение фирмы Metal Manufactures Limited (Австралия). MM Cables может производить ленты системы Bi-2223 непрерывной длиной до 1000м. Она является одной из 5-ти фирм в мире, способных это делать. Фирма поставляет ВТСП кабель и небольшие изделия из него в страны азиатско-тихоокеанского региона. Успех явился результатом интенсивных исследований объединенной группы сотрудников MM Cables, the University of Wollongong, and the CSIRO Division of Telecommunications and Industrial Physics. Ленты, состоящие из 37 Bi-2223 жил в Ag оболочке, изготовлены методом порошок-в-трубе. Критический ток, измеренный при 77К в собственном магнитном поле по критерию 1мкВ/см, составил 8000A/см2. MM Cables разрабатывает также целую серию ВТСП проводов и лент, оптимизированных для различных применений. Стандартная продукция включает ленты, содержащие до 61 жилы в чисто серебряной оболочке или в оболочке на основе сплава серебра, с критическим током до 20000А/см2 (77К). По требованию заказчика все проводники могут быть покрыты непрерывным изолирующим слоем. MM Cables на основе ВТСП лент изготавливает различные небольшие устройства, в том числе ВТСП магниты с диаметром отверстия 50мм, генерирующие поле 0.5Тл (4.2К) во внешнем поле до 5Тл. Фирма поставляет также ВТСП провода различных конфигураций, включающих твистированные провода с уменьшенными потерями на переменном токе, круглые и ленточные конструкции, круглые провода, характеристики которых не зависят от ориентации внешнего магнитного поля, токовводы. Технология и конструкция ВТСП изделий фирмы защищена патентами.

Nordic Superconductor Technologies (NST, Дания) изготавливает методом “порошок-в-трубе” ВТСП (BSCCO-2223) ленту длиной 1230м и критической плотностью тока 23.3кА/см2. Фирма производит ВТСП ленты большой длины в серебряной оболочке и в оболочках из сплава серебра, упрочненного окислением, и из Ag-Au сплава. NST была учреждена в 1997 году именно с целью разработки, производства и продажи ВТСП лент.

Уникальный ВТСП кабель c очень низкими потерями на переменном токе разработали совместно две японские фирмы - Chubu Electric Power Co. и Fujikura. Кабель состоит из транспонированного сегментного проводника BSCCO в серебряной оболочке, спирально намотанного вокруг трубки-канала для хладоагента. Проводник покрыт хорошо проводящим изоляционным слоем на основе гибридных полимеров. Каждый проводник состоит из 5 ВТСП лент с изолированными поверхностями. Технология легко трансформируется для производства кабеля на основе YBCO.

*ВТСП токовводы уже пошли в дело*

Специалисты Tohoku Univ. и CREST (Япония) установили ВТСП токовводы на сверхпроводящий (Nb3Sn) магнит с 52мм теплым отверстием и полем 15.1Tл. Длина Bi2Sr2Ca2Cu3O10+d токовводов – 180мм, внешний диаметр 23мм, внутренний диаметр – 20мм . Токоввод пропускает критический ток до 1000А при 77К в отсутствии магнитного поля.

**Годовщина первого ВТСП магнита**В 1997г. на ускорителе ван-де-Граафа (The Institute for Geological and Nuclear Sciences, Wellington, Новая Зеландия) установлен ВТСП магнит для переключения ионного луча. В создании и установке магнита принимали участие американская фирма American Superconductor Corp., Alphatech International (Auckland, Новая Зеландия), ISYS (Palo Alto, США) и The Institute for Industrial Research (Wellington, Новая Зеландия). Установка сверхпроводящего магнита позволяла увеличить прохождение ионного луча без увеличения мощности питания или установки тяжелого ферромагнитного сердечника в обычном магните. Магнит состоит из двух рэйстрековых катушек из проводов Bi-2223, генерирующих однородное поле 0.72Тл и помещенных между двумя ферромагнитными полюсами (410? 700мм2). Две 100А ВТСП катушки имеют рабочую температуру 50К и охлаждаются однокаскадным рефрижератором Джифорда-МакМагона. В течение первого года работы магнит находился безаварийно в рабочем состоянии в течение 9600 часов и выдержал 15 термоциклов без выхода из строя. Сотрудники, работающие на ускорителе, утверждают, что установка ВТСП магнита привела к значительному улучшению характеристик ионного луча за счет увеличения апертуры магнита и однородности поля. Сотрудник одного из разработчиков магнита - The Institute for Industrial Research, сообщает, что за прошедший год со дня установки магнита критические параметры ВТСП проводников были улучшены в 2 раза для длинных проводников и в 3 раза - для коротких кусков.

**STI получила заказ на изготовление 16 систем ВТСП фильтров для сотовых станций**Superconductor Technologies, Inc (STI) получила заказ от провайдерской службы сотовой связи на изготовление 16-ти систем фильтров – SuperFilterTM. Это – самый большой заказ в мире на производство сверхпроводящих устройств для систем связи за всю историю. В течение II квартала 1998г. фирма уже провела с блестящими результатами испытания 14 систем фильтров в 12-ти провайдерских службах. Испытания показали, что применение системы SuperFilter увеличивает на 100% пропускную способность телефонного канала. Ожидая роста заказов, STI запускает новые производственные мощности для выпуска SuperFilter – помещение площадью 1800м2. Сейчас фирма может выпускать одну систему в день, а к концу года увеличит производительность до 3 систем в день. Производственный цикл включает осаждение ВТСП пленок, изготовление микросхем, сборку и упаковку схем, изготовление дьюаров, сборку рефрижераторов (cryocooler), сборку и испытание всей системы.

Другой производитель ВТСП систем для базовых станций сотовой связи - Conductus, Inc , получил заказы на свою продукцию ClearSiteTM для провайдера Booz-Allen & Hamilton. ClearSiteTM комбинирует лучшие качества ВТСП фильтров и криогенных малошумящих выпрямителей. Система была успешно испытана в полевых условиях.

**Потенциал парного взаимодействия вихрей в сверхпроводнике второго рода. Прямое измерение**Магнитные вихри в сверхпроводниках второго рода привлекают к себе внимание со времени предсказания их существования Абрикосовым. Именно свойства коллектива магнитных вихрей определяют такие важные характеристики сверхпроводников как критический ток и верхнее критическое поле. Эти свойства, в свою очередь, обусловлены двумя факторами: 1) взаимодействием вихрей друг с другом и 2) взаимодействием вихрей с центрами пиннинга, образующимися вследствие нарушения идеальной периодичности кристаллической решетки сверхпроводника. Микроскопические механизмы, ответственные за упомянутые два взаимодействия, активно исследовались теоретиками. Что же касается эксперимента, то до недавнего времени физики могли судить об этих взаимодействиях лишь косвенно, анализируя поведение магнитного потока в сверхпроводниках.

Разработка методики наблюдения магнитных вихрей "в реальном времени" с помощью лоренцевской микроскопии [1,2] в принципе делает возможными прямые измерения как потенциала пиннинга, так и потенциала взаимодействия вихрей между собой. Лоренцевская микроскопия основана на отклонении электронного луча просвечивающего электронного микроскопа магнитным полем, что позволяет наблюдать в сверхпроводнике отдельные вихри и отслеживать их движение.

Впервые эта методика применена к исследованию магнитных вихрей в работе [3] коллектива американских (University of Chicago, Argonne National Laboratory) и японских (Hitachi Ltd.) физиков. Была изучена тонкая пленка ниобия толщиной 100нм и средним размером зерен около 300мкм. Образец помещали на подставку электронного микроскопа и охлаждали в отсутствие поля до *T* =4.5K<*Tc”* 9K. После этого включали поле, перпендикулярная пленке компонента которого равнялась 56.6Гс. При этом средняя концентрация вихрей составляла r 0=(2.6 ± 0.1)мкм-2. Движение вихрей фиксировали на видеоленте с частотой 30кадров/с, после чего отснятый "фильм" оцифровывали и обрабатывали на компьютере. Характерная скорость движения вихрей составляла около 0.1мкм/с, а средний по времени градиент концентрации вихрей в направлении их движения - (2± 1)? 10-3r 0мкм-1. Параметр ориентационного порядка (равный единице в идеальной треугольной решетке) был определен путем усреднения по времени и по области наблюдения; он составил 0.41± 0.03. Нарушение идеальности вихревой решетки связано, очевидно, с наличием в пленке хаотически распределенных центров пиннинга, притягивающих вихри к себе. Однако ни один из вихрей не оставался "запиннингованным" в течение всего времени наблюдения (33с). Это обусловлено достаточно большой величиной силы Лоренца, "распределяющей" вихри между центрами пиннинга.

Найдя (путем компьютерной обработки полученных результатов) среднюю по времени концентрацию вихрей r (**r**) как функцию координаты **r**, авторы [3] смогли построить "карту потенциала пиннинга". При этом был использован тот простой факт, что вероятность обнаружить вихрь в окрестности точки **r** пропорциональна exp(-V(**r**)/U0), где V(**r**) - потенциал пиннинга в этой точке, а U0 - характерная энергия (при низких температурах последняя определяется не тепловой энергией *kBT*, а функцией V(**r**)).

Сложнее было найти парный потенциал межвихревого взаимодействия U(r). Однако и эта задача была решена, что стало возможным путем расчета (на основании экспериментальных данных) парной корреляционной функции, пропорциональной интегралу по *d***x** от произведения r (**x**-**r**,*t*)? r (**x**,*t*), и последующего усреднения этой функции по времени наблюдения. В результате была найдена зависимость U(r) при 0.3мкм<r<1.8мкм. Она достаточно хорошо совпала с известным лондоновским потенциалом U(r)~K0(r/l ), где K0 - функция Макдональда, l - глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник. Наилучшее соответствие достигается при выборе l =(39.1± 0.7)нм, что неплохо согласуется с табличным значением l =(45± 1)нм при *T*=4.5K. К числу не совсем понятных особенностей экспериментальной функции U(r) следует отнести небольшой минимум U при r=0.7мкм. Авторы [3] полагают, что он обусловлен систематическими ошибками, которые могут быть существенно уменьшены путем увеличения времени наблюдения за движущимися вихрями.

Основной целью статьи [3], как отмечают ее авторы, была верификация новой методики на хорошо изученном материале (ниобии). Дееспособность этой методики подтверждена, что делает ее перспективной для исследования свойств других, пока еще недостаточно хорошо изученных сверхпроводников, в том числе слоистых ВТСП. Например, представляется исключительно интересным проверить теоретическое предположение [4,5] о ван-дер-ваальсовском характере взаимодействия вихрей в NbSe2 и Bi2Sr2CaCu2O8.

*K. Harada et al., Science* ***274*** *(1996) 1167*

*T. Matsuda et al., Science* ***271*** *(1996) 1393*

*C.-H. Sow et al., Phys. Rev. Lett.* ***80*** *(1998) 2693*

*G. Blatter and V. Geshkenbein, Phys. Rev. Lett.* ***77*** *(1996) 4958*

*S. Mukherji and T. Nattermann, Phys. Rev. Lett.* ***79*** *(1997) 139*

**Ферми-поверхность Sr2RuO4: эффект де Гааз-ван Альфена против фотоэмиссии с угловым разрешением**Открытое недавно соединение Sr2RuO4 замечательно тем, что является пока единственным примером слоистого перовскита, не содержащего меди, в котором обнаружена сверхпроводимость. Это соединение относится к классу т.н. “самодопированных” проводников благодаря низкому значению параметра U/W (U - энергия кулоновского отталкивания на узле, W - ширина зоны), т.е. роль электронных корреляций здесь не столь важна, как, например, в купратах. Относительно небольшое значение температуры СП перехода (~1К) предопределило успешное применение гальваномагнитных (ГМ) методов для исследования поверхности Ферми в нормальном состоянии. Как известно, в купратах использовать эффект де Гааз-ван Альфена напрямую не удается из-за высоких значений Тс и Нс2, а эксперименты в смешанном состоянии существенно усложняют интерпретацию экспериментальных данных. Использование гальваномагнитных методов привлекательно по той причине, что в этом случае удается восстановить поверхность Ферми во всей зоне Бриллюэна и провести сравнение с соответствующими данными по фотоэмиссии. В отличие от принципиально поверхностного метода фотоэлектронной спектроскопии (ФЭС, глубина выхода фотоэлектронов не превышает 10-20A, т.е. меньше размера элементарной ячейки вдоль оси с), ГМ методы - существенно объемные. В связи с огромным количеством информации о деталях ферми-поверхности купратов, полученной с помощью ФЭС с угловым разрешением (ФЭСУР), и отсутствием альтернативных методов исследования ферми-поверхности ВТСП, такое сравнение представляет несомненный интерес, поскольку дает представление о надежности информации об объемной электронной структуре вещества, полученной с помощью поверхностного метода исследования.

Сразу после открытия Sr2RuO4 [1] были проделаны расчеты зонной структуры [2-4] и восстановлена ферми-поверхность с помощью ФЭСУР [5,6]. При этом оказалось, что имеются серьезные расхождения между теорией и экспериментом, что казалось довольно странным, учитывая слабость корреляционных эффектов и, как следствие, гораздо большее доверие к зонным расчетам. Это противоречие так и “висело в воздухе” до обнаружения ГМ осцилляций в Sr2RuO4 [7,8] – надежного и проверенного способа исследования ферми-поверхности. Результаты ГМ экспериментов позволили идентифицировать все листы ферми-поверхности – два электронных кармана вокруг центра зоны (Г) и один дырочный карман вокруг границы зоны (Х). В то же время, согласно ФЭСУР, ферми-поверхность Sr2RuO4 состоит из одного электронного листа и двух дырочных. Результаты ГМ исследований снимают большое количество противоречий, порожденных ФЭС исследованиями. Ферми-поверхность, восстановленная из ГМ осцилляций, дает точное число электронов (4) на атом Ru; позволяет с точностью до деталей описать экспериментальную температурную зависимость эффекта Холла; очень хорошо совпадает с результатами зонных расчетов. Совершенно очевидно, что имеются серьезные проблемы с восстановлением электронной зонной структуры из ФЭС, по крайней мере для рутенатов. Эти проблемы могут быть связаны как с экстремальной поверхностной чувствительностью метода, так и с многочисленными предположениями, заложенными в анализ экспериментальных данных. ФЭСУР эксперименты дают весьма похожие результаты, касающиеся, например, “extended van Hove singularity” для купратов и рутенатов, поэтому описанные выше проблемы ФЭС могут быть серьезным “звонком” для тех, кто делает далеко идущие выводы, полагаясь исключительно на данные фотоэмиссии.

*Y.Maeno et al. Nature* ***372*** *(1994) 532*

*A.P.Mackenzie et al. Phys. Rev. Lett.* ***76*** *(1996) 3786*

*T.Oguchi Phys. Rev. B* ***51*** *(1995) 1385*

*D.J.Singh Phys. Rev. B* ***52*** *(1995) 1358*

*T.Yokoya et al. Phys. Rev. Lett.* ***76*** *(1996) 3009*

*D.H.Lou et al. Phys. Rev.Lett.* ***76*** *(1996) 4845*

*A.P.Mackenzie et al. Phys.Rev.Lett.* ***78*** *(1997) 2271*

*A.P.Mackenzie et al J.of Phys.Soc.Jap.* ***67*** *(1998) 385*

**О возможности высокотемпературной поверхностной сверхпроводимости в бериллии**Известно, что на поверхности (0001) бериллия плотность электронных состояний на уровне Ферми N(EF) примерно в четыре раза больше, чем в объеме [1,2]. Величина N(EF) является важной характеристикой, определяющей многие электронные свойства. В частности, электрон-фононное взаимодействие тем сильнее, чем больше N(EF): согласно простейшей модели, безразмерная константа электрон-фононного взаимодействия l прямо пропорциональна N(EF).

Исследования поверхности Be(0001), выполненные в Brandeis University и Brookhaven National Laboratory [3] методом фотоэмиссии с угловым разрешением, показали, что поверхностная величина l составляет 1.15 ± 0.1 - примерно в пять раз больше, чем значение l = 0.24 в объеме [4]. Поскольку критическая температура массивных образцов бериллия составляет Tc = 0.026К [5], то из классической формулы БКШ Tc ~ exp(-1/l ) следует, что на поверхности Be(0001) может реализоваться высокотемпературная сверхпроводимость с Tc ” 70К. Конечно, на величину Tc (особенно в квазидвумерных системах) влияет и множество других факторов, поэтому действительность может не оправдать ожидания. Но ведь может и превзойти!

1. E.V.Chulkov et al., Surf. Sci. 188 (1987) 287.
2. P.J.Feibelman and R.Stumpf, Phys. Rev. B 50 (1994) 17480.
3. T.Balasubramanian et al., Phys. Rev. B 57 (1998) 6866.
4. G.Grimvall, The Electron-Phonon Interaction in Metals, 1981.
5. R.L.Falge, Jr., Phys. Lett. A 24 (1967) 579.

**Наблюдение псевдощели внутри коров магнитных вихрей в Bi2Sr2CaCu2O8+d**Говоря о природе сверхпроводимости ВТСП, с уверенностью можно утверждать лишь то, что сверхпроводящее состояние ВТСП “построено” из состояний спаренных электронов, а также что это состояние является сильно анизотропным (по-видимому, симметрия сверхпроводящего состояния, по крайней мере, в некоторых ВТСП, является d-волновой, хотя здесь остаются некоторые сомнения). Механизм высокотемпературной сверхпроводимости все еще не выяснен.

Основным признаком “классических” БКШ-сверхпроводников является характер их возбужденного состояния: оно представляет собой квазичастицы, образующиеся при разрыве куперовских пар. Поэтому при нагревании выше критической температуры Tc пары исчезают одновременно с когерентным сверхпроводящим состоянием. Это происходит в силу того, что размер одной пары (длина когерентности x ) много больше среднего расстояния между парами. А длина когерентности, в свою очередь, велика по причине малости энергии связи электронов в каждой паре D , поскольку x ~ 1/D . В ВТСП величина D значительно (примерно на порядок) больше, чем в низкотемпературных сверхпроводниках, поэтому длина когерентности сравнима с расстоянием между электронными парами, или даже меньше его. Поэтому возникает вопрос: а не могут ли пары существовать не только ниже, но и выше Tc, либо в виде флуктуаций, либо как некоррелированные двухчастичные формирования? Экспериментальное наблюдение в ВТСП при T > Tc так называемой “псевдощели” конкретизирует этот вопрос: связано ли наличие псевдощели с “предсуществующими” парами, или же псевдощель имеет другую физическую природу?

Совершенно новый подход к исследованию псевдощели предложен в работе швейцарских (Univ. de Geneve) и японских (Univ. Tsukuba) физиков. Они изучали характеристики магнитных вихрей в монокристаллах Bi2Sr2CaCu2O8+d методом сканирующей туннельной спектроскопии (СТС) при T=4.2К. Как известно, СТС “видит” локальную плотность квазичастичных состояний, в силу чего, собственно, и становится возможным наблюдение изолированных магнитных вихрей (плотность состояний различна вне вихря, то есть в сверхпроводящей области, и в его сердцевине - коре, то есть в локально несверхпроводящей области).

Что же показал эксперимент? В сердцевинах вихрей не было обнаружено квазичастичных состояний, зато зарегистрирована “щелевая структура”, причем последняя изменялась пропорционально истинной сверхпроводящей щели (были изучены монокристаллы с различным содержанием кислорода, то есть с различными Tc). Более того, исследование температурной зависимости псевдощели при T > Tc и “низкотемпературной щели” в корах магнитных вихрей показало, что последняя - это и есть та самая псевдощель, локально сохранившаяся вплоть до гелиевых температур в областях нормальной фазы. Наиболее правдоподобное объяснение полученным результатам, по мнению авторов, - это наличие в нормальном состоянии ВТСП (как во всем образце при T > Tc, так и лишь внутри магнитных вихрей при T < Tc) некоррелированных электронных пар вместо привычных квазичастиц.

Ch. Renner et al., Phys. Rev. Lett. 1998,80, 3606