

Страсти по сверхпроводимости в конце тысячелетия

А.БУЗДИН, А.ВАРЛАМОВ

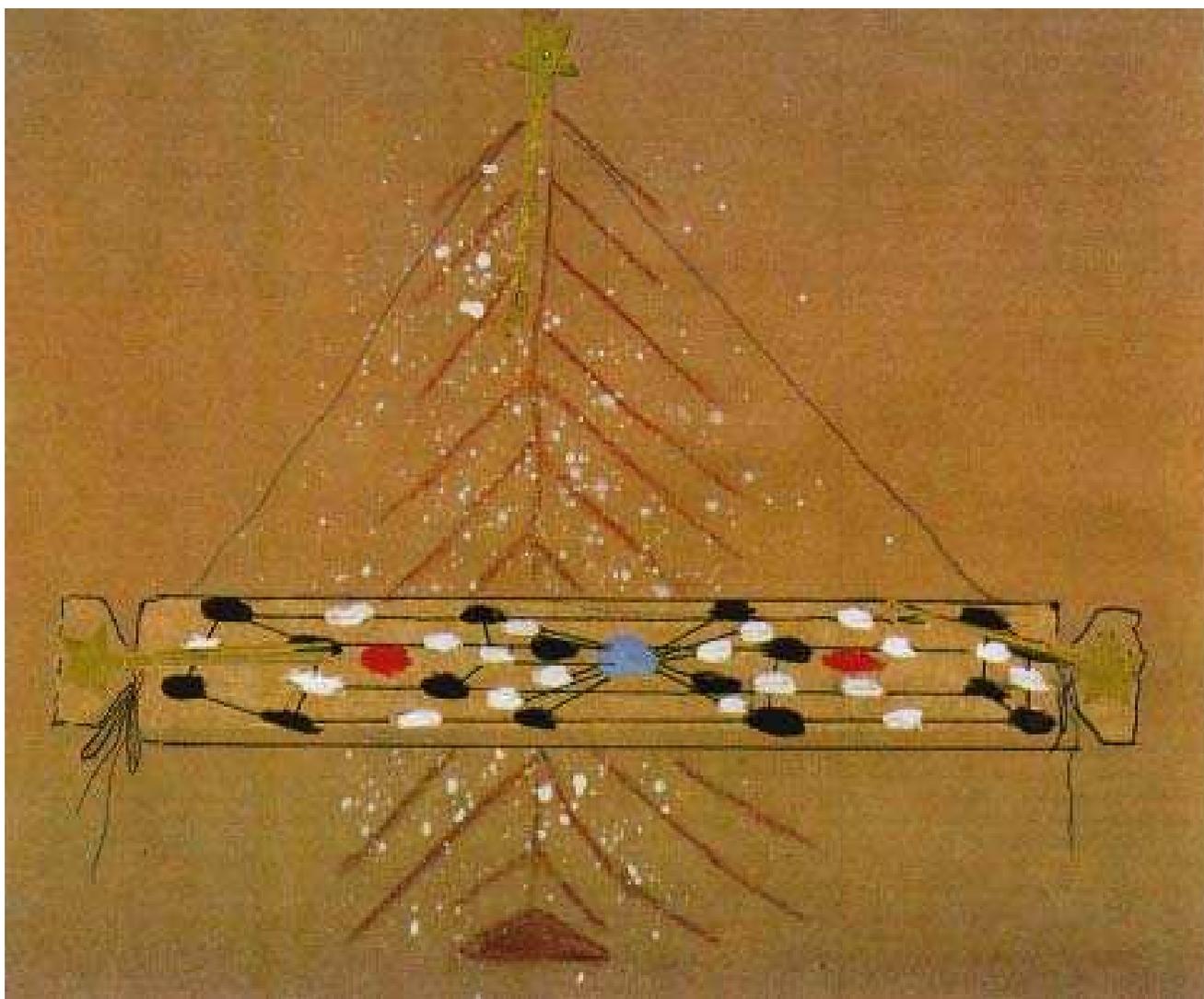
БЕЗУСЛОВНО, САМОЕ ЯРКОЕ событие в физике конца уходящего столетия – это открытие нового класса сверхпроводников, электрическое сопротивление которых в точности обращается в ноль при температурах вплоть до 165 кельвинов (всего на 20 градусов ниже

рекордно низкой температуры воздуха, зарегистрированной на российской полярной базе «Восток» в Антарктиде). По своему практическому значению это открытие сегодня сравнивают с обнаруженным в начале XIX века явлением электромагнитной индукции. В XX же веке его

можно поставить в один ряд с открытием деления урана, созданием лазера, открытием полупроводников...

Начнем с конца

Начало новому захватывающему этапу в развитии сверхпроводимости положила работа А.Мюллера и



Г.Беднорца из исследовательской лаборатории фирмы IBM в Швейцарии. На рубеже 1985–1986 годов этим ученым удалось синтезировать соединение лантана, бария, меди и кислорода, так называемую металлооксидную керамику La-Ba-Cu-O , которое проявляло признаки сверхпроводимости при рекордно высокой по тем, еще недавним, временам температуре в 35 кельвинов! Статья под осторожным названием «Возможность высокотемпературной сверхпроводимости в системе La-Ba-Cu-O » была отклонена ведущим американским физическим журналом «Physical Review Letters» – научное сообщество за последние двадцать лет устало от многочисленных ложных сенсаций по поводу открытия то в одном, то в другом месте мифического высокотемпературного сверхпроводника и таким образом ограждало себя от очередного бума. Мюллер и Беднорц отослали статью в немецкий журнал «Zeitschrift für Physik». Сейчас, когда сверхпроводящий бум действительно разразился и даже несколько угас, а исследования высокотемпературных сверхпроводников ведутся в сотнях лабораторий, почти каждая из тысяч статей, посвященных исследованию нового явления, начинается со ссылки на эту публикацию, осенью же 1986 года она прошла почти незамеченной.¹ Лишь одна японская группа на всякий случай перепроверила и... подтвердила заявленный в этой статье результат. Затем феномен высокотемпературной сверхпроводимости был подтвержден американскими, китайскими, советскими физиками...

В начале 1987 года весь мир охватила лихорадка поиска новых и исследования свойств уже обнаруженных сверхпроводников. Критическая температура быстро повышалась: для соединения La-Sr-Cu-O она составила уже 45 К, для La-Ba-Cu-O (под давлением) поднялась до 52 К и, наконец, в феврале 1987 года, когда американец Пол Чу догадался сымитиро-

вать действие внешнего давления заменой атомов лантана соседними по столбцу таблицы Менделеева, но меньшими по размеру атомами иридия (Y), критическая температура синтезированного соединения $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ перевалила через заветный «азотный рубеж», достигнув 93 кельвинов.

Это был долгожданный триумф, однако еще не конец истории: в 1988 году синтезируется соединение, состоящее уже из пяти элементов, типа Ba-Ca-Sr-Cu-O с критической температурой 110 К, а несколько позже – ртутные и таллиевые его аналоги с температурой 125 К. Под давлением в 300 атм предельная критическая температура ртутного рекордсмена уже неплохо звучит и в шкале Цельсия: -108°C !

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости во многом уникально для современной физики. Во-первых, оно сделано всего двумя учеными и очень скромными средствами. Во-вторых, в состав обнаруженных соединений входят легкодоступные элементы, и в принципе такие сверхпроводники могут быть приготовлены за день работы в школьном кабинете химии. Какой разительный контраст с открытиями в других областях физики, скажем физики высоких энергий! Здесь исследования ведутся большими «командами» ученых – перечисление авторов статьи иногда занимает целую журнальную страницу, а используемое оборудование стоит многие миллионы долларов. Новое открытие внушает оптимизм – время исследователей-одиночек в физике еще не миновало! Наконец, несмотря на то, что его ждали семьдесят пять лет, это открытие застало всех врасплох. Теоретики могли только развести руками, и чем выше становилась критическая температура по мере открытия все новых и новых сверхпроводников, тем шире руки приходилось разводить.

Так случайно или закономерно открытие Мюллера и Беднорца? Можно ли было синтезировать вещество со столь уникальными свойствами раньше? Как непросто дать ответы на эти вопросы. Мы давно привыкли к тому, что все новое получается на грани возможностей: с применением уникальных установок, сверхсильных полей, сверхнизких температур, сверхвысоких энер-

гий. Здесь же ничего такого нет, «испечь» высокотемпературный сверхпроводник, как говорилось, не так уж сложно – с этим вполне мог бы справиться квалифицированный средневековый алхимик. Стоит вспомнить, что два десятка лет назад во многих лабораториях мира интенсивно исследовалось весьма необычное сверхпроводящее соединение – так называемое алхимическое золото. Это название соединение получило за свой желтый блеск и большой удельный вес, что делало его похожим на благородный металл. Синтезированное алхимиками еще в средние века, оно, бывало, выдавалось за настоящее золото и рекламировалось как результат успешного применения философского камня. Алхимическое золото – довольно сложное соединение, и, как знать, не «испекли» ли бы высокотемпературный сверхпроводник в средние века, обладай он золотым блеском?

Что касается средних веков, то там, конечно, все обстоит в высшей степени проблематично, но читателю, по-видимому, любопытно будет узнать, что некоторые из сегодняшних высокотемпературных сверхпроводников лежали на полке лабораторного шкафа с... 1979 года! Именно тогда в Институте общей и неорганической химии АН СССР они были синтезированы И.С.Шаплыгиным с соавторами совсем для других целей. Однако измерений проводимости этих соединений при низких температурах, позволивших бы обнаружить новое явление, проведено не было – открытие не состоялось...

От удивления – к пониманию

Теперь, когда во всем мире обсуждают свойства высокотемпературных сверхпроводников и перспективы их применений в науке и технике, многие моменты истории развития сверхпроводимости высвечиваются не так, как было до этого выдающегося открытия.

Впервые о сверхпроводимости, одном из самых ярких и необычных явлений физики твердого тела, стало известно 28 апреля 1911 года, когда нидерландский физик Г.Камерлинг-Оннес на заседании Королевской академии наук в Амстердаме сообщил о только что обнару-

¹ Нобелевская премия по физике 1987 года присуждена А.Мюллеру и Г.Беднорцу. О чрезвычайной важности сделанного ими открытия свидетельствует тот факт, что между выходом в свет статьи и присуждением премии прошло немногим более года.

женном им эффекте – полном исчезновении электрического сопротивления ртути, охлажденной жидким гелием до температуры 4,15 кельвина. Хотя этого открытия никто не ожидал и оно противоречило существовавшей в те времена классической электронной теории металлов, тот факт, что первооткрывателем сверхпроводимости стал Камерлинг-Оннес, был не случаен. Дело в том, что именно ему первому удалось решить труднейшую научную и техническую задачу того времени – получить жидкий гелий (температура кипения 4,16 К), возможность работать с которым позволила заглянуть в неведомый мир температур, близких к абсолютному нулю. Он решил тут же применить появившееся средство исследования для выяснения низкотемпературного поведения сопротивления чистых металлов. В это время шла оживленная теоретическая дискуссия – обращается ли в ноль или остается конечным сопротивление чистого металла в абсолютном нуле температуры. Будучи сторонником первой точки зрения, Камерлинг-Оннес с удовлетворением воспринял полученный на ртути результат, однако вскоре осознал, что обращение сопротивления в ноль при конечной температуре является совсем иным эффектом.

Подчеркнем, что в сверхпроводящем состоянии сопротивление образца электрическому току равно нулю не приблизительно, а строго. Поэтому по сверхпроводящей замкнутой цепи ток может сколь угодно долго циркулировать не затухая. Самое длительное существование незазатухающего сверхпроводящего тока – около двух лет – было зафиксировано впоследствии в Англии (этот ток циркулировал бы в кольце и поныне, если бы не перерыв в снабжении лаборатории жидким гелием, вызванный забастовкой транспортных рабочих). Даже спустя два года не было замечено никакого ослабления тока.

Вскоре после открытия сверхпроводимости обнаружили не только в ртути, но и в целом ряде других металлов. Перспективы практического применения открытого явления казались безграничными: линии передачи электроэнергии без потерь, сверхмощные магниты, элект-

ромоторы и трансформаторы новых типов и так далее. Однако два препятствия встали на пути реализации этих планов. Первое – это чрезвычайно низкие критические температуры, при которых явление сверхпроводимости наблюдалось во всех известных материалах. Для охлаждения сверхпроводников до столь низких температур приходилось пользоваться остродефицитным гелием (запасы его на Земле ограничены, и получение одного литра жидкого гелия даже сейчас обходится в несколько долларов). Это обстоятельство делало многие заманчивые проекты использования сверхпроводимости попросту нерентабельными. Второе препятствие – его вскоре обнаружил сам Камерлинг-Оннес – связано с тем, что сверхпроводимость оказалась весьма «капризной» по отношению к магнитному полю (а следовательно, и к предельной величине протекающего тока): в сильных полях она разрушалась.

Следующим фундаментальным свойством сверхпроводящего состояния, обнаруженным в 1933 году, оказался так называемый эффект Мейснера – Оксенфельда: полное «выталкивание» массивным сверхпроводником магнитного поля из своего объема.

Сущность феномена сверхпроводимости оставалась совершенно необъяснимой с точки зрения классической теории металлов, а квантовая теория в то время лишь начинала создаваться. Была предложена так называемая феноменологическая двухжидкостная модель, в которой принималось сосуществование в сверхпроводящем металле двух сортов электронов: обычных, взаимодействующих с решеткой, и особых, сверхпроводящих, с решеткой по каким-то причинам не взаимодействующих. Это позволило братьям Х. и Ф. Лондонам написать уравнения электродинамики сверхпроводника, описывающие эффект Мейснера – Оксенфельда и некоторые другие свойства, однако микроскопическая природа сверхпроводимости оставалась загадкой.

Открытие в 1938 году П.Л. Капицей явления сверхтекучести – протекания жидкого гелия без какой-либо вязкости через сколь угодно тонкие капилляры при температурах ниже 2,18 К – и последующее

объяснение этого явления Л.Д. Ландау породили надежды на скорое понимание феномена сверхпроводимости. Оказалось, что при низких температурах в системе атомов гелия, являющихся квантовыми частицами с целым спином, происходит их накапливание на самом низком энергетическом уровне. Ландау показал, что при этом в энергетическом спектре возбуждений появляется характерная щель, приводящая к возможности сверхтекучего состояния. Это чисто квантовое, однако проявляющееся в макроскопическом масштабе, явление позволило Ландау назвать жидкий гелий «окном в квантовый мир».

Механически перенести ту же идеологию на сверхпроводимость, т.е. трактовать ее как сверхтекучесть электронов в металле, не удалось. Дело в том, что поведение квантовой системы электронов (частиц с полуцелым спином – так называемых фермионов) кардинально отличается от поведения системы атомов гелия (частиц с целым спином – бозонов). Здесь и при нулевой температуре могут возникать возбуждения со сколь угодно малыми энергиями, а следовательно, не выполняется сформулированный Ландау критерий сверхтекучести. Естественное желание свести задачу к предыдущей наталкивало на мысль создать из двух электронов-фермионов один составной бозон с суммарным целым спином, после чего реализовать для сверхпроводимости схему сверхтекучести по Ландау. Однако этому, очевидно, мешало кулоновское отталкивание между двумя электронами, пусть даже и сильно экранированное в электронейтральном металле.

Прошло еще десять лет, и в 1950 году был открыт так называемый изотопический эффект, который впервые указал на связь явления сверхпроводимости с кристаллической решеткой металла. При измерении критической температуры свинца обнаружилось, что она зависит от массового числа исследуемого изотопа, т.е. сверхпроводимость перестала быть чисто электронным явлением. Чуть позже Х. Фрелих и Дж. Бардин независимо показали, что взаимодействие электронов с колебаниями решетки – фононами – может приводить к притяжению. Это притяжение в принципе может

даже эффективно превышать кулоновское отталкивание между электронами, однако не следовало забывать об огромных кинетических энергиях электронов, казалось бы, разрывающих найденную слабую связь. Составные бозоны снова не получились.

В том же 1950 году на основе накопленного экспериментального материала и развития теоретических представлений о физике твердого тела, жидущихся на применении квантовой механики и статистической физики, В.Л.Гинзбург и Л.Д.Ландау создают новую феноменологическую теорию сверхпроводимости – так называемую теорию Гинзбурга – Ландау. Эта теория оказалась настолько провидческой и успешной, что и сегодня является мощным инструментом исследования сверхпроводимости, несмотря на прошедшие 50 лет и последующее создание микроскопической теории сверхпроводимости.

В 1957 году американскими учеными Дж.Бардином, Л.Купером и Дж.Шриффером собираются воедино упомянутые выше намеки и идеи и формулируется последовательная микроскопическая теория сверхпроводимости. Явление сверхпроводимости действительно оказалось связанным с возникновением в металлах притяжения между электронами. Природа этого притяжения носит сугубо квантовый характер. Большие кинетические энергии электронов, обусловленные особенностями основного состояния квантовой системы фермионов, не помеха: спаривание возникает не между самими электронами, а между низкоэнергетическими возбуждениями в этой системе – квазичастицами. Они имеют тот же заряд, что и электрон, и некоторую эффективную массу, однако в металлической фазе их энергии могут быть сколь угодно малыми. Притяжение приводит к перестройке и этого спектра и к «открытию» в нем так необходимой для выполнения критерия сверхтекучести Ландау щели. В качестве нестройной аналогии можно привести пример двух шариков, лежащих на резиновом коврике. Если эти шарики далеки друг от друга, то каждый из них деформирует коврик, образуя вокруг себя лунку. Если же положить сначала один шарик, а затем недалеко от

него другой, то их лунки сольются в одну и шарики скатятся вместе на дно общей лунки. Часть квазичастиц (обычно, после введения в теорию, их снова называют электронами) при достаточно низких температурах как бы объединяются в связанные (так называемые куперовские – по имени их первооткрывателя) пары, которые, пребывая в особом, квантовом состоянии, переносят электрический ток без потерь энергии. Размеры таких пар в атомном масштабе весьма велики – они могут достигать сотен и тысяч межатомных расстояний. Поэтому следует представлять их не как два электрона, связанных друг с другом наподобие двойной звезды, а, скорее, как двух партнеров, пришедших вместе в дискотеку, но танцующих, может быть, в разных концах зала, когда их разделяют десятки других танцоров.² Таким образом, сверхпроводимость – не что иное, как макроскопическое квантовое явление.

Итак, потребовалось почти полвека с момента открытия сверхпроводимости, прежде чем был достигнут качественный прогресс в понимании природы этого удивительного явления и создана его последовательная теория. Этот период можно считать первым этапом в изучении сверхпроводимости.

В поисках высоких критических параметров

Создание теории сверхпроводимости послужило мощным импульсом ее целенаправленного исследования. Без преувеличения огромный прогресс был достигнут в получении новых сверхпроводящих материалов. Важную роль сыграло тут открытие А.А.Абрикосовым нового класса сверхпроводников (так называемых сверхпроводников второго рода), качественно отличавшихся от уже известных своим весьма необычным поведением в магнитном поле. Если ранее считалось, что магнитное поле не может проникнуть в сверхпроводящую фазу, не разрушив ее (и это действительно верно почти для всех чистых

металлов)³, то Абрикосов теоретически показал, что существует и другая возможность – магнитное поле может проникать при определенных условиях в сверхпроводник в виде вихрей тока (вихрей Абрикосова), сердцевина которых переходит в нормальную фазу, периферия же остается сверхпроводящей! В соответствии с поведением сверхпроводников в магнитном поле их стали делить на сверхпроводники первого рода (старые) и второго (открытые Абрикосовым). Важно, что сверхпроводник можно перевести из первого рода во второй, «испортив» его примесями или другими дефектами.

Среди сверхпроводников второго рода удалось найти соединения, способные нести токи большой плотности и выдерживать гигантские магнитные поля. И хотя для их практического использования пришлось решить ряд непростых технологических проблем (эти вещества были хрупкими, большие токи оказывались неустойчивыми и т.п.), факт оставался фактом – одно из двух основных препятствий на пути широкого использования сверхпроводников в технике было преодолено.

Хуже обстояло дело с повышением критической температуры. Если критические магнитные поля к шестидесятым годам удалось увеличить по сравнению с первыми опытами Камерлинг-Оннеса в тысячи раз, то рост критической температуры не вселял особого оптимизма – она достигала лишь 20 кельвинов. Таким образом, для нормальной работы сверхпроводящих устройств все так же требовался дорогой жидкий гелий. И это было особенно обидно, поскольку как раз в это время обнаружили принципиально новый квантовый эффект – эффект Джозефсона, открывший сверхпроводникам обширное поле применения в микроэлектронике, медицине, измерительной и компьютерной тех-

³ Следует оговориться, что подобное утверждение, строго говоря, справедливо лишь для образцов цилиндрической формы при приложении поля вдоль оси цилиндра. В случае более сложной формы образца или другой ориентации не слишком слабого магнитного поля возможна реализация так называемого промежуточного состояния, при котором макроскопические слои сверхпроводящей фазы чередуются в объеме образца с нормальными слоями.

² Это образное сравнение принадлежит одному из создателей теории сверхпроводимости Дж.Шрифферу.

нике. Проблема повышения критической температуры встала необычайно остро. Теоретические оценки предельно возможных ее значений показывали: в рамках обычной, фонной сверхпроводимости (т.е. сверхпроводимости, обусловленной притяжением электронов друг к другу посредством взаимодействия с решеткой) эта температура не должна была превышать 40 К. Однако обнаружение сверхпроводника и с такой критической температурой стало бы огромным достижением, так как можно было бы перейти на охлаждение сравнительно дешевым и доступным жидким водородом (его температура кипения 20 К). Это открыло бы весьма важную эпоху «среднетемпературной» сверхпроводимости, и здесь начались активные поиски совершенствования существующих и создания новых сверхпроводящих сплавов традиционными материаловедческими методами. Голубой же мечтой оставалось создание сверхпроводника с критической температурой 100 кельвинов (а еще лучше – выше комнатной), который можно было бы охлаждать дешевым и широко используемым в технике жидким азотом. Лучшим результатом этих поисков стал сплав с критической температурой 23,2 К – рекорд был достигнут в 1973 году и продержался долгих тринадцать лет, вплоть до 1986 года критическую температуру не удалось повысить ни на один градус.

Складывалось впечатление, что фонный механизм сверхпроводимости исчерпал свои возможности. В этой связи еще в 1964 году американским физиком Литтлом и В.Л.Гинзбургом были высказаны такие идеи: раз ограничением возможности повышения критической температуры является сама природа фонного механизма сверхпроводимости, то следует каким-то способом изменить этот механизм притяжения электронов, т.е. заставить электроны образовывать куперовские пары с помощью не фонного, а какого-то другого притяжения.

На протяжении последних двадцати лет выдвигалось множество новых теорий, детально исследовались десятки, а то и сотни тысяч самых необычных веществ. В первой же работе Литтла внимание экспериментаторов привлекли так на-

зываемые квазиодномерные соединения – длинные молекулярные проводящие цепи с боковыми отростками. Как следовало из теоретических оценок, здесь можно было ожидать заметного повышения критической температуры. Однако, несмотря на усилия многих лабораторий мира, синтезировать такие сверхпроводники не удалось. И все же на этом пути физики и химики совершили немало удивительных открытий: были получены органические металлы, а в 1980 году впервые синтезированы и органические сверхпроводники (рекордная критическая температура органических соединений на сегодня – более 10 К). Удалось получить двухмерные «сэндвичи»: «металл – полупроводник», а также слоистые сверхпроводники и, наконец, магнитные сверхпроводники – в них мирно сосуществуют сверхпроводимость и магнетизм, который, согласно совсем еще недавним представлениям, полностью ей антагонистичен. Но реальных указаний на высокотемпературную сверхпроводимость так и не было.

В середине семидесятых годов среди многочисленных кандидатов в высокотемпературные сверхпроводники мелькнули и некие диковинные керамические соединения типа Pb–Ba–O. Они, будучи при комнатных температурах по своим электрическим свойствам посредственными проводниками, не слишком далеко от абсолютного нуля переходили в сверхпроводящее состояние. Конечно, «не слишком далеко» – это все же на добрый десяток градусов ниже рекордного по тем временам значения. Однако фокус состоял в том, что новое соединение и металлом-то можно было называть с большой натяжкой. Согласно имеющимся в то время теоретическим представлениям, достигнутая в керамиках величина критической температуры оказывалась не малой, а поразительно большой для таких веществ.

Это обстоятельство и привлекло внимание к керамикам как к возможным кандидатам в высокотемпературные сверхпроводники. Мюллер и Беднорц, начиная с 1983 года, подобно средневековым алхимикам,

↑ Температура, К Температуры сравнения	Сверхпроводящие материалы	Критическая температура T_c , К
220		
180	<i>Рекорд «холода», зафиксированный на станции «Восток» в Антарктиде</i>	$T_c = 164$ К (под давлением 30 атм)
160	$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$	≈ 20 К
140	$\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2}$	$n = 3 \quad T_c = 132$ К
120	<i>Ночная температура лунной поверхности</i>	
100	$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+3}$	$n = 4 \quad T_c = 122$ К
80	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$	$n = 3 \quad T_c = 110$ К
80	<i>Температура кипения кислорода</i>	
80	<i>Температура кипения азота</i>	
80	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$	$T_{c\text{max}} = 92$ К
60		
40	<i>Температура поверхности Плутона</i>	
40	$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$	$T_c = 40$ К
40	$\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$	$T_c = 30$ К
20	<i>Температура кипения водорода</i>	
20	Rb_3C_{60}	$T_c = 23$ К
20	Nb_3Ge	$T_c = 9$ К
20	Pb Nb	$T_c \approx 7$ К
20	<i>Температура кипения гелия</i>	
20	Hg	$T_c = 4,2$ К
20	Al, Ga, Zn	

возились с сотнями различных окислов, варьируя их состав, количество, режимы синтеза. По рассказам самого Мюллера, они руководствовались некоторыми физическими соображениями, которые, похоже, сегодня находят свое подтверждение в результате сложнейших экспериментальных исследований новых веществ. На этом непростом пути в конце 1985 года они и подобрались, наконец, к соединению бария, лантана, меди и кислорода, которое при измерениях проявило признаки сверхпроводимости при 35 кельвинах.

Квазидвумерная сверхпроводимость: между антиферромагнитным и металлическим состояниями

Сегодня уже получены десятки различных соединений, переходящих в сверхпроводящее состояние при высоких, по сравнению с рекордом 1973 года, температурах. Некоторые из них вы найдете в приведенной здесь таблице.

Общей характеристикой высокотемпературных сверхпроводников является их слоистая структура. В настоящее время, пожалуй, наиболее изученным высокотемпературным сверхпроводником является соединение $YBa_2Cu_3O_7$, его кристаллическая структура приведена на рисунке 1. Как хорошо видно, атомы меди и кислорода выстраиваются в плоскости, перемежаемые другими атомами. В результате проводящие слои чередуются с изолирующими, и движение носителей заряда (которыми, как правило, являются дырки, а не электроны) носит так называемый квазидвумерный характер: носители могут легко перемещаться внутри слоев CuO_2 , в то время как их перескоки на соседние слои происходят сравнительно редко. Куперовские пары также оказываются локализованными именно в этих слоях.

Квазидвумерный характер электронного спектра высокотемпературных сверхпроводников, по-видимому, является ключевым для понимания микроскопической природы этого замечательного явления, что пока остается делом будущего. Однако уже сегодня создана замечательная по своей красоте феноменологическая теория вихревого состояния вы-

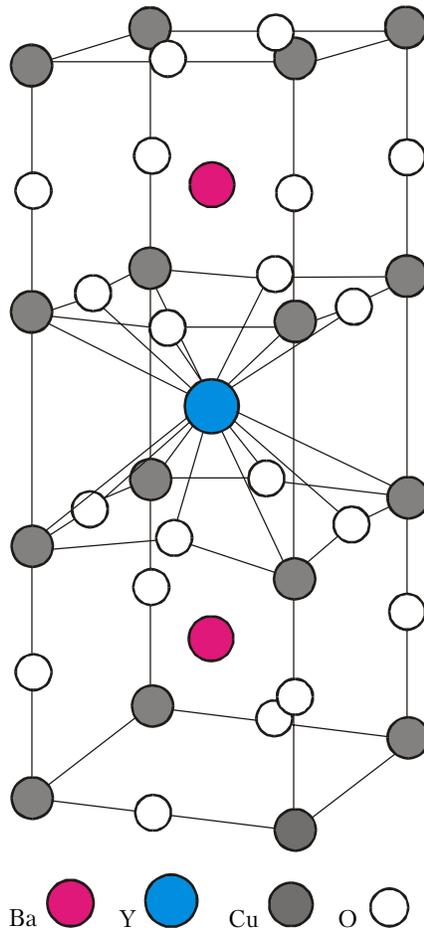


Рис.1

сокотемпературных сверхпроводников в магнитном поле, которая оказалась настолько интересной и богатой различного рода эффектами, что, по сути дела, выделилась в самостоятельную область физики – физику «вихревого вещества». И в ней квазидвумерность электронной жизни явилась определяющей. Действительно, ввиду квазидвумерности электронного движения, вихри Абрикосова оказываются как бы набранными из элементарных вихрей, локализованных, вслед за куперовскими парами и самими электронами, в проводящих слоях. При низких температурах эти элементарные вихри, получившие на физическом жаргоне название «блинов», благодаря слабому притяжению между ними выстраиваются в линию, а затем уже эти линии формируют вихревую решетку.

По мере повышения температуры вихревые линии из-за тепловых флуктуаций все больше и больше изгибаются, и при некоторой температуре решетка плавится, примерно так же, как обыкновенный кри-

сталл. Таким образом в высокотемпературном сверхпроводнике с повышением температуры упорядоченную решетку Абрикосова сменяет неупорядоченная фаза «вихревой жидкости», состоящая из хаотически расположенных, изгибающихся и перепутывающихся между собой вихревых линий. Интересно, что при дальнейшем повышении температуры (но находясь все еще в сверхпроводящей фазе) вихревые линии могут «испаряться» – распаться на элементарные вихри, положения которых в каждом сверхпроводящем слое будут хаотическими и совершенно независимыми от конфигурации вихрей в соседних слоях. Наличие различного рода неоднородностей, неизбежное в реальных кристаллах, еще более усложняет картину переходов между различными вихревыми формами.

Хотя в понимании свойств высокотемпературных сверхпроводников за последние годы достигнут значительный прогресс, природа самой высокотемпературной сверхпроводимости остается загадкой. Существует по крайней мере двадцать противоречащих друг другу теорий, претендующих на объяснение высокотемпературной сверхпроводимости, в то время как нужна одна, единственно правильная. Так, ряд физиков полагают, что куперовские пары в этих сверхпроводниках образуются за счет своего рода магнитного флуктуационного взаимодействия. Указанием на это служит тот факт, что в кристаллах $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ с содержанием кислорода меньше номинального ($x = 1$) критическая температура падает (рис.2; правая кривая), равно как и концентрация свободных электронов. При $x < 0,4$ мы уже имеем дело с диэлектриком, в котором, однако, при достаточно низких температурах наблюдается магнитное упорядочение атомов меди. Магнитные моменты соседних атомов меди оказываются сориентированными антипараллельно, и результирующая намагниченность кристалла остается равной нулю. Такого рода магнитный порядок хорошо известен в физике магнетизма и называется антиферромагнитным (см. левую кривую на рисунке 2; здесь T_N – так называемая температура Нееля, т.е. температура перехода в антиферромагнитное состояние).

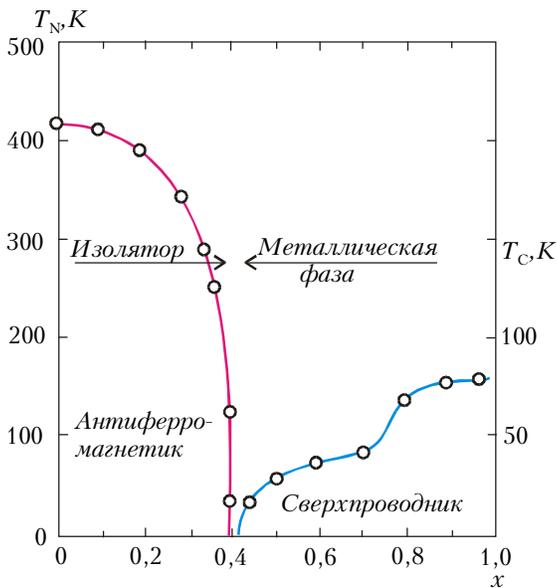


Рис.2

Можно было бы думать, что и в сверхпроводящей фазе атомы меди сохраняют флуктуирующий магнитный момент, который и ответствен в конечном счете за возникновение сверхпроводящего притяжения между электронами. Такого рода механизм связан с особыми свойствами атомов меди, которые могут пребывать в магнитном или немагнитном состояниях в зависимости от их валентности.

Тот факт, что во всех высокотемпературных сверхпроводниках присутствуют слои Cu—O, казалось бы, является аргументом в пользу данной теории. Однако совсем недавно появилось сообщение о наблюдении признаков сверхпроводимости при температуре 90 K в соединении $W_3ONa_{0,05}$. Точный состав сверхпроводящей фазы пока не известен, но по крайней мере ясно, что «магических» атомов меди там нет, и вообще ни один из элементов нового высокотемпературного сверхпроводника не обладает магнитными свойствами.

В других теориях физики пытаются обобщить тем или иным образом классическую теорию сверхпроводимости, пересматривают сами основы теории металлического состояния, «скрещивают» сверхпроводимость с антиферромагнетизмом в пространстве высшего числа измерений, разделяют спин и заряд носителей, заготавливают куперовские пары загодя, еще выше критической температуры, а также предпри-

нимают иные попытки объяснить необычные свойства высокотемпературных сверхпроводников единым образом. Вызов, брошенный природой, остается без ответа, теоретики по-прежнему не могут прийти к согласию. То ли будучи, согласно меткому сравнению, подобными хором глухих, где каждый поет свою партию не слушая другого, то ли потому, что время действительно еще не пришло, но правильная теория пока не сформулирована.

Postscriptum для налогоплательщика

Отсутствие теоретического объяснения явления высокотемпературной сверхпроводимости, конечно, не останавливает поисков практических применений этих материалов. Основная трудность на этом пути заключается в «плохой технологичности» имеющихся высокотемпературных сверхпроводников: они оказались весьма хрупкими и непригодными для важнейшего технологического процесса обработки металлов — прокатки. Однако уже сейчас ряд компаний поставляют на мировой рынок кабели из высокотемпературных сверхпроводников длиной в несколько километров. Их изготавливают, наполняя трубку из серебра или другого хорошего металла порошком высокотемпературного сверхпроводника, а затем прокатывая и отжигая ее. Сейчас в США и во Франции уже функционирует ряд опытных линий передач электроэнергии по подземному кабелю из высокотемпературного сверхпроводника. Созданы также первые моторы и генераторы на базе высокотемпературных сверхпроводников. Нет сомнения, что сфера применения этих материалов будет расширяться. И можно надеяться на открытие более совершенных высокотемпературных сверхпроводников.

Скажем теперь несколько слов о перспективах. Они поистине фантастичны. На повестку дня ставятся многие из предложенных ранее глобальных проектов — высокотемпературные сверхпроводники делают их рентабельными.

• Так, сейчас в линиях электропередач теряется от 20 до 30 процентов всей вырабатываемой в мире электроэнергии. Применение высокотемпературных сверхпроводников для передачи электроэнергии сможет полностью эти потери исключить.

• Все проекты термоядерного синтеза базируются на использовании гигантских сверхпроводящих магнитов для удержания высокотемпературной плазмы от касания стенок камеры. Для поддержания их в сверхпроводящем состоянии расходуются если не реки, то ручьи жидкого гелия. В недалеком будущем их можно будет перевести на азотное охлаждение.

• Огромные сверхпроводящие катушки смогут служить накопителями электроэнергии, снимающими пиковые нагрузки в потреблении электроэнергии.

• Основанная на применении сверхпроводящих джозефсоновских элементов сверхчувствительная аппаратура для снятия магнитокардиограмм и магнитоэнцефалограмм может прийти во все больницы.

• Между городами со скоростью 400—500 километров в час помчатся экспрессы на магнитной подушке, создаваемой сверхпроводящими магнитами.

• Будет создано новое поколение сверхмощных компьютеров на сверхпроводниковой элементной базе, охлаждаемых жидким азотом.

Пусть нас не заподозрят в «сверхпроводящей эйфории». Даже за недолгое время, прошедшее со дня открытия, пыл многих исследователей был изрядно умерен — так бывает, когда выдающийся олимпийский рекорд не удается потом годами перекрыть. Но рекорд состоялся, теперь он служит ориентиром, возможность получения материалов с уникальными свойствами подтверждена. И хотя экономика, безусловно, не раз еще внесет коррективы в осуществление названных проектов, хотя рекордные результаты еще только следует превзойти, а затем перевести в разряд массовых, сегодня мы твердо знаем, что недавно невозможное стало реально достижимым. А это уже необратимо меняет точку отсчета в нашем отношении к сверхпроводимости.