

Школьные
ДЭ
Кольники

В. Л. Гинзбург
Е. А. Андрушин

Сверхпроводимость





ВИТАЛИЙ ЛАЗАРЕВИЧ ГИНЗБУРГ — физик-теоретик, академик АН СССР. Родился в 1916 г., окончил Московский университет в 1938 г., с 1940 г. работает в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР. Автор более 300 научных работ и ряда научно-популярных и публицистических статей. В области теории сверхпроводимости работает с 1943 г., занимался также рядом других областей физики и астрофизики (теория распространения электромагнитных волн в плазме, радиоастрономия и происхождение космических лучей, теория сегнетоэлектриков, излучение равномерно движущихся источников и др.). Профессор МФТИ. Лауреат Ленинской и Государственной премий. Иностранный член Лондонского королевского общества, Национальной академии наук США и некоторых других иностранных академий. Народный депутат СССР.



ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ АНДРЮШИН — кандидат физико-математических наук. Родился в 1951 г., в 1974 г. окончил МГУ, с 1977 г. работает в ФИАН СССР в области физики твердого тела. Автор более 30 опубликованных научных работ.

**В. Л. Гинзбург
Е. А. Андрушин**

Библиотечка
Детской
энциклопедии



Сверхпроводимость

Редакционная
коллегия:
И. В. Петрянов
(главный редактор)
И. Л. Кнунянц
А. Н. Сахаров



Москва
«Педагогика» 1990



Scan nbl

ББК 22.37

Г 49

Рецензент

Р. Г. Минц,

доктор физико-математических наук

Гинзбург В. Л., Андрюшин Е. А.

Г 49 Сверхпроводимость. — М.: Педагогика, 1990. — 112 с.: ил. — (Б-чка Дет. энциклопедии «Ученые — школьнику»).

ISBN 5-7155-0305-1

В книге академика В. Л. Гинзбурга и кандидата физико-математических наук Е. А. Андрюшина рассказывается о сверхпроводимости — одном из самых сложных явлений, исследуемых в физике твердого тела. Школьники узнают о необычных свойствах металлов при низких температурах, об их использовании в технике и о современных открытиях физики.

Для старшеклассников.

Г 4306000000(4802000000)—021 90—90
005(01)—90

ББК 22.37

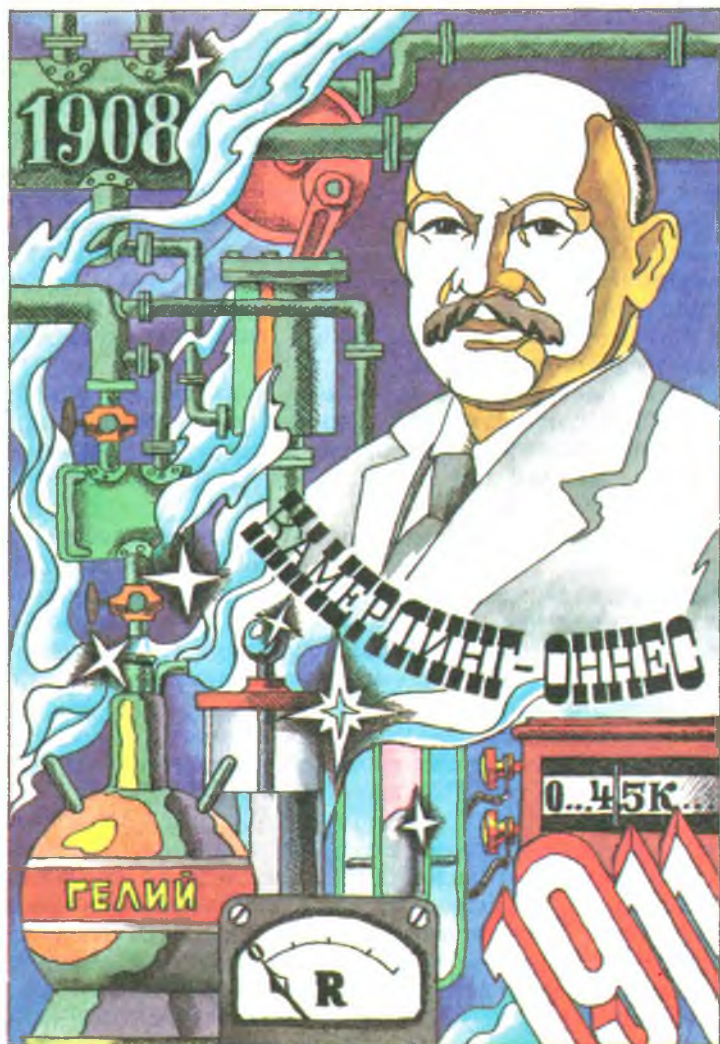
ISBN 5-7155-0305-1 © Издательство «Педагогика», 1990

Сверхпроводимость — физическое явление, для характеристики которого не жалеют эпитетов. И действительно, долгие годы ее природа была неясна. Потребовались несколько десятилетий и усилия многих физиков, чтобы раскрыть механизм этого явления. Однако и сейчас, после открытия в 1986 и 1987 гг. так называемых высокотемпературных сверхпроводников, тайна окутывает сверхпроводимость, до сих пор остаются принципиальные вопросы, на которые нет ответа. Но для того, чтобы добраться до них, надо познакомиться с уже пройденным путем.

Мы расскажем вам, в чем заключается явление сверхпроводимости, как оно было открыто, каковы основные свойства сверхпроводников, где они применяются и, по всей вероятности, будут широко использоваться в будущем.

Мы надеемся, что наша книга окажется самой простой из всех популярных книг, посвященных сверхпроводимости за последние годы. Одновременно, однако, она будет наименее подробной и наименее точной. К тому же, как говорил Козьма Прутков, «нельзя объять необъятное». Читателю не стоит удивляться, если в более полных книгах он встретит утверждения, сформулированные точнее, чем в нашем тексте. Мы не везде оговорили необходимость такого уточнения, чтобы не загромождать текст примечаниями и отступлениями.

Книга построена по канону от простого к сложному и от первого открытия семьдесят с лишним лет назад через долгие исследования к последним сенсациям. Читатель в зависимости от своих интересов может выбирать. Достаточно прочесть главу об открытии сверхпроводимости, чтобы получить о ней некоторое представление, и затем читать главы об ее применении и о том, как начался сверхпроводящий бум. Зато главы



«Физика сверхпроводимости» и «Природа сверхпроводимости» будут полезны тем, кто заинтересуется физикой, чего нам больше всего хочется.

Открытие сверхпроводимости

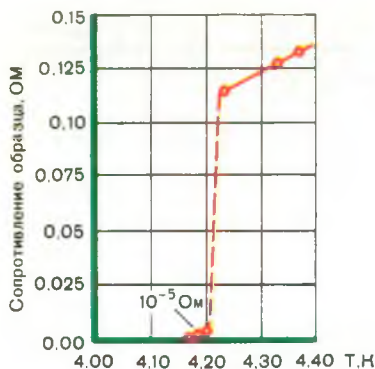
Начало. В 1911 г. голландский физик Х. Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости. Он проводил измерения электрического сопротивления ртути при очень низких температурах. Оннес хотел выяснить, сколь малым может стать сопротивление вещества электрическому току, если максимально очистить вещество от примесей и максимально снизить «тепловой шум», т. е. уменьшить температуру.

Результат этого исследования оказался неожиданным: при температуре ниже $4,15\text{ K}^1$ сопротивление почти мгновенно исчезло. График такого поведения сопротивления в зависимости от температуры приведен на рис. на с. 6.

Электрический ток — это движение заряженных частиц. Уже в то время было известно, что электрический ток в твердых телах — это поток электронов. Они заряжены отрицательно и намного легче, чем атомы, из которых состоит всякое вещество.

Каждый атом, в свою очередь, состоит из положительно заряженного ядра и взаимодействующих с ним и между собой по закону Кулона электронов. Каждый атомный электрон занимает определенную «орбиту». Чем ближе «орбита» к ядру, тем сильнее электрон притягивается к нему, тем большая энергия требуется,

¹Градусы этой шкалы принято обозначать заглавной буквой К, они равны привычным градусам Цельсия, но отсчитываются от абсолютного нуля температуры. По шкале Цельсия абсолютный нуль температуры есть — $273,16^\circ\text{C}$; так что упомянутая температура $4,15\text{ K}$ или — $269,01^\circ\text{C}$. Дальше мы будем стараться приводить округленные значения.



Этот рисунок скопирован с одной из первых работ Оннеса, посвященных сверхпроводимости. По современным данным график надо сдвинуть на 0,05 К — у Оннеса была неточная шкала температур.

чтобы оторвать такой электрон от ядра. Наоборот, самые внешние от ядра электроны наиболее легко отрываются от него, хотя и для этого нужно затратить энергию.

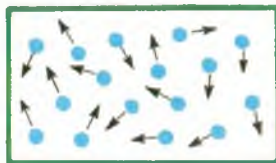
Внешние электроны называются валентными. Они действительно отрываются от атомов, когда те объединяются в твердое тело, и образуют газ почти свободных электронов. Это простая, красивая и часто оказывающаяся правильной физической картина: кусок вещества представляет из себя как бы сосуд, в котором находится «газ» электронов (см. рис. на с. 7).

Если мы создали электрическое поле — приложили к исследуемому кусочку напряжение, — в электронном газе возникнет ветер как бы под действием разности давлений. Этот ветер и есть электрический ток.

Металлы. Вы знаете, что отнюдь не все вещества проводят электрический ток. В диэлектриках валентные электроны остаются «привязанными» к своим атомам и не так-то просто заставить их двигаться через весь образец.

Довольно сложно объяснить, почему одни вещества оказываются металлами, а другие — диэлектриками.

«Газ» электронов. Кружки со стрелками показывают хаотическое движение частиц.



Это зависит от того, из каких атомов они составлены и как эти атомы расположены. Иногда возможны превращения, когда расположение атомов меняется, например, под действием давления атомы сближаются, диэлектрик становится металлом.

Через диэлектрики ток не течет, но и в металлах электроны движутся не вполне свободно. Они наталкиваются на атомные «остовы», от которых «оторвались», и рассеиваются на них. При этом возникает трение, или, как мы говорим, электрический ток испытывает сопротивление¹.

А при сверхпроводимости сопротивление исчезает, становится равным нулю, т. е. движение электронов происходит без трения. Между тем опыт нашей повседневной жизни показывает, казалось бы, что такое движение невозможно.

На разрешение этого противоречия были направлены работы физиков на протяжении десятков лет.

Открытое свойство настолько необычно, что металлы, обладающие сопротивлением, в противоположность сверхпроводникам называются нормальными.

¹Картина возникновения электрического сопротивления, конечно, сложнее, и дальше мы остановимся на ней подробнее.

Сопротивление. Электрическое сопротивление куска металла измеряется в Омах и определяется размерами и материалом образца. В формуле

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

R — сопротивление, S — поперечное сечение образца, l — длина (размер образца в том направлении, в котором течет ток). Написав такую формулу, мы как бы продолжаем сравнивать электроны с газом: чем шире и короче труба, тем легче продуть через нее газ. Величина ρ — удельное сопротивление, она характеризует свойства материала, из которого сделан образец.

У чистой меди при комнатной температуре $\rho = 1,75 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. Медь — один из наиболее хорошо проводящих ток металлов, она очень широко используется для этой цели. Некоторые другие металлы при комнатной температуре проводят электрический ток хуже:

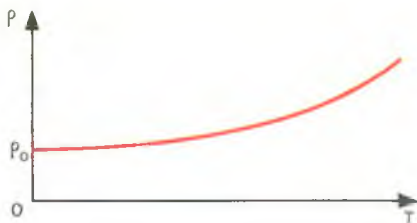
Алюминий	$\rho = 2,8 \cdot 10^{-6}$ Ом·см
Свинец	$\rho = 21,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·см
Ртуть	$\rho = 95,8 \cdot 10^{-6}$ Ом·см

(Для сравнения приведем удельные сопротивления некоторых диэлектриков, тоже при комнатной температуре:

Асбест	$\rho = 2 \cdot 10^5$ Ом·см
Резина	$\rho = 4 \cdot 10^{13}$ Ом·см
Янтарь	$\rho = 1 \cdot 10^{18}$ Ом·см)

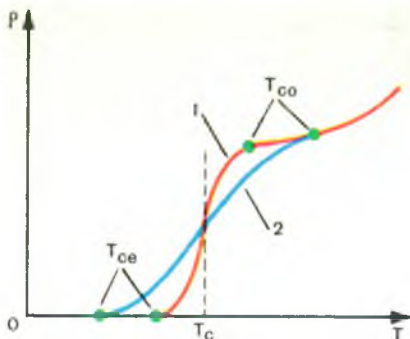
При понижении температуры T удельное сопротивление меди постепенно понижается и при температуре в несколько градусов Кельвина составляет 10^{-9} Ом·см, но сверхпроводником медь не становится. А вот алюминий, свинец, ртуть переходят в сверхпроводящее состояние, и проведенные с ними опыты показывают, что удельное сопротивление сверхпроводника во всяком случае не превышает 10^{-23} Ом·см — в сто триллионов раз меньше, чем у меди!

Зависимость удельного сопротивления ρ металла от температуры T .



Остаточное сопротивление. Удельное сопротивление металла зависит от температуры. Условный график $\rho(T)$, скажем, для меди вы видите на рис. на с. 9. Чем больше температура, тем больше сопротивление, тем сильнее колеблются составляющие металл атомные «остовы» и тем большую помеху представляют они для электрического тока. ρ_0 — остаточное сопротивление, к нему «стремится» сопротивление образца, если приближать температуру к абсолютному нулю. Остаточное сопротивление зависит от совершенства и состава образца. В любом веществе встречаются посторонние атомы — примеси, а также всевозможные другие дефекты. Чем меньше в образце дефектов, тем меньше остаточное сопротивление. Именно эта зависимость интересовала Оннеса в 1911 г. Он вовсе не искал «сверхпроводимость», а пытался выяснить, сколь малым можно сделать остаточное сопротивление, очищая образец. Он проводил опыты с ртутью, потому что в то время ртуть можно было довести до большей степени чистоты¹, чем платину, золото или медь (это металлы, которые являются лучшими проводниками, чем ртуть, и которые Оннес изучал перед открытием сверхпроводимости. Эти металлы не сверхпроводят).

¹Способом «перегонки», аналогичным процессу дистилляции воды.

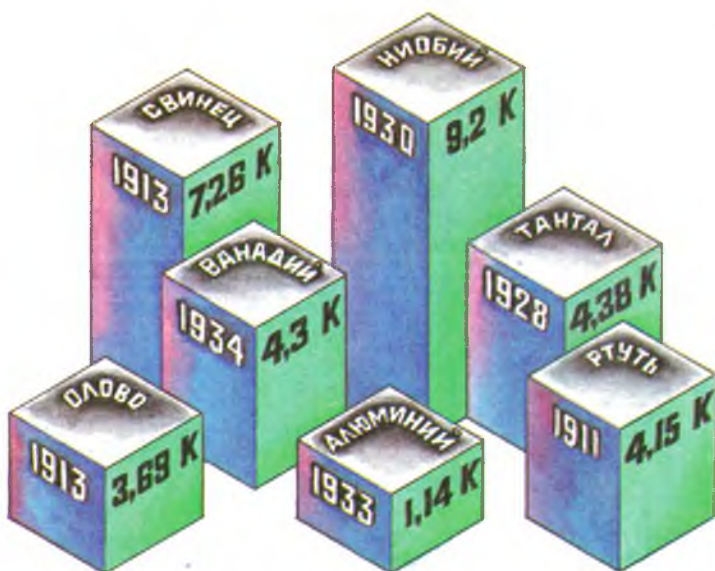


Вид сверхпроводящего перехода. Зависимости сопротивления от температуры для образца 1 (более «чистого») и 2 (более «грязного»). Критическая температура T_c обозначает середину перехода, когда сопротивление падает наполовину по сравнению с нормальным состоянием. Начало падения сопротивления — T_{co} , конец — T_{ce} .

Критическая температура. Сверхпроводимость возникает скачком при понижении температуры. Температура T_c , при достижении которой происходит скачок, называется критической. Внимательное исследование показывает, что такой переход происходит в некотором интервале температур (см. рис. на с. 10). Трение движущихся электронов исчезает независимо от «чистоты» образца, но чем образец «чище», тем скачок сопротивления резче, его ширина в самых «чистых» образцах меньше сотой доли градуса. В этом случае говорят о «хороших» образцах или сверхпроводниках — в «плохих» образцах ширина скачка может достигать десятков градусов. (Это, конечно, относится к вновь открытым сверхпроводникам, у которых T_c большая, достигает сотни градусов.)

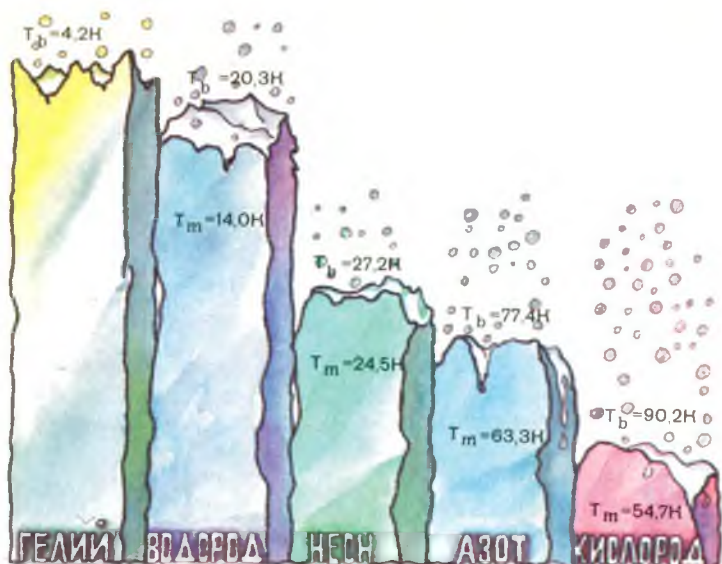
Критическая температура своя для каждого вещества. Эта температура и год обнаружения сверхпроводимости (точнее, год опубликования статьи об этом) указаны на рис. на с. 11 для нескольких чистых элементов. У ниобия самая высокая критическая температура из всех элементов таблицы Менделеева, но и она не превышает 10 К.

Еще Оннес не только обнаружил сверхпроводимость



ртути, олова и свинца, но и нашел первые сверхпроводящие сплавы — сплавы ртути с золотом и оловом. С тех пор эта работа продолжалась, на сверхпроводимость проверялись все новые соединения, и постепенно класс сверхпроводников расширился.

Низкие температуры. Исследование сверхпроводимости шло очень медленно. Для наблюдения явления нужно было охлаждать металлы до низких температур, а это не так просто. Образец должен охлаждаться постоянно, для этого его помещают в охлаждающую жидкость. Все жидкости, известные нам из повседневного опыта, при низких температурах замерзают, отвердевают. Поэтому необходимо оживить вещества, которые при комнатных условиях являются газами. На рис. на с.



12 указаны температуры кипения T_b и плавления T_m пяти веществ (при атмосферном давлении).

Если мы понижаем температуру ниже T_b , вещество охлаждается, а ниже T_m оно отвердевает. (Гелий при атмосферном давлении остается жидким вплоть до абсолютного нуля температур.) Так что для наших целей какое-либо из указанных веществ можно использовать «в промежутке» между T_b и T_m . До последнего времени максимальная известная критическая температура сверхпроводимости едва превышала 20 K, поэтому при исследовании сверхпроводимости нельзя было обойтись без жидкого гелия. Азот также широко применяется в качестве охладителя. Азот и гелий используются на последовательных ступенях охлаждения. Оба эти вещества нейтральны и безопасны.

Ожижение гелия — сама по себе интереснейшая и увлекательная проблема, решением которой занимались многие физики на рубеже XIX—XX столетий. Достиг цели Оннес в 1908 г. Специально для этого он создал лабораторию в Лейдене (Нидерланды). Затем в течение 15 лет лаборатория обладала монополией на уникальные исследования в новой области температур. В 1923 г. жидкий гелий научились получать еще в двух лабораториях мира, в Берлине и в Торонто. В Советском Союзе такое оборудование появилось в начале 30-х гг. в Харьковском физико-техническом институте.

После второй мировой войны постепенно во многих странах развивалась целая промышленность по обеспечению лабораторий жидким гелием. До этого все находилось на самообслуживании. Технические затруднения и физическая сложность явления приводили к тому, что знания о сверхпроводимости накапливались очень медленно. Только через 22 года после первого открытия было обнаружено второе фундаментальное свойство сверхпроводников.

Эффект Мейснера. О его наблюдении сообщили в 1933 г. немецкие физики В. Мейснер и Р. Оксенфельд.

До сих пор мы называли сверхпроводимостью исчезновение электрического сопротивления. Однако сверхпроводимость — нечто более сложное, чем просто отсутствие сопротивления. Это еще и определенная реакция на внешнее магнитное поле. Эффект Мейснера заключается в том, что постоянное не слишком сильное магнитное поле выталкивается из сверхпроводящего образца. В толще сверхпроводника магнитное поле ослабляется до нуля, сверхпроводимость и магнетизм можно назвать как бы противоположными свойствами.

При поиске новых сверхпроводников проверяются оба главных свойства сверхпроводимости: в сверхпроводнике обращается в нуль электрическое сопротивление, из сверхпроводника выталкивается магнитное



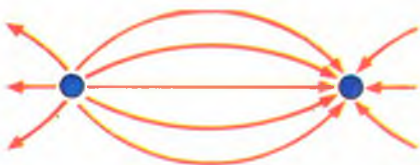
Постоянный магнит длиной несколько сантиметров парит на расстоянии чуть больше одного сантиметра над дном сверхпроводящей чашечки. Чашечка поставлена на три медные ножки. Ножки стоят в жидком гелии, а чашечка находится в парах гелия для поддержания сверхпроводящего состояния.

поле. В некоторых случаях в «грязных» сверхпроводниках падение сопротивления с температурой может быть гораздо более растянутым, чем это изображено на рис. на с. 6 для ртути. В истории исследований неоднократно бывало так, что физики принимали за сверхпроводимость какое-то другое падение сопротивления, даже связанное с обычным коротким замыканием.

Для доказательства существования сверхпроводимости необходимо как минимум наблюдать проявления обоих главных ее свойств. Весьма эффектный опыт, демонстрирующий присутствие эффекта Мейснера, представлен на рис. на с. 14: постоянный магнит парит над сверхпроводящей чашечкой. Впервые такой опыт осуществил советский физик В. К. Аркадьев в 1945 г.

В сверхпроводнике возникают выталкивающие магнитное поле токи, их магнитное поле отталкивает постоянный магнит и компенсирует его вес. Существенны и стенки чашечки, которые отталкивают магнит к центру. Над плоским дном положение магнита неустойчиво, от случайных толчков он уйдет в сторону. Такой парящий магнит напоминает легенды о левитации. Наиболее

Линии со стрелками, изображающие как бы струи воды, — силовые линии поля.



известна легенда о гробе религиозного пророка. Гроб был помещен в пещеру и там парил в воздухе без всякой видимой поддержки. Сейчас нельзя с уверенностью сказать, основаны ли подобные рассказы на каких-либо реальных явлениях. В настоящее время с помощью эффекта Мейснера «осуществить легенду» технически возможно.

Магнитное поле. Современная физика использует понятие поля для описания воздействия одного тела на другое на расстоянии, без непосредственного соприкосновения. Так, посредством электромагнитного поля взаимодействуют заряды и токи. Всем, кто изучал законы электромагнитного поля, известен наглядный образ поля — картина его силовых линий. Впервые этот образ использовал английский физик М. Фарадей. Для наглядности полезно вспомнить еще один образ поля, использованный другим английским физиком — Дж. К. Максвеллом.

Представьте себе, что поле — движущаяся жидкость, например вода, текущая вдоль направлений силовых линий. Вот, скажем, как можно описать с ее помощью взаимодействие зарядов по закону Кулона. Пусть есть бассейн, для простоты плоский и мелкий, его вид сверху изображен на рис. на с. 15. В дне проделано две дырки: через одну вода поступает в бассейн (это как бы положительный заряд), а через другую вытекает (это сток, или отрицательный заряд). Текущая в таком бассейне вода изображает электрическое поле двух неподвиж-

ных зарядов. Вода прозрачна и ее течение для нас незаметно. Но внесем в струи «пробный положительный заряд» — шарик на ниточке. Мы сразу почувствуем силу — жидкость увлекает шарик за собой.

Вода относит шарик от источника — одноименные заряды отталкиваются. К стоку, или заряду другого знака, шарик притягивается, причем сила между зарядами зависит от расстояния между ними, как и положено по закону Кулона.

Токи и поля в сверхпроводниках. Для того чтобы описать поведение токов и полей в сверхпроводниках, нужно вспомнить закон магнитной индукции. Сейчас для наших целей полезнее дать ему более общую формулировку, чем в школьном курсе физики. Закон магнитной индукции говорит вообще-то о взаимоотношении электрического и магнитного полей. Если мы представляем электромагнитное поле как жидкость, то взаимоотношение электрической и магнитной компонент поля можно представлять как взаимоотношение спокойного (ламинарного) и вихревого течения жидкости. Каждое из них может существовать само по себе. Пусть перед нами, например, спокойный широкий поток — однородное электрическое поле. Если мы попробуем изменить это поле, т. е. как бы затормозить или ускорить жидкость, то обязательно появятся вихри — магнитное поле. А изменение магнитного поля всегда ведет к появлению электрического поля, а электрическое поле вызывает в проводящем контуре ток, и тогда мы получаем обычное явление магнитной индукции: изменение магнитного поля наводит ток. Именно этот физический закон работает на всех электростанциях мира, тем или иным способом вызывая изменения магнитного поля в проводнике. Возникающее электрическое поле порождает ток, который поступает в наши дома и на промышленные предприятия.

Но вернемся к сверхпроводникам. Постоянный ток в сверхпроводнике не нуждается в присутствии электрического поля, и в равновесной ситуации электрическое поле в сверхпроводнике равно нулю. Такое поле ускорило бы электроны, а никакого сопротивления, трения, которое уравнило бы ускорение, в сверхпроводниках нет. Сколь угодно малое постоянное электрическое поле привело бы к бесконечному возрастанию тока, что невозможно. Электрическое поле возникает только в несверхпроводящих участках цепи. Ток в сверхпроводниках течет без падения напряжения.

При мысленных рассуждениях не видно ничего, что могло бы препятствовать существованию магнитного поля в сверхпроводнике. Однако ясно, что сверхпроводник будет мешать магнитному полю изменяться. Действительно, изменение магнитного поля порождало бы ток, который создавал бы магнитное поле, компенсирующее первоначальное изменение.

Итак, любой контур из сверхпроводника должен сохранять текущий сквозь него поток магнитного поля. (Магнитный поток через контур есть просто произведение напряженности магнитного поля на площадь контура.)

То же самое должно происходить и в толще сверхпроводника. Поднесем, например, к сверхпроводящему образцу магнит — его магнитное поле проникнуть в сверхпроводник не может. Любая такая «попытка» приводит к возникновению тока в сверхпроводнике, магнитное поле которого компенсирует внешнее поле. В итоге магнитное поле в толще сверхпроводника отсутствует, а по поверхности течет как раз такой ток, какой для этого требуется. В толще обычного проводника, который вносят в магнитное поле, все происходит точно так же, однако там есть сопротивление и наведенный ток довольно быстро затухает, а его энергия переходит в тепло из-за трения. (Это тепло очень просто обнаружить

на опыте: подведите руку к работающему трансформатору, и вы почувствуете его.) В сверхпроводнике сопротивления нет, ток не затухает и не пускает магнитное поле внутрь сколь угодно долго. Описанная картина точна и многократно подтверждена на опыте.

Теперь сделаем другой мысленный опыт. Возьмем тот же кусок сверхпроводящего вещества, но при достаточно высокой температуре, когда оно еще находится в нормальном состоянии. Внесем его в магнитное поле и подождем, пока все успокоится, токи затухнут — вещество пронизывает магнитный поток. Теперь будем понижать температуру, ожидая, пока вещество перейдет в сверхпроводящее состояние. Кажется, что понижение температуры никак не должно повлиять на картину магнитного поля. Магнитный поток в сверхпроводнике меняться не должен. Если теперь убрать магнит — источник внешнего магнитного поля, то сверхпроводник должен этому сопротивляться и на поверхности должны возникнуть сверхпроводящие токи, поддерживающие магнитное поле внутри.

Однако такое поведение совершенно не соответствует тому, что наблюдается на опыте: эффект Мейснера наблюдается и в этом случае. Если охлаждать нормальный металл в магнитном поле, то при переходе в сверхпроводящее состояние магнитное поле выталкивается из сверхпроводника. На его поверхности при этом появляется незатухающий ток, который обеспечивает нулевое поле в толще сверхпроводника. Описанная картина сверхпроводящего состояния наблюдается всегда — независимо от того, каким способом совершен переход в это состояние.

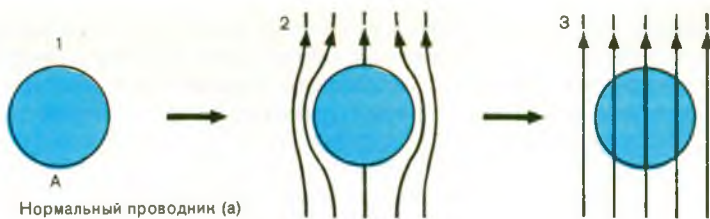
Конечно, это описание предельно идеализировано, и по ходу книги мы будем его усложнять, но уже сейчас стоит упомянуть о том, что существует два рода сверхпроводников, которые по-разному реагируют на магнитное поле. Мы начали рассказывать о свойствах

сверхпроводников I рода, с открытия которых и началась сверхпроводимость. Позднее были открыты сверхпроводники II рода, с несколько иными свойствами. В основном с ними связаны практические применения сверхпроводимости.

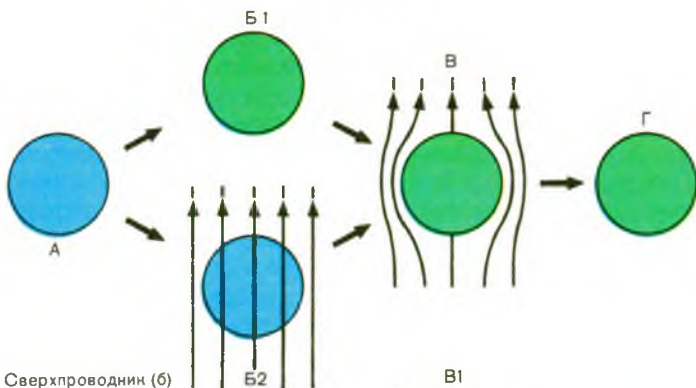
Идеальный диамагнетизм. Выталкивание магнитного поля столь же удивительно для физика, как и отсутствие сопротивления. Дело в том, что постоянное магнитное поле обычно проникает всюду. Экранирующий электрическое поле заземленный металл ему не препятствует. В большинстве случаев граница тела для магнитного поля — это не стенка, сдерживающая его «течение», а как бы небольшая ступенька на дне бассейна, меняющая глубину и незначительно влияющая на это «течение». Напряженность магнитного поля в веществе меняется на сотые или тысячные доли процента по сравнению с его силой вовне (за исключением таких магнитных веществ, как железо и другие ферромагнетики, где к внешнему присоединяется большое внутреннее магнитное поле). Во всех прочих веществах магнитное поле либо чуть-чуть усиливается — и такие вещества называются парамагнетиками, либо чуть-чуть ослабляется — такие вещества получили название диамагнетиков.

В сверхпроводниках магнитное поле ослабляется до нуля, они являются идеальными диамагнетиками.

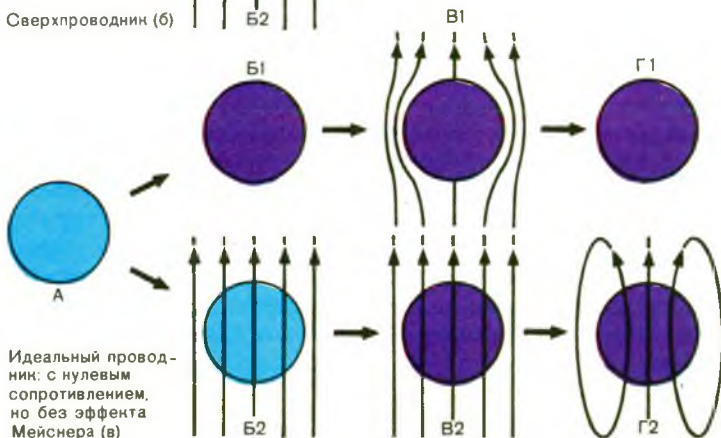
Только экран из непрерывно поддерживаемых токов может «не пропустить» магнитное поле. Сверхпроводник сам создает на своей поверхности такой экран и поддерживает его сколь угодно долго. Поэтому эффект Мейснера, или идеальный диамагнетизм сверхпроводника, не менее удивителен, чем его идеальная проводимость.



Нормальный проводник (а)



Сверхпроводник (б)



Идеальный проводник: с нулевым сопротивлением, но без эффекта Мейснера (в)

На рисунке условно изображено, что происходит с металлическим шариком при изменении температуры T и при наложении магнитного поля H (силовые линии магнитного поля обозначены стрелками, пронизывающими или «обтекающими» образец). Мы будем различать металл в нормальном состоянии — тогда он маркируется голубым цветом. Если металл переходит в сверхпроводящее состояние — кружок будет зеленым. Для сравнения мы показываем (В), как вел бы себя идеальный проводник — металл без эффекта Мейснера с нулевым сопротивлением (если бы он существовал). Это состояние обозначаем фиолетовым цветом.

(а) 1. Нормальный проводник, обладающий отличным от нуля сопротивлением при любой температуре (А).
2. Он внесен в магнитное поле, в соответствии с законом электромагнитной индукции возникают токи, которые сопротивляются проникновению магнитного поля в металл. Однако если

сопротивление отлично от нуля, они быстро затухают и мы наблюдаем картинку 3.

(б) Из нормального состояния А при температуре выше T_c есть два пути. Первый: при понижении температуры образец переходит в сверхпроводящее состояние (В1), затем можно наложить магнитное поле, которое выталкивается из образца (В). Второй путь: сначала наложить магнитное поле, которое проникнет в образец (В2), а затем понизить температуру, тогда при переходе поле вытолкнется (В). Снятие магнитного поля дает картинку Г.

(в) Если бы не было эффекта Мейснера, проводник без сопротивления вел бы себя по-другому. При переходе в состояние без сопротивления в магнитном поле ($B2 \rightarrow B2$) он бы сохранял магнитное поле и удерживал бы его даже при снятии внешнего магнитного поля ($G2$). Размагнитить такой магнит можно было бы, только повышая температуру. Такое поведение, однако, на опыте не наблюдается.

Немного истории. В следующей главе мы расскажем об удивительных свойствах сверхпроводников подробнее, а эту главу нам хочется закончить перечислением наиболее важных работ, сделанных физиками за время изучения сверхпроводимости.

Прежде всего это уже упомянутые открытия Х. Камерлинг-Оннеса (1911) и В. Мейснера и Р. Оксенфельда (1933). Первое теоретическое объяснение поведения сверхпроводника в магнитном поле предложено в Англии (1935) эмигрировавшими из Германии немец-

кими физиками Ф. Лондоном и Г. Лондоном. В 1950 г. Л. Д. Ландау и один из авторов этой книги написали работу, в которой построили более общую теорию сверхпроводимости. Это описание оказалось удобным и используется до сих пор.

Механизм явления был раскрыт в 1957 г. американскими физиками Дж. Бардиным, Л. Купером и Дж. Шриффером. По заглавным буквам их фамилий эта теория называется теорией БКШ, а сам механизм (для него существенно парное поведение электронов) часто называется «куперовским спариванием», поскольку его идею придумал Л. Купер. Для развития представлений теории БКШ очень важными оказались опубликованные в том же году работы советских физиков: Н. Н. Боголюбова, который создал математически строгую теорию БКШ, и Л. П. Горькова, который показал связь теории БКШ с предшествовавшими представлениями о сверхпроводимости.

Кроме того, большое влияние оказали открытия и исследования в 50-х гг. соединений с относительно высокими критическими температурами, способных выдерживать весьма высокие магнитные поля и пропускать большие плотности тока в сверхпроводящем состоянии. Пожалуй, кульминацией этих исследований стал опыт Дж. Кюнцлера с сотрудниками (1960). Они продемонстрировали, что проволока из Nb_3Sn при $T=4,2$ К в поле 88 000 Э (более сильного поля просто не было в их распоряжении) пропускает ток плотностью 100 тыс. А/см². Открытые в то время сверхпроводники работают в технических устройствах до сих пор. Подобные материалы выделяют сейчас в особый класс сверхпроводников, который получил название жестких сверхпроводников.

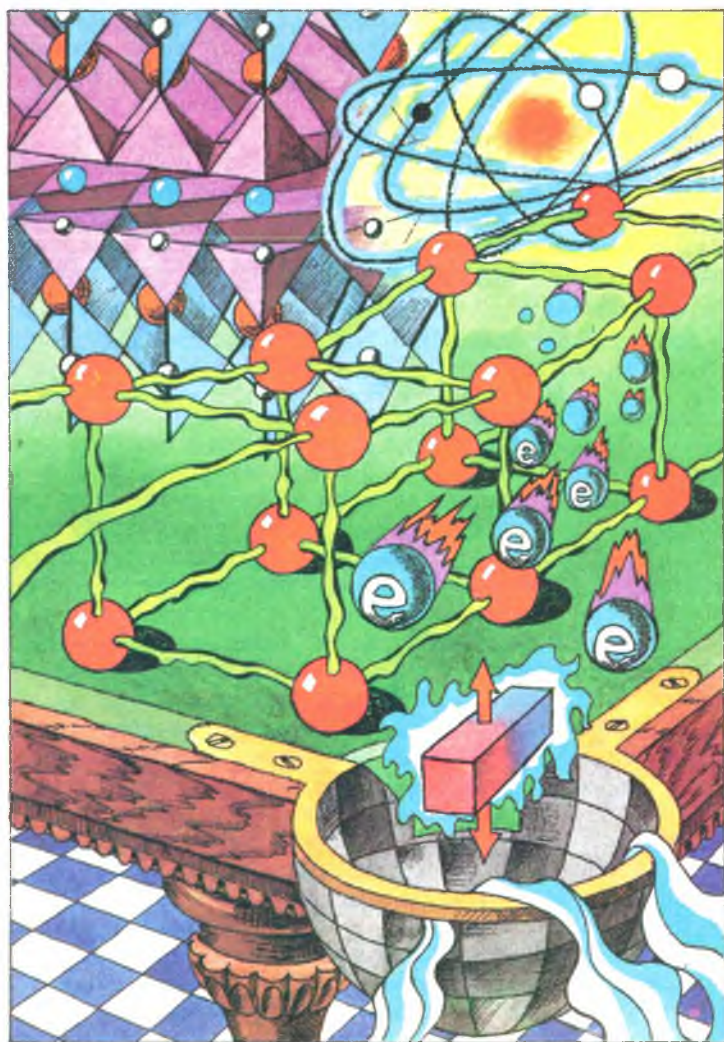
В 1962 г. английский физик Б. Джозефсон теоретически предсказал совершенно необычные явления, которые должны происходить на контактах сверхпроводников. Эти предсказания затем были полностью

подтверждены, а сами явления получили название «слабой сверхпроводимости» или эффектов Джозефсона и быстро нашли практическое применение.

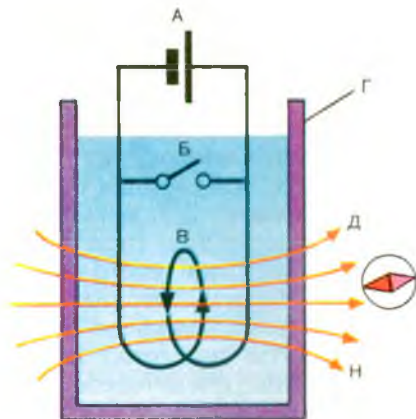
Наконец, статья (1986) двух работающих в Цюрихе физиков, швейцарца К. Мюллера и немца из ФРГ Г. Беднорца, ознаменовала открытие новых классов сверхпроводящих веществ и породила лавину новых исследований в этой области, что в ближайшем будущем отразится на жизни всех обитателей, по крайней мере, цивилизованных стран. Начинается очередная технологическая революция.

Физика сверхпроводимости

Как убедиться в том, что сопротивление сверхпроводника действительно равно нулю? Легко нарисовать график (см. рис. на с. 6 и 10), на котором кривая «уперлась» в ось абсцисс, труднее обрести уверенность в том, что сопротивление действительно равно нулю, а не просто очень маленькое. Измеряя сопротивление, физик использует прибор, обладающий определенной чувствительностью, рассчитанный на ту величину, которую он предполагает получить. Если измеряемая величина вдруг уменьшается даже в 10, а то и в 100 раз, стрелка прибора перестает двигаться. Именно поэтому так негладко выглядит зависимость сопротивления от температуры, которую впервые получил Оннес. Ему понадобилось около года, чтобы убедиться, что сопротивление сверхпроводящего вещества меньше чувствительности самого точного на то время прибора. Однако и это не доказывает, что сопротивление строго равно нулю. Но такого чисто экспериментального доказательства и не может быть. Физическую величину можно считать равной нулю, если ее возможное отклонение от математического значения «нуль» так мало, что его невозможно установить никакими измерениями.



Принципиальная схема опыта Оннеса. А — источник тока, Б — выключатель. Он замыкается, чтобы ток циркулировал в сверхпроводящем контуре внутри сосуда Г с жидким гелием. В — сверхпроводящее кольцо, которое создает магнитное поле Н. На рисунке обозначены его силовые линии. Д — магнитная стрелка, с помощью которой отслеживаются изменения магнитного поля.



В свое время еще Оннес поставил такой опыт: поместил в сосуд с жидким гелием, который служил охладителем, кольцо из сверхпроводника, в котором циркулировал ток (см. рис. на с. 25). Если бы сверхпроводник имел отличное от нуля сопротивление, то ток в кольце уменьшался бы, и тогда изменялось бы магнитное поле, которое создает такой кольцевой ток. Магнитное поле можно регистрировать вне сосуда с жидким гелием. За его изменением следили просто с помощью стрелки компаса. За те несколько часов, которые были в его распоряжении, пока не испарился жидкий гелий, никакого изменения магнитного поля обнаружено не было. Впоследствии этот опыт повторялся. В 50-е гг. за магнитным полем подобного кольца следили около полутора лет и также не обнаружили никакого изменения. Таким образом, точность утверждения о нуле сопротивления стала поистине фантастической. Если даже считать, что в пределах этой точности у сверхпроводника есть какое-то небольшое сопротивление, то и тогда уменьшение тока в небольшой катушке можно будет заметить лишь через миллионы лет.

Фазовый переход. Физики давно убедились, что сопротивление сверхпроводника I рода постоянному электрическому току равно нулю, и мы надеемся, что вы в это тоже поверили. Это значит, что сверхпроводник принципиально отличается от самого хорошего нормального проводника с очень маленьким сопротивлением. Это два разных состояния вещества. В физике об этом говорят так: металл может существовать в нормальном состоянии (при температуре, большей T_c) и в сверхпроводящем состоянии (при температуре, меньшей T_c). Оба эти состояния называются в физике фазами. Такое специальное название придумано, чтобы подчеркнуть: вещество находится в равновесии. Это очень важное физическое понятие.

Легче всего проиллюстрировать, что такое равновесное состояние, представив маленький стальной шарик, катающийся в рюмке (см. рис. на с. 27). Из-за трения в конце концов он успокоится в центральной точке дна рюмки. Это и будет его равновесным состоянием, которому совершенно все равно, с какой стороны начал скатываться шарик. Равновесным является то состояние, в котором шарик имеет наименьшую энергию.

Теперь представьте себе, что шарик в рюмке — условное обозначение металлического образца. Если мы охлаждаем его, то при каждой температуре у него есть «энергия равновесия». Две кривые (см. рис. на с. 28) изображают зависимость энергии равновесия от температуры для нормальной фазы и для сверхпроводящей фазы. Мы как бы сравниваем, у какой рюмки дно ниже. Именно при критической температуре T_c их положение одинаково, шарик может «перескочить» из нормальной фазы в сверхпроводящую. Такой переход называется фазовым переходом.

Для сравнения можно назвать и другие примеры фазовых переходов, наверно, хорошо известные из повседневной практики: превращение воды в лед при

охлаждении и превращение воды в пар при нагревании. Кипение — это переход из жидкой фазы в газообразную, а плавление — из твердой фазы в жидкую. Конечно, наш опыт обычно относится к значительно большим температурам, чем температуры сверхпроводящих фазовых переходов: вода замерзает при 0°C , или 273 K , а кипит при 373 K (при нормальном атмосферном давлении).

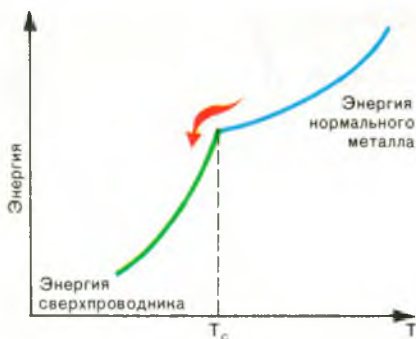


По сравнению, скажем, с переходом плавления у сверхпроводящего фазового перехода есть одно важное отличие: кривые (на рис. на с. 28) пересекаются, мы как бы непрерывно переходим с одной кривой на другую. Это означает, что на сам переход энергию затрачивать не надо. Напротив, чтобы расплавить лед, уже находящийся при температуре 273 K , еще нужно затратить значительную энергию.

Это важное отличие говорит физику о том, что в сверхпроводящей фазе по сравнению с нормальной электроны обретают порядок движения. Для того чтобы это стало понятнее, представьте, что вы сидите в концертном зале. По сцене расхаживают танцоры, но сам танец еще не начался, никакого порядка в их движении нет. Но вот зазвучала музыка, и мы сразу увидели смысл в движениях: начался танец, появился порядок, произошел фазовый переход.

А вот как выглядел бы в том же концертном зале фазовый переход плавления или, лучше, переход кристаллизации — при понижении температуры. Здесь на сцену как бы выходит балетмейстер, который расставляет участников концерта в намеченные режиссером позиции.

Красная стрелка показывает, как меняется энергия



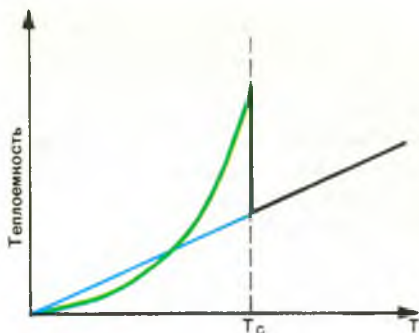
исследуемого металлического образца при охлаждении. При достижении критической температуры T_c происходит фазовый переход, и зависимость энергии от температуры меняется от нормальной к сверхпроводящей.

Фазовые переходы могут происходить при различных условиях, и в зависимости от них равновесные фазы вещества определяются разными энергетическими характеристиками. В этой книге мы пользуемся одним словом — энергия.

Сравнение фазовых переходов с танцами крайне условно. Это лишь аналогия, позволяющая указать на два различных типа фазовых переходов, которые в физике называются переходами I рода (например, плавление) и II рода (сверхпроводящий фазовый переход).

Теплоемкость. При сверхпроводящем фазовом переходе электрическое сопротивление меняется скачком, а энергия — непрерывно. Скачком меняется также одна из самых важных тепловых величин — теплоемкость, или количество тепла, необходимое для изменения температуры вещества. Есть легко запоминающееся правило: для того чтобы в комнатных условиях нагреть 1 г воды на 1° , нужна 1 калория тепла (1 калория чуть больше, чем 4 Дж; один Джоуль — это работа силы в 1 Ньютон на расстоянии в 1 м). Это правило и означает, что теплоемкость воды при комнатной температуре равна единице. Обычно при охлаждении вещества его теплоемкость уменьшается; в момент сверхпроводящего

Зависимость теплоемкости от температуры вблизи сверхпроводящего перехода. Синей линией обозначен ход теплоемкости нормального металла — если бы не было сверхпроводящего перехода.



перехода, однако, она скачком увеличивается приблизительно в $2,5 \div 3$ раза (см. рис. на с. 29).

Для сравнения приведем теплоемкость некоторых веществ при комнатной температуре:

Вода	$4,19 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 1 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$
Ацетон	$2,18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 0,52 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$
Алюминий	$0,9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 0,216 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$
Железо	$0,46 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 0,11 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$
Ртуть	$0,14 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 0,033 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$
Свинец	$0,13 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 0,031 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$

Теплоемкость в нормальной фазе накануне сверхпроводящего перехода:

Свинец (при $T = 8 \text{ K}$)	$7,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 0,00175 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$
Ртуть (при $T = 6 \text{ K}$)	$1,1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 0,00260 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$
Алюминий (при $T = 2 \text{ K}$)	$0,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 0,00024 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$

Обо всем этом пишется для того, чтобы вы почувствовали, в чем состоит работа физика. Поведение любых физических величин может затем оказаться важным для технических применений. Особенно важно и интересно необычное поведение. Например, «скачок» наверняка когда-нибудь окажется полезным инженеру. Скажем, температура меняется непрерывно, а сопротивление или теплоемкость меняется сильно, — значит, таким способом малыми усилиями можно пустить ток или начать иной процесс. Физики тщательно изучают особенности поведения физических величин — одна из них изображена на рис. на с. 29. Как раз такой всплеск теплоемкости — один из характерных признаков фазового превращения.

Два типа электронов. Мы уже говорили о том, что электронный газ в металлах образуют те самые электроны, которые участвуют в проводимости. Конечно, это приближенное описание металла, и вот в чем его главный недостаток. Частицы идеального газа не взаимодействуют друг с другом. Самое простое представление о них — биллиардные шары, которые могут сталкиваться между собой, но никак иначе не влияют на положение друг друга. Уже на основе такого представления можно понять некоторые явления, поэтому оно было использовано в главе «Открытие сверхпроводимости».

Однако частицы электронного газа заряжены и взаимодействуют между собой по закону Кулона. Более точно сравнивать их с жидкостью. Л. Д. Ландау любил по этому поводу говорить: «Закон Кулона никто не отменял». Он использовал представление о жидкости для создания теории Ферми-жидкости электронов.

Жидкость занимает как бы промежуточное место между газом и твердым телом. Частицы газа далеко друг от друга, они почти независимы. Частицы жидкости ближе, они уже чувствуют друг друга, их взаимодей-

ствие достаточно, чтобы удерживать их вместе, но недостаточно, чтобы они заняли устойчивые положения в узлах кристаллической решетки твердого тела.

Что ж, будем считать электроны проводимости в металле электронной жидкостью и сравнивать ток с ее течением, а не с ветром в газе. В 1934 г. голландские физики К. Гортер и Х. Казимир предложили рассматривать сверхпроводник как смесь двух электронных жидкостей — нормальной и сверхпроводящей. Нормальная электронная жидкость обладает теми же свойствами, что и электроны в нормальном металле, а вот сверхпроводящая течет без трения. Обе жидкости тщательно перемешаны, в каждом кусочке сверхпроводника есть электроны обоих сортов. Количество, или, точнее, доля, сверхпроводящих электронов зависит только от температуры. Когда мы охлаждаем металл до критической температуры, то сверхпроводящие электроны появляются, а при абсолютном нуле все электроны являются сверхпроводящими.

Сверхпроводнику, через который течет постоянный ток, можно сопоставить эквивалентную электрическую схему (см. рис. на с. 32): два параллельно соединенных электрических сопротивления, одно из которых обращается в нуль при сверхпроводящем переходе. Нулевое сопротивление как бы шунтирует цепь, и весь ток идет по «сверхпроводящей ветви». Значит, какова бы ни была плотность сверхпроводящей электронной жидкости, если она есть, то и сверхпроводимость есть — мы регистрируем нулевое сопротивление и не можем заметить «нормальную ветвь». Зато она проявляет себя в другом — чем больше плотность сверхпроводящих электронов, тем больший сверхпроводящий ток способен пропустить цепь. Сверхпроводящие электроны стремятся взять на себя весь ток, но зато они оказываются неспособными проводить тепло, т. е. переносить энергию из одного конца образца в другой.



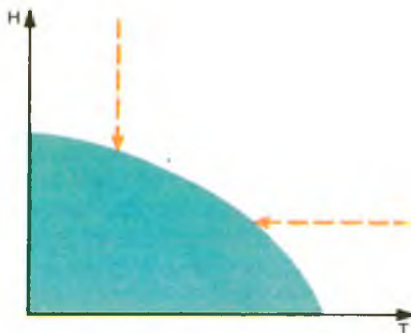
При понижении температуры падает количество нормальных электронов, а с ним уменьшается и теплоемкость (см. рис. на с. 29), и теплопроводность сверхпроводника.

Как происходит сверхпроводящий переход в магнитном поле. Описывая фазовый переход в сверхпроводящее состояние, мы говорили, что он происходит без затраты энергии, поскольку заключается лишь в изменении порядка движения электронов.

Если магнитное поле не равно нулю, это уже не так. Переход в магнитном поле требует затраты энергии на выталкивание магнитного поля из образца. Энергии для этого требуется ровно столько, сколько ее было запасено магнитным полем во всем объеме металла. Опыт показывает, что возможности сверхпроводника в этом смысле ограничены. Если магнитное поле оказывается больше некоторой величины, то при охлаждении металла оно не вытесняется и сверхпроводимость не возникает. Магнитное поле такой величины называется критическим для данного материала и обозначается H_c . H_c зависит от температуры, чаще всего так, как изображено на рис. на с. 33, где эта зависимость показана сплошной линией, разделяющей график на две части — зеленую и белую.

Для того чтобы получить сверхпроводящее состояние, надо «перейти эту сплошную линию». Это можно сделать, либо уменьшая магнитное поле при постоянной температуре T , пока мы не перейдем критическое значение $H_c(T)$, либо уменьшая температуру при постоянном поле H , пока мы не перейдем критическое значение

Фазовая диаграмма перехода: нормальный металл — сверхпроводник. Пунктирными стрелками показаны возможные «пути» фазового перехода (при одновременном уменьшении температуры и магнитного поля).



$T_c(H)$. Критическая температура в поле меньше, чем в его отсутствие.

Этот график называется фазовой диаграммой, сплошная линия — это линия фазовых переходов, разделяющая области обеих фаз. Вся эта линия отвечает фазовым переходам I рода — за исключением одной точки: в нулевом магнитном поле происходит фазовый переход II рода. Во всей области сверхпроводимости (зеленой) магнитное поле в толще сверхпроводника равно нулю, работает эффект Мейснера. Указанные величины H относятся к внешнему полю.

Характерными для каждого материала являются величины критической температуры T_c в нулевом поле и критического магнитного поля H_c при нулевой температуре. Это координаты концов линии переходов на диаграмме. Именно о них мы и будем говорить в дальнейшем и их называть критической температурой и критическим магнитным полем. Вот каковы критические температуры и поля некоторых сверхпроводников:

Ртуть	$T_c = 4,15 \text{ К}$	$H_c = 411 \text{ Э}$
Свинец	$T_c = 7,2 \text{ К}$	$H_c = 803 \text{ Э}$
Ниобий	$T_c = 9,2 \text{ К}$	$H_c = 1944 \text{ Э}$
Алюминий	$T_c = 1,19 \text{ К}$	$H_c = 99 \text{ Э}$
Ванадий	$T_c = 5,3 \text{ К}$	$H_c = 1370 \text{ Э}$

Несколько цифр для сравнения: средняя напряженность магнитного поля Земли 0,5 Э, а текущий по проводам в наших квартирах ток в 1 А создает в изоляции провода магнитное поле напряженностью около 2 Э. Впрочем, конечно, создаются сейчас и гораздо большие поля — в электромоторах, турбинах, специальных электромагнитах, рекордно достижимые в настоящее время напряженности постоянного магнитного поля составляют сотни тысяч Эрстед. Так что для промышленных применений нужны сверхпроводники с гораздо большими критическими полями, чем указанные в таблице. Как правило, чем больше критическая температура T_c , тем больше критическая напряженность H_c магнитного поля. Поиск сверхпроводников со все большими значениями T_c и H_c идет постоянно.

Критический ток. Есть и еще один критический параметр, который ограничивает существование сверхпроводимости. Это критический ток, или, поскольку ток критической величины зависит от размеров образца, лучше говорить о критической плотности тока, т. е. о токе, который способен пропустить сверхпроводник через единичное поперечное сечение. Эту величину обозначают j_c и измеряют в А/м² (в системе СИ), а также в А/см² и других единицах.

Мы только что обсуждали, как магнитное поле разрушает сверхпроводимость (посмотрите на фазовую диаграмму еще раз: чем больше внешнее магнитное поле, тем меньше температура, при которой наступает сверхпроводимость, а если напряженность поля H превысит H_c , то сверхпроводимости не будет вообще). Но пусть даже внешнее магнитное поле отсутствует. Если по сверхпроводнику пропускается ток, то этот ток тоже будет создавать свое магнитное поле, и это магнитное поле столь же разрушающе будет действовать на сверхпроводимость. Таким образом, критическим должен

становиться ток, который создает критическое магнитное поле. Это действительно оказывается так на опыте для многих сверхпроводников.

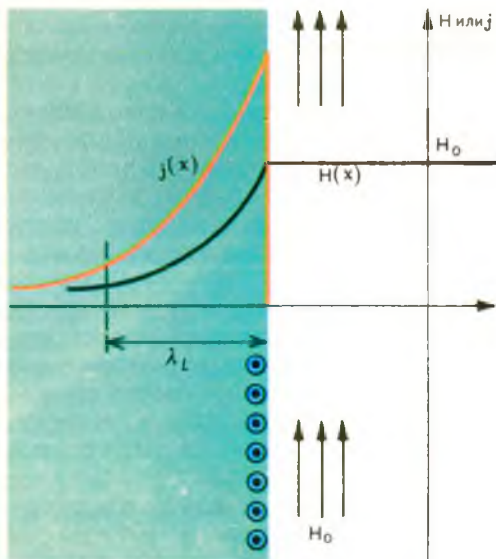
До сих пор мы часто упоминали два типа токов, которые могут течь в сверхпроводниках. Во-первых, это замкнутый экранирующий ток, который течет по поверхности образца и обеспечивает эффект Мейснера. Конечно, экранирующий ток течет только тогда, когда есть внешнее магнитное поле, которое «нужно» не впускать в сверхпроводник.

Во-вторых, через сверхпроводящий образец, включенный в электрическую цепь, может течь транспортный ток, который не зависит от внешнего магнитного поля. Оба эти тока имеют как бы разное «назначение», хотя по сути и то, и другое электрический ток. Магнитное поле любого тока одинаково влияет на сверхпроводимость.

Если ток течет в толще сверхпроводника, то и магнитное поле тока должно создаваться там же. Но одно из главных свойств сверхпроводимости — эффект Мейснера — как раз и состоит в том, что магнитное поле вытесняется из объема сверхпроводника. Значит, и транспортный ток должен выталкиваться на поверхность.

Все токи (в сверхпроводниках I рода) поверхностные, они текут в тонком слое вблизи границы сверхпроводника с нормальной фазой. По тонким стенкам сверхпроводящей трубки будет течь точно такой же ток, что и по сплошному цилиндру.

Глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник. Давайте поподробнее взглянем на поверхность сверхпроводника, на которой происходят такие важные явления (см. рис. на с. 36). Вдоль границы протекает сверхпроводящий ток, который экранирует магнитное поле и не пускает его в глубь материала (на



Граница раздела сверхпроводника (слева, зеленым цветом) и магнитного поля (справа, стрелками обозначены его силовые линии). Кружки с точками внутри обозначают текущий по поверхности сверхпроводящий ток с направлением на нас. Поле спадает плавно (по экспоненте), глубиной его проникновения условно считается расстояние, на котором напряженность падает в $e \approx 2,72$ раза (буквой e обозначается основание натурального логарифма). Красная линия — зависимость плотности тока от расстояния поперек плоской границы сверхпроводника.

рисунке — влево). Этот ток течет в некотором приповерхностном слое. Если сужать этот слой, то плотность тока будет возрастать, что в конце концов приведет к разрушению материала. Но раз экранирующий ток распределяется на определенную толщину, то и магнитное поле проникает на такое же расстояние в глубь сверхпроводника и уменьшается вглубь постепенно. На рисунке показано, как ведет себя напряженность внешнего магнитного поля и плотность тока в зависимости от расстояния в глубь сверхпроводника от плоской границы. Обе эти величины постепенно убывают, распространяясь на глубину, которую обычно обозначают буквами λ_L и называют лондоновской глубиной проникновения (в честь братьев Лондон, которые впервые ввели эту величину).

Глубина проникновения λ_L оказывается различной для разных сверхпроводников. Она зависит от свойств материала. Вот каковы ее значения для некоторых сверхпроводников:

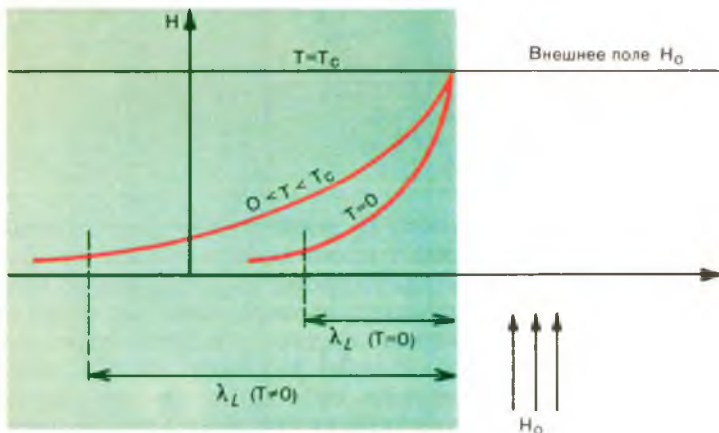
Олово	$\lambda_L = 510 \text{ \AA}$
Алюминий	$\lambda_L = 500 \text{ \AA}$
Свинец	$\lambda_L = 390 \text{ \AA}$
Ртуть	$\lambda_L = 380 - 450 \text{ \AA}$
Ниобий	$\lambda_L = 470 \text{ \AA}$
Таллий	$\lambda_L = 920 \text{ \AA}$

Приведенные значения λ_L относятся к нулевой температуре T . Они отражают проникновение поля как бы при «максимальной» сверхпроводимости, когда все электроны становятся «сверхпроводящими» и вторая, «нормальная» электронная жидкость совсем исчезает. При росте температуры от нуля до критической λ_L возрастает. Можно представить себе исчезновение сверхпроводимости при нагревании как процесс все большего проникновения магнитного поля, пока наконец при критической температуре оно не захватит весь образец (см. рис. на с. 38).

Численные значения глубины проникновения даны в ангстремах (\AA). Это атомная единица длины, $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см} = 0,1 \text{ нм}$. Обычно расстояния между атомами в кристаллах составляют несколько ангстрем, причем изменение этих расстояний даже на одну сотую долю ангстрема может играть существенную роль для свойств кристалла.

Глубина проникновения оказывается гораздо больше, чем эти атомные расстояния. Область проникновения магнитного поля и сверхпроводящего тока распространяется на сотни и тысячи атомных слоев. Она и не может быть «слишком» тонкой — иначе «не успеют» сформироваться сверхпроводящие свойства. Ведь сверхпроводимость — это свойство системы атомов, а не отдельных атомов.

Чем выше температура, тем глубже проникает в сверхпроводник магнитное поле.

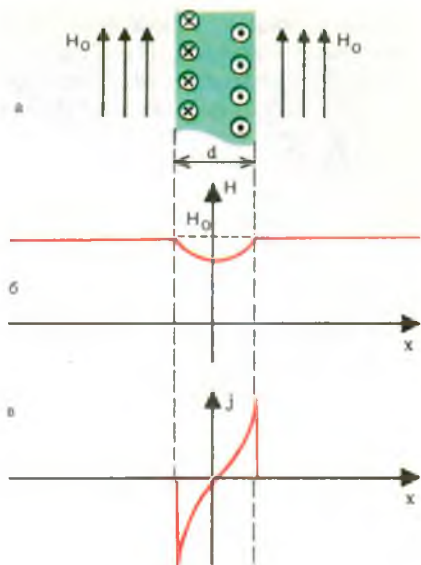


Впрочем, с точки зрения обыденных размеров глубина проникновения достаточно мала: $\lambda_L \sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ см.

Величины в несколько миллионных долей сантиметра вполне оправдывают слова «вытеснение на поверхность». В экспериментах на «толстых» образцах это так и есть.

Влияние формы сверхпроводника на проникновение магнитного поля и на сверхпроводящий переход. До сих пор мы говорили о самой простой ситуации: у плоской границы большого куска сверхпроводника создавали параллельное этой границе магнитное поле и смотрели, как оно влияет на сверхпроводимость (см. рис. на с. 36). Однако в физических исследованиях и в технических приложениях обычно используются сверхпроводящие образцы значительно более сложной формы. В этом случае влияние магнитного поля также усложняется.

а — тонкая пленка толщиной d в магнитном поле H . Силловые линии поля обозначены стрелками, кружки \odot обозначают линии тока, текущего в направлении «на нас», кружки \otimes — линии тока, текущего в направлении «от нас». Ниже, на графиках б и в, показаны зависимости напряженности H магнитного поля и плотности тока J от расстояния поперек пленки.



Например, вполне реально создавать сверхпроводящую пленку, толщина d которой меньше глубины проникновения λ_L . (Тонкая пленка нужна, например, для измерительных приборов.) Такая пленка оказывается слишком тонкой и уже не может полностью экранировать магнитное поле. Ток течет по всей ее толщине, а магнитное поле проникает внутрь, лишь слегка ослабляясь (см. рис. на с. 39).

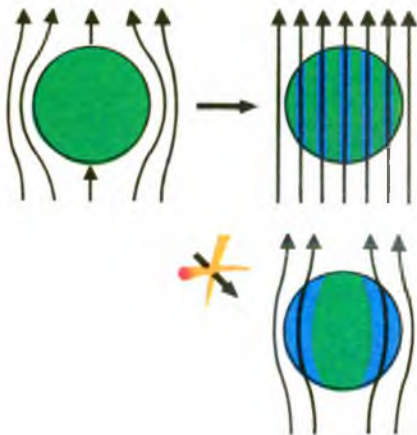
В объеме сверхпроводника магнитное поле существовать не может. Только в пограничном слое толщиной λ_L происходит его «противоборство» со сверхпроводимостью, на что «тратится» часть «сверхпроводящего выигрыша в энергии». В пленках удастся это как бы «обойти», что сразу приводит к эффектному результату: критическое магнитное поле тонкой пленки гораздо

больше, чем критическое поле массивного образца из того же материала. Приблизительно можно сказать, что оно увеличивается во столько же раз, во сколько глубина λ_L больше толщины d , т. е. в λ_L/d раз. Таким образом можно получить увеличение критического поля почти в 100 раз. И все потому, что удалось убрать явное «противоборство» магнитного поля и сверхпроводимости — и разрушить сверхпроводимость стало гораздо сложнее.

Промежуточное состояние. А теперь давайте мысленно внесем в магнитное поле, пока небольшое, сверхпроводящий шар (см. рис. на с. 41). В пограничном слое толщиной λ_L вдоль поверхности шара возникнут экранирующие токи, которые вытеснят магнитное поле. Пусть диаметр этого шара гораздо больше, чем λ_L , и потому тоненький пограничный слой на рисунке просто не обозначен. Пока мы будем считать, что магнитное поле полностью выталкивается из шара. Но тогда оно становится неодинаковым в различных местах у поверхности шара. Его значение у «полюсов» шара оказывается меньшим, чем первоначальное, а значение у «экватора» — большим.

Теперь будем увеличивать магнитное поле и посмотрим, что произойдет, когда его экваториальное значение достигнет критического. Такое поле должно разрушить сверхпроводимость в близлежащей области шара и проникнуть туда. На первый взгляд получилась бы картина, изображенная на рисунке, где в экваториальные области проникло магнитное поле и они перешли в нормальное состояние. Но при этом уменьшается значение самого поля: представьте себе снова поток жидкости на месте силовых линий магнитного поля. Проникнув в шар, жидкость как бы разлилась шире, зато уменьшила свой уровень. Но ведь уменьшенное поле будет ниже критического, оно не должно разрушать сверхпроводимость. Налицо противоречие в наших рассуждениях.

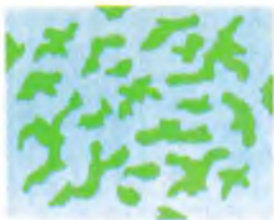
Сверхпроводящий шар в магнитном поле. Небольшое магнитное поле полностью выталкивается из шара. В достаточно большом магнитном поле возникает промежуточное состояние шара. Через нормальные области проходят силовые линии поля. Области, в которых сохраняется сверхпроводимость, закрашены зеленым.



Его решение нашел Л. Д. Ландау: образец разбивается на чередующиеся нормальные и сверхпроводящие зоны (см. рис. на с. 41) и «пропускает» поле через свои нормальные области. Такое состояние называют промежуточным. Наиболее наглядно промежуточное состояние удастся наблюдать в сверхпроводящей пластине, ориентированной перпендикулярно полю. Если пластина достаточно протяженная, то практически никакое магнитное поле не может обогнуть ее. Сколь угодно слабое поле должно создавать каналы для своего проникновения. В этих каналах силовые линии поля сгущаются, и напряженность поля как раз равна критической.

Поперечные размеры нормальных полос составляют, например, около 0,01 см, т. е. их вполне можно наблюдать невооруженным глазом.

Например, изготовим пластину из сверхпроводника с низкой критической температурой (допустим, из алюминия с $T_c = 1,19$ К), а на ее поверхность насыпаем оловянный порошок ($T_c = 3,7$ К). Тогда в алюминиевой пластине может существовать промежуточное состояние, а



Схематическое изображение промежуточного состояния сверхпроводящей пластины в перпендикулярном поле.

частицы олова останутся сверхпроводящими и будут выталкиваться из нормальных областей, собираясь над сверхпроводящими. Такую картину легко сфотографировать, тогда мы видим распределение нормальных и сверхпроводящих областей, пример которого показан на рис. на с. 42.

По мере увеличения магнитного поля размеры сверхпроводящих областей уменьшаются. Эти области исчезают совсем, когда величина внешнего магнитного поля достигает критической и весь образец переходит в нормальное состояние.

Сверхпроводники II рода. Оказывается, промежуточное состояние возникает не у всех сверхпроводящих материалов. Существует целый класс сверхпроводников, в которые магнитное поле проникает по-другому. Это в основном сплавы, а из чистых элементов — ниобий. Они получили название сверхпроводников II рода. Первоначально изучавшиеся сверхпроводники, такие, как ртуть, свинец, алюминий, называли сверхпроводниками I рода.

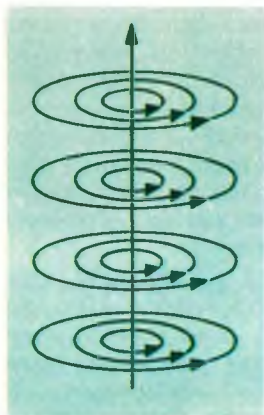
Чем различаются эти два рода сверхпроводимости? Сверхпроводники I рода выталкивают магнитное поле и способны «бороться» против него, пока его напряженность не достигла критического значения H_c . Выше этого предела вещество переходит в нормальное состояние. В промежуточном состоянии образец как бы впус-

кает в себя магнитное поле, однако с точки зрения физики точнее сказать, что образец просто разбивается на «большие» соседствующие куски: нормальные и сверхпроводящие. Через нормальные «протекает» магнитное поле напряженностью H_c , а в сверхпроводящих, как и положено, магнитное поле равно нулю. Если мы «приблизим» к себе любой клочок границы между такими областями, то увидим как бы картинку рисунка на с. 36 — экранирование поля.

Сверхпроводники II рода также выталкивают магнитное поле, но только очень слабое. При повышении напряженности магнитного поля сверхпроводник II рода «находит возможность» впустить поле внутрь, одновременно сохраняя сверхпроводимость. Это происходит при напряженности поля, намного меньшей, чем H_c : в сверхпроводнике самопроизвольно появляются вихревые токи.

Вихревое состояние сверхпроводников II рода теоретически предсказал советский физик А. А. Абрикосов в опубликованной в 1957 г. работе.

Токовые вихри можно уподобить длинным соленоидам с толстой обмоткой (см. рис. на с. 44), только ток в них течет не по проводам, а прямо в толще сверхпроводника, не растекаясь в стороны и не меняя своей силы, — ведь это сверхпроводящий ток. Как и в любой катушке из провода, в таком вихре создается магнитное поле, т. е. как бы в толще сверхпроводника создается нормальный канал, вбирающий в себя струйку потока магнитного поля. Диаметр этого вихревого канала строго задан, он не зависит от внешнего магнитного поля. Он меняется от сверхпроводника к сверхпроводнику, а численно составляет около 10^{-7} см, т. е. гораздо меньше, чем обычные размеры областей промежуточного состояния сверхпроводников I рода.



Схематическое изображение вихря в сверхпроводнике II рода. Вихрь параллелен внешнему магнитному полю. Силовые линии поля как снаружи проводника, так и в центре вихря обозначены прямыми стрелками, а вихревые токи — замкнутыми круговыми стрелками.

Вихри. Это очень красивое и не очень обычное явление, поэтому в существование вихрей мало кто верил — пока их не обнаружили экспериментально.

В сверхпроводнике II рода вихри ориентированы параллельно внешнему магнитному полю. Они и появляются тогда, когда включается поле, и «входить» или «выходить» из образца могут только через «боковую» поверхность. Вихри можно уподобить дыркам в сыре, по ним магнитное поле проникает в толщу сверхпроводника.

Условно можно сказать, что каждый вихрь захватывает и вносит внутрь сверхпроводника «одну» силовую линию магнитного поля. Если увеличивать напряженность внешнего магнитного поля, то размеры каждого из вихрей и величина потока магнитного поля, которую они проводят, не увеличиваются. Просто увеличивается количество вихрей и уменьшается расстояние между ними.

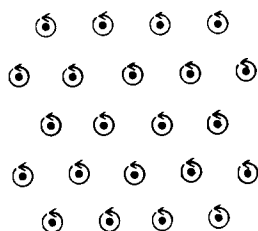
Вихри безразличны друг другу: текущие в них

токи создают взаимные помехи, и поэтому параллельные вихри отталкиваются. Они стараются держаться подальше друг от друга, но когда их много, то отталкивание идет со всех сторон.

Подобно атомам кристалла, вихри образуют правильную решетку. Если смотреть вдоль направления магнитного поля, как бы с торца цилиндров-вихрей, то, как правило, получается картина треугольной решетки, условно изображенная на рис. на с. 46. Ее удалось наблюдать экспериментально приблизительно теми же способами, что и промежуточное состояние сверхпроводников I рода, но уже, конечно, с помощью микроскопа.

Вихри возникают, если напряженность внешнего магнитного поля достигает некоторой новой для нас критической величины, которая называется нижним критическим полем (H_{c1}). В момент, когда поле достигло величины H_{c1} , в сверхпроводник проникли первые вихри. При дальнейшем увеличении напряженности количество вихрей увеличивается, а расстояние между ними уменьшается, т. е. магнитное поле как бы сжимает решетку вихрей — пока она не разрушится, вихри сольются и произойдет переход в нормальное состояние. Только в этот момент исчезает сверхпроводимость. Это происходит при достижении верхнего критического поля H_{c2} .

Вот так сверхпроводник II рода ухитряется «примирять» сверхпроводимость и магнитное поле. Конечно, вне вихрей магнитное поле равно нулю, а сердцевина вихря находится в нормальном состоянии. Но можно рассчитать некоторое среднее поле: внутри сверхпроводника I рода оно будет в точности равно нулю, а в сверхпроводнике II рода — нет (см. рис. на с. 47). Можно сказать, что H_{c1} гораздо меньше H_c , зато H_{c2} гораздо больше, и это чрезвычайно важно для практического применения сверхпроводимости.



Так выглядит треугольная решетка вихрей, если мы смотрим вдоль направления магнитного поля. Каждый кружок со стрелкой условно изображает вихревой ток, а точка в середине — направленную к нам силовую линию магнитного поля. Каждые три соседних вихря образуют правильный треугольник.

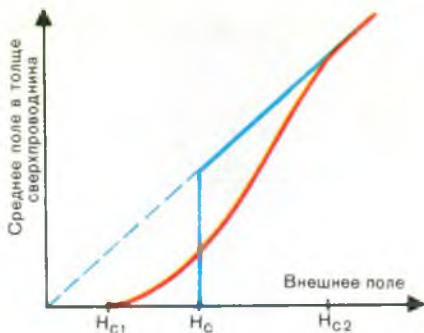
Сверхпроводимость II рода значительно труднее разрушить магнитным полем — поскольку велико поле H_{c2} . Из таблицы видно, какие гигантские поля способны выдерживать некоторые сплавы (из которых сейчас изготавливают сверхпроводящие провода) без разрушения сверхпроводимости.

Вещество	T_c	H_{c2} при температуре 4,2 К
Nb_3Ti	8—10 К	90 000—130 000 Э
V_3Ga	14,5 К	210 000—230 000 Э
Nb_3Sn	17—18 К	220 000—250 000 Э
V_3Si	17 К	230 000 Э
Nb_3Ga	20 К	340 000 Э
Nb_3Ge	21—24 К	370 000—400 000 Э

К сожалению, пока мы не можем продолжить этот ряд цифр — верхние критические поля у вновь открытых высокотемпературных сверхпроводников и некоторых других соединений столь велики, что их еще не удалось измерить (при близких к абсолютному нулю температурах).

Движение вихрей. Вихрь как целое может передвигаться в толще сверхпроводника — ведь это вихревой ток, который взаимодействует с другим током или магнитным полем. Оказывается, что движение такого вихря происходит с трением, и это не очень приятное обстоятельство.

Для сравнения на одном графике мы условно изобразили зависимость среднего поля в толще сверхпроводника от величины внешнего магнитного поля для сверхпроводника I рода (черная линия) и для сверхпроводника II рода (красная линия).

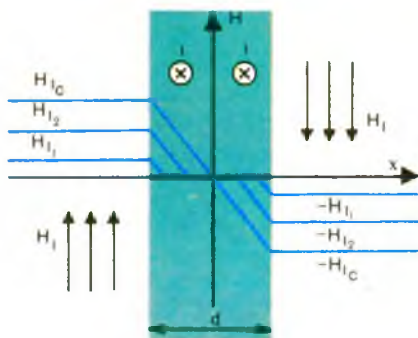


Давайте попытаемся пропускать по сверхпроводнику какой-либо ток — транспортный ток, — он начнет взаимодействовать с вихрями и двигать их. На трение вихрей при их движении будет уходить энергия. Но это означает, что возникло электрическое сопротивление и перестало «работать» одно из главных свойств сверхпроводимости.

Получается, что критическая плотность тока сверхпроводников II рода определяется не количеством сверхпроводящих электронов и не количеством вихрей, а их способностью к движению. Ток без сопротивления течет только тогда, когда удастся вихри как-то закрепить.

Сделать это возможно, поскольку вихри цепляются за дефекты кристаллической решетки металла. Конечно, сила их взаимодействия с дефектами зависит от вида дефекта. Единичный дефектный атом вихрь просто «не заметит». Атом слишком мал для него, удержать на себе вихри способны лишь «протяженные» дефекты — искажения кристаллической решетки, включающие мириады атомов. Тогда транспортный ток будет обтекать вихри без сопротивления.

Вот какие случаются парадоксы: чтобы увеличить



Пластина из сверхпроводника II рода показана зеленым цветом, вдоль нее по направлению от нас течет транспортный ток I , обозначенный кружками с крестиками \otimes . Ток создает магнитное поле напряженностью H_I , обозначенное стрелками по бокам. На рисунок наложен график зависимости поля H_I от расстояния x при разных значениях тока I , вплоть до критической, $I = I_1, I_2, I_c$.

проводимость нормального металла, металлурги стараются сделать его как можно чище и совершенней. А для того, чтобы сверхпроводник был способен нести как можно больший ток без сопротивления, надо его специальным образом «портить».

Попробуем описать более подробно и наглядно столь непривычную картину протекания тока. Пусть у нас есть сверхпроводящая пластина, вдоль которой мы начинаем пропускать транспортный ток, постепенно увеличивая его силу (см. рис. на с. 48). Ток I создает вокруг пластины магнитное поле H_I . Если ток I мал, то и поле H_I мало. Оно не проникает в пластину, на поверхности течет экранирующий мейснеровский ток. Когда транспортный ток I увеличивается настолько, что его магнитное поле H_I сравнивается с нижним критическим полем H_{c1} , то в пластину с обеих сторон начинают проникать вихри и вблизи поверхности закрепляются на дефектах. Чем больше ток, тем больше вихрей входит в пластину (и тем сильнее проникает туда магнитное поле). Вихри продвигаются все дальше к середине пластины и в какой-то момент достигают ее. При этом везде в сечении пластины плотность тока равна критической,

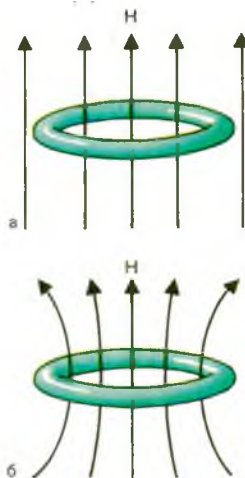
а магнитное поле проникает вплоть до середины пластины, где оно меняет знак.

Захват магнитного потока. Сделаем из сверхпроводящего материала «бублик». Поместим его в магнитное поле, а затем охладим и переведем в сверхпроводящее состояние (см. рис. на с. 49). Тогда из толщ «бублика» поле вытолкнется, а в дырке по-прежнему останется.

Оказывается, что сверхпроводящий «бублик» в точности сохраняет захваченное, или, как еще говорят, «замороженное», поле. Его изменениям препятствует закон электромагнитной индукции. Если мы пытаемся изменить магнитный поток через кольцо, то в самом кольце наводится ток, препятствующий изменению. Поскольку кольцо сверхпроводящее, ток не затухает — магнитный поток остается неизменным.

Напомним, что магнитный поток через дырку кольца — это просто произведение площади S дырки на напряженность H перпендикулярного магнитного поля.

Более того, оказывается, что величина захваченного магнитного потока может принимать только определенные значения. Грубо говоря, это значения: 0, 1, 2, 3, ... и так далее все целые числа, а величина единицы $\Phi_0 = 2,07 \times 10^{-15} \text{ Вб}$. Отнеситесь к этой величине с уважением — это фундаментальная физическая постоянная, которая связана с другими фундаментальными



а — сверхпроводящее кольцо в магнитном поле.
б — сверхпроводящее кольцо захватило магнитное поле.

постоянными формулой

$$\Phi_0 = \frac{\pi \hbar c}{e},$$

где \hbar — постоянная Планка (в честь немецкого физика Макса Планка), c — скорость света, а e — заряд электрона, который не стоит путать с основанием натурального логарифма. Мы надеемся, что величина $\pi \approx 3,14$ нашим читателям знакома.

Единица магнитного потока Φ_0 называется квантом потока. Магнитный поток обязательно равен целому числу квантов.

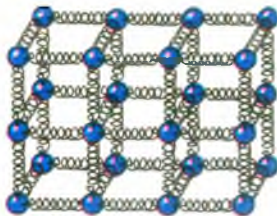
Один квант потока очень мал, но все-таки удалось поставить эксперименты и зарегистрировать квант потока через сверхпроводящее кольцо. Для сравнения: поток довольно слабенького естественного магнитного поля Земли через площадь 1 мм^2 равен приблизительно 25 000 квантам.

Квантование потока через кольцо — важное и красивое явление, выражение квантовых свойств в больших масштабах. Но еще более важно и вполне логично, что вихри в сверхпроводниках II рода несут ровно один квант магнитного потока. Их вполне можно сравнить с фундаментальными элементарными частицами, у которых есть свой «заряд» — квант потока.

Влияние кристаллической решетки. Давайте забудем пока о реальной структуре твердых тел со всеми их дефектами и отклонениями от регулярности и будем считать, что атомы металла выстроены в идеально правильную кристаллическую решетку. (Самый простой пример такой решетки из одинаковых атомов изображен на рис. на с. 51.)

Исчезновение электрического сопротивления, экра-

Схема расположения атомов в простом кристалле. Каждый кружочек — равновесное положение атома, а пружинки между ними условно изображают связи, силы, действующие между атомами.



нирование внешнего магнитного поля, скачок теплоемкости при сверхпроводящем фазовом переходе — все эти свойства относятся к электронам. Кристаллическая решетка представляет собой как бы сосуд, емкость, в которую налита электронная «жидкость». И вот на первый взгляд при сверхпроводящем переходе меняются свойства жидкости, а сосуд здесь ни при чем.

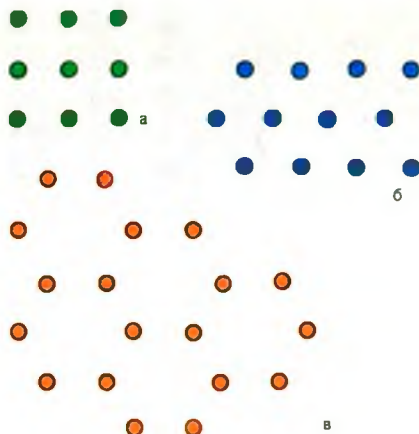
Оказывается, что это первое впечатление неверно. Действительно, в подавляющем большинстве случаев сверхпроводящий переход почти не влияет на решетку. Но вот кристаллическая решетка на сверхпроводимость влияет, более того, определяет сверхпроводимость, причем исключений из этого закона пока не обнаружено.

Существует много видов кристаллических решеток. Часто одно и то же вещество может иметь кристаллические решетки разных видов, т. е. одни и те же атомы могут быть расположены друг относительно друга по-разному (см. рис. на с. 52).

Переход от одного типа кристаллической решетки к другому происходит при изменении либо температуры, либо давления, либо еще какого-нибудь параметра. Такой переход, как и возникновение сверхпроводимости и плавление, является фазовым.

Влияние кристаллической решетки на сверхпроводимость продемонстрировал открытый в 1950 г. изотоп — эффект.

При замене одного изотопа на другой вид кристалли-



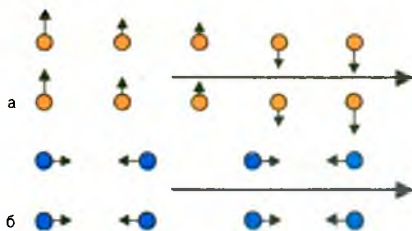
Для наглядности мы изобразили различные возможные кристаллические решетки на плоскости. Виды трехмерных решеток еще более разнообразны.

ческой решетки не меняется, «электронная жидкость» вообще не затрагивается, меняется только масса атомов. Оказалось, что от массы атомов зависит T_c многих сверхпроводников. Чем меньше масса, тем больше T_c . Более того, вид этой зависимости позволил утверждать, что T_c пропорциональна частоте колебаний атомов решетки, а это сыграло существенную роль в понимании механизма сверхпроводимости. Поэтому, прежде чем переходить к рассказу о природе сверхпроводимости, стоит более подробно описать колебания решетки и ввести новое действующее лицо книги.

Фононы. В равновесии атомы твердого тела образуют правильную кристаллическую решетку. Однако стоять неподвижно на месте атомы, естественно, не могут. Узлы кристаллической решетки — это для атомов лишь средние положения, вокруг которых они беспрерывно колеблются.

Между атомами действуют силы, поэтому колебания одного атома передаются другим и распространяются

Бегающая по кристаллической решетке волна — это согласованное движение атомов. На примере рисунков *a* и *б* видите, что это движение может быть различным даже при одном и том же направлении волны. Чем сложнее кристалл, чем большее количество разных атомов составляют его решетку, тем большее количество видов волн может распространяться в нем.



на весь кристалл. Удобно представлять, будто бы атомы связаны между собой пружинками, как на рис. на с. 51. Такая модель позволяет хорошо описывать колебания кристаллической решетки, или, иначе говоря, волны, распространяющиеся в решетке. Видов таких волн может быть довольно много: тем больше, чем сложнее вид кристаллической решетки. Различаются частоты и скорости распространения волн, различается характер движения атомов в такой волне, как это изображено для примера на рис. на с. 53. Самый знакомый для большинства людей вид волн в решетке кристалла — звук.

Слово «*φωνή*» (фонэ) в переводе с греческого — «голос». Волны кристаллической решетки советский физик И. Е. Тамм назвал фононами, хотя и не все они звуковые. Такое название связано с тем, что волны кристаллической решетки подчиняются законам квантовой механики и ведут себя не только как волны, но и как частицы. Фонон можно рассматривать как летящую частицу, обладающую, как ей и положено, определенной энергией и скоростью. Очень легко запомнить, какова энергия такой частицы: она пропорциональна частоте соответствующей волны. Поэтому, чтобы не думать о различных единицах измерения и коэффици-

ентах пропорциональности, физики частоту, как и температуру, часто измеряют в энергетических единицах.

Природа сверхпроводимости

Квантовая механика. Так называется наука, которая вошла в состав физики в 20-х гг. нашего века. Под квантовой механикой мы понимаем здесь нерелятивистскую квантовую теорию, изучающую законы движения микрочастиц при скоростях, гораздо меньших, чем скорость света. Эти законы «работают» в основном на атомных масштабах расстояний, однако в некоторых случаях проявляются и в макром мире. Можно назвать несколько квантовых явлений, помимо сверхпроводимости, которые мы можем наблюдать без приборов, — лазерный свет, магнитное упорядочение атомов ферромагнетика и др. Хотя эта наука уже полностью разработана, ее законы до сих пор непривычны для людей. Возможно, поэтому их почти не изучают в школах. А может быть, наоборот: эти законы остаются непривычными, потому что их не изучают в школах.

Но при рассказе о сверхпроводимости обязательно нужно вступать в царство квантовой механики. Без этого обойтись нельзя, поскольку само явление сверхпроводимости существенно квантовое, и его не удавалось понять, пока не было в основном закончено построение квантовой механики.

Для того, чтобы сделать механизм сверхпроводимости наглядным, мы будем разбирать поведение электронов в кристаллах. Если бы это были частицы, подчиняющиеся обычной механике, то было бы удобно уподобить их бильiardным шарам.

Бильiardный шар находится где-то на бильiardе, он движется с какой-то скоростью. Мы привыкли, что его положение, скорость и энергия могут быть любыми, уж во всяком случае они никак не зависят от размеров



бильярда и высоты его бортов.

Давайте попробуем устроить на бильярде «твердое тело» — расставим шары правильными рядами. Это будет «кристаллическая решетка», шары изображают тяжелые атомные остовы. Атомные остовы, или ионы, действительно намного тяжелее электрона. Напомним, что каждый протон и нейтрон, из которых составлено ядро атома, почти в 2 тыс. раз тяжелее электронов.

Теперь пустим на бильярд небольшой шарик, который будет сталкиваться с большими шарами. При этом почти не будет теряться энергия, если отношение их масс велико. Будем считать, что движение маленького шарика тормозится только за счет трения о сукно бильярда. И трение, и столкновения с большими шарами важны для понимания поведения электрона в кристалле. Конечно, в кристалле и то и другое свойство относится к рассеянию электрона на ионах. При столкновении электрона с ионом изменяется направление его движения (как и при столкновении большого шара с очень маленьким). И те же столкновения обеспечивают «трение» — потерю энергии (трение о сукно).

Однако и после этого разъяснения «бильiardная» модель твердого тела вызывает недоумение. Решетка из больших бильiardных шаров отнюдь не кажется удобным «сосудом», «трубой» для движения шариков-электронов. Попробуйте «включить ток» — толкнуть «электрон» сквозь «решетку». Если в «решетке» достаточно много шаров, протолкнуть электрон будет очень нелегко, сколько бы ни вмешиваться в его движение. Конечно, опытный игрок сможет пустить электрон точно между рядами шаров, но в металлическом кристалле ток-то идет отнюдь не только вдоль граней!

Таким образом, эта модель не годится для описания твердого тела.

Квантовый бильярд. Для устройства такого бильярда возьмем обычное плоское корыто, волны на поверхности воды будут «электронами». Для нашей модели необходимо возбуждать волны с помощью длинной линейки, частицы изображаются плоскими бегущими волнами, а не круговыми волнами от упавшего в воду камешка.

К сожалению, довольно сложно создать в домашних условиях достаточно большой полигон, чтобы спокойно наблюдать движение волны-«электрона». После того как волна дойдет до стенки и отразится, возникнет рябь (интерференция), и надо будет ждать, пока вода успокоится для следующего опыта.

На квантовом бильярде можно попробовать устроить «кристаллическую решетку». Прикрепите к дну установленные правильными рядами палочки или что-нибудь еще в этом роде — так, чтобы они выступали над водой. Пустим на «кристаллическую решетку» плоскую волну — «электрон». Она будет рассеиваться на каждой палочке — «атоме». От каждой палочки будут расходиться круги, которые затем, однако, будут складываться, и мы увидим необычный результат: волна-«электрон» пройдет через «кристалл». Конечно, на нашем кустарном бильярде она окажется искаженной, но можно доказать такое утверждение: если бы мы всё сделали совершенно точно, то и волна прошла бы без искажений.

Мы проиллюстрировали один из результатов квантовой механики: электрон проходит через правильную кристаллическую решетку, «не замечая» ее. Но это справедливо только для идеальной решетки. Любое отклонение от идеальности вносит нарушения в движение электронов и тем самым вносит вклад в электрическое сопротивление. Отклонения от идеальности возникают по двум причинам. Первая — это фононы. Атомы решетки все время колеблются и отклоняются от сред-

них положений — тем больше, чем выше температура. Именно отсюда возникает температурная зависимость электрического сопротивления, изображенная на рис. на с. 9.

Вторая причина — дефекты. Это примеси — «чужие» атомы в узлах решетки; вакансии — отсутствие атома там, где он должен быть; «разрывы» решетки, которые называются дислокациями, и т. д. Видов дефектов набирается довольно много, они отвечают за остаточное электрическое сопротивление, обозначенное буквой ρ_0 на рис. на с. 9.

Шкала энергий. Вернемся теперь к сверхпроводимости и прежде всего оценим, какую энергию выигрывает электрон при переходе от нормального состояния к сверхпроводящему. Об этом выигрыше мы часто говорили в предыдущих главах. Ведь этот выигрыш — главное условие перехода. Физическая система не будет самопроизвольно менять свое состояние, если нет возможности уменьшить свою энергию.

Величину «сверхпроводящего выигрыша в энергии» легко определить, если еще раз обратить внимание на опыты в магнитном поле. Сверхпроводник вытесняет магнитное поле, и для этого, на создание токового экрана, тратится энергия. Расходуется на это как раз «сверхпроводящий выигрыш в энергии». Поэтому он равен энергии максимального магнитного поля, какое сверхпроводник еще способен из себя вытеснить. Величину такого поля (H_c) начали измерять вскоре после открытия сверхпроводимости и обнаружили, что выигрыш в энергии оказался удивительно маленьким.

Сверхпроводимость — очень «хрупкое» явление. Но здесь придется приостановиться и извиниться, поскольку в физике нельзя сказать только: «маленькая энергия», надо еще добавить, по отношению к чему она маленькая? Астрофизик с полным правом назовет эне-

ргию, излучаемую Солнцем, маленькой по сравнению с энергией, испускаемой при взрыве сверхновой звезды, но энергия Солнца заведомо больше всех наших земных энергий.

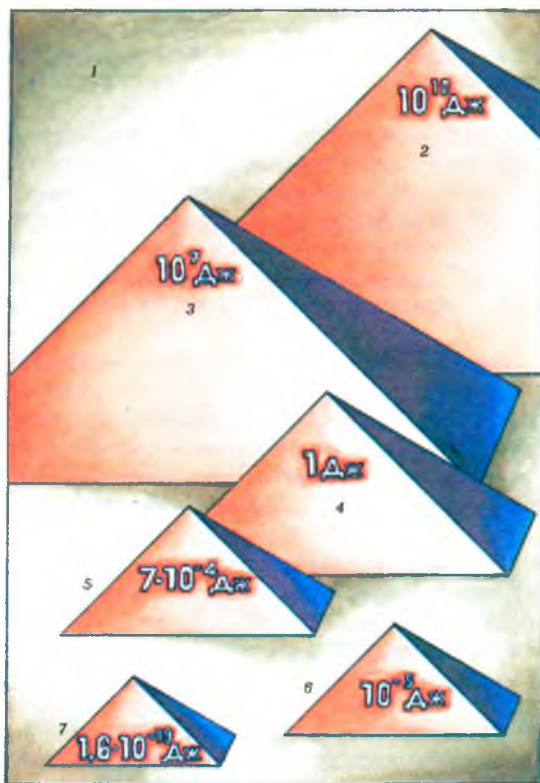
Возьмем за точку отсчета энергию в 1 Дж (Единица энергии в международной системе СИ, принятая в современной школе.) Приблизительно это та энергия, которую затратит человек, чтобы подпрыгнуть на пару миллиметров. С человеческой точки зрения совсем немного — за день на передвижения, даже особенно не утруждаясь, человек тратит порядка десяти миллионов Джоулей.

Нас, однако, интересует энергия куска вещества. Например, выигрыш в энергии для сверхпроводящей ртути составляет $7 \cdot 10^{-14}$ Дж на каждый кубический сантиметр ее объема при абсолютном нуле температуры.

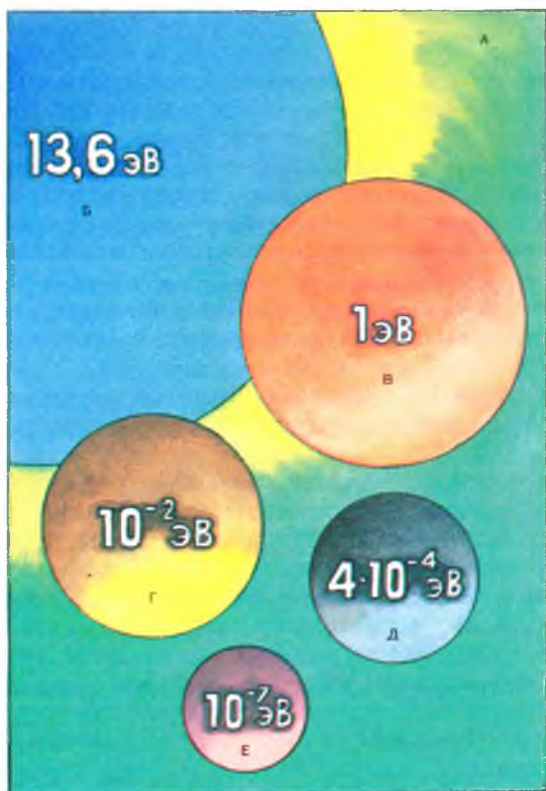
Эту энергию необходимо еще соотнести с количеством действующих лиц — электронов. В 1 см^3 вещества приблизительно 10^{22} — 10^{23} атомов, у ртути приблизительно $4 \cdot 10^{22}$ атомов/ см^3 . (Постоянная Авогадро составляет $6 \cdot 10^{23}$ частиц на молярный объем. Атомный вес ртути — 201 г, ее плотность — $13,6 \text{ г/см}^3$. Из этих данных легко вычислить молярный объем ртути и оценить концентрацию ее атомов.) Можно считать, что приблизительно таково же число электронов, составляющих электронную жидкость ртути; простые металлы отдают туда в среднем около одного электрона на атом. Выигрыш в энергии сверхпроводящей ртути составляет около $2 \cdot 10^{-26}$ Дж в расчете на один электрон.

Это уже настолько маленькая величина, что удобнее перейти к другой единице энергии — электронвольту (эВ). Это энергия, которую набирает электрон, пролетающий ускоряющую разность потенциалов в 1 В.

Обычно для того, чтобы оторвать один электрон от изолированного атома или вырвать электрон из кристалла, требуется энергия в несколько электронвольт.



Такой же порядок имеет кинетическая энергия электрона в кристалле, и приблизительно такую же энергию несет квант видимого света, фотон — несколько электронвольт. Таким образом, это характерный атомный масштаб энергий. 1 эВ составляет $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж, гораздо больше, чем тот выигрыш в энергии, который мы оцениваем и который оказывается одной десятиллионной долей электронвольта, 10^{-7} эВ.



С чем еще можно сравнить эту величину? Энергии фононов, колебаний кристаллической решетки гораздо меньше, чем энергии электронов, — приблизительно в тысячу раз. Для электрона фонон — пушинка, которая может составить легкую помеху, но не более того. Средние энергии фононов порядка сотых долей электрон-вольта — это так называемые энергии тепловых излучений. (Если приложить к холодному кристаллу руку, то

при передаче тепла как раз будут возбуждаться фононы.)

Но ведь и энергия фононов, равная, скажем, 10^{-2} эВ, в 100 тыс. раз больше, чем «сверхпроводящий выигрыш в энергии», 10^{-7} эВ. Более того, этот выигрыш даже меньше, чем температура перехода в сверхпроводящее состояние. Температура — мера кинетической энергии, и ее тоже можно измерять в электронвольтах. Температура перехода для ртути соответствует приблизительно величине $4 \cdot 10^{-4}$ эВ. Эта величина еще в 4 тыс. раз больше, чем то изменение энергии электрона, которое происходит при переходе в сверхпроводящее состояние.

Коллективное явление. Все упомянутые энергетические величины в компактном виде приведены на рис. на с. 60—61.

Для того чтобы понять, как возможно существование сверхпроводимости, надо понять, каким образом столь малое изменение энергии электрона приводит к столь разительному изменению его поведения. Выигрыш в энергии за счет сверхпроводимости — это самая маленькая энергия в системе. Очень тяжело уловить ее на фоне всех остальных. Достаточно малейшего изменения положения атомов в кристалле — и хороший сверхпроводник перестает быть вообще сверхпроводником. Теоретический расчет этого явления весьма затруднителен.

Главное, однако, в понимании сверхпроводимости вот что: это явление связано не с особенностями индивидуального поведения электронов (слишком мала энергия в расчете на один электрон), его возникновение — результат коллективного поведения электронов. Электроны уже никак нельзя считать независимыми друг от друга, их движение становится упорядоченным в отличие от нормального состояния, свойства которого можно понять, рассмотрев среднее поведение индиви-

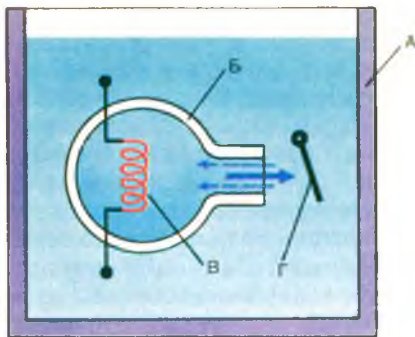
дуального электрона.

Сверхпроводимость и некоторые другие квантовые явления физики, для которых существенно совместное поведение частиц, вполне официально называются коллективными явлениями.

В фантастическом романе «Ариэль» А. И. Беляева ученый Чарльз Хайд создает летающего человека — летающего без помощи какого бы то ни было аппарата. По идее Беляева, Хайд изобрел способ направить хаотическое тепловое движение частиц тела в одну сторону, благодаря чему Ариэль обрел способность летать, присаживаясь, чтобы передохнуть, на крыло попутного самолета. Для полета Ариэлю не требовалось дополнительных затрат энергии — ведь ни одна частица его тела не изменила величины своей скорости, изменились только направления движения. Такой образ поможет лучше представить, что такое сверхпроводимость. В этом состоянии происходит не столько изменение энергии электронов, сколько изменение характера их движения. Возникает порядок движения. Конечно, поток электронов строго в одном направлении (как и молекул) невозможен. Поэтому порядок движения электронов лучше сравнивать не с однообразным движением колонны солдат, а с хитрым сплетением движений танцующих в затейливом хороводе.

Сверхтекучесть. Пожалуй, первым среди коллективных движений квантовых частиц было понято явление сверхтекучести жидкого гелия при температуре ниже 2,17 К. Это имеет отношение и к истории сверхпроводимости, поэтому скажем несколько слов о сверхтекучести. Явление сверхтекучести «открывалось» в течение многих лет. Наибольший вклад в его изучение внес в 1938 г. П.Л. Капица, а теорию явления построил в 1941 г. Л. Д. Ландау.

Сверхтекучий жидкий гелий (который в этом состо-



В большой сосуд А с гелием II помещена колбочка Б. В широкой части колбочки встроена нагревательная спираль В — если включить извне ток, то можно нагревать жидкий гелий только внутри колбочки. Узкая часть колбочки открыта, жидкий гелий может втекать или вытекать из нее свободно, но перед отверстием расположено легкое крылышко Г, отклонение которого при малейшем движении жидкости можно наблюдать. Если начать нагревать спираль, крылышко сразу показывает, что из колбочки начинает вытекать гелий. Вместе с тем количество жидкости в колбочке не уменьшается сколь угодно долго, а значит, гелий должен не только вытекать, но и втекать. Многочисленные опыты показывают, что в узкой части колбочки в каждой точке сосуществуют два противоположных течения — нормальное, уносящее из колбочки тепло, и сверхтекучее, доставляющее туда жидкость, причем сверхтекучее течение не оказывает давления на крылышко.

Эта часть течения называется гелием II в отличие от несверхтекучего гелия I) может протекать через тонкие капилляры, щели и вообще любые отверстия совершенно свободно, т. е. совсем без трения. (Речь идет о сверхтекучести наиболее распространенного изотопа гелия ^4He , а есть еще сверхтекучесть изотопа гелия ^3He . Свойства этих явлений сильно различаются.) Это весьма похоже на сверхпроводимость электронной жидкости, только заряд атомов гелия равен нулю, поэтому тока при сверхтекучести не возникает. Однако некоторые другие свойства гелия II и электронной жидкости сверхпроводника очень похожи. Оказывается, и гелий II ведет себя как смесь двух жидкостей — сверхтекучей и нормальной.

Сверхтекучая часть гелия II движется

совсем без трения и одновременно совсем не переносит тепла, в нормальной же части содержится все тепло, имеющееся в жидкости, эта часть жидкости испытывает трение.

Существование сверхтекучей и нормальной жидкостей ярче всего демонстрирует опыт, схема которого изображена на рис. на с. 64.

Как же понять это движение без трения? Представьте, что все частицы жидкости как бы сцеплены вместе и ни одну нельзя отделить, не разрушив все состояние.

Речь идет о квантовых состояниях и о квантовых законах, поэтому аналогия в повседневной жизни вряд ли найдется. Но можно вспомнить одну из самых первых задач квантовой механики, которую решил датский физик Нильс Бор в 1912 г. Эта задача о строении атома.

Атом и квантовые состояния. К 1912 г. было твердо установлено; что атом состоит из тяжелого положительно заряженного ядра и легких отрицательно заряженных электронов. Но было не понятно, как они могут сочетаться в атоме. Вращающийся вокруг атома электрон в соответствии с законами классической физики движется ускоренно. Ускоренно движущийся заряд должен излучать электромагнитные волны и тем самым терять энергию, а значит, довольно быстро упасть на ядро.

Решение Бора таково: «вращающиеся» вокруг ядра электроны находятся в определенных «квантовых» состояниях. Они поглощают или излучают энергию только при переходе из одного квантового состояния в другое, лежащее выше или ниже по энергии. По аналогии со сверхпроводимостью и сверхтекучестью можно сказать, что электрон в своем состоянии «движется по орбите без трения». Ничто не может помешать ему, если

энергия «помехи» меньше, чем энергетическое расстояние между состояниями.

Теперь попробуем перенести то же самое на жидкость в целом. Пусть у нее есть наинизшее по энергии состояние, которое называется основным, и следующие, вышележащие. Если разница в энергии между этими последующими состояниями и основным сколь угодно мала, то жидкость находится в нормальной фазе, она легко принимает и отдает энергию, а ее движение происходит с трением.

Если же вышележащие состояния отделены от основного некоторым интервалом, который называется щелью (энергетической), тут-то и становится возможным движение без трения. Щель мешает жидкости переходить в другое состояние. Но конечно, если воздействие (например, магнитное поле, сверхпроводящий ток, нагрев) достаточно большое — больше критического, — тогда щель разрушается.

Таким образом, сверхпроводимость и сверхтекучесть — прямое проявление квантовых свойств огромных коллективов частиц.

Квантовые жидкости. Мы привели два примера квантовых жидкостей: жидкий гелий, где при низких температурах возникает сверхтекучесть, и электронную жидкость, где при низких температурах возможна сверхпроводимость, которая есть не что иное, как сверхтекучесть жидкости заряженных частиц. Но если для жидкого гелия наши качественные объяснения почти достаточны, то далеко не так просто обстоит дело со сверхпроводимостью.

Названные жидкости — представители двух классов квантовых жидкостей, которые могут существовать в природе. Дело в том, что на два класса делятся все частицы в зависимости от величины присущего им спина. Спин — одна из квантовых характеристик любой

частицы. К сожалению, аналогии для нее в окружающей нас жизни нет. Очень условно можно говорить о спине электрона как о характеристике его вращения вокруг своей оси, т. е. представлять электрон чем-то вроде волчка. Однако в то же время стоит твердо помнить, что никакого вращения на самом деле нет. А есть спин.

Спин может принимать целые или полуцелые значения. (Единицей измерения спина является постоянная Планка $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$ эрг·с.) Если частица имеет целый спин: 0, 1, 2, и т. д., она называется Бозе-частицей, в честь индийского физика Ш. Бозе. Если частица имеет полуцелый спин: $1/2$, $3/2$, $5/2$ и т. д., она называется Ферми-частицей, в честь итальянского физика Э. Ферми. Свойства тех и других значительно различаются.

Спин атомов гелия равен нулю, поэтому жидкий гелий представляет собой пример Бозе-жидкости. Кардинальное свойство Бозе-частиц — стремление занимать одно состояние, т. е. стремление всех частиц жидкости как бы притягиваться друг к другу. Речь идет, конечно, не о реальном притяжении, а о самом простом представлении о свойствах Бозе-частиц. Очень удачным нам кажется эпиграф, который предпослал рассказу о них известный английский физик Дж. Займан: «Чем нас больше соберется, тем нам будет веселей».

Для Бозе-жидкости естественно выполнение условий, необходимых для движения без трения.

А вот для Ферми-жидкости дело обстоит наоборот: никакие две Ферми-частицы не могут обладать одинаковым набором характеристик. Это абсолютный закон, который называется принципом Паули, в честь известного швейцарского физика. Этот закон задает как бы отталкивание Ферми-частиц друг от друга, а электроны обладают спином $1/2$, и электронная жидкость является Ферми-жидкостью.

Плотность (концентрация) электронов в простых

металлах очень велика (она составляет 10^{22} — 10^{23} электронов на 1 см^3). Очень велико и число состояний, которые эти электроны занимают, — каждому свое, в отличие от Бозе-жидкости. Поэтому и спектр энергий электронов в простых металлах очень широк, а их средняя кинетическая энергия достигает нескольких электрон-вольт.

Очень долго было совершенно непонятно, как в этих условиях устроить щель между состояниями электронной жидкости, да и как может устойчиво существовать столь маленькая щель (она по порядку величины соответствует критической температуре) на фоне столь больших энергий электронов. Единственный принципиально возможный путь — создать из электронов Бозе-частицы. На словах это просто: достаточно связать электроны в пары. Тогда суммарный спин пары либо 0, либо 1, и в любом случае пара в целом является Бозе-частицей.

Коль скоро электроны образовали пары, физику-профессионалу становится понятным, почему возникает сверхпроводимость. Но вот с какой стати образовывать пару двум отрицательно заряженным частицам, которые сильно отталкиваются по закону Кулона. Можно оценить, что эти силы отталкивания сообщают двум «соседним» электронам ускорение разлета порядка 10^{20} ускорений свободного падения (которое равно, как известно, $g = 9,8\text{ м/с}^2$). Конечно, в электронной жидкости взаимные отталкивания уравниваются, и реально таких ускорений электрон не испытывает, но как жить в паре с подобным соседом?

Электрон-фононное взаимодействие. В главе «Физика сверхпроводимости» мы представили еще одно действующее лицо этой книги — фононы. Именно они помогут нам объединить электроны в пары.

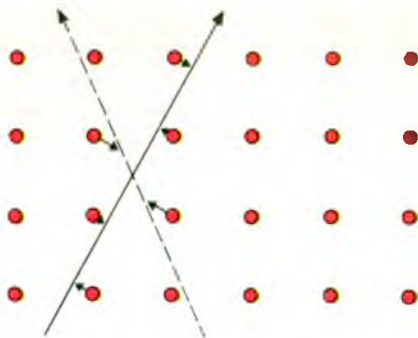
Напомним, что фононы — это волны кристалличес-

кой решетки металла. Однако равным образом мы можем представлять их как частицы, что принято в квантовой механике. Далее, мы писали о том, что идеальной кристаллической решетки электрон не замечает, поэтому о рассеянии электрона на колеблющейся кристаллической решетке можно говорить как о рассеянии на фононах.

При рассеянии электрона на волне решетки, или, иными словами, столкновении электрона с фононом, меняются энергии, скорости и направления движения этих частиц, но соблюдаются законы сохранения энергии и импульса. Можно мысленно представлять картину столкновения двух бильiardных шаров, однако электрон и фонон слишком разные по своей природе частицы, и потому точнее другой образ: электрон поглощает фонон, принимая его энергию и импульс. Или электрон испускает фонон, запускает колебание решетки, отдавая ей часть своей энергии. Все подобные процессы вкуче называются взаимодействием электронов с фононами.

В нормальном состоянии это взаимодействие порождает электрическое сопротивление: электрон в своем движении возбуждает колебание решетки, а сам при этом слегка тормозится. Оказывается, взаимодействие электронов с фононами обеспечивает не только сопротивление, но и его исчезновение при низких температурах. Оно способствует столь желанному объединению электронов в пары.

Связывание электронов в пары. Чтобы понять, как это происходит, проследим дальнейшую судьбу фонона, который был возбужден электроном. Итак, в решетке пролетел электрон и вызвал колебание ионов, расположенных в узлах решетки. Электрон несет отрицательный заряд, а ионы заряжены положительно. Поэтому ионы слегка притянутся к пролетевшему электрону (см.



Кружки изображают упорядоченные в решетку атомные остовы, ионы. Сплошная и пунктирная линии показывают как бы траектории движения двух притягивающихся через посредство фононов электронов.

рис. на с. 70). Но ионы гораздо тяжелее электрона, поэтому их движение более медленное. Электрон уже «давно» пролетел, а ионы еще только подтянулись к тому месту, где он был. Значит, в этом месте образовался (на некоторое время) небольшой избыточный положительный заряд, и уже другой летящий мимо этого места электрон почувствует его и изменит свое движение, притянется к этому месту.

Вот таким способом фононы создают слабое притяжение между электронами. Но притягиваются электроны, находящиеся на больших расстояниях. Ведь для того чтобы второй электрон (см. рис. на с. 70) притянулся ионами, первый должен уже далеко улететь, иначе его отрицательный заряд перебьет все притяжение. Электроны, находящиеся вблизи, отталкиваются, как и положено двум отрицательным зарядам по закону Кулона, а на достаточно больших расстояниях они притягиваются за счет фононов. На больших расстояниях отталкивание двух электронов не мешает, так как вокруг и между обоими электронами много положительных ионов и других электронов, и все силы притяжения и отталкивания уравниваются.

Притяжение между электронами приводит к связы-

ванию их в пары, которые называются куперовскими, в честь американского ученого Л. Купера. Первое сравнение, которое приходит в голову — возникла «электронная» молекула. Но это не совсем так. Атомы в молекулах находятся рядышком, а для того, чтобы пропустить «сквозь» молекулу какой-то «чужой» атом, нужно затратить большую энергию, и при этом молекула разрушится. В куперовской паре электроны находятся на большом расстоянии, которое может быть в тысячи раз больше, чем среднее расстояние между электронами, т. е. между двумя составляющими пару электронами свободно бегают огромное количество других электронов, относящихся к другим парам. Это большая толпа, в которой вы видите своего друга далеко от вас, но все же не теряете его из виду.

Среднее расстояние между электронами в паре обозначается греческой буквой ξ и называется длиной корреляции. Это расстояние, на котором электроны чувствуют друг друга и на котором существенно изменяются сверхпроводящие свойства. Величина ξ для разных сверхпроводящих материалов различна. Вот несколько примеров:

Алюминий	$\lambda_L = 500 \text{ \AA}$	$\xi = 15000 \text{ \AA}$
Олово	$\lambda_L = 510 \text{ \AA}$	$\xi = 2500 \text{ \AA}$
Таллий	$\lambda_L = 920 \text{ \AA}$	$\xi = 2700 \text{ \AA}$
Ниобий	$\lambda_L = 470 \text{ \AA}$	$\xi = 600 \text{ \AA}$
Сплав ниобия и тантала	$\lambda_L = 900 \text{ \AA}$	$\xi = 300 \text{ \AA}$

Значения длин ξ и λ_L указаны для температуры, стремящейся к абсолютному нулю.

Граница сверхпроводника. Две длины характеризуют каждый сверхпроводящий материал: длина корреляции ξ и глубина проникновения магнитного поля λ_L .

Магнитное поле в сверхпроводнике сильно изменяется на длине λ_L , а на длине ξ сильно изменяется число сверхпроводящих электронов, т. е. электронов, связанных в куперовские пары. Особенно наглядно это видно на границе сверхпроводника. На рисунке схематически показаны: справа сверхпроводник, в глубине которого количество n_s сверхпроводящих электронов постоянно, а к границе с нормальной фазой начинает падать; слева существует постоянное магнитное поле, которое в сверхпроводнике экранируется и от его границы вглубь спадает (рис. на с. 73).

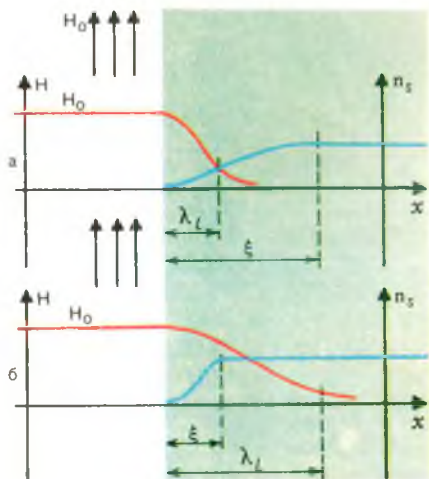
Видно, что возможны две ситуации. Первая: длина ξ больше глубины λ_L (см. рис. а). Иметь такую границу невыгодно энергетически, тут образуется целая область, где магнитное поле уже вытеснено (на что требуется энергия), а сверхпроводящих электронов мало и сверхпроводящего выигрыша в энергии еще нет. Так выглядит граница сверхпроводника I рода. На образование такой границы нужно затрачивать энергию, поэтому в промежуточном состоянии таких границ возникает не очень много. Да и вообще сверхпроводимость I рода легче разрушить.

Совсем другое дело — сверхпроводник II рода (см. рис. б). Тут длина λ_L больше ξ ¹. Получается, что магнитное поле спадает плавно, вытесняется медленнее, чем электроны связываются в пары, и возникает сверхпроводящий выигрыш в энергии. Эта ситуация энергетически выгодна, и в сверхпроводнике II рода таких границ появляется много — в виде вихрей. Вихрь ведь и есть такая граница, только свернутая в трубку, в середине которой магнитное поле.

¹Есть точно, то к сверхпроводникам II рода относятся материалы, для которых $\lambda_L > \xi/\sqrt{2}$.

Граница сверхпроводящей (зеленый цвет) и нормальной (белый цвет) фаз. Зависимость от расстояния поперек границы напряженности магнитного поля H и количества сверхпроводящих электронов.

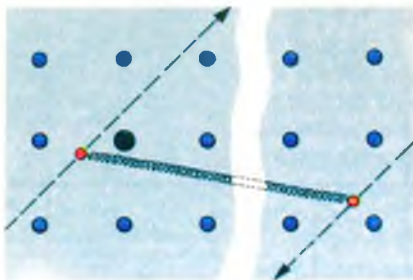
а — сверхпроводник I рода.
б — сверхпроводник II рода.



Два главных свойства сверхпроводника. Это отсутствие электрического сопротивления и эффекта Мейснера. Теперь посмотрим, как они связаны с описанным механизмом сверхпроводимости.

Действительно, куперовские пары электронов могут двигаться без трения (см. рис. на с. 74). Дело в том, что электроны в такой паре разделены большим расстоянием, а энергии их одинаковы. Пусть один электрон наталкивается на дефект — но не может рассеяться произвольно, ведь его «держит» второй, спаренный электрон. В такой ситуации оба связанных электрона лишь изменяют направление своего движения, но не меняют своей энергии, а это и значит, что они движутся без трения.

Электроны, по тем или иным причинам не связанные в пары, ведут себя обычно, их мы называли нормальными. В сверхпроводящем состоянии некоторое число пар разрушается под влиянием температуры, магнитного поля и т. п.



Условное изображение рассеяния куперовской пары электронов на дефекте. Кристаллическая решетка обозначена маленькими кружочками, а дефектный узел — большим черным кружком посередине. Два движущихся в противоположном направлении электрона куперовской пары показаны пунктирными линиями. Расстояние между ними гораздо больше, чем расстояние между соседними узлами кристаллической решетки.

В куперовскую пару связываются электроны с противоположно направленными спинами. Это стремление противоречит стремлению магнитного поля выстраивать спины вдоль своего направления. Две эти противоположности совместить никак нельзя. Сильное магнитное поле распаривает электроны и уничтожает сверхпроводимость. Слабое же магнитное поле само вытесняется сверхпроводящими электронами. Они подстраиваются и изменяют свое движение так, чтобы экранировать поле.

И наконец, скажем заключительные в этой главе слова: сколь бы сложным ни казалось явление сверхпроводимости после нашего описания, на самом деле оно еще сложнее. Сверхпроводимость обусловлена коллективным, а не только парным поведением электронов. Взаимосвязано не только движение двух электронов в куперовской паре, но и движение всех пар между собой. Для тех, кто увлекается электро- или радиотехникой, такое свойство будет особенно понятным: можно сказать, что все пары движутся в фазе. И эта фаза вполне реальная квантовая характеристика сверхпроводника, существование которой доказано на опыте.

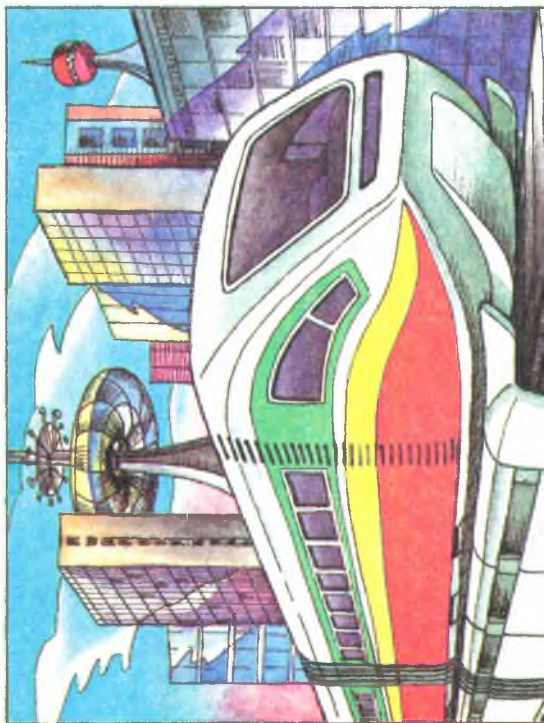
Объем и назначение этой книги не позволяют нам и дальше распространяться о тонкостях физики дела, надо оставить место и для рассказа о применениях сверхпроводимости.

Техника сверхпроводимости

Применение сверхпроводимости заманчиво и затруднительно. Знакомство с удивительными свойствами сверхпроводящих материалов сразу вызывает мысль о необходимости их применения в технике. Этой задачей стали заниматься еще в 20-х гг. Очень заманчиво не тратить энергию на потери в проводах. Стоит только запомнить, что в современных воздушных линиях электропередачи теряется до 10% передаваемой энергии и еще больше потери энергии на преобразование тока.

Однако не так-то просто заменить все провода на сверхпроводящие. Первая и очевидная трудность — низкие температуры. Подбираться к абсолютному нулю температур непросто и недешево. Многие стоящие на этом пути трудности уже преодолены. Скажем, затраты на собственно охлаждение не очень велики. Более существенным препятствием является сложность соответствующей аппаратуры, для создания и обслуживания которой требуется высокая квалификация и «высокая» технология.

Все работающие сверхпроводящие устройства должны быть тщательно изолированы от внешней среды. Гелий — дорогой и редкий материал, поэтому для уменьшения его потерь применяется дополнительное внешнее охлаждение жидким азотом. Такое двойное охлаждение сильно усложняет аппарат. Уже отсюда ясно, почему столь большое внимание уделялось повышению критической температуры сверхпроводимости и почему столь большой отклик вызвали недавние откры-





тия новых материалов. Об открытии новых материалов мы расскажем дальше, а сейчас кратко опишем уже существующие сверхпроводящие устройства.

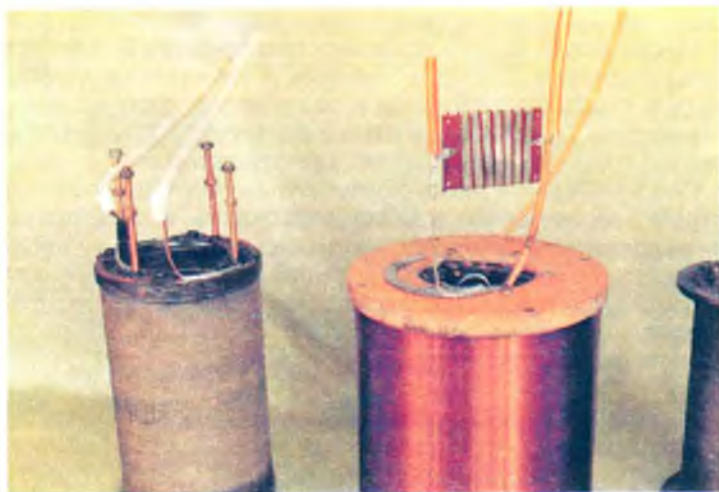
Реализовать идею линии электропередачи без потерь пока не удалось. В настоящее время технически сложно создать столь протяженное и равномерно охлаждаемое устройство. В разных странах испытываются небольшие опытные образцы линий электропередачи.

Пока работают лишь компактные сверхпроводящие устройства, которые удобно охлаждать и защищать. Первые такие устройства появились в 60-х гг. — после того, как были открыты материалы, пригодные для изготовления проводов. Несмотря на всю заманчивость, сверхпроводимость ждала своих применений еще дольше, чем раскрытия механизма явления.

Магниты. С постоянными магнитами человечество познакомилось достаточно давно, однако для большинства практических применений они непригодны. Напряженность их магнитного поля не очень велика и к тому же может изменяться во времени из-за воздействия внешних условий. Поэтому вот уже в течение многих лет для получения магнитных полей используются электромагниты. (Самые первые модели электромагнитов относятся к 20-м гг. XIX в). Электромагнит — это катушка, намотанная проводом, по которому течет ток. Создаваемое катушкой магнитное поле пропорционально силе тока и количеству витков.

Создание магнитов со все большими напряженностями поля сопровождалось увеличением силы тока и потерь энергии на джоулево тепло. Уже в 30-е гг. для создаваемых крупных магнитов потребовалось водяное охлаждение, а получение напряженностей в десятки тысяч Эрстед затруднительно без использования сверхпроводимости.

Сейчас в мире серийно производятся многие виды



сверхпроводящих магнитов. Еще более велико разнообразие магнитов, которые изготавливаются для специальных, часто уникальных установок научного и промышленного назначения. Несколько «простых» магнитов вы видите на рис. на с. 78.

Дорога к созданию сверхпроводящих магнитов была достаточно сложной. Первоначально главным препятствием были низкие критические поля сверхпроводников I рода. С открытием сверхпроводников II рода начались практические попытки создания сверхпроводящих магнитов. При этом инженеры столкнулись с различного рода неустойчивостями сверхпроводящих магнитных систем. Вот картина одной из них.

Сверхпроводящий магнит располагается в сосуде с жидким гелием. Через специальный канал в сосуд вво-

дятся провода, по которым получает питание обмотка магнита. По этому же каналу выходят пары испаряющегося гелия и в стационарных условиях подается жидкий гелий для компенсации испарения. Оказалось, что этого недостаточно, чтобы поддерживать магнит в рабочем состоянии. В 60-е гг. возникали аварии: резко увеличивалось тепловыделение, бурно испарялся жидкий гелий вместе с клочками обмотки и изоляции. После такой аварии магнит был непригоден к эксплуатации — его обмотка (находившаяся в жидком гелии) была расплавлена.

Плотность тока в магните близка к критической. По случайной причине в какой-то очень небольшой зоне обмотки сверхпроводник может перейти в нормальное состояние. Этот кусочек провода уже обладает сопротивлением (и довольно значительным по сравнению, например, с медью). На сопротивлении начинает выделяться тепло, и нормальный кусочек провода становится интенсивным нагревателем. Выделение тепла приводит к переходу в нормальное состояние соседних участков провода, сопротивление и потери еще больше увеличиваются, и процесс может развиваться лавинообразно. Запасенная энергия магнита превращается в тепло и не только испаряет весь жидкий гелий, но и разрушает обмотку.

Для стабилизации сверхпроводящих магнитов были созданы условия для саморассасывания случайно возникающих нормальных зон. Для этого сверхпроводник покрывается слоем хорошего нормального металла, обычно меди, теплопроводность которой гораздо больше, а удельное сопротивление гораздо меньше, чем у сверхпроводящего материала. Медь шунтирует участки, на которых произошел переход в нормальное состояние, а также способствует быстрому отводу тепла от зародыша нормальной фазы.

Впрочем, в сверхпроводящих устройствах разного

назначения применяются провода различной конструкции, и на этом стоит остановиться поподробнее.

Сверхпроводящие провода. Сверхпроводящие провода разительно отличаются от тех, что применяются в электрических бытовых устройствах вокруг нас.

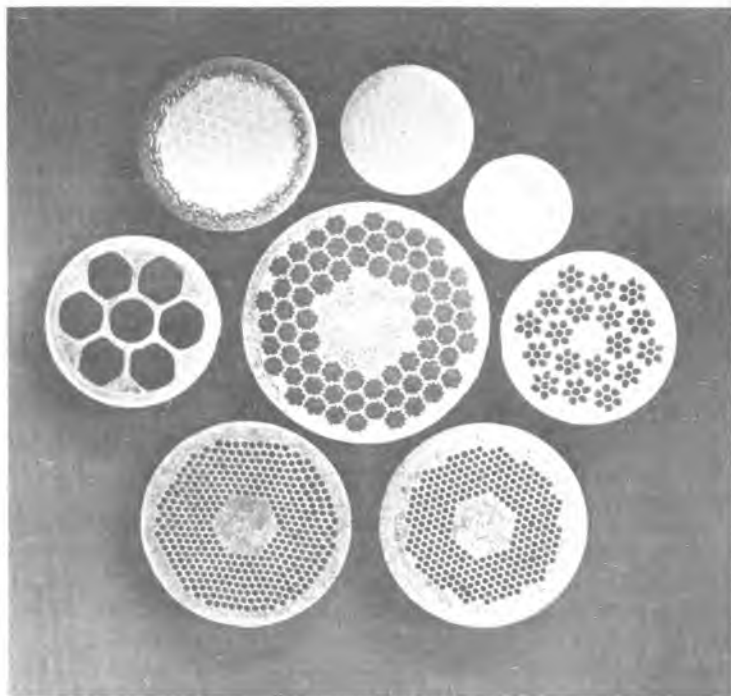
Высокие магнитные поля способны выдерживать лишь сверхпроводники II рода. Они «впускают» в себя магнитное поле в виде вихрей. Но движение этих же вихрей обуславливает появление электрического сопротивления, и большое критическое поле «компенсируется» малой критической плотностью тока.

Потребовались длительные усилия для создания материалов, структура которых препятствует движению вихрей. Для этого были созданы специальные сложные технологии, включающие множество этапов повторных плавок и волочений, отжига иковки, химической обработки и т. д. Фактически создана специальная область металлургии и материаловедения.

К современным материалам для сверхпроводящих проводов относятся в первую очередь сплавы ниобия (Nb) с титаном (Ti). Это наиболее часто используемый материал, провода из него производятся в ряде стран серийно (см. рис. на с. 81). Более высокими характеристиками обладает соединение Nb_3Sn . Оно выдерживает поле напряженностью до 100 тыс. Э одновременно с плотностью транспортного тока до 10^3 А/мм²! Напомним, что бытовой провод сечением 1 мм² предназначен для токов, не превышающих 1—2 А, во избежание расплавления.

Nb_3Sn также используется для конструирования проводов, хотя такие провода делать гораздо сложнее, чем ниобий-титановые. В главе «Физика сверхпроводимости» уже говорилось, что «хорошими» сверхпроводящими свойствами обладают, как правило, металлы с «плохими» нормальными свойствами. Например,

Сечение проводов, которые серийно
выпускаются промышленностью



сверхпроводники в нормальной фазе гораздо хуже про-
водят тепло и ток, чем, скажем, чистая медь. Кроме
того, большинство сверхпроводников, и в том числе
 Nb_3Sn , хрупкие. А ведь мы привыкли беззаботно изги-
бать обычные провода и даже пласти из них кружевные
узоры. Со сверхпроводящим материалом надо обра-
щаться гораздо аккуратнее; пожалуй, пока единствен-
ным приятным исключением являются ниобий-титано-

вые сплавы, которые обладают достаточной для изготовления проводов пластичностью. И они-то наиболее часто используются на практике.

Мы не можем даже перечислить все проблемы, возникающие при конструировании сверхпроводящих проводов. Решая их, конструктор должен совместить противоречивые требования. Скажем, для обеспечения стабильности желательно добавлять в провод побольше меди. Но тогда увеличивается его вес и уменьшается средняя плотность тока. Низкое удельное сопротивление меди способствует подавлению неустойчивостей, но зато увеличивает потери в переменном магнитном поле. (А в любом устройстве это поле будет меняться, как минимум, в моменты включения и выключения.)

Сверхпроводящие жилки провода, которые должны иметь диаметр менее 0,1 мм, располагаются в медной матрице. Жилки обязательно нужно скручивать относительно продольной оси провода. На рис. на с. 81 вы видите не просто сечения различных проводов, а разные фазы сборки сверхпроводящего провода. Пучок тоненьких сверхпроводящих жилок покрывается медью и скручивается, затем эта операция повторяется с полученными более толстыми жилками и т. д. Общее число собственно сверхпроводящих ниточек в сечении провода достигает десятков и сотен тысяч!

В крупных устройствах стабилизирующего влияния меди недостаточно, и провод по всей длине дополнительно охлаждают жидким гелием, для чего в медной матрице оставляют специальные каналы.

Так что сверхпроводящий провод весьма сложная и дорогая конструкция. Впрочем, такие утверждения всегда относительны. Килограмм сверхпроводящего материала для провода почти в тысячу раз дороже килограмма меди. Но если сравнить стоимость проводов, рассчитанных на равную силу тока, то сверхпроводящий провод окажется дешевле медного.

Применения сверхпроводящих магнитов. Сильные магнитные поля необходимы прежде всего для научных исследований в области физики. И здесь сверхпроводящие магниты применяются активно. Некоторые установки без них невозможно создать в принципе. На рис. на с. 84 вы видите, как собирают одну из них — это установка «Токамак-15». Она предназначена для получения и исследования плазмы при высоких температурах и плотностях. Естественно, для физиков такие установки и исследования представляют интерес сами по себе, однако обычно их создание оправдывается как этап на пути к осуществлению реакций термоядерного синтеза. Работы по созданию термоядерного реактора начались более 30 лет назад. По ходу дела было получено множество научных и инженерных результатов, которые, по-видимому, ценнее, чем гипотетическое осуществление заявленной цели.

Установки семейства «Токамак» представляют из себя тор (или, попросту говоря, «бублик»), внутри которого магнитное поле должно удерживать высокотемпературную плотную плазму. Магнитное поле очень сложной конфигурации создается сверхпроводящей магнитной системой, состоящей из большого количества обмоток нескольких видов. Один из элементов системы вы видите на рис. на с. 87. Назовем несколько чисел, характеризующих размеры и сложность системы: большой радиус тора составляет почти два с половиной метра, так что весь центр зала, который вы видите на рисунке, превосходит по своим размерам квартиру любого из читателей. Все это пространство будет закрыто кожухом и охлаждаться жидким гелием.

Токи в обмотках достигают 3700 A , а радиальная сила, которая будет действовать на одну катушку в рабочем состоянии, достигает 10 т .

Конструирование подобных плазменных установок уже немыслимо без сверхпроводящих магнитов, из





Момент монтажа сверхпроводящей магнитной системы обмотки тороидального поля установки «Токамак-15». Ин-

ститут атомной энергии им. И. В. Курчатова, Москва. Снимок сделан в начале 1988 г. Сейчас установка полностью собрана.

которых построены и магнитные системы новых ускорителей элементарных частиц. Создание таких систем характеризует сложность задач, которые научились решать.

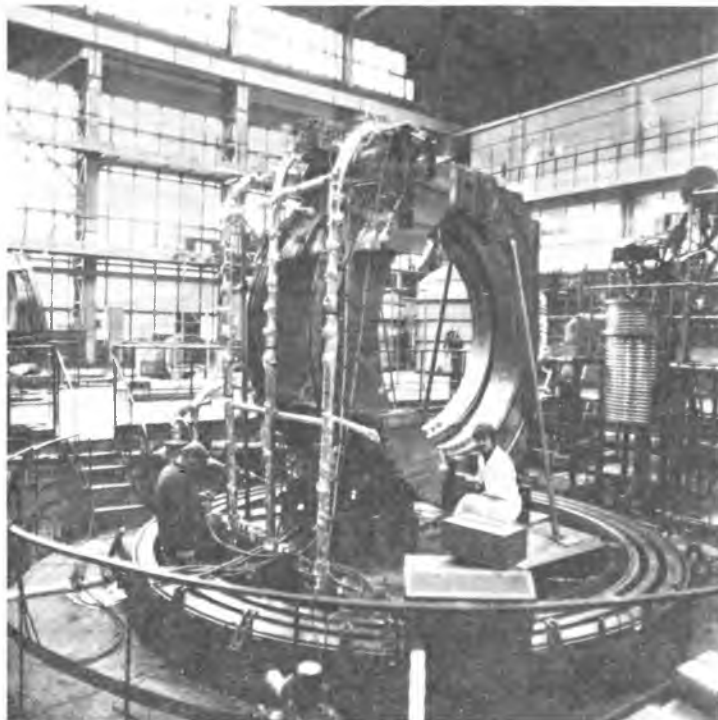
Впрочем, в лабораторных исследованиях применяются не только гигантские магниты. На рис. на с. 88 показан источник жесткого излучения, так называемая сверхпроводящая «змейка», которая излучает пучок электронов в магнитном поле, а магнитное поле создают сверхпроводящие магниты, один из которых находится за прямоугольной панелью в центре снимка.

Сверхпроводящие магниты используются в ЯМР-томографах (ЯМР — ядерный магнитный резонанс). Это — медицинский прибор, использующий свойство некоторых ядер (например, водорода) давать резонансный отклик на слабое электромагнитное излучение, причем частота резонанса прямо пропорциональна напряженности магнитного поля. Анализ (с помощью ЭВМ) отклика ядер в разных частях организма позволяет получать послойное контрастное изображение любых тканей, даже мягких, что очень сложно достичь другими методами. Можно надеяться, что в перспективе ЯМР-томограф позволит получать и биохимический анализ.

Во внутренней цилиндрической полости прибора сверхпроводящий магнит создает магнитное поле. В современных установках напряженность поля составляет 15—20 тыс. Э. Для получения хорошего изображения однородность поля в полости должна быть не хуже 0,1%. По сравнению с рентгеноскопией ЯМР-томография не только более мощное диагностическое средство, но и безвредное: 15-летние исследования пока не выявили

Подготовка элемента сверхпроводящей магнитной системы «Токамак-15» к испытаниям на

стенде Института атомной энергии им. И. В. Курчатова.

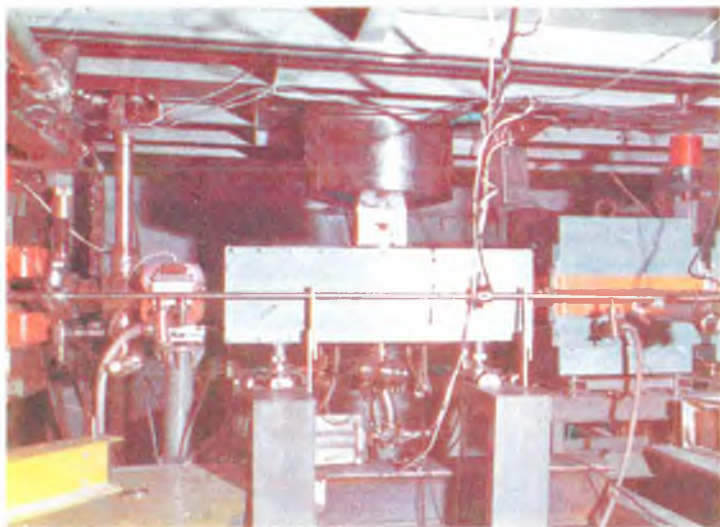


каких-либо отрицательных последствий кратковременного пребывания человека в сильном магнитном поле.

Идея использования ЯМР-томографии в медицине была высказана в 1971 г. Промышленный выпуск приборов начался в 1982 г. В конце 1985 г. их было 300, в 1986 г. — 600, к концу 1988 г. — более 2000. В ближай-

Сверхпроводящая «змейка» — источник синхротронного излучения на накопителе электронов

ВЭПП-3. Институт ядерной физики, Новосибирск.



шие годы в развитых странах не останется ни одной больницы без ЯМР-томографа. Это и большое технологическое достижение: столь сложная установка сделана полностью автономной и автоматизированной. Обслуживание сводится к ежедневной проверке уровня жидкого гелия.

Существуют и другие возможности применения сверхпроводящих магнитов, большинство из которых относится, скорее, к будущему. Разговор об этом продолжится в последней главе, сейчас мы кратко расскажем о совершенно ином классе сверхпроводящих устройств, реально существующих и активно используемых, — о сквидах. Для этого надо вернуться к физике сверхпроводимости.

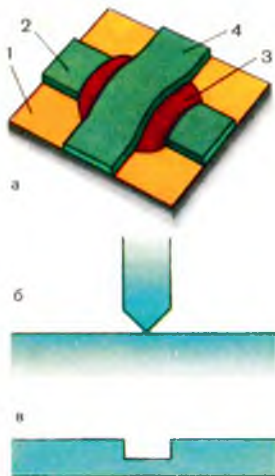
Эффекты Джозефсона. Они возникают при наличии контакта двух сверхпроводников. Их существование предсказал в 1962 г. английский физик Б. Джозефсон.

Что такое контакт? Мы щелкаем тумблером выключателя, замыкаем контакт, по цепи идет ток, и в комнате зажигается свет. Для этого потребовался «хороший контакт», соприкосновение двух проводников. Даже тонкая пленка диэлектрика создает огромное сопротивление и препятствует протеканию тока. Отсутствие контакта точно так же мешает протеканию и сверхпроводящего тока, причем препятствием в этом случае служит не только диэлектрик, но и несверхпроводящий металл.

Однако физика сверхпроводящего контакта сложнее. Проведем простой мысленный опыт: возьмем два разных куска сверхпроводника. Движение электронов в одном и другом никак не связано между собой, даже если это один и тот же материал. Теперь давайте сблизить эти два куска. Из несвязанных частей в конце концов составится единое целое! И в нем движение всех электронных пар взаимосвязано. Состояние контакта сказывается на всех электронах, а не только на оказавшихся вблизи. Когда же и как происходит переход от полного отсутствия связи двух кусков к их полному единству?

Сверхпроводящие электроны в нашей книге охарактеризованы некоторым масштабом длины ξ . Количество сверхпроводящих электронов не может возрастать или убывать «слишком резко» от одного участка сверхпроводника к другому. Но это означает, что граница сверхпроводника не может резко ограничивать влияние сверхпроводимости. Действительно, оказывается, что это влияние распространяется на длину ξ за границу сверхпроводника (если этому ничто не мешает, а мешать может, например, магнитное поле, см. рис. на с. 36, 73).

Если нанести на сверхпроводник тонкую пленку



Рисунки а, б, в схематически показывают возможности создания слабых сверхпроводящих звеньев. Это только примеры, в технике используется значительно большее число вариантов.

а — на подложку 1 напыляется полоска сверхпроводника 2, затем прослойка диэлектрика 3 и, наконец, сверху полоска сверхпроводника 4. Показанные на рисунке слои образуют джозефсоновский контакт. Реально это может быть только часть напыленного на той же подложке более сложного устройства.

б — в разрезе показан точечный контакт одного сверхпроводника с другим, который тоже образует слабое звено.

в — можно также сделать канавку в пленке сверхпроводника. На рисунке показан поперечный разрез такой пленки с канавкой. Существенно, чтобы поперечные размеры канавки были порядка ξ .

нормального металла толщиной меньше ξ , то эта пленка тоже обретает сверхпроводящие свойства. Такое явление называется эффектом близости.

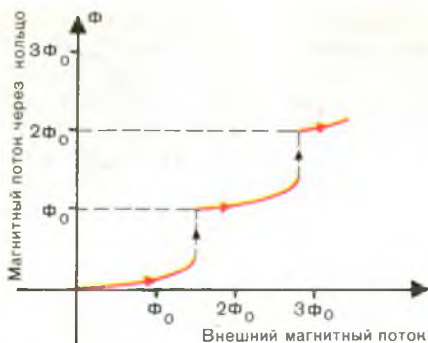
Эффекты Джозефсона возникают тогда, когда два куска сверхпроводника разделены тонкой пленкой нормального металла или диэлектрика — достаточно тонкой, чтобы они еще чувствовали сверхпроводимость друг друга, и достаточно толстой, чтобы все же разделить их. Именно о такой ситуации мы и говорим как о контакте двух сверхпроводников, а взаимовлияние сверхпроводников друг на друга, когда оно возникает, называется слабой сверхпроводимостью.

Сам контакт иначе называется слабым звеном сверхпроводящей цепи. Слабое звено можно создать отнюдь не только с помощью разделяющей два сверхпроводника пленки. Некоторые применяющиеся на практике виды слабых звеньев показаны на рис. на с. 90.

В каждом из сверхпроводников, находящихся в контакте, движение электронов упорядоченно, куперовские пары движутся **в фазе**. Эти фазы для обоих сверхпроводников, вообще говоря, различны — их различие обуславливает движение пар электронов через контакт. При описании эффектов Джозефсона полезно вспомнить явление интерференции в оптике. Это аналогичные явления — только на контакте сверхпроводников интерферируют не световые, а электронные волны, именно о разности их фаз идет речь. (Напомним, что по законам квантовой механики не только волну следует представлять как частицу, но и частицу, в данном случае электрон, — как волну.)

Стационарный эффект Джозефсона заключается в том, что через контакт самопроизвольно течет сверхпроводящий ток, естественно, без приложения какого-либо напряжения. Этот ток определяется разностью фаз обоих сверхпроводников. Он довольно слабый, но вполне ощутимый, для обычно применяемых контактов составляет величину порядка миллиамперов.

Нестационарный эффект Джозефсона возникает, если к контакту приложить постоянное напряжение U или попробовать пропускать через него ток, больший некоторого критического. (Обратите, пожалуйста, внимание на то, что критический ток слабого звена гораздо меньше критического тока сверхпроводника. Это разные величины. Поэтому, кстати, в цепях, рассчитанных на большие токи, слабых звеньев быть не должно и контакты необходимо изготавливать с большой тщательностью.) Тогда контакт обретает активное сопротивление и индуктивность, а ток течет через него переменный. В отличие от обычного закона Ома напряжение U определяет не амплитуду тока, а его частоту. При напряжениях порядка милливольт частоты составляют сотни и тысячи Гигагерц ($1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$). Эта область частот называется областью СВЧ — сверхвысоких частот.



Так увеличивается магнитный поток через сверхпроводящее кольцо со слабым звеном при увеличении внешнего магнитного поля. Внешним потоком мы называем величину потока, который проходил бы через кольцо, если бы сверхпроводимости не было.

Джозефсоновский контакт двух сверхпроводников не только преобразует постоянное напряжение в переменный ток, но и работает как колебательный контур — излучает электромагнитные волны в диапазоне СВЧ.

Неудивительно, что столь своеобразные явления быстро нашли свое применение.

Применение слабой сверхпроводимости — скивды.

Скивид — прибор, название которого произошло от английского варианта сокращения более длинного наименования: «сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство». «Сердце» скиvida представляет из себя сверхпроводящее кольцо с четырьмя выводами, которые служат для подачи тока и съема напряжения. В кольце есть одно или два слабых звена. Кольца с одним и с двумя слабыми звеньями — два разных вида скиvida, различающиеся по устройству и режиму работы. Мы, однако, в этой книге избегаем излишних подробностей, поэтому расскажем лишь о свойствах, общих для всех скиvidов.

Для их работы существенны два явления: стационарный эффект Джозефсона и явление сохранения и квантования магнитного потока в сверхпроводящем

кольце. Дело в том, что на сквид подается магнитное поле — внешнее или специально создаваемое в устройстве. Если бы кольцо не содержало слабых звеньев, то оно бы жестко сохраняло величину Φ магнитного потока, протекающего через него, причем эта величина кратна кванту потока Φ_0 , т. е. $\Phi = n\Phi_0$, где n — целое число.

А сверхпроводящее кольцо со слабым звеном ведет себя в поле следующим образом. Если мы увеличиваем внешний поток, то магнитный поток Φ через кольцо тоже немного увеличивается (см. рис. на с. 92) — сверхпроводящий ток кольца не может полностью экранировать внешнее поле. Затем настает момент, когда этот сверхпроводящий ток превышает критический ток слабого звена, оно переходит в нормальное состояние, один квант потока проникает внутрь кольца (на рисунке это момент скачка), экранирующий ток резко падает, слабое звено вновь переходит в сверхпроводящее состояние, и кольцо снова начинает сопротивляться дальнейшему нарастанию внешнего магнитного поля.

При другом возможном в сквидах режиме на внешние контакты подается постоянный ток, и со сквида можно снимать отличное от нуля напряжение, которое, однако, зависит еще и от магнитного поля, в котором находится сквид. Эта зависимость позволяет на основе сквидов создавать сверхточные измерители напряженности магнитного поля. При этом сквид измеряет не абсолютное значение поля, а его отличие от эталонного, или разницу значений поля в двух близких точках, или изменение поля во времени. Большое поле, конечно, разрушит сквид, поэтому чаще всего сквид помещают в экранирующий сверхпроводящий стакан. (Это название должно напоминать только о форме экрана, а не о реальных размерах устройства, которое, скорее, напоминает тонкую палочку. Размеры самих сквидов порядка десятков и сотен микрон.) Измеряемые измене-

ния магнитного поля передаются к сквиду с помощью специальных приемных витков и катушек.

Основанные на сквидах датчики магнитного поля широко применяются в геофизике для измерения колебаний магнитного поля Земли и в некоторых других областях. Около 20 лет сквиды пробуют применить в медицине для записи магнитных сигналов органов человеческого тела — в дополнение к электрическим исследованиям (электрокардиограммы или электроэнцефалограммы). Для съемки магнитных сигналов не нужен непосредственный контакт с телом. Более того, возможна регистрация сигналов гораздо более слабых или исходящих от небольших участков тела. За годы экспериментов научились получать магнитограммы практически от всех органов человеческого тела, причем удается регистрировать сигналы с напряженностью $5 \cdot 10^{-7}$ Э, и это не предел! Напомним, что напряженность магнитного поля Земли в миллион раз больше и что для таких исследований нужно тщательно экранировать комнату.

Таким способом удастся получить магнитограмму плода беременной женщины. Это существенно, поскольку раннее обнаружение отклонений в ритме сердца и назначение лечения могут уменьшить возникающее повреждение мозга ребенка и устранить его умственную отсталость. А электрокардиограмму плода на фоне электрической активности органов матери получить очень трудно или вообще невозможно. С физической точки зрения этот метод уже разработан, однако распространенным диагностическим методом еще не стал: прежде всего потому, что не всегда надежна расшифровка магнитограммы.

На основе сквидов и контактов Джозефсона созданы и другие измерительные приборы: чувствительные вольтметры, низкотемпературные термометры (для диапазона температур 10^{-6} — 10^{+1} К), детекторы электро-

магнитного излучения и многие другие. С помощью эффекта Джозефсона в 70-е гг. был установлен новый, более точный эталон Вольта, удалось также раз в 10 уточнить значения некоторых фундаментальных постоянных физики. Немного найдется столь «работоспособных» эффектов.

Сверхпроводящий бум

Нарушители спокойствия. До сих пор мы писали о том, сколь важно и интересно явление сверхпроводимости. Мы надеемся, что читатель уже проникся сознанием важности этого явления и ждет продолжения: почему, собственно, в последнее время о сверхпроводимости так много говорят и пишут? Ведь еще в 1986 г. все было совсем не так. Обсуждение сверхпроводимости практически не выходило за рамки самой физики. О ней упоминалось в научно-популярных и фантастических книгах, но все же, скорее, как об экзотике, с которой редко кто мог столкнуться в повседневной жизни. Большинство же людей просто не слышали об этом явлении. Другие, более эффектные технические применения физических открытий, скажем, атомная бомба, лазеры, полупроводниковая электроника, заслоняли сверхпроводимость. Теперь настал ее черед.

Новая эра началась в октябре 1986 г. в результате публикации статьи Г. Беднорца и К. Мюллера о возможном наблюдении сверхпроводимости при температуре более 30 К. Авторы были очень осторожны в выражениях: сообщения о повышении критической температуры бывали и раньше, но до этого ни разу не подтверждались. На этот раз результат был не только подтвержден, но и быстро «улучшен». В начале 1987 г. уже в ряде лабораторий было установлено, что в соединении четырех химических элементов: лантана, стронция, меди и кислорода, La-Sr-Cu-O , - существует достаточно резкий сверхпроводящий переход с $T_c = 36$ К. Уже этого было





достаточно, чтобы мир физики пришел в возбуждение. В начале марта 1987 г. было опубликовано сообщение о сверхпроводимости в соединении элементов иттрия, бария, меди и кислорода, Y-Ba-Cu-O , о сверхпроводимости при температуре, превышающей температуру кипения жидкого азота, $T_c = 77 \text{ К}$. Обнаружена «азотная» сверхпроводимость, которая совсем недавно казалась недостижимой мечтой!

Лавина. Вот как описывала конференцию Американского физического общества, состоявшуюся в Нью-Йорке 18—19 марта 1987 г., одна из американских газет: «Физики трех континентов предприняли атаку на один из нью-йоркских отелей, чтобы стать участниками созданной на скорую руку конференции, посвященной цепочке открытий, которые, возможно, повлекут за собой целый каскад коммерческих применений в электронике и электротехнике».

Двери конференц-зала открылись в среду ранним вечером перед ревущей, блистающей всеми красками толпой, внезапно потерявшей все свое профессорское достоинство. В течение трех минут она заполнила все 1200 мест для сидения, после чего около тысячи физиков набилось в проходы между рядами и заняло места у простенков зала. Сотни других сражались у дверей за право войти».

Далее в газете небывалый ажиотаж среди участников конференции сравнивается с поведением зрителей знаменитого фестиваля рок-музыки. Похожая атмосфера царила тогда и в других центрах физики. У нас в Москве, чтобы сдержать людей, стремившихся 26 марта 1987 г. попасть на сессию Отделений общей физики и астрономии и ядерной физики АН СССР, впервые за всю историю сессий пригласили дружинников.

Но самое удивительное: бум не кончился и сегодня, хотя первый ажиотаж прошел. Теперь ясно — это был

не кратковременный всплеск интереса к сверхпроводимости, это было начало перехода на новый уровень исследований по сверхпроводимости, перехода к новой технологической революции.

Сделанные открытия не единичны и не случайны. К настоящему времени обнаружены не просто новые соединения, а пять новых классов высокотемпературных сверхпроводников. Уже к лету 1987 г. удалось получить хорошие сверхпроводящие образцы с резким переходом при температуре, превышающей 90 К. На 1 ноября 1988 г. твердо установлен «рекорд» критической температуры в 125 К. При этом речь идет о температуре полной сверхпроводимости («конец» сверхпроводящего перехода, обозначенный $T_{св}$ на рис. на с. 10). Проверяются сообщения о материалах с большими T_c .

Тщательному изучению подвергаются всевозможные вещества, попадающие в круг внимания. Идет интенсивнейший обмен мнениями и результатами. Через каждые 2—3 месяца, иногда даже чаще, в том или другом конце земного шара проводятся конференции, симпозиумы, семинары по сверхпроводимости в целом или даже затрагивающие более узкие вопросы. В мире появились десятки новых информационных изданий, посвященных исключительно сверхпроводимости, и даже две «сверхпроводящие» газеты. Темпы работы удивляют не меньше, чем результаты. От первого сообщения об открытии вещества до развернутых докладов о его свойствах на конференциях проходит месяц-полтора.

Конечно, в этом выражается энтузиазм людей, их стремление застолбить свой участок на новом поле открытий. Сколь далеко заходит дело, можно судить по такой истории: руководитель крупной американской лаборатории принес в редакцию физического журнала статью об открытии нового высокотемпературного сверхпроводника и потребовал, чтобы с рецензентов,

которые будут знакомиться со статьей, брали подписку о неразглашении сведений до ее выхода в свет. Потом выяснилось, что он к тому же исказил формулу вещества и исправил ее в последний момент. Но самое любопытное: вещество с ошибочной формулой тоже оказалось высокотемпературным сверхпроводником. Все хотят быть первыми: ставки велики...

Существенно и то, что правительства большинства стран и руководители крупных частных фирм приняли большие программы и выделили огромные суммы на исследования по сверхпроводимости. В работу включились чуть ли не все, кто имеет на это возможность. Широкий круг стран и физических центров, где активно занимаются этой проблемой.

Но и это еще не все. Сообщения о сверхпроводящих открытиях регулярно появляются в обычных, далеких от физики газетах. На конференции по сверхпроводимости приходят за информацией журналисты. О сверхпроводимости заговорили очень далекие от физики люди.

Что же питает сверхпроводящий бум? Почему на сверхпроводимость не жалеют тратить иногда миллионы?

Для нас, конечно, было бы приятно сказать, что сделано выдающееся открытие и этому все рады. Но дело обстоит не совсем так. Успех действительно достигнут большой. С тех пор как в 1973 г. была получена $T_c = 23,3$ К соединения Nb_3Ge , этот параметр до 1986 г. не удавалось увеличить ни на один градус. За последующие полтора года максимальная температура подскочила в несколько раз. Впрочем, во второй половине XX в. в физике сделаны существенно более фундаментальные открытия, которые не вызывали и доли такого общественного резонанса. Назовем для примера открытия новых элементарных частиц, пульсаров. В простом

увеличении критической температуры еще ничего принципиально нового нет. (Полученные результаты не сводятся к одной температуре, но до широкого круга доходят почти только сообщения о повышении T_c .)

Главная причина бума в другом: возможность охлаждать сверхпроводники жидким азотом вместо жидкого гелия сулит огромный экономический эффект. Литр жидкого гелия стоит около 10 руб., литр жидкого азота — примерно 4 коп. Более того, для охлаждения одинаковых масс требуется на порядок меньшее количество азота (у него теплота парообразования значительно выше, чем у гелия). Добавьте сюда значительное упрощение и удешевление всей криогенной аппаратуры.

Как видите, есть за что сражаться: то, что раньше было экзотикой, в ближайшее время станет обыденной техникой. А главное, исследования продолжаются, и никто не доказал, что температуру нельзя поднять еще выше. Это настолько заманчиво, что в литературе, в том числе в газетах, за время сверхпроводящего бума появились десятки сообщений о наблюдении, указывающих на сверхпроводимость эффектов при самых разных — вплоть до комнатной — температурах.

«Уровень шума». Есть еще одно удивительное обстоятельство, которое тоже способствовало сверхпроводящему буму. Оказалось, что новые сверхпроводники отнюдь не являются какими-то экзотическими веществами, их можно без особого труда приготовить в любой физической или химической лаборатории. Конечно, параметры сверхпроводимости сильно зависят от условий приготовления, достичь рекордных значений не так просто, но продемонстрировать сверхпроводимость при азотной температуре возможно теперь даже в школьных опытах.

После начала сверхпроводящего бума были просмотрены публикации прошлых лет — было обнаружено,

что вещества, оказавшиеся высокотемпературными сверхпроводниками, уже попадали в орбиту исследователей. В частности, в 1978 г. в Институте общей и неорганической химии АН СССР было получено соединение как раз состава La-Sr-Cu-O . Но тогда авторам не пришло в голову проверять его на сверхпроводимость, и только через 9 лет образцы «достали с полки» и убедились, что это сверхпроводник.

Около 30 лет назад американский фантаст Р. Ф. Джоунс написал рассказ «Уровень шума». (Он опубликован и в нашей стране в 1967 г., в 10-м томе «Библиотеки современной фантастики».) Сюжет рассказа вот какой: собирается секретное совещание большой группы ученых, физиков и математиков. На совещании сообщается, что некий человек изобрел антигравитационный аппарат. Были проведены его испытания, во время которых испытатель и аппарат погибли. Участникам совещания предъявляют бесформенные обломки аппарата и звукозаписи (с большими помехами), некоторые другие данные — и ставится задача воспроизвести результат.

До совещания все его участники убеждены, что антигравитация принципиально невозможна, а тут они волей-неволей убеждаются в обратном. Меняется их отношение, и начинается работа. В итоге новый аппарат создан. После чего выясняется, что первоначальное совещание и все представленные данные — тщательно задуманный обман. Никакого изобретателя с аппаратом не было. Была идея разрушить предубежденность, или, как пишет автор рассказа, повысить «уровень шума».

Нам кажется, что нечто подобное произошло и со сверхпроводимостью. В течение длительного времени все поиски приводили все в ту же область температур. Распространились довольно правдоподобные суждения, что иначе и быть не может, что критическая температура сверхпроводимости принципиально не подни-

мается выше 30 К. И хотя в 70-е гг. было показано, что никаких принципиальных ограничений на T_c нет, большинство физиков все же не верили в существование высокотемпературных сверхпроводников. Их поиски были «не в моде».

Статья Г. Беднорца и К. Мюллера послужила катализатором, поднявшим «уровень шума». Неверие превратилось в веру, которая, будучи подкреплена ассигнованиями, дала и продолжает давать великолепные результаты.

Перспективы сверхпроводимости. Авторы этой книги были бы не против, если бы читателей интересовала сверхпроводимость сама по себе, однако надеяться на это не приходится. Мы уже писали о том, что большинство заинтересовавшихся новым открытием манят перспективы применения сверхпроводимости, и в этом смысле произошло событие скорее «экономическое», чем физическое. Неудивительно, что один из первых результатов сверхпроводящего бума — увеличение объема продаж на рынке обычной сверхпроводящей техники.

Пройдет еще немало времени, пока будут разработаны провода и устройства из новых материалов. Еще неясно даже, из каких материалов будет удобнее всего их делать. Так что пока в ход идут сверхпроводники «гелиевые».

В Японии в 1988 г. построен опытный образец железной дороги со сверхпроводящей магнитной подвеской, пока его длина 7 км. Идея была высказана довольно давно, просто до сих пор никто не брался за ее осуществление. Суть ее в том, чтобы поезд (либо вагон) двигался без колес. По-видимому, такой способ движения может обеспечить более высокие скорости движения, чем теперь. Держать же вагон над дорогой и двигать его вперед должно магнитное поле, которое создают уста-

новленные в днище вагона сверхпроводящие магниты. Железнодорожный путь представляет из себя полосу из уложенных перпендикулярно движению металлических стержней, в которых наводится управляемая с помощью ЭВМ волна тока, бегущая под и перед вагоном. Взаимодействие тока с магнитным полем одновременно тянет вагон вперед и поддерживает просвет между дном вагона и дорогой.

По-видимому, в будущем обязательно будут созданы участки сверхскоростных железных дорог. Нам представляется, что использование для них принципа магнитной подвески и применение сверхпроводящих магнитов более перспективны, чем использование реактивных двигателей и воздушных подушек. Хочется, чтобы вновь создаваемые устройства давали бы минимум шума и теплового и химического загрязнения воздуха.

Конечно, это только начало осуществления идеи. Предстоит решить еще немало проблем: защита пассажиров в салоне от мощного магнитного поля, защита самих путей от попадания посторонних предметов, обеспечение устойчивости движения вагона над дорогой и т. д.

Также в Японии в 1988 г. начал осуществляться другой «сверхпроводящий» проект в области транспорта. Здесь предлагается использовать магнитное поле для движения морских судов. На проводник с током со стороны магнитного поля действует сила. На роль такого проводника предназначается морская вода, которая по ряду каналов будет проходить через судно. Источником магнитного поля будут сверхпроводящие обмотки. Очень заманчиво обещание практически бесшумного движения судна (если не считать плеска выбрасываемых струй воды). Проект первого судна предусматривает скорость 8 узлов, оно должно быть спущено на воду в 1990 г. Если это осуществится, на флоте появится двигатель совершенно нового типа.

Сверхпроводящий бум дал мощный импульс инженерным разработкам и обеспечил оживление на рынке сверхпроводящих проводов и магнитов. Еще более существенны те перемены, которые бум вносит в общественную психологию. Люди постепенно проникаются мыслью о неизбежности в будущем замены большинства электрических сетей и машин на сверхпроводящие. Еще в 70-е гг., после энергетического кризиса, было показано, что экономия энергии окупает необходимые затраты. Новые открытия еще более приближают к жизни новую энергетику.

Пожалуй, разговор о перспективах стоит заключить вот каким утверждением: в ближайшие десятилетия создание и внедрение сверхпроводящей техники могут дать более значительную экономию энергии, чем любая программа наращивания производства энергии, в том числе программа освоения термоядерной энергии.

*Как сделать высокотемпературный
сверхпроводник
в школьной лаборатории*

По крайней мере, один материал из числа вновь открытых и открываемых сверхпроводников вы вполне можете изготовить под руководством учителя физики или руководителя кружка. Ваши сверстники из школ за рубежом уже занимаются этим. Всем, кто заинтересуется возможностью продемонстрировать самодельные сверхпроводники, было бы полезно прочитать опубликованные в журнале *New Scientist* 1987. V. 115, N. 1571, P. 36 — 39 заметки Поля Гранта. Он пишет о том, как лаборатория фирмы ИБМ, в которой он работает, помогала учителям и школьникам ставить химические и физические опыты с высокотемпературными сверхпроводниками. Ниже мы полностью приводим рецепт изготовления такого сверхпроводника, который написала дочь П. Гранта.

Конечно, в наших школах осуществить описываемые дальше опыты сложнее. Многие компоненты и инструменты нам менее доступны.

Итак, прежде всего мы предлагаем научиться изготавливать сверхпроводник состава $Y-Ba-Cu-O$. В качестве исходных компонентов понадобятся окись иттрия Y_2O_3 , углекислый барий $BaCO_3$ и окись меди CuO .

Рецепт

1. Возьмите 1,13 г окиси иттрия, 3,95 г углекислого бария и 2,39 г окиси меди.

2. Перемешайте, а затем растолките в порошок в ступке.

3. Получившуюся смесь отожгите — продержите в печи при температуре $950^{\circ}C$ приблизительно 12 ч.

4. Охладите полученный комок и вновь растолките его в ступке.

5. Спрессуйте порошок в таблетки (может быть, впоследствии для проведения каких-либо опытов понадобятся другие формы, например кольца).

6. Снова отожгите получившиеся таблетки при той же температуре и в течение того же времени, однако теперь с обязательной подачей в печь кислорода.

7. Медленно охладите таблетки — скорость понижения температуры не должна превышать 100 град/ч.

Замечания по технике безопасности.

Как сам материал сверхпроводника $Y-Ba-Cu-O$, так и исходные компоненты не относятся к числу ядовитых веществ. Однако при работе с ними необходимо соблюдать определенные правила. Нужно использовать защитные очки, перчатки, а при измельчении компонентов в ступке обязательно надевать марлевые повязки на рот. Вдыхать пыль углекислого бария и окиси

меди вредно. Проводите все операции в помещении, оборудованном вытяжкой, — это, впрочем, обязательный элемент оборудования любой химической лаборатории, в том числе школьной.

Замечания к рецепту

Указанные количества исходных компонентов позволяют получить около 7 г сверхпроводника $Y-Ba-Cu-O$, или около 5 таблеток диаметром 1 см и толщиной 1 мм. Ниже мы расскажем об опытах, которые можно провести с ними, а сейчас о некоторых трудностях, встречающихся при изготовлении.

Исходные компоненты не относятся к числу редких. Их наверняка можно получить в различных научных учреждениях, а также на многих предприятиях в порядке шефской помощи. Получить описываемый сверхпроводник можно по более простой схеме и из других компонентов, однако лучше начинать с приведенного рецепта. Для отжига можно использовать печь, предназначенную для изготовления керамики. Такие печи есть во многих кружках керамики и в художественных студиях. Дело в том, что изготавливаемый сверхпроводник так же представляет из себя керамику, как и некоторые знакомые предметы домашнего обихода. Только нам нужна керамика-металл, поэтому таблетки будут получаться другого цвета — черные.

Цвет керамического сверхпроводника — важный показатель его качества. Если он получается с прозеленью, значит, опыт изготовления был неудачен, и все надо начинать сначала (при этом можно вновь измельчить полученные таблетки). Зеленый цвет свидетельствует о недостатке кислорода в образце. Желательно получить материал с химической формулой $YBa_2Cu_3O_7$. Однако контролировать содержание кислорода по исходной смеси невозможно, к тому же кислород спосо-

бен улетучиваться в процессе изготовления. Так что подача кислорода в печь при отжиге существенна. Сам кислород можно получить в научных, медицинских, производственных организациях (он используется, например, при сварке). Для подачи его в печь можно применить насос, который служит для накачки воздуха в аквариум. Скорость подачи кислорода может быть минимальной, скажем такой, чтобы кожа ощущала легкое дуновение газа.

Довольно существенно поддержание температуры отжига. Работа будет бесполезной, если температура отжига опускается ниже 900°C . Превышение рабочей температуры на 100° приведет к расплавлению смеси. Тогда придется ее вновь растолочь и начать все сначала. Так что надо предварительно проверить термометр печи, обычно он показывает далекие от истинных значения.

Очень важно медленно охлаждать изготовленные таблетки — быстрое охлаждение ведет к потере кислорода. Таким образом, первоначально цикл отжиг-охлаждение будет занимать 20 ч. Необходимо организовать ночные дежурства.

При изготовлении понадобится также пресс. Оценка показывает, что нужно развивать усилие в 7 тыс. кг на таблетку диаметром около 1 см, чтобы получить хороший образец. По-видимому, таблетки можно прессовать даже с помощью самодельного винтового пресса.

Стоит обратить внимание также на выбор тигля, в котором отжигается материал. Металлический тигль может реагировать со сверхпроводником, иногда с нежелательными последствиями. К тем же последствиям могут привести примеси в смеси исходных материалов. Например, 2—3% примеси атомов железа вместо меди ведут к подавлению сверхпроводимости.

Что делать с изготовленными таблетками?

Конечно, можно убедиться в резком падении сопротивления при сверхпроводящем переходе. Однако с помощью стандартных приборов вряд ли удастся по величине сопротивления отличить сверхпроводящий образец от медного. Гораздо нагляднее демонстрация эффекта Мейснера.

В любом случае для охлаждения понадобится жидкий азот. Его можно попросить в физических институтах. Сейчас он применяется довольно широко — и в медицине, и даже в кондитерской промышленности. Личный опыт одного из авторов показывает, что жидкий азот можно транспортировать и хранить в обычном бытовом термосе со стеклянной колбой. (Ни в коем случае не закрывать термос крышкой!) Нельзя, однако, гарантировать, что такая колба не лопнет при налипании жидкого азота.

Непосредственно для опытов удобно наливать азот в неглубокие пенопластовые кюветы (можно использовать для этого пенопластовые крышки от упаковки приборов и некоторых бытовых изделий). В жидкий азот нельзя совать пальцы, в остальном же он практически безопасен в работе.

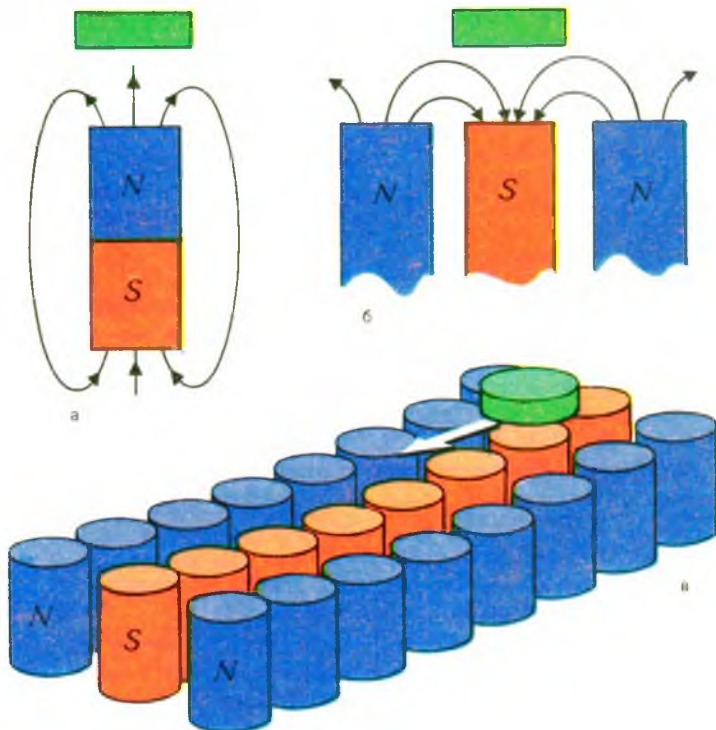
Простейший опыт состоит в том, что неохлажденная в азоте таблетка спокойно лежит на магните, никак не реагируя на магнитное поле, а охлажденная висит над ним. Можно придумать различные варианты этого опыта, в том числе весьма впечатляющие.

Положение таблетки над одним полюсом магнита неустойчиво (см. рис. на с. 109). Она как бы находится на вершине скользкой горки и довольно легко соскальзывает вбок. Из нескольких магнитов можно устроить такую конфигурацию магнитного поля, чтобы таблетка находилась как бы в «ложбинке». Тогда таблетку можно не только подвесить, но и закрутить в воздухе.

Варианты демонстрации эффекта Мейснера. *а* — зеленая таблетка сверхпроводника висит над постоянным магнитом. Ее положение над полюсом неустойчиво, она норовит соскользнуть в бок.

б — устройство магнитной «ложбинки» Рисунок представ-

ляет собой как бы разрез магнитного поля в одной плоскости. *в* — эскиз длинной «ложбинки», вдоль которой таблетка может свободно двигаться. Если края «ложбинки» приподняты, то таблетка будет колебаться из конца в конец, мы получим маятник.



Поскольку трение о воздух мало, таблетка крутится до тех пор, пока повышающаяся температура не достигнет T_c . Тогда таблетка просто упадет на магниты.

Еще более эффектные опыты можно провести при более сложной конфигурации магнитного поля. Если устроить «ложбинку» длинную, то таблетка сможет двигаться вдоль нее при малейшем толчке и совершать довольно длинные путешествия по извилистой дорожке. После охлаждения в жидком азоте таблетка сохраняет сверхпроводимость на воздухе при комнатной температуре около минуты. Более длительные опыты нужно проводить в парах жидкого азота.

Что читать о сверхпроводимости

Гинзбург В. Л. Высокотемпературная сверхпроводимость (мечта становится реальностью). — Природа. — 1987. — № 7. С. 16—30.

Дмитренко И. М. В мире сверхпроводимости. — Киев: Наукова думка. — 1981.

Кресин В. З. Сверхпроводимость и сверхтекучесть. — М.: Наука. — 1978.

Рыдник В. И. Электроны шагают в ногу. — М.: Знание. — 1986.

Тилли Д. Р., Тилли Дж. Сверхтекучесть и сверхпроводимость. — М.: Мир. — 1977.

Асламазов Л. Г., Губанков В. Н. Слабая сверхпроводимость. — М.: Знание. — 1982.

Буздин А. И., Моцалков В. В. Экзотические сверхпроводники. — М.: Знание. — 1986.

Буккель В. Сверхпроводимость: Основы и приложения. — М.: Мир. — 1975.

Шмидт В. В. Введение в физику сверхпроводников. — М.: Наука. — 1982.

Содержание

3	К читателю	54	Природа сверхпроводимости
5	Открытие сверхпроводимости	54	Квантовая механика
5	Начало	57	Квантовый билиард
6	Металлы	58	Шкала энергий
8	Сопротивление	62	Коллективное явление
9	Остаточное сопротивление	63	Сверхтекучесть
10	Критическая температура	65	Атом и квантовые состояния
11	Низкие температуры	66	Квантовые жидкости
13	Эффект Мейснера	68	Электрон-фононное взаимодействие
15	Магнитное поле	69	Связывание электронов в пары
16	Токи и поля в сверхпроводниках	71	Граница сверхпроводника
19	Идеальный диамагнетизм	73	Два главных свойства сверхпроводника
21	Немного истории	75	Техника сверхпроводимости
23	Физика сверхпроводимости	75	Применение сверхпроводимости заманчиво и затруднительно
23	Как убедиться в том, что сопротивление сверхпроводника действительно равно нулю?	77	Магниты
26	Фазовый переход	80	Сверхпроводящие провода
28	Теплоемкость	83	Применения сверхпроводящих магнитов
30	Два типа электронов	89	Эффекты Джозефсона
32	Как происходит сверхпроводящий переход в магнитном поле	92	Применение слабой сверхпроводимости — сквиды
34	Критический ток	95	Сверхпроводящий бум
35	Глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник	95	Нарушители спокойствия
38	Влияние формы сверхпроводника на проникновение магнитного поля и на сверхпроводящий переход	97	Лавина
40	Промежуточное состояние	99	Что же питает сверхпроводящий бум?
42	Сверхпроводники II рода	100	«Уровень шума»
44	Вихри	102	Перспективы сверхпроводимости
46	Движение вихрей	104	Как сделать высокотемпературный сверхпроводник в школьной лаборатории
49	Захват магнитного потока	110	Что читать о сверхпроводимости
50	Влияние кристаллической решетки		
52	Фононы		



Художник
Ю. П. Мартыненко

Виталий Лазаревич
Гинзбург

Евгений Александрович
Андрюшин

Сверхпроводимость

ИЗДАНИЕ ДЛЯ ДЕТЕЙ И ЮНОШЕСТВА

Заведующий редакцией
А. А. Чуба

Редактор
Н. Н. Габисония

Мл редактор
А. Б. Фролов

Художественный редактор
В. П. Храмов

Технический редактор
С. Н. Жданова

Корректор
Л. В. Яковлева

Сдано в набор 07.06.89 Подписано в
печать 27.02.90 Формат 70×108^{1/32}
Бумага офсетная №1 Гарнитура
школьная Усл печ л 4,9 Уч-изд
л 4,9 Усл кр-отт 20,13 Тираж
200 000 экз Заказ № 500 Цена
30 коп

Издательство «Педагогика Акаде-
мии педагогических наук СССР и
Государственного комитета СССР
по печати

107847, Москва, Лефортовский
пер., 8

Ордена Трудового Красного Зна-
мени Калининский полиграфиче-
ский комбинат Государственного
комитета СССР по печати 170024,
г. Калинин, пр. Ленина, 5



30 коп.

Читайте
следующую
книгу
серии

«Ученые —
школьнику»!

Как законы природы отражаются
в отдельной живой клетке и в
жизни людей?

●
Почему зеркало, построенное для
отражения света, помогает понять
себя самого и приобщиться к
достижениям человеческого разу-
ма?

●
Как мир науки и мир искусства,
взаимодействуя между собой, обра-
зует эстетику жизни и этику пове-
дения?

●
Об этом и многом другом вы узнае-
те, прочитав книгу доктора биоло-
гических наук А. М. Котлярского
и кандидата технических наук
А. П. Афанасьева «Почему мы смо-
тримся в зеркало».



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ПЕДАГОГИКА»