

И.К. Кикоин

Журнал Квант

1973 №11

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 50
ББК 22
К38

К38 **Кикоин И.К.**
Журнал Квант: 1973 №11 / И.К. Кикоин – М.: Книга по Требованию, 2023. – 84 с.

ISBN 978-5-458-29899-5

ISBN 978-5-458-29899-5

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Отсутствие электрического сопротивления означает, что при протекании тока полностью отсутствуют потери энергии. Ведь тепловые потери при прохождении тока по обычным, несверхпроводящим металлам (такие металлы называют нормальными) обусловлены сопротивлением проводника. Это видно из известной формулы, выражающей закон Джоуля — Ленца:

$$Q = I^2 R t.$$

В сверхпроводнике электроны не испытывают сопротивления и не теряют энергии. Поэтому сверхпроводящий ток не затухает.

В 1959 году был поставлен такой эксперимент. В металлическом кольце был наведен сверхпроводящий ток. Через два с половиной года приборы не отметили никакого уменьшения этого тока. Отсутствие тепловых потерь приводит к тому, что время циркуляции тока по кольцу практически бесконечно велико.

Сверхпроводящие вещества. Впервые эффект сверхпроводимости был обнаружен при исследовании ртути. Однако вскоре были открыты новые сверхпроводники.

В настоящее время известно около 25 элементов, переходящих при понижении температуры в сверхпроводящее состояние. Самая высокая критическая температура у ниобия ($T_k = 9,2^\circ$), а самая низкая — у иридия. У иридия сверхпроводимость обнаруживается при температуре всего $0,140^\circ$. Сейчас достигнуты температуры в тысячные доли градуса. Возможно, многие элементы окажутся сверхпроводниками при температурах более низких, чем T_k иридия.

Основную часть сверхпроводящих веществ составляют не чистые вещества, а сплавы и соединения. Сейчас известно около 500 таких сверхпроводящих веществ, и их число все время увеличивается. Во многих лабораториях мира ведется интенсивный поиск новых сверхпроводящих материалов.

Самые высокие температуры, при которых сохраняется свойство сверхпроводимости, наблюдаются именно в сплавах. Долгие годы «рекордсменом» был сплав ниобия с оловом Nb_3Sn , критическая температура которого $18,1^\circ$. В настоящее время самой высокой T_k обладает сложное соединение $Nb_3Al \cdot Nb_3Ge$, синтезированное несколько лет тому назад и сохраняющее свойство сверхпроводимости вплоть до температуры $T_k = 20,1^\circ$.

Уже простое изучение свойств сверхпроводников позволяет сделать некоторые интересные выводы.

Существуют сплавы (например, сплав меди с серой CuS или золота с висмутом Au_2Bi), компоненты которых порознь сверхпроводниками не являются.

Бериллий становится сверхпроводящим только в том случае, если образец приготовлен в виде тонкой пленки, толщина которой не превышает 10^{-5} см.

Различные металлы неодинаково проводят электрический ток. Можно было бы ожидать, что такие хорошие проводники, как медь, золото, серебро, у которых сопротивление в обычных условиях и так очень мало, легче других веществ переходят в состояние сверхпроводимости. Однако на опыте наблюдается совсем другая картина. Именно в этих металлах сверхпроводимость не обнаружена. Важность этого факта отмечалась физиками еще задолго до создания теории сверхпроводимости. Так, в книге Я. Г. Дорфмана и И. К. Кикоина, вышедшей 40 лет тому назад *), читаем: «То обстоятельство, что ни Ag, ни Cu, ни другие наилучшие проводники не переходят в сверхпроводящее состояние, но, наоборот, ... плохие проводники... обладают этой удивительной особенностью, свидетельствует о том, что механизм сверхпроводимости совершенно отличен от механизма обычной проводимости».

*) Я. Г. Дорфман, И. К. Кикоин. Физика металлов. ГТТИ, 1933.

Недавно было обнаружено, что некоторые полупроводники также могут при низких температурах переходить в сверхпроводящее состояние.

Особое состояние вещества. Слово «сверхпроводимость» отражает способность веществ проводить электрический ток без всякого сопротивления. Но это — не единственная особенность сверхпроводников. Сверхпроводящий переход — это не только исчезновение электрического сопротивления. Это переход в совершенно новое физическое состояние. В сверхпроводниках наблюдаются аномалии почти всех известных физических свойств. О чем бы ни шла речь — о теплоемкости, о поглощении света или звука, о поведении в магнитном поле — всегда отмечают особые свойства сверхпроводников, резко отличающиеся от свойств обычных металлов. При переходе через критическую температуру T_k мы попадаем в мир особых законов. Именно поэтому мы и будем говорить не просто о сверхпроводимости, а о сверхпроводящем состоянии вещества.

Остановимся сначала на главном вопросе: какова природа сверхпроводимости? Как объясняется явление сверхпроводимости и что происходит в веществе, когда его температура приближается к абсолютному нулю?

Как объясняется явление сверхпроводимости?

Сверхпроводимость была открыта, как упоминалось выше, в 1911 году. Открытие Камерлинг-Оннеса вызвало огромный интерес. Многие физики пытались разными способами объяснить исчезновение электрического сопротивления и другие особенности сверхпроводящего состояния. Среди них были А. Эйнштейн, еще в 1920 году отмечавший аналогию сверхпроводимости и ферромагнетизма; один из создателей квантовой механики В. Гейзенберг, пытав-

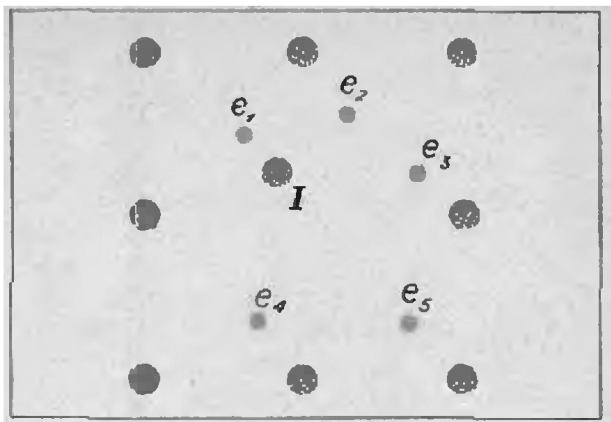


Рис. 2.

шийся объяснить сверхпроводимость особенностями электростатического взаимодействия электронов, и многие, многие другие.

Однако прошло почти полвека, прежде чем удалось решить эту загадку. Только в 1957 году появилась работа американских физиков Д. Бардина, Л. Купера и Д. Шриффера, в которой была изложена теория сверхпроводимости.

Притяжение между электронами. Название этого раздела может вызвать законное удивление. В самом деле, электроны как частицы с одноименными электрическими зарядами должны не притягиваться, а отталкиваться друг от друга. Оказывается, однако, что эффект сверхпроводимости определяется именно наличием сил межэлектронного притяжения.

Электронный газ в металле или полупроводнике находится под воздействием кристаллической решетки, благодаря чему и появляется межэлектронное притяжение. Попробуем наглядно представить себе механизм возникновения этого притяжения. Рассмотрим взаимодействие каких-нибудь двух электронов e_1 и e_2 , находящихся в металле (рис. 2). Между ними действуют, прежде всего, обычные силы кулоновского отталкивания. Но, кроме того, наличие кристаллической решетки приводит к появлению дополнительного межэлектронного взаимодействия. Электрон e_1

притягивает один из ионов кристаллической решетки и смещает его (например, ион I на рис. 2) из положения равновесия. Электрическое поле, создаваемое ионом I , действует и на остальные электроны, поэтому смещение иона сказывается и на них. Таким образом, с «помощью» ионов возникает дополнительное электрическое взаимодействие электронов. Теория сверхпроводимости доказывает, что оно носит характер притяжения.

Таким образом, кристаллическая решетка и есть та промежуточная среда, которая создает притяжение между электронами. Само притяжение можно представить себе следующим образом. Электрон притягивает ионы кристаллической решетки. В результате деформации решетки электрон оказывается окруженным «облаком» положительного заряда. Представьте, что величина этого положительного заряда превышает по величине заряд электрона, тогда электрон вместе с окружающей его ионной «шубой» оказывается положительно заряженной системой, которая и притягивается к другому электрону. При высоких температурах достаточно интенсивное тепловое движение отбрасывает частицы друг от друга, размывает ионную «шубу», что фактически уменьшает силы притяжения. При низких же температурах силы притяжения играют очень важную роль.

Может возникнуть вопрос: не противоречит ли существование межэлектронного притяжения известным законам физики? Если два электрона находятся в вакууме, то, конечно, они отталкиваются друг от друга. В среде сила их взаимодействия равна

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{e}{r^2} \quad (\epsilon — \text{диэлектрическая проницаемость среды}).$$

Среда может иметь отрицательную диэлектрическую проницаемость $\epsilon < 0$. Это приводит к изменению знака силы, и электроны в такой среде будут притягиваться друг к другу. Решетка кристалла и оказывается той сре-

дой, которая делает отрицательной диэлектрическую проницаемость в сверхпроводнике.

Таким образом, при температурах, близких к абсолютному нулю, между электронами действует кулоновское отталкивание и дополнительное притяжение. Все дальнейшее зависит от того, какая из этих сил окажется большей по величине. Если вплоть до абсолютного нуля преобладает отталкивание, металл остается нормальным и его свойства радикально не изменяются. Если же при некоторой температуре начинают преобладать силы притяжения, то вещество переходит в сверхпроводящее состояние.

Электронные пары. Притяжение между электронами, приводящее к сверхпроводимости, характеризуется рядом интересных особенностей. Если мы будем следить за поведением какого-нибудь электрона в сверхпроводнике, то окажется, что этот электрон неодинаково притягивается к разным электронам. Он «выберет» один определенный электрон, к которому будет притягиваться наиболее сильно. В частности, этот «выбранный» в данный момент электрон будет иметь противоположный импульс.

Электронная система в сверхпроводнике оказывается разбитой на пары связанных электронов. Состав электронных пар не стабилен. Он все время меняется, так что электронная система весьма динамична. Это выглядит так, как будто электроны собрались на балу и исполняют танец, во время которого постоянно меняются партнеры.

Особо следует остановиться на вопросе о размере электронной пары. Он составляет величину порядка 10^{-4} см. Для сравнения заметим, что период кристаллической решетки примерно 10^{-8} см, так что электроны, входящие в пару, находятся друг от друга на огромном расстоянии в 10^4 периодов решетки. И тем не менее именно они наиболее сильно притя-

гиваются друг к другу. Если состояние одного из электронов, входящих в пару, меняется под действием какой-нибудь силы (например, под влиянием магнитного поля), то это изменение сразу же скажется и на поведении другого электрона. В сверхпроводниках наблюдается редчайший в неживой природе пример дальнодействия.

При повышении температуры возрастает роль хаотического теплового движения. Межэлектронное притяжение ослабевает, и, наконец, при некоторой температуре (это и есть критическая температура T_k) вещество переходит из сверхпроводящего в обычное, нормальное состояние.

Отсутствие электрического сопротивления. Сверхпроводники замечательны тем, что в них электроны не отталкиваются, а притягиваются друг к другу.

Под действием сил притяжения электронная система превращается в связанный коллектив. Между частицами действуют силы сцепления.

В нормальных металлах электронный газ может увеличивать свою энергию любыми сколь угодно малыми порциями. В сверхпроводнике электронный газ не может поглощать любую энергию. Минимальная порция энергии, которую он может поглотить, — энергия связи электронной пары. Картина разрыва электронной пары похожа на распад атомного ядра. Нейтроны и протоны связаны в единое целое, и для разрыва системы требуется конечная энергия — энергия связи атомного ядра.

Электрическое сопротивление связано, как известно, с рассеянием электронов тепловыми колебаниями решетки или примесями*). Механическая энергия движущихся электронов при этом переходит в тепловую

энергию. Представьте себе, что электронная система движется в кристалле с малой скоростью (сила тока при этом невелика). Тогда взаимодействие электронов с решеткой будет слишком слабым для того, чтобы возбудить электронную систему. Электронному газу при этом может быть сообщена энергия, меньшая энергии связи. Но электроны в сверхпроводнике, как уже было сказано, не могут ее поглотить. Поэтому они движутся так, как будто нет никакого рассеяния. А это и означает отсутствие электрического сопротивления, то есть возникновение эффекта сверхпроводимости.

Если же ток превышает некоторое значение, называемое критическим, то столкновения электронной системы с ионами или примесями становятся достаточно интенсивными и свойство сверхпроводимости исчезает.

О некоторых свойствах сверхпроводников

Эффект Мейсснера. Говоря о свойствах сверхпроводников, мы в основном отмечали, что они пропускают ток без всякого сопротивления. В этом разделе мы расскажем еще о некоторых особенностях сверхпроводящего состояния.

Предположим, что сверхпроводник помещен во внешнее магнитное поле. Оказывается, что поле не в состоянии проникнуть в толщу сверхпроводника.

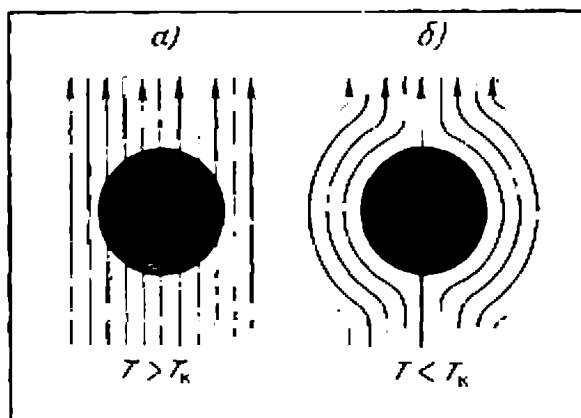


Рис. 3.

*) Подробнее о природе сопротивления рассказано в статье М. И. Каганова и Г. Л. Любарского «Электрон движется с трением» («Квант», 1973, № 6).

При температурах, больших T_k , силовые линии магнитного поля проникают в вещество, как во всякий нормальный металл (рис. 3, а). Начнем понижать температуру, не выключая при этом магнитного поля. Как только достигается критическая температура T_k , происходит переход в сверхпроводящее состояние; при этом силовые линии выталкиваются из толщи образца (рис. 3, б). Это явление, называемое эффектом Мейсснера, было открыто в 1933 году.

Как же происходит выталкивание магнитных силовых линий из сверхпроводника? Ответ на этот вопрос тесно связан с самим эффектом сверхпроводимости, то есть с возможностью протекания незатухающих электрических токов.

Предположим, что мы хотим в веществе поддерживать постоянный электрический ток. В нормальном металле для этого необходимо создать постоянное электрическое поле. Магнитное поле не подходит для этой цели, так как оно не совершает никакой работы, а это необходимо, поскольку существует сопротивление движению электронов, возникают тепловые потери, и поэтому необходим непрерывный подвод энергии.

Совершенно иные процессы разыгрываются в сверхпроводниках. Сопротивление в них равно нулю, и поэтому для поддержания электрического тока никакой работы не требуется. Постоянный ток в сверхпроводниках может создаваться магнитным полем. Это очень важная особенность электромагнетизма сверхпроводников.

Вернемся теперь к эффекту Мейсснера. Когда сверхпроводник вносится во внешнее магнитное поле, в его поверхностном слое возникает вызванный этим полем сверхпроводящий ток. Этот ток, как и всякое движение зарядов, создает собственное магнитное поле, которое противоположно внешнему магнитному полю. В теории сверхпроводимости доказывается, что внутри сверхпроводника происходит полная компенсация

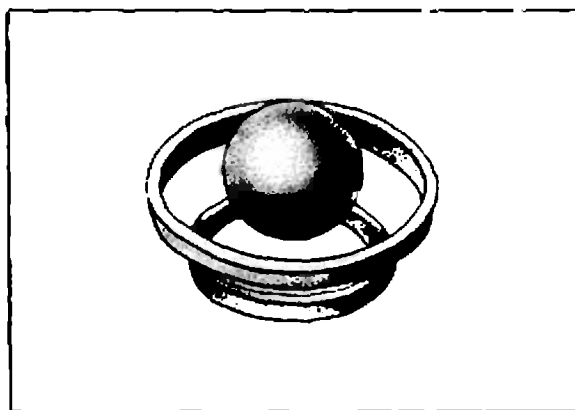


Рис. 4.

этих полей, поэтому магнитное поле там отсутствует. Таким образом, поверхностный слой сверхпроводника является магнитным экраном, не пропускающим внутрь вещества магнитное поле.

«Гроб Магомета». Эффект Мейсснера дает возможность наблюдать целый ряд очень необычных явлений.

Вот, например, одно из них. Если взять металлическое кольцо, в котором циркулирует сверхпроводящий ток, и над ним поместить сферу, также находящуюся в сверхпроводящем состоянии, то мы увидим, что сфера (если она не очень тяжелая) висит над кольцом без всякой поддержки.

На рисунке 4 изображена сфера, висящая над сверхпроводящим кольцом. Как же объясняется возможность такого подвешивания?

При протекании тока по кольцу в окружающем пространстве появляется магнитное поле. Выше мы говорили о том, что сверхпроводящий ток может создаваться магнитным полем. Именно такой ток и возникает в металлической сфере. Этот ток имеет такое направление, при котором его собственное магнитное поле противоположно полю, создаваемому током в кольце. Это следует из закона сохранения энергии так же, как и правило Ленца, определяющее направление индукционного тока.

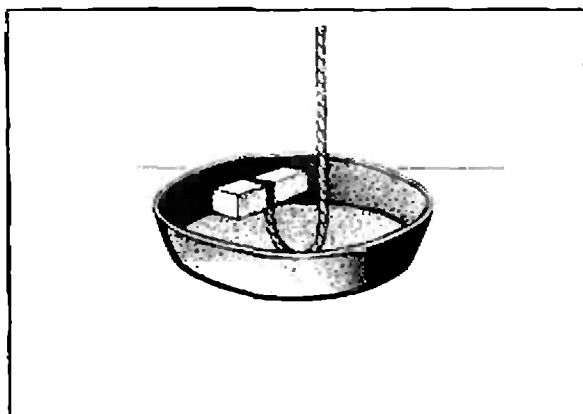


Рис. 5.

Направления токов в кольце и в сфере оказываются противоположными, а это приводит к появлению силы отталкивания. Сфера висит на высоте, определяемой равенством силы ее тяжести и силы отталкивания токов.

На рисунке 5 показан другой эксперимент. Постоянный магнит висит над металлическим образцом, в котором магнитным полем индуцируется сверхпроводящий ток. Этот эксперимент похож на предыдущий. Роль колец, создающих магнитное поле, играет постоянный магнит. Этот эксперимент получил шуточное название «гроб Магомета» (по преданию, гроб пророка Магомета висел в воздухе без всякой поддержки).

Сверхпроводники в магнитном поле. Критическое поле. Если увеличивать внешнее магнитное поле, то при некотором его значении B_k (это значение называется критическим магнитным полем) сверхпроводящее состояние разрушается, и вещество переходит в обычное нормальное состояние. Величина B_k зависит от температуры. Чем ближе мы подходим к критической температуре, тем меньше величина B_k и тем легче разрушается состояние сверхпроводимости.

На рисунке 6 показано, как с ростом температуры изменяется величина критического поля B_k . Наиболее устойчиво сверхпроводящее состоя-

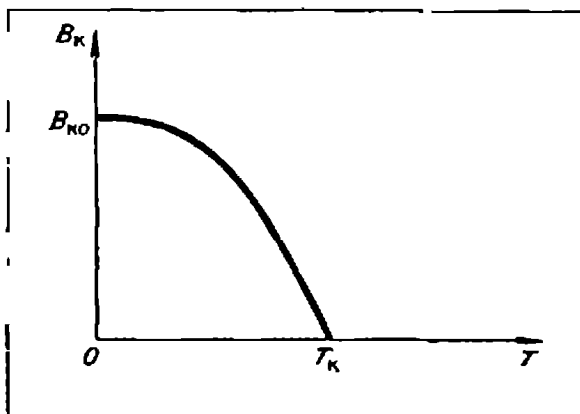


Рис. 6.

ние при абсолютном нуле (значение B_{k0} , соответствующее $T = 0^\circ$, максимально). Когда температура становится равной T_k , величина критического магнитного поля, естественно, обращается в нуль.

Таким образом, металл можно перевести из сверхпроводящего в нормальное состояние и не повышая его температуры. Такой переход может произойти при воздействии на сверхпроводник магнитного поля.

Не следует считать поэтому, что вещество при температурах, меньших T_k , — обязательно сверхпроводник. Оно может быть и нормальным металлом, если величина окружающего магнитного поля превышает B_k .

На первый взгляд может показаться, что сверхпроводящий ток, протекающий без тепловых потерь, идеально подходит для создания сколь угодно сильных магнитных полей. Ведь при использовании обычных электромагнитов большую роль играют джоулевы потери. Если мы хотим получить очень сильные магнитные поля, то необходимо в обмотках создавать достаточно сильные токи; при этом из-за тепловых потерь провода могут просто расплавиться.

В сверхпроводниках из-за отсутствия тепловых потерь такой опасности нет. Поэтому и может показаться, что при увеличении сверхпроводящего тока мы можем получить любое требуемое значение индукции магнитного поля. Однако как только поле

достигает значения B_k , сверхпроводимость разрушается, и поэтому дело обстоит не так просто.

Был обнаружен тем не менее класс сверхпроводящих веществ, способных создавать мощные магнитные поля и выдерживать сильные токи. Но описание их свойств — это предмет особого рассказа.

Говоря об электромагнитных свойствах сверхпроводников, следует отметить еще одну любопытную особенность, обусловленную наличием пар связанных электронов.

Основным законом, описывающим постоянный ток в нормальном металле, является закон Ома, который может быть записан в так называемой локальной форме: $j = E/\rho$ (ρ — удельное сопротивление проводника, E — напряженность электрического поля, j — плотность тока). Согласно закону Ома, величина тока в определенном месте металла определяется значением электрического поля в этом же месте.

В сверхпроводниках все выглядит совершенно иначе. Постоянный сверхпроводящий ток создается, как мы уже отмечали, не электрическим, а магнитным полем. Но разница состоит не только в этом. Из-за межэлектронной связи оказывается, что если внешнее поле подействует на какой-нибудь электрон в сверхпроводнике, то это действие «почувствует» и другой электрон, связанный с ним в пару.

Поместим сверхпроводник во внешнее магнитное поле. Электроны, находящиеся в поверхностном слое (в толщу образца поле не проникает), приходят в движение, и создается сверхпроводящий ток. При этом электрон движется как благодаря непосредственному действию на него внешнего магнитного поля, так и под влиянием других, связанных с ним электронов, также находящихся под воздействием поля. Поэтому ток, возникающий в данном месте сверхпроводника, определяется не только значением внешнего поля в этом месте,

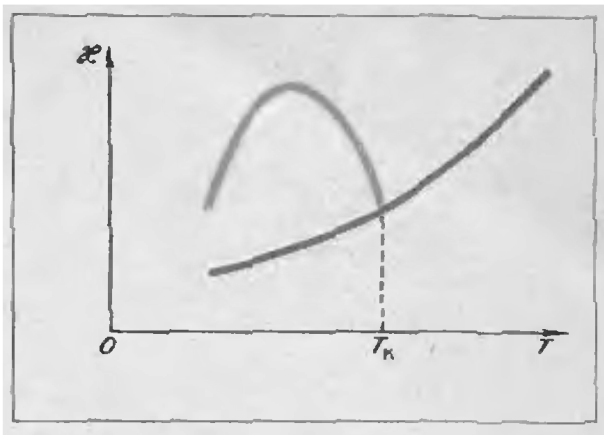


Рис. 7. Теплопроводность χ нормального металла отмечена на рисунке синей линией, теплопроводность сверхпроводника — красной.

но и значением его в некоторой области. Такая связь тока с внешним полем, в отличие от случая нормального металла, называется нелокальной.

Тепловые свойства. Теплоемкость сверхпроводников при температурах, далеких от T_k , оказывается очень малой величиной, намного меньшей теплоемкости нормального металла, взятого при той же температуре (переход в нормальное состояние при этой же температуре можно осуществить с помощью магнитного поля). Поэтому температура сверхпроводников очень легко изменяется при подведении или, наоборот, при отводе теплоты.

Очень необычна картина передачи тепла в сверхпроводниках. Теплопроводность обычного металла меняется при изменении температуры. Например, способность сплавов проводить тепло уменьшается с понижением температуры. Сверхпроводящий сплав ведет себя совершенно иначе. После перехода в состояние сверхпроводимости его теплопроводность не убывает, а возрастает с понижением температуры, затем она достигает максимума и только после этого начинает убывать (рис. 7).

Это еще раз показывает, что сверхпроводимость — не только отсутствие

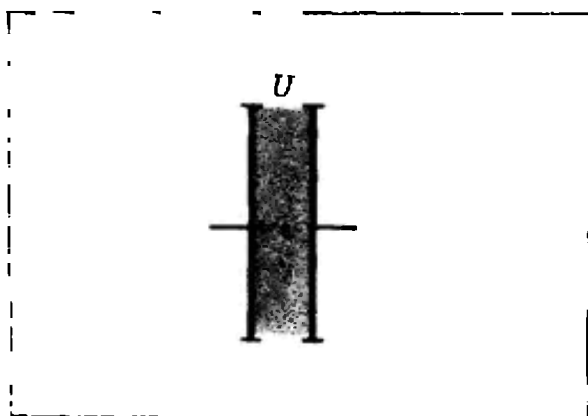


Рис. 8.

электрического сопротивления, а особое состояние вещества.

Э ф ф е к т Д ж о з е ф с о н а. Рассмотрим контакт (рис. 8), состоящий из двух сверхпроводящих пленок, разделенных тонким (около 10^{-7} см) слоем изолирующего вещества. Электроны могут переходить из одной пленки в другую. Мы не станем здесь обсуждать вопрос о механизме прохождения электронов сквозь диэлектрический слой, поскольку это не относится непосредственно к предмету нашего рассказа. Отметим только возможность наблюдения удивительного явления, открытого всего лишь несколько лет тому назад.

Если к контакту приложить *постоянную* разность потенциалов, то через него потечет *переменный* сверхпроводящий ток. Этот переменный ток, так же, как, например, ток в колебательном контуре, будет излучать электромагнитные волны, и это излучение наблюдается на опыте.

Этот эффект носит имя английского физика Джозефсона, теоретически предсказавшего в 1962 году возможность его наблюдения.

Как мы уже говорили, в сверхпроводнике возникают связанные электронные пары. Эти пары проходят через диэлектрический слой и приобретают при этом энергию $2eU$ (U — разность потенциалов, приложенная к контакту). В обычном металле эта энергия превратилась бы

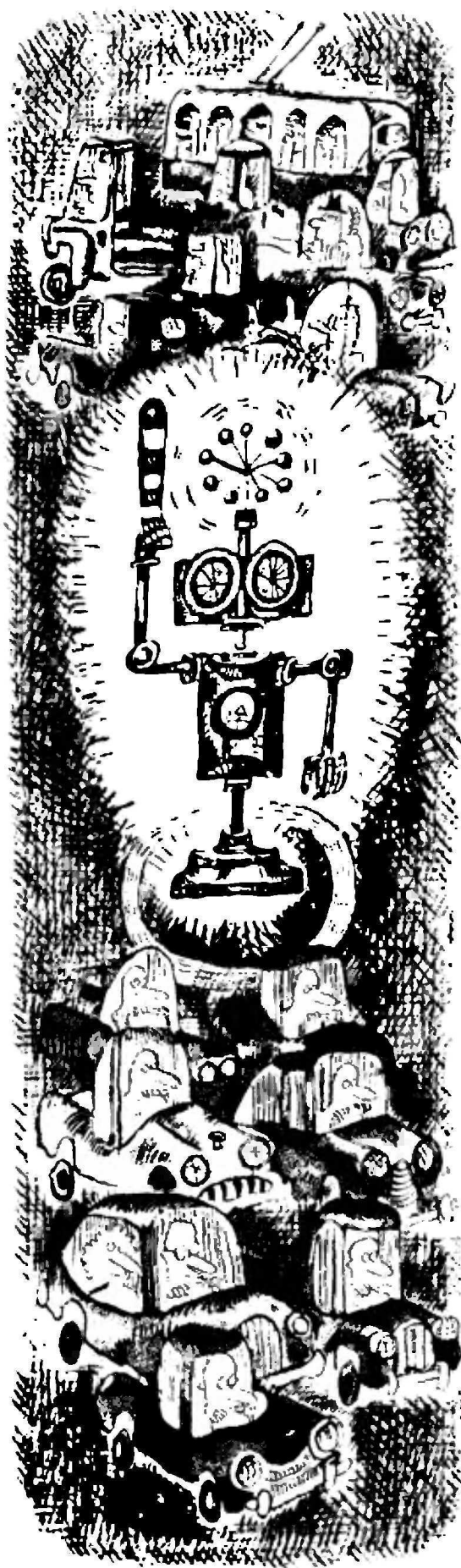
в тепловую. При протекании сверхпроводящего тока сопротивления нет, и полученная электронной парой порция энергии $2eU$ излучается в виде кванта с энергией $h\nu = 2eU$. На опыте и наблюдается излучение с частотой $\nu = 2eU/h$.

Излучать электромагнитные волны может только переменный ток. Именно такой ток и течет через контакт Джозефсона.

В выражение для частоты излучения входит удвоенный заряд электрона. Это связано с существованием электронных пар; полный заряд каждой равен $2e$. Одиночный электрон при прохождении разности потенциалов U приобретает энергию eU . Тот факт, что на опыте действительно наблюдается излучение с частотой $\nu = 2eU/h$, можно рассматривать как экспериментальное подтверждение правильности представления о существовании в сверхпроводниках связанных электронных пар.

Эффект Джозефсона позволяет создавать переменный ток с помощью постоянной разности потенциалов.

Мы рассказали о природе сверхпроводимости и о некоторых эффектах, наблюдаемых в сверхпроводниках. Физика сверхпроводимости еще очень «молода» и, несомненно, в этой области можно ожидать раскрытия еще многих тайн.



Машина управляет

Р. С. Гутер,
Ю. Л. Полунов

Недавно сотрудники американского журнала «Компьютерс энд аутомейшн» подсчитали, что из шестисот «профессий» электронных вычислительных машин около ста пятидесяти приходится на долю так называемых «управляющих» машин — машин, которые управляют быстротекущими технологическими и экспериментальными процессами. Мы хотим здесь рассказать о том, как машины управляют и почему для этого понадобились вычисления.

Как управляет человек

По шоссе мчится автомобиль. Шофер управляет движением машины. Обгоняя попутный транспорт и разъезжаясь со встречными машинами, водитель непрерывно следит за дорогой. Он намечает траекторию и скорость движения и изменяет положение педалей и руля машины так, чтобы фактические траектория и скорость как можно меньше отличались от намеченных. Мозг — руки — машина — глаза — мозг — вот система управления автомобилем.

В электрической печи сушатся формы для отливок. Температура в печи не должна выходить за определенные пределы. Рабочий следит за стрелкой прибора, связанного с электрическим термометром внутри печи. Если стрелка приближается к заданным границам, то рабочий увеличивает или уменьшает ток в нагревательном элементе, передвигая движок реостата, чтобы стрелка возвратилась в нужное положение.

На плите варится борщ. Повар пробует борщ и добавляет те или иные

продукты или изменяет силу огня до тех пор, пока содержимое кастрюли не придет в соответствие с его представлениями о готовом и вкусном блюде. Легко видеть, что принципы его действий те же, что и шофера, и рабочего у сушильной печи. Различие в действиях определяется лишь особенностями технологических процессов.

Алгоритмы управления

Во всех наших примерах фигурировал человек. Однако его можно исключить из системы управления. Если закон управления каким-либо объектом точно сформулирован в виде последовательности правил действий (*алгоритма*), то, в принципе, можно создать устройство и составить программу, осуществляющую этот алгоритм без участия человека. Такие системы принято называть *системами автоматического управления*.

Например, для управления сушильной печью достаточно выходной сигнал электрического термометра подать в устройство управления двигателя, связанного с движком реостата. Алгоритм управления ясен: если температура в печи начала падать, то двигатель должен повернуться в одну сторону, увеличивая ток в печи; если же температура растет, то двигатель должен уменьшить ток, повернувшись в противоположную сторону.

Отвлекаясь от физической сущности процессов, протекающих в системах управления, мы можем выделить блоки, общие для этих систем: объект управления, управляющая система, исполнительные органы и органы (устройства), передающие в управляющую систему информацию о целях и результатах управления. Графическое изображение такой системы (*блок-схема*) приведено на рисунке 1. Советуем читателю определить, что именно играет роль того или иного блока в каждом из приведенных примеров.

Описанные системы управления называют *замкнутыми системами*

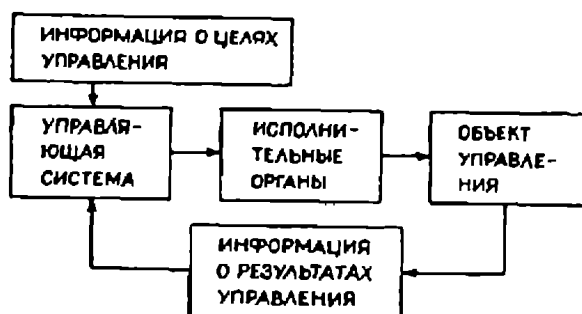


Рис. 1.

или *системами с обратной связью*. На принципе обратной связи — передаче информации с выхода системы на ее вход — основано регулирование процессов в живых организмах, технических устройствах, экономических и общественных системах.

Чтобы понять роль обратной связи, надо познакомиться с разомкнутыми системами, в которых такая связь отсутствует. Примером может служить автомат по продаже газированной воды.

Как работает этот автомат? Опущенная в отверстие монета проверяется по весу и, падая затем дальше, замыкает электрическую цепь. Включенный ею электромагнит притягивает рычаг, открывающий клапан (кран) на время, достаточное для наполнения стакана водой.

Бывают случаи, когда автомат «не доливает». Он делает это, разумеется не по «злому умыслу», просто за время эксплуатации изменились свойства электромагнита или рычага, и он открывает клапан на более короткий срок.

Попробуем видоизменить автомат так, чтобы возникла обратная связь. Для этого нужно иметь устройство, измеряющее уровень жидкости в стакане. Выходной сигнал этого устройства надо подать в обмотку электромагнита так, чтобы клапан оставался открытым до тех пор, пока не придет сигнал «стакан полон». Такая система будет более гибкой, ей не страшны изменения.

Замкнутые системы автоматического управления появились зна-