

Глава 6

Квантовые макроскопические эффекты

§1. Свойства вещества при сверхнизких температурах

В главе 2 мы рассмотрели свойства агрегатных состояний вещества. Было установлено, что при понижении температуры (если она ниже критической) газ можно перевести в жидкое состояние, а дальнейшее охлаждение приводит к отвердеванию вещества. Но чтобы охладить вещество, его нужно привести в равновесное состояние с охлаждающей средой. Долгое время в качестве охлаждающих сред использовали жидкий кислород ($T_{\text{жс}} = 90,2\text{K}$), азот ($T_{\text{жс}} = 77,4\text{K}$), водород ($T_{\text{жс}} = 20,3\text{K}$). Для получения этих веществ в жидком состоянии использовали методы, связанные с адиабатическим расширением и совершением газом работы (метод Линде, метод Капицы и др.).

Значительный прогресс в изучении свойств вещества при низких температурах достигли, когда в 1908 г. Х.Камерлинг-Оннесу удалось сжигить гелий ($T_{\text{жс}} = 4,2\text{K}$).

В предыдущих главах мы рассматривали изменение свойств вещества при низких и сверхнизких температурах: уменьшение омического сопротивления металлов, уменьшение вклада решетки в теплоемкость твердых тел (закон Дебая), относительное увеличение вклада электронов в эту теплоемкость, наличие нулевых колебаний в твердых телах при $T \rightarrow 0\text{K}$, конденсация Бозе-газа, заполнение энергетических состояний свободными электронами при $T \rightarrow 0\text{K}$ (при соблюдении принципа Паули) до некоторой максимальной энергии, называемой энергией Ферми и т.д.

И хотя низкие и сверхнизкие температуры «далеки» от комнатных условий, но уже перечисленный выше список физических явлений, наблюдаемых в этих условиях, говорит о важности изучения вещества при таких параметрах температуры как для научных исследований, позволяющих познать свойства вещества, так и для практических целей. Более подробно мы будем говорить об этом далее.

§2. Открытие и свойства низкотемпературной сверхпроводимости. Сверхпроводники 2-го рода

Прорыв в рассматриваемой области был сделан тем же Х.Камерлинг-Оннесом, который в 1908 г. сумел превратить в жидкость последнее газообразное на земле вещество – гелий. Камерлинг-Оннес занимался изучением остаточного сопротивления металлов в зависимости от их чистоты (см. рис. 102).

Экспериментируя с ртутью (которую методом возгонки можно получить практически чистой), Камерлинг-Оннес в 1911 г. открыл то явление, которое мы называем сверхпроводимостью. В очень узком интервале температуры $\sim 0,01\text{K}$ (в зависимости от чистоты) ртуть теряла свое сопротивление. Была установлена критическая температура для ртути -

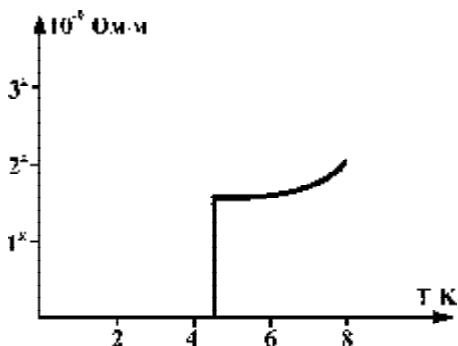


Рис. 102.

$T_{кр} = 4,15\text{K}$. Оказалось, что

лучшие по электрическим параметрам проводники – платина, золото, медь – не являются сверхпроводниками. За почти семидесятилетний период изучения сверхпроводимости были получены сплавы, у которых $T_{кр} \approx 23\text{K}$.*

В 1933 г. было открыто одно из удивительных свойств сверхпроводников – эффект Мейснера: не очень сильное магнитное поле (меньше так называемого $H_{кр}$, при котором сверхпроводимость разрушается) выталкивается из сверхпроводящего образца, то есть сверхпроводники являются идеальными диамагнетиками (см. гл. 5, §3) (Рис.103).

* Установлено, что низкотемпературной сверхпроводимостью обладают 25 химических элементов и более 400 сплавов и химических соединений.

Два проявления низкотемпературной сверхпроводимости – исчезновение сопротивления и эффект Мейснера – главные, одновременно присутствующие (если есть внешнее магнитное поле) признаки этого явления.

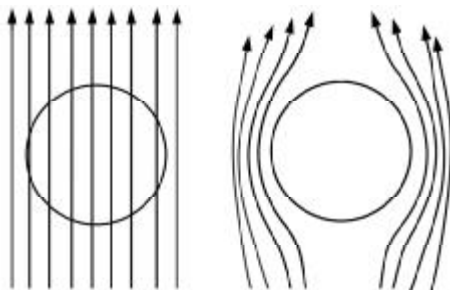


Рис. 103.

С точки зрения термодинамики переход проводника в сверхпроводящее состояние является фазовым переходом. Но, в отличие, например, от процесса кристаллизации, при котором происходит выделение некоторого количества энергии и поэтому фазовый переход называется фазовым переходом 1-го рода, переход в сверхпроводящее состояние не сопровождается выделением энергии. Такой фазовый переход называется фазовым переходом 2-го рода, энергия образца изменяется непрерывно. Однако, теплоемкость металла при переходе в сверхпроводящее состояние изменяется скачком, причем в момент перехода возрастает в 2.5-3 раза (см. рис.104).

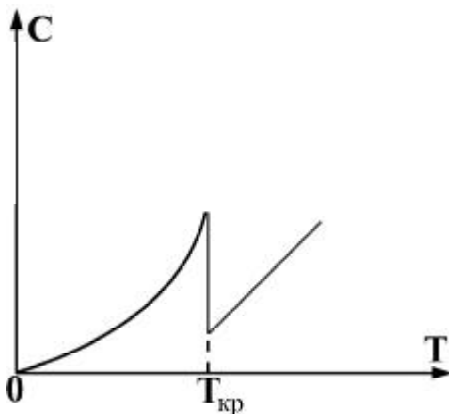


Рис.104.

С другой стороны, если переход в сверхпроводящее состояние происходит во внешнем магнитном поле, то такой переход возможен, если напряженность магнитного поля меньше $H_{кр}$. При этом, для выталкивания магнитного поля из объема образца потребуется затрата энергии. А это означает, что мы имеем дело не с фазовым переходом 2-го рода, а с фазовым переходом 1-го рода (см. рис.105). Только в т. А мы снова имеем фазовый переход 2-го рода.

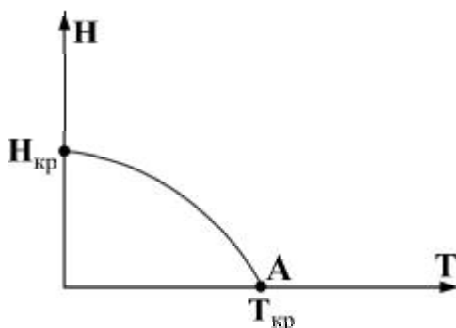


Рис.105.

Приведем некоторые критические величины: (Табл.10).

Табл. 10

Вещество	Критическая температура $T_{кр}$, К	$H_{кр}$, эрстед
Ртуть	4,15	411
Свинец	7,2	803
Аллюминий	1,19	99
Ванадий	5,3	1370

Для ориентировки: магнитное поле Земли имеет напряженность $H_z = 0,5 \text{ Э}$, вокруг провода с током в 1 А $H_l = 2 \text{ Э}$.

Так как вокруг проводника с током существует его магнитное поле, то только в том случае, если ток меньше определенной критической величины, данный образец может стать сверхпроводником. Отметим еще раз, что в сверхпроводнике ток течет лишь в тонком поверхностном слое. Только в этом случае будет наблюдаться эффект Мейснера – второй обязательный признак сверхпроводимости. Толщина приповерхностного слоя (а, следовательно, глубина проникновения внешнего магнитного поля представлена в таблице 11.

Табл. 11

Вещество	Глубина проникновения $\overset{\circ}{A}$
Олово	510
Аллюминий	500
Свинец	390
Ртуть	380-450

$1\overset{\circ}{A}=10^{-8}$ см

Особое состояние сверхпроводимости названо промежуточным. Представим себе пластину проводника, расположенную перпендикулярно магнитному полю и имеющую сечение, значительно меньше размеров пластины. Магнитное поле не может обогнуть пластину, да и остановиться на поверхности пластины оно не может – магнитных зарядов не существует. В пластине, находящейся в сверхпроводящем состоянии, возникают каналы нормального состояния проводника, в которых магнитное поле сгущается, достигает критического значения и тем самым в этих каналах разрушается сверхпроводящее состояние.

Все обсужденные выше свойства принадлежат сверхпроводникам 1-го рода.

Но в 1957 г. советский физик А.А. Абрикосов предсказал существование сверхпроводников 2-го рода, как правило, соответствующие вещества являются сплавами (Nb_3Ti , V_3Ga , Nb_3Sn и др.). Особенностью таких сверхпроводников является то, что внутри них среднее магнитное поле не равно нулю. При достижении внешнего магнитного поля величины $H_{кр1} \leq H_{кр}$ внутри проводника, находящегося в сверхпроводящем состоянии, возникают токовые вихри. Их магнитное поле внутри «вихревого столба» разрушает сверхпроводимость и только тогда, когда напряженность внешнего магнитного поля достигнет величины $H_{кр2} \gg H_{кр}$ весь проводник теряет сверхпроводящее состояние.

Если придать сверхпроводнику форму кольца, то в нем будет циркулировать незатухающий ток. В момент перехода проводника в сверхпроводящее состояние внешнее магнитное поле сосредотачива-

ется внутри выреза кольца. Установлено, что величина захваченного магнитного потока может принимать только определенные значения: 0,1,2 ... величины $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$.

Оказалось, что этот квант магнитного потока Φ_0 связан с другими фундаментальными постоянными:

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

где $\hbar$ - постоянная Планка, c – скорость света, e – заряд электрона.

Вихри в сверхпроводниках 2-го рода несут ровно один квант магнитного потока.

В 1950 г. был открыт «изотоп-эффект»: оказалось, что кристаллическая решетка влияет на сверхпроводимость. Замена элемента на более легкий изотоп поднимает $T_{кр}$, т.е. эта температура зависит от частоты колебаний структурных частиц решетки.

В 1962 г. английский физик Б. Джозефсон предсказал так называемую слабую сверхпроводимость: при контакте двух разнородных сверхпроводников через него самопроизвольно течет сверхпроводящий ток. Если же к контакту приложить постоянное напряжение, то контакт обретет активное сопротивление и индуктивность, причем ток оказывается переменным. При напряжении в несколько милливольт частота тока составляет сотни и тысячи Гигагерц ($1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$). Эффект Джозефсона нашел широкое практическое применение.

В силу дороговизны получения и удержания сверхнизких температур, сверхпроводимость пока нашла свое применение, в основном, в научных исследованиях, в частности, для получения сверхсильных магнитов для работы в ускорителях элементарных частиц.

§3. Теория низкотемпературной сверхпроводимости

Для объяснения явления низкотемпературной сверхпроводимости нам необходимо использовать материал, изложенный в гл.1, §12, 13 и 14 (поэтому читателю целесообразно прочитать указанные параграфы вторично).

В обычных проводниках носителями заряда являются электроны. Во многих явлениях электроны ведут себя как классические частицы. Например, при таком подходе к носителям заряда в проводниках удалось объяснить закон Ома. Однако, квантовая природа электронов все же проявилась в том, что температурная зависимость удельной проводимости, а, значит, и плотности тока объяснима только с учетом того, что электроны – это фермионы, т.е. обладают специфическими квантовыми свойствами. Точно так же, из-за квантовых свойств электронов, их вклад в теплоемкость при комнатных температурах ничтожно мал. Неучастие электронов в создании теплоемкости в металлах – одно из больших затруднений классической электронной теории, разрешить которое смогла лишь квантовая электронная теория.

В обычных условиях электроны, будучи одноименно заряженными, отталкиваются друг от друга. Но при понижении температуры проводника в процессе взаимодействия электронов все существенней сказывается присутствие кристаллической решетки, в узлах которой находятся положительно заряженные ионы. В 1957 году американские физики Л.Купер, Дж.Бардвин, и Дж. Шриффер (и одновременно с ними советский физик Н.Н.Боголюбов –старший) построили квантовую теорию явления сверхпроводимости. Они показали, что благодаря участию кристаллической решетки, между электронами возникает и притяжение: каждый электрон вокруг себя поляризует кристаллическую решетку, возникает своеобразная потенциальная яма, попав в которую другой электрон оказывается связанным с первым электроном. При определенной критической температуре для каждого сверхпроводника кинетической энергии уже оказывается недостаточно, чтобы вырваться из этой специфической потенциальной ямы, образуются так называемые – «куперовские пары» – динамические системы, содержащие по два электрона. Но у системы из двух электронов результирующий спин оказывается целочисленным (в «куперовской паре» спины электронов – это векторные характеристики – направлены противоположно, поэтому спин пары равен нулю). А это означает, что «куперовская пара» по своим свойствам будет относиться к классу бозонов. Но бозоны не подчиняются принципу Паули и могут «собираться» в любом количестве в одном энергетическом состоянии. В этом случае говорят, что происходит «конденсация» бозе-частиц. Естественно, в силу энергетической выгоды все «куперовские пары» «соберутся» на самом нижнем энергетическом уровне (рис.106).

Но, обладая наименьшей возможной энергией, «куперовские пары» не будут взаимодействовать ни между собой, ни с кристаллической решеткой. Действительно, при взаимодействии участники его должны обмениваться энергией и количеством движения. Находясь на нижнем энергетическом уровне, «куперовские пары» не могут отдавать ни энергии, ни количества движения, так как они (энергия и количество движения) у пары минимальные, меньше быть не могут. Не могут «куперовские пары» и принять энергию, если

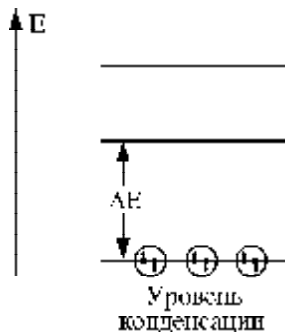


Рис. 106.

она меньше, чем ΔE (см. рис.106). Вот и получается, что после охлаждения проводника ниже критической температуры, его электроны (объединенные в «куперовские пары») перестают взаимодействовать как между собой, так и с кристаллической решеткой. Последний эффект и проявляется как отсутствие сопротивления у проводника (вспомним: физической природой омического сопротивления является обмен энергией между носителями заряда и кристаллической решеткой). Сверхпроводящее состояние, т.е. образование «куперовских пар» и их «конденсация», возможны не во всяком проводнике. Необходимо выполнение некоторых условий, которым должна удовлетворять кристаллическая решетка. Если поднять температуру сверхпроводника так, чтобы средняя энергия теплового движения kT стала больше, чем ΔE , то сверхпроводящее состояние исчезает, так как разрушаются все «куперовские пары» и электроны переходят на более высокие энергетические состояния. В теории сверхпроводимости интервал энергии ΔE носит специфическое название – «энергетическая щель».

§4. Высокотемпературная сверхпроводимость

В октябре 1986 г. была опубликована статья двух физиков, работавших в Швейцарии Г.Беднорца и К.Мюллера. Они сообщали, что получили сверхпроводящее вещество с $T_{кр} \sim 30K$. Через несколько месяцев результат был улучшен в несколько раз. Основой всех веществ

было соединение, содержащее лантан, стронций, медь и кислород ($La - Sr - Cu - O$), затем появились сведения, что сверхпроводимостью обладают и соединения иттрия, бария, меди и кислорода ($I - Ba - Cu - O$) при температуре выше температуры кипения жидкого азота ($77K$), затем была достигнута $T_{кр} \sim 125K$ и выше. А это действительно уже «комнатные» температуры. Причем, если литр жидкого гелия стоит около 10 руб, то литр жидкого азота всего лишь 4 коп. (по ценам 80-х гг XXв.).

В настоящее время во многих научных лабораториях мира (в том числе, и в нашей стране) идет интенсивное изучение высокотемпературной сверхпроводимости. Трудно переоценить значение этого явления для человечества: известно, что потери на «джоулево тепло» составляют почти 30% от вырабатываемой в мире электроэнергии.

Однако, не создана еще теория высокотемпературной сверхпроводимости. А, главное – высокотемпературные сверхпроводники – это керамические соединения. И возникают трудности в изготовлении протяженных гибких проводников...

§5. Сверхтекучесть. Теория явления

Сверхтекучесть, как и сверхпроводимость – это чисто квантовые процессы, наблюдаемые макроскопически.

Выше уже рассказывалось, что гелий был последним газом, который был сжижен лишь в 1908 г. при температуре $4,2K$ и нормальном давлении. И это единственное вещество, которое не удалось отвердить при нормальных условиях.

В 1938 г. советский физик П.Капица обнаружил у жидкого гелия новое явление – сверхтекучесть: при температуре $2,19K$ гелий испытывает фазовый переход 2-го рода, что проявляется в его способности вытекать из сосуда через любое малое отверстие без всякого трения.

Сверхтекучий гелий – это еще одна квантовая жидкость (первой являются куперовские электронные пары). Поэтому логично объяснить свойства сверхтекучего гелия на той же основе, как и объяснение сверхпроводимости.

Атом гелия ${}^4_2\text{He}$ как единая сложная система является бозоном. Действительно, в атоме гелия ядро содержит два протона и два нейтрона, а в электронной оболочке - два электрона, всего в атоме шесть частиц и все фермионы. Их суммарный спин будет целочисленным. И все, что мы говорили выше о «куперовских парах», применимо к отдельным атомам гелия, которые при температуре 2,19К все переходят в нижнее энергетическое состояние, т.е. происходит «конденсация» и наступает сверхтекучее состояние. Только теперь исчезает не взаимодействие с кристаллической решеткой, а со стенками сосуда. Именно поэтому сверхтекучий гелий способен вытечь из сосуда через любое малое отверстие.

Мы рассмотрели возникновение сверхтекучести у одного изотопа He . Но у этого элемента есть и еще один изотоп ${}^3_2\text{He}$, в ядре которого имеется не два, а один нейтрон. А это означает, что изотоп ${}^3_2\text{He}$, не является бозоном. Однако, эксперимент показывает, что при очень низкой температуре (вблизи абсолютного нуля) и этот изотоп гелия обнаруживает сверхтекучее состояние. Исходя из предыдущего, мы должны предположить, что происходит «куперизация» двух атомов гелия ${}^3_2\text{He}$, и образуется система из двух атомов, а это уже сложный бозон и все, сказанное выше о «куперовских парах», снова можно повторить. Чтобы не было недоразумения, отметим, что слово «конденсация», которое мы использовали при объяснении сверхпроводимости и сверхтекучести, не имеет никакого отношения к конденсации обычных газов при переходе их из газообразного в жидкое состояние. Именно поэтому слово «конденсация» мы брали в кавычках. Под процессом «конденсация» в рассматриваемой теории понимается лишь переход «куперовских пар» и подобных им систем в одно, самое нижнее энергетическое состояние.

Рассмотрим один характерный опыт со сверхтекучим гелием.

В сосуд (см. рис.107) со сверхтекучим гелием помещена колба (сосуд Дюара – аналог термоса), в которую встроена нагревательная

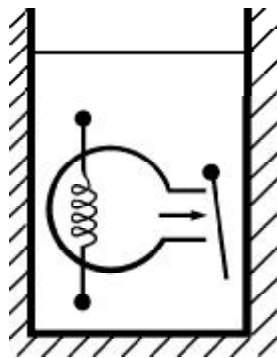


Рис. 107.

спираль, благодаря которой можно нагревать жидкий гелий только внутри колбы. Перед открытым отверстием колбы расположено легкое крылышко, отклонение которого при движении жидкости можно наблюдать.

При подаче напряжения на спираль крылышко отклоняется, свидетельствуя об истечении гелия из колбы. Но количество гелия в колбе не уменьшается. Это означает, что на смену вышедшему гелию столько же жидкости втекает из большого сосуда. Причем эта входящая в колбу сверхтекучая жидкость не оказывает воздействия на крылышко, т.е. эта жидкость ведет себя так, как положено «сконденсировавшимся» бозонам – атомам гелия при температуре $T \leq 2,19K$. Нагретая же жидкость становится гелием, находящимся в нормальном состоянии. И только поток этой жидкости несет энергию, которую этот поток может передать крылышку.

Пока явление сверхтекучести не нашло практического применения. Вместе с тем ряд явлений, наблюдаемых в состоянии нейтронных звезд (см. гл.2, §1), свидетельствуют, что вещество этих звезд находится в сверхтекучем состоянии (более подробно о свойствах сверхтекучести читатель узнает, ознакомившись с указанной в конце книги литературой).

Заключение

Наука о строении и свойствах твердых тел – физика твердого тела (ФТТ) – несмотря на свою давнюю историю, испытывает новый подъем. Об интенсивности развития этого раздела физической науки говорит хотя бы тот факт, что примерно треть всех публикуемых по физике работ в той или иной степени связана с ФТТ.

Влияя на содержание и темп научно-технической революции, ФТТ оказывает огромное воздействие на другие отрасли естествознания, дает начало новым направлениям в науке, непосредственно связана с мировыми экологическими проблемами.

Исключительно велик и общепризнан вклад наших ученых в эту область познания природы.

Развитие современной науки и техники требовало как удешевления электронных устройств, так и уменьшения их габаритов. Это выз-

вало появление микроэлектроники, основной задачей которой является создание высоконадежных, экономичных микроминиатюрных электронных схем и устройств. Решение этих задач привело к разработке качественно новых принципов изготовления электронных схем, к отказу от использования дискретных радиодеталей и к изготовлению микросхем в микрообъемах полупроводникового монокристалла. Такие схемы получили название интегральных схем. В них все детали (транзисторы, диоды, емкости, резисторы) составляют единое целое, изготовленное в едином технологическом процессе. Размеры интегральной схемы порядка 10^{-6} м, число элементов в ней порядка 10^9 м⁻³ и более, потребляемая мощность от сотен милливатт до единиц микроватт.

Широкое применение нашли гетероструктурные элементы, представляющие собой микрокристалл из двух областей с одним и тем же типом проводимости, но разной шириной запретных зон. Именно за разработку гетеросистем российский физик академик РАН Ж.И. Алферов получил в 2000 году Нобелевскую премию по физике.

В процессе изложения материала автор постоянно обращал внимание читателя на огромное число нерешенных задач, на обнаружение у «классических» объектов принципиально новых свойств. Все это свидетельствует, что и новому поколению физиков-исследователей осталась возможность продолжить развитие физической науки и, в том числе, физики твердого тела.

Прочитанная читателем данная книга – это только начало большого пути в процессе познания свойств твердого состояния вещества.