

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

537.312.6

**СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ \*)***У. Литтл*

Несколько лет назад в Массачузетском технологическом институте был произведен эксперимент, который продемонстрировал возможность создания вечно движущейся системы. В небольшом металлическом кольце индуцировался электрический ток. Затем это кольцо не трогали в течение года. Но и спустя год электрический ток по-прежнему циркулировал в материале кольца; еще более удивительно то, что сила тока за это время практически осталась неизменной. Хотя большинство физиков инстинктивно противится представлению о вечном движении и предпочитает эвфемистически называть такие токи «устойчивыми токами», нельзя не признать, что эти токи удивительно устойчивы.

Тайна этого необыкновенного явления состоит, конечно, в том, что металл поддерживается при очень низкой температуре; речь идет о температурах, отличающихся лишь на несколько градусов от абсолютного нуля. Ниже определенной «характеристической температуры» многие металлы спонтанно переходят в так называемое сверхпроводящее состояние; в этом состоянии поток электронов может двигаться вдоль металла, не встречая с его стороны какого-либо сопротивления типа трения. А так как трение является причиной, обуславливающей невозможность построения вечно движущихся машин, то в этом случае, когда оно полностью отсутствует, возбужденный в какой-то момент ток течет неограниченно долго без подкачки энергии извне. Тем самым разрушается традиционное убеждение о невозможности вечного движения.

Фактически явление сверхпроводимости совсем уж не такое редкое. С момента его обнаружения голландским физиком Камерлинг-Оннесом, более чем пятьдесят лет назад, большое число самых различных металлов и несколько сотен сплавов этих металлов оказались сверхпроводниками. Как можно думать, технологический потенциал вечно движущихся машин, основанных на явлении сверхпроводимости, в принципе неограничен. Передача энергии без потерь, чрезвычайно мощные электромагниты, весьма эффективные электромоторы, усилители, ускорители и даже счетные машины — все это лишь небольшая часть тех важных применений, которые нашло себе явление сверхпроводимости за последние пятьдесят лет. Однако главным недостатком всех этих схем является необходимость использования очень низких температур, неизбежных для создания сверхпроводника; сложное и громоздкое оборудование, обеспечивающее

\*) W. A. Little, Superconductivity at Room Temperature, Scient. Amer. 212 (2), 21 (1965). В оригинале — резюме: «Хотя этого еще никому не удалось добиться, теоретические исследования указывают на то, что возможно синтезировать органические соединения, которые, подобно многим металлам при низких температурах, способны проводить электрический ток, не оказывая ему сопротивления». Перевод В. А. Угарова. Комментарий — в статье Л. В. Келдыша на стр. 327.

температуру, необходимую для поддержания сверхпроводящего состояния металлов, зачастую делало такие установки экономически невыгодными. Надежда на то, что со временем проблема охлаждения может быть снята за счет открытия сверхпроводников с высокими температурами перехода, окрыляла исследования многочисленных сплавов, составленных из различных сверхпроводящих металлов. Хотя при этом было обнаружено много новых сверхпроводящих сплавов, перспектива получения металлического сверхпроводника с высокой температурой перехода вовсе не стала радостней. Самая высокая температура перехода, полученная до сих пор, составляет всего-навсего  $18,2^\circ\text{K}$ ; такая температура находится значительно ниже той области температур, которую можно достичь с помощью рядовой охлаждающей системы. Кроме всего прочего, в результате этих работ было получено значительное количество статистических данных, указывающих на то, что чрезвычайно мало вероятно найти сплав, температура перехода которого была бы значительно выше  $20^\circ\text{K}$ .

Но что можно сказать о возможности открытия каких-то других веществ — возможно, неметаллической природы, — которые окажутся сверхпроводящими при более высоких температурах? Современная ситуация чрезвычайно благоприятна для теоретического рассмотрения такой возможности, поскольку в последние годы был достигнут существенный прогресс в понимании природы сверхпроводящего состояния. В частности, я заинтересовался возможностью синтеза таких органических веществ, которые имитировали бы основные свойства сверхпроводящего металла. Из моих расчетов вытекает, что некоторые органические молекулы способны находиться в сверхпроводящем состоянии при температурах порядка комнатной ( $\sim 300^\circ\text{K}$ ), а возможно, даже и выше! Для того чтобы пояснить ход рассуждений, приводящих к такому предсказанию, я должен сначала остановиться на некоторых теоретических результатах, на которых эти рассуждения основываются.

Выяснение истинной природы сверхпроводимости оказалось одной из самых трудных проблем теоретической физики нашего столетия. Решительный шаг был сделан в 1957 г., когда была опубликована исчерпывающая микроскопическая теория Бардина, Купера, Шриффера. Эта теория, известная ныне повсюду как БКШ-теория, не только сумела объяснить практически все экспериментальные данные, собранные за последние пятьдесят лет, но и успешно предсказала значительное количество новых явлений, связанных со сверхпроводимостью.

Как и большинство научных теорий, БКШ-теория не упала с небес, а была построена на прочном теоретическом фундаменте, заложенном предыдущими исследованиями. В частности, некоторые существенные черты БКШ-теории были указаны много лет назад теоретиком Ф. Лондоном, которому удалось успешно развить макроскопическую теорию сверхпроводимости уже в 1950 г. Именно тогда Лондон обнаружил понимание в высшей степени упорядоченной природы сверхпроводящего состояния и интуитивно уловил несколько существенных критериев, которым должна удовлетворять правильная микроскопическая теория. Он понял, что каждый образец данного сверхпроводника обладает характерным свойством, присущим ему, и что в сверхпроводящем состоянии это свойство остается неизменным, несмотря на тепловое или какое-либо другое внешнее воздействие. Он был поражен также необыкновенной устойчивостью сверхпроводящего состояния; эта особенность сверхпроводящего состояния очень ярко подчеркнута в БКШ-теории.

Быть может, именно благодаря тому, что ему удалось в самых общих чертах ощутить микроскопическую теорию, Лондон смог высказать идею

о том, что явление сверхпроводимости может иметь существенное значение не только для людей, занимающихся физикой низких температур, но также и для многих из тех, кто работает в других областях науки. Лондон допустил возможность сверхпроводящих состояний в некоторых крупных органических молекулах типа протеина; ему казалось, что это предположение могло бы объяснить некоторые необычные свойства этих молекул. Увы, Лондон умер за несколько лет до появления БКШ-теории и уже не мог развить или проверить свои идеи в свете этой новой теории. И хотя его другие работы оказали большое влияние на многих, работающих в этой области, те мысли, о которых мы упомянули, в течение десяти лет после его смерти привлекали к себе очень мало внимания.

Мой интерес к проблеме биологических сверхпроводников возник лет пять назад, когда я работал в Стэнфордском университете над достаточно скромной задачей о передаче тепла металлическим сверхпроводникам. Как и Лондон, я был поражен чрезвычайной устойчивостью сверхпроводящего состояния; мне пришло в голову, что если природа хочет сберечь запасенную информацию, например, в генетическом коде живого объекта от разрушительного действия тепла или других внешних воздействий, то принципы, лежащие в основе явления сверхпроводимости, оказываются вполне подходящими для этой цели. Имея в виду неповторимую изобретательность природы в таких вещах, я подумал о том, что было бы полезно выяснить, не могут ли появляться сверхпроводящие состояния в крупных органических молекулах, построенных вдоль основных цепей генетических молекул дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК).

В свете тех требований, которые вытекают из БКШ-теории, одна молекула этого общего типа выглядит особенно многообещающей. Ее структура по случайному совпадению совсем близка к той, которую, по-видимому, имел в виду Лондон; это позволяет предположить, что он пошел в своих рассуждениях в этом направлении значительно дальше, чем это можно заключить из его опубликованных работ. Подробные расчеты сверхпроводящих свойств гипотетической молекулы показывают, что она будет сверхпроводящей при комнатных температурах и даже при температурах значительно выше комнатных. Этот результат — хотя он и является безусловно необходимым, если явление сверхпроводимости несет какие-то биологические функции, — оказался весьма неожиданной премией. Последующие исследования показали, что существует относительно простое объяснение такой необычно высокой температуры перехода. Однако, прежде чем описать, как может передаваться сверхпроводящий ток такой молекулой, необходимо рассмотреть механизм, с помощью которого электрический ток идет по обычному проводнику и металлическому сверхпроводнику.

В нормальном несверхпроводящем металле при образовании кристаллической решетки каждый атом теряет один или несколько из своих внешних, наименее связанных с ним электронов; эти оторвавшиеся от атома электроны могут свободно блуждать по всему металлу. Движение этих «свободных» электронов тем не менее подвержено некоторым ограничениям: требования квантовой механики ведут к тому, что допустимы лишь некоторые энергетические состояния электронов, или, другими словами, лишь некоторые скорости. Другое ограничение определяет характер распределения электронов по этим состояниям. Это ограничение вытекает из принципа запрета Паули, который утверждает, что в каждом из допустимых состояний в данный момент времени может находиться только один электрон. Электроны могут произвольным образом перерас-

пределяться, лишь бы были соблюдены два указанных условия. Наиболее

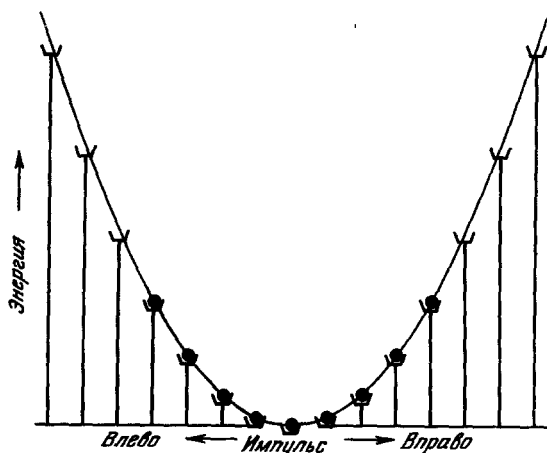


Рис. 1. В нормальном проводнике «свободные» электроны (темные кружки) могут перемещаться любым образом, совместимым с двумя ограничениями: 1) допустимы только определенные энергетические состояния; 2) в каждом допустимом состоянии в данный момент времени может находиться только один электрон.

В наиболее устойчивом энергетическом распределении электронов все нижние энергетические состояния заняты электронами, а все высшие состояния пусты. Никакого тока нет, потому что влево и вправо движется одинаковое число электронов.

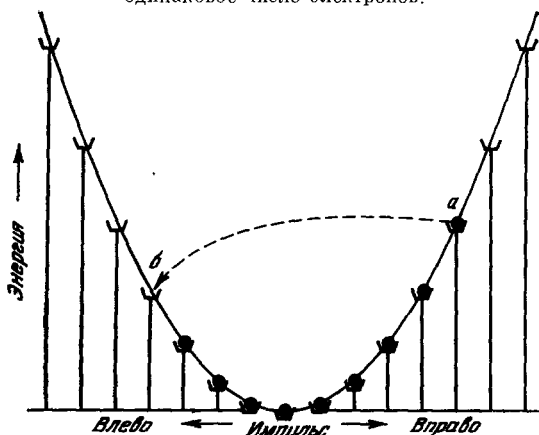


Рис. 2. В нормальном проводнике появляется ток, если все допустимые энергетические состояния смещаются в одном направлении (на нашем рисунке вправо); теперь уже вправо движется больше электронов, чем влево.

Ток прекращается, когда электрон *a*, энергично движущийся вправо, сталкивается с каким-либо дефектом металла и отбрасывается назад (пунктирная стрелка); он может теперь занять одно из свободных состояний *b*, соответствующих электрону, движущемуся с несколько меньшей скоростью влево

ной с регулярным движением электронов (рис. 2). Однако у обычного металла асимметричное распределение не может сохраняться в течение длительного времени, если оно не поддерживается внешними факторами.

устойчивым распределением по энергиям будет такое распределение, когда все нижние энергетические состояния заполнены электронами, а все высшие состояния пусты. Для каждого состояния, соответствующего электрону, движущемуся влево, найдется другое состояние с той же энергией, соответствующее электрону, движущемуся вправо. Таким образом, в низшем энергетическом состоянии есть столько же электронов, движущихся влево, сколько электронов движущихся вправо; таким образом, полное распределение электронов является симметричным (рис. 1). В таком состоянии равновесия средняя скорость электронов по любому направлению равна нулю и, следовательно, никакого тока в металле нет.

Если в металле возбуждается ток, то это равносильно утверждению, что все электроны принуждаются двигаться в одном направлении, скажем вправо, так что к скорости беспорядочного движения каждого электрона добавляется скорость регулярного движения. Поэтому у электронов, движущихся вправо, возрастет скорость, а следовательно, и энергия; у электронов, движущихся влево, скорость и энергия станут меньше. В среднем такое асимметричное распределение электронов будет иметь несколько большую энергию по сравнению с исходным симметричным распределением благодаря появлению дополнительной кинетической энергии, связанной с регулярным движением электронов (рис. 2). Однако у обычного металла асимметричное распределение не может сохраняться в течение длительного времени, если оно не поддерживается внешними факторами.

Это происходит потому, что электрон, быстро движущийся вправо, в конце концов сталкивается с каким-либо дефектом металла и отбрасывается в противоположную сторону. Это означает, что он попадает в одно из свободных состояний, соответствующих электрону, движущемуся более медленно влево. Состояния слева обладают несколько меньшей энергией, поскольку их скорость меньше, и поэтому электроны будут предпочитать эти состояния. Таким образом, асимметричное состояние, обеспечивающее наличие тока, будет быстро перестраиваться, переходя в симметричное распределение с более низкой энергией; в результате перестройки ток прекращается.

В сверхпроводниках такого рассасывания асимметричного распределения электронов не происходит, потому что в этом случае возникает притяжение между электронами, которое связывает их в пары. Каждый электрон сверхпроводника имеет своего партнера, с которым он спарен. Спаренные электроны не могут свободно перемещаться по металлу; оказалось, что для того, чтобы электроны могли быть связаны друг с другом, импульс центра масс каждой пары должен быть таким же, как и импульс центра масс большинства других пар (рис. 3). Теперь уже, если электрон, энергично движущийся вправо, сталкивается с дефектом решетки и в результате соударения оказывается в состоянии, соответствующем движению с меньшей скоростью влево, этот электрон окажется без партнера, а его прежний партнер также оказывается в одиночестве. Эти два разрозненных электрона уже не способны образовать пару друг с другом, потому что их центр масс не имел бы нужного импульса. Следо-

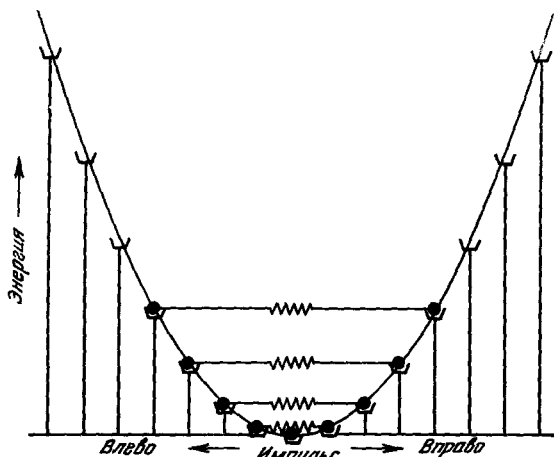


Рис. 3. В сверхпроводнике притяжение «свободных» электронов связывает их попарно (см. также рис. 5).

Спаренные электроны не могут свободно двигаться по металлу, поскольку оказалось, что для того, чтобы электроны были связаны друг с другом, необходимо, чтобы импульс центра масс каждой пары был таким же, как и у большинства других пар. Когда в металле нет тока, импульс центра масс каждой пары равен нулю.

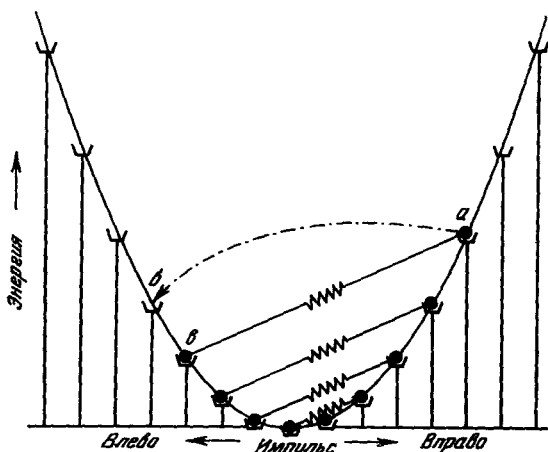


Рис. 4. «Устойчивый ток» течет в сверхпроводнике, когда число электронов, движущихся вправо, больше числа электронов, движущихся влево.

Ток не прекращается, потому что если электрон из точки *a* перебросится в точку *b*, оба электрона — перекинутый из *a* и электрон в точке *b* — останутся без партнера. Эти два разрозненных электрона уже не могут образовать пару, потому что их центр масс не будет иметь нужное значение импульса. Следовательно, электронные пары, как правило, разрушаться не будут.

вательно, если затрата энергии на разрыв спаренных электронов не возмещается за счет уменьшения кинетической энергии в результате соударения, разрыв пары вообще не произойдет. Асимметричное распределение сохранится, и ток будет устойчивым (рис. 4). Согласно БКШ-теории именно эта причина определяет тот факт, что электрический ток в сверхпроводящем кольце может существовать неограниченно долго.

Разумеется, приведенные рассуждения лишь частично дают ответ на вопрос о том, почему некоторые вещества неожиданно становятся сверхпроводящими при некоторой характеристической температуре. Неясно, почему электроны вдруг притягивают друг друга, тогда как известно, что заряды у электронов одинаковые и электроны поэтому должны отталкивать друг друга. С какой стати центры масс различных пар должны каким-либо образом коррелировать друг с другом? Но это уже довольно тонкие вопросы, на которые трудно дать простой ответ. Однако наводящие соображения можно получить, исходя из некоторой аналогии.

Представьте себе тонкую упругую пленку, натянутую на обычный барабан. Положим на пленку два тяжелых шарика. Как будут вести себя шарики, если мы будем плавно наклонять барабан то в одну, то в другую сторону? Очевидно, за счет веса шарика упругая пленка несколько прогнется, и если эти шарики подойдут достаточно близко друг к другу, один из них скатится в углубление, образованное другим; для наблюдателя извне это выглядело бы как притяжение шариков друг к другу. Если теперь наклонять барабан, эти шарики будут двигаться по пленке уже вместе, парой: каждый из них будет двигаться в углублении, образованном другим шариком. Если наклонять барабан достаточно резко, воздействие в конце концов может оказаться настолько сильным, что шарики отделятся друг от друга и станут перемещаться по пленке более или менее независимо друг от друга.

Но что здесь общего со сверхпроводимостью? Положительно заряженные ионы металла, возникшие после того, как атомы лишились своих внешних электронов, отнюдь не жестко закреплены в узлах кристаллической решетки; они могут совершать упругие колебания около своих узлов. Когда один из «свободных» электронов — мы назовем его первым электроном — проходит около положительно заряженных ионов, эти ионы будут притягиваться к отрицательно заряженному электрону, пока он находится вблизи них. Это приводит к нарушению правильности решетки; в непосредственной близости к электрону решетка «сморщилась» (рис. 5). Второй электрон, естественно, притягивается к области с избытком положительного заряда, созданной высокой плотностью ионов там, где решетка сморщилась; тем самым этот электрон косвенным образом притягивается к первому электрону. Картина вполне аналогична тому, что имеет место, когда один из шариков притягивается к другому за счет углубления в упругой пленке барабана. В этих случаях сморщивание решетки и прогиб пленки барабана играют эквивалентные роли.

Вызываемые этим механизмом силы притяжения в металле могут оказаться столь значительными, что два электрона оказываются крепко-накрепко связанными друг с другом. Однако такая связь может появиться лишь в том случае, если температура достаточно низка, потому что при высоких температурах тепловое возбуждение электронов ведет к разрушению электронных пар, подобно тому как резкие наклоны барабана могут привести к разъединению шариков.

Полезно приглядеться более внимательно к деталям этого процесса. Представим себе, что первый электрон движется по коридору положительных ионов. Радиус действия электрон-ионного взаимодействия чрез-

вычайно мал; поэтому первый электрон, проходя мимо иона, будет сообщать каждому иону короткий, резкий толчок. Этот импульс вызывает движение иона в том направлении, где находился электрон; однако ионы движутся значительно медленнее электронов, и электрон, вызвавший движение иона, к тому времени, когда ион сместится настолько далеко, чтобы почувствовать упругие силы со стороны своих соседей, будет уже

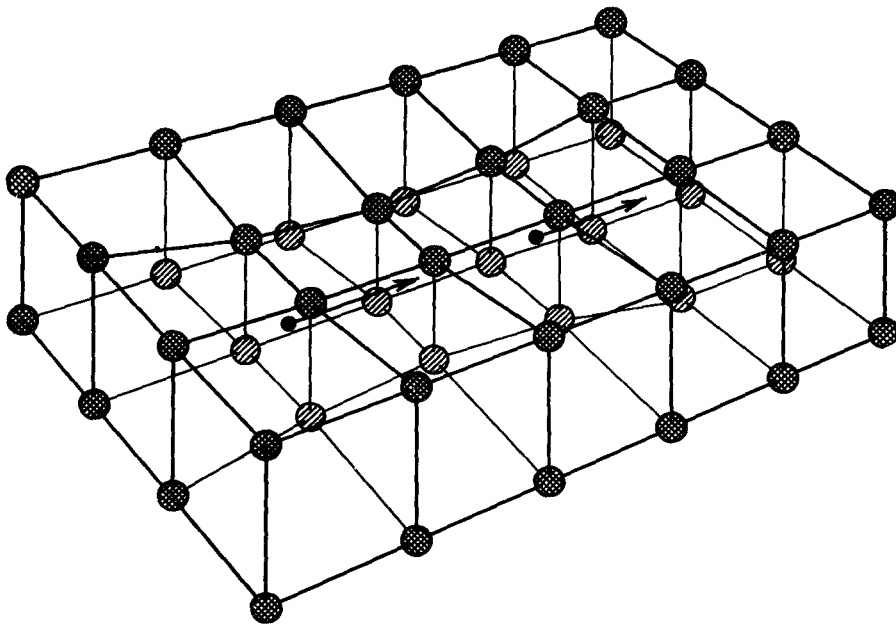


Рис. 5. Электронные пары в сверхпроводящем металле образуются благодаря механизму, воспроизведенному на этом рисунке.

Отрицательно заряженный электрон движется через ионную решетку, которую до известной степени можно считать упругой. Движущийся электрон притягивает к себе положительно заряженные ионы решетки, вызывая тем самым «сморщивание» решетки вблизи себя. Естественно, что второй электрон притягивается избытком положительного заряда, обусловленным более высокой плотностью ионов в «сморщенной» области кристаллической решетки; это притяжение и есть косвенное взаимодействие с первым электроном. Поскольку ионы движутся значительно медленнее электронов, сморщенная область тащится на значительном расстоянии за первым электроном и второй электрон может следовать за первым на некотором безопасном расстоянии.

совсем далеко. В конечном счете область, где решетка сморщена, движется на некотором удалении от первого электрона и второй электрон следует на некотором безопасном расстоянии от первого.

Между двумя рассмотренными электронами вполне достаточно места для движения многих других электронов. Какое влияние могут оказать эти электроны на нашу теоретическую модель? Если движение этих электронов абсолютно хаотично и совершенно не коррелируется с движением первого электрона, они будут оказывать заметное влияние на упорядоченный процесс, описанный выше. Эти электроны также будут «сморщивать» решетку вблизи себя и растягивать ее в других местах. И если решетка будет растянута там, где ей следовало бы быть сморщенной, и будет сморщена там, где ей следовало бы быть растянутой этими многочисленными нескоррелированными электронами, то от той сморщенной области, которая была создана первым электроном, почти ничего не останется и второму электрону уже не за чем будет следовать. Если можно так сказать, след будет быстро потерян, и пара будет разбита. С другой стороны, если движение всех остальных электронов коррелировано так, что каждый

электрон избегает столкновений и маневрирует нужным образом, то каждый электрон может в полной мере наслаждаться притяжением своего партнера и множество пар может сосуществовать одновременно.

И вот оказывается, что необходимым условием для того, чтобы все пары в этом смысле гармонизировали друг с другом, является условие равенства импульсов их центров масс. При очень низких температурах это в высшей степени координированное состояние электронов осуществляется спонтанно, потому что выигрыш в энергии для каждой пары превышает потери, связанные с тем, что свобода отдельных частиц утрачивается. Когда температура повышается, тепловое возбуждение в конце

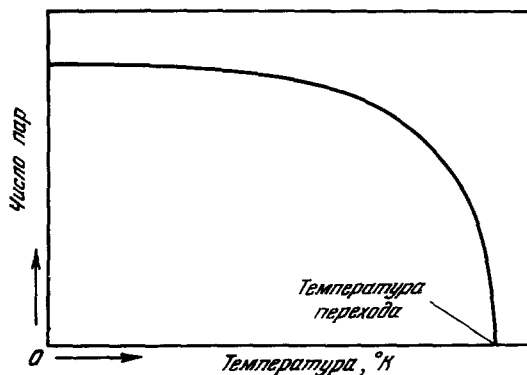


Рис. 6. Катастрофическое разрушение электронных пар в сверхпроводнике происходит при приближении к температуре сверхпроводящего перехода со стороны низких температур.

Хотя пары начинают разрушаться сравнительно медленно, несвязанные электроны, возникающие из разбитых пар, оказывают влияние на сохранившиеся пары, заставляют их разделяться и тем самым очень быстро ускоряют процесс разрушения пар. Выше температуры перехода электронные пары существовать не могут.

отличается высокой степенью внутренней упорядоченности. Оно существует только ниже такой температуры, при которой разрушение электронных пар становится катастрофическим. Температура, при которой это происходит, называется температурой сверхпроводящего перехода.

Предыдущие рассуждения легко позволяют указать критерии, выполнение которых необходимо для того, чтобы органическая молекула могла существовать в сверхпроводящем состоянии. Такая молекула в общем должна содержать те же самые существенные ингредиенты, которые присущи сверхпроводящему металлу. Необходима среда, в которой электроны могли бы двигаться, и нечто похожее на упругую заряженную структуру, которая играла бы роль ионной решетки.

Представим себе длинную молекулу, построенную из цепочки атомов углерода, которые образуют то, что я называю «позвоночником». С каждой стороны позвоночника наружу отходят боковые молекулярные цепи, подобно тому как расходятся ребра в грудной клетке человека. Как я уже говорил, такая структура подсказывается генетической молекулой ДНК; атомы углерода позвоночника замещаются сахаро-фосфатной последовательностью ДНК, а боковые цепи замещаются основаниями. Если углеродная цепь сопряженная, т. е. в ней чередуются одинарные и двойные связи вдоль цепи, она будет вести себя как металл: электроны могут двигаться свободно от одного конца позвоночника к другому. Для боковых

концов становится достаточным, чтобы разрушать пары. Образующиеся при этом некоррелированные, несвязанные электроны становятся той разрушительной силой, которая уничтожает электронные пары. Они портят механизм притяжения между электронами и тем самым ослабляют силы связи между сохранившимися парами. Это ведет в свою очередь к дальнейшему разрушению пар. А когда температура поднимается еще выше, разрушение пар приобретает катастрофический характер; выше некоторой определенной температуры уже ни одна пара существовать не может (рис. 6).

Совершенно ясно, что сверхпроводящее состояние



цепей кажутся вполне подходящими молекулы типа диэтилцианинидидиа, красителя, обычно используемого в сенсibilизированных фотографических эмульсиях. Эти молекулы легко поляризуются; электроны в них могут свободно перемещаться с одного места, расположенного вблизи одного края молекулы, на другое место вблизи другого края (рис. 7). Попадая в электрическое поле, заряды легко переходят с одного конца молекулы на другой, и молекула оказывается поляризованной.

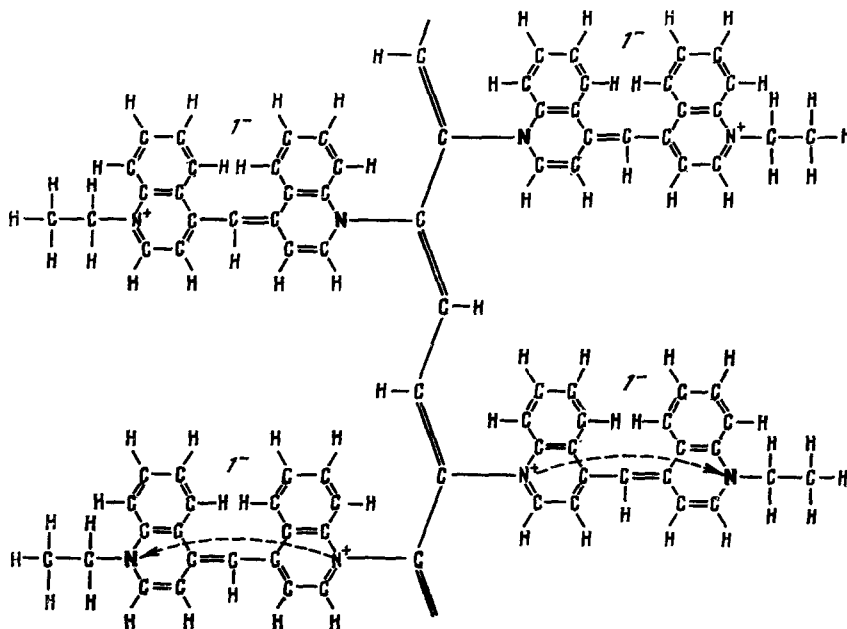


Рис. 7. Гипотетическая сверхпроводящая молекула строится вокруг «позвоночника», состоящего из атомов углерода, связанных чередующимися одинарной и двойной связями.

Вдоль позвоночника периодически расположены боковые цепочки, образованные обычным красителем диэтилцианинидидиа и направленные наружу позвоночника. Молекулы боковых цепочек легко поляризуются; это означает, что электрон может свободно перемещаться от атома азота, расположенного на одном краю молекулы, к другому атому азота, расположенному на другом конце молекулы. Жирные символы отмечают атомы азота, которые содержат в себе резонирующие электроны в двух возможных состояниях поляризации. Электроны могут свободно перемещаться также и вдоль самого позвоночника.

Рассмотрим электрон, движущийся вдоль позвоночника такой молекулы. Когда электрон проходит мимо каждой боковой цепочки, создаваемое им электрическое поле поляризует молекулы боковой цепочки и индуцирует положительный заряд на конце молекулы, ближайшем к позвоночнику. Благодаря большой скорости электрона в позвоночнике область максимального значения положительно индуцированного заряда в боковой цепочке несколько отстает от этого электрона. Второй электрон притягивается к области положительного заряда и поэтому косвенно притягивается первым электроном (рис. 8). Но именно это самое рассуждение мы использовали, описывая сверхпроводящий металл; естественно, что и в этом случае мы должны прийти к тому же явлению сверхпроводимости. Когда подробные вычисления по БКШ-теории были проведены для органической молекулы, то оказалось, что теоретическая температура перехода необычайно высока; типичная температура лежит около  $2000^\circ \text{K}$ . Эта цифра, конечно, намного выше тех цифр, к которым мы привыкли для сверхпроводников, и если ей верить, она должна иметь достаточно надежные физические основания. Но это так и есть на самом деле.

Вернемся к описанию механизма притяжения между свободными электронами в обычном сверхпроводнике. Когда электрон проходит около иона, он сообщает иону короткий резкий импульс и затем проходит

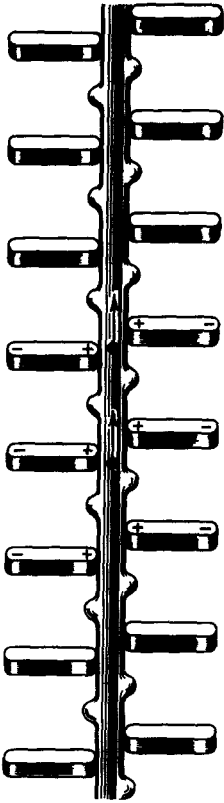


Рис. 8. Электронные пары проходят вдоль позвоночника гипотетической сверхпроводящей молекулы с помощью механизма притяжения, аналогичного механизму притяжения в сверхпроводящем металле. Когда электрон проходит мимо побочной цепочки, его электрическое поле поляризует молекулу побочной цепочки и индуцирует положительный заряд на том конце молекулы, который ближе к позвоночнику. Второй электрон притягивается к этой области положительного заряда и тем самым косвенно притягивается первым электроном.

умноженное на  $6^\circ \text{K}$ ; грубо говоря, это как раз  $2000^\circ \text{K}$ . Это число почти в точности совпадает с числом, полученным нами в более ранних, независимых вычислениях. Очевидно, высокая температура перехода

дальше. Этот импульс сообщает каждому иону некоторое количество кинетической энергии; ион начинает двигаться. Ион продолжает свое движение до тех пор, пока упругие силы со стороны соседей не остановят его. В этот момент кинетическая энергия иона полностью превращается в потенциальную энергию. Можно вполне элементарным способом показать, что максимальное смещение иона обратно пропорционально квадратному корню из его массы. Если ионы тяжелые, смещения незначительны; если ионы легкие, смещения велики. Но чем больше смещения, тем больше искажена решетка и, следовательно, тем больше величина избыточного положительного заряда в сморщенной области. Но поскольку второй электрон притягивается к этой области и в результате этого привязывается к первому электрону, следует ожидать, что сила связи также зависит от массы ионов, образующих решетку. По тем же самым соображениям температура перехода, которая определяется энергией связи, должна быть обратно пропорциональна корню квадратному из массы иона. Но дело обстоит именно так. Эксперименты, проведенные с образцами, содержащими различные изотопы данного сверхпроводящего элемента, указывают на то, что в большинстве случаев температура перехода зависит от массы изотопа в точности таким образом. Такая связь носит название изотопического эффекта, ее открытие в начале 1950 г. дало в наши руки один из ключей к пониманию природы сверхпроводимости.

Изотопический эффект играет также существенную роль при объяснении чудовищно высокой температуры перехода наших гипотетических сверхпроводящих молекул. В таких молекулах ионы металла мы заменили хорошо поляризуемыми молекулами боковых цепочек. Под влиянием электрического поля, создаваемого электроном в позвоночнике, побочные цепочки сами по себе не смещаются, но один электрон в н у т р и каждой боковой цепочки может перемещаться и его перемещение вызывает поляризацию. Вместо иона, как это было в случае металла, перемещающимся объектом является теперь электрон, масса его составляет только одну стотысячную долю массы типичного иона. Согласно основному закону изотопического эффекта, температура перехода должна быть по порядку величины на корень квадратный из 100 000 больше температуры перехода в типичном металлическом сверхпроводнике (это будет 316,

является следствием притяжения, посредником в котором является чрезвычайно легкая частица — электрон вместо иона.

Для того чтобы движение ионов и электронов было в известном смысле аналогичным, с теоретической точки зрения представляется необходимым, чтобы электрон двигался в позвоночнике типа цепочки. По-видимому, это и является причиной того, почему ни один металл не попадает в эту категорию сверхпроводников и почему до сих пор не обнаружен ни один сверхпроводник с высокой температурой перехода.

Если допустить возможность сверхпроводимости при комнатных температурах в молекулах рассмотренного вида, перед нами открывается совершенно новый мир науки и технологии. Размышления относительно использования таких сверхпроводников будут читаться скорее как научно-фантастический роман, чем серьезные научные предложения. Нет никакого сомнения в том, что химические проблемы (и быть может, в конце концов, технологические проблемы) синтеза и производства таких материалов невероятно сложны. Но давайте задумаемся над тем, что мы требуем; ведь мы хотим синтеза молекулы по точной, почти инженерной спецификации: такая задача никогда не вставала перед органической химией раньше. Тем не менее многие химики чувствуют, что такая задача может быть решена и что в течение разумного срока некоторые молекулы такого типа, несомненно, будут синтезированы. Можно надеяться, что когда такой день наступит, наше расширение БКШ-теории выдержит самое страшное испытание.

Предположим, что мы получили в свое распоряжение пластический материал, который является сверхпроводником при комнатной температуре. Как можно его использовать? Очевидные применения, о которых шла речь в начале статьи, приходят в голову немедленно, но еще более волнующие перспективы открываются в связи с диамагнетизмом сверхпроводника или его непроницаемостью для магнитного поля. Благодаря высоко координированному движению электронов магнитное поле не может проникнуть во внутренние области сверхпроводника. Это свойство можно продемонстрировать, помещая прямой магнит над слоем сверхпроводящего металла. Магнит свободно парит над слоем сверхпроводника, полностью поддерживаемый собственным магнитным полем. Магнитное поле не может проникнуть в сверхпроводник и, таким образом, создает подушку, на которой покоится магнит. Нетрудно представить себе парящий корабль будущего, использующий этот самый принцип для перевозки пассажиров и груза над «железной дорогой» из сверхпроводящего слоя; этот корабль движется как ковер-самолет, без трения, без износа и разрушения. Можно представить себе катанье на магнитных лыжах по сверхпроводящим горам, лыжные прыжки — многие фантастические вещи окажутся вполне реальными.

Можно ли ожидать что-либо интересное в этом направлении с биологической точки зрения? Если окажется возможным синтезировать искусственную сверхпроводящую молекулу, мне кажется, что мы не откроем ничего нового: в природе такая молекула существует уже давным-давно. Таким образом, можно ожидать, что мы получим молекулу такого типа, который играет в природе некоторую уникальную роль, но мы можем только гадать, в чем состоит эта роль. В высшей степени координированное движение электронов внутри нашей гипотетической молекулы связывает разные части молекулы между собой весьма интимным образом. В результате такой связи реакция одной части молекулы может оказывать определенное действие на способность к реакции других групп в любой части

целой молекулы, сколь бы отдаленными эти части ни были. Не может ли такое влияние на больших расстояниях быть ответственным за некоторые весьма запутанные свойства живых молекул? В нашей молекуле конкретное значение общего для всех пар импульса центра масс обладает очень интересным свойством: оно придает молекуле уникальную, явно предпочтительную трехмерную изогнутую структуру. Непосредственно связана с каждым возможным значением этого импульса уникальная, очень сложная форма всей молекулы в целом. Не связаны ли эти структурные формы с макроскопической организацией живых систем? Сейчас у нас нет уверенности в справедливости этой идеи, но ее следствия представляются весьма заманчивыми. Согласно нашей модели существует очень сильное специфическое притяжение между двумя молекулами, электронные пары которых обладают одинаковыми импульсами, но у молекул, пары которых имеют различные импульсы, такого притяжения нет. Не имеет ли это обстоятельство отношения к чрезвычайно острой селективности и специфичности определенных биохимических реакций? И здесь мы не знаем правильного ответа, но идея сама по себе очень привлекательна. И когда начинаешь размышлять над всеми открывающимися возможностями, вековая мечта человечества о вечном движении простого механического устройства становится поблекшей и бесцветной.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W. A. Little, Phys. Rev. 134 (6A), 1416 (1964).
  2. E. A. Lynton, Superconductivity, 1961 (см. перевод: Э. Линтон, Сверхпроводимость, М., Изд-во «Мир», 1964).
  3. F. London, Superfluids, John Wiley and Sons, N. Y., 1950.
  4. T. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. 108(5), 1175 (1957) (см. перевод: Теория сверхпроводимости, М., ИЛ, 1960).
-