

# ПРИРОДА

№ 4, 2001 г.

Куркин М.И.

## **Может ли изолятор быть сверхпроводником?**

© “Природа”

Использование и распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”  
(грант РФФИ 00-07-90172)

[vivovoco.nns.ru](http://vivovoco.nns.ru)  
[vivovoco.rsl.ru](http://vivovoco.rsl.ru)  
[www.ibmh.msk.su/vivovoco](http://www.ibmh.msk.su/vivovoco)

# Может ли изолятор быть сверхпроводником?

— Вы, профессор, воля ваша, что-то нескладное придумали. Оно, может, и умно, но больно непонятно. Над вами потешаться будут.

М.Булгаков. «Мастер и Маргарита».  
Из беседы Воланда с Иммануилом Кантом за завтраком.

М.И.Куркин

**Н**ачну с того, что вопрос, вынесенный в заголовок, требует уточнения. Его можно воспринимать в плане возможности существования двух состояний (диэлектрического и сверхпроводящего) одного вещества, но при разных условиях. Тогда в нем нет ничего смешного. Я собираюсь обсудить его в другом варианте: может ли вещество вести себя, как изолятор, находясь в сверхпроводящем состоянии? Чтобы юмор такой постановки вопроса был понятен не только специалистам по сверхпроводимости, необходимы некоторые пояснения.

## Свободные и связанные электроны в твердых телах

*Свобода есть осознанная необходимость.*

Ф.Энгельс

В физике термин «свободный» обычно употребляется как антипод слову «связанный», а «связанный» — как синоним слову «локализованный». Если объект связанный, он не может самостоятельно покинуть своего насиженного места. И наоборот, объект свободен, если он имеет право без посторонней помощи сорваться с места куда глаза глядят и не возвращаться. В этом смысле электрон в атоме,двигающийся по орбите вокруг ядра, следует считать связанным. Для его амнистии из атомной тюрьмы достаточно сблизить атомы до перекрытия их электронных оболочек, как это происходит во всех твердых телах. Тогда у электронов появится возможность путешествовать от одного атома к другому, а став коллективной собственностью, они оказываются свободными в соответствии с принятым выше определением.

Убедиться в существовании таких свободных электронов в том или ином веществе проще всего по их поведению в электрическом поле  $E$ . Свободные электроны должны перемещаться под действием  $E$ , т.е.

© М.И.Куркин



**Михаил Иванович Куркин**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией теоретической физики Института физики металлов Уральского отделения РАН (Екатеринбург). Занимается проблемами теории когерентных явлений в радиоспектроскопии. Опубликовал в соавторстве с Е.А.Туровым монографию «Ядерный магнитный резонанс в магнитоупорядоченных веществах и его применения». Неоднократно печатался в «Природе».

проводить электрический ток. Если свободных электронов нет, вещество — непроводник, или, как чаще говорят, изолятор. Таким образом, газ нейтральных атомов, где все электроны связанные, обязан быть изолятором, в чем мы убеждаемся каждый раз, выдергивая вилку из электророзетки.

Что касается твердых тел, то поскольку коммунистическое сообщество атомов раскрепощает электроны, напрашивается вывод:

все твердые тела — проводники.

Тогда как быть с твердыми изоляторами, на которых подвешены провода линий электропередач?

Оказалось, что все дело в квантовых свойствах электронов. В частности, согласно законам квантовой механики электрон с импульсом  $p$  должен обладать волновыми свойствами. Длина такой электронной волны  $\lambda$  связана с  $p$  соотношением де Бройля:

$$\lambda = h/p, \quad (1)$$

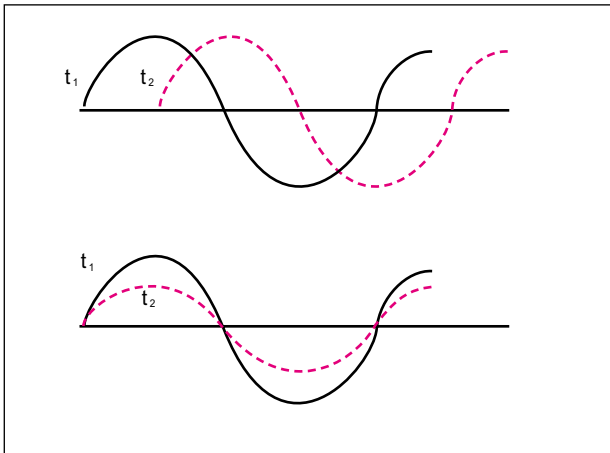
где  $h$  — постоянная Планка.

## Волновая делокализация как способ ограничения свободы

*Ох, и дурят нашего брата.*

Из репертуара Аркадия Райкина

Обычно волна представляется чем-то очень размазанным в пространстве, поэтому локализация электрона с ее помощью на первый взгляд напоминает попытку утопить жуку в реке. Однако, если у читателя хватит терпения, через пару абзацев он убедится, что у меня не было в мыслях водить его за нос, по край-



Мгновенные снимки струны при ее колебании в режиме бегущей (сверху) и стоячей волн в последовательные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  (соответственно сплошные и штриховые линии). Для бегущей волны процесс распространения сводится к смещению всей кривой как целого (отсюда и название «бегущая волна»). В том, что такая волна обладает импульсом, легко убедиться, наблюдая, как в шторм волны разбиваются о скалы. А вот две встречные бегущие волны не разбиваются друг о друга, а взаимно проникают. В результате получается стоячая волна, узлы которой остаются на месте (поэтому она и «стоячая»), а остальные точки совершают колебания с разной амплитудой.

ней мере здесь.

Для начала вспомним, что твердые тела, как правило, обладают кристаллической (т.е. пространственно периодической) атомной структурой, а законы распространения волн в кристаллах хорошо известны из опытов с рентгеновскими лучами. Падающая волна генерирует на каждом узле решетки рассеянную волну; рассеянные волны, налагаясь друг на друга, по законам интерференции могут усиливать друг друга, а могут и ослаблять (в зависимости от соотношения их фаз). Так вот, если длина волны падающего излучения  $\lambda >$

$2d$ , где  $d$  — период решетки в направлении распространения волны, рассеянные волны гасят друг друга. В результате падающей волне не приходится тратить свои ресурсы на их содержание и она свободно распространяется через кристалл. При

$$\lambda = 2d \quad (2)$$

рассеянные волны, наоборот, усиливают друг друга, формируя новую волну, которая распространяется в направлении, противоположном падающей. В свою очередь рассеянная волна генерирует рассеянную волну второго порядка в направлении падающей и т.д. И если рассеянную волну назвать падающей, то падающая по отношению к ней станет рассеянной. В этих условиях разобраться, как кого называть, не представляется возможным, поэтому был достигнут компромисс в виде понятия о волне нового типа, в которую бегущие в противоположном направлении волны входят на полностью равноправных условиях. Эту образующуюся в конце концов волну называют стоячей. Представить себе различие между бегущей волной и стоячей можно уже на примере колебаний струны. Достаточно сравнить мгновенные снимки струны в разные моменты времени.

К электрону в состоянии стоячей волны формула де Бройля (1) уже не применима. Поскольку такой электрон не может решить, в какую сторону ему двигаться, его импульс

$$p = p_s = 0, \quad (3)$$

несмотря на то, что  $\lambda_s \neq 0$ .

Равенство (3) можно пояснить следующим образом. Выберем какой-нибудь электрон в состоянии стоячей волны, который обретается где-то в средней полосе России. Как волна он не может быть точно локализован, поэтому имеет шанс побывать, например, в Ялте. Но как стоячая волна он обязан отбыть такой же срок на Соловках, чтобы его среднее положение не сместилось. В этом смысле наш электрон оказывается связанным. Во всяком случае участвовать в переносе заряда он не может.

Как же такое ограничение свободы скажется на электропроводности кристаллов в поле  $E$ ? Выберем электрон, который до включения поля  $E$  имел длину волны  $\lambda > 2d$ , поэтому находился в состоянии бегущей

волны. Под действием  $E$  он будет ускоряться, увеличивая свой импульс  $p$  и уменьшая длину волны в соответствии с (1). Когда  $\lambda$  достигнет значения  $2d$  (2), электрон перейдет в состояние стоячей волны и выпадет из процесса электропереноса.

Получаем, что импульс электрона в кристалле  $p$  ограничен некоторой величиной, которую обозначим символом  $p_B$ . Интервал разрешенных значений  $p$ :

$$|p| < p_B = h/d \quad (4)$$

назвали зоной Бриллюэна. А что происходит с энергией электрона?

При объединении атомов в кристалл изменяется энергетический спектр электрона, т.е. допустимые законами квантовой механики значения его энергии. В атоме связанным состояниям электрона соответствуют дискретные значения (уровни) энергии  $\epsilon_n$  ( $n$  — номер электронной оболочки). Кстати, их вычисление обеспечило триумф квантовой механике.

В кристалле к  $\epsilon_n$  необходимо добавить кинетическую энергию  $p^2/2m_n$ , где  $m_n$  — так называемая эффективная масса электрона, характеризующая его движение не вообще, а только от одного атома к другому. Она может значительно превышать массу электрона в вакууме  $m \sim 10^{-30}$  кг, поскольку зависит от степени перекрытия электронных оболочек соседних атомов.

Зависимость энергии электрона от  $p$  означает, что атомные уровни расширяются в полосы энергии. Максимальному значению  $p = p_B$  должна соответствовать максимальная допустимая энергия, а ширина каждой из полос  $\Delta_n$  в соответствии с (4) определяется выражением:

$$\Delta_n = p_B^2/2m_n \quad (5)$$

Полосатый энергетический спектр электронов в твердом теле занимает промежуточное положение между непрерывным спектром электронов в вакууме и спектром бесконечно узких уровней энергии электрона в атоме.

## Некоторые другие формулы электронной теории

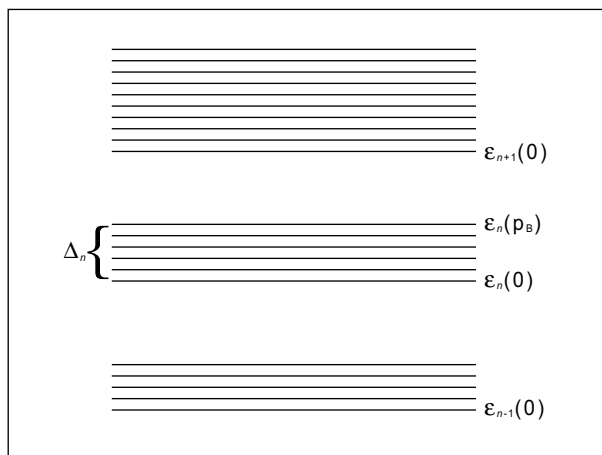
— Огласите весь список, пожалуйста.

Реплика из кинофильма Л.Гайдая «Напарник»

Ограничение (4) на величину импульса  $p$  означает, что для электрона в кристалле существует предельная скорость

$$v_n = p_B/m_n = 2\Delta_n/p_B, \quad (6)$$

превышение которой карается лишением свободы — ссылкой в состояние стоячей волны. Казалось бы,



Энергетический спектр электронов в кристалле. Полосы разрешенных значений энергий обозначены горизонтальной штриховкой; они отделены друг от друга запрещенными зонами.  $n$  — номер разрешенной полосы, ее дно  $\epsilon_n(0)$  соответствует значению  $p = 0$ , а потолок  $\epsilon_n(p_B)$  — значению импульса на границе зоны Бриллюэна  $p_B$ ;  $\Delta_n$  — ширина полосы.

действие таких двух требований, как ускорение электронов полем  $E$  и их арест при достижении предельной скорости, должно исключить существование твердых проводников. Значит,

*все кристаллы — изоляторы.*

Дабы снова не спешить с выводами, попробуем сперва учесть движение атомных ядер при электропереносе. На первый взгляд это представляется бессмысленным занятием, поскольку ядра в твердом теле совершают лишь колебательные движения и, следовательно, не могут участвовать в электропереносе. Но ведь и стенки водопроводных труб неподвижны, тем не менее их взаимодействие с водой (из-за трения) сильно сказывается на нашем водоснабжении.

Аналогично трение электронов о кристаллическую решетку позволяет им ускориться в поле  $E$  лишь до определенного значения  $v(E)$ . С ним связана величина

плотности электрического тока, который протекает в проводнике под действием поля  $E$ :

$$j(E) = e\rho v(E), \quad (7)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $\rho$  — число электронов в единице объема. Зависимость  $v$  от  $E$  должна быть такой,

чтобы выполнялся закон Ома. По этому закону с ростом  $E$  увеличивается  $j(E)$ , а следовательно и  $v(E)$ , од-

нако достигнуть предельных значений  $v_n$  (6) и макси-

мальной плотности тока

$$j_n = e \rho v_n \quad (8)$$

пока не удалось ни для одного из известных твердых проводников. Это связано с разогревом проводника, настолько сильным, что проводник испарится прежде, чем ток сравняется с  $j_n$  (8) и материал превратится в изолятор. Как и в первый раз, выходит, что

*все твердые тела — проводники.*

Круг замкнулся, и есть все основания считать его порочным, ибо твердые изоляторы все же существуют.

Итак, одних волновых свойств электрона оказалось недостаточно, чтобы разгадать тайну различия проводников и изоляторов.

## Принцип Паули и критерий проводимости

*Был мир глубокой тьмой окутан.*

*Да будет свет! И вот явился Ньютон.*

Из научного фольклора

Собственно Ньютон здесь упомянут исключительно для рифмы. На самом деле в данном случае благодарить следует Паули, открывшего принцип своего имени. Этот принцип запрещает двум электронам находиться в одном квантовом состоянии\* и допускает переход электрона от одного атома к другому при выполнении уже двух условий:

- упоминавшемся ранее перекрытии электронных оболочек соседних атомов;
- наличии пустых мест в оболочках, куда собирается податься электрон.

Если оболочки заполнены целиком, электрон перейти на другой атом не имеет права. При объединении атомов в кристалл орбитам, где наблюдается аншлаг, соответствует полностью заполненная зона Бриллюэна, т.е. электроны разбирают все значения из полосы разрешенных энергий. В таком твердом теле электроны могут увеличивать свою энергию только скачком, переходя в полосу с более высоким номером  $n$ , а не непрерывно, как при ускорении полем  $E$ . Значит, вещества с полностью заполненными полосами энергии удовлетворяют критерию изолятора.

Из атомных оболочек с вакантными местами образуются полосы и зоны, заполненные (при температуре  $T = 0$ ) до определенного уровня, называемого уровнем или энергией Ферми  $\varepsilon_F$  (с соответствующим ему им-

пульсом Ферми  $p_F$ ). В этом случае энергия электронов может изменяться непрерывно, т.е. такое вещество удовлетворяет критерию проводника. Целиком запол-

\* Для квантовых частиц, обладающих волновыми свойствами, такого запрета как будто бы не должно быть, так как волны могут накладываться друг на друга, обеспечивая тем самым интерференцию. Более того, есть сорт квантовых частиц, которые, наоборот, стремятся залезть в одно состояние, чувствуя себя в такой коммуналке более комфортно, чем при раздельном проживании. Но электроны принцип Паули неукоснительно соблюдают.

ненные полосы получили название валентных, частично — полос проводимости.

Ускоряя электроны полем  $E$ , можно попытаться загнать их под потолок полосы проводимости, чтобы все пустые состояния остались на дне. В этом состоянии проводник должен вести себя как изолятор, поскольку потолок полосы проводимости не даст электронам возможности ускоряться и дальше. После выключения  $E$  такое состояние будет неустойчиво, так как не удовлетворяет условию минимума энергии. Подобно лавине, которая несется с вершины горы вниз, электроны посыпятся на дно полосы, отдавая излишки своей энергии решетке. При этом пустые места начнут «всплывать» вверх, так что вещество вновь превратится в проводник.

К сожалению, создать такое инвертированное, как его называют, состояние в твердых проводниках пока не удалось. Дело в том, что по мере его формирования электроны из-за трения о решетку так сильно ее разогревают, что вещество испаряется прежде, чем электроны почувствуют потолок полосы проводимости\*.

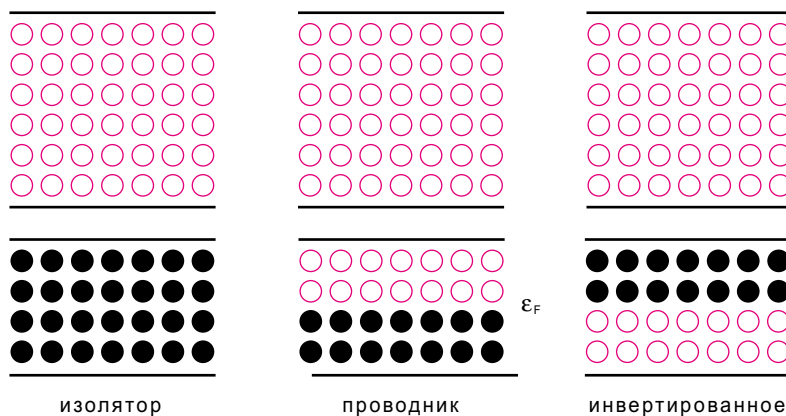
Получается, что создавая мир, Творец поделил все твердые тела на проводники и изоляторы (в рамках интересующего нас вопроса полупроводники те же изоляторы\*\*). Вариант, при котором проводник может превратиться в изолятор, а затем снова в проводник, в принципе не запрещен. Но Всевышний почему-то решил создать разные препятствия на пути его реализации, поставив его в положение запретного плода, который вроде и есть, но трогать его — грех. А вдруг такое превращение возможно для сверхпроводников?

Сверхпроводники — это проводники с нулевым электросопротивлением. Напомним, с чем связано появление обычного сопротивления. Во-первых, под действием электрического поля все электроны получают одинаковое ускорение, т.е. на их хаотическое тепловое блуждание накладывается упорядоченное движение. Во-вторых, столкновение каждого электрона с большим числом ядер стремится превратить такое упорядоченное движение снова в хаотическое, как это происходит с путником в густом лесу при отсутствии ориентиров. Когда рост упорядочения за счет  $E$  будет скомпенсирован разупорядочением из-за столкновений, установится фиксированное значение тока, которое и описывается известным законом Ома. Из этой картины ясно, что «занулить» сопротивление можно, связав электроны между собой в некое крупное образование, от которого отдельные ядра не в состоянии отщипывать по одному электрону. Если в мас-

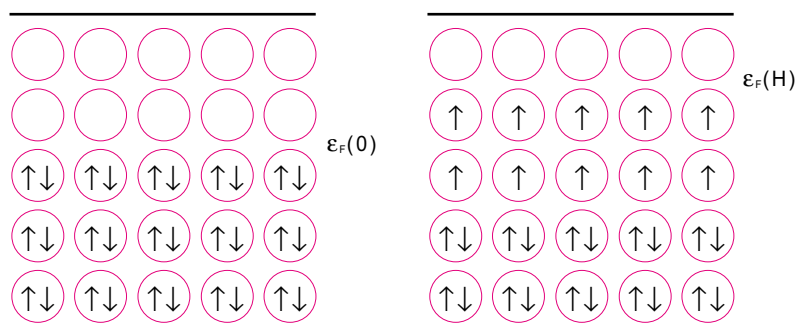
\* Чтобы не вызвать недоумения у читателей, не забывших принцип генерации света лазером, подчеркнем, что здесь речь идет об инвертированном состоянии именно целой зоны, а не группы примесных уровней, как в активном веществе лазера.

\*\* У полупроводников, как и у изоляторов, хватает электронов для заполнения зоны Бриллюэна целиком, но в отличие от первых очень узка запрещенная зона. Поэтому в полупроводниках при комнатных температурах тепловое движение забрасывает часть электронов в зону проводимости, и они получают возможность участвовать в создании электрического тока.

Разные варианты заполнения электронами энергетических полос в кристалле. Полупроводник при нулевой температуре изображается так же, как изолятор. Правая схема отвечает инвертированному распределению электронов в проводнике.  $\varepsilon_F$  – уровень Ферми.



Положение уровня Ферми  $\varepsilon_F$  в зоне проводимости в отсутствие магнитного поля ( $H = 0$ , слева) и при конечных  $H \neq 0$ . В первом случае все состояния заполняются парами электронов с противоположными магнитными моментами (стрелки). Во втором – часть импульсных состояний занята однократно, и уровень Ферми смещен вверх.



штабах этого образования все неоднородности атомной структуры вещества (включая тепловые) полностью усредняются, то оно (образование) будет передвигаться в веществе с сохранением импульса, как в однородной среде\*.

Реализовать эти соображения в формулах удалось Дж.Бардину, Л.Куперу и Дж.Шрифферу, поэтому их описание сверхпроводимости называют теорией БКШ.

С исчезновением трения у электронов появляется возможность, ускоряясь полем  $E$ , добраться до потолка полосы проводимости, а там, чем черт не шутит, превратиться в сверхпроводник в изолятор. Увы, Создатель предусмотрел этот вариант и исключил его с помощью все того же принципа Паули. Замысел сводился к следующему. Дабы образовать сверхпроводящий коллектив, следует каждую пару электронов с противоположно направленными импульсами  $p_F$  и  $-p_F$  как-то связать, чтобы они не очень разлетались в разные стороны после встречи. Возможность преодолеть эти сепаратистские тенденции есть, поскольку каждый электрон имеет магнитный момент  $\mathbf{M}$ , а значит, кинетическая энергия разлета, которую надо погасить, будет зависеть от магнитного поля.

Действительно, по законам квантовой механики у пары электронов векторы  $\mathbf{M}$  могут быть либо параллельны, либо антипараллельны. Принцип Паули разрешает им иметь импульс одинаковой величины  $p$  только при антипараллельной ориентации  $\mathbf{M}$ . Это позволяет электронам понизить свою кинетическую энергию, заселяя каждое состояние с импульсом  $p$  парами. Можно сказать, что между электронами, как и между людьми, действует некоторое взаимное притяжение.

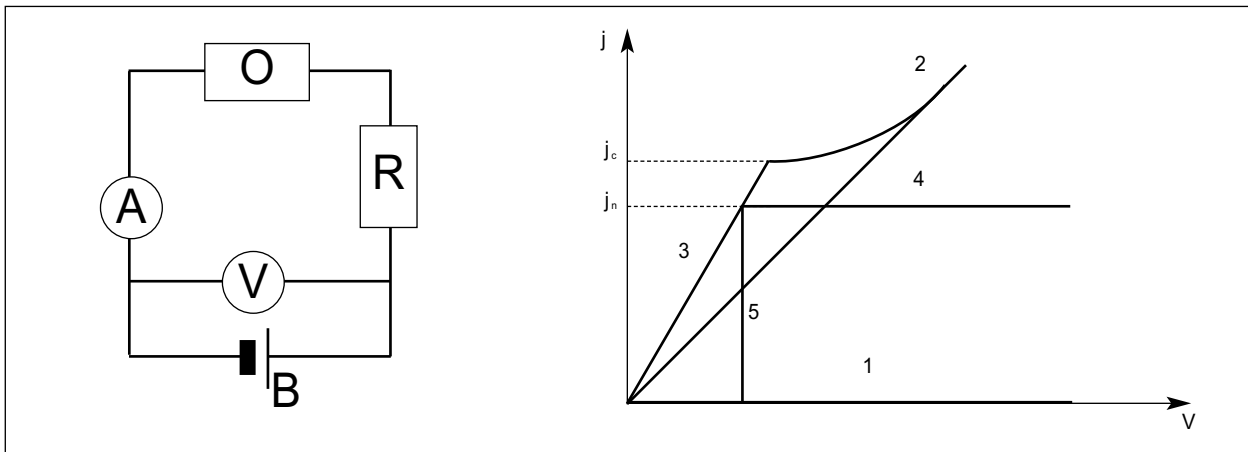
Магнитное же поле  $\mathbf{H}$  стремится ориентировать все векторы  $\mathbf{M}$  параллельно себе. Но стоит векторам  $\mathbf{M}$  стать параллельными, как электронам придется разойтись по камеркам с разными значениями  $p$ : чтобы не вступать в конфликт с принципом Паули, им необходимо чем-то отличаться друг от друга. В результате кому-то из партнеров придется лезть вверх, увеличивая  $p_F$  и  $\varepsilon_F$ . Это означает, что должно существовать

критическое поле  $H = H_c$ , при котором величина  $p_F$  достигнет таких значений, когда «притяжение» между электронами не сможет обеспечить стабильность сверхпроводящего сообщества.

Осталось вспомнить, что при ускорении электронов появляется электрический ток, а значит, и связанное с ним магнитное поле  $H$ . Следовательно, существует критическое значение тока  $j_c$ , при котором магнитное поле тока разрушает сверхпроводящее состояние. Для всех известных сверхпроводников

$$j_c \ll j_n, \quad (9)$$

\* Многие читатели «Природы» знают, что каждый закон сохранения отвечает какому-нибудь свойству симметрии среды. Так, закон сохранения энергии отражает однородность времени, закон сохранения момента импульса — изотропность пространства, ну а закон сохранения самого импульса — однородность пространства. Эти утверждения известны в физике под названием теоремы Нётер.



Простейший способ выявления «классовой принадлежности» образца.

Слева – электрическая схема для снятия вольт-амперной характеристики. В – источник тока, О – исследуемый образец, R – эталонное сопротивление, V – вольтметр, А – амперметр.

Справа – вольт-амперная характеристика изолятора (1), нормального проводника (2), обычного сверхпроводника (3), аномального сверхпроводника, не превращающегося в изолятор (4 – частичное грехопадение) и аномального сверхпроводника, переходящего в инвертированное состояние с полной потерей электропроводности (5 – полное грехопадение).

где  $j_n$  — предельное значение (8). В результате после разрушения сверхпроводимости вещество становится нормальным проводником, а не изолятором. Таким способом Творцу удалось сохранить упомянутый выше запретный плод в неприкосновенности.

## Аномальная сверхпроводимость

*Не будут люди чтить богов,  
Коль черта нет в учережденьи!*

Из оперы, написанной  
в Институте физики металлов  
Ю.М.Плишкиным, И.Ш.Трахтенбергом  
и Г.Г.Талуцем по поводу создания  
Уральского научного центра

А что, если сверхпроводники, для которых

$$j_c > j_n, \quad (10)$$

все-таки существуют? Сейчас мы увидим, что о реализации условия (10) без участия нечистой силы нечего даже и думать. По этой причине весь последующий текст рассчитан на читателя, который убежден, что Дьявол существует, даже если Бога нет.

Прежде всего встает вопрос, как экспериментально отличить аномальный сверхпроводник от вещества другого типа. Обычно для подобных целей используют вольт-амперную характеристику (ВАХ). Для ее регистрации собирается нехитрая схема, вроде той, что изображена слева на последнем рисунке, а затем строится зависимость показаний амперметра  $j$  от показаний вольтметра  $V$ . Если исследуемый

образец — изолятор, ток  $j = 0$  и линия  $j(V)$  совпадает с осью  $V$  (линия 1 на рисунке справа). Для нормального проводника  $j(V)$  будет представлена прямой линией 2, наклон которой, согласно закону Ома, определяется суммарным сопротивлением цепи — эталона  $R$  и образца  $r$  (возьмем его равным сопротивлению сверхпроводника в несверхпроводящем состоянии). ВАХ для обычного сверхпроводника при  $j < j_c$  изобразится линией 3. Ее наклон сначала будет больше, так как сопротивление образца  $r = 0$ . Затем, при  $j > j_c$ , произойдет переключение на линию 2 с промежуточным участком, вид которого зависит от характера превращения сверхпроводника в нормальный проводник.

Для аномального сверхпроводника зависимость  $j(V)$  совпадает с прямой линией 3 до значения  $j = j_n$  (8). На этой отметке ток  $j$  должен бы замереть, так как увеличивать свою скорость  $v$  электроны не могут (мешает потолок полосы проводимости), а отсутствие трения не позволит им передать свой импульс решетке (линия 4). По отсутствию реакции  $j$  на изменение  $V$  аномальные сверхпроводники похожи на изоляторы. Но только похожи, поскольку в изоляторах ток  $j = 0$ , а не  $j_n$ .

Такое частичное грехопадение, конечно, не может удовлетворить Искусителя, тем более что у него осталась лазейка для полного соображения. Вспомним, что бегущая волна де Бройля, описывающая движение электрона с импульсом  $p_0$  (4), превращается при условии (2) в стоячую волну, у которой электронный импульс  $p = 0$ . Закон сохранения импульса предписывает передать эту разницу импульсов партнеру по взаимодействию — кристаллической решетке. Существенно, что кинетическая энергия электронов в этом процессе

не меняется, следовательно не происходит и разогрева образца, как в случае электросопротивления. В результате такого обмена импульсами без передачи энергии полная скорость электронов относительно ядер станет равной нулю, а сами электроны окажутся в инвертированном состоянии. Как уже говорилось, в этом состоянии они по тем же причинам не могут и, значит, неотличимы от электронов в изоляторах. Ясно, что сверхпроводящий ток обратится в нуль (линия 5) и будет оставаться таковым при увеличении  $V$ .

Самое интересное в этой истории то, что аномальный сверхпроводник будет скрываться под маской изолятора\*, пока его не нагреют до температуры сверхпроводящего перехода  $T_c$ , выше которой он станет нормальным проводником. Но при охлаждении ниже  $T_c$  он снова превратится в сверхпроводящий изолятор и т.д.

Итак, тактика совращения найдена. Осталось разыскать объект, готовый к такому грехопадению.

## Кто он, аномальный сверхпроводник

*Где искать и как добыть  
То, чего не может быть?*

Л.Филатов.

«Про Федота — стрельца, молодого удалца»

Посмотрим теперь более внимательно на формулы (6) — (10). Из них следует, что скорость  $v_n$  (6) в аномальном сверхпроводнике должна быть гораздо меньше, чем в обычном. Поскольку межатомные расстояния  $d$  в различных твердых телах отличаются незначительно, то и импульсы  $p_n$  (4) также должны быть близки по величине. Поэтому малые значения  $j_n$  (8) в аномальном сверхпроводнике можно получить только за счет малой ширины зоны проводимости  $\Delta_n$  (5). Хотя

веществ с малыми  $\Delta_n$  достаточно много, все они, как правило, оказываются изоляторами. Для превращения их в проводники приходится вводить различные примеси. В качестве примера укажем на соединение  $YBa_2Cu_3O_6$  — базовое для высокотемпературных сверхпроводников (с температурой сверхпроводящего перехода  $T_c$  выше точки кипения жидкого азота). Хотя само это соединение — изолятор, его удается превратить в проводник, увеличив содержание кислорода с  $O_6$  до  $O_{6+x}$ , где  $x$  может изменяться в пределах от 0.4 до 1.

веществ с малыми  $\Delta_n$  достаточно много, все они, как

правило, оказываются изоляторами. Для превращения их в проводники приходится вводить различные примеси. В качестве примера укажем на соединение  $YBa_2Cu_3O_6$  — базовое для высокотемпературных сверхпроводников (с температурой сверхпроводящего перехода  $T_c$  выше точки кипения жидкого азота). Хотя само это соединение — изолятор, его удается превратить в проводник, увеличив содержание кислорода с  $O_6$  до  $O_{6+x}$ , где  $x$  может изменяться в пределах от 0.4 до 1.

\* Может, поэтому они до сих пор не обнаружены?

Из сказанного следует, что аномальные сверхпроводники нужно искать прежде всего среди изоляторов с примесями. Не исключено, что требуемый интервал концентраций примесей окажется слишком узким. Тогда из-за флуктуаций в распределении их по объему образца содержание вождельной фазы станет настолько низким, что она сможет существовать лишь в виде мелких включений, не контактирующих между собой. В этих условиях нечего даже и думать, чтобы осуществить описанный выше эксперимент. Останется только путь бесконтактного обнаружения сверхпроводящей фазы, да еще норовящей замаскироваться под изолятор. Тут ничего не поделаешь. Как заметил еще И.В.Гёте, иметь дело с нечистой силой всегда не просто. Для достижения успеха приходится закладывать душу.

## В заключение

*Разумеется, прозорливый читатель уже давно угадал, что я с самого начала к тому клонил, и только досадовал на меня, зачем я даром трачу бесполезные слова и драгоценное время.*

Ф.Достоевский.  
«Братья Карамазовы»

Думаю, что читатель вправе спросить меня, а само я верю в существование аномальных сверхпроводников. Конечно нет, дорогой читатель. Как можно верить в подобную чушь. Но мне на память пришел один случай, который произошел с Нильсом Бором. В его рабочем кабинете висела подкова, по поводу которой один посетитель задал ему ехидный вопрос: «Вы действительно верите в эту примету?» «Что Вы, — ответил Нильс Бор. — Как можно верить в подобную чушь». Тогда посетитель задал еще более ехидный вопрос: «Тогда зачем она здесь висит?» «Дело в том, — ответил великий физик, — что эта штука помогает независимо от того, веришь в нее или нет». ■