**В железосодержащих сверхпроводниках обнаружен изотопический эффект**

Открытые два года обратно железосодержащие сверхпроводники возродили интерес к одной из самых интригующих физических проблем современности — построению теории высокотемпературной сверхпроводимости. Главной загадкой на пути решения этой задачи остаются неизвестные и не понятые до сих пор процессы внутри вещества, которые ответственны за его сверхпроводящее состояние и которые позволяют ему иметь высокую критическую температуру (температуру перехода из нормального состояния в сверхпроводящее). Японские ученые в журнале Physical Review Letters опубликовали экспериментальную работу, результаты которой могут внести некоторую определенность в понимание этих внутренних механизмов сверхпроводимости с высокой критической температурой.

Кристаллическая решетка BaFe2As2. Изображение с сайта www.natureasia.com

Сверхпроводимость характеризуется отсутствием электрического сопротивления и идеальным диамагнетизмом (абсолютным непроникновением магнитного поля внутрь материала). Она возникает у веществ, которые имеют температуру ниже определенного, характерного только для них значения. Такая температура называется критической (Tc).

Хотя сверхпроводимость была открыта голландским ученым Хейке Камерлинг-Оннесом вдобавок в начале прошлого века (в 1911 году), объяснено это явление было лишь спустя примерно 50 лет (в 1957 году). Создателями теории сверхпроводимости принято считать Джона Бардина, Леона Купера и Джона Шриффера. Они установили, что вещество становится сверхпроводящим благодаря объединению электронов проводимости в пары (именуемые куперовскими) и их дальнейшей синхронизации. Иными словами, все электроны ведут себя как единое неделимое (ни один из электронов не стремится в этом состоянии показать свою «индивидуальность») и благодаря этому обтекают без какого-либо сопротивления кристаллическую решетку вещества.

Появление куперовских пар обусловлено сложным взаимодействием ионов кристаллической решетки и электронов. Электроны обмениваются безмассовыми «почти» частицами (квазичастицами) фононами — квантами колебательного движения ионов. «Почти» — потому что фононы не могут существовать в свободном состоянии, их жизнь ограничена кристаллической решеткой. В результате обмена квазичастицами промеж электронами появляется притяжение, что в свою очередь приводит к образованию куперовских пар. Описанный процесс формирования куперовских пар получил наименование электрон-фононного взаимодействия (механизма). Именно этот механизм и составляет основу теории сверхпроводимости, или теории БКШ, названной так по первым буквам фамилий ее авторов.

Надо сказать, что теория БКШ, как и любая другая физическая теория, не возникла спонтанным образом. Она стала итогом последовательных экспериментальных и теоретических исследований различных ученых. Среди этого многообразия особо стоит выделить публикации английского физика Герберта Фрёлиха, который в 1950 году первым указал на существенную роль влияния ионов на электроны в возникновении сверхпроводимости. Из своей идеи профессор смог вывести заключение о том, что критическая температура в семействе изотопов данного сверхпроводника должна быть назад пропорциональна квадратному корню массы иона М (молекулярной массы), то есть Tc ~ M–α (значок «~» обозначает пропорциональность), где α = 0,5. Проще говоря, чем больше молекулярная масса сверхпроводящего вещества, тем меньше его критическая температура. Такая зависимость получила наименование «изотопический эффект», или «изотоп-эффект». В том же году Эммануэль Максвелл обнаружил изотопический эффект в изотопах ртути, что явилось веским доказательством правильности гипотезы Фрёлиха. Позже изотоп-эффект был открыт и у других сверхпроводников (см. таблицу 1).

Таблица 1. Изотопический эффект в различных сверхпроводниках

СверхпроводникαМеханизм сверхпроводимостиHg (ртуть)0,5±0,03фононныйTl (таллий)0,5±0,1фононныйCd (кадмий)0,5±0,1фононныйMo (молибден)0,33±0,05фононный

La0,89Sr0,11CuO4

(замена 16О на 18О)

≈0,07?

YBa2Cu3O7

(замена 16О на 18О)

≈0,02?

\*Знак вопроса означает, что ученые не знают истинной причины формирования куперовских пар и, сообразно, возникновения сверхпроводимости.

Отметим, что в рассуждениях Фрёлиха речь шла о моноатомных сверхпроводниках, то есть материалах, образованных из одного химического элемента.

Когда в 1986-87 годах была обнаружена высокотемпературная сверхпроводимость в купратных (медьсодержащих) соединениях La0,89Sr0,11CuO4 (Tc = 40 К) и YBa2Cu3O7 (Tc = 92 К) и др., ученым стало ясно, что ставшая уже классической теория БКШ не в состоянии ее объяснить. БКШ-теория не допускает существования столь высокой критической температуры в веществах с такой силой электрон-фононного взаимодействия. На то, что не фононы заставляют объединяться электроны в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП), указывало и неимение у этих ВТСП изотоп-эффекта по кислороду — элементу, который наряду с медью присутствует во всех открытых впоследствии сверхпроводниках с высокой Tc. Замещение традиционного кислорода 16О другими его изотопами чрезвычайно слабо изменяло критическую температуру (см. таблицу 1).

С тех пор изотоп-эффект стал рассматриваться как необыкновенный тест на причастность фононов к появлению сверхпроводимости. Если α равно или близ к 0,5, то в данном материале куперовские пары (сверхпроводимость) возникают за счет электрон-фононного притяжения. В противном случае сверхпроводимость вызвана иным механизмом.

Чтобы выявить наличие или неимение изотоп-эффекта в сверхпроводнике, надобно определить показатель степени α в зависимости Tc ~ M–α. Рассчитать α из экспериментальных данных не сложно. Так как Tc ~ M–α, то герб равенства промеж критической температурой и массой иона возникнет, если переписать эту зависимость в таком виде: Tc = const·M–α (const — это постоянная величина, константа, которая от Tc и M не зависит). Продифференцировав Tc по M и вспомнив определение производной функции, получим формулу:

,

где ΔM и ΔT соответствуют разности масс ионов и разности критических температур, возникающей при замещении иона его изотопом. Из этой формулы, опираясь на экспериментальные данные, ученые и определяют α, то есть наличие или неимение изотопического эффекта.

Конечно, изотоп-эффект не дает прямого ответа на важнейший вопрос высокотемпературной сверхпроводимости: что заставляет электроны в ВТСП объединяться в пары? Однако он играет важную роль в распутывании этой загадки, в частности позволяет определить ступень причастности фононов к возникновению куперовских пар.

С открытием в 2008 году железосодержащих ВТСП поиски причин возникновения высокотемпературной сверхпроводимости возобновились с новой силой. И, конечно, в первую очередь ученых заинтересовала величина вклада электрон-фононного взаимодействия в сверхпроводимость «железных» сверхпроводников. Будет ли этот вклад отличен от нуля или он так же пренебрежительно мал, как и в купратных ВТСП? Один из возможных способов решения данной проблемы связан с обнаружением (или необнаружением) изотопического эффекта по железу — веществу, объединяющие «железные» сверхпроводники в один класс.

Впервые изотоп-эффект в железосодержащих ВТСП, а точнее, в поликристаллических соединениях SmFeAsO1–xFx (х = 0,15) с Tc = 40 К и Ba1–xKxFe2As2 (х = 0,4) с Tc = 37 К был открыт группой китайских ученых в 2009 году. Заменяя атомы природного (наиболее распространенного) железа 56Fe изотопом 54Fe, исследователи выяснили, что показатель степени α находится вблизи от 0,5 и предположительно равен 0,35. Из результатов эксперимента ученые заключили, что частично (частично — потому что α равно не 0,5, а чуть меньше – 0,35) куперовские пары формируются под действием электрон-фононного взаимодействия, но бесспорно, что количественно этот процесс классической теорией БКШ не описать.

История с изотопическим эффектом в железосодержащих сверхпроводниках получила свое продолжение в недавно опубликованной в журнале Physical Review Letters статье японских ученых Inverse Iron Isotope Effect on the Transition Temperature of the (Ba,K)Fe2As2 Superconductor (доступной также здесь). Они сосредоточили свое внимание на изотоп-эффекте по железу в поликристаллах Ba1–xKxFe2As2 — сверхпроводника, в котором тот же эффект по железу исследовали их китайские коллеги.

Чтобы достичь минимальной грехи в итоговых результатах, авторы статьи приготовили семь наборов из сверхпроводящего Ba1–xKxFe2As2 по два образца в каждом. Условия их производства были совершенно идентичными. разность заключалась лишь в химическом составе, а точнее, в использовании при изготовлении сверхпроводника наряду с обычным железом (56Fe, в таблице оно обозначено как nFe) двух его других стабильных изотопов: 54Fe и 57Fe. предположим, набор S2, как видно из таблицы, представляет собой два одинаково приготовленных поликристалла Ba1–xKxFe2As2, в состав которых входят изотопы железа-54 и 57 соответственно.

Таблица 2. Критическая температура, сдвиг критической температуры и показатель степени в изотопическом эффекте по железу в зависимости от изотопа Fe, входящего в состав сверхпроводящих поликристаллов Ba1–xKxFe2As2

Из полученных данных (см. таблицу 2) ученые рассчитали показатель степени α и обнаружили, что, во-первых, он отличается от нуля и в среднем равен –0,18. Во-вторых, и это самое необычное, он имеет отрицательный герб, то есть чем тяжелее ион железа, входящий в сверхпроводник, тем выше критическая температура. В подавляющем большинстве сверхпроводники, если и обладают изотоп-эффектом, то для них α — положительное число.

Возникающее противоречие с результатами предыдущей работы по изотоп-эффекту (см. выше) авторы статьи объясняют несовершенством изготовления поликристаллов Ba1–xKxFe2As2, делая упор на возможную неточность в допировании исследуемого вещества атомами калия.

Какие выводы делают из своей работы японские экспериментаторы? Ненулевое значение α указывает на то, что фононы нельзя скидывать со счетов в теории сверхпроводимости «железных» ВТСП. Однако отрицательная величина α говорит о том, что механизм электрон-фононного взаимодействия, возможно, более трудный, чем описываемый в теории БКШ. На основании того, что α в среднем равно –0,18, а не 0,5, авторы статьи делают следующее догадка. По их мнению, в железосодержащих ВТСП реализуется экзотический механизм объединения куперовских пар: смесь «более сложного» электрон-фононного и обменного взаимодействий. В одной из прошлых новостей «Элементы» уже писали вероятном обменном механизме формирования пар электронов. Поэтому лишь напомним, что обменное взаимодействие частиц представляет собой квантовый (связанный с принципом запрета Паули) аналог электростатического взаимодействия.

Таким образом, если теоретикам удастся объяснить такой аномальный изотоп-эффект в «железных» ВТСП в рамках высказанной авторами обсуждаемой статьи гипотезы о смешанном взаимодействии электронов, то не исключено, что природа высокотемпературной сверхпроводимости может проясниться не только для данного класса сверхпроводников.

Источник: Parasharam M. Shirage, Kunihiro Kihou, Kiichi Miyazawa, Chul-Ho Lee, Hijiri Kito, Hiroshi Eisaki, Takashi Yanagisawa, Yasumoto Tanaka, Akira Iyo. Inverse Iron Isotope Effect on the Transition Temperature of the (Ba,K)Fe2As2 Superconductor // Phys. Rev. Lett. 103, 257003 (2009).