

Ученые впервые увидели синглет Чжана — Райса: открытие приближает к разгадке высокотемпературной сверхпроводимости



Дата публикации: 13.08.2026

Сверхпроводимость кажется почти нарушением привычных правил электричества: при определенных условиях материал начинает проводить ток без электрического сопротивления. У обычных сверхпроводников этот эффект хорошо описывается существующими теориями, однако купраты, способные переходить в сверхпроводящее состояние при значительно более высоких температурах, уже несколько десятилетий остаются одной из главных загадок физики конденсированного состояния. Теперь ученым удалось непосредственно увидеть квантовую структуру, существование которой теоретики предсказывали почти 40 лет.

Исследователи из Университета Цинхуа и Китайской академии наук впервые визуализировали в реальном пространстве локализованный синглет Чжана — Райса. Результаты опубликованы в Nature Physics. Это квантовое состояние играет центральную роль в одной из основных моделей поведения легированных купратов, однако до сих пор экспериментаторам не удавалось непосредственно

показать, как оно выглядит на атомном уровне.

Чтобы понять значение открытия, необходимо представить исходное состояние купратного материала. Его ключевым элементом являются атомные плоскости CuO_2 , состоящие из меди и кислорода. Без дополнительного легирования электроны в таких системах сильно взаимодействуют друг с другом, и материал может вести себя как антиферромагнитный изолятор Мотта. Это необычная ситуация: простая зонная теория могла бы предполагать проводимость, но сильное электронное взаимодействие фактически блокирует движение зарядов.

Ситуация начинает меняться, когда в систему вводят так называемые дырки. В физике твердого тела дырка — не настоящая пустота или частица в привычном смысле, а отсутствие электрона, которое в коллективном поведении материала проявляет себя как положительный носитель заряда. При постепенном увеличении концентрации таких дырок электронная структура купрата перестраивается, а при определенных условиях материал приобретает сверхпроводящие свойства.

Еще в 1988 году физики Фучун Чжан и Томас Райс предложили объяснение того, что происходит с отдельной дыркой в плоскости CuO_2 . Согласно их модели, она взаимодействует с окружающими электронными состояниями меди и кислорода и формирует особое коллективное состояние с нулевым суммарным спином — синглет Чжана — Райса. Эта концепция стала одним из фундаментальных элементов теоретического описания купратов, но непосредственно рассмотреть такую структуру в реальном пространстве долгое время не удавалось.

Для эксперимента ученые выбрали $\text{Ca}_2\text{CuO}_2\text{Cl}_2$, сокращенно ССОС. Этот купрат обладает относительно простой кристаллической структурой и исключительно чистой поверхностью, что делает его удобным объектом для атомно-разрешающих исследований. Часть атомов кальция исследователи заменяли натрием, постепенно увеличивая количество дырок в плоскостях CuO_2 .

Вместо сравнения только двух крайних состояний — исходного изолятора и уже сформировавшегося сверхпроводника — команда подготовила серию образцов с различной концентрацией носителей заряда. Она охватывала путь от крайне слабого легирования до области, где начинает появляться сверхпроводимость. На каждом этапе ученые проводили высокоразрешающее картирование электронных состояний, фактически наблюдая за постепенным преобразованием материала.

Именно такой подход позволил впервые увидеть пространственное

распределение электронного состояния, связанного с одной введенной дыркой. Экспериментальная картина соответствовала ожидаемому синглету Чжана — Райса. Для физики купратов это важный результат: объект, десятилетиями существовавший прежде всего внутри теоретических моделей и косвенных экспериментальных данных, получил непосредственное изображение на атомном масштабе.

Однако наиболее интересная часть эксперимента началась при дальнейшем увеличении концентрации дырок. Отдельные синглеты не просто становились многочисленнее и равномерно заполняли материал. Они начинали взаимодействовать и объединяться, формируя более крупные организованные электронные структуры.

Исследователи называли их электронными молекулами. Это не молекулы в обычном химическом смысле, состоящие из связанных атомов, а коллективные образования электронных состояний. Их характерный размер составлял примерно четыре постоянные кристаллической решетки, а внутри наблюдались полосообразные молекулярные орбитали. По мере дальнейшего легирования такие области увеличивались, соединялись между собой и постепенно формировали более связанную электронную систему.

Именно здесь исследование приобретает особое значение для проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Физики давно умеют достаточно хорошо описывать исходный антиферромагнитный изолятор и могут экспериментально исследовать уже возникшее сверхпроводящее состояние. Но промежуточная стадия — превращение отдельных легированных дырок в коллективную систему, способную поддерживать сверхпроводящее спаривание, — оставалась значительно менее понятной.

Новые наблюдения позволяют буквально проследить этот переход. Сначала возникает отдельный локализованный синглет Чжана — Райса, затем появляются взаимодействующие электронные образования, после чего при достаточной концентрации носителей система приближается к сверхпроводящему состоянию. Исследователи получили своеобразную последовательность кадров, показывающую перестройку электронной материи по мере легирования.

Это еще не означает, что механизм высокотемпературной сверхпроводимости окончательно раскрыт. Остается главный вопрос: в какой именно момент и благодаря какому взаимодействию носители заряда начинают образовывать пары, способные двигаться через материал без сопротивления. Но пространство для поиска существенно сужается, поскольку теперь можно непосредственно исследовать электронные структуры, возникающие непосредственно перед

появлением сверхпроводимости.

Следующая задача команды заключается в определении конфигураций, при которых впервые открывается сверхпроводящая щель. Ученые хотят выяснить, какие расположения и взаимодействия легированных дырок наиболее благоприятны для возникновения спаривания. Если удастся связать определенную геометрию электронных молекул с началом сверхпроводящего состояния, это может стать важным шагом к построению более полной микроскопической теории купратов.

Концепция электронных молекул потенциально способна помочь и в объяснении других загадочных свойств этих материалов. За десятилетия исследований транспортные измерения, сканирующая спектроскопия и фотоэмиссионные эксперименты обнаружили в купратах множество необычных эффектов. До сих пор их нередко приходится рассматривать как отдельные явления. Новая модель предполагает возможность связать часть этих наблюдений с одной общей картиной пространственной организации легированных электронных состояний.

Практическое значение подобных фундаментальных исследований может проявиться значительно позже. Высокотемпературные сверхпроводники интересны для энергетики, мощных магнитных систем, медицинского оборудования, ускорителей частиц и квантовых технологий. Главным ограничением остается необходимость охлаждения. Понимание того, какие именно микроскопические процессы создают сверхпроводимость в купратах, в перспективе может дать более рациональный путь к поиску материалов с еще более высокой критической температурой.

Первая прямая визуализация синглета Чжана — Райса поэтому важна не только как подтверждение давней теоретической идеи. Она показывает промежуточный уровень организации вещества, который раньше оставался практически невидимым: путь от одной легированной дырки к коллективному электронному состоянию. Возможно, именно в этой области между отдельным квантовым объектом и сформировавшимся сверхпроводником скрывается ответ на одну из самых устойчивых загадок современной физики.

Ссылка: «Визуализация синглета Чжана-Райса, электронных молекул и образования куперовских пар в купратном сверхпроводнике» DOI: [10.1038/s41567-026-03375-4](https://doi.org/10.1038/s41567-026-03375-4).