

Физики приблизились к разгадке сверхпроводимости: обнаружено скрытое состояние электронов перед исчезновением электрического сопротивления



Дата публикации: 05.07.2026

Сверхпроводимость уже более ста лет остается одним из самых загадочных явлений современной физики. При переходе в сверхпроводящее состояние электрический ток начинает течь без какого-либо сопротивления, а значит, энергия практически не теряется при передаче. Именно поэтому сверхпроводники рассматриваются как одна из ключевых технологий будущего — они могут стать основой квантовых компьютеров, сверхчувствительных датчиков, мощных медицинских томографов, новых типов магнитного транспорта и практически без потерь передающих электроэнергию линий.

Несмотря на десятилетия исследований, физики до сих пор не имеют полного ответа на один из главных вопросов: что именно происходит с электронами непосредственно перед тем, как материал становится сверхпроводником? Международная группа исследователей из Корейского передового института науки и технологий (KAIST) сделала важный шаг к решению этой проблемы,

обнаружив ранее скрытое электронное состояние, которое возникает еще до появления сверхпроводимости.

Результаты исследования опубликованы в журнале Nature Physics и уже привлекли внимание специалистов по физике конденсированного состояния, поскольку позволяют по-новому взглянуть на механизмы формирования необычных квантовых материалов.

Главным объектом исследования стал материал CsV_3Sb_5 — представитель сравнительно нового семейства так называемых металлов кагоме. Эти материалы получили свое название благодаря характерной геометрии атомной решетки, напоминающей традиционный японский узор плетения корзин «кагоме». На первый взгляд подобная структура кажется лишь красивой геометрической особенностью, однако именно она заставляет электроны взаимодействовать совершенно необычным образом.

В обычных металлах электроны ведут себя относительно независимо друг от друга. В металлах кагоме ситуация принципиально иная: движение частиц становится коллективным, что приводит к возникновению редких квантовых состояний. Именно поэтому такие материалы считаются одной из наиболее перспективных платформ для поиска новых типов сверхпроводимости и других необычных квантовых эффектов.

Особый интерес ученых вызывает тот факт, что CsV_3Sb_5 способен одновременно демонстрировать сразу несколько сложных электронных состояний. Помимо сверхпроводимости, в нем наблюдаются волны плотности заряда, топологические электронные состояния и признаки нарушения фундаментальных симметрий, лежащих в основе современной физики.

Долгое время исследователи спорили о том, существует ли между обычным металлическим состоянием и сверхпроводимостью еще одна скрытая стадия организации электронов. Отдельные эксперименты намекали на ее существование, однако убедительных доказательств до сих пор не удавалось получить.

Для решения этой задачи команда KAIST использовала один из самых чувствительных современных методов исследования электронной структуры вещества — угловую фотоэмиссионную спектроскопию с использованием кругового дихроизма. Во время эксперимента поверхность кристалла попеременно освещали светом с левой и правой круговой поляризацией, а затем анализировали направление и энергию электронов, покидающих материал. Такой подход позволяет буквально «увидеть», как организовано движение электронов внутри кристаллической решетки.

Исследователи уделили особое внимание исключению возможных экспериментальных артефактов. Геометрия установки сама по себе способна создавать ложные сигналы, поэтому ученые разработали специальную процедуру обработки данных, позволяющую отделить реальные свойства материала от эффектов измерительной аппаратуры.

Результат оказался неожиданным. Оказалось, что нарушение симметрии обращения времени возникает при температуре около 140–145 Кельвинов, тогда как хорошо известная волна плотности заряда появляется лишь примерно при 94 Кельвинах. Это означает, что существует еще один этап самоорганизации электронов, предшествующий всем ранее известным изменениям.

Нарушение симметрии обращения времени считается одним из наиболее необычных явлений квантовой физики. В идеальном случае многие процессы выглядят одинаково независимо от того, течет ли время вперед или мысленно обращается вспять. Однако если такая симметрия нарушается, это означает, что внутри материала возникают направленные коллективные движения электронов, которые уже невозможно описать привычными моделями поведения металлов.

По мнению авторов исследования, именно такое состояние наблюдается в CsV_3Sb_5 . Электроны начинают двигаться по микроскопическим замкнутым траекториям, образуя так называемый порядок петлевых токов. Иными словами, внутри атомной решетки возникают крошечные замкнутые циркуляции электронного тока, которые невозможно увидеть напрямую обычными методами наблюдения.

Концепция петлевых токов существует в теоретической физике уже много лет. Многие специалисты предполагали, что подобные структуры могут играть важную роль в механизме возникновения сверхпроводимости, особенно в материалах нового поколения. Однако экспериментально подтвердить их существование оказалось чрезвычайно сложно.

Новая работа стала одним из наиболее убедительных доказательств того, что подобный скрытый электронный порядок действительно существует и возникает раньше остальных известных фазовых переходов.

Проследив изменение электронной структуры по мере охлаждения материала, исследователи восстановили последовательность событий. При высоких температурах материал ведет себя как обычный металл. Затем появляется порядок петлевых токов. После этого формируется волна плотности заряда — состояние, при котором электроны начинают распределяться внутри кристалла с определенной периодичностью. И только затем возникает

сверхпроводимость, когда электрическое сопротивление полностью исчезает.

Таким образом, ученые предложили новую последовательность формирования квантовых состояний: обычный металл → порядок петлевых токов → волна плотности заряда → сверхпроводимость.

Эта схема имеет большое значение для фундаментальной физики. До настоящего времени оставалось неясным, какие именно электронные структуры помогают возникновению сверхпроводимости, а какие, наоборот, конкурируют с ней. Теперь становится понятно, что некоторые скрытые формы коллективного поведения электронов могут не препятствовать сверхпроводимости, а подготавливать условия для ее появления.

Полученные результаты могут оказаться важными далеко за пределами одного конкретного материала. Многие современные теории предполагают существование похожих скрытых электронных состояний в высокотемпературных сверхпроводниках на основе купратов — веществах, способных становиться сверхпроводящими при значительно более высоких температурах. Одной из самых известных загадок этих материалов остается так называемое состояние псевдощели — необычный режим, который возникает непосредственно перед сверхпроводимостью и десятилетиями не поддается полному объяснению.

Если механизмы, обнаруженные в металлах кагоме, окажутся универсальными, физики смогут значительно продвинуться в понимании природы высокотемпературной сверхпроводимости. Именно эта область считается одной из главных целей современной физики конденсированного состояния, поскольку создание материалов, работающих без сопротивления при комнатной температуре, способно радикально изменить мировую энергетику и вычислительную технику.

Авторы исследования отмечают, что ключевым достижением стала возможность впервые непосредственно проследить скрытое коллективное движение электронов, которое раньше удавалось обнаружить лишь по косвенным признакам. Совпадение экспериментальных данных с теоретическими расчетами орбитального движения электронов существенно усиливает уверенность в правильности предложенной модели.

Хотя до полного понимания природы сверхпроводимости еще далеко, новая работа демонстрирует, что самые важные процессы происходят задолго до исчезновения электрического сопротивления. Раскрывая последовательность скрытых электронных состояний, физики постепенно приближаются к разгадке одного из самых сложных явлений квантового мира. Именно такие

фундаментальные открытия могут стать основой для создания принципиально новых сверхпроводящих материалов, которые в будущем изменят энергетику, транспорт, медицину и квантовые технологии.