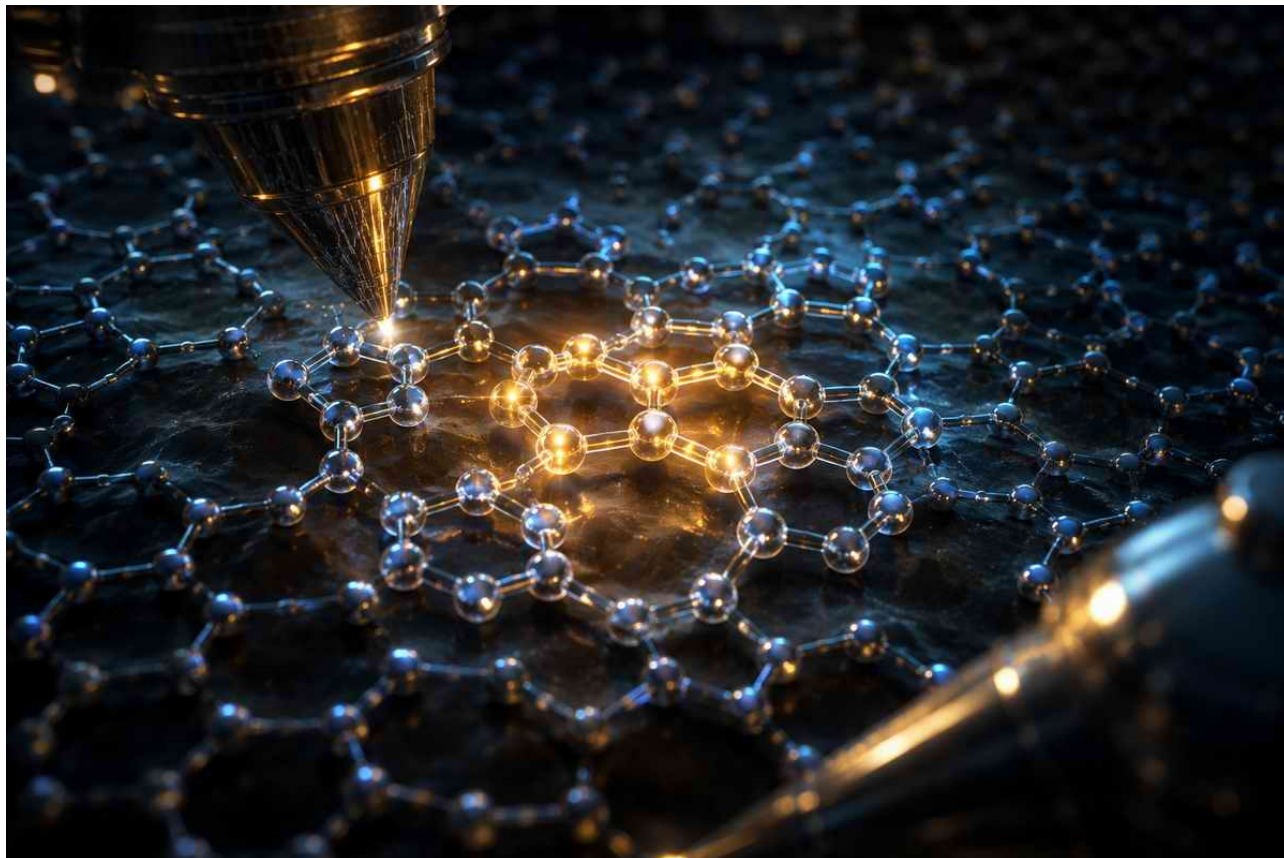


Квантовые состояния по принципу кота Шрёдингера обнаружены в кластерах из шести молекул



Дата публикации: 17.07.2026

Современная электроника стремительно приближается к фундаментальным ограничениям классической физики. По мере уменьшения размеров транзисторов и электронных компонентов инженерам все чаще приходится учитывать явления квантовой механики, которые на макроскопическом уровне практически незаметны. Именно поэтому поиск новых способов управления отдельными электронами становится одной из важнейших задач современной физики, материаловедения и нанотехнологий. Новое исследование ученых Базельского университета демонстрирует, что даже небольшие группы молекул способны проявлять сложное коллективное квантовое поведение, которое ранее наблюдалось лишь в теоретических моделях.

Работа, опубликованная в журнале Nature Communications, посвящена изучению взаимодействия неспаренных электронов внутри специально сформированных молекулярных кластеров. Полученные результаты не только расширяют фундаментальные знания о квантовой природе вещества, но и

открывают новые перспективы для создания электронных устройств следующего поколения, работающих уже на уровне отдельных молекул.

Большинство привычных электронных устройств функционирует благодаря движению огромного количества электронов одновременно. Однако при переходе к нанометровым размерам начинают проявляться законы квантовой механики, согласно которым частицы могут находиться сразу в нескольких состояниях одновременно. Такое явление называется квантовой суперпозицией и лежит в основе работы перспективных квантовых компьютеров.

До настоящего времени физики достаточно хорошо понимали поведение парных электронов внутри отдельных молекул. Гораздо менее изученными оставались радикалы — молекулы, содержащие один неспаренный электрон на внешней электронной оболочке. Именно такие электроны обладают высокой химической активностью и способны формировать необычные коллективные квантовые состояния.

Исследовательская группа под руководством профессора Эрнста Мейера использовала специально синтезированные молекулы тетрабромтетраазапирена, сокращенно ТВТАР. При помощи сканирующего туннельного микроскопа ученые с атомной точностью размещали молекулы на поверхности, формируя кластеры из трех и шести элементов. После этого к системе прикладывались различные электрические напряжения, а прибор регистрировал распределение зарядов и прохождение электрического тока в каждой точке структуры.

Сканирующий туннельный микроскоп позволяет не только наблюдать отдельные атомы и молекулы, но и управлять ими. С помощью тончайшей металлической иглы исследователи буквально собирали молекулярные конструкции по одной молекуле, создавая идеальные условия для изучения квантовых взаимодействий.

Эксперименты показали, что неспаренные электроны в соседних молекулах ведут себя вовсе не как независимые частицы. Вместо этого они начинают взаимодействовать между собой, образуя единую коллективную систему. На изображениях, полученных с помощью микроскопа, распределение электрического заряда формировало сложные кольцеобразные структуры, напоминающие цветочные узоры.

Наиболее интересным оказалось поведение зарядов внутри небольших кластеров. Согласно классической физике каждый электрон должен занимать строго определенную молекулу. Однако квантовая механика допускает совершенно иной сценарий.

В кластерах из трех молекул исследователи обнаружили, что электроны

одновременно существуют сразу в нескольких возможных конфигурациях. Вместо фиксированного расположения заряд распределяется между различными молекулами одновременно. Иными словами, система находится не в одном конкретном состоянии, а сразу в нескольких возможных вариантах.

Именно это явление физики называют квантовой суперпозицией. Оно хорошо известно благодаря знаменитому мысленному эксперименту с котом Шрёдингера, который символически может находиться одновременно в двух взаимоисключающих состояниях до момента наблюдения. В данном случае аналогичная ситуация возникает уже не в абстрактной модели, а непосредственно в распределении электрических зарядов внутри молекулярной структуры.

Еще более необычные результаты были получены при исследовании кластеров, состоящих из шести молекул. Здесь электроны организовывались совершенно иначе. Центральные молекулы сохраняли нейтральное состояние, тогда как внешние элементы кластера принимали на себя электрический заряд. При этом сами заряды не закреплялись за конкретными молекулами, а существовали одновременно сразу в нескольких местах системы.

Такое коллективное распределение энергии свидетельствует о формировании сложных многоэлектронных состояний, которые невозможно описать как простую сумму поведения отдельных частиц. Именно подобные коллективные эффекты сегодня рассматриваются как одна из основ будущей молекулярной электроники.

Во время экспериментов исследователи обнаружили еще одно необычное квантовое явление — отрицательную дифференциальную проводимость. В привычных электрических цепях увеличение напряжения практически всегда сопровождается ростом силы тока. Однако на молекулярном уровне ситуация может развиваться совершенно иначе.

При определенных значениях напряжения ученые наблюдали обратную картину: несмотря на увеличение приложенного электрического поля, сила тока уменьшалась. Подобное поведение практически невозможно встретить в повседневной макроскопической технике, однако в наномасштабе оно становится естественным следствием квантовых взаимодействий между электронами.

Подобные эффекты представляют большой практический интерес. Отрицательная дифференциальная проводимость уже рассматривается как потенциальная основа для создания сверхминиатюрных генераторов, быстродействующих переключателей, логических элементов нового поколения и

компонентов квантовых вычислительных систем.

Не менее важной частью исследования стало создание математической модели, способной количественно описывать наблюдаемое поведение электронов. Объединив экспериментальные данные с современными квантово-механическими расчетами, ученые получили инструмент, позволяющий прогнозировать свойства аналогичных молекулярных кластеров еще до проведения экспериментов.

Такие модели имеют огромное значение для дальнейшего развития нанoeлектроники. Они позволяют заранее рассчитывать характеристики будущих молекулярных устройств, оптимизировать их структуру и управлять коллективными электронными состояниями с высокой точностью.

Сегодня специалисты все чаще рассматривают отдельные молекулы как полноценные строительные элементы будущих электронных схем. Вместо кремниевых транзисторов размером в несколько нанометров могут использоваться специально синтезированные молекулярные структуры, в которых информация будет храниться и передаваться благодаря квантовым состояниям отдельных электронов.

Полученные результаты демонстрируют, что управление коллективным поведением неспаренных электронов уже выходит за рамки теоретических моделей. Ученые не только смогли наблюдать сложные многоэлектронные состояния непосредственно в эксперименте, но и научились объяснять их количественно. Это открывает путь к разработке принципиально новых электронных компонентов, сочетающих молекулярные технологии, нанofизику и квантовую механику. В перспективе подобные исследования могут стать одной из основ создания сверхкомпактных вычислительных систем, высокочувствительных сенсоров и полноценных квантовых процессоров нового поколения.

Ссылка: «Неравновесная коррелированная динамика электронов в треугольных молекулярных ансамблях» DOI: [10.1038/s41467-026-75051-3](https://doi.org/10.1038/s41467-026-75051-3).