

Физики впервые увидели квантовый «танец» света и кристалла внутри нанокристаллов перовскита



Дата публикации: 10.06.2026

Международная группа физиков совершила важный шаг в изучении квантового мира, впервые напрямую наблюдая необычное явление, которое исследователи образно называют квантовым танцем. Речь идет о синхронном взаимодействии экситонов и фононов внутри нанокристаллов перовскита — перспективного класса полупроводниковых материалов, который в последние годы привлекает все больше внимания благодаря своим уникальным оптическим и электронным свойствам.

Результаты исследования открывают новые возможности для развития квантовых технологий и позволяют лучше понять фундаментальные процессы, происходящие в веществах на атомном уровне. Работа демонстрирует, что некоторые явления, ранее считавшиеся источником помех для квантовых систем, могут, наоборот, стать полезным инструментом для создания будущих устройств.

Чтобы понять значение открытия, необходимо разобраться в природе объектов, участвующих в этом процессе. Когда частица света — фотон — попадает в полупроводник, она может передать свою энергию электрону. Электрон переходит в более высокое энергетическое состояние, оставляя после себя так называемую дырку — область с положительным зарядом. Электрон и дырка начинают взаимодействовать и образуют связанную пару, известную как экситон.

Экситон нельзя представить как обычную частицу в привычном понимании. Это особое квантовое состояние вещества, которое может перемещаться через кристалл, перенося энергию без переноса электрического заряда. Именно экситоны играют важную роль в работе солнечных батарей, светодиодов и многих современных оптоэлектронных устройств.

Вторым участником квантового взаимодействия является фонон. Несмотря на необычное название, фонон представляет собой квант колебаний атомов внутри кристаллической решетки. Если представить кристалл как сложную трехмерную сеть связанных между собой атомов, то фононы можно рассматривать как элементарные порции этих коллективных колебаний.

В большинстве твердых тел взаимодействие между экситонами и фононами приводит к быстрой потере квантовой когерентности. Проще говоря, колебания атомов начинают действовать как шум, разрушающий тонкие квантовые состояния. Именно поэтому создание устойчивых квантовых систем остается одной из главных задач современной физики.

Однако исследование нанокристаллов перовскита продемонстрировало неожиданное исключение из этого правила. Перовскиты представляют собой особую группу материалов с кристаллической структурой, которая обладает уникальными свойствами. В последние годы они активно изучаются как перспективная основа для солнечных элементов нового поколения, лазеров, фотодетекторов и квантовых устройств.

Особенность нанокристаллов заключается в их чрезвычайно малом размере. Их диаметр составляет всего несколько нанометров, что примерно в тысячи раз меньше толщины человеческого волоса. В таких масштабах квантовые эффекты становятся особенно заметными, а взаимодействие между различными квантовыми объектами существенно усиливается.

При возбуждении коротким лазерным импульсом экситон не только появляется внутри нанокристалла, но и вызывает локальное искажение окружающей кристаллической решетки. Это приводит к возникновению фононов. В результате оба объекта оказываются связанными друг с другом и

начинают эволюционировать как единая квантовая система, образуя состояние, известное как экситон-полярон.

Для наблюдения этого процесса исследователи использовали сверхкороткие лазерные импульсы длительностью около ста фемтосекунд. Для сравнения, одна фемтосекунда составляет одну квадриллионную долю секунды. Такие временные масштабы настолько малы, что позволяют отслеживать движение электронов и развитие квантовых состояний практически в реальном времени.

Эксперимент проводился при температуре около двух кельвинов, что соответствует примерно минус 271 градусу Цельсия. В этих условиях тепловые колебания атомов минимальны, благодаря чему квантовая когерентность сохраняется значительно дольше.

Ученым удалось зафиксировать отчетливые квантовые биения — своеобразные ритмические колебания, возникающие при интерференции нескольких квантовых состояний. Эти биения стали прямым свидетельством того, что экситоны и фононы действительно развиваются синхронно и обмениваются энергией как единая система.

Особенно впечатляющим оказался тот факт, что когерентное состояние сохранялось примерно десять пикосекунд. Хотя это время кажется ничтожно малым, в мире квантовой физики оно считается весьма значительным и позволяет наблюдать множество циклов взаимодействия между экситонами и колебаниями кристалла.

Дополнительным достижением стало обнаружение возможности управлять этим эффектом. Исследователи показали, что изменение размеров нанокристаллов позволяет регулировать силу взаимодействия между экситонами и фононами. В более компактных структурах связь оказывается сильнее, тогда как в более крупных кристаллах квантовые колебания сохраняются дольше.

Подобная управляемость делает перовскитные нанокристаллы чрезвычайно привлекательными для создания будущих квантовых технологий. Возможность контролировать когерентную динамику открывает перспективы для разработки квантовых вычислительных систем, сверхэффективных источников света, квантовых сенсоров и устройств передачи информации нового поколения.

Особый интерес представляет возможность генерации одиночных фононов — отдельных квантов колебаний кристаллической решетки. Такие состояния рассматриваются как потенциальные носители информации в будущих квантовых схемах и могут стать важным элементом новых архитектур квантовых компьютеров.

Результаты исследования также меняют представления о роли кристаллических колебаний в квантовой физике. Если раньше фононы в основном считались источником декогеренции и помех, то теперь становится очевидно, что они способны выступать полноценным квантовым ресурсом. Это открывает новое направление исследований, в котором колебания вещества будут использоваться не для разрушения квантовых состояний, а для их сохранения, передачи и контроля.

Таким образом, наблюдение синхронного квантового взаимодействия экситонов и фононов не только углубляет понимание фундаментальной физики твердого тела, но и приближает появление практических квантовых технологий, которые могут существенно изменить электронику, связь и вычислительную технику будущего.

Ссылка: «Квантовые биения экситон-поляронов в нанокристаллах перовскита CsPbI₃» DOI: [10.1038/s41467-026-73506-1](https://doi.org/10.1038/s41467-026-73506-1).