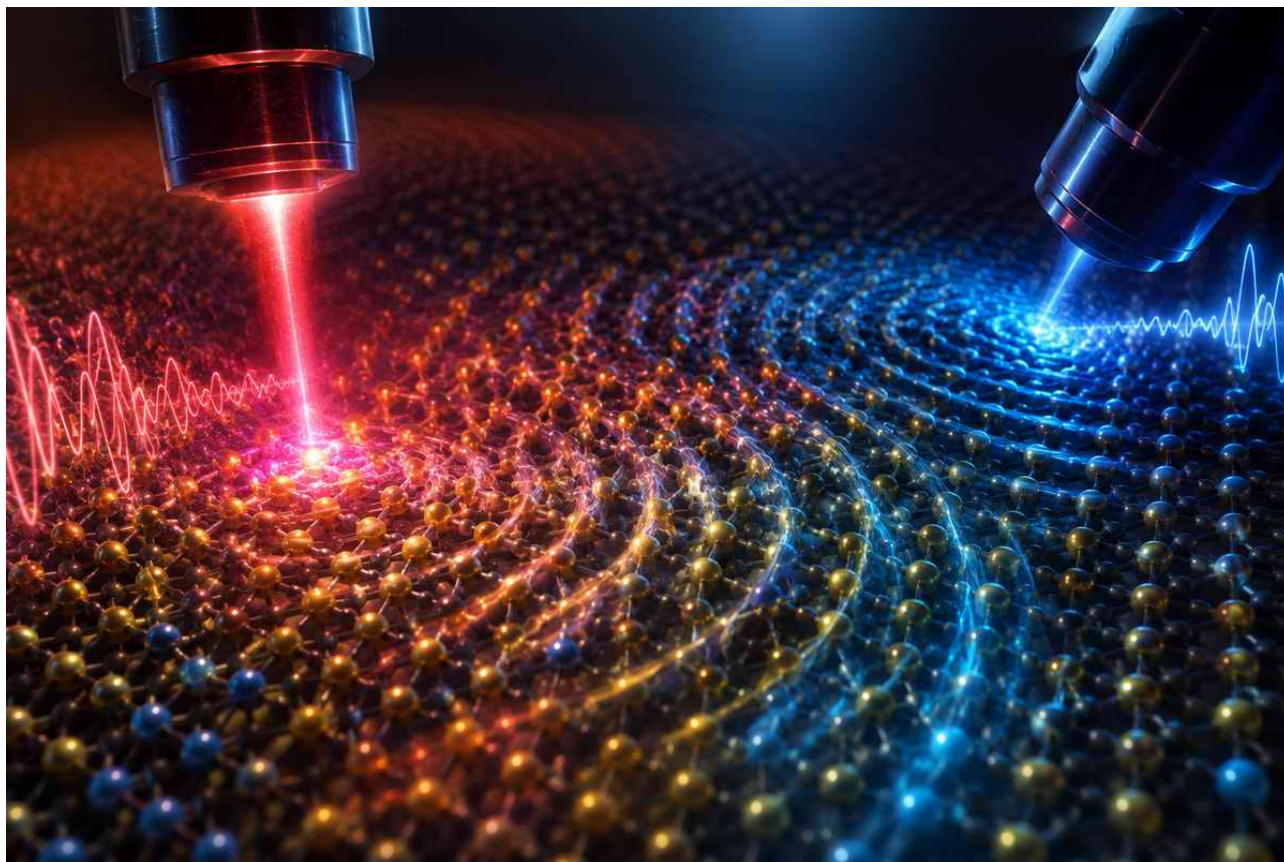


Ученые впервые сняли «видео» скрытых квантовых волн в скрученном WSe₂



Дата публикации: 18.05.2026

Исследователи из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре впервые смогли напрямую наблюдать скрытые зарядово-нейтральные квантовые моды в скрученном диселениде вольфрама WSe₂ — одном из наиболее перспективных двумерных квантовых материалов современности. Работа открывает новые возможности для изучения экзотических квантовых состояний вещества, которые могут стать основой будущих квантовых компьютеров, сверхпроводников и энергоэффективной электроники.

За последние годы квантовые материалы стали одной из главных тем современной физики. Их свойства определяются не классическими законами, а сложными квантово-механическими эффектами, которые возникают при коллективном взаимодействии электронов. В таких системах электроны перестают вести себя как независимые частицы и начинают действовать согласованно, образуя так называемые коррелированные квантовые фазы.

Именно эти фазы ответственны за многие необычные явления, включая

сверхпроводимость, квантовый магнетизм, экзотические токи без сопротивления и коллективные возбуждения. Однако исследование подобных состояний долгое время оставалось крайне сложной задачей, поскольку многие квантовые возбуждения не несут электрического заряда и практически невидимы для традиционных методов измерения.

В новом исследовании ученые использовали скрученный двухслойный диселенид вольфрама WSe_2 — материал, состоящий из двух ультратонких слоев, повернутых друг относительно друга под небольшим углом. Такое «скручивание» формирует муаровую структуру — сложный интерференционный узор, радикально изменяющий электронные свойства материала. Именно муаровые материалы сегодня считаются одной из самых перспективных платформ для поиска новых квантовых фаз вещества.

Особое внимание исследователей привлекло междолинное когерентное состояние, или IVC-состояние. В квантовой физике «долинами» называют различные энергетические состояния электронов внутри кристалла. При определенных условиях электроны в разных долинах начинают квантово-механически связываться между собой, создавая коллективное состояние с необычными свойствами.

Теоретики давно предполагали, что такие состояния должны сопровождаться существованием особых коллективных мод — волн квантового поведения, распространяющихся через материал. Однако прямое наблюдение этих мод оставалось практически невозможным.

Для решения этой задачи исследователи разработали сверхбыструю оптическую систему визуализации с пространственно-временным разрешением. Метод основан на технологии «накачка-зондирование», при которой короткий лазерный импульс возбуждает систему, а второй импульс через заданный промежуток времени фиксирует распространение возникших возбуждений.

Фактически ученым удалось создать своего рода «квантовую видеосъемку», позволяющую наблюдать динамику скрытых процессов внутри материала почти в реальном времени. Последовательность тысяч снимков позволила восстановить полную картину движения коллективных квантовых мод внутри WSe_2 .

В ходе эксперимента исследователи обнаружили две различные коллективные моды, распространяющиеся с разными скоростями. Одна из них двигалась чрезвычайно быстро — порядка нескольких километров в секунду — и демонстрировала почти баллистическое распространение, напоминающее движение волн без потерь энергии. Вторая мода распространялась значительно медленнее и имела диффузионный характер.

Наиболее удивительным оказалось то, что обе моды были электрически нейтральными, но переносили противоположные спин-долинные поляризации. Это означает, что внутри материала возникали скрытые квантовые потоки, которые невозможно зарегистрировать стандартными электрическими методами.

Собранные данные хорошо согласуются с существованием двух давно предсказанных коллективных возбуждений — фазовой моды Голдстоуна и амплитудной моды Хиггса в спин-долинной сверхтекучей системе. Аналогичные явления ранее обсуждались преимущественно в контексте сверхпроводимости и физики элементарных частиц.

По сути, ученые впервые получили прямые экспериментальные признаки того, что внутри скрученного WSe_2 могут формироваться сложные квантовые жидкости с коллективным поведением электронов. Подобные состояния способны переносить информацию и энергию практически без потерь, что особенно важно для разработки новых поколений квантовых устройств.

Исследование также демонстрирует, насколько сильно изменилось понимание двумерных материалов после появления муаровой инженерии. Простое изменение угла между двумя атомарными слоями может кардинально перестраивать свойства вещества и создавать совершенно новые квантовые фазы, которых не существует в обычных кристаллах.

По мнению ученых, новый метод визуализации открывает путь к исследованию многих других экзотических состояний вещества, которые ранее оставались скрытыми. В частности, речь идет о квантовых спиновых жидкостях, экситонных изоляторах, фракционных состояниях Черна и других формах коллективного квантового поведения.

Особый интерес представляет возможная связь обнаруженных мод со сверхпроводимостью. На фазовой диаграмме скрученного WSe_2 состояние IVC располагается рядом с областями, где ранее уже наблюдались признаки сверхпроводящих фаз. Это позволяет предположить, что нейтральные коллективные возбуждения могут играть важную роль в механизме возникновения сверхпроводимости в муаровых материалах.

В перспективе такие исследования способны привести к созданию принципиально новых квантовых технологий. Среди потенциальных направлений — сверхбыстрая электроника, устройства спинтроники, энергоэффективные вычислительные системы, квантовые сенсоры и элементы будущих квантовых компьютеров.

Современная физика все активнее движется в сторону изучения не

отдельных частиц, а коллективных состояний материи, где огромное количество электронов начинает действовать как единая квантовая система. Именно такие эффекты могут стать фундаментом технологической революции следующего десятилетия.

Ссылка: «Наблюдение распространяющихся коллективных спин-долинных мод в скрученном WSe₂ » DOI: [10.1038/s41567-026-03280-w](https://doi.org/10.1038/s41567-026-03280-w).