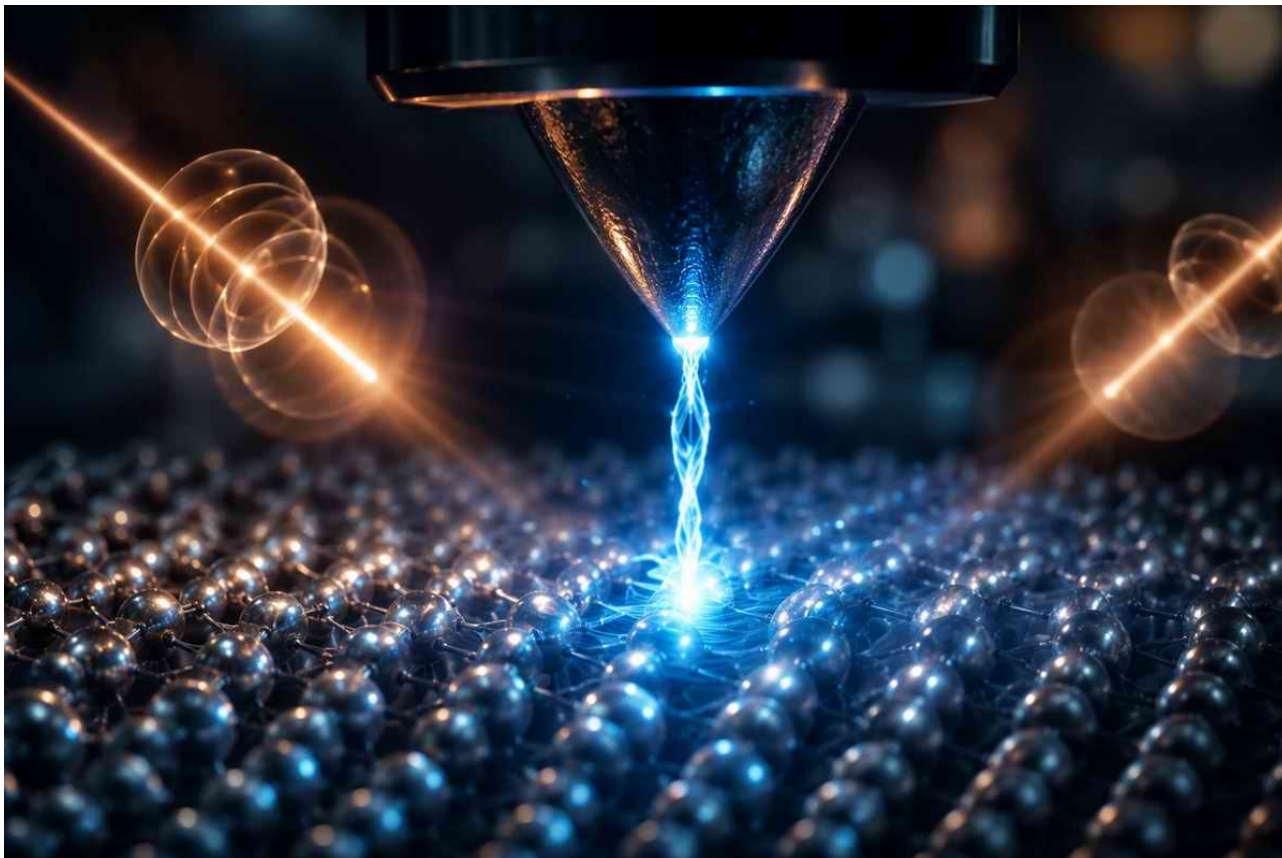


Ученые впервые приблизились к фундаментальному пространственно-временному пределу квантовой механики



Дата публикации: 04.07.2026

Сверхбыстрая сканирующая туннельная микроскопия сделала еще один шаг к пределам, которые долгое время считались практически недостижимыми. Международная исследовательская группа впервые смогла экспериментально приблизиться к фундаментальному пространственно-временному ограничению квантовой механики, одновременно исследуя положение электрона и его эволюцию во времени с беспрецедентной точностью. Работа открывает новые возможности для изучения квантовых процессов, разработки электроники нового поколения и создания технологий, работающих на скоростях, ранее считавшихся недостижимыми.

На протяжении десятилетий одним из важнейших принципов квантовой физики оставался принцип неопределенности Вернера Гейзенберга. Согласно ему, невозможно одновременно с произвольной точностью определить некоторые пары физических характеристик частицы, например ее координату и импульс. Однако считалось, что между пространством и временем подобного

фундаментального ограничения не существует. Новое исследование показывает, что при изучении сверхбыстрых квантовых процессов возникает иной, ранее практически недоступный пространственно-временной предел, который начинает проявляться на уровне электронных волновых пакетов.

Полученный результат стал возможен благодаря развитию сверхбыстрой сканирующей туннельной микроскопии. Эта технология объединяет атомное пространственное разрешение классического туннельного микроскопа с ультракороткими лазерными импульсами, позволяющими наблюдать процессы, происходящие за невероятно малые промежутки времени. Вместо получения статичных изображений ученые фактически создают сверхзамедленные «видеозаписи» движения электронов.

Особую роль в исследовании сыграла новая лазерная система, разработанная специально для работы в аттосекундном диапазоне. Аттосекунда представляет собой одну миллиардную миллиардной доли секунды — настолько короткий интервал времени, что секунда относится к возрасту Вселенной примерно так же, как аттосекунда относится к одной секунде. Именно в таких масштабах происходят основные процессы перераспределения электронов в атомах, молекулах и твердых телах.

Во время эксперимента ученые направляли последовательность сверхкоротких лазерных импульсов на атомарно острый металлический наконечник. Под действием света электроны переходили на поверхность серебра, расположенную всего в нескольких атомных диаметрах. Изменяя задержку между двумя лазерными импульсами, исследователи смогли проследить динамику туннелирования электронов практически в реальном времени.

Особенность наблюдаемого процесса заключается в его чисто квантовой природе. В классической физике электрон не обладает достаточной энергией, чтобы преодолеть энергетический барьер между двумя объектами. Однако согласно законам квантовой механики он способен пройти сквозь этот барьер благодаря эффекту квантового туннелирования. Именно этот эффект лежит в основе работы сканирующих туннельных микроскопов и многих современных квантовых технологий.

Новые измерения позволили увидеть не только сам процесс туннелирования, но и тончайшие особенности поведения электронных волновых пакетов. Теоретические расчеты показали, что электрон реагирует на воздействие светового поля не мгновенно, а с задержкой порядка 500 аттосекунд. Хотя такой интервал кажется ничтожным, именно он позволяет глубже понять фундаментальные механизмы взаимодействия света и вещества.

Для проверки результатов были выполнены сложные квантово-механические расчеты, полностью воспроизводящие наблюдаемую динамику. Совпадение экспериментальных данных с компьютерным моделированием подтверждает правильность новой интерпретации процессов, происходящих на границе возможного пространственного и временного разрешения.

Одним из наиболее интересных выводов исследования стало обнаружение взаимосвязи между точностью локализации электрона и его энергетическим состоянием. Чем точнее исследователи пытаются определить положение электрона во времени, тем большую энергию необходимо сообщить системе. В результате электронный волновой пакет начинает сильнее распространяться в пространстве. Эта закономерность впервые была экспериментально измерена непосредственно для отдельного атома.

Несмотря на столь сильное возбуждение, электронные волновые пакеты сохраняют достаточно высокую пространственную локализацию. Благодаря этому становится возможным проведение микроскопии с атомным разрешением одновременно в пространстве и в аттосекундном масштабе времени. Подобная комбинация ранее считалась практически недостижимой.

Полученные результаты имеют большое значение не только для фундаментальной физики. Управление сверхкороткими электронными импульсами позволяет создавать локальные плотности электрического тока, достигающие колоссальных величин — порядка одного триллиона ампер на квадратный сантиметр. Такие экстремальные режимы могут использоваться для контролируемого воздействия на отдельные химические связи и управления химическими реакциями практически на уровне отдельных электронов.

В перспективе новая технология позволит наблюдать, как формируются и разрушаются химические связи в реальном времени, исследовать перенос заряда в молекулах, создавать сверхбыстрые элементы квантовой электроники и разрабатывать вычислительные устройства нового поколения. Если современные CMOS-процессоры работают на гигагерцевых частотах, то управление электронами непосредственно в аттосекундном диапазоне потенциально позволит увеличить скорость обработки информации на несколько порядков.

Работа также открывает новые горизонты для квантовых технологий, фотоники, материаловедения и физики конденсированного состояния. Возможность одновременно исследовать пространственное положение электронов и их временную динамику приближает ученых к пониманию фундаментальных процессов, определяющих свойства вещества на самом глубоком уровне.

Авторы исследования считают, что сегодняшние достижения являются лишь первым этапом. По мере совершенствования лазерных систем, квантового моделирования и методов сверхбыстрой микроскопии станет возможным изучение еще более сложных процессов, происходящих внутри молекул, наноматериалов и будущих квантовых устройств. Именно такие исследования могут стать основой для появления принципиально новой электроники, где скорость работы будет определяться уже не характеристиками микросхем, а фундаментальной скоростью движения электронов.

Ссылка: «Отслеживание электронов в пространственно-временном пределе»
DOI: [10.1038/s41566-026-01932-0](https://doi.org/10.1038/s41566-026-01932-0).