

Как физики научились почти идеально управлять молекулами и зачем это нужно квантовым технологиям



Дата публикации: 29.12.2025

Долгое время квантовая физика уверенно опиралась на атомы и ионы, которые удалось научиться охлаждать, удерживать и управлять с высокой точностью. На этой базе появились атомные часы рекордной точности, квантовые симуляторы и элементы квантовых вычислений. Однако молекулы оставались сложной и во многом неукротимой территорией. В отличие от атомов, они не только перемещаются, но и вращаются, а также вибрируют, из-за чего обладают множеством квантовых состояний и резко повышенной чувствительностью к окружающей среде. Именно эта сложность долгое время делала молекулы неудобным объектом для точного контроля.

Группа физиков из Национальный институт стандартов и технологий смогла сделать важный шаг к решению этой проблемы. В работе, опубликованной в *Physical Review Letters*, они продемонстрировали почти идеальное управление молекулярным ионом гидрида кальция — системой, состоящей из атома кальция и атома водорода с удалённым электроном. Такой контроль открывает дорогу к

использованию молекул в квантовых датчиках, новых типах часов, фундаментальных тестах физики и, в перспективе, к управляемой квантовой химии.

Принципиальная трудность заключается в том, что молекулы имеют гораздо больше степеней свободы, чем атомы. Атом можно представить как почти идеальную сферу: при вращении он не меняет своих свойств. Молекула же напоминает асимметричную гантель, и её квантовое состояние зависит от ориентации, вращения и колебаний. Это приводит к появлению огромного числа возможных состояний, каждое из которых потенциально реагирует на тепловое излучение и внешние поля. С точки зрения управления это проблема, но с точки зрения измерений — уникальное преимущество.

Чтобы «разговорить» молекулу и научиться читать её состояние, исследователи использовали метод квантовой логической спектроскопии. Этот подход ранее был разработан для сверхточных ионных часов и основан на использовании вспомогательного иона, который легко взаимодействует с лазерным светом. В эксперименте молекулярный ион гидрида кальция удерживался в ловушке вместе с ионом кальция. Оба объекта имеют одинаковый электрический заряд, поэтому они отталкиваются и оказываются связанными общим движением, подобно двум массам на пружине.

Ион кальция хорошо «виден» для лазеров, в отличие от самой молекулы. Охлаждая кальций лазерным излучением, ученые одновременно охлаждали и молекулу, резко снижая её тепловое движение. Это позволило увеличить время жизни конкретного молекулярного состояния примерно в десять раз по сравнению с условиями при комнатной температуре. Далее лазер использовался для управления вращением молекулы, а ион кальция играл роль квантового индикатора, сообщая о произошедших изменениях.

Когда молекула переходила между вращательными состояниями, связанный с ней ион кальция реагировал изменением собственного квантового состояния и испускал короткую вспышку фотонов. Эти вспышки фиксировались камерой как появление или исчезновение яркой точки. Две последовательные вспышки означали, что молекула совершила два четко контролируемых квантовых перехода и была возвращена в исходное состояние. Такой подход позволил ученым буквально «наблюдать» квантовую механику в реальном времени.

Эксперимент показал, что молекула может оставаться в заданном вращательном состоянии около 18 секунд, прежде чем тепловое излучение окружающей среды вынудит её перейти в другое состояние. Для квантовой физики это очень долгое время: за этот интервал исследователи успевают провести тысячи измерений, проверяя состояние системы и подтверждая, что

контроль действительно является управляемым, а не случайным. Вероятность успешного управления составила около 99,8%, то есть лишь две попытки из тысячи приводили к сбою.

Такая стабильность делает молекулы перспективным инструментом для измерений. Благодаря своей чувствительности к тепловому излучению они могут работать как микроскопические квантовые термометры, способные регистрировать не просто температуру, а конкретные спектральные характеристики теплового фона. Это особенно важно для атомных часов и квантовых сенсоров, где даже минимальные тепловые флуктуации могут влиять на точность.

Еще более важным является то, что продемонстрированный метод не привязан к конкретному виду молекул. Это означает, что в будущем можно будет выбирать молекулы с заранее заданными свойствами под конкретные задачи. Потенциальные направления включают квантовое зондирование, квантовую информатику, поиск новых фундаментальных эффектов, высокоточную спектроскопию, моделирование химических реакций на квантовом уровне.

Если атомы представляют собой ограниченный набор элементов периодической таблицы, то мир молекул практически бесконечен по своему разнообразию. Именно поэтому контроль над ними считается одной из ключевых целей современной квантовой науки. Работа ученых из NIST показывает, что переход от «послушных» атомов к сложным молекулам уже начался и в ближайшие годы может существенно расширить инструментарий квантовых технологий, приблизив их к новым областям физики и химии.

Ссылка: «Высокоточное управление квантовым состоянием полярного молекулярного иона в криогенной среде» DOI: [10.48550/arxiv.2506.14740](https://doi.org/10.48550/arxiv.2506.14740).