

Ученые научились «отключать» шум в молекулах для поиска новой физики за пределами Стандартной модели



Дата публикации: 23.07.2026

Современная физика успешно объясняет устройство окружающего мира с помощью Стандартной модели элементарных частиц. Эта теория с высокой точностью описывает фундаментальные частицы и три из четырех известных фундаментальных взаимодействий, однако она не способна ответить на целый ряд важнейших вопросов. Почему во Вселенной почти полностью отсутствует антиматерия? Что представляет собой темная материя? Почему существуют именно такие значения фундаментальных физических констант? Поиск ответов на эти вопросы требует создания исключительно чувствительных экспериментальных методов, способных обнаружить чрезвычайно слабые физические эффекты.

Одними из самых перспективных инструментов для подобных исследований считаются тяжелые полярные молекулы. Благодаря своей сложной внутренней структуре они способны многократно усиливать воздействие новых физических явлений, которые невозможно зарегистрировать обычными

экспериментальными установками. Именно поэтому такие молекулы уже несколько лет находятся в центре внимания физиков, изучающих процессы за пределами Стандартной модели.

Однако высокая чувствительность имеет и обратную сторону. Любые случайные электрические или магнитные поля, возникающие в лаборатории, оказывают влияние на измерения. Даже незначительные электромагнитные помехи способны полностью скрыть слабый сигнал, который ученые пытаются обнаружить. Именно борьба с подобным шумом долгое время оставалась одной из главных проблем высокоточных экспериментов.

Теперь международная группа исследователей под руководством Юики Такахаша из Калифорнийского технологического института предложила оригинальное решение этой задачи. Работа, опубликованная в журнале *Physical Review X*, демонстрирует новый подход к созданию молекулярных квантовых состояний, практически нечувствительных к внешним электромагнитным помехам. При этом способность фиксировать искомые физические эффекты полностью сохраняется.

Тяжелые полярные молекулы обладают уникальным свойством. Их электрический заряд распределен неравномерно, благодаря чему под воздействием внешнего электрического поля внутри молекулы возникает чрезвычайно мощное внутреннее поле. Оно может превышать исходное воздействие в сотни тысяч и даже миллионы раз. Такое естественное усиление делает молекулы идеальными квантовыми датчиками, позволяющими исследовать явления, которые невозможно наблюдать другими методами.

Особенно важным направлением подобных исследований считается поиск электрического дипольного момента электрона. Согласно Стандартной модели, эта величина должна быть настолько малой, что современные приборы практически не способны ее зарегистрировать. Однако многие альтернативные теории предсказывают значительно более высокий дипольный момент. Его обнаружение стало бы одним из самых убедительных доказательств существования новой физики.

Кроме того, подобные измерения позволяют проверить существование нарушений фундаментальных симметрий природы. Речь идет прежде всего о симметриях обращения времени и зарядовой четности. Именно их возможное нарушение многие физики связывают с тем, что после Большого взрыва материя практически полностью вытеснила антиматерию. Несмотря на десятилетия исследований, этот вопрос остается одной из крупнейших загадок современной космологии.

Главная проблема заключается в том, что молекулы одинаково хорошо реагируют как на полезный сигнал, так и на любые посторонние воздействия. Даже минимальные колебания лабораторных магнитных или электрических полей могут исказить результаты измерений сильнее, чем предполагаемый эффект новой физики. Поэтому исследователям приходится уделять огромное внимание подавлению внешних помех.

Для решения этой задачи команда Такахаша использовала идею, давно применяемую в атомных часах. В высокоточных часах существуют так называемые «магические» переходы между энергетическими уровнями атомов. Их особенность состоит в том, что изменения внешних условий практически не влияют на разницу энергий между этими состояниями. Благодаря этому атомные часы сохраняют рекордную точность даже при небольших изменениях окружающей среды.

Исследователи смогли реализовать аналогичный принцип в тяжелой полярной молекуле гидроксида иттербия YbOH . Ученые выбрали такие вращательные квантовые состояния, которые практически одинаково реагируют на изменение внешних электрических и магнитных полей. Поскольку оба энергетических уровня смещаются синхронно, расстояние между ними остается почти неизменным, а значит, случайные электромагнитные помехи перестают влиять на результаты измерений.

Испытания показали впечатляющий результат. Чувствительность молекулы к случайным электрическим полям удалось уменьшить более чем в 700 раз, а влияние магнитных полей сократилось примерно в 200 раз. При этом молекула полностью сохранила способность реагировать на те чрезвычайно слабые физические эффекты, ради которых и проводятся подобные эксперименты.

Не менее интересным оказалось еще одно свойство новой методики. Авторы обнаружили, что другие специально подобранные квантовые состояния этой же молекулы можно использовать как высокоточные датчики окружающей среды. Пока одна группа состояний эффективно игнорирует внешние помехи, другая одновременно измеряет характеристики этих самых полей. Такой подход позволяет постоянно контролировать условия эксперимента и оперативно корректировать возникающие отклонения, значительно повышая надежность результатов.

Хотя проведенная работа пока представляет собой подтверждение принципа, предложенная технология имеет гораздо более широкие перспективы. Методика не ограничивается использованием только гидроксида иттербия. Аналогичные способы квантовой настройки можно применять и к другим тяжелым полярным молекулам, многие из которых уже используются в современных лабораториях

или совместимы с технологиями лазерного охлаждения и магнитного удержания.

Совмещение подобных методов с новейшими квантовыми технологиями может значительно повысить чувствительность будущих экспериментов. Чем меньше уровень электромагнитного шума, тем выше вероятность обнаружить крайне слабые эффекты, свидетельствующие о существовании неизвестных фундаментальных взаимодействий или новых элементарных частиц.

Фактически речь идет о создании нового поколения молекулярных квантовых сенсоров. Они способны стать важным инструментом не только для фундаментальной физики, но и для развития сверхточной метрологии, квантовых технологий и новых стандартов измерения физических величин. Одновременно такие исследования помогают лучше понять внутреннее устройство материи и приблизиться к ответу на один из самых фундаментальных вопросов современной науки — почему наша Вселенная почти полностью состоит из материи, тогда как антиматерия практически исчезла вскоре после ее рождения.

Работа команды Юики Такахаши показывает, что ключ к открытиям может заключаться не только в строительстве все более мощных ускорителей частиц, но и в совершенствовании методов сверхточных измерений. Если предложенная технология подтвердит свою эффективность в дальнейших экспериментах, тяжелые полярные молекулы могут стать одним из главных инструментов поиска физики за пределами Стандартной модели и приблизить ученых к открытиям, способным изменить современное представление о фундаментальных законах Вселенной.

Ссылка: «Инженерные переходы молекулярных часов для точных измерений»
[DOI: 10.1103/4t7q-d58r](https://doi.org/10.1103/4t7q-d58r).