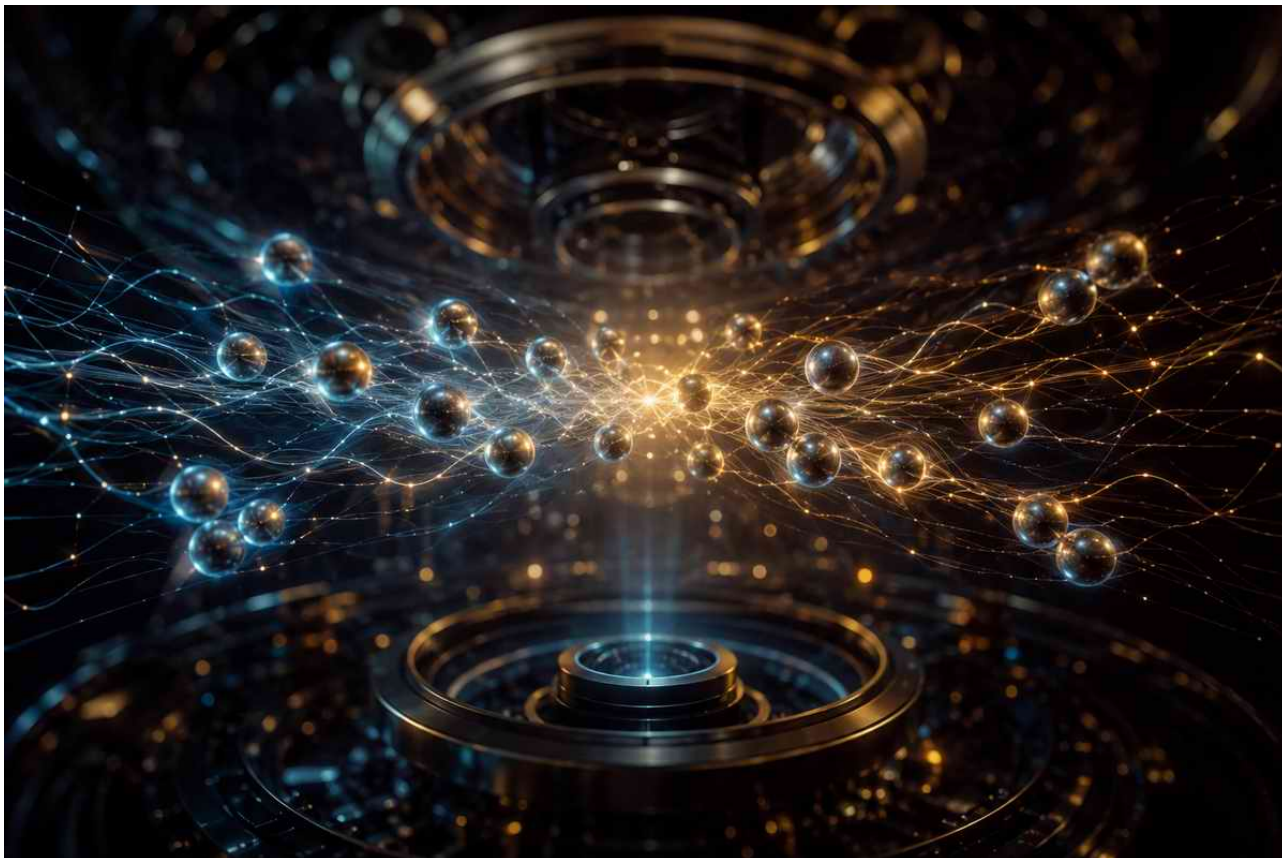


## Физики впервые показали квантовую интерференцию Хонга-Оу-Манделя с участием до 12 атомов



Дата публикации: 02.07.2026

Квантовая физика снова показала, насколько необычно может вести себя материя, если отдельные частицы становятся полностью неразличимыми друг для друга. Физики впервые продемонстрировали интерференцию Хонга-Оу-Манделя с участием более чем десяти нейтральных атомов. В эксперименте участвовали до 12 атомов рубидия, охлажденных почти до абсолютного нуля и подготовленных в составе бозе-эйнштейновского конденсата.

Это достижение важно не только как новый рекорд в фундаментальной физике. Оно показывает, что сложные многочастичные квантовые состояния можно создавать и измерять не только с фотонами, но и с атомами. Такой результат открывает путь к более точным квантовым сенсорам, новым схемам квантовой метрологии и экспериментам, где запутанность используется как реальный физический ресурс для измерений, превосходящих классические ограничения.

Эффект Хонга-Оу-Манделя был впервые продемонстрирован в 1987 году на парах фотонов. Его суть связана с одним из самых странных свойств квантового мира — неразличимостью одинаковых частиц. Если два одинаковых бозона одновременно попадают на симметричный делитель пучка, они не расходятся случайным образом по двум выходам, как можно было бы ожидать в классической физике. Вместо этого они выходят вместе через один и тот же порт. Частицы словно теряют индивидуальность и начинают вести себя как единая квантовая система.

Для двух частиц этот эффект давно стал классическим экспериментом квантовой оптики. Он играет важную роль в квантовой информации, фотонных вычислениях, квантовой криптографии и высокоточных измерениях. Однако расширить этот эффект на большое число частиц значительно сложнее. В многочастичном варианте уже недостаточно показать, что пары частиц интерферируют между собой. Необходимо доказать, что все частицы одновременно участвуют в едином коллективном квантовом процессе.

Именно это и удалось сделать исследователям. Они показали, что до 12 нейтральных атомов могут демонстрировать подлинную многочастичную интерференцию Хонга-Оу-Манделя в двухрежимной системе. Это означает, что все атомы имели только два возможных выходных состояния, подобно фотонам в исходном эксперименте, но при этом поведение системы определялось не отдельными парами, а взаимодействием всей группы частиц как единого квантового ансамбля.

До сих пор фотоны считались наиболее удобной платформой для подобных экспериментов. Ученые давно умеют хорошо регистрировать одиночные фотоны, отслеживать их появление и анализировать распределение по выходным каналам. С помощью фотонных систем уже изучали интерференцию Хонга-Оу-Манделя с четырьмя, шестью и восемью фотонами. Но масштабирование фотонных экспериментов сталкивается с серьезными трудностями: потери света, неполная неразличимость частиц, шум, случайные многофотонные события и сложность однозначной интерпретации данных.

Атомные системы имеют свои сложности, но дают и важные преимущества. Атомы можно удерживать в ловушках, охлаждать, подготавливать в нужных квантовых состояниях и измерять с высокой точностью. В новом эксперименте исследователи использовали бозе-эйнштейновский конденсат примерно из 250 атомов рубидия, помещенных в оптическую дипольную ловушку. При экстремально низкой температуре атомы переходят в особое квантовое состояние, где начинают вести себя согласованно, а их волновые свойства становятся особенно заметными.

Внутри конденсата ученые формировали пары атомов в двух разных спиновых состояниях. Такой процесс позволил создать исходное состояние, в котором в двух режимах находилось равное число атомов. Затем микроволновые импульсы выполняли роль квантового делителя пучка: они когерентно смешивали два спиновых состояния с вероятностью 50 на 50, создавая условия для интерференции Хонга-Оу-Манделя.

Главной технической задачей было не просто подготовить атомы, а точно их пересчитать после эксперимента. Для доказательства многочастичной интерференции необходимо знать, сколько атомов оказалось в каждом выходном состоянии при каждом запуске. Обычный шум детектирования для такой платформы может превышать сигнал от одного атома, поэтому без специальной методики невозможно надежно отличить истинное квантовое распределение от экспериментальной погрешности.

Чтобы решить эту проблему, команда использовала метод оптической патоки. Атомы освещались шестью лазерными лучами, направленными с разных сторон. Такая конфигурация замедляла движение атомов и удерживала их около исходного положения, пока они испускали флуоресцентный свет. Благодаря этому сигнал от каждого атома становился значительно сильнее, а точность подсчета достигала уровня около 0,2 атома. Это позволило в каждом отдельном измерении определять целое число атомов в каждом спиновом состоянии.

Не менее важным оказалось то, что атомы в оптической ловушке могут сохраняться в течение десятков секунд, тогда как подготовка и сама интерференция занимают значительно меньше времени. Это резко снижает проблему потерь. Если атом физически остается в системе, он обязательно регистрируется через флуоресцентный сигнал. Такой контроль сделал эксперимент особенно убедительным.

Исследователи анализировали распределение выходных состояний для систем от 2 до 12 атомов. Для доказательства подлинной многочастичной интерференции они использовали несколько признаков: подавление нечетных результатов, характерную форму кластеризации частиц и проверку глубины запутанности.

Первый признак связан с четностью. При интерференции Хонга-Оу-Манделя определенные исходы становятся крайне маловероятными или практически исчезают. В эксперименте нечетные результаты были сильно подавлены, причем эффект сохранялся даже для 10 и 12 атомов. Однако одной четности недостаточно, потому что подобная картина может возникать и при обычной двухчастичной интерференции.

Второй признак оказался более показательным. Если бы атомы вели себя независимо, можно было бы ожидать относительно равномерного распределения между двумя выходами. Вместо этого наиболее вероятными становились экстремальные варианты, когда большинство атомов или все атомы группировались в одном выходном состоянии. Такое коллективное поведение нельзя объяснить простым набором независимых парных интерференций.

Третий и самый важный тест был связан с квантовой запутанностью. Ученые оценили глубину запутанности — то есть число частиц, которые невозможно описать как независимые подсистемы. Для 8 атомов была подтверждена подлинная полная многочастичная запутанность. Для 12 атомов данные указывали на запутанность как минимум 10 частиц с высокой статистической достоверностью.

В совокупности эти признаки позволили исключить объяснение, при котором система распадается на небольшие независимые кластеры частиц. Наиболее последовательное объяснение результатов — настоящая  $N$ -частичная интерференция, где все атомы участвуют в общем квантовом процессе.

Особенно важны последствия эксперимента для квантовой метрологии. В классических измерениях точность обычно растет сравнительно медленно: если увеличить число независимых частиц, выигрыш масштабируется примерно как квадратный корень из их количества. Но запутанные квантовые состояния позволяют приблизиться к пределу Гейзенберга, где точность улучшается значительно сильнее и напрямую зависит от числа частиц.

В эксперименте исследователи оценили метрологический потенциал полученных состояний с помощью информации Фишера. Для системы из 12 атомов результат оказался на 6,4 децибела выше классического предела. Это означает, что созданные атомные состояния уже демонстрируют преимущество, важное для будущих сверхточных измерений. В перспективе при масштабировании до гораздо большего числа атомов подобные методы могут дать многократное улучшение чувствительности квантовых сенсоров.

Потенциальные применения такой технологии связаны с атомными часами, гравиметрами, инерциальными датчиками, измерениями слабых полей и фундаментальными тестами квантовой механики. Чем лучше ученые умеют создавать и контролировать многочастичную запутанность, тем ближе становятся устройства, способные измерять физические величины с точностью, недоступной классическим системам.

Отдельный интерес представляет возможность дальнейшего масштабирования. Исследователи считают, что система детектирования в

принципе может быть расширена до разрешения примерно 1000 атомов. Для увеличения числа реально запутанных частиц потребуется снизить плотность атомного облака и уменьшить нежелательные столкновения внутри конденсата. Если эти задачи удастся решить, атомные платформы смогут конкурировать с фотонными системами в области многочастичных квантовых экспериментов и даже превосходить их в ряде направлений.

Новый результат также важен для проверки фундаментальных принципов квантовой механики. Пространственное разделение подобных запутанных состояний может открыть путь к многочастичным тестам Белла — экспериментам, которые проверяют границы между классическим и квантовым описанием реальности. Раньше такие исследования в основном ассоциировались с фотонами, но теперь атомные системы становятся все более серьезным инструментом для изучения глубинных законов квантового мира.

Демонстрация интерференции Хонга-Оу-Манделя с участием до 12 атомов показывает, что бозе-эйнштейновские конденсаты могут быть не только объектом фундаментальных исследований, но и практической платформой для генерации сложных квантовых состояний. В этом эксперименте атомы выступили не как независимые микроскопические объекты, а как единая согласованная система, поведение которой невозможно объяснить с точки зрения привычной классической интуиции.

Главный смысл работы заключается в том, что ученые научились видеть и измерять коллективную квантовую интерференцию на уровне отдельных атомов. Это приближает физику к созданию управляемых многочастичных квантовых систем, где запутанность, интерференция и неразличимость частиц становятся не абстрактными понятиями, а инженерными инструментами для технологий будущего.

**Ссылка:** «Интерференция Хонга-Оу-Манделя более чем десяти неразличимых атомов» [DOI: 10.1038/s41567-026-03302-7](https://doi.org/10.1038/s41567-026-03302-7).