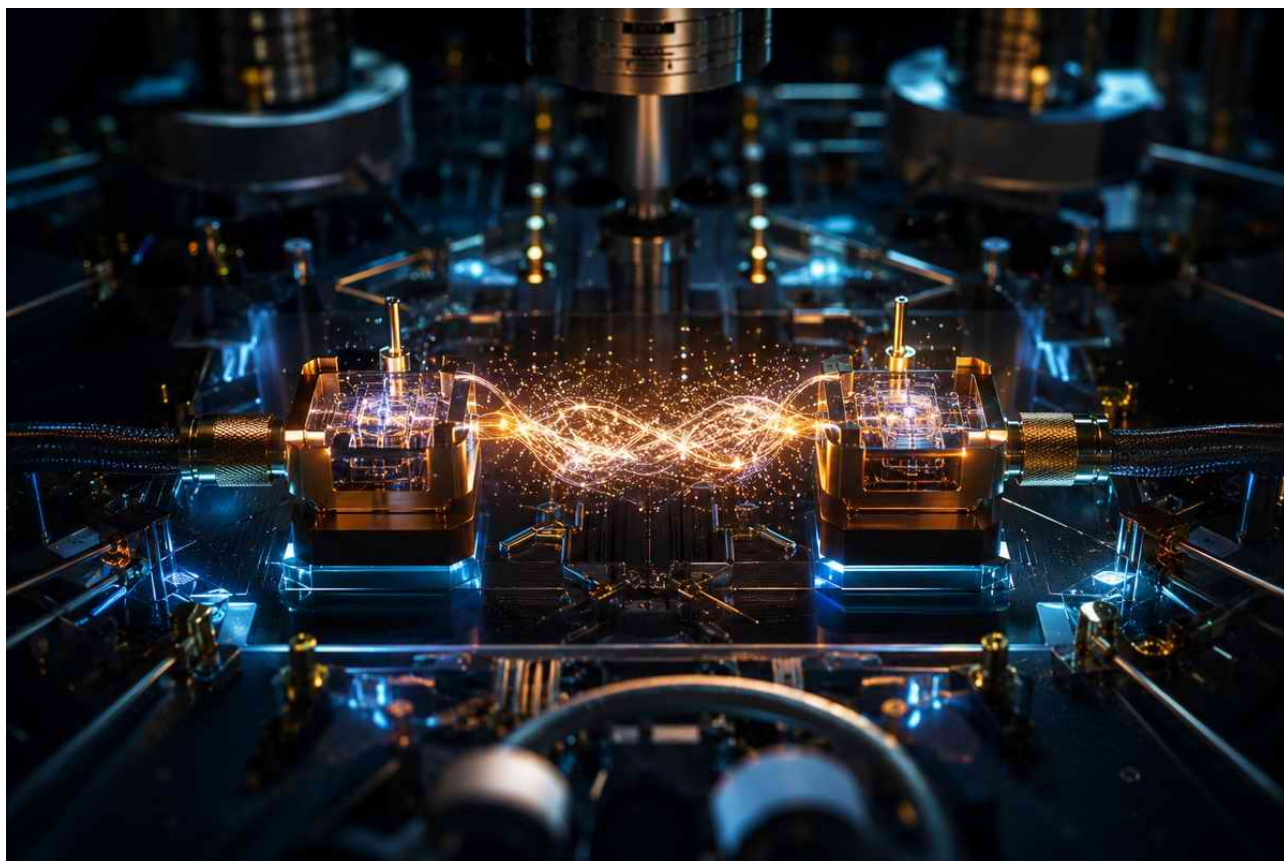


Квантовая запутанность без передачи частиц: физики нашли новый способ создавать устойчивые квантовые связи



Дата публикации: 20.07.2026

Квантовая запутанность считается одним из самых необычных и одновременно наиболее важных явлений современной физики. Именно она лежит в основе квантовых вычислений, защищенной квантовой связи, сверхточных измерений и будущего квантового интернета. Однако практическое использование запутанных состояний остается чрезвычайно сложной задачей. Главная причина заключается в том, что квантовые системы крайне чувствительны к воздействию окружающей среды. Даже незначительные внешние помехи способны разрушить запутанность за доли секунды, существенно ограничивая возможности создания масштабных квантовых сетей.

Исследователи из Университета Иллинойса в Урбана-Шампейн и Чикагского университета предложили принципиально новый подход к решению этой проблемы. Вместо традиционной передачи уже подготовленных запутанных квантовых объектов между удаленными узлами они продемонстрировали возможность формирования устойчивой квантовой запутанности

непосредственно в процессе взаимодействия системы с окружающей средой. Результаты исследования опубликованы в журнале Physical Review X и открывают новые перспективы для развития распределенных квантовых вычислений.

На первый взгляд сама идея кажется парадоксальной. В классическом понимании утечка энергии и информации из квантовой системы всегда считалась главным врагом квантовых технологий. Этот процесс, известный как декогеренция, постепенно разрушает хрупкие квантовые состояния и лишает их преимуществ перед классическими вычислительными системами. Именно поэтому большинство современных разработок направлено на максимальную изоляцию кубитов от внешней среды.

Новая работа демонстрирует совершенно иной подход. Вместо борьбы с неизбежной диссипацией ученые предложили использовать ее как полезный инструмент. Оказалось, что при правильной настройке параметров взаимодействия система способна самостоятельно переходить в устойчивое запутанное состояние. При этом сама окружающая среда начинает выполнять роль своеобразного механизма стабилизации, поддерживая квантовые корреляции вместо их разрушения.

Квантовая запутанность представляет собой особую форму связи между частицами, при которой состояние одной из них оказывается неразрывно связано с состоянием другой независимо от расстояния между ними. Такие корреляции невозможно объяснить законами классической физики. Именно благодаря этому свойству квантовые компьютеры способны выполнять вычисления, которые практически недоступны традиционным суперкомпьютерам, а квантовые коммуникационные системы потенциально обеспечивают принципиально новый уровень защищенности передачи информации.

До настоящего времени большинство методов получения удаленной запутанности строилось по одной схеме. Сначала квантовые объекты создавались в общем месте, затем разделялись и передавались по специальным каналам связи. Именно на этапе транспортировки возникала основная проблема: любые шумы, вибрации, тепловые флуктуации или электромагнитные помехи постепенно разрушали квантовое состояние.

Авторы нового исследования поставили перед собой другой вопрос: можно ли полностью отказаться от этапа передачи квантовых частиц и сформировать запутанность сразу между удаленными элементами системы. Ответ оказался положительным.

Основой разработки стала так называемая каскадная квантовая система. В такой конфигурации несколько сверхпроводящих кубитов непрерывно взаимодействуют со световым полем через однонаправленный волновод. Каждый кубит одновременно поглощает и испускает фотоны, а часть энергии неизбежно рассеивается в окружающую среду. Если внешнее управляющее поле подобрано достаточно точно, процессы потерь и внешнего воздействия начинают взаимно компенсироваться. В результате вся система естественным образом приходит к устойчивому состоянию, в котором между кубитами возникает квантовая запутанность.

Главным достижением исследования стало создание технологии синтетического сжатия. Именно она позволила реализовать ранее существовавшие лишь в теоретических моделях идеи в реальном эксперименте.

В традиционных расчетах предполагались практически идеальные условия, недостижимые для современных лабораторий. Реальные квантовые устройства обладают аппаратными ограничениями, дополнительными шумами и множеством несовершенств. Метод синтетического сжатия позволяет математически компенсировать эти недостатки путем точной настройки экспериментальных параметров. Благодаря этому удалось воспроизвести поведение идеальной системы без необходимости создавать недостижимые физические условия.

Эксперимент был проведен на двух сверхпроводящих кубитах. Несмотря на сравнительно простую конфигурацию, исследователи смогли получить высококачественную стационарную квантовую запутанность, которая сохраняется не кратковременно, а представляет собой естественное устойчивое состояние всей системы. Это принципиально отличает новую технологию от большинства существующих методов, где запутанность возникает лишь на короткий промежуток времени и затем постепенно исчезает.

Особый интерес вызывает возможность масштабирования технологии. Если аналогичные принципы удастся реализовать для десятков или сотен кубитов, это может стать основой для создания распределенных квантовых вычислительных сетей нового поколения. При таком подходе отдельные квантовые процессоры смогут взаимодействовать друг с другом без необходимости передачи чрезвычайно чувствительных квантовых состояний через шумные каналы связи.

Исследователи уже работают над расширением методики на многокубитные архитектуры. Одним из наиболее перспективных направлений считается дистилляция квантовой запутанности. Этот метод позволяет объединять несколько сравнительно слабозапутанных состояний и получать значительно более качественную квантовую связь между отдельными кубитами. Подобные

технологии рассматриваются как важный элемент будущих квантовых вычислительных платформ.

Полученные результаты имеют большое значение не только для фундаментальной физики, но и для прикладных разработок. Современные квантовые компьютеры пока содержат ограниченное количество кубитов и испытывают серьезные проблемы с масштабированием. Одним из наиболее вероятных путей дальнейшего развития считается объединение нескольких небольших квантовых процессоров в единую распределенную сеть. Новая технология может значительно упростить создание подобных архитектур.

Кроме вычислений методика представляет интерес для квантового интернета, защищенной передачи информации, распределенных сенсорных систем, сверхточной метрологии, квантовой криптографии и будущих гибридных вычислительных комплексов. Возможность получать устойчивую запутанность без непосредственной транспортировки квантовой информации потенциально делает подобные системы значительно менее чувствительными к шумам и потерям.

Развитие сверхпроводящих кубитов, методов синтетического сжатия, каскадных квантовых систем, квантовой оптики, математического моделирования и инженерии квантовых устройств постепенно меняет представления о том, каким может стать следующее поколение квантовых технологий. Новое исследование показывает, что процессы, которые долгое время считались главным препятствием для развития квантовых вычислений, при правильной организации могут превратиться в инструмент создания стабильных квантовых состояний. Такой подход способен приблизить появление масштабируемых квантовых компьютеров и глобальных квантовых сетей значительно раньше, чем предполагалось еще несколько лет назад.

Ссылка: «Автономная стабилизация удаленной запутанности в каскадной квантовой сети» DOI: [10.1103/z6zz-vw5q](https://doi.org/10.1103/z6zz-vw5q).