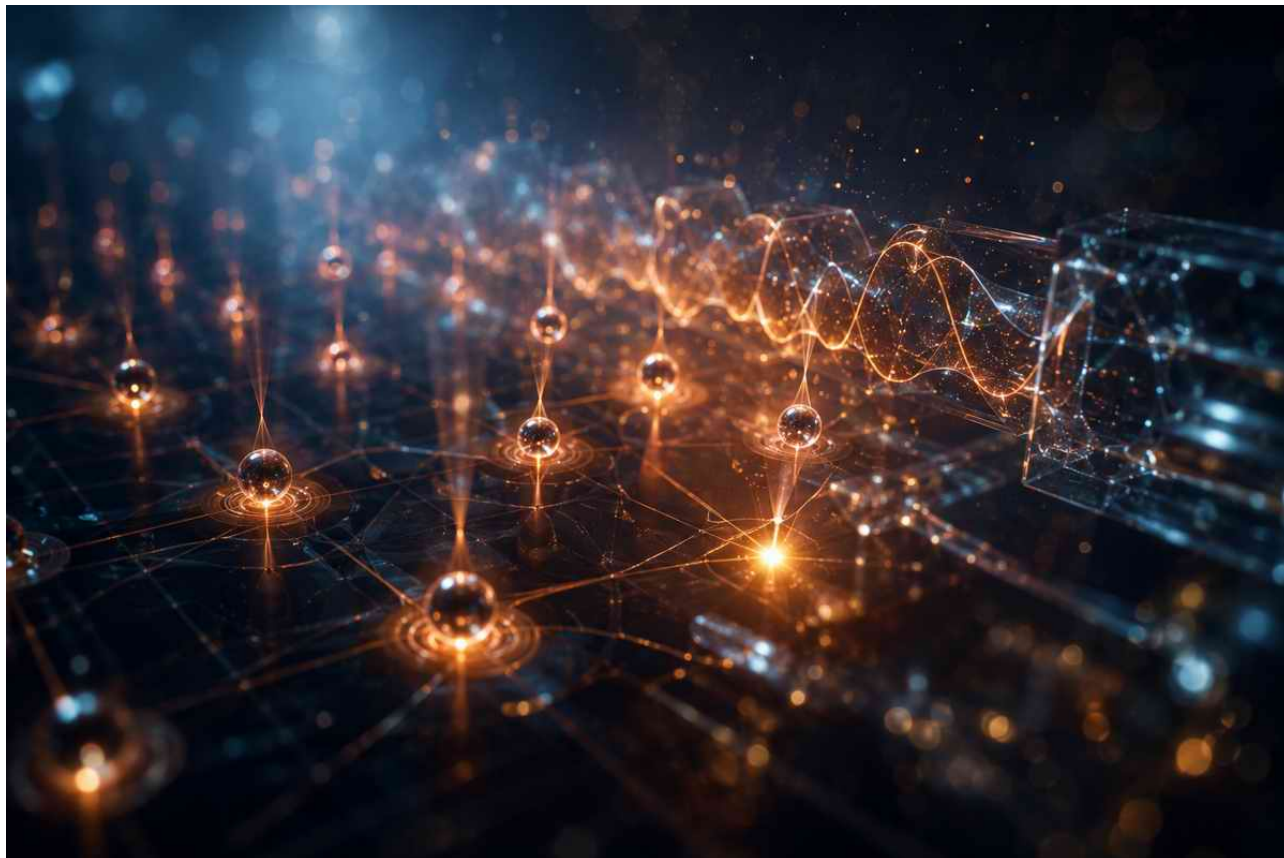


Квантовые компьютеры стали на шаг ближе к надежной работе: ученые научили нейтральные атомы самостоятельно обнаруживать ошибки



Дата публикации: 19.07.2026

Квантовые компьютеры считаются одной из самых перспективных технологий XXI века. В отличие от традиционных вычислительных систем, работающих с двоичными битами, принимающими значение 0 или 1, квантовые компьютеры используют кубиты — особые квантовые объекты, которые способны одновременно находиться в нескольких состояниях благодаря явлению суперпозиции. Именно эта особенность позволяет выполнять некоторые вычисления значительно быстрее классических суперкомпьютеров и открывает возможности для решения задач, которые сегодня практически недоступны современной вычислительной технике.

Несмотря на огромный потенциал, главной проблемой квантовых вычислений остается чрезвычайная чувствительность кубитов к внешним воздействиям. Даже минимальные изменения температуры, электромагнитные помехи, вибрации или случайные взаимодействия с окружающей средой способны нарушить квантовое состояние частицы. В результате возникают ошибки,

которые быстро накапливаются и делают длительные вычисления практически невозможными.

Именно поэтому создание эффективных систем обнаружения и исправления ошибок считается одним из важнейших направлений современной квантовой физики. Пока эта задача не будет решена, построить действительно мощные и надежные квантовые компьютеры промышленного уровня практически невозможно.

Значительный шаг в этом направлении сделали исследователи из Принстонского университета. Они разработали новую архитектуру квантовых вычислений, основанную на использовании нейтральных атомов иттербия-171, находящихся в долгоживущем метастабильном возбужденном состоянии. Результаты исследования показывают, что подобный подход позволяет не только уменьшить количество возникающих ошибок, но и значительно упростить их обнаружение и последующее исправление.

Нейтральные атомы сегодня считаются одной из наиболее перспективных платформ для создания квантовых процессоров. В отличие от сверхпроводниковых кубитов или захваченных ионов, отдельные атомы обладают высокой стабильностью, могут длительное время сохранять квантовые состояния и легко объединяются в большие двумерные массивы с помощью оптических ловушек, сформированных лазерным излучением.

Особый интерес представляет изотоп иттербия-171. Благодаря своим квантовым свойствам он обеспечивает высокую точность управления, длительное время когерентности и возможность выполнять сложные логические операции с минимальными потерями информации. Именно эти характеристики делают его привлекательным кандидатом для масштабируемых квантовых вычислений.

Главная идея нового исследования заключается в том, чтобы изменить сам характер возникающих ошибок. Вместо того чтобы пытаться бороться с полностью случайными нарушениями, ученые предложили специально проектировать кубиты таким образом, чтобы ошибки становились так называемыми ошибками стирания.

В традиционных квантовых вычислениях система зачастую не знает, какой именно кубит оказался поврежден. Ошибка проявляется лишь в неправильном результате вычислений, поэтому ее поиск требует выполнения большого количества дополнительных операций и сложных алгоритмов анализа.

Ошибки стирания работают совершенно иначе. При их возникновении система получает информацию о том, какой именно кубит перестал

функционировать корректно. Другими словами, квантовый процессор сразу определяет местоположение проблемы, что существенно облегчает ее последующее исправление.

Подобный принцип давно используется в классических системах хранения информации. Например, если жесткий диск сообщает о повреждении определенного сектора памяти, восстановить данные значительно проще, чем искать неизвестную ошибку среди миллионов исправно работающих элементов. Исследователи фактически перенесли аналогичную идею в область квантовых вычислений.

Для реализации этой концепции команда разработала специальную схему кодирования информации. В ней четыре физических кубита объединяются таким образом, чтобы хранить два логических кубита. Подобная архитектура известна как код коррекции ошибок $[[4,2,2]]$ и позволяет обнаруживать возникающие ошибки стирания даже в очень компактной системе.

Хотя этот код считается сравнительно небольшим, он стал важным доказательством работоспособности предложенного подхода. В обычных условиях столь компактная схема практически не способна исправлять квантовые ошибки. Однако после преобразования ошибок в формат стирания даже небольшой код начинает эффективно выполнять функции коррекции.

Фактически ученые показали, что правильный выбор типа ошибок иногда оказывается не менее важным, чем совершенствование самих алгоритмов исправления.

Работа основана на предыдущих исследованиях этой научной группы. Несколько лет назад исследователи уже продемонстрировали возможность создания кубитов, самостоятельно сигнализирующих о возникновении ошибки. Однако тогда система могла лишь определить неисправный элемент, не имея эффективного механизма его восстановления.

Новое исследование стало следующим логическим этапом развития технологии. Теперь информация об обнаруженной ошибке используется для полноценной коррекции вычислений, а не только для исключения поврежденного кубита из дальнейшей работы.

Подобный подход особенно важен при создании будущих квантовых процессоров, содержащих десятки тысяч или даже миллионы кубитов. При столь больших масштабах полностью исключить ошибки невозможно, поэтому единственным решением становится построение архитектуры, способной автоматически обнаруживать и исправлять возникающие нарушения практически в режиме реального времени.

В современной квантовой информатике именно отказоустойчивость считается главным условием создания универсальных квантовых компьютеров. Такой процессор должен продолжать выполнять вычисления даже при постоянном возникновении отдельных ошибок, не теряя правильность итогового результата.

Исследователи подчеркивают, что представленная работа является прежде всего подтверждением жизнеспособности самой концепции. Следующим этапом станет применение аналогичного метода к значительно более сложным кодам коррекции ошибок с большим кодовым расстоянием. Такие системы способны одновременно исправлять несколько различных типов ошибок и обеспечивать существенно более высокий уровень надежности.

Для достижения этой цели потребуется решить еще ряд технических задач. Необходимо научиться быстро заменять потерянные атомы непосредственно во время выполнения вычислений, ускорить проведение квантовых логических операций, повысить точность квантовых вентилях и уменьшить вероятность возникновения дополнительных ошибок в процессе коррекции.

Параллельно исследовательская группа работает над технологиями автоматической перезагрузки атомов в оптические ловушки, совершенствованием методов лазерного управления и созданием более совершенных квантовых логических элементов. Все эти разработки должны стать частью единой масштабируемой архитектуры будущих квантовых процессоров.

Значение подобных исследований выходит далеко за пределы фундаментальной физики. Надежные квантовые компьютеры смогут моделировать сложнейшие молекулы и химические реакции, значительно ускорить разработку новых лекарственных препаратов, создавать высокоэффективные материалы, оптимизировать логистические системы, проводить сверхточные климатические расчеты, совершенствовать методы искусственного интеллекта и решать математические задачи, которые сегодня требуют тысяч лет вычислений даже на самых мощных суперкомпьютерах.

Одновременно развитие квантовых вычислений стимулирует прогресс во многих смежных областях науки, включая лазерную физику, атомную спектроскопию, материаловедение, микроэлектронику, фотонику и теорию информации. Каждое улучшение качества квантовых кубитов способствует появлению новых технологий, которые впоследствии находят применение и за пределами квантовых вычислений.

Сегодня сразу несколько технологических платформ конкурируют за право

стать основой будущих универсальных квантовых компьютеров. Среди них сверхпроводниковые кубиты, захваченные ионы, фотонные системы, кремниевые спиновые кубиты и нейтральные атомы. Каждая технология обладает собственными преимуществами и ограничениями, однако именно платформы на основе нейтральных атомов в последние годы демонстрируют особенно быстрый прогресс благодаря высокой масштабируемости, длительному времени сохранения квантовой информации и возможности формировать большие массивы кубитов с помощью лазерных технологий.

Новая работа ученых Принстонского университета показывает, что будущее квантовых вычислений зависит не только от увеличения количества кубитов, но и от способности интеллектуально управлять неизбежными ошибками. Если предложенная стратегия успешно масштабируется на крупные квантовые процессоры, это станет одним из важнейших шагов на пути к созданию действительно надежных, отказоустойчивых квантовых компьютеров, способных выполнять вычисления, которые сегодня остаются недостижимыми для классических вычислительных систем.

Ссылка: «Логические кубиты с преобразованием стирания с использованием метастабильных нейтральных атомов» [DOI: 10.1038/s41567-026-03309-0](https://doi.org/10.1038/s41567-026-03309-0).