

## **Физики подтвердили устойчивость мод Майораны к дефектам материала — шаг к созданию надежных квантовых компьютеров**

Дата публикации: 10.06.2026

Одной из главных проблем современных квантовых компьютеров остается их высокая чувствительность к внешним воздействиям. Даже незначительные колебания температуры, электромагнитные помехи или дефекты материалов способны нарушить состояние кубитов и привести к вычислительным ошибкам. Именно поэтому ученые по всему миру ищут способы создания квантовых систем, которые смогут сохранять информацию даже в неблагоприятных условиях. Новое исследование международной группы физиков стало важным шагом в этом направлении.

Исследователи из Гамбургского университета и ряда научных центров представили убедительные доказательства того, что так называемые моды Майораны сохраняют устойчивость даже при наличии значительного структурного беспорядка в материале. Полученные результаты опубликованы в журнале *Nature Physics* и подтверждают одну из ключевых теоретических концепций топологических квантовых вычислений.

Моды Майораны представляют собой особые квантовые состояния, которые многие ученые рассматривают как перспективную основу для создания отказоустойчивых квантовых компьютеров. Их уникальность заключается в том, что информация кодируется не в локальных свойствах системы, а в ее глобальной топологической структуре. Благодаря этому подобные состояния значительно менее чувствительны к внешним воздействиям и дефектам материала.

Интерес к модам Майораны возник после теоретических работ, предсказавших существование частиц, являющихся собственными античастицами. Хотя в фундаментальной физике такие частицы до сих пор остаются предметом исследований, в конденсированных средах удалось обнаружить квазичастицы, демонстрирующие аналогичные свойства. Именно они получили название майорановских состояний или мод Майораны.

В рамках нового исследования ученые сосредоточились на одномерных атомных цепочках, состоящих из магнитных атомов железа. Для проведения экспериментов была создана сложная гибридная структура, включающая сверхпроводящий ниобий, тонкий слой серебра и поверхностный слой сплава висмута и серебра. Такая архитектура позволила сформировать условия,

необходимые для возникновения топологических сверхпроводящих состояний.

Для анализа структуры материала исследователи использовали сканирующую туннельную микроскопию и спектроскопию, работающие при температуре около четырех кельвинов, что соответствует примерно минус 269 градусам Цельсия. Эти методы позволяют не только визуализировать отдельные атомы, но и изучать локальные электронные состояния с чрезвычайно высоким пространственным разрешением.

Наблюдения показали интересную особенность. Несмотря на то что верхний атомный слой обладал практически идеальной кристаллической структурой, в более глубоких слоях присутствовали наноразмерные неоднородности и дефекты. С точки зрения классической электроники подобный беспорядок обычно считается нежелательным фактором, ухудшающим характеристики устройства. Однако для проверки устойчивости мод Майораны наличие таких дефектов оказалось крайне полезным.

После подготовки подложки ученые разместили на ее поверхности отдельные атомы железа, формируя строго линейные атомные цепочки. Манипуляции проводились с помощью сверхточного наконечника сканирующего туннельного микроскопа, который позволяет перемещать отдельные атомы и создавать структуры заданной формы буквально по одному атому за раз.

Когда длина цепочек превысила определенное критическое значение, на их концах были обнаружены характерные состояния с нулевой энергией. Именно такие сигнатуры считаются одним из главных признаков существования мод Майораны. Особое значение имел тот факт, что эти состояния сохранялись даже при наличии заметного структурного беспорядка в материале.

Для дополнительной проверки ученые выполнили подробное компьютерное моделирование с использованием параметров, максимально приближенных к реальным условиям эксперимента. Результаты расчетов хорошо совпали с наблюдаемыми данными и подтвердили, что обнаруженные состояния действительно обладают топологической защитой.

Полученные результаты имеют большое значение для развития квантовых технологий. Одной из ключевых задач в этой области является создание кубитов, способных работать длительное время без возникновения ошибок. Сегодня значительная часть ресурсов квантовых компьютеров расходуется на коррекцию ошибок, возникающих из-за нестабильности квантовых состояний. Если информация будет храниться в топологически защищенных состояниях Майораны, потребность в сложных механизмах коррекции может существенно сократиться.

Топологические кубиты считаются одним из наиболее перспективных направлений развития квантовых вычислений. В отличие от традиционных сверхпроводящих кубитов, они потенциально способны сохранять квантовую информацию значительно дольше и надежнее. Это открывает возможности для создания более масштабных квантовых систем, пригодных для решения практических задач в криптографии, материаловедении, фармацевтике и моделировании сложных физических процессов.

Особый интерес представляет возможность выполнения так называемых операций плетения, при которых моды Майораны обмениваются положениями в пространстве. Теоретически такие операции позволяют реализовывать квантовые логические элементы с очень высокой степенью защиты от ошибок. Однако для практического применения необходимо детально изучить влияние различных типов беспорядка на динамику этих состояний.

Авторы исследования отмечают, что следующим этапом станет дальнейшее совершенствование разработанной гибридной платформы и изучение поведения мод Майораны в более сложных условиях. Ученые намерены выяснить, насколько устойчивыми остаются эти состояния при изменении параметров системы, а также исследовать механизмы управления ими для будущих квантовых устройств.

Результаты работы стали одним из наиболее убедительных экспериментальных подтверждений того, что топологическая защита действительно способна сохранять квантовые состояния даже в несовершенных материалах. Это приближает создание практических майорановских кубитов и делает концепцию отказоустойчивых квантовых компьютеров значительно более реалистичной, чем еще несколько лет назад.

**Ссылка:** «Устойчивость мода Майораны к потенциалу борьбы в атомных цепочках на сверхпроводящем сплаве Рашбы» DOI: [10.1038/s41567-026-03322-3](https://doi.org/10.1038/s41567-026-03322-3).