

Прорыв в квантовой теории: достигнуто оптимальное масштабирование для дистилляции магических состояний

Дата публикации: 13.11.2025

В квантовой науке совершенствование методов коррекции ошибок и повышение точности вычислений — фундаментальные задачи, от которых зависит будущее всей отрасли. Недавняя работа исследователей из Центра теоретической физики Массачусетского технологического института представляет собой важный шаг в этом направлении: впервые доказано, что оптимальное масштабирование для дистилляции магического состояния — ключевого ресурса в универсальных квантовых вычислениях — достижимо. Этот результат устраняет одно из главных теоретических препятствий на пути к созданию полностью отказоустойчивых квантовых машин.

Магические состояния представляют собой особые квантовые состояния, которые позволяют выполнять операции за пределами так называемого набора Клиффорда — ограниченного набора логических операций, поддерживаемых стандартными кодами коррекции ошибок. Без таких состояний квантовый компьютер не может достичь универсальности, а значит, не способен превзойти классические системы по вычислительной мощности. Однако магические состояния подвержены шуму и ошибкам, и их качество должно быть значительно повышено для практического использования.

Процесс дистилляции магических состояний, предложенный Бравым и Китаевым в 2005 году, позволяет из большого числа зашумлённых состояний получить меньшее количество состояний более высокой чистоты. Но этот процесс традиционно требует огромных вычислительных ресурсов: чем выше требуемая точность, тем больше растут накладные расходы. Сложность дистилляции характеризуется масштабной экспонентой γ (гамма): чем меньше γ , тем эффективнее процесс. Значение $\gamma = 0$ обозначает идеальный сценарий, при котором количество требуемых ресурсов остаётся постоянным независимо от уровня чистоты магического состояния.

На протяжении последних десятилетий исследователи стремились снизить этот показатель. Работы Хастингса и Хааха в 2017 году позволили достичь $\gamma \approx 0,678$, а позже Кришна и Тиллих приблизились к значению $\gamma \rightarrow 0$, но их методы применялись только к теоретическим системам, слишком большим для практической реализации. Новое исследование из MIT впервые доказало возможность достижения $\gamma = 0$ для реальных кубитных систем — того самого базового элемента квантовых компьютеров.

Команда использовала подход, основанный на алгебраико-геометрических кодах — особом классе кодов коррекции ошибок, обладающем высокой плотностью и устойчивостью к шуму. Эти коды ранее использовались в теоретических кудитных системах (квантовых состояниях с числом уровней, превышающим два), но теперь их удалось адаптировать к кубитам, что сделало теорию применимой к существующим архитектурам квантовых процессоров. Исследователи доказали, что эти коды позволяют проводить дистилляцию магических состояний в один раунд, без необходимости многократной итерации процесса. Это кардинально снижает вычислительные издержки и устраняет эффект накопления ошибок между циклами дистилляции.

Суть прорыва заключается в том, что новые методы дистилляции используют асимптотически хорошие коды с линейным расстоянием и эффективными декодерами, позволяя подавлять ошибки за один цикл преобразования. Вместо многократной постселекции, когда плохие состояния отбрасываются, здесь применяется активная коррекция ошибок, что обеспечивает постоянные накладные расходы. Таким образом, процесс становится не только более эффективным, но и масштабируемым.

Для проверки теоретических выводов команда провела серию математических и симуляционных экспериментов, подтвердивших устойчивость предложенной модели. Одним из ключевых этапов стало использование представления кудитов (например, 1024-уровневых систем) в виде наборов кубитов. Это позволило применить новые алгоритмы к практическим архитектурам квантовых машин, не теряя эффективности.

Значимость открытия трудно переоценить. Дистилляция магических состояний является узким местом в архитектуре отказоустойчивых квантовых компьютеров, а её оптимизация открывает путь к созданию более мощных и устойчивых систем. Постоянные накладные расходы означают, что увеличение сложности алгоритмов больше не приведёт к экспоненциальному росту вычислительных затрат.

Однако между теоретическим достижением и его практической реализацией остаются серьёзные технологические барьеры. Для применения нового метода потребуется огромное количество физических кубитов, которых пока нет в распоряжении существующих квантовых процессоров. Тем не менее, разработка математических основ и оптимальных кодов создаёт фундамент для будущих прорывов.

Исследователи отмечают, что понимание природы «магии» в квантовых вычислениях — не просто академическая задача, а основа создания универсальных систем. Разработка более устойчивых кодов и алгоритмов

коррекции ошибок позволит минимизировать потери данных, обеспечивая стабильное выполнение квантовых операций.

В дальнейшем планируется исследовать варианты оптимизации кодов, включая квантовые LDPC-коды (Low-Density Parity-Check), способные сочетать устойчивость и компактность, а также улучшить методы декодирования и трансформации кубитов в кубиты. Эти направления могут стать ключом к созданию масштабируемых квантовых систем, готовых к выполнению практических задач — от моделирования молекулярных структур до криптографического анализа и машинного обучения.

Работа MIT стала одним из редких примеров, когда фундаментальная теоретическая физика напрямую указывает путь к инженерным решениям. Достижение оптимального масштабирования дистилляции магических состояний не просто улучшает эффективность вычислений — оно поднимает весь уровень квантовой инженерии, приближая момент, когда универсальные квантовые компьютеры перестанут быть концепцией и станут инструментом реальной науки и технологий.

Ссылка: «Магическая дистилляция с постоянным верхним напором» DOI: [10.1038/s41567-025-03026-0](https://doi.org/10.1038/s41567-025-03026-0).