

Физики восстановили «второй закон» квантовых ресурсов, устранив пробел в фундаментальной теореме

Дата публикации: 31.12.2025

Физики сделали важный шаг в развитии квантовой теории информации, устранив давний недостаток в одном из её ключевых математических утверждений — обобщённой квантовой лемме Стайна. Эта теорема лежит в основе так называемых теорий квантовых ресурсов, которые описывают, какие преобразования между квантовыми состояниями возможны при строго ограниченном наборе допустимых операций. Новая работа не только закрывает обнаруженный ранее пробел в доказательстве, но и возвращает теории квантовых ресурсов строгий аналог второго закона термодинамики, давно ожидаемый физиками и математиками.

Квантовая теория информации изучает способы хранения, передачи и обработки информации с использованием квантово-механических эффектов. Именно она дала теоретическую базу для квантовых вычислений, квантовой криптографии и новых сенсорных технологий. Одним из центральных инструментов этой области являются ресурсные теории, в которых состояния рассматриваются как «ресурсы», а допустимые операции строго ограничены физическими или технологическими условиями. Примеры таких ресурсов включают запутанность, асимметрию, когерентность и термодинамическую неравновесность.

В 2008 году была предложена обобщённая квантовая лемма Стайна, которая формализовала задачу квантовой проверки гипотез в ситуациях, когда альтернативная гипотеза представляет собой не одно состояние, а целый класс допустимых состояний, например свободных от ресурса. Эта формулировка оказалась чрезвычайно влиятельной, поскольку позволяла связывать задачи различения квантовых состояний с фундаментальными ограничениями на преобразование ресурсов в асимптотическом режиме, то есть при большом числе копий состояний.

Однако спустя годы выяснилось, что в исходном доказательстве существует математический пробел. Его наличие означало, что целый пласт работ, опирающихся на эту теорему, находился под вопросом. Проблема была связана с тонкими свойствами составной альтернативной гипотезы и набором условий, при которых доказательство действительно работает. Ошибка стала широко обсуждаться после анализа, проведённого Марко Томамихелем из National University of Singapore, а затем была подробно разобрана в последующих

публикациях.

Решение этой проблемы предложили Масахито Хаяси и Хаята Ямасаки, работающие в Chinese University of Hong Kong, Shenzhen и University of Tokyo. Их статья была опубликована в журнале Nature Physics и стала важным событием для всего сообщества специалистов по квантовой информации. Авторы не просто устранили пробел, а предложили более аккуратную и универсальную математическую конструкцию, в которой часть из ранее считавшихся обязательными условий оказалась избыточной.

Ключевым результатом работы стало строгое доказательство того, что регуляризованная относительная энтропия квантового ресурса выступает в роли полной характеристики асимптотической конвертируемости между квантовыми состояниями. Проще говоря, если одно состояние можно преобразовать в другое с ненулевой скоростью при допустимых операциях, то это полностью определяется значением соответствующей энтропийной меры. По смыслу это утверждение полностью аналогично второму закону термодинамики, где энтропия определяет направление и возможность термодинамических процессов.

Авторы показали, что даже в сложных случаях, когда число собственных значений квантовых состояний растёт слишком быстро и стандартные методы становятся неприменимыми, задачу можно корректно обработать с помощью специальных аппроксимаций. Эти методы позволяют заменить исходные операторы на математически более управляемые, не меняя при этом физического смысла задачи. В результате доказательство сохраняет строгость и применимость к широкому классу квантовых систем.

Исправленная формулировка обобщённой квантовой леммы Стайна имеет далеко идущие последствия. Она возвращает теории квантовых ресурсов внутреннюю согласованность, даёт единый язык для обсуждения скоростей преобразования различных ресурсов и создаёт прочную математическую основу для проектирования будущих квантовых технологий. В практическом плане это важно для оценки предельных возможностей квантовых алгоритмов, оптимизации протоколов и более точного понимания того, какие преобразования принципиально достижимы, а какие запрещены фундаментальными законами.

Работа Хаяси и Ямасаки также подчёркивает, насколько тесно переплетены абстрактная математика и прикладная квантовая инженерия. Исправление, которое на первый взгляд кажется сугубо теоретическим, напрямую влияет на то, как исследователи будут описывать и сравнивать квантовые ресурсы в реальных устройствах. Восстановив «второй закон» квантовых ресурсов, физики

сделали важный шаг к более зрелой и надёжной теории квантовой информации, способной служить фундаментом для следующего поколения квантовых технологий.

Ссылка: «Обобщенная квантовая лемма Стайна и Второй закон квантовых ресурсных теорий» DOI: [10.1038/s41567-025-03047-9](https://doi.org/10.1038/s41567-025-03047-9).