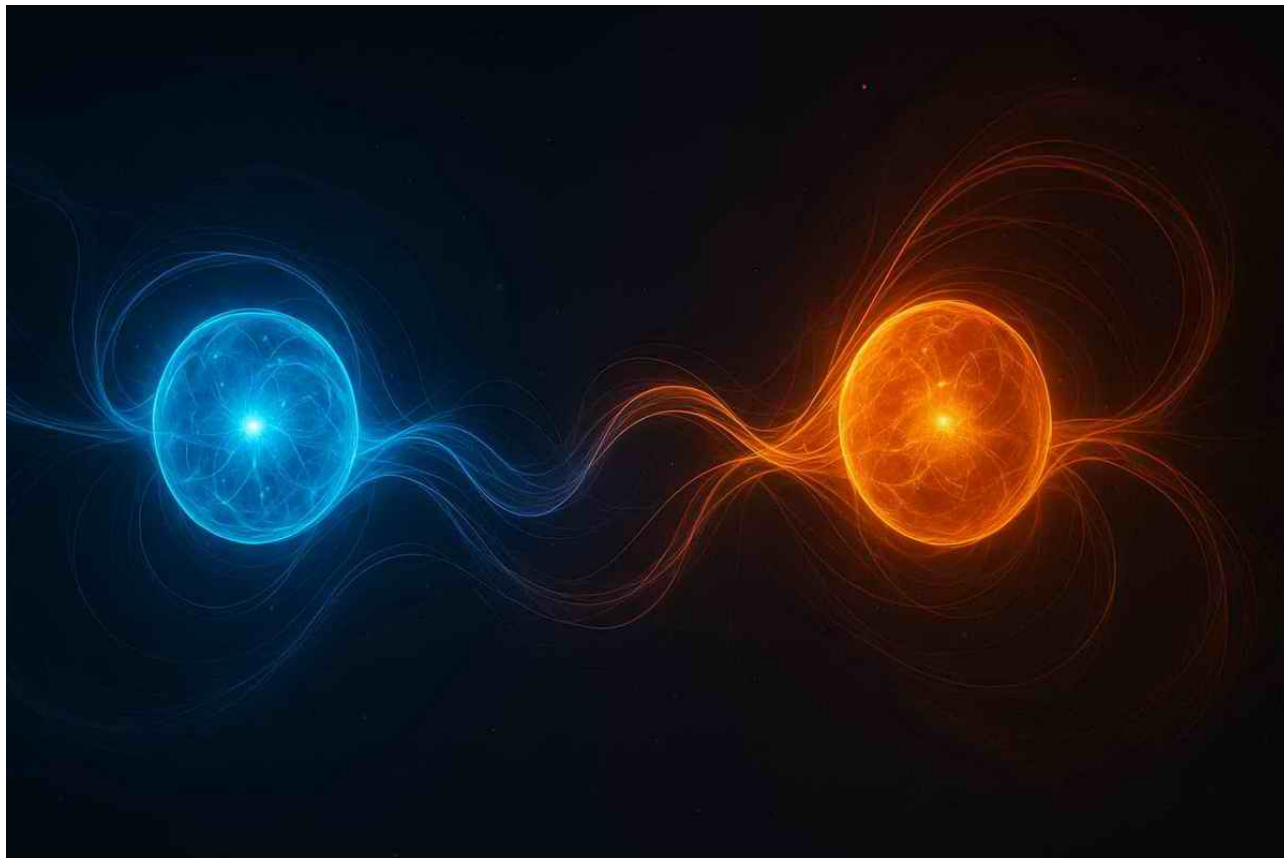


Квантовый эквивалент второго закона термодинамики: как батарея запутанности меняет представление о квантовой обратимости



Дата публикации: 04.07.2025

Спустя два столетия после формулировки второго закона термодинамики Сади Карно, физики предложили его квантовый аналог — закон, описывающий возможность обратимой манипуляции квантовой запутанностью. Это открытие устраняет одно из фундаментальных ограничений в квантовой информатике, где до недавнего времени считалось, что запутанность, в отличие от тепла, не может быть преобразована без потерь между различными квантовыми состояниями.

Запутанность — одна из самых загадочных и мощных особенностей квантовой механики. Она обеспечивает корреляции между частицами на любом расстоянии, лежит в основе квантовой телепортации, защищённой связи и вычислений. До сих пор существовали глубокие теоретические параллели между запутанностью и термодинамическими процессами, включая понятия квантовой энтропии и ресурсов. Однако отсутствие полноценного аналога второго закона термодинамики, устанавливающего пределы обратимости процессов, оставалось открытым вопросом.

Международная группа исследователей показала, что с помощью дополнительной запутанной системы — так называемой «батареи запутанности» — можно реализовать полностью обратимые преобразования запутанных состояний. Эта батарея, по сути, выполняет роль хранилища ресурса запутанности, аналогично тому, как классическая батарея хранит и отдаёт энергию. Условие лишь одно: уровень запутанности внутри батареи не должен снижаться в процессе преобразования.

Работа построена на ограничениях LOCC — локальных операций и классической связи, в которых две стороны (Алиса и Боб) не могут напрямую воздействовать на общую запутанность. В этом ограниченном сценарии большинство манипуляций запутанностью необратимы. Но введение батареи запутанности радикально меняет картину. Исследователи доказали, что любое смешанное квантовое состояние можно перевести в другое и вернуть обратно без потерь, используя этот дополнительный ресурс.

Значимость открытия выходит далеко за рамки теории запутанности. Оно формирует фундаментальную основу для систематического описания обратимости в различных квантовых ресурсах: когерентности, свободной энергии, квантовой информации. Появляется возможность построения «батарей ресурсов», каждая из которых обеспечивает обратимое управление конкретной характеристикой квантовой системы, не разрушая её. Это не только теоретический инструмент, но и потенциальный путь к созданию новых квантовых устройств, способных эффективно управлять сложными состояниями.

Методика, предложенная в исследовании, позволяет рассматривать обратимость как универсальный принцип в квантовой физике. Это открывает дорогу к построению нового, более общего формализма квантовой термодинамики, в котором любые преобразования ресурсов могут быть оценены, оптимизированы и полностью контролируемы. Таким образом, батарея запутанности становится не просто метафорой, а ключом к пониманию глубинных законов обратимости во вселенной, где квантовая информация — столь же важна, как энергия или материя.

Ссылка: «Второй закон запутывания. Манипулирование с помощью батареи запутывания.» DOI: [10.1103/kl56-p2vb](https://doi.org/10.1103/kl56-p2vb)