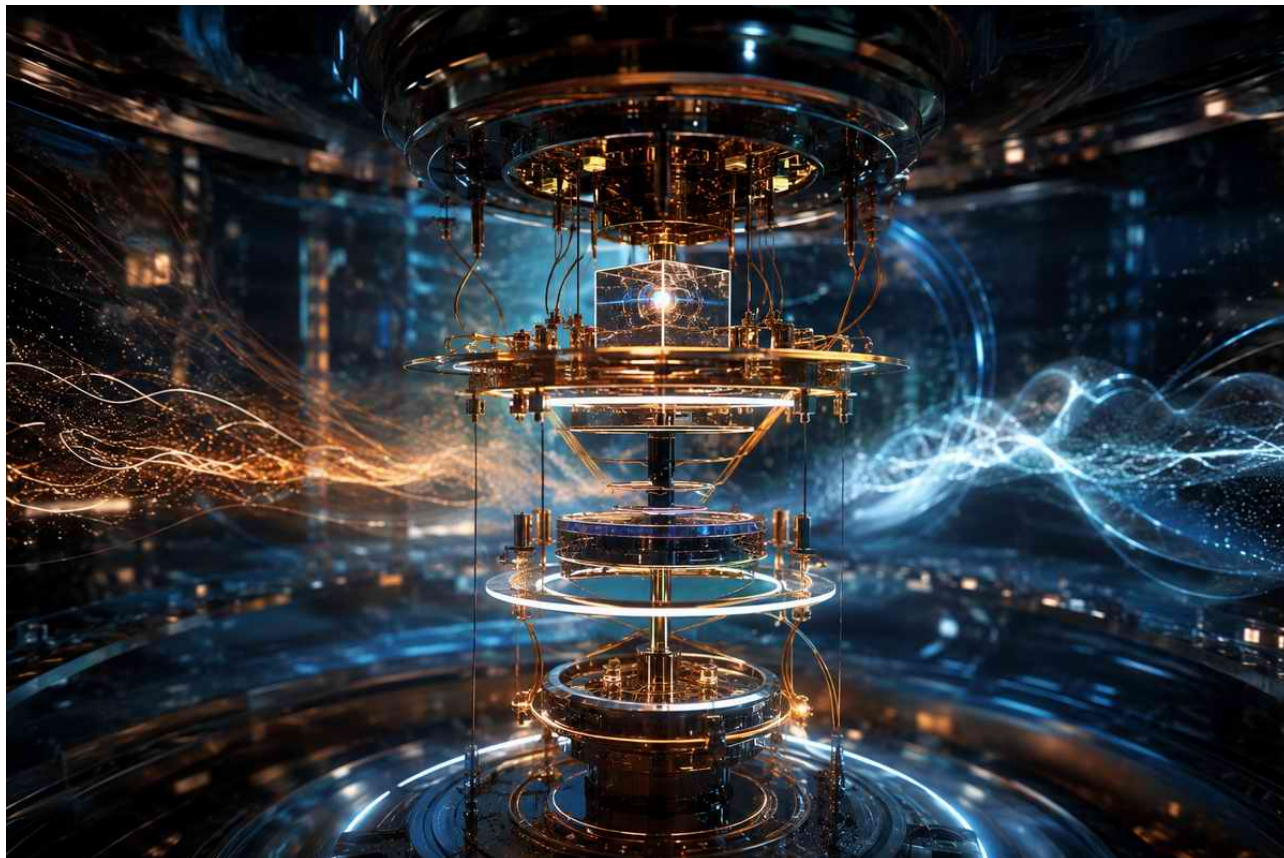


Создан первый сверхпроводящий квантовый тепловой двигатель, который может ускорить развитие квантовых компьютеров



Дата публикации: 13.07.2026

Физики сделали важный шаг на пути к созданию более мощных и масштабируемых квантовых компьютеров. Исследователи из Университета Аалто впервые в мире продемонстрировали работу циклического сверхпроводящего квантового теплового двигателя — устройства, которое использует тепловую энергию на квантовом уровне для выполнения полезной работы. Результаты исследования опубликованы в журнале Nature Communications и открывают новое направление в быстро развивающейся области квантовой термодинамики.

Работа объединяет сразу две фундаментальные области физики. С одной стороны находится квантовая механика, описывающая поведение частиц в микромире, где действуют суперпозиция, квантовая запутанность и туннелирование. С другой — классическая термодинамика, объясняющая превращение тепла в механическую работу и лежащая в основе практически всей современной энергетики. До недавнего времени связь между этими двумя теориями оставалась во многом неясной.

Именно тепловые двигатели стали одной из важнейших технологий в истории человечества. Паровые машины, двигатели внутреннего сгорания и газовые турбины работают по одному принципу — преобразуют тепловую энергию в полезную работу. Благодаря им движутся автомобили, самолеты и морские суда, а большинство электростанций производят электроэнергию.

Однако на квантовом уровне привычные законы начинают работать иначе. При температурах, близких к абсолютному нулю, энергия отдельных квантовых объектов становится сопоставимой с тепловыми флуктуациями, а процессы начинают подчиняться законам квантовой механики. Именно поэтому создание настоящего квантового теплового двигателя долгое время считалось одной из наиболее сложных задач современной экспериментальной физики.

Исследователи Университета Аалто сумели решить эту проблему, разработав миниатюрную сверхпроводящую систему, состоящую из трансмонного кубита, микроволнового резонатора и специального квантового холодильника. Вместе эти элементы образуют полноценную тепловую машину, работающую в условиях экстремально низких температур.

Трансмонный кубит сегодня считается одним из наиболее перспективных строительных блоков квантовых компьютеров. В отличие от классического бита, принимающего только значения 0 или 1, кубит способен одновременно находиться сразу в нескольких квантовых состояниях благодаря явлению суперпозиции. Именно эта особенность обеспечивает огромный вычислительный потенциал будущих квантовых систем.

Эксперимент проводился внутри криостата — установки, охлаждающей оборудование практически до абсолютного нуля. В таких условиях исчезает электрическое сопротивление, материалы переходят в сверхпроводящее состояние, а квантовые эффекты становятся достаточно устойчивыми для проведения точных экспериментов.

В основе работы нового устройства лежит цикл Отто — один из классических термодинамических процессов, который используется, например, в бензиновых двигателях внутреннего сгорания. Ученым удалось впервые реализовать аналогичный цикл внутри сверхпроводящей квантовой схемы, где вместо поршней и цилиндров работают квантовые состояния кубита.

Главной особенностью новой установки стал необычный квантовый холодильник. В обычных тепловых машинах используются два независимых резервуара — горячий и холодный. В новой системе оба режима обеспечивает одно и то же устройство. В зависимости от управляющих сигналов холодильник способен поочередно нагревать или охлаждать кубит, создавая полный

термодинамический цикл.

Во время экспериментов исследователи синхронно управляли состоянием кубита и контролировали перенос тепла через него. Измерения показали, что система действительно преобразует тепловую энергию в положительную работу, полностью соответствуя принципам работы настоящего теплового двигателя.

Это стало первой экспериментальной демонстрацией циклического сверхпроводящего квантового теплового двигателя. До настоящего времени подобные устройства существовали преимущественно в виде теоретических моделей или отдельных экспериментальных элементов, не образующих полноценный рабочий цикл.

Открытие представляет интерес не только для фундаментальной науки. Одной из главных проблем современных квантовых компьютеров остается чрезвычайно сложная инфраструктура управления кубитами. Каждый кубит требует передачи большого количества управляющих микроволновых сигналов через специальные кабели, соединяющие комнатную температуру с глубоко охлажденными квантовыми процессорами.

По мере роста числа кубитов эта проблема становится все более серьезной. Если современные экспериментальные компьютеры содержат десятки или сотни кубитов, то будущие универсальные квантовые машины потребуют уже сотен тысяч физических кубитов для реализации примерно тысячи надежных логических кубитов с коррекцией ошибок.

При использовании существующих технологий для такой системы могут понадобиться миллионы микроволновых кабелей. Помимо огромной стоимости, подобная архитектура усложняет охлаждение процессора, увеличивает уровень шумов и существенно ограничивает масштабирование квантовых вычислений.

Именно здесь квантовые тепловые двигатели могут сыграть неожиданно важную роль. Исследователи рассчитывают создать полностью автономные устройства, которые смогут выполнять часть операций по управлению и считыванию кубитов непосредственно внутри криогенной системы без передачи большого количества сигналов извне.

Если подобный подход удастся реализовать, архитектура будущих квантовых компьютеров станет значительно проще. Уменьшится количество соединительных кабелей, снизится энергопотребление, сократятся тепловые помехи, а сами квантовые процессоры станут значительно легче масштабировать.

Кроме практических преимуществ, новая работа имеет большое значение для

фундаментальной физики. Она демонстрирует, что классические законы термодинамики продолжают действовать даже в мире отдельных квантовых объектов, хотя проявляются там совершенно необычным образом. Подобные исследования постепенно формируют новую научную область — квантовую термодинамику, которая изучает преобразование энергии на уровне отдельных квантовых систем.

Перспективные направления применения технологии: масштабируемые квантовые компьютеры, автономное управление кубитами, квантовые холодильники, сверхпроводящие вычислительные системы, квантовые сенсоры, энергоэффективные квантовые процессоры, фундаментальная квантовая термодинамика и разработка новых архитектур квантовых вычислений.

В настоящее время исследовательская группа продолжает совершенствовать конструкцию двигателя. Следующим этапом станет создание полностью автономной версии устройства, способной работать без внешнего управления. Подобная технология может стать одним из ключевых элементов будущих квантовых вычислительных систем, где количество кубитов будет измеряться уже не сотнями, а сотнями тысяч.

Хотя до появления массовых универсальных квантовых компьютеров остается еще немало инженерных задач, новая разработка показывает, что решения могут прийти не только из области вычислительной техники, но и из фундаментальной физики. Первый сверхпроводящий квантовый тепловой двигатель стал еще одним примером того, как изучение базовых законов природы постепенно превращается в основу технологий следующего поколения.

Ссылка: «Первая демонстрация квантового теплового двигателя на основе сверхпроводящих цепей с управляемым рассеянием» [DOI: 10.1038/s41467-026-72651-x](https://doi.org/10.1038/s41467-026-72651-x).