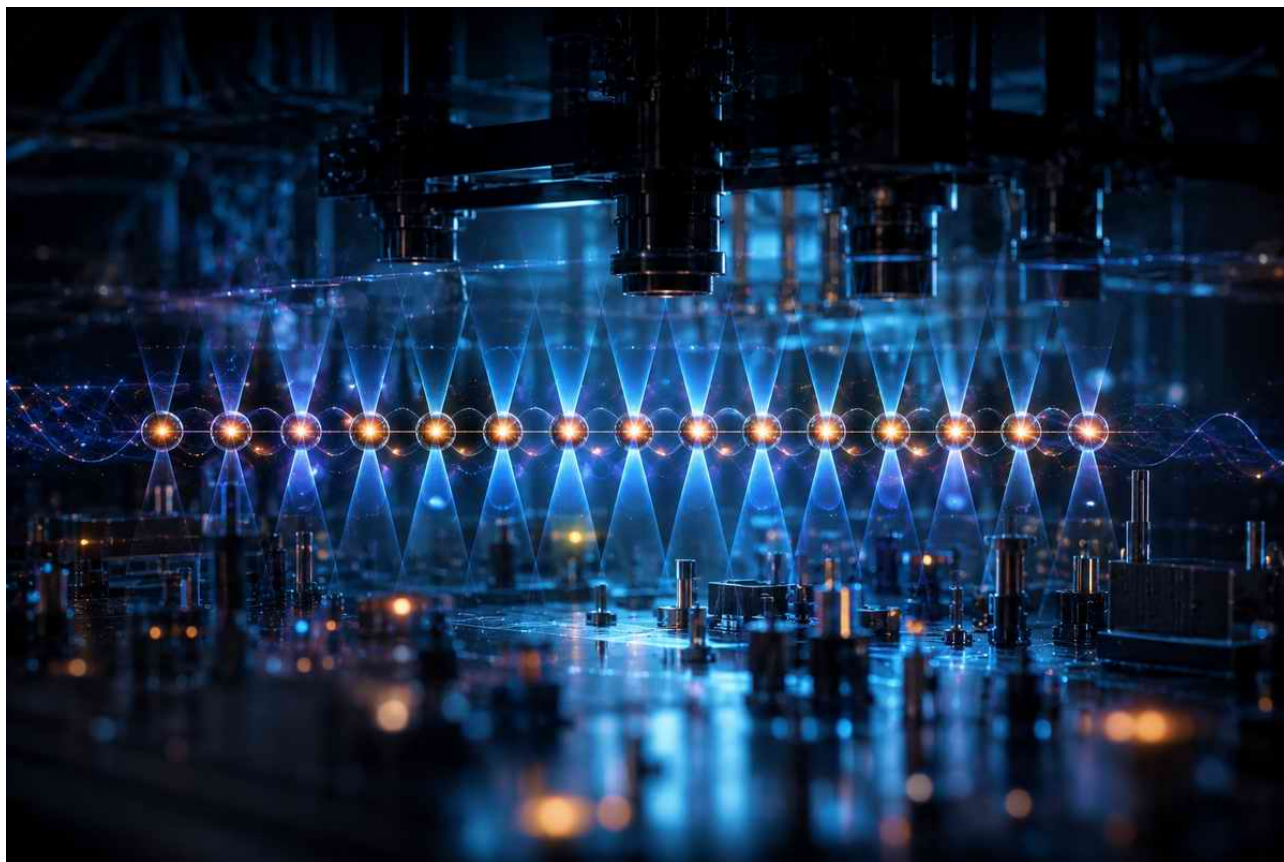


Физики впервые измерили универсальную энергетическую лестницу квантовой материи



Дата публикации: 20.08.2026

В физике существует удивительное явление: совершенно разные системы при определенных условиях могут внезапно начать подчиняться одинаковым математическим законам. Микроскопические различия словно перестают иметь значение, а поведение вещества определяется несколькими фундаментальными характеристиками. Этот принцип называется универсальностью, и теперь ученым впервые удалось непосредственно увидеть одно из его важнейших проявлений в искусственно созданной квантовой материи.

Исследователи Калифорнийского технологического института вместе с коллегами из Европы использовали квантовый симулятор на основе нейтральных атомов. С его помощью они экспериментально воспроизвели две известные конформные теории поля и измерили энергетические уровни, существование и точные соотношения которых физики рассчитывали теоретически на протяжении десятилетий.

Универсальность встречается и в более привычной физике. Когда вещество

приближается к критической точке фазового перехода, множество деталей его микроскопического устройства может перестать определять общую картину. Разные материалы начинают демонстрировать сходные закономерности. Это позволяет описывать чрезвычайно сложные системы с помощью относительно компактного набора математических правил.

В новом эксперименте ученых интересовал квантовый фазовый переход. В отличие от кипения воды или плавления льда, он происходит не из-за повышения температуры. Такие переходы возникают благодаря квантовым эффектам при температурах, близких к абсолютному нулю, когда суперпозиция, запутанность и взаимодействия между частицами начинают определять состояние всей системы.

Для описания поведения материи около подобных критических точек используются конформные теории поля. Они предсказывают не просто существование определенных возбуждений, но и точные отношения между их энергиями. Если представить эти состояния как ступени лестницы, теория сообщает, на каком расстоянии друг от друга должны располагаться ступени.

Математически такая энергетическая лестница была известна около четырех десятилетий, однако непосредственно измерить ее в подходящей управляемой квантовой системе до сих пор не удавалось. Именно эту задачу решила международная команда, используя технологии, первоначально развивавшиеся для создания квантовых компьютеров.

Экспериментальная установка состояла из атомов стронция, расположенных в линию. Каждый атом удерживался сфокусированным лазерным лучом — так называемым оптическим пинцетом. Такая технология позволяет физикам практически поштучно собирать искусственную квантовую материю и точно управлять ее отдельными элементами.

Затем атомы переводили в высокоэнергетические состояния Ридберга. В них электрон находится значительно дальше от ядра, благодаря чему взаимодействие соседних атомов резко усиливается. В результате цепочка перестает вести себя как набор независимых частиц и превращается в коллективную квантовую систему.

Настраивая лазеры, исследователи приводили ее к критической точке между более и менее упорядоченными состояниями. После этого начинался своеобразный поиск резонансов. Лазерное поле периодически изменяли на разных частотах и наблюдали, насколько сильно реагирует вся атомная цепочка.

Принцип можно сравнить с бокалом, который начинает звучать, если воздействовать на него с подходящей частотой. В квантовой системе

определенные частоты соответствуют переходам между энергетическими уровнями. Последовательно перебирая их и регистрируя пики реакции, физики смогли восстановить структуру энергетической лестницы.

Эксперименты проводились с цепочками длиной до 35 атомов. После учета размера системы полученные спектры совпали с предсказаниями конформной теории поля Изинга. Затем исследователи изменили параметры установки и перевели систему в более сложную трикритическую точку Изинга. Здесь возникла другая последовательность энергетических уровней — и она снова соответствовала теоретическим расчетам.

Возможности атомного симулятора позволили пойти дальше обычной спектроскопии. Поскольку каждый атом доступен для индивидуального наблюдения, ученые смогли разделить возбуждения по симметрии и обнаружить дополнительное семейство энергетических уровней, которое оставалось скрытым при первоначальном измерении. Изменение условий на концах атомной цепочки также перестраивало спектр именно так, как предсказывала теория.

Эксперимент важен не потому, что физики сомневались в существовании этих математических закономерностей. Он показывает, что квантовые симуляторы становятся полноценными лабораториями для проверки фундаментальной теоретической физики. Систему можно собрать из отдельных атомов, настроить взаимодействия, приблизить к критическому состоянию и буквально измерить свойства абстрактной теории.

Следующим этапом станут более крупные массивы и переход от одномерных цепочек к двумерным решеткам атомов. Здесь ситуация становится значительно интереснее, поскольку многие двумерные квантовые системы уже невозможно настолько подробно рассчитать традиционными методами.

В перспективе тот же подход можно применить там, где точного теоретического ответа вообще не существует. Тогда квантовый симулятор перестанет быть устройством для проверки известных формул и станет инструментом исследования неизвестной квантовой материи, включая режимы, моделирование которых оказывается чрезвычайно сложным даже для мощных классических компьютеров.

Ссылка: «Наблюдение спектров конформной теории поля в квантовом симуляторе» DOI: [10.1038/s41586-026-10904-x](https://doi.org/10.1038/s41586-026-10904-x).