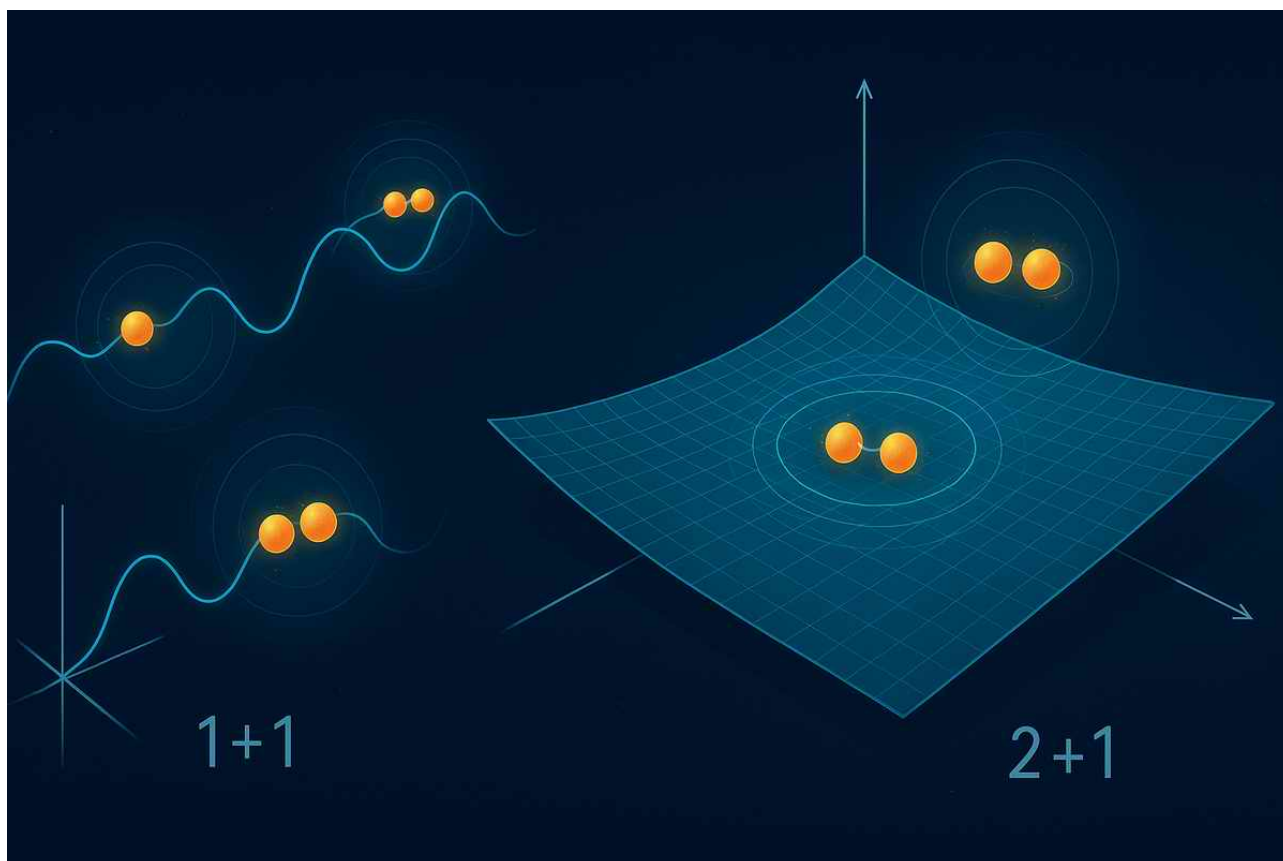


## Физики открыли универсальные законы квантовой запутанности во всех измерениях пространства-времени



Дата публикации: 07.08.2025

Исследователи из Японии и США совершили теоретический прорыв, показав, что фундаментальный феномен квантовой запутанности подчиняется универсальным закономерностям независимо от размерности пространства-времени. Группа под руководством Юи Кусуки из Университета Кюсю, при участии профессора Хироши Оогури и исследователя Шридипа Пала из Калифорнийского технологического института, применила методы из физики элементарных частиц для анализа квантовой теории информации в многомерных системах. Это позволило выйти за пределы прежних ограничений, сосредоточенных в основном на (1+1) мерных теориях, и обобщить результаты на произвольное число измерений.

В центре работы — энтропия Реньи, количественная мера квантовой запутанности, играющая ключевую роль в классификации квантовых состояний и анализе сложных квантовых систем. Авторы использовали тепловую эффективную теорию — подход, изначально разработанный для анализа

взаимодействий в высокоэнергетической физике, — чтобы исследовать поведение энтропии Реньи в режиме малого числа реплик. Они показали, что в этом режиме все особенности запутанности определяются всего несколькими универсальными параметрами, включая энергию Казимира, которая отражает флуктуации вакуума в ограниченных геометриях.

Одним из достижений стало описание спектра запутанности — распределения собственных значений по подсистеме — в области крупных значений, где ранее было сложно получить аналитические результаты. Кроме того, исследователи проанализировали, как выбор метода расчёта влияет на наблюдаемое поведение энтропии Реньи, что позволило выделить инвариантные закономерности, независимые от деталей подхода.

Полученные результаты открывают новый путь для изучения многомерных квантовых систем и обладают высоким потенциалом для приложений в квантовой теории поля, теории гравитации и даже в квантовой космологии. С помощью универсальных характеристик запутанности можно строить более точные модели сложных взаимодействий, выявлять критические точки в фазовых переходах и находить связи между квантовой информацией и геометрией пространства-времени. Особенно важным направлением станет дальнейшее исследование связи между запутанностью и фундаментальными аспектами квантовой гравитации, включая проблему потери информации в черных дырах.

Новый термодинамический взгляд на квантовую запутанность также позволяет применять методы статистической физики к задачам квантовой информации. Это делает возможным не только теоретическое описание сложных квантовых состояний, но и потенциальную реализацию таких структур в квантовых вычислениях и коммуникациях. Универсальность открытых закономерностей делает их особенно ценными, поскольку они не зависят от конкретной модели, а отражают фундаментальные свойства многомерных квантовых полей.

Дальнейшее развитие этой теории, как надеются авторы, позволит расширить её применимость к более общим геометриям, включая кривизну пространства и топологические особенности. Это, в свою очередь, может пролить свет на фундаментальные свойства материи, взаимодействий и пространства-времени на самых глубоких уровнях, от микроскопических масштабов до масштабов Вселенной.

**Ссылка:** «Универсальность энтропии Реньи в конформных теориях поля»»

DOI: 10.1103/fsg7-bs7q.