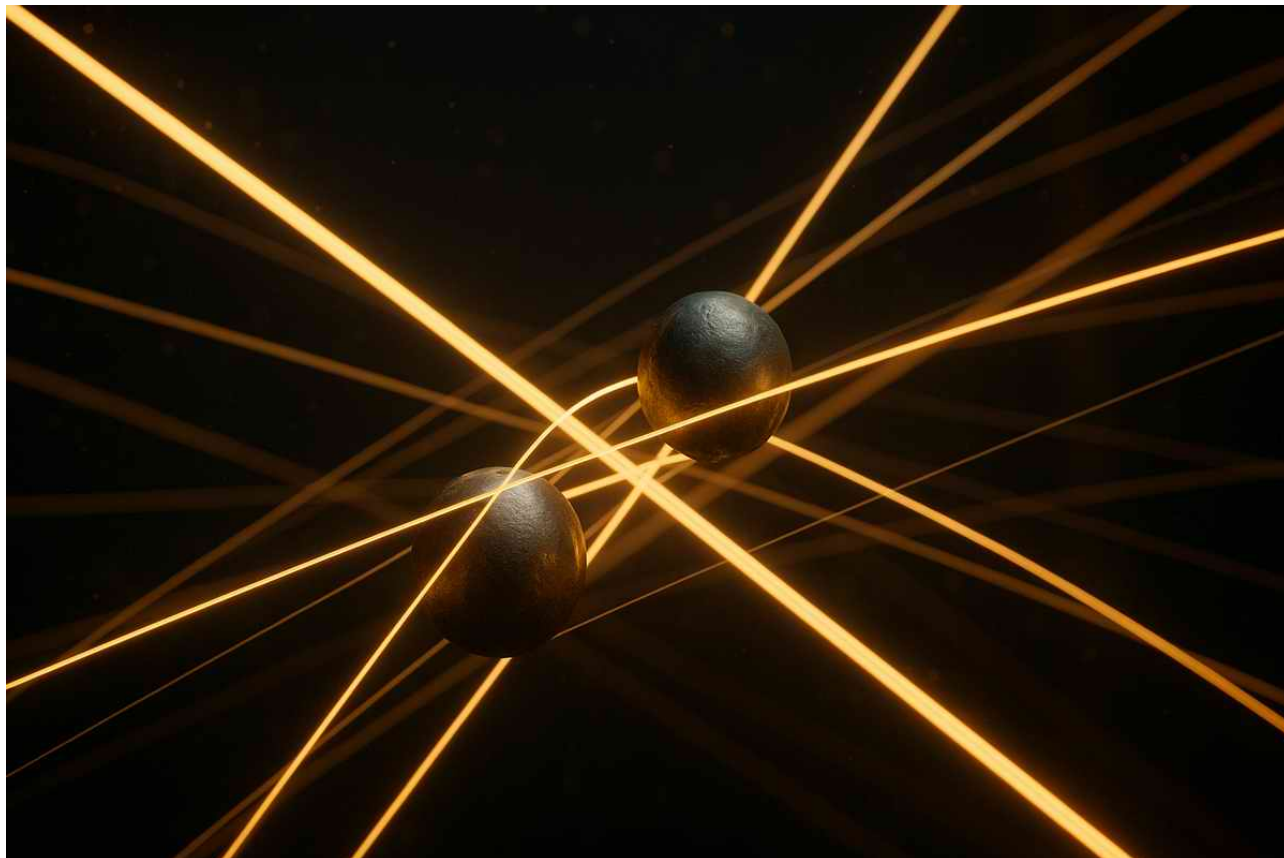


Квантовая запутанность подчиняется универсальным законам независимо от числа измерений



Дата публикации: 20.08.2025

Квантовая запутанность, одна из самых загадочных и фундаментальных особенностей квантовой механики, продолжает удивлять даже специалистов. Недавнее исследование продемонстрировало, что поведение запутанных систем подчиняется универсальным законам, действующим одинаково во всех измерениях пространства-времени. Для анализа был применён новый метод — тепловая эффективная теория, которая позволила свести сложную квантовую физику к более прозрачным формулам.

Запутанность играет центральную роль в квантовых вычислениях, криптографии и исправлении ошибок, поэтому понимание её структуры — ключ к развитию будущих технологий. Учёные показали, что стандартная мера запутанности — энтропия Реньи — имеет универсальную форму в пределе малых значений параметра n , когда рассматриваемая область окружена сферической границей. Этот результат справедлив в любых измерениях, допускающих описание через конформную теорию поля.

Главное открытие заключается в том, что зависимость при малых n определяется всего одной универсальной константой из эффективной теории и площадью границы выбранной области. Такое упрощение даёт ясный ориентир: несмотря на всю сложность квантовых систем, фундаментальные принципы их запутанности не зависят от деталей конкретной модели.

Особое значение имеет подтверждение так называемого «закона площади». Запутанность в большинстве квантовых систем масштабируется не с объёмом системы, а с размером её границы. Это свойство давно используется для разработки алгоритмов симуляции квантовых материалов, и теперь получено более строгие теоретические доказательства его универсальности.

Энтропия Реньи позволяет «снять спектр запутанности» — распределение эффективных уровней энергии, определяющих, как информация закодирована в подсистеме. Эти уровни связаны с модульным гамильтонианом, оператором, чьи собственные значения задают структуру редуцированного состояния. Используя тепловую эффективную теорию, исследователи смогли подсчитать, сколько уровней запутанности находится выше заданного порога, что делает процесс более управляемым и понятным.

В двумерных системах подобные задачи иногда удаётся решать точно благодаря высокой симметрии, но в трёх и более измерениях кривизна и граничные эффекты вносят дополнительные сложности. Новая работа показывает, что универсальность сохраняется и в этих случаях, но строгие методы, применимые в 2D, уже не работают напрямую. Таким образом, удалось провести границу между свойствами, которые гарантированы низкоразмерной симметрией, и свойствами, присущими любой многомерной системе.

Практическая ценность этих результатов огромна. Универсальные формулы позволяют более эффективно строить численные методы — тензорные сети, алгоритмы Монте-Карло и другие подходы, где критично учитывать геометрию и запутанность. Более того, энтропии Реньи напрямую связаны с голографическими принципами, которые объединяют квантовую теорию поля и гравитацию, переводя понятия запутанности в геометрию многомерного пространства-времени.

Это открывает перспективы не только для квантовых технологий, но и для фундаментальной физики. Универсальные характеристики запутанности могут стать своеобразными «отпечатками пальцев» фаз материи, помогая классифицировать состояния, а также точнее сопоставлять результаты квантовых симуляторов с поведением реальных материалов.

Таким образом, исследование показывает, что квантовая запутанность —

несмотря на её сложность и многослойность — подчиняется универсальным правилам, которые действуют одинаково во всех измерениях. Этот результат укрепляет фундаментальные основы квантовой информации и создаёт прочный мост между абстрактной теорией и практическими приложениями в области вычислений, криптографии и голографической гравитации.