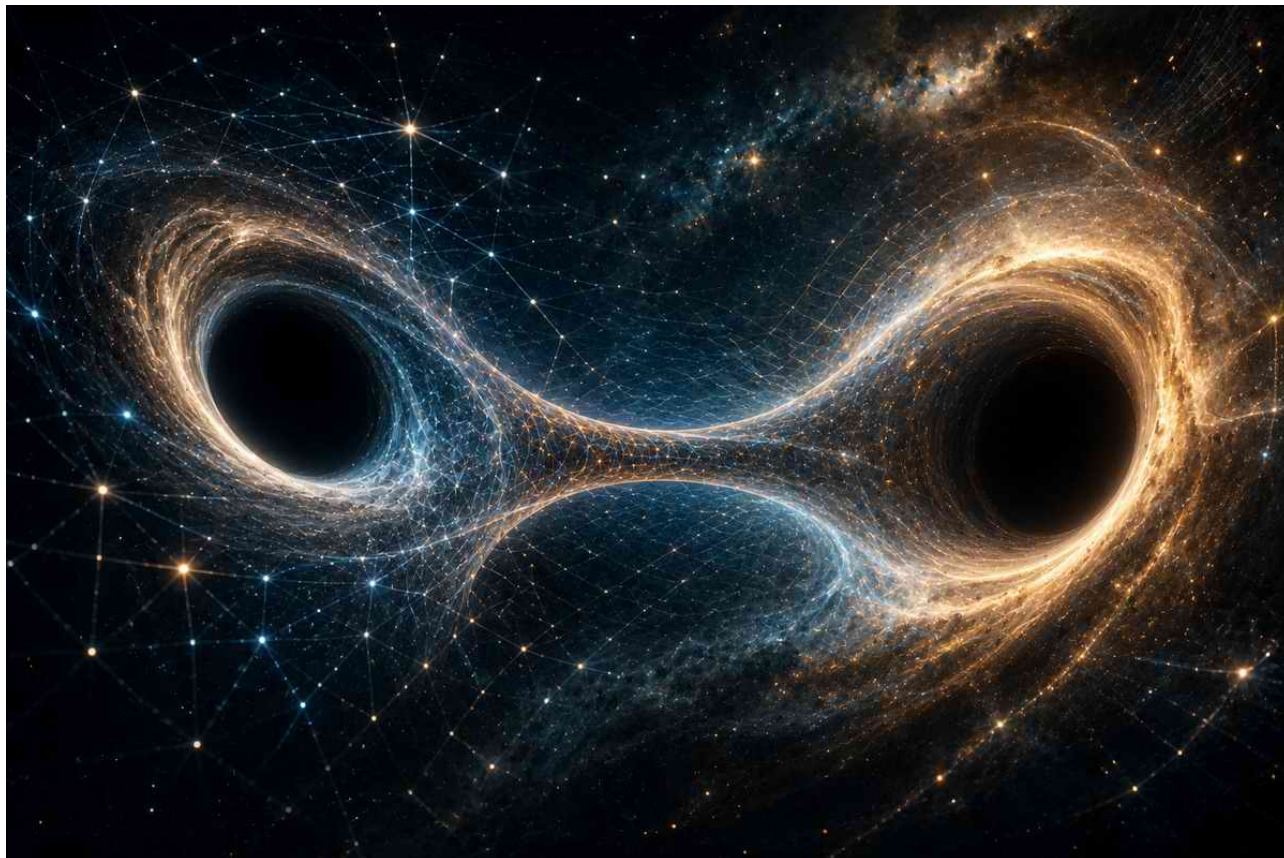


От кротовых нор к квантовой информации: как гипотеза $ER=EPR$ меняет представления о пространстве и времени



Дата публикации: 12.07.2026

В 2013 году физики Хуан Малдасена и Леонард Сасскинд предложили гипотезу, которая стала одной из самых необычных идей современной теоретической физики. Она получила название $ER=EPR$ и объединила две знаменитые концепции XX века. Первая — мосты Эйнштейна—Розена, или кротовые норы, представляющие собой гипотетические туннели в пространстве-времени. Вторая — пары Эйнштейна—Подольского—Розена, то есть квантово-запутанные частицы, свойства которых оказываются неразрывно связанными независимо от расстояния между ними. Согласно гипотезе, эти явления являются двумя различными описаниями одной и той же фундаментальной структуры.

Если две чёрные дыры находятся в квантово-запутанном состоянии, то между ними существует мост Эйнштейна—Розена, даже если их разделяют миллионы или миллиарды километров. Такой туннель не позволяет путешествовать быстрее света и не нарушает причинность, однако представляет собой

геометрическое выражение квантовой связи. В этой картине пространство перестаёт быть заранее существующей ареной, на которой происходят события. Напротив, сама геометрия Вселенной возникает благодаря квантовой запутанности, а гравитация оказывается не фундаментальной силой природы, а эмерджентным явлением, возникающим из более глубокой структуры квантовой информации.

Долгое время эта гипотеза изучалась почти исключительно на одном идеализированном примере — термополевом двойном состоянии. В такой модели две чёрные дыры являются почти зеркальными копиями друг друга и соединены короткой, гладкой и идеально симметричной кротовой норой. Математически это чрезвычайно удобная конструкция, однако физики давно понимали, что она скорее исключение, чем правило. Реальные квантовые состояния редко бывают столь упорядоченными. В большинстве случаев они хаотичны, содержат огромное количество случайных флуктуаций и практически никогда не обладают идеальной симметрией.

Именно этот вопрос стал предметом исследования группы Брайана Суингла из Университета Брандейса в 2025 году. Учёные решили выяснить, существует ли геометрический аналог не только для идеально организованной запутанности, но и для обычных хаотических квантовых состояний. Ответ оказался неожиданно положительным. Исследователи показали, что если постепенно добавлять к идеальной системе случайные квантовые возмущения, запутанное состояние усложняется, а соединяющая две чёрные дыры кротовая нора начинает изменять свою форму.

Короткий и гладкий туннель постепенно вытягивается, становится длиннее и приобретает сложную внутреннюю структуру. Его геометрия больше не напоминает идеально отполированную трубу, а превращается в извилистый проход с многочисленными неоднородностями, флуктуациями материи и энергии. Авторы назвали такой объект ER-гусеницей. Самым важным результатом стала найденная количественная зависимость: длина кротовой норы прямо пропорциональна степени хаотичности квантового состояния. Чем сложнее и случайнее оказывается запутанность, тем длиннее и запутаннее становится соответствующий пространственный туннель.

Эта работа значительно расширила гипотезу $ER=EPR$. Теперь она перестала описывать лишь идеальные математические конструкции и получила возможность распространяться на гораздо более широкий класс квантовых состояний, которые значительно ближе к тем, что могут существовать в реальной природе.

Не менее неожиданным стало появление связи между квантовой гравитацией

и физикой конденсированных сред. В 2025 году Сан-Джин Син и Или Ван исследовали системы, близкие к знаменитой модели Сахдеева—Йе—Китаева, которая давно рассматривается как одна из наиболее перспективных моделей квантовой гравитации. Они обнаружили, что пространственно-случайные взаимодействия между квантовыми степенями свободы создают своеобразные аналоги кротовых нор, обеспечивающие передачу импульса на больших расстояниях без привычного причинного подавления.

Исследователи показали, что существует два принципиально разных типа беспорядка. Пространственно-случайные взаимодействия сохраняют квантовую когерентность и формируют своеобразные «червоточины» внутри материала, тогда как пространственно-однородные взаимодействия, наоборот, приводят к декогеренции и разрушению квантовых связей. Такой результат оказался особенно важен для понимания природы странных металлов — материалов, сопротивление которых изменяется с температурой совсем не так, как предсказывает классическая теория. Именно существование подобных квантовых «туннелей» может объяснять наблюдаемую в этих материалах планковскую диссипацию, при которой время рассеяния электронов оказывается ограничено фундаментальными константами природы. Тем самым идеи, родившиеся в теории струн и исследованиях чёрных дыр, неожиданно начали объяснять свойства вполне реальных веществ.

Гипотеза $ER=EPR$ имеет и глубокое философское значение. На протяжении столетий пространство воспринималось как нечто существующее само по себе —местилище объектов и событий. Новая картина предлагает совершенно иной взгляд. Если пространство действительно возникает благодаря квантовой запутанности, то фундаментальными становятся не сами объекты, а связи между ними. Реальность оказывается построенной не из отдельных «вещей», а из отношений. Такой взгляд удивительно созвучен реляционной философии, согласно которой существование невозможно вне взаимодействий. То, что кажется нам независимыми объектами, может быть лишь проявлением более глубокой сети квантовых корреляций, из которой рождаются пространство, время и привычная геометрия Вселенной.

Ещё несколько лет назад подобные идеи воспринимались исключительно как красивые математические построения. Однако развитие квантовых технологий постепенно переводит их в область экспериментальной проверки. В 2025 году группа Марии Спиропулу из Калифорнийского технологического института использовала квантовый процессор Google Sycamore 2 для моделирования голографической кротовой норы. В ходе эксперимента исследователи смогли воспроизвести передачу квантовой информации через её модель, получив результаты, согласующиеся с предсказаниями голографического принципа. Хотя

речь идёт не о настоящей космической кротовой норе, а о её квантовой симуляции, подобные эксперименты позволяют проверять фундаментальные идеи квантовой гравитации в лабораторных условиях. Это делает гипотезу $ER=EPR$ не только предметом теоретических исследований, но и объектом экспериментальной физики.

Сегодня гипотеза $ER=EPR$ уже воспринимается как одна из наиболее перспективных попыток объединить квантовую механику и общую теорию относительности. Появление в 2025 году концепции ER-гусениц показало, что даже хаотическая квантовая запутанность может иметь собственный геометрический аналог, а исследования странных металлов продемонстрировали неожиданную связь между квантовой гравитацией и физикой реальных материалов. Всё это постепенно формирует новую картину мира, в которой пространство и время перестают быть фундаментальной данностью и рассматриваются как эмерджентные свойства квантовой информации. Независимо от того, подтвердится ли гипотеза $ER=EPR$ в полном объёме, она уже изменила ландшафт современной фундаментальной физики, объединив квантовую механику, гравитацию и теорию информации в единую концептуальную систему и напомнив, что устройство реальности может оказаться значительно более странным, взаимосвязанным и удивительным, чем подсказывает наш повседневный опыт.