

Пространственно-временной кристалл на грани чёрной дыры: физики приблизились к разгадке критического коллапса

Дата публикации: 12.06.2026

Современная физика продолжает открывать всё более необычные состояния материи и пространства-времени. Одним из самых загадочных объектов последних лет стал так называемый пространственно-временной кристалл — экзотическая структура, которая существует на тонкой границе между стабильным пространством и рождением чёрной дыры. Новое исследование европейских физиков позволило впервые получить точное математическое описание этого явления и приблизило науку к пониманию одного из самых сложных процессов общей теории относительности.

Чёрные дыры обычно ассоциируются с коллапсом массивных звёзд. Когда ядерное топливо внутри звезды исчерпывается, давление излучения перестаёт противостоять гравитации, и вещество начинает стремительно сжиматься. В результате может образоваться объект с настолько сильным гравитационным полем, что даже свет не способен его покинуть.

Однако теория относительности Альберта Эйнштейна допускает существование и других сценариев. В некоторых случаях чёрные дыры могут возникать без участия звёзд, исключительно за счёт сложной самоорганизации самого пространства-времени. Именно этот механизм лежит в основе явления, которое физики называют критическим коллапсом.

Критический коллапс представляет собой своеобразную точку равновесия между двумя различными исходами. С одной стороны, система может полностью рассеяться, возвращаясь к обычному состоянию пространства-времени. С другой стороны, малейшее дополнительное возмущение способно запустить необратимый процесс формирования чёрной дыры.

Подобные переходы хорошо известны и в повседневной жизни. Например, вода при температуре замерзания может оставаться жидкой до тех пор, пока не появится минимальное внешнее воздействие, после чего начинается быстрое образование льда. В физике такие состояния называют критическими, поскольку они находятся непосредственно на границе фазового перехода.

Исследователи предполагают, что пространство-время также способно проходить через аналогичные критические состояния. В определённых условиях искривления, создаваемые материей и энергией, могут самоорганизовываться в

необычную упорядоченную структуру. Вместо хаотического распределения возникает повторяющийся геометрический узор, напоминающий кристалл.

Именно поэтому объект получил название пространственно-временного кристалла. Хотя он не состоит из атомов, как обычные кристаллы, его структура также обладает высокой степенью порядка и симметрии. По сути, речь идёт о своеобразной «кристаллизации» самой геометрии пространства-времени.

Особенность такого состояния заключается в его крайней нестабильности. Пространственно-временной кристалл существует лишь в очень узком диапазоне параметров и напоминает шар, балансирующий на вершине холма. Любое минимальное изменение может привести либо к возвращению системы в обычное состояние, либо к формированию чёрной дыры.

Физики рассматривают этот объект как один из наиболее интересных примеров так называемого критического поведения в гравитации. Он демонстрирует, насколько сложными могут быть процессы, происходящие в пространстве-времени под действием сильных гравитационных полей.

Первые признаки существования критического коллапса были обнаружены ещё в 1993 году во время компьютерного моделирования. Тогда исследователи заметили удивительную закономерность: независимо от начальных условий образование чёрных дыр подчинялось универсальным математическим правилам вблизи критической точки.

Это открытие стало одним из самых интригующих результатов численной гравитации. Однако на протяжении более тридцати лет учёным не удавалось получить строгого аналитического объяснения наблюдаемого эффекта. Все знания основывались преимущественно на компьютерных расчётах и численных экспериментах.

Новая работа позволила преодолеть это ограничение. Исследователи нашли способ вывести точные математические формулы, описывающие поведение системы непосредственно в критической точке. Для этого был использован необычный подход, связанный с увеличением числа измерений пространства-времени.

На первый взгляд идея выглядит парадоксально. Наша Вселенная обладает тремя пространственными измерениями и одним временным. Однако математические уравнения общей теории относительности можно записывать и для пространства с произвольным числом измерений.

Оказалось, что в пределе очень большого количества измерений некоторые аспекты гравитации становятся значительно проще для анализа. То, что

выглядит практически неразрешимой задачей в четырёхмерной Вселенной, приобретает более понятную структуру в многомерных моделях.

Используя этот метод, исследователи смогли обнаружить закономерности, которые ранее оставались скрытыми. Полученные результаты не только объяснили старые компьютерные симуляции, но и открыли новые возможности для изучения процессов, связанных с чёрными дырами и экстремальной гравитацией.

Особый интерес вызывает тот факт, что критический коллапс может приводить к образованию очень маленьких чёрных дыр. В отличие от сверхмассивных объектов в центрах галактик, такие чёрные дыры могут быть значительно меньше атома. Хотя их существование пока не подтверждено наблюдениями, многие теоретические модели допускают возможность их появления в экстремальных условиях ранней Вселенной или при высокоэнергетических процессах.

Изучение пространственно-временных кристаллов также помогает лучше понять фундаментальную структуру пространства и времени. Некоторые физики предполагают, что подобные состояния могут играть важную роль в теориях квантовой гравитации, которые пытаются объединить общую теорию относительности с законами квантовой механики.

Не менее важным является и методологический аспект исследования. Полученный математический аппарат оказался необычайно устойчивым и допускает систематическое повышение точности расчётов. Это означает, что в будущем учёные смогут применять его для анализа широкого круга задач, связанных с сильной гравитацией.

Сегодня физика чёрных дыр остаётся одной из самых быстро развивающихся областей науки. Открытие гравитационных волн, первые изображения горизонта событий и новые теоретические модели постоянно расширяют представления о природе пространства-времени. Исследование пространственно-временных кристаллов добавляет ещё один важный элемент в эту картину.

Хотя подобные объекты пока существуют лишь в математических моделях, они демонстрируют удивительное богатство решений, скрытых в уравнениях Эйнштейна. Пространство-время оказывается гораздо более динамичной и сложной структурой, чем представлялось ещё несколько десятилетий назад. Новая работа показывает, что между обычной геометрией Вселенной и рождением чёрной дыры может существовать целый мир экзотических состояний, которые только начинают открываться современной науке.

Ссылка: «Аналитические дискретные самоподобные решения уравнения Эйнштейна-Клейна-Гордона при большом D » DOI: [10.1103/qgl5-5l3t](https://doi.org/10.1103/qgl5-5l3t).