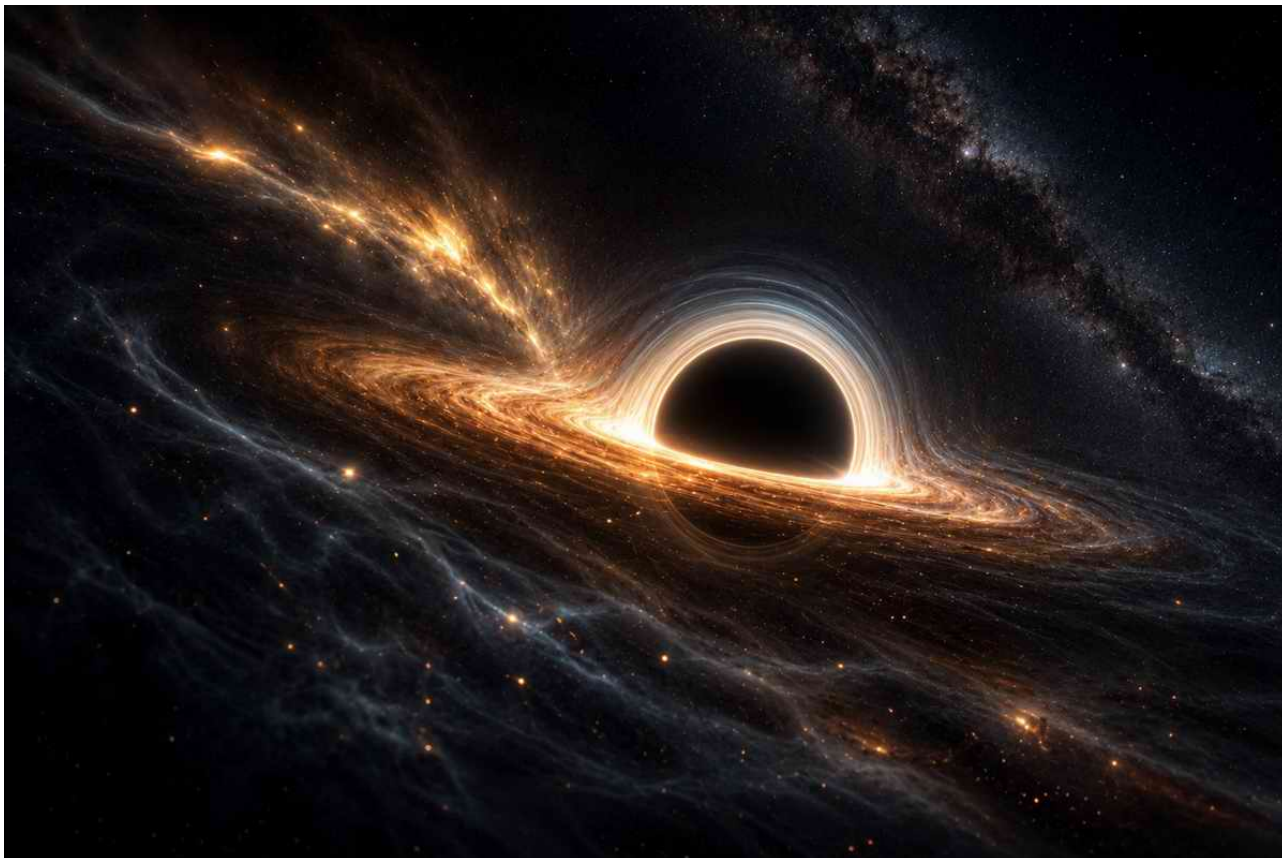


## Физики пересмотрели законы Хокинга: динамические черные дыры могут подчиняться новой термодинамике



Дата публикации: 03.07.2026

Черные дыры считаются одними из самых загадочных объектов во Вселенной. Их гравитация настолько велика, что даже свет не способен покинуть область, известную как горизонт событий. Несмотря на десятилетия исследований, физика черных дыр продолжает ставить перед учеными фундаментальные вопросы, многие из которых связаны с попыткой объединить две величайшие теории современной науки — общую теорию относительности Альберта Эйнштейна и квантовую механику.

Новое исследование физиков из Университета штата Пенсильвания, опубликованное в журнале *Physical Review Letters* и отмеченное редакцией как одна из наиболее значимых работ выпуска, предлагает новый взгляд на термодинамику черных дыр. Авторы разработали альтернативный способ определения энтропии, который впервые позволяет распространить знаменитые законы механики черных дыр Стивена Хокинга на реальные динамические черные дыры, непрерывно изменяющиеся во времени.

На первый взгляд термодинамика и черные дыры кажутся совершенно разными областями физики. Термодинамика описывает процессы нагревания, охлаждения, кипения воды, работу двигателей и обмен энергией между телами. Черные дыры, напротив, являются экстремальными космическими объектами, где пространство и время искривляются настолько сильно, что привычные представления о физике перестают работать.

Однако в начале 1970-х годов произошел настоящий научный переворот. Стивен Хокинг, Джейкоб Бекенштейн и другие исследователи обнаружили удивительное сходство между законами термодинамики и поведением черных дыр. Выяснилось, что многие математические свойства этих объектов почти идеально повторяют законы, управляющие обычными физическими системами.

Одним из ключевых понятий стала энтропия — фундаментальная величина, характеризующая число возможных микроскопических состояний системы. В классической термодинамике второй закон утверждает, что энтропия замкнутой системы не может самопроизвольно уменьшаться. Именно поэтому горячий чай постепенно остывает, но никогда не нагревается сам по себе.

Бекенштейн предположил, что аналогичная величина должна существовать и у черных дыр. Позднее Хокинг показал, что площадь горизонта событий действительно ведет себя подобно энтропии. Более того, он доказал, что черные дыры обладают собственной температурой и способны медленно испускать излучение, получившее название излучения Хокинга.

Это открытие полностью изменило представления ученых. До этого считалось, что черные дыры абсолютно холодны и могут только поглощать вещество. После работ Хокинга стало ясно, что они подчиняются термодинамическим законам и со временем способны даже испаряться.

Тем не менее классическая теория Хокинга имеет важное ограничение. Она описывает исключительно идеализированные черные дыры, находящиеся в состоянии равновесия, то есть практически не меняющиеся со временем.

Реальная Вселенная устроена иначе. Черные дыры постоянно поглощают окружающее вещество, сталкиваются друг с другом, образуют двойные системы, испускают гравитационные волны и постепенно теряют массу благодаря квантовому излучению. Все эти процессы делают их динамическими объектами, для которых существующие термодинамические законы работают далеко не всегда.

Главной причиной проблемы является горизонт событий. Именно его площадь традиционно считается мерой энтропии черной дыры. Однако горизонт событий обладает необычным свойством: его положение определяется не только

текущим состоянием объекта, но и всей будущей историей пространства-времени.

Подобная зависимость от будущего называется телеологичностью. Иначе говоря, чтобы точно определить положение горизонта событий сегодня, необходимо знать, что произойдет с черной дырой спустя значительное время. Для реальных быстро меняющихся объектов такой подход оказывается крайне неудобным.

Авторы новой работы предложили заменить горизонт событий другим понятием — динамическим горизонтом.

В отличие от классического горизонта событий динамический горизонт определяется исключительно текущими физическими параметрами черной дыры. Его свойства зависят только от того, что происходит в настоящий момент, без необходимости учитывать будущее развитие системы.

На основе этой идеи исследователи сформулировали новую меру энтропии, которая сохраняет фундаментальные свойства второго закона термодинамики и одновременно подходит для описания неравновесных процессов.

Это означает, что теперь первый и второй законы термодинамики могут применяться не только к идеализированным статичным черным дырам, но и к объектам, которые растут, вращаются, сталкиваются, испаряются или взаимодействуют с окружающей средой.

Особенно важным новое исследование становится в эпоху гравитационно-волновой астрономии. После открытия обсерваториями LIGO, Virgo и KAGRA гравитационных волн от слияний черных дыр ученые получили возможность непосредственно наблюдать самые динамичные процессы во Вселенной.

Во время подобных столкновений черные дыры стремительно меняют массу, вращение и форму пространства-времени вокруг себя. Именно для таких процессов существующая теория Хокинга давала лишь приближенные ответы. Новая модель может значительно улучшить описание подобных событий.

Работа также имеет большое значение для исследований квантовой гравитации. Одной из главных нерешенных задач современной физики остается объединение общей теории относительности и квантовой механики в единую фундаментальную теорию. Черные дыры считаются идеальной лабораторией для подобных исследований, поскольку именно в них обе теории одновременно играют решающую роль.

Предложенная авторами формулировка энтропии может оказаться важным

шагом к созданию более полной квантовой теории черных дыр и пониманию процессов, происходящих при их испарении.

Не менее интересны возможные последствия для космологии. Сверхмассивные черные дыры, расположенные в центрах галактик, активно растут за счет поглощения газа, звезд и даже других черных дыр. Новая теория позволяет более последовательно описывать энергетический баланс подобных объектов на протяжении миллиардов лет их эволюции.

Исследование также демонстрирует удивительную универсальность физических законов. Термодинамика, изначально созданная для описания паровых машин XIX века, неожиданно оказывается применимой к самым экстремальным объектам во Вселенной, существующим в условиях колоссальных плотностей энергии и искривления пространства-времени.

Основные результаты исследования: предложена новая мера энтропии черных дыр; динамические горизонты заменяют классические горизонты событий при описании неравновесных процессов; первый и второй законы термодинамики распространяются на растущие, сливающиеся и испаряющиеся черные дыры; новая теория позволяет точнее описывать реальные астрофизические процессы; результаты могут стать важным шагом на пути к созданию квантовой теории гравитации.

Авторы подчеркивают, что предложенная концепция не отменяет знаменитые работы Стивена Хокинга, а значительно расширяет область их применения. Если первоначальная теория описывала идеальные, находящиеся в равновесии черные дыры, то новая формулировка делает возможным изучение настоящих космических объектов, непрерывно меняющихся под воздействием окружающей Вселенной. Это приближает физику к более полному пониманию природы гравитации, времени и одной из самых загадочных форм материи в космосе.

**Ссылка:** «Термодинамика черных дыр, вдали от равновесия» DOI: [10.1103/3c1r-v8f1](https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1).