



The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Чёрные дыры подчиняются термодинамическим «законам» — новый результат распространяет их на бурно неравновесные чёрные дыры

*С 1970-х известно, что чёрные дыры подчиняются законам, похожим на термодинамику, но самая чистая версия применялась только к спокойно находящимся в равновесии дырам. Новая статья в *Physical Review Letters* расширяет первый и второй законы на быстро меняющиеся чёрные дыры — поглощающие вещество, сливающиеся и излучающие, — используя локально определяемые «динамические горизонты». Это позволяет назначать температуру и энтропию даже бурно эволюционирующей чёрной дыре. Результат является математикой классической общей теории относительности, а не новой квантовой гравитацией, не наблюдением и не решением информационного парадокса.*

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium*, Abhay Ashtekar, Daniel E. Paraizo, Jonathan Shu, *Physical Review Letters* 136, 251405 (2026) · DOI: 10.1103/3c1r-v8f1

У чёрных дыр есть «законы», похожие на термодинамику. Аккуратная версия работала лишь тогда, когда ничего не происходило

Один из самых странных фактов физики состоит в том, что чёрные дыры ведут себя как горячие тела. В начале 1970-х Бекенштейн и Хокинг заметили, что уравнения, описывающие чёрные дыры, по членам соответствуют законам термодинамики: у чёрной дыры есть энтропия, пропорциональная площади горизонта, и температура, пропорциональная поверхностной гравитации. Затем Хокинг показал, что температура реальна в самом глубоком смысле: чёрная дыра действительно очень слабо светится тепловым излучением.

Что такое излучение Хокинга?

В классической физике из чёрной дыры ничто не выходит, поэтому она должна быть совершенно чёрной и вообще не иметь температуры. В 1974 году Стивен Хокинг показал, что с учётом квантовой теории вблизи горизонта ситуация меняется: чёрная дыра испускает слабое тепловое свечение и потому медленно теряет массу, или «испаряется». Спектр является тепловым при температуре Хокинга, хотя распространение через искривлённое пространство-время изменяет излучение, достигающее бесконечности. В распространённой наглядной картине — это не настоящее доказательство Хокинга — квантовые флуктуации непосредственно снаружи горизонта создают пары, один участник которых уходит как излучение, а другой падает внутрь.

Ключевая особенность состоит в том, что температура *обратно* пропорциональна массе чёрной дыры: чем меньше дыра, тем она горячее. Для любой чёрной дыры, которую способен увидеть телескоп, температура фантастически низка — намного ниже температуры окружающего пустого пространства, — поэтому на практике свечение совершенно ничтожно и никогда не измерялось напрямую. Его значение концептуально: именно излучение Хокинга превращает *аналогию* между механикой чёрных дыр и термодинамикой в реальную физику. Поскольку дыра действительно имеет температуру, «температура» и «энтропия» в этих законах — настоящие термодинамические величины, а не формальное совпадение. Это фон для нынешней статьи, а не её результат.

Это соответствие закреплено результатом, называемым **первым законом механики чёрных дыр** — Бардин, Картер и Хокинг, 1973. На словах он утверждает: если слегка сдвинуть чёрную дыру из одного стационарного состояния в близкое стационарное состояние, изменение её массы равно температуре, умноженной на изменение энтропии, плюс член, связанный с вращением. Это версия для чёрных дыр выражения «полученное тепло равно температуре, умноженной на изменение энтропии».

Но в словах *близкое стационарное состояние* скрыта проблема. Чистый закон 1973 года сравнивает две чёрные дыры, спокойно находящиеся в равновесии и различающиеся лишь бесконечно мало. Он вообще не описывает **процесс** — поглощение звезды, слияние двух чёрных дыр или затухание новорождённой дыры после бурного возникновения. Именно эти ситуации интересуют нас больше всего, и они противоположны «спокойному состоянию». Аккуратный закон замолкает ровно тогда, когда чёрная дыра становится интересной.

Почему очевидное исправление не работает

Можно подумать, что решение просто: наблюдать, как горизонт растёт при падении вещества. Проблема в том, *какой* горизонт использовать.

Горизонт, который обычно представляют люди, — **горизонт событий**, настоящая точка невозврата, — обладает тонким и неудобным свойством: он определяется всей будущей историей Вселенной. Чтобы знать, где находится горизонт событий *сейчас*, пришлось бы знать всё, что когда-либо попадёт в чёрную дыру, на протяжении бесконечного будущего. Это не техническая мелочь. Горизонт событий может начать расти в совершенно пустой и плоской области пространства *до* прибытия вещества, которое позже накормит дыру, просто потому, что этому веществу суждено прийти. Его площадь может увеличиваться там, где локально вообще ничего не происходит.

Как горизонт может расти до прибытия вещества?

Научное название этой особенности — **телеологическая природа горизонта событий**, также называемая его **глобальным определением**. Здесь «телеологический» не означает, что у горизонта есть цель, что он предсказывает будущее или посылает влияние назад во времени. Это означает, что решить, находится ли событие внутри горизонта, можно лишь по полной будущей истории пространства-времени.

Формальное определение говорит то же самое компактнее. Представьте **будущую светоподобную бесконечность**, обозначаемую I^+ , как место назначения света, который навсегда уходит в иначе пустое, бесконечно далёкое будущее. Горизонт событий — граница между событиями, откуда направленный наружу световой сигнал когда-нибудь сможет достичь этой области, и событиями, откуда никакой сигнал никогда не сможет выйти. В стандартной записи общей теории относительности это граница причинного прошлого будущей светоподобной бесконечности: $\partial J^-(I^+)$. Поскольку слово *когда-нибудь* встроено в определение, никакое измерение, выполненное только здесь и сейчас, не может точно определить горизонт событий.

Странность хорошо видна на примере коллапсирующей сферической оболочки. До её прихода внутренняя область может быть пустой и локально плоской. Если

последовательно выпускать из центра направленные наружу лучи света, ранние лучи уйдут, а поздние встретят падающую оболочку в геометрии, из которой уже не смогут выбраться. Горизонт событий — граница между этими исходами. Если проследить её назад, она начинается в центре и расширяется через всё ещё пустую и плоскую внутреннюю область до того, как туда приходит оболочка. Растущая площадь не сообщает о местном потоке вещества; она фиксирует, какие пути выхода остаются открытыми в завершённом пространстве-времени. Ничто здесь не действует назад во времени. Если бы оболочку отклонили и чёрная дыра не образовалась, полное пространство-время было бы другим, и ранняя область не принадлежала бы горизонту событий. Урок не в том, что будущее меняет прошлое, а в том, что горизонт событий — **глобальная причинная граница**, а не поверхность, которую находящийся рядом наблюдатель может обнаружить в один момент. Именно поэтому, когда физикам нужно следить за изменяющейся чёрной дырой, они используют квазилокальные или динамические горизонты.

Это делает горизонт событий бесполезным для текущего описания «состояния» чёрной дыры. Даже в компьютерной симуляции его нельзя точно найти, пока расчёт не завершён, и тем более его нельзя использовать для отслеживания температуры или энтропии мгновение за мгновением.

Ход статьи: горизонт, определяемый локально

Новая работа Абхая Аштекаря, Даниэля Параизо и Джонатана Шу строится на другом понятии горизонта — **квазилокальном**, определяемом только геометрией в собственной окрестности без ссылки на бесконечное будущее. Эти «сегменты динамического горизонта» уже используются численными релятивистами для поиска чёрных дыр в симуляциях слияний именно потому, что они локальны и честны: их площадь растёт только там, где через них действительно проходит энергия.

Затем авторы решают более трудную половину задачи. В обычной термодинамике система вдали от равновесия крайне неудобна: ей нельзя однозначно назначить одну температуру или давление, потому что эти величины строго определены только после установления равновесия. У чёрных дыр та же проблема — пока не воспользоваться особым свойством общей теории относительности. Равновесная чёрная дыра, то есть чёрная дыра Керра, полностью задаётся лишь двумя числами: размером и вращением. Авторы строят отображение, которое для любого бурно эволюционирующего неравновесного горизонта в каждый момент извлекает два числа равновесной чёрной дыры, на которую он в этот момент похож. Благодаря этому резко меняющейся чёрной дыре всё же можно назначить **зависящие от времени температуру и вращение**.

Имея локально определённую энергию, текущую через горизонт, и мгновенные

интенсивные величины, авторы расширяют первый закон на чёрные дыры, сколь угодно далёкие от равновесия. Ключевое отличие: новый закон описывает **конечные изменения, вызванные реальными физическими процессами** — прохождением через горизонт вещества и гравитационных волн, — а не бесконечно малые шаги между двумя замороженными состояниями. Его дополняет соответствующий второй закон, теперь уже *количественный*: площадь горизонта растёт на величину, напрямую связанную с поступившей энергией. Вместе первый и второй законы указывают на чистый вывод: даже посреди самого бурного события правильной мерой энтропии чёрной дыры остаётся площадь её горизонта.

Чего это *не* доказывает

- Работа **не решает квантовую гравитацию**. Это результат *классической* общей теории относительности, использующий стандартное отождествление площади горизонта с энтропией. Он не выводит эту энтропию из более фундаментальных принципов.
- Она **не считает микросостояния** и не объясняет, *из чего* состоит энтропия чёрной дыры. Она расширяет формализм термодинамики чёрных дыр, но не открывает коробку с микроскопическими степенями свободы.
- Она **не разрешает информационный парадокс чёрных дыр**. Эта загадка относится к квантовой теории; статья её не затрагивает.
- Это **не наблюдение и не измерение**. Здесь нет телескопа, данных или сигнала гравитационных волн — это математика. «Температура» сливающейся чёрной дыры здесь является точно определённой величиной в уравнениях, а не показанием термометра.
- Работа **не опровергает Бекенштейна и Хокинга**. Она *расширяет* их картину на динамический режим, о котором исходный равновесный закон ничего не говорил.

Насколько сильны доказательства

Для результата такого рода они сильны: это аккуратная и внутренне согласованная работа по математической физике от ведущей группы, опубликованная в *Physical Review Letters* как *Editors' Suggestion*; отдельная сопроводительная статья содержит более длинные выводы.

Честные оговорки относятся скорее к *типу* результата, чем к его качеству:

- Работа опирается на обычное предположение, что площадь горизонта *есть* энтропия — площадь, делённая на четыре с соответствующими константами Ньютона и Планка. Если полная квантовая теория гравитации когда-нибудь изменит это отождествление, интерпретация изменится вместе с ним.

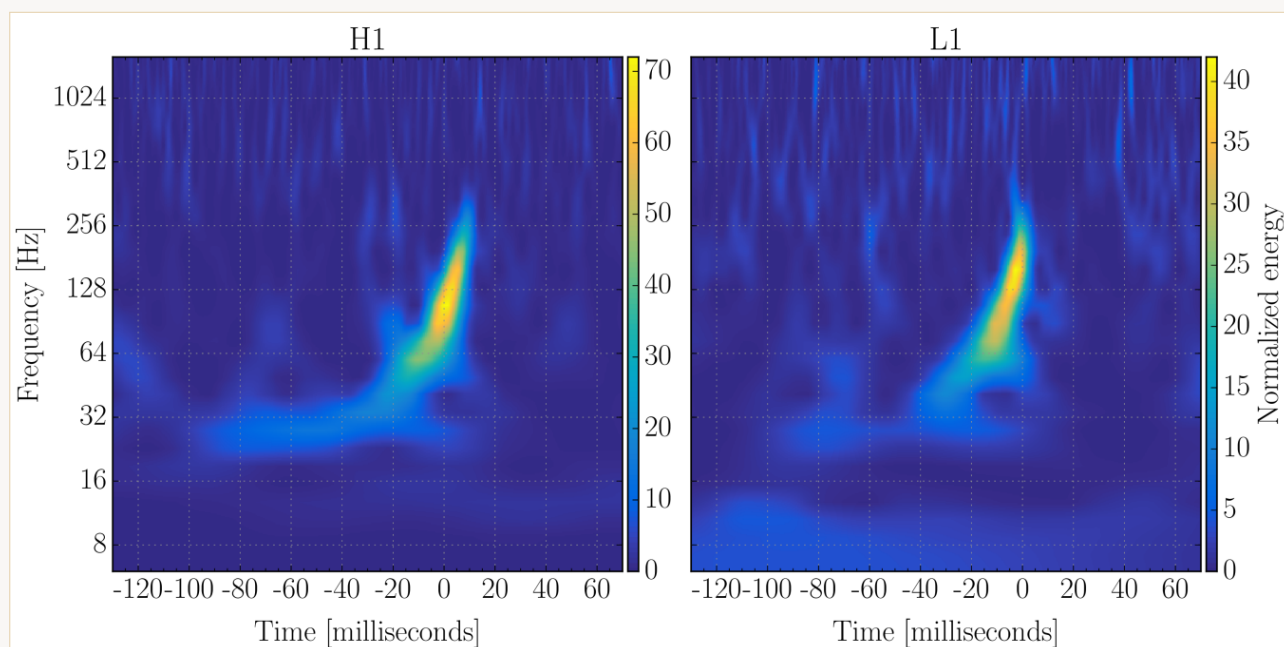
- Основные вычисления выполнены для наиболее распространённого случая — пространственноподобных динамических горизонтов с осевой симметрией. Авторы утверждают, что ограничения несущественны, но полностью общее утверждение частично опирается на результаты других работ.
- Формула «энтропия равна площади горизонта даже вне равновесия» — убедительное *отождествление*, естественно вытекающее из новых первого и второго законов, но не теорема, выведенная из микроскопической статистики.

Итак, это строгая модернизация пятидесятилетней системы, а не экспериментальное открытие и не новый закон природы, ожидающий проверки.

Почему это важно

Есть две причины: практическая и концептуальная.

Практически чёрные дыры, которые мы сегодня действительно изучаем — те, чьи слияния слышат LIGO и Virgo, — проводят самые важные моменты далеко от равновесия. Величины статьи строятся на тех же локально определённых горизонтах, которые уже отслеживают симуляции, поэтому появляется принципиальный способ говорить об энтропии и температуре чёрной дыры *во время* слияния или коллапса, а не только до и после.



GW150914, первый непосредственно зарегистрированный сигнал гравитационных волн, возник при слиянии двух чёрных дыр. Эти время-частотные карты показывают сигнал в LIGO Hanford слева и LIGO Livingston справа: в обоих детекторах яркий след изгибается вверх по мере роста частоты к моменту слияния. Это реальный пример системы чёрных дыр далеко от равновесия; он служит контекстом для новой термодинамической схемы, но не является наблюдательным доказательством этой схемы.

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / Classical and Quantum Gravity, Fig. 10 CC BY 3.0

Концептуально термодинамика чёрных дыр — одна из немногих конкретных подсказок о квантовой гравитации, место, где явно встречаются гравитация, квантовая теория и термодинамика. Чем точнее мы понимаем, что означают «энтропия» и «температура» для бурно меняющейся чёрной дыры, тем точнее цель, в которую должна попасть будущая квантовая теория. Работа не отвечает на глубокий вопрос, чем на самом деле является энтропия чёрной дыры. Она формулирует вопрос точнее — а в этой области физики это большая часть работы.

Краткий итог

Чёрные дыры подчиняются законам, зеркально похожим на термодинамику, но чистый «первый закон» 1973 года сравнивал только спокойно находящиеся в равновесии чёрные дыры и не мог описывать реальный процесс. Аштекар, Параизо и Шу расширили первый и второй законы на чёрные дыры, сколь угодно далёкие от равновесия — сливающиеся, поглощающие вещество, затухающие, — используя локально определяемые «динамические горизонты» и отображение, которое назначает меняющейся чёрной дыре мгновенную температуру и вращение. Вывод состоит в том, что площадь горизонта остаётся правильной мерой энтропии даже во время бурных событий. Это строгий результат классической общей теории относительности, а не квантовая гравитация, не наблюдение, не подсчёт микросостояний и не решение информационного парадокса.

Проверка без преувеличений

Что показывает статья: математически согласованное расширение первого и второго законов механики чёрных дыр на полностью динамические, далёкие от равновесия чёрные дыры, построенное на квазилокальных динамических горизонтах. Оно определяет конечный, основанный на процессе первый закон и количественный второй закон и делает естественным отождествление энтропии динамической чёрной дыры с площадью её горизонта.

Что является реальным, но интерпретационным: отождествление «энтропия = площадь горизонта» вне равновесия. Новые законы делают его убедительным, но оно наследует стандартное классическое предположение площадь—энтропия, а не выводит его.

Чего работа не показывает: квантовой теории гравитации; микроскопического происхождения или «подсчёта» энтропии чёрной дыры; решения информационного парадокса; какого-либо наблюдательного или экспериментального результата; температуры, которую можно физически измерить.

Главные ограничения: везде используется классическая общая теория относительности; основные результаты доказаны для распространённого пространственноподобного осесимметричного случая, а общность аргументируется с помощью сопроводительных работ; отождествление площади и энтропии предполагается, а не выводится из статистической механики.

Насколько уверенным может быть обычный читатель? Высокая уверенность, что это серьёзный и признанный теоретический шаг, действительно распространяющий термодинамику чёрных дыр на динамический режим. И столь же высокая уверенность, что это *не* заявление о новых наблюдениях, не квантовая гравитация и не решение знаменитой информационной загадки. Правильная позиция: реальный шаг в понимании, сделанный мелом, а не телескопом.

Источники

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium, Phys. Rev. Lett. 136, 251405 (2026)

<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>