



The CLEAN PAPER

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

Чорні діри підкоряються термодинамічним «законам» — новий результат поширює їх на бурхливі нерівноважні чорні діри

*З 1970-х років відомо, що чорні діри підкоряються законам, які віддзеркалюють термодинаміку, але найчіткіша версія стосувалася лише чорних дір, що спокійно перебувають у рівновазі. Нова стаття в *Physical Review Letters* поширює перший і другий закони на ті частини квазілокальних горизонтів, які відповідають умовам сегментів динамічного горизонту й можуть бути як завгодно далекими від рівноваги, — під час акреції, колапсу та більшості етапів злиття чорних дір. Симуляції відстежують квазілокальний горизонт упродовж усього злиття, але закони ще не охоплюють короткий проміжок навколо злиття, коли він не є сегментом динамічного горизонту. Основну теорію сформульовано в межах загальної теорії відносності, а до випаровування її застосовано в напівкласичному наближенні; це не нова квантова гравітація, не спостереження й не розв'язання інформаційної загадки чорних дір.*

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

Чорні діри мають «закони», схожі на термодинаміку. Акуратна версія працювала лише тоді, коли нічого не відбувалося

Один із найдивніших фактів фізики полягає в тому, що чорні діри поведуться як гарячі тіла. На початку 1970-х Бекенштейн і Гокінг помітили, що рівняння, які описують чорні діри, член за членом відповідають законам термодинаміки: чорна діра має ентропію, пропорційну площі горизонту, і температуру, пропорційну поверхневій гравітації. Потім Гокінг показав, що температура реальна в найглибшому сенсі: чорна діра справді дуже слабо світиться тепловим випромінюванням.

Що таке випромінювання Гокінга?

У класичній фізиці з чорної діри нічого не виходить, тому вона мала б бути цілком чорною і взагалі не мати температури. У 1974 році Стівен Гокінг показав, що з урахуванням квантової теорії поблизу горизонту ситуація змінюється: чорна діра випускає слабе теплове світіння і тому повільно втрачає масу, або «випаровується». Спектр є тепловим за температури Гокінга, хоча поширення крізь викривлений простір-час змінює випромінювання, яке досягає нескінченності. У поширеній наочній картині — це не справжній доказ Гокінга — квантові флуктуації безпосередньо за горизонтом створюють пари, один учасник яких відлітає як випромінювання, а інший падає всередину.

Ключова особливість полягає в тому, що температура *обернено* пропорційна масі чорної діри: що менша діра, то вона гарячіша. Для будь-якої чорної діри, яку здатен побачити телескоп, температура фантастично низька — набагато нижча за температуру навколишнього порожнього простору, — тому на практиці світіння цілком мізерне й ніколи не вимірювалося безпосередньо. Його значення концептуальне: саме випромінювання Гокінга перетворює *аналогію* між механікою чорних дір і термодинамікою на реальну фізику. Оскільки діра справді має температуру, «температура» та «ентропія» в цих законах — справжні термодинамічні величини, а не формальний збіг. Це тло для нинішньої статті, а не її результат.

Ця відповідність закріплена результатом, який називають **першим законом механіки чорних дір** — Бардін, Картер і Гокінг, 1973. Словесно він стверджує: якщо трохи зрушити чорну діру з одного стаціонарного стану до близького стаціонарного стану, зміна її маси дорівнює температурі, помноженій на зміну ентропії, плюс член, пов'язаний з обертанням. Це версія для чорних дір вислову «отримане тепло дорівнює температурі, помноженій на зміну ентропії».

Але у словах *близький стаціонарний стан* прихована проблема. Лаконічний закон 1973 року порівнює дві чорні діри, що спокійно перебувають у рівновазі й відрізняються лише нескінченно мало. Він узагалі не описує **процес** — поглинання зорі, злиття двох

чорних дір або згасання новонародженої діри після бурхливого виникнення. Саме ці ситуації цікавлять нас найбільше, і вони протилежні «спокійному стану». Акуратний закон замовкає рівно тоді, коли чорна діра стає цікавою.

Чому очевидне виправлення не працює

Можна подумати, що розв'язання просте: спостерігати, як горизонт зростає під час падіння речовини. Проблема в тому, який горизонт використовувати.

Горизонт, який зазвичай уявляють люди, — **горизонт подій**, справжня точка неповернення, — має тонку й незручну властивість: він визначається всією майбутньою історією Всесвіту. Щоб знати, де перебуває горизонт подій *зараз*, довелося б знати все, що коли-небудь упаде в чорну діру, протягом нескінченного майбутнього. Це не технічна дрібниця. Горизонт подій може почати зростати в цілком порожній і плоскій області простору до прибуття речовини, яка пізніше нагодує діру, просто тому, що цій речовині судилося прийти. Його площа може збільшуватися там, де локально взагалі нічого не відбувається.

Як горизонт може зростати до прибуття речовини?

Наукова назва цієї особливості — **телеологічна природа горизонту подій**, яку також називають його **глобальним визначенням**. Тут «телеологічний» не означає, що горизонт має мету, передбачає майбутнє або посиляє вплив назад у часі. Це означає, що вирішити, чи лежить подія всередині горизонту, можна лише за повною майбутньою історією простору-часу.

Формальне визначення говорить те саме компактніше. Уявіть **майбутню світлоподібну нескінченність**, позначену $\mathcal{I}^+$, як місце призначення світла, яке назавжди відходить у порожнє, нескінченно далеке майбутнє. Горизонт подій — межа між подіями, звідки спрямований назовні світловий сигнал колись зможе досягти цієї області, і подіями, звідки жоден сигнал ніколи не зможе вийти. У стандартному записі загальної теорії відносності це межа причинного минулого майбутньої світлоподібної нескінченності: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Оскільки слово *колись* вбудоване у визначення, жодне вимірювання, виконане лише тут і зараз, не може точно визначити горизонт подій.

Дивність добре видно на прикладі сферичної оболонки, що колапсує. До її приходу внутрішня область може бути порожньою й локально плоскою. Якщо послідовно випускати з центра спрямовані назовні промені світла, ранні промені втечуть, а пізні зустрінуть оболонку, що падає, у геометрії, з якої вже не зможуть вибратися. Горизонт подій — межа між цими результатами. Якщо простежити її назад, вона починається в центрі й розширюється через іще порожню та плоску внутрішню область до того, як туди приходить оболонка. Зростання площі не повідомляє про місцевий потік речовини; воно фіксує, які шляхи виходу

залишаються відкритими у завершеному просторі-часі.

Ніщо тут не діє назад у часі. Якби оболонку відхилили й чорна діра не утворилася, повний простір-час був би іншим, і рання область не належала б горизонту подій. Урок не в тому, що майбутнє змінює минуле, а в тому, що горизонт подій — **глобальна причинна межа**, а не поверхня, яку близький спостерігач може виявити в одну мить. Саме тому, коли фізикам потрібно стежити за чорною дірою, що змінюється, вони використовують квазілокальні або динамічні горизонти.

Це робить горизонт подій непридатним для поточного опису «стану» чорної діри. Навіть у комп'ютерній симуляції його не можна точно знайти, доки розрахунок не завершено, і тим більше його не можна використовувати для відстеження температури чи ентропії мить за миттю.

Хід статті: горизонт, визначений локально

Нова стаття Абгая Аштекаря, Даніеля Параізо та Джонатана Шу ґрунтує свій результат на іншому понятті горизонту — **квазілокальному**, визначеному лише геометрією у власному околі, без посилання на нескінченне майбутнє. Ці **квазілокальні горизонти** — саме ті поверхні, за допомогою яких фахівці з чисельної теорії відносності вже визначають розташування початкових чорних дір, відстежують злиття та визначають розташування залишкової чорної діри протягом усієї симуляції. Розроблені тут термодинамічні закони застосовуються до тих частин квазілокального горизонту, які задовольняють додаткові умови для **сегмента динамічного горизонту**. На кожному такому сегменті площа змінюється безпосередньо у відповідь на локальний потік енергії, а не на події у віддаленому майбутньому: за додатного припливу вона збільшується, а для часоподібного горизонту, що випаровується, з від'ємним потоком енергії — зменшується.

Далі автори розв'язують складнішу половину задачі. У звичайній термодинаміці система далеко від рівноваги вкрай незручна: їй не можна однозначно призначити одну температуру чи тиск, бо ці величини строго визначені лише після встановлення рівноваги. У чорних дір та сама проблема — доки не скористатися особливою властивістю загальної теорії відносності. Рівноважна чорна діра, тобто чорна діра Керра, повністю задається лише двома числами: розміром і обертанням. Автори будують відображення, яке бере кожен стан уздовж сегмента динамічного горизонту й на кожному поперечному перерізі цього сегмента визначає два числа рівноважної чорної діри, на яку цей стан у ту мить схожий. Завдяки цьому чорній дірі, що різко змінюється, уздовж сегмента можна призначити **залежні від часу температуру й обертання**.

Маючи ці складники — локально визначену енергію, що тече крізь горизонт, і миттєві інтенсивні величини, — автори розширюють перший закон на чорні діри, як завгодно далекі від рівноваги. Ключове значення має те, що новий закон описує

скінченні зміни, спричинені реальними фізичними процесами (проходженням речовини й гравітаційних хвиль крізь горизонт), а не нескінченно малі кроки між двома застиглими станами. Його доповнює відповідний другий закон, формулювання якого тепер є *кількісним*: зміна площі горизонту безпосередньо пов'язана з локальним потоком енергії — це зростання за додатного припливу або зменшення для часоподібного горизонту, що випаровується, за від'ємного потоку. Разом перший і другий закони приводять до одного чіткого висновку: для будь-якої фази, представленої сегментом динамічного горизонту, хоч би якою бурхливою вона була, правильною мірою ентропії й далі є площа горизонту.

Чого це не доводить

- Робота **не розв'язує** квантову гравітацію. Основну теорію сформульовано в межах загальної теорії відносності; для її застосування до випаровування чорних дір використано напівкласичне наближення, у якому квантові поля матерії діють на класичному просторі-часі. Стандартне ототожнення площі горизонту з ентропією тут і далі припускається, а не виводиться з чогось фундаментальнішого.
- Вона **не рахує мікростани** й не пояснює, з чого складається ентропія чорної діри. Вона розширює облік термодинаміки чорних дір, але не відкриває коробку з мікроскопічними ступенями свободи.
- Вона **не розв'язує інформаційний парадокс чорних дір**. Ця загадка стосується квантової теорії; стаття її не зачіпає.
- Це **не** спостереження і не вимірювання. Тут немає телескопа, даних або сигналу гравітаційних хвиль — це математика. «Температура», яку приписують динамічному горизонту в процесі еволюції чорної діри, є точно визначеною величиною в рівняннях, а не чимось, що можна зчитати з термометра.
- Робота **ще не** дає неперервного термодинамічного опису всього процесу злиття двох чорних дір. Чисельні симуляції відстежують квазілокальний горизонт упродовж усієї еволюції — від початкових чорних дір через злиття до залишкової чорної діри, — але впродовж короткого проміжку безпосередньо поблизу злиття цей горизонт не задовольняє умов, необхідних для сегмента динамічного горизонту. У супровідній статті зазначено, що робота над термодинамічним описом цього проміжку триває.
- Робота **не спростовує Бекенштейна й Гокінга**. Вона *розширює* їхню картину на динамічний режим, про який початковий рівноважний закон нічого не говорив.

Наскільки сильними є докази

Переконливі для результату такого типу: це ретельна й внутрішньо узгоджена робота з математичної фізики від провідної групи в цій галузі, опублікована як *Editors' Suggestion* у *Physical Review Letters*. Рецензована супровідна стаття містить докладніші виведення й розглядає випадки, виклад яких було скорочено в Letter.

Чесні застереження стосуються радше *типу* результату, ніж його якості:

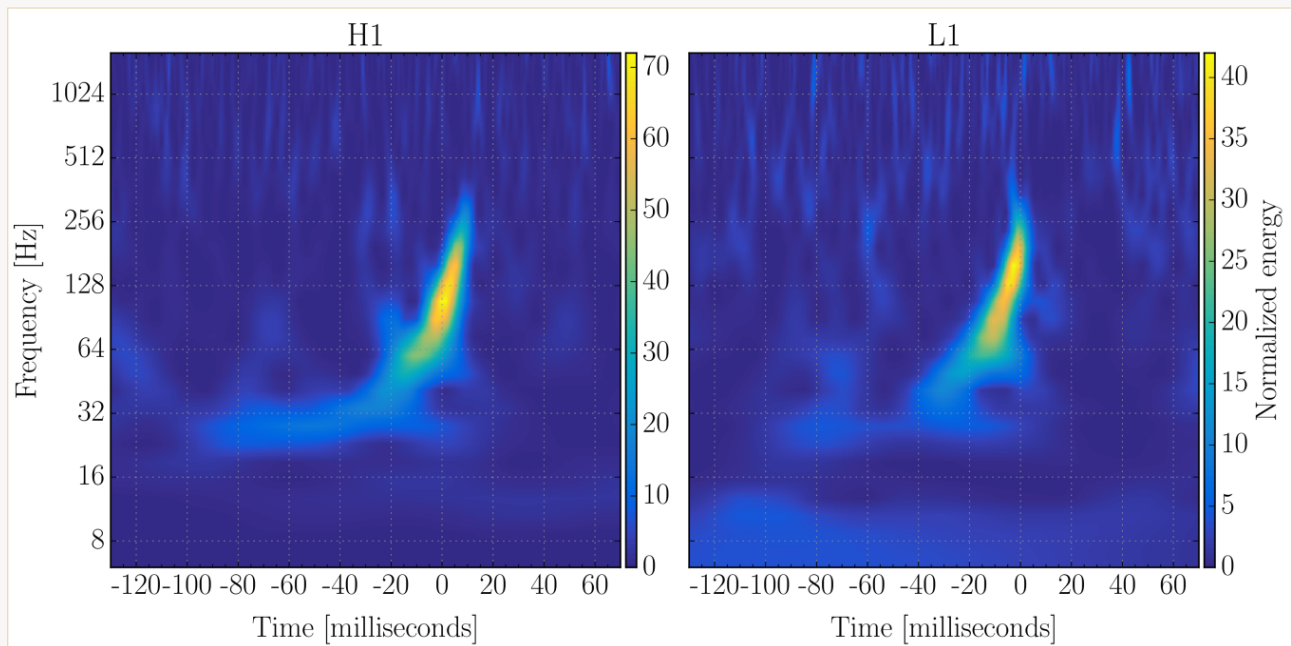
- Робота спирається на звичайне припущення, що площа горизонту є ентропією — площа, поділена на чотири з відповідними сталими Ньютона й Планка. Якщо повна квантова теорія гравітації колись змінить це ототожнення, інтерпретація зміниться разом із ним.
- Задля стислості й простоти в короткому Letter основне виведення подано для осесиметричних просторовоподібних динамічних горизонтів. У рецензованій супровідній статті явно проаналізовано часоподібні динамічні горизонти й побудовано кутовий момент без обертального поля Кіллінга. Однак для часоподібних горизонтів, що випаровуються, явний розгляд зворотної реакції обмежено сферичною симетрією.
- Формула «ентропія дорівнює площі горизонту навіть поза рівновагою» — переконливе *ототожнення*, яке природно впливає з нових першого й другого законів, але не теорема, виведена з мікроскопічної статистики.

Отже, це строге оновлення п'ятдесятирічної системи, а не експериментальне відкриття й не новий закон природи, що чекає на перевірку.

Чому це важливо

Є дві причини: практична й концептуальна.

Практично чорні діри, які ми сьогодні справді вивчаємо — ті, чиї злиття чують LIGO і Virgo, — проводять найважливіші моменти далеко від рівноваги. Симуляції відстежують квазілокальний горизонт від початкових чорних дір через злиття до залишкової чорної діри. Величини в цій статті застосовуються до тих частин горизонту, які відповідають умовам сегментів динамічного горизонту, тож робота дає принциповий спосіб говорити про ентропію й температуру чорної діри протягом більшості етапів еволюції злиття та під час колапсу, а не лише після того, як усе усталилося. Упродовж короткого проміжку безпосередньо навколо злиття квазілокальний горизонт продовжують відстежувати, але він залишається поза межами нинішнього термодинамічного опису.



GW150914, перший безпосередньо зареєстрований сигнал гравітаційних хвиль, виник під час злиття двох чорних дір. Ці частотно-часові карти показують сигнал у LIGO Hanford ліворуч і LIGO Livingston праворуч: в обох детекторах яскравий слід вигинається вгору зі зростанням частоти до моменту злиття. Це реальний приклад системи чорних дір далеко від рівноваги; він дає контекст для нової термодинамічної схеми, але не є спостережним доказом цієї схеми.

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

Концептуально термодинаміка чорних дір — одна з небагатьох конкретних підказок щодо квантової гравітації, місце, де явно зустрічаються гравітація, квантова теорія й термодинаміка. Що точніше ми розуміємо, що означають «ентропія» і «температура» для чорної діри, яка бурхливо змінюється, то точнішою є ціль, у яку має влучити майбутня квантова теорія. Робота не відповідає на глибоке питання, чим насправді є ентропія чорної діри. Вона формулює питання точніше — а в цій галузі фізики це велика частина роботи.

Короткий підсумок

Чорні діри підкоряються законам, що віддзеркалюють термодинаміку, але чіткий «перший закон» 1973 року лише порівнював чорні діри, які нерухомо перебувають у рівновазі, і не міг описати реальний процес. Аштекар, Параізо й Шу розширюють перший і другий закони на чорні діри, як завгодно далекі від рівноваги — ті, що поглинають речовину, колапсують, згасають після збурення та проходять більшість етапів злиття, — використовуючи квазілокальні горизонти, застосовуючи термодинамічні закони до їхніх сегментів динамічного горизонту та будуючи відображення, яке приписує кожному стану вздовж цих сегментів миттєву температуру та спін. У підсумку площа горизонту залишається правильною мірою ентропії для кожної фази, представленої сегментом динамічного горизонту. Короткий проміжок безпосередньо

поблизу злиття ще не охоплено цим термодинамічним описом, хоча симуляції продовжують відстежувати квазілокальний горизонт. Основну теорію сформульовано в межах загальної теорії відносності, а до випаровування її застосовано в напівкласичному наближенні; це не квантова гравітація, не спостереження, не підрахунок мікростанів і не розв'язання інформаційного парадоксу.

Твереза оцінка

Що показує стаття: математично узгоджене розширення першого й другого законів механіки чорних дір на повністю динамічні чорні діри далеко від рівноваги, побудоване на квазілокальних горизонтах і тих їхніх частинах, які задовольняють умови для сегментів динамічного горизонту. Воно визначає скінченний, заснований на процесі перший закон і кількісний другий закон та робить природним ототожнення ентропії динамічної чорної діри з площею її горизонту.

Що є реальним, але інтерпретаційним: ототожнення «ентропія = площа горизонту» поза рівновагою. Нові закони роблять його переконливим, але воно успадковує стандартне класичне припущення площа—ентропія, а не виводить його.

Чого робота не показує: квантової теорії гравітації; мікроскопічного походження або «підрахунку» ентропії чорної діри; розв'язання інформаційного парадоксу; будь-якого спостережного чи експериментального результату; температури, яку можна фізично виміряти.

Головні обмеження: Основне виведення виконано в загальній теорії відносності, тоді як у застосуванні до часоподібного випаровування використано напівкласичне наближення; короткий проміжок безпосередньо поблизу злиття подвійної системи не представлений сегментом динамічного горизонту, і робота над його термодинамічним описом триває, хоча чисельні симуляції продовжують відстежувати квазілокальний горизонт; явний розгляд зворотної реакції часоподібних горизонтів, що випаровуються, обмежено сферичною симетрією; ототожнення площі з ентропією припускається, а не доводиться на основі статистичної механіки.

Наскільки впевненим може бути звичайний читач? Висока впевненість, що це серйозний і визнаний теоретичний крок, який справді поширює термодинаміку чорних дір на динамічний режим. І так само висока впевненість, що це *не* заява про нові спостереження, не квантова гравітація і не розв'язання відомої інформаційної загадки. Правильна позиція: реальний крок у розумінні, зроблений крейдою, а не телескопом.

Оновлення після публікації

• Виправлення · 2026-08-27

Після зауважень автора для листування Абгая Аштекаря ми виправили два твердження, у яких часоподібні й неосесиметричні випадки було описано як лише аргументовані, хоча їх явно розглянуто в рецензованій супровідній статті. Під час перегляду ми також уточнили, що теорія ще не охоплює короткого проміжку безпосередньо поблизу злиття подвійної системи, коли квазілокальний горизонт не задовольняє умов для сегмента динамічного горизонту.

- **Виправлення · 2026-08-28**

Після додаткового уточнення від автора для листування Абгая Аштекаря ми розрізнили квазілокальні горизонти, які чисельні симуляції відстежують від початкових чорних дір через злиття до залишкової чорної діри, та ті їхні частини, що задовольняють додаткові умови для сегментів динамічного горизонту, де застосовуються термодинамічні закони.

Джерела

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

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

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of dynamical black holes beyond perturbation theory, Gen. Relativ. Gravit. 58, 91 (2026)

<https://doi.org/10.1007/s10714-026-03585-4>