



The CLEAN PAPER

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

Черните дупки се подчиняват на термодинамични „закони“ — нов резултат ги разширява към черни дупки, бурно изведени от равновесие

*От 70-те години е известно, че черните дупки се подчиняват на закони, отразяващи термодинамиката, но най-чистата версия се прилага само към черни дупки, които спокойно стоят в равновесие. Нова статия в *Physical Review Letters* разширява първия и втория закон към черни дупки, които се променят бързо — поглъщат материя, сливат се, излъчват — чрез локално дефинирани „динамични хоризонти“. Това позволява на физиците да присвояват температура и ентропия дори на бурно развиваща се черна дупка. Резултатът е математически и принадлежи на класическата обща теория на относителността — не е нова квантова гравитация, наблюдение или решение на информационния парадокс на черните дупки.*

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

Черните дупки имат „закони“, приличащи на термодинамиката. Подредената версия работеше само когато нищо не се случваше

Един от най-странните факти във физиката е, че черните дупки се държат като горещи тела. В началото на 70-те години Бекенщайн и Хокинг забелязват, че уравненията, управляващи черните дупки, съответстват член по член на законите на термодинамиката: черната дупка има ентропия, пропорционална на площта на хоризонта ѝ, и температура, пропорционална на повърхностната ѝ гравитация. След това Хокинг показва, че температурата е реална в най-дълбокия смисъл — черната дупка действително свети, макар и изключително слабо, с топлинно лъчение.

Какво е лъчението на Хокинг?

Класически нищо не може да избяга от черна дупка, така че тя би трябвало да е напълно черна и изобщо да няма температура. През 1974 г. Стивън Хокинг показва, че това се променя, когато около хоризонта се вземе предвид квантовата теория: черната дупка излъчва слабо топлинно сияние и следователно бавно губи маса, или „се изпарява“. Спектърът е топлинен при температурата на Хокинг, а разпространението през изкривеното пространство-време изменя лъчението, което достига безкрайността. В една разпространена нагледна картина — която не е действителното извеждане на Хокинг — квантови флуктуации непосредствено извън хоризонта създават двойки, при които единият партньор избягва като лъчение, а другият пада навътре.

Ключовото е, че тази температура е *обратно* пропорционална на масата на черната дупка: колкото по-малка е тя, толкова е по-гореща. За всяка черна дупка, която телескоп би могъл да види, температурата е фантастично ниска — далеч под температурата на празното пространство около нея — така че на практика сиянието е напълно пренебрежимо и никога не е измервано пряко. Значението му е концептуално: лъчението на Хокинг превръща *аналогията* между механиката на черните дупки и термодинамиката в реална физика. Понеже черната дупка действително има температура, „температурата“ и „ентропията“ в тези закони са истински термодинамични величини, а не формално съвпадение. (Това е фон към настоящата статия, не неин резултат.)

Това съответствие е закрепено от резултат, наречен **първи закон на механиката на черните дупки** (Бардин, Картър и Хокинг, 1973). С думи той казва: ако леко промените черна дупка от едно стационарно състояние към близко друго стационарно състояние, промяната в масата ѝ е равна на температурата по промяната в ентропията, плюс член за въртенето. Това е версията за черни дупки на „внесената топлина е равна на температурата по промяната на ентропията“.

Има уловка в израза *близко стационарно състояние*. Чистият закон от 1973 г. сравнява

две черни дупки, които спокойно се намират в равновесие и се различават само безкрайно малко. Той никога не описва действителен **процес** — черна дупка, поглътеща звезда, сливане на две черни дупки, новородена черна дупка, която затихва след бурното си раждане. Това са точно ситуацияите, които най-много искаме да разберем, и те са противоположността на „спокойно състояние“. Подреденият закон замлъква точно когато черната дупка става интересна.

Защо очевидната поправка не работи

Може да изглежда, че решението е лесно: просто наблюдавайте как хоризонтът расте, докато материя пада навътре. Проблемът е *кой* хоризонт.

Хоризонтът, който повечето хора си представят — **хоризонтът на събитията**, истинската граница без връщане — има едно фино и неудобно свойство: той се определя от цялото бъдеще на Вселената. За да знаете къде се намира хоризонтът на събитията *точно сега*, би трябвало да знаете всичко, което някога ще падне в черната дупка, завинаги. Това не е техническа подробност. Хоризонтът на събитията може да започне да расте в напълно празна и плоска област на пространството *преди* да е пристигнала материята, която ще го захрани, просто защото тази материя е предопределена да пристигне по-късно. Площта му може да се увеличава там, където локално не се случва нищо.

Как хоризонтът може да расте, преди материята да пристигне?

Научното име на тази особеност е **телеологична природа на хоризонта на събитията**, наричана и неговата **глобална дефиниция**. Тук „телеологична“ не означава, че хоризонтът има цел, предсказва бъдещето или изпраща влияние назад във времето. Означава, че дали дадено събитие принадлежи вътре в хоризонта може да се реши само от пълната бъдеща история на пространство-времето.

Формалната дефиниция казва същото по-сбито. Представете си **бъдещата светлоподобна безкрайност** — наричана „ай-плюс“ и записвана $\mathcal{I}^+$ — като местоназначението, което достига светлина, избягала завинаги към иначе празното, безкрайно далечно бъдеще. Хоризонтът на събитията е границата между събития, от които насочен навън светлинен сигнал в крайна сметка може да достигне това местоназначение, и събития, от които никой такъв сигнал никога не може. В стандартната нотация на общата теория на относителността той е границата на причинното минало на бъдещата светлоподобна безкрайност: $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$. Понеже думата *някога* е вградена в тази дефиниция, никое измерване, направено само тук и сега, не може да локализира точно хоризонта на събитията. Колапсираща сферична обвивка прави странността видима. Преди обвивката да пристигне, областта вътре в нея може да бъде празна и локално плоска. Изпратете навън светлинни лъчи от центъра в последователно по-късни

моменти: по-ранните лъчи избягват, докато по-късните срещат колапсиращата обвивка в геометрия, от която не могат да излязат. Хоризонтът на събитията е границата между тези два изхода. Проследена назад, тази граница започва в центъра и се разширява през все още празната, плоска вътрешност, преди обвивката да я достигне. Нарастващата ѝ площ не съобщава за локален поток на материя там; тя записва кои пътища за бягство остават отворени в завършеното пространство-време.

Нищо в тази картина не действа назад във времето. Ако обвивката бъде отклонена и не се образува черна дупка, завършеното пространство-време би било различно и по-ранната област не би била част от хоризонт на събитията. Урокът не е, че бъдещето променя миналото, а че хоризонтът на събитията е **глобална причинна граница**, не повърхност, която близък наблюдател може да открие в един момент. Точно затова физиците използват квазилокални или динамични хоризонти, когато трябва да проследяват черна дупка, докато тя се променя.

Това прави хоризонта на събитията непригоден за текущ отчет на „състоянието“ на черната дупка. Не можете дори да го локализирате в компютърна симулация, преди симулацията да приключи, и със сигурност не можете да го използвате за проследяване на температура или ентропия момент по момент.

Ходът: хоризонт, който може да се дефинира локално

Новата статия на Абхай Аштекар, Даниел Параизо и Джонатан Шу изгражда резултата си върху различно понятие за хоризонт — **квазилокално**, определено само от геометрията в собствената му околност, без позоваване на безкрайното бъдеще. Тези „сегменти на динамичен хоризонт“ са повърхностите, които специалистите по числена относителност вече използват за намиране на черни дупки в симулации на сливания, точно защото са локални и честни: площта им расте само там, където енергия действително ги пресича.

Освен това авторите решават по-трудната половина на проблема. В обикновената термодинамика система далеч от равновесие е прословуто хлъзгава: не може чисто да ѝ се присвои една температура или налягане, защото тези величини са добре дефинирани едва след установяване на равновесие. Черните дупки имат същия проблем — докато, както показват авторите, не се използва специално свойство на общата относителност. Черна дупка в равновесие — черна дупка на Кер — се определя само от две числа: размера и въртенето си. Затова авторите изграждат отображение, което взема всеки бурно развиващ се хоризонт далеч от равновесие и във всеки момент извлича двете числа на равновесната черна дупка, на която той моментно прилича. Чрез това отображение дори на яростно променяща се черна дупка могат да бъдат присвоени **зависещи от времето температура и въртене**.

С тези съставки — локално дефинирана енергия, преминаваща през хоризонта, и моментни интензивни величини — те разширяват първия закон към черни дупки произволно далеч от равновесие. Важно е, че новият закон описва **крайни промени, причинени от реални физични процеси** — материя и гравитационни вълни, пресичащи хоризонта — а не безкрайно малки стъпки между две замръзнали състояния. Те го съчетават със съответстващ втори закон, чиято формулировка вече е *количествена*: площта на хоризонта нараства с количество, пряко свързано с постъпилата енергия. Вzeti заедно, първият и вторият закон сочат към едно чисто заключение — дори за черна дупка наред най-бурното събитие, което можем да си представим, правилната мярка за ентропия остава площта на хоризонта ѝ.

Какво не доказва това

- **Не решава квантовата гравитация.** Това е резултат в *класическата* обща теория на относителността, който използва стандартното отъждествяване на площта на хоризонта с ентропията. Не извежда тази ентропия от нещо по-фундаментално.
- **Не брои микросъстояния и не обяснява от какво е изградена ентропията на черна дупка.** Разширява термодинамичния баланс на черните дупки; не отваря кутията и не разкрива микроскопичните степени на свобода.
- **Не решава информационния парадокс на черните дупки.** Тази загадка живее в квантовата теория; статията не я засяга.
- **Не е наблюдение или измерване.** Няма телескоп, данни или сигнал от гравитационни вълни — това е математика. „Температурата“ на сливаща се черна дупка тук е прецизно дефинирана величина в уравненията, не нещо, което може да се отчете с термометър.
- **Не отменя Бекенщайн и Хокинг.** То *разширява* тяхната картина към динамичния режим, за който първоначалният закон, приложим само в равновесие, не е имал какво да каже.

Колко силни са доказателствата?

Силни за това, което представляват: внимателно и вътрешно последователно изследване по математическа физика от водеща група в областта, публикувано като *Editors' Suggestion* в *Physical Review Letters* (съпътстваща статия развива по-дългите извеждания).

Честните уговорки са за *вида*, не за качеството:

- Резултатът се основава на конвенционалното допускане, че площта на хоризонта е ентропията — площта, разделена на четири пъти константата на Нютон и константата на Планк. Ако пълна квантова теория на гравитацията някога преразгледа това отъждествяване, интерпретацията ще се промени заедно с него.

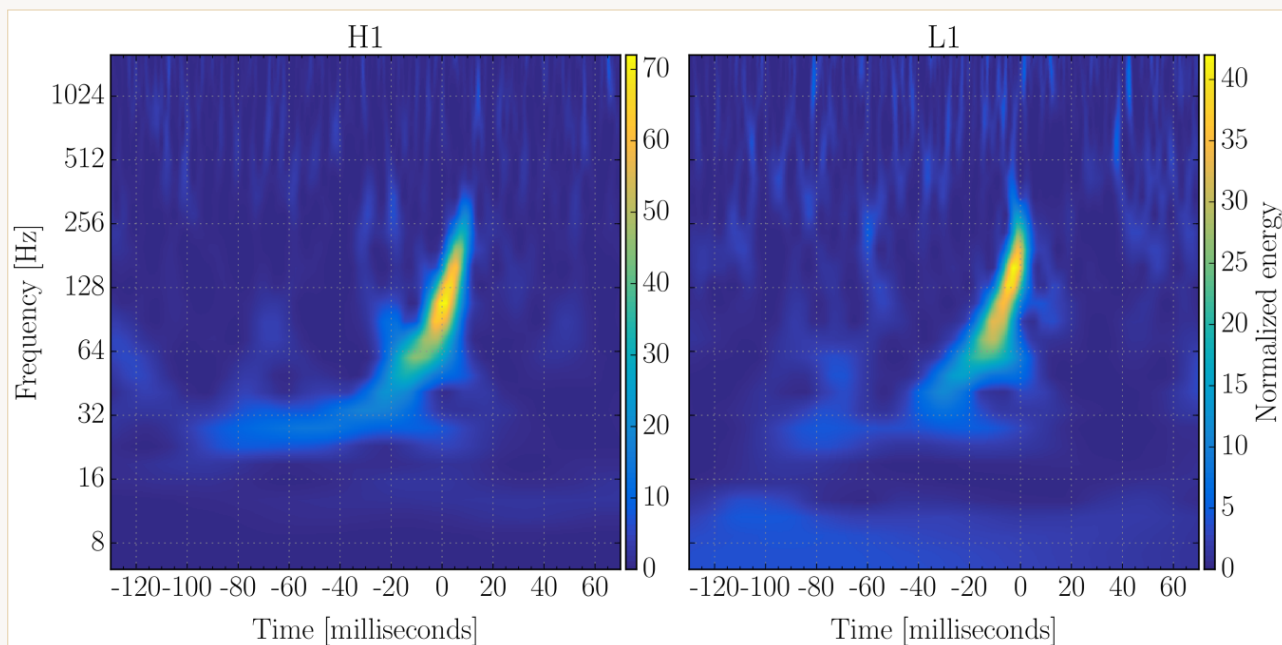
- Основните изчисления са разработени за най-честия случай — пространственоподобни динамични хоризонти с осева симетрия; авторите твърдят, че ограниченията не са съществени, но напълно общото твърдение разчита на резултати, представени другаде.
- „Ентропията е равна на площта на хоризонта дори извън равновесие“ е убедително *отъждествяване*, направено естествено от новите първи и втори закони — не теорема, изведена от микроскопична статистика.

Следователно: строго разширение на петдесетгодишна рамка, не експериментално откритие и не нов природен закон, който чака да бъде изпитан.

Защо е важно

По две причини — една практическа и една концептуална.

Практически, черните дупки, които днес действително изследваме — онези, чиито сливания LIGO и Virgo чуват — прекарват най-важните си моменти далеч от равновесие. Величините в тази статия са изградени от същите локално дефинирани хоризонти, които симулациите вече проследяват, така че резултатът дава принципен начин да се говори за ентропията и температурата на черна дупка *по време на сливане* или колапс, а не само преди и след тях.



GW150914, първият пряко открит сигнал от гравитационни вълни, идва от сливането на две черни дупки. Тези времево-честотни карти показват сигнала в LIGO Hanford (вляво) и LIGO Livingston (вдясно): и в двата детектора ярката следа се издига, докато честотата на сигнала нараства към сливането. Това е реален пример за система от черни дупки далеч от равновесие; служи като контекст за новата термодинамична рамка, а не като наблюдателно доказателство за нея.

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

Концептуално, термодинамичното поведение на черните дупки е една от малкото конкретни следи, които имаме за квантовата гравитация — място, където гравитацията, квантовата теория и термодинамиката видимо се срещат. Изясняването какво точно означават „ентропия“ и „температура“ за черна дупка, която се променя бурно, прави по-точна целта, която всяка бъдеща квантова теория трябва да улучи. То не отговаря на дълбокия въпрос какво всъщност е ентропията на черната дупка. Формулира въпроса по-точно — а в този ъгъл на физиката това е по-голямата част от работата.

Накратко

Черните дупки се подчиняват на закони, които отразяват термодинамиката, но чистият „първи закон“ от 1973 г. сравнява само черни дупки, неподвижни в равновесие, и не може да описва реален процес. Аштекар, Параизо и Шу разширяват както първия, така и втория закон към черни дупки произволно далеч от равновесие — сливащи се, поглъщащи материя, затихващи — чрез локално дефинирани „динамични хоризонти“ и отображение, което присвоява на променящата се черна дупка моментна температура и въртене. Изводът е, че площта на хоризонта остава правилната мярка за ентропия дори по време на бурни събития. Това е строг резултат в класическата обща теория на относителността, не квантова гравитация, не наблюдение, не броене на микросъстояния и не решение на информационния парадокс.

Проверка без увъртане

Какво показва статията: Математически последователно разширение на първия и втория закон на механиката на черните дупки към напълно динамични черни дупки, далеч от равновесие, изградено върху квазилокални динамични хоризонти. То дефинира краен първи закон, основан на процеси, и количествен втори закон и прави естествено отъждествяването на ентропията на динамична черна дупка с площта на хоризонта ѝ.

Какво е реално, но интерпретативно: Отъждествяването „ентропия = площ на хоризонта“ извън равновесие. Новите закони го правят убедително, но то наследява стандартното класическо допускане площ-ентропия, вместо да го извежда.

Какво не показва: Квантова теория на гравитацията; микроскопичен произход или „брой“ на ентропията на черна дупка; решение на информационния парадокс; какъвто и да е наблюдателен или експериментален резултат; температура, която може физически да бъде измерена.

Основни ограничения: Изцяло класическа обща теория на относителността; основните

результати са доказани за обичайния пространственоподобен, осесиметричен случай, като общността е аргументирана чрез съпътстваща работа; отъждествяването площ-ентропия е прието, не доказано от статистическата механика.

Колко доверие трябва да има един неспециалист? Високо доверие, че това е солиден и добре оценен теоретичен напредък, който действително разширява термодинамиката на черните дупки към динамичния режим. Също толкова високо доверие, че това *не* е твърдение за нови наблюдения, не е квантова гравитация и не решава известния информационен парадокс. Правилната нагласа: реална стъпка в разбирането, направена с тебешир, не с телескоп.

Източници

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium, Phys. Rev. Lett. 136, 251405 (2026)
<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>