



# *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 на XX век е известно, че черните дупки се подчиняват на закони, аналогични на термодинамичните, но най-ясната им версия се прилага само към черни дупки, намиращи се спокойно в равновесие. Нова статия в *Physical Review Letters* разширява първия и втория закон към онези части от квазилокалните хоризонти, които отговарят на условията за сегменти на динамичен хоризонт и могат да бъдат произволно далеч от равновесие — при акреция, колапс и през повечето етапи от сливането на черни дупки. Симулациите проследяват квазилокалния хоризонт през цялото сливане, но законите все още не обхващат краткия интервал около коалесцирането, когато той не е сегмент на динамичен хоризонт. Основната рамка е в общата теория на относителността, с полукласическо приложение към изпаряването; това 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:  $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$ . 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 Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo и Jonathan Shu основава резултата си на различно понятие за хоризонт — **квазилокално**, дефинирано единствено чрез геометрията в непосредствената му околност, без позоваване на безкрайното бъдеще. Тези **квазилокални хоризонти** са повърхностите, които специалистите по числена относителност вече използват, за да локализируют изходните черни дупки, да проследят сливането и да локализируют остатъка през цялата симулация. Разработените тук термодинамични закони се прилагат към онези части от квазилокалния хоризонт, които изпълняват допълнителните условия за **сегмент на динамичен хоризонт**. Във всеки такъв сегмент площта се изменя в пряк отговор на локалния енергиен поток, а не на събития в далечното бъдеще: тя нараства при положителен входящ поток, а при изпаряващ се времеподобен хоризонт с отрицателен енергиен поток намалява.

Освен това авторите решават по-трудната половина на проблема. В обикновената термодинамика система далеч от равновесие е прословуто трудна за описване: не може еднозначно 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 съответствие,

което взема всяко състояние по протежение на сегмент на динамичен хоризонт и във всяко напречно сечение на сегмента извлича двете числа на равновесната черна дупка, на която то моментно прилича. Чрез това съответствие на бурно променяща се черна дупка могат да бъдат присвоени **зависещи от времето температура и въртене** по протежение на сегмента.

С тези елементи — локално дефинирана енергия, протичаща през хоризонта, и моментни интензивни величини — те разширяват първия закон към черни дупки, намиращи се произволно далеч от равновесие. От решаващо значение 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 застинали състояния. Те го съчетават със съответен втори закон, чиято формулировка вече е **количествена**: промяната в площта на хоризонта е пряко свързана с локалния енергиен поток — нарастване при положителен входящ поток или намаляване при времеподобен изпаряващ се хоризонт с отрицателен поток. Взети заедно, първият и вторият закон водят до един ясен извод — за всяка фаза, представена от сегмент на динамичен хоризонт, колкото и бурна да е тя, правилната мярка за ентропия остава площта на хоризонта.

## Какво не доказва това

- Той **не** решава квантовата гравитация. Основната рамка е формулирана в общата теория на относителността; приложението ѝ към изпаряването на черни дупки използва полукласическото приближение, при което квантовите полета на материята действат върху класическо пространство-време. Тя все така приема стандартното отъждествяване на площта на хоризонта с ентропията, вместо да извежда тази ентропия от нещо по-фундаментално.
- **Не брой 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.
- Това **не** е наблюдение или измерване. Не участват телескоп, данни или сигнал от гравитационни вълни — това е математика. „Температурата“, приписвана на динамичен хоризонт при еволюцията на черна дупка, е точно дефинирана величина в уравненията, а не нещо, което би могло да се отчете с термометър.
- Тя **все още не** дава непрекъснато термодинамично описание на цялото коалесциране на две черни дупки. Числените симулации проследяват квазилокалния хоризонт през цялата еволюция — от изходните черни дупки, през сливането, до остатъка — но за кратък интервал съвсем близо до сливането този хоризонт не изпълнява условията, изисквани за сегмент на динамичен хоризонт. Според съпътстващата статия термодинамичното описание на този интервал все още е в процес на разработване.

- **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 — в рамките на това, което представлява резултатът: внимателна и вътрешно последователна работа по математическа физика от водеща група в областта, публикувана като *Editors' Suggestion* в *Physical Review Letters*. Рецензирана съпътстваща статия представя по-подробните извеждания и разглежда случаите, съкратени в кратката статия.

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 преразглежда това отъждествяване, интерпретацията ще се промени заедно с него.
- За краткост и простота кратката статия представя основното извеждане чрез осесиметрични, пространственоподобни динамични хоризонти. Рецензираната съпътстваща статия анализира изрично времеподобни динамични хоризонти и конструира ъгловия момент без ротационно поле на Killing. При изпаряващите се времеподобни хоризонти обаче изричното третиране на обратното въздействие е ограничено до сферична симетрия.
- „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.

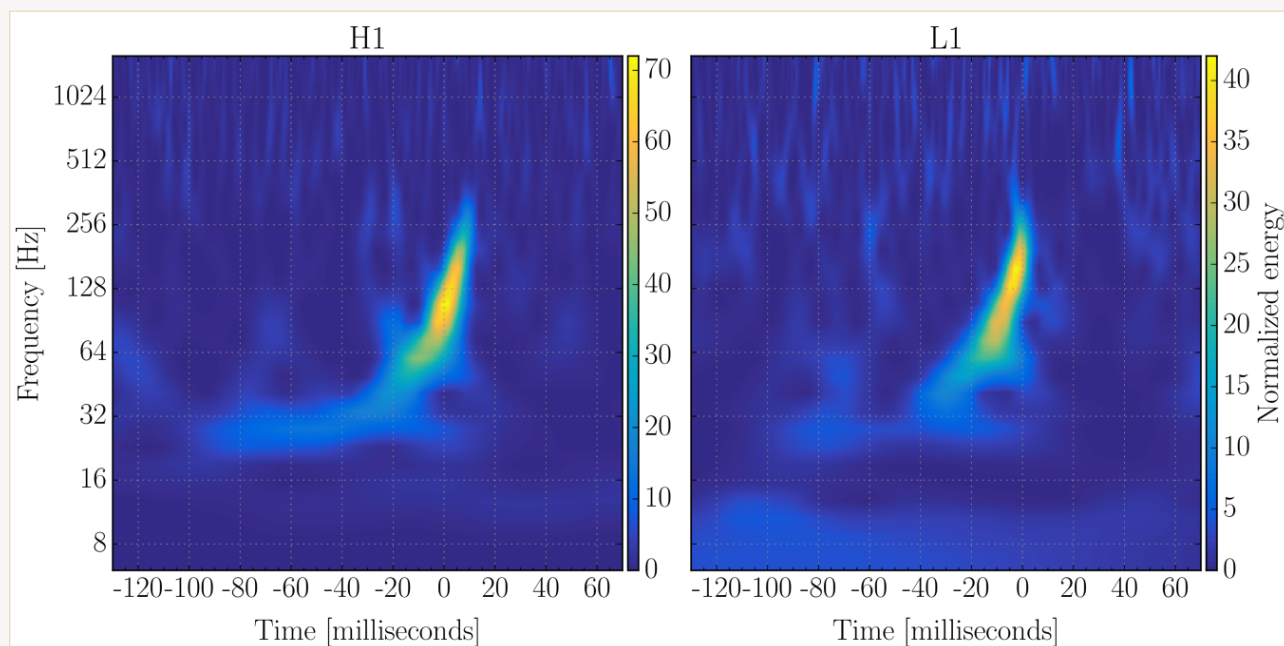
Следователно: строго разширение на петдесетгодишна рамка, не експериментално откритие и не нов природен закон, който чака да бъде изпитан.

## Защо е важно

По две причини — една практическа и една концептуална.

На практика черните дупки, които действително изследваме днес — онези, чиито сливания LIGO и Virgo чуват — прекарват най-важните си моменти далеч от равновесие. Симулациите проследяват квазилокалния хоризонт от изходните черни дупки, през сливането, до остатъка. Величините в тази статия се прилагат към частите от този хоризонт, които отговарят на условията за сегменти на динамичен хоризонт, и така дават принципен начин да се говори за ентропията и температурата на черна дупка през повечето етапи от еволюцията на сливането и по време на колапс, а не само

след като всичко се е установило. През краткия интервал непосредствено около коалесцирането квазилокалният хоризонт продължава да бъде проследяван, но остава извън настоящото термодинамично описание.



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, аналогични на термодинамичните, но ясният „първи закон“ от 1973 г. сравнява само черни дупки, които са неподвижни в равновесие, и не може да опише действителен процес. Ashtekar, Paraizo и Shu разширяват както първия, така и втория закон към черни дупки, намиращи се произволно далеч от равновесие — поглъщащи материя, колапсиращи, затихващи и преминаващи през повечето етапи на сливане — като използват квазилокални

хоризонти, прилагат термодинамичните закони към техните сегменти на динамичен хоризонт и изграждат съответствие, което приписва на всяко състояние по тези сегменти моментна температура и спин. Изводът е, че площта на хоризонта остава правилната мярка за ентропия за всяка фаза, представена от сегмент на динамичен хоризонт. Краткият интервал съвсем близо до коалесцирането все още не е обхванат от това термодинамично описание, въпреки че симулациите продължават да проследяват квазилокалния хоризонт. Основната рамка е в общата теория на относителността, с полукласическо приложение към изпаряването; тя не е квантова гравитация, наблюдение, броене на микросъстояния или 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 хоризонти и онези техни части, които изпълняват условията за сегменти на динамичен хоризонт. 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:** Основното извеждане е в общата теория на относителността, докато приложението към времеподобното изпаряване използва полукласическото приближение; краткият интервал съвсем близо до коалесцирането на двойната система не е представен от сегмент на динамичен хоризонт и термодинамичното му описание остава в процес на разработване, въпреки че числените симулации продължават да проследяват квазилокалния хоризонт; изричното третиране на обратното въздействие при изпаряващи се времеподобни хоризонти е ограничено до сферична симетрия; отъждествяването на площта с ентропията е прието, а не доказано въз основа на 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.

#### Актуализации след публикуването

- **Поправка · 2026-08-27**

След обратна връзка от автора за кореспонденция Abhay Ashtekar коригирахме две твърдения, които описваха времеподобните и неосесиметричните случаи само като аргументирани, вместо като изрично разгледани в рецензираната съпътстваща статия. При прегледа уточнихме също, че рамката все още не обхваща краткия интервал съвсем близо до коалесцирането на двойната система, когато квазилокалният хоризонт не изпълнява условията за сегмент на динамичен хоризонт.

- **Поправка · 2026-08-28**

След допълнително уточнение от кореспондиращия автор Abhay Ashtekar разграничихме квазилокалните хоризонти, които числените симулации проследяват от изходните черни дупки, през сливането, до остатъка, от частите, които изпълняват допълнителните условия за сегменти на динамичен хоризонт и към които се прилагат термодинамичните закони.

---

## Източници

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>