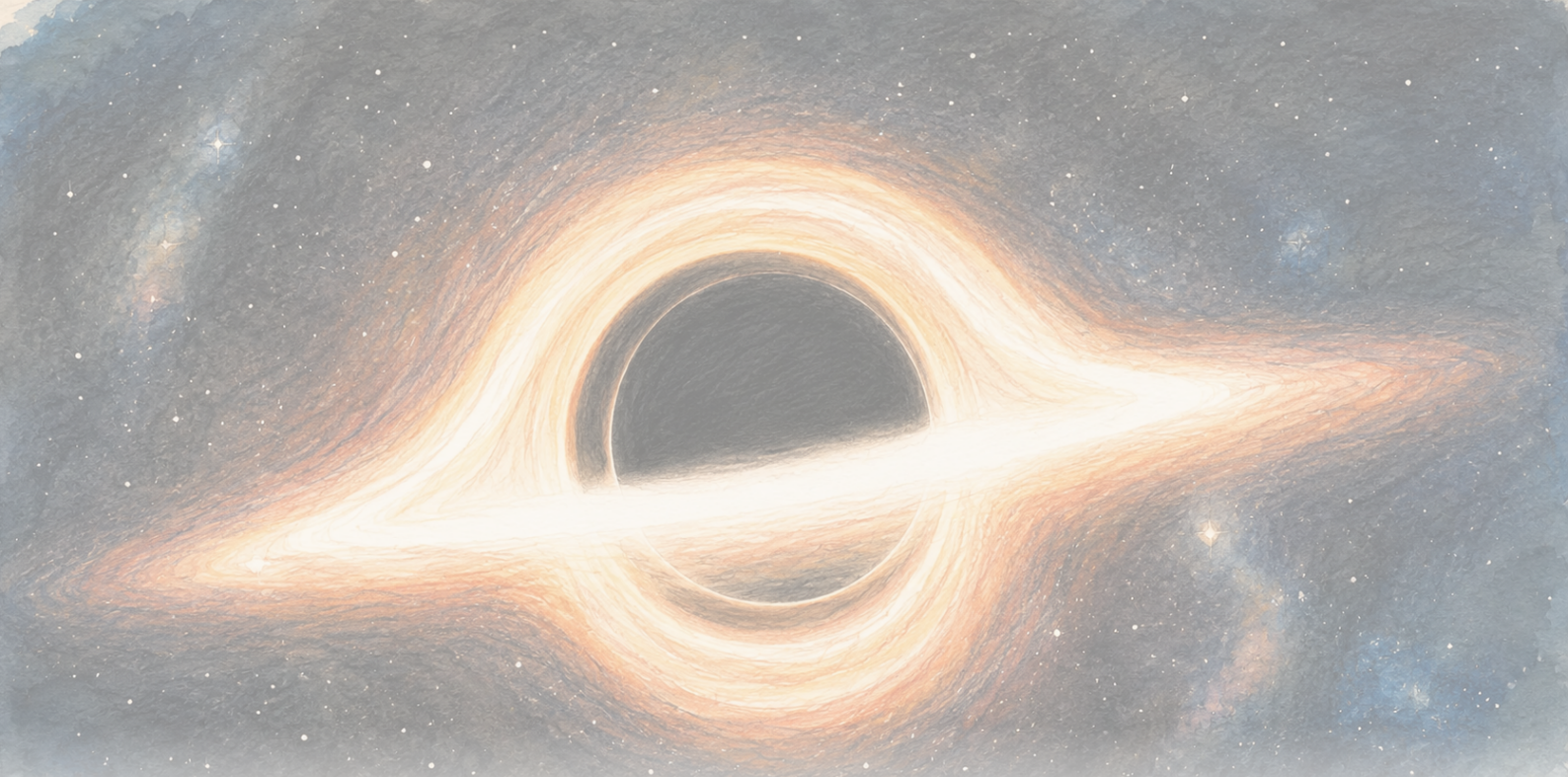




The CLEAN PAPER

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

Црните дупки следат термодинамички „закони“ — нов резултат ги проширува на црни дупки насилно далеку од рамнотежа

*Од 1970-тите е познато дека црните дупки следат закони што ја огледуваат термодинамиката, но најчистата верзија важеше само за црни дупки што мирно седат во рамнотежа. Нов труд во *Physical Review Letters* ги проширува првиот и вториот закон на црни дупки што брзо се менуваат — голтаат материја, се спојуваат, зрачат — користејќи локално дефинирани „динамички хоризонти“. Тоа им овозможува на физичарите да доделат температура и ентропија дури и на насилно еволуирачка црна дупка. Ова е математички резултат во класичната општа релативност, не нова квантна гравитација, не набљудување и не решение на информациската загатка на црните 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

Црните дупки имаат „закони“ што личат на термодинамика. Уредната верзија важеше само кога ништо не се случуваше.

Еден од најчудните факти во физиката е дека црните дупки се однесуваат како жешки тела. Во раните 1970-ти, Bekenstein и Hawking забележале дека равенките што ги опишуваат црните дупки се совпаѓаат, член по член, со законите на термодинамиката: црната дупка има ентропија пропорционална на површината на нејзиниот хоризонт и температура пропорционална на нејзината површинска гравитација. Потоа Hawking покажал дека температурата е реална во најдлабока смисла — црната дупка навистина свети, многу слабо, со топлинско зрачење.

Што е Hawking-ово зрачење?

Класично, ништо не може да избега од црна дупка, па таа би требало да биде совршено црна и воопшто да нема температура. Во 1974 година Stephen Hawking покажал дека тоа се менува кога во близина на хоризонтот ќе се земе предвид квантната теорија: црната дупка емитува слаб топлински сјај и затоа полаку губи маса, односно „испарува“. Спектарот е топлински на Hawking-овата температура, додека ширењето низ закривено простор-време го менува зрачењето што стигнува до бесконечност. Во една честа хеуристичка слика — не во вистинската изведба на Hawking — квантни флуктуации непосредно надвор од хоризонтот создаваат парови во кои едниот партнер бега како зрачење, а другиот паѓа внатре.

Клучната особина е дека оваа температура е *обратно* пропорционална на масата на црната дупка: колку е помала дупката, толку е потопла. За која било црна дупка што телескоп би можел да ја види, температурата е фантастично ниска — многу пониска од температурата на празниот простор околу неа — па во практика сјајот е сосема занемарлив и никогаш не бил директно измерен. Неговата важност е концептуална: Hawking-овото зрачење е она што ја претвора *аналогијата* меѓу механиката на црните дупки и термодинамиката во вистинска термодинамика. Бидејќи дупката навистина има температура, „температурата“ и „ентропијата“ во овие закони се реални термодинамички величини, а не формална случајност. (Ова е позадина за сегашниот труд, не еден од неговите резултати.)

Таа кореспонденција е закотвена со резултат наречен **прв закон на механиката на црните дупки** (Bardeen, Carter и Hawking, 1973). Со зборови, тој вели: ако малку ја поместите црната дупка од една стационарна состојба во блиска стационарна состојба, промената на нејзината маса е еднаква на нејзината температура помножена со промената на ентропијата, плус член за нејзиниот спин. Тоа е верзијата за црни дупки на „внесената топлина е температура по промена на ентропијата“.

Но има замка скриена во изразот *блиска стационарна состојба*. Чистиот закон од 1973 година споредува две црни дупки што мирно седат во рамнотежа и се разликуваат

само инфинитезимално. Тој никогаш навистина не опишува **процес** — црна дупка што проголтава ѕвезда, две црни дупки што се спојуваат, новородена дупка што „свони“ и се смирува по насилно раѓање. Токму тие ситуации најмногу сакаме да ги разбереме, а тие се спротивност на „мирно седење“. Уредниот закон замолчува токму кога црната дупка станува интересна.

Зошто очигледното решение не функционира

Можеби изгледа дека решението е лесно: само следете како расте хоризонтот додека материјата паѓа внатре. Проблемот е *кој* хоризонт.

Хоризонтот што повеќето луѓе си го замислуваат — **хоризонтот на настани**, вистинската точка без враќање — има суптилна и незгодна особина: тој се дефинира преку целата иднина на универзумот. За да знаете каде е хоризонтот на настани *толку сега*, би морале да знаете сè што некогаш ќе падне во дупката, засекогаш. Ова не е техничка ситница. Хоризонт на настани може да почне да расте во сосема празен, рамен регион од просторот *пред* да пристигне материјата што подоцна ќе ја храни дупката, едноставно затоа што таа материја е предодредена да пристигне подоцна. Неговата површина може да расте таму каде што, локално, не се случува апсолутно ништо.

Како може хоризонт да расте пред да пристигне материјата?

Научното име за оваа загатка е **телеолошка природа на хоризонтот на настани**, наречена и негова **глобална дефиниција**. Тука „телеолошки“ не значи дека хоризонтот има цел, ја предвидува иднината или испраќа влијание наназад низ времето. Значи дека дали некој настан припаѓа внатре во хоризонтот може да се одлучи само од целосната идна историја на простор-времето.

Формалната дефиниција го кажува истото пократко. Замислете **идна нулта бесконечност** — наречена „I-plus“ и запишана $\mathcal{I}^+$ — како одредиштето до кое стигнува светлина што засекогаш бега во инаку празна, бесконечно далечна иднина. Хоризонтот на настани е границата меѓу настаните од кои надворешен светлосен сигнал на крај може да стигне до тоа одредиште и настаните од кои таков сигнал никогаш не може. Во стандардната нотација на општата релативност, тој е границата на каузалното минато на идната нулта бесконечност: $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$. Бидејќи зборот *никогаш* е вграден во дефиницијата, ниту едно мерење направено само тука и сега не може точно да го лоцира хоризонтот на настани.

Колабирачка сферична обвивка ја прави чудноста видлива. Пред да пристигне обвивката, регионот во неа може да биде празен и локално рамен. Испратете светлосни зраци нанадвор од центарот во последователно подоцнежни моменти: порано испратените зраци бегаат, додека подоцнежните ја среќаваат колабирачката обвивка во геометрија од која не можат да излезат. Хоризонтот

на настани е границата што ги разделува тие два исхода. Ако се следи наназад, таа граница започнува во центарот и се шири низ сè уште празната, рамна внатрешност пред обвивката да стигне до неа. Растечката површина не пријавува никаков локален проток на материја таму; таа бележи кои патишта за бегство остануваат отворени во завршеното простор-време.

Ништо во оваа слика не дејствува наназад во времето. Ако обвивката се пренасочеше и не се формираше црна дупка, завршеното простор-време ќе беше поинакво и тој претходен регион немаше да биде дел од хоризонт на настани. Поуката не е дека иднината го менува минатото, туку дека хоризонтот на настани е **глобална каузална граница**, а не површина што близок набљудувач може да ја детектира во еден момент. Токму затоа физичарите користат квазилокални или динамички хоризонти кога треба да следат црна дупка додека се менува.

Тоа го прави хоризонтот на настани бескорисен како тековен опис на „состојбата“ на црната дупка. Не можете ни да го лоцирате во компјутерска симулација додека симулацијата не заврши, а уште помалку да го користите за момент по момент да следите температура или ентропија.

Потегот: хоризонт што може да се дефинира локално

Новиот труд, од Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo и Jonathan Shu, го гради резултатот врз поинаков поим за хоризонт — **квазилокален**, дефиниран само од геометријата во сопственото соседство, без повикување на бесконечната иднина. Овие „сегменти на динамички хоризонт“ се површините што нумеричките релативисти веќе ги користат за наоѓање црни дупки во симулации на спојувања, токму затоа што се локални и чесни: нивната површина расте само таму каде енергија навистина ги преминува.

Над тоа, авторите ја решаваат потешката половина од проблемот. Во обичната термодинамика, систем далеку од рамнотежа е озлогласено лизгав: не можете чисто да му доделите една температура или притисок, бидејќи тие величини се добро дефинирани дури откако нештата ќе се смират. Црните дупки го имаат истиот проблем — сè додека, како што покажуваат авторите, не се искористи посебна особина на општата релативност. Црна дупка во рамнотежа (Кер-ова црна дупка) е целосно определена само со две бројки: нејзината големина и спинот. Затоа авторите градат пресликување што зема кој било диво еволуирачки, нерамнотежен хоризонт и во секој момент ги отчитува двете бројки на рамнотежната црна дупка на која тој во тој миг наликува. Преку тоа пресликување, на насилно менувачка црна дупка сепак може да ѝ се доделат **временски зависна температура и спин**.

Со тие делови — локално дефинирана енергија што тече преку хоризонтот и моментални интензивни величини — тие го прошируваат првиот закон на црни дупки произволно далеку од рамнотежа. Клучно, новиот закон опишува **конечни промени предизвикани**

од реални физички процеси (материја и гравитациски бранови што го преминуваат хоризонтот), а не инфинитезимални чекори меѓу две замрзнати состојби. Го спаруваат со соодветен втор закон чија изјава сега е *квантитативна*: површината на хоризонтот расте за количина директно врзана за енергијата што влегла. Заедно, првиот и вториот закон упатуваат на еден чист заклучок — дури и за црна дупка среде најнасилниот можен настан, вистинската мерка на ентропијата и понатаму е површината на нејзиниот хоризонт.

Што ова не докажува

- **Не** ја решава квантната гравитација. Ова е резултат во *класичната* општа релативност, со стандардната идентификација на површината на хоризонтот со ентропијата. Не ја изведува таа ентропија од нешто пофундаментално.
- **Не** брои микросостојби ниту објаснува *од што* е направена ентропијата на црната дупка. Го проширува сметководството на термодинамиката на црните дупки; не ја отвора кутијата за да ги открие микроскопските степени на слобода.
- **Не** го решава информацискиот парадокс на црните дупки. Таа загатка живее во квантната теорија; овој труд не ја допира.
- Ова **не е** набљудување или мерење. Нема телескоп, нема податоци, нема сигнал на гравитациски бранови — ова е математика. „Температурата“ на спојувачка црна дупка тука е прецизно дефинирана величина во равенките, не нешто што можете да го прочитате од термометар.
- **Не** ги соборува Bekenstein и Hawking. Ја *проширува* нивната слика во динамичкиот режим каде првичниот закон, ограничен на рамнотежа, немал што да каже.

Колку се убедливи доказите?

Силни, за она што се: внимателно и внатрешно доследно парче математичка физика од водечка група во областа, објавено како *Editors' Suggestion* во Physical Review Letters (придружен труд ги разработува подолгите изведби).

Чесните огради се однесуваат на *видот* на резултатот, не на неговиот квалитет:

- Се потпира на конвенционалната претпоставка дека површината на хоризонтот е ентропија (површина поделена со четири пати Newton-овата константа и Planck-овата константа). Ако таа идентификација некогаш се ревидира со целосна квантна теорија на гравитацијата, и толкувањето ќе се движи со неа.
- Главните пресметки се разработени за најчестиот случај (простороподобни динамички хоризонти, аксијално симетрични); авторите тврдат дека ограничувањата не се суштински, но целосно општата изјава се потпира на резултати од други места.
- „Ентропијата е еднаква на површината на хоризонтот, дури и далеку од рамнотежа“

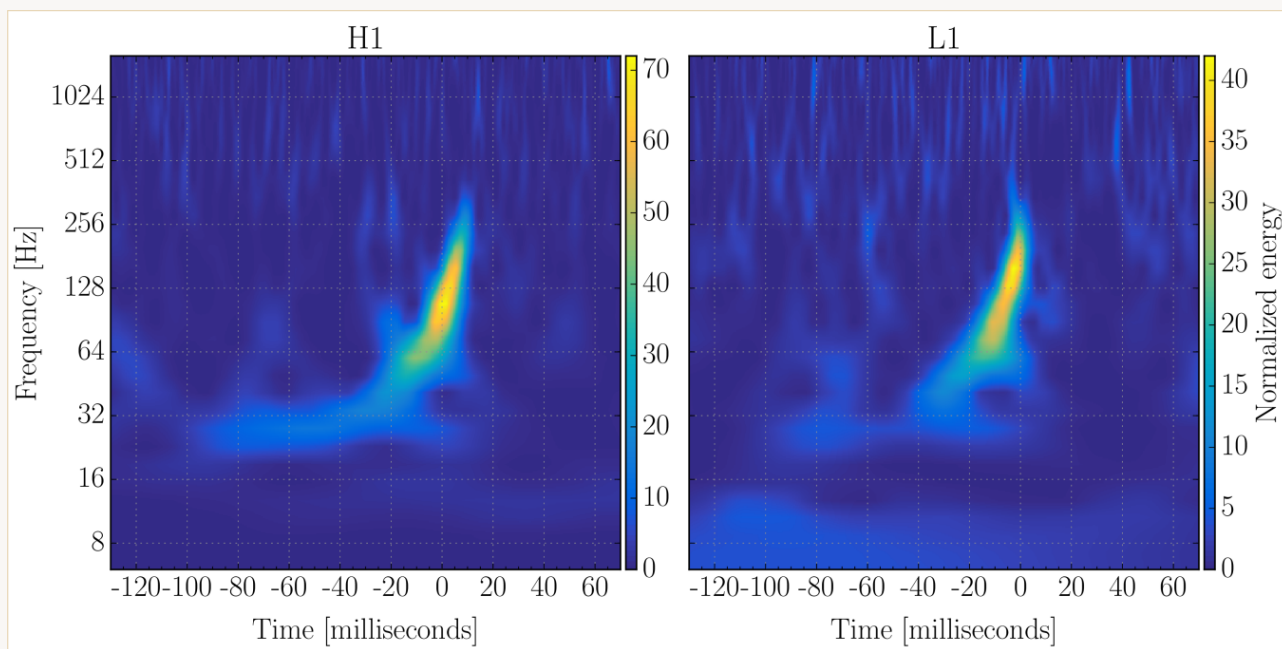
е убедлива *идентификација* што новите прв и втор закон ја прават природна — не теорема изведена од микроскопска статистика.

Значи: ригорозно проширување на рамка стара педесет години, не експериментално откритие и не нов физички закон на природата што чека да се тестира.

Зошто е важно

Од две причини, една практична и една концептуална.

Практично, црните дупки што денес навистина ги проучуваме — оние што LIGO и Virgo ги „слушаат“ како се спојуваат — ги минуваат своите најважни моменти далеку од рамнотежа. Величините во овој труд се изградени од истите локално дефинирани хоризонти што симулациите веќе ги следат, па тоа дава принципиелен начин да се зборува за ентропијата и температурата на црна дупка *за време* на спојување или колапс, а не само пред и потоа.



GW150914, првиот директно детектиран сигнал на гравитациски бранови, дошол од спојување на две црни дупки. Овие временско-фреквентни карти го покажуваат сигналот во LIGO Hanford (лево) и LIGO Livingston (десно): во двата детектора светлата трага оди нагоре додека фреквенцијата на сигналот расте кон спојувањето. Ова е реален пример за систем на црни дупки далеку од рамнотежа; служи како контекст за новата термодинамичка рамка, не како набљудувачки доказ за неа.

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

Концептуално, термодинамичкото однесување на црните дупки е една од малкуте конкретни траги што ги имаме за квантната гравитација — местото каде гравитацијата, квантната теорија и термодинамиката видливо се среќаваат. Прецизирањето што

точно значат „ентропија“ и „температура“ за црна дупка што насилно се менува ја стеснува целта што секоја идна квантна теорија мора да ја погоди. Не одговара на длабокото прашање што навистина е ентропијата на црната дупка. Го поставува прашањето попрецизно — што, во овој агол од физиката, е поголем дел од работата.

Кратко резиме

Црните дупки следат закони што ја огледуваат термодинамиката, но чистиот „прв закон“ од 1973 година споредувал само црни дупки што мирно седат во рамнотежа и не можел да опише вистински процес. Ashtekar, Paraizo и Shu ги прошируваат и првиот и вториот закон на црни дупки произволно далеку од рамнотежа — што се спојуваат, се хранат, се смируваат — користејќи локално дефинирани „динамички хоризонти“ и пресликување што на менувачка црна дупка ѝ доделува моментална температура и спин. Резултатот е дека површината на хоризонтот останува правилната мерка на ентропијата дури и за време на насилни настани. Тоа е ригорозен резултат во класичната општа релативност, не квантна гравитација, не набљудување, не броење микросостојби и не решение на информацискиот парадокс.

Проверка без претерување

Што покажува трудот: Математички доследно проширување на првиот и вториот закон на механиката на црните дупки на целосно динамички црни дупки далеку од рамнотежа, изградено врз квазилокални динамички хоризонти. Дефинира конечен прв закон заснован на процес и квантитативен втор закон, и ја прави природна идентификацијата на ентропијата на динамичка црна дупка со површината на нејзиниот хоризонт.

Што е вистинско, но толкувачко: Идентификацијата „ентропија = површина на хоризонтот“ далеку од рамнотежа. Новите закони ја прават убедлива, но таа ја наследува стандардната класична претпоставка површина–ентропија наместо да ја изведува.

Што не покажува: Квантна теорија на гравитацијата; микроскопско потекло или „броење“ на ентропијата на црна дупка; решение на информацискиот парадокс; каков било набљудувачки или експериментален резултат; температура што физички би можеле да ја измерите.

Главни ограничувања: Целосно класична општа релативност; главните резултати се докажани за честиот простороподобен, аксијално симетричен случај, со општост аргументирана преку придружната работа; идентификацијата површина–ентропија е претпоставена, не докажана од статистичка механика.

Колкава доверба треба да има општ читател? Висока доверба дека ова е солиден, добро ценет теоретски напредок што навистина ја проширува термодинамиката на црните дупки во динамичкиот режим. Подеднакво висока доверба дека *не* е тврдење за нови набљудувања, не е квантна гравитација и не го решава познатиот информациски проблем. Правилниот став: вистински чекор во разбирањето, направен со креда, а не со телескоп.

Извори

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

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