



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 се покоруваат на закони што ја огледуваат термодинамиката, но најелегантната верзија важела само за црни дупки што мирно се наоѓаат во рамнотежа. Нов труд во *Physical Review Letters* ги проширува првиот и вториот закон на деловите од квазилокалните хоризонти што ги исполнуваат условите за сегменти на динамички хоризонт и можат да бидат произволно далеку од рамнотежа — при акреција, колапс и во повеќето фази од спојувањето на црни дупки. Симулациите го следат квазилокалниот хоризонт во текот на целото спојување, но законите сè уште не го опфаќаат краткиот интервал околу слевањето, кога тој не е сегмент на динамички хоризонт. Основната рамка е во општата релативност, со семикласична примена на испарувањето; тоа не е нова квантна гравитација, набљудување или 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 на Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo и Jonathan Shu го заснова својот резултат врз поинаков поим за хоризонт — **квазилокален**, дефиниран само преку геометријата во сопственото соседство, без повикување на бесконечната иднина. Овие **квазилокални хоризонти** се површините што нумеричките релативисти веќе ги користат за да ги лоцираат почетните црни дупки, да го следат спојувањето и да го лоцираат остатокот во текот на целата симулација. Термодинамичките закони развиени тука се применуваат на деловите од квазилокалниот хоризонт што ги исполнуваат дополнителните услови за **сегмент на динамички хоризонт**. На секој таков сегмент површината се менува како директен одговор на локалниот енергетски флукс, а не на настани во далечната иднина: таа се зголемува при позитивен прилив, а кај временскоподобен хоризонт што испарува со негативен енергетски флукс — се намалува.

Над тоа, авторите ја решаваат потешката половина од проблемот. Во обичната термодинамика, систем далеку од рамнотежа е озлогласено тешко да се опише: 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 ја зема секоја состојба долж сегмент на динамички хоризонт и, во секој напречен пресек на тој сегмент, ги отчитува двете бројки на рамнотежната

црна дупка на која состојбата во тој миг наликува. Преку тоа пресликување, на црна дупка што силно се менува може долж сегментот да ѝ се доделат **временски зависна температура и спин**.

Со тие елементи — локално дефинирана енергија што тече преку хоризонтот и моментални интензивни величини — тие го прошируваат првиот закон на црни дупки произволно далеку од рамнотежа. Клучно е што 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. Со него поврзуваат соодветен втор закон, чиј исказ сега е *квантитативен*: промената на површината на хоризонтот е непосредно врзана за локалниот енергетски флуks — раст при позитивен прилив или намалување кај временскоподобен хоризонт што испарува при негативен флуks. Земени заедно, првиот и вториот закон водат до еден јасен заклучок — за секоја фаза претставена со сегмент на динамички хоризонт, колку и да е бурна, правилната мерка на ентропијата и понатаму е површината на нејзиниот хоризонт.

Што ова не докажува

- Тоа **не** ја решава квантната гравитација. Основната рамка е формулирана во општата релативност; нејзината примена на испарувањето на црните дупки ја користи семикласичната апроксимација, во која квантните полиња на материјата дејствуваат врз класичен простор-време. Таа и понатаму ја претпоставува стандардната идентификација на површината на хоризонтот со ентропијата, наместо да 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.
- Тоа **не е** набљудување или мерење. Не се вклучени телескоп, податоци или сигнал од гравитациски бранови — ова е математика. “Температурата” што му се припишува на динамичкиот хоризонт додека црната дупка еволуира е прецизно дефинирана величина во равенките, а не нешто што би можело да се отчита од термометар.
- Тоа **сè уште не** дава непрекинат термодинамички опис на целото слевање на две црни дупки. Нумеричките симулации го следат квазилокалниот хоризонт низ целата еволуција — од почетните црни дупки, преку спојувањето, до остатокот — но во краток интервал сосема близу до спојувањето тој хоризонт не ги исполнува условите потребни за сегмент на динамички хоризонт. Во придружниот труд се вели дека термодинамичкиот опис на тој интервал сè уште е во разработка.
- **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?

Силен, во рамките на она што претставува: внимателен и внатрешно доследен труд од математичката физика од водечка група во областа, објавен како *Editors' Suggestion* во *Physical Review Letters*. Рецензираниот придружен труд ги дава подолгите изведувања и ги обработува случаите скратени од Letter.

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

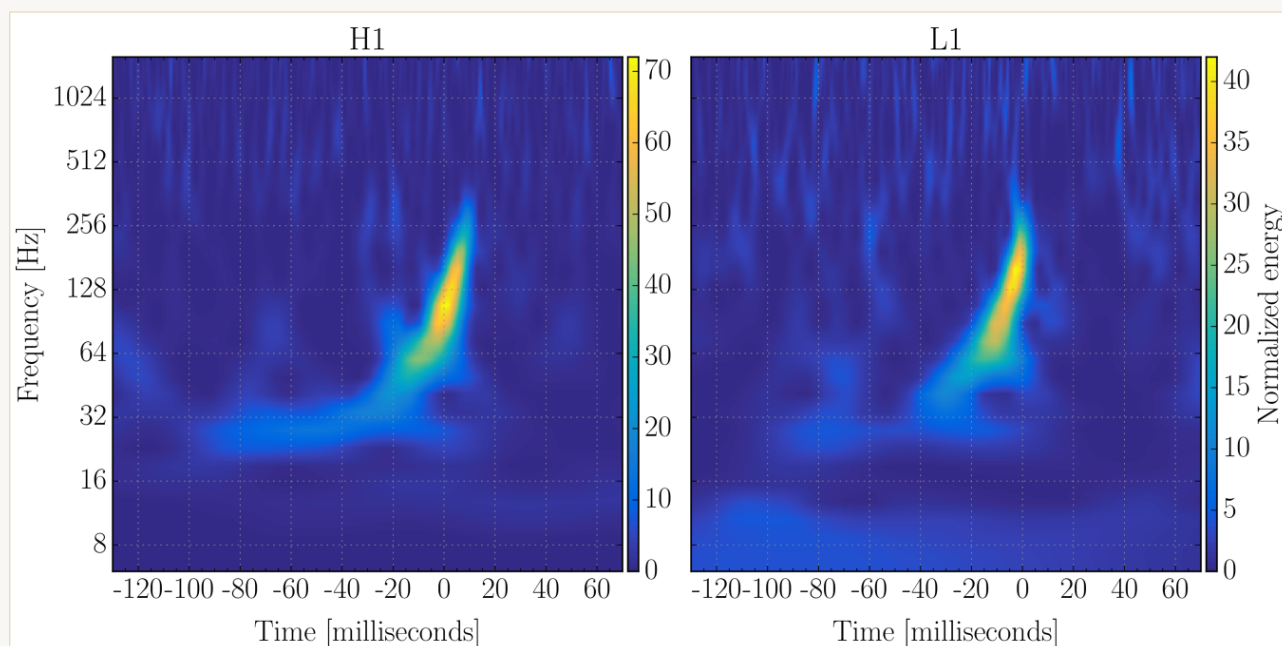
- Се потпира на конвенционалната претпоставка дека површината на хоризонтот е ентропија (површина поделена со четири пати Newton-овата константа и Planck-овата константа). Ако таа идентификација некогаш се ревидира со целосна квантна теорија на гравитацијата, и толкувањето ќе се движи со неа.
- Заради концизност и едноставност, краткиот Letter го прикажува главното изведување со аксијално симетрични, простороподобни динамички хоризонти. Рецензираниот придружен труд изречно ги анализира временскоподобните динамички хоризонти и конструира аголен момент без ротациско Килингово поле. Сепак, кај временскоподобните хоризонти што испаруваат, експлицитната обработка на повратното дејство е ограничена на сферична симетрија.
- „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 чие спојување го ‘слушаат’ LIGO и Virgo — ги минуваат своите најважни мигови далеку од рамнотежа. Симулациите го следат квазилокалниот хоризонт од почетните црни дупки, преку спојувањето, до остатокот. Величините во овој труд се применуваат на деловите од тој хоризонт што ги исполнуваат условите за сегменти на динамички хоризонт, па трудот дава принципиелен начин да се зборува за ентропијата и температурата на црната дупка низ повеќето фази од еволуцијата на спојувањето и при колапс, а не само откако сè ќе се смири. Во краткиот интервал непосредно околу слевањето квазилокалниот хоризонт продолжува да се следи, но останува надвор од сегашниот термодинамички опис.



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 се покоруваат на закони што ја огледуваат термодинамиката, но елегантниот ‘прв закон’ од 1973 година споредувал само црни дупки што мируваат во рамнотежа и не можел да опише реален процес. Ashtekar, Paraizo и Shu ги прошируваат и првиот и вториот закон на црни дупки произволно далеку од рамнотежа — додека примаат материја, колабираат, се смируваат и минуваат низ повеќето фази од спојувањето — користејќи квазилокални хоризонти, применувајќи ги термодинамичките закони на нивните сегменти на динамички хоризонт и градејќи пресликување што на секоја состојба долж тие сегменти ѝ припишува моментална температура и спин. Заклучокот е дека површината на хоризонтот останува правилната мерка на ентропијата за секоја фаза претставена со сегмент на динамички хоризонт. Краткиот

интервал сосема близу до слевањето сè уште не е опфатен со тој термодинамички опис, иако симулациите продолжуваат да го следат квазилокалниот хоризонт. Основната рамка е во општата релативност, со семикласична примена на испарувањето; тоа не е квантна гравитација, набљудување, броење микросостојби или 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 хоризонти и нивните делови што ги исполнуваат условите за сегменти на динамички хоризонт. 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: Основното изведување е во општата релативност, додека примената за испарување со временскоподобен хоризонт ја користи семикласичната апроксимација; краткиот интервал сосема близу до слевањето на две црни дупки не е претставен со сегмент на динамички хоризонт и неговиот термодинамички опис сè уште се разработува, иако нумеричките симулации продолжуваат да го следат квазилокалниот хоризонт; експлицитната обработка на повратното дејство кај временскоподобните хоризонти што испаруваат е ограничена на сферична симетрија; идентификацијата површина–ентропија се претпоставува, а не се докажува од статистичката 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.

Ажурирања по објавувањето

- **Исправка · 2026-08-27**

По повратните забелешки од авторот за кореспонденција Abhay Ashtekar, исправивме два исказа во кои временскоподобните и неаксијално симетричните случаи беа опишани како само аргументирани, наместо како експлицитно обработени во рецензираниот придружен труд. При ревизијата разјаснивме и дека рамката сè уште не го опфаќа краткиот интервал сосема близу до слевањето на две црни дупки, кога квазилокалниот хоризонт не ги исполнува условите за сегмент на динамички хоризонт.

- **Исправка · 2026-08-28**

По дополнително појаснување од авторот за кореспонденција Abhay Ashtekar, ги разграничивме квазилокалните хоризонти, кои нумеричките симулации ги следат од почетните црни дупки, преку спојувањето, до остатокот, од нивните делови што ги исполнуваат дополнителните услови за сегменти на динамички хоризонт, каде што се применуваат термодинамичките закони.

Извори

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>