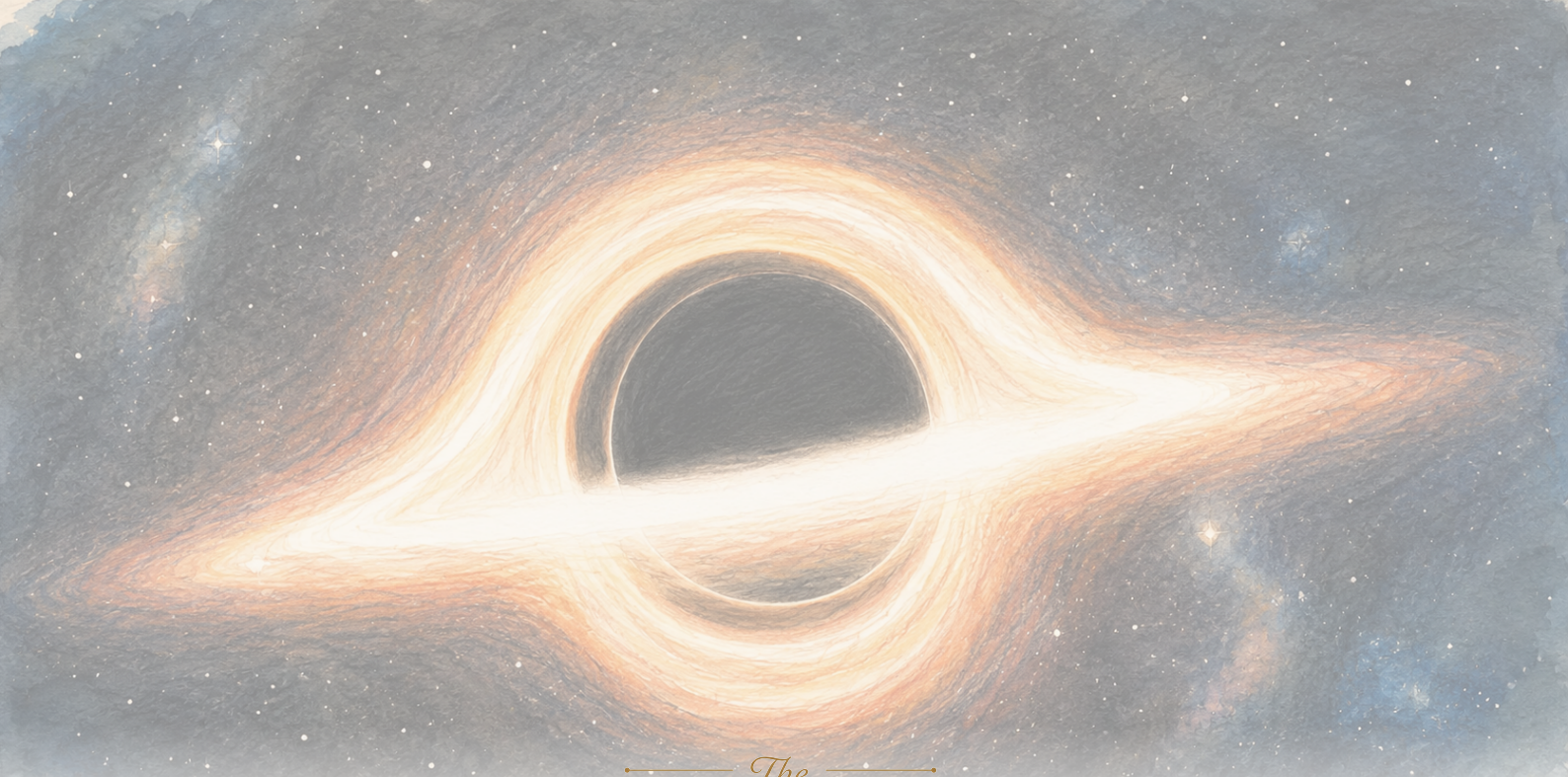




The CLEAN PAPER

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

Чорныя дзіркі падпарадкоўваюцца тэрмадынамічным «законам» — новы вынік пашырае іх на бурныя нераўнаважныя чорныя дзіркі

З 1970-х вядома, што чорныя дзіркі падпарадкоўваюцца законам, падобным да тэрмадынамікі, але самая чыстая версія ўжывалася толькі да спакойных дзірак у раўнавазе. Новы артыкул у Physical Review Letters пашырае першы і другі законы на чорныя дзіркі, якія хутка змяняюцца — паглынаюць рэчыва, зліваюцца і выпраменьваюць, — выкарыстоўваючы лакальна вызначаныя «дынамічныя гарызонты». Гэта дазваляе прызначаць тэмпературу і энтрапію нават чорнай дзірцы, якая бурна эвалюцыянуе. Вынік з'яўляецца матэматыкай класічнай агульнай тэорыі адноснасці, а не новай квантавай гравітацыяй, не назіраннем і не развязаннем інфармацыйнага парадоксу.

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

Чорныя дзіркі маюць «законы», падобныя да тэрмадынамікі. Акуратная версія працавала толькі тады, калі нічога не адбывалася

Адзін з самых дзіўных фактаў фізікі ў тым, што чорныя дзіркі паводзяць сябе як гарачыя целы. На пачатку 1970-х Бекенштэйн і Хокінг заўважылі, што раўнанні, якія апісваюць чорныя дзіркі, член за членам адпавядаюць законам тэрмадынамікі: чорная дзірка мае энтрапію, прапарцыянальную плошчы гарызонту, і тэмпературу, прапарцыянальную паверхневай гравітацыі. Потым Хокінг паказаў, што тэмпература рэальная ў самым глыбокім сэнсе: чорная дзірка сапраўды вельмі слаба свеціцца цеплавым выпраменьваннем.

Што такое выпраменьванне Хокінга?

У класічнай фізіцы з чорнай дзіркі нічога не выходзіць, таму яна павінна была б быць цалкам чорнай і ўвогуле не мець тэмпературы. У 1974 годзе Стывен Хокінг паказаў, што з улікам квантавай тэорыі каля гарызонту сітуацыя змяняецца: чорная дзірка выпускае слабое цеплавое свячэнне і таму павольна губляе масу, або «выпарэецца». Спектр з'яўляецца цеплавым пры тэмпературы Хокінга, хоць распаўсюджванне праз скрыўленую прастору-час змяняе выпраменьванне, якое дасягае бясконцасці. У распаўсюджанай нагляднай карціне — гэта не сапраўдны доказ Хокінга — квантавыя флуктуацыі непасрэдна за гарызонтам ствараюць пары, адзін удзельнік якіх адлятае як выпраменьванне, а другі падае ўнутр.

Ключавая асаблівасць у тым, што тэмпература *адваротна* прапарцыянальная масе чорнай дзіркі: чым меншая дзірка, тым яна гарачэйшая. Для любой чорнай дзіркі, якую здольны ўбачыць тэлескоп, тэмпература фантастычна нізкая — значна ніжэйшая за тэмпературу навакольнай пустой прасторы, — таму на практыцы свячэнне зусім мізэрнае і ніколі не вымяралася непасрэдна. Яго значэнне канцэптуальнае: менавіта выпраменьванне Хокінга ператварае *аналогію* паміж механікай чорных дзірак і тэрмадынамікай у рэальную фізіку. Паколькі дзірка сапраўды мае тэмпературу, «тэмпература» і «энтрапія» ў гэтых законах — сапраўдныя тэрмадынамічныя велічыні, а не фармальнае супадзенне. Гэта фон для цяперашняга артыкула, а не яго вынік.

Гэтая адпаведнасць замацаваная вынікамі, які называюць **першым законам механікі чорных дзірак** — Бардзін, Картэр і Хокінг, 1973. Словамі ён сцвярджае: калі крыху зрушыць чорную дзірку з аднаго стацыянарнага стану ў блізкі стацыянарны стан, змена яе масы роўная тэмпературы, памножанай на змену энтрапіі, плюс складнік, звязаны з кручэннем. Гэта версія для чорных дзірак выразу «атрыманае цяпло роўнае тэмпературы, памножанай на змену энтрапіі».

Але ў словах *блізкі стацыянарны стан* схаваная праблема. Класічны закон 1973 года параўноўвае дзве чорныя дзіркі, якія спакойна знаходзяцца ў раўнавазе і адрозніваюцца

толькі бясконца мала. Ён увогуле не апісвае **працэс** — паглыннанне зоркі, зліццё дзвюх чорных дзірак або згасанне нованароджанай дзіркі пасля бурнага ўзнікнення. Менавіта гэтыя сітуацыі цікавяць нас найбольш, і яны супрацьлеглыя «спакойнаму стану». Акуратны закон маўчыць роўна тады, калі чорная дзірка становіцца цікавай.

Чаму відавочнае выпраўленне не працуе

Можна падумаць, што развязанне простае: назіраць, як гарызонт расце падчас падзення рэчыва. Праблема ў тым, які гарызонт выкарыстоўваць.

Гарызонт, які звычайна ўяўляюць людзі, — **гарызонт падзей**, сапраўдная кропка незвароту, — мае тонкую і нязручную ўласцівасць: ён вызначаецца ўсёй будучай гісторыяй Сусвету. Каб ведаць, дзе знаходзіцца гарызонт падзей *цяпер*, давялося б ведаць усё, што калі-небудзь упадзе ў чорную дзірку, цягам бясконцай будучыні. Гэта не тэхнічная дробязь. Гарызонт падзей можа пачаць расці ў цалкам пустой і плоскай вобласці прасторы да прыбыцця рэчыва, якое пазней накорміць дзірку, проста таму, што гэтаму рэчыву наканавана прыйсці. Яго плошча можа павялічвацца там, дзе лакальна ўвогуле нічога не адбываецца.

Як гарызонт можа расці да прыбыцця рэчыва?

Навуковая назва гэтай асаблівасці — **тэлеалагічная прырода гарызонту падзей**, якую таксама называюць яго **глабальным вызначэннем**. Тут «тэлеалагічны» не азначае, што гарызонт мае мэту, прадбачыць будучыню або пасылае ўплыў назад у часе. Гэта азначае, што вырашыць, ці ляжыць падзея ўнутры гарызонту, можна толькі паводле поўнай будучай гісторыі прасторы-часу.

Фармальнае вызначэнне кажа тое самае карацей. Уявіце **будучую святлападобную бясконцасць**, пазначаную $\mathcal{I}^+$, як месца прызначэння святла, якое назаўсёды сыходзіць у пустую, бясконца далёкую будучыню. Гарызонт падзей — мяжа паміж падзеямі, адкуль накіраваны вонкі светлавы сігнал калі-небудзь зможа дасягнуць гэтай вобласці, і падзеямі, адкуль ніводзін сігнал ніколі не зможа выйсці. У стандартным запісе агульнай тэорыі адноснасці гэта мяжа прычыннага мінулага будучай святлападобнай бясконцасці: $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$. Паколькі слова *калі-небудзь* убудавана ў вызначэнне, ніводнае вымярэнне, зробленае толькі тут і цяпер, не можа дакладна вызначыць гарызонт падзей.

Дзіўнасць добра бачная на прыкладзе сферычнай абалонкі, якая калапсуе. Да яе прыходу ўнутраная вобласць можа быць пустой і лакальна плоскай. Калі паслядоўна выпускаць з цэнтра накіраваныя вонкі прамяні святла, раннія прамяні ўцякуць, а пазнейшыя сустраюць абалонку, што падае, у геаметрыі, з якой ужо не змогуць выбрацца. Гарызонт падзей — мяжа паміж гэтымі вынікамі. Калі прасачыць яе назад, яна пачынаецца ў цэнтры і пашыраецца праз яшчэ

пустую і плоскую ўнутраную вобласць да таго, як туды прыходзіць абалонка. Рост плошчы не паведамляе пра мясцовы паток рэчыва; ён фіксуе, якія шляхі выхаду застаюцца адкрытымі ў завершанай прасторы-часе.

Нішто тут не дзейнічае назад у часе. Калі б абалонку адхілілі і чорная дзірка не ўтварылася, поўная прастора-час была б іншай, і ранняя вобласць не належала б гарызонту падзей. Урок не ў тым, што будучыня змяняе мінулае, а ў тым, што гарызонт падзей — **глабальная прычынная мяжа**, а не паверхня, якую блізкі назіральнік можа выявіць у адно імгненне. Менавіта таму, калі фізікам трэба сачыць за чорнай дзіркай, што змяняецца, яны выкарыстоўваюць квазілакальныя або дынамічныя гарызонты.

Гэта робіць гарызонт падзей непрыдатным для бягучага апісання «стану» чорнай дзіркі. Нават у камп'ютарнай сімуляцыі яго нельга дакладна знайсці, пакуль разлік не завершаны, і тым больш яго нельга выкарыстоўваць для адсочвання тэмпературы або энтрапіі імгненне за імгненнем.

Ход артыкула: гарызонт, вызначаны лакальна

Новая праца Абхая Апштэкара, Даніэля Параіза і Джонатана Шу будзецца на іншым паняцці гарызонту — **квазілакальным**, вызначаным толькі геаметрыяй ва ўласным наваколлі без спасылкі на бясконцую будучыню. Гэтыя «сегменты дынамічнага гарызонту» ўжо выкарыстоўваюць лікавыя рэлятывісты для пошуку чорных дзірак у сімуляцыях зліццяў менавіта таму, што яны лакальныя і сумленныя: іх плошча расце толькі там, дзе праз іх сапраўды праходзіць энергія.

Далей аўтары развязваюць складанейшую палову задачы. У звычайнай тэрмадынаміцы сістэма далёка ад раўнавагі вельмі нязручная: ёй нельга адназначна прызначыць адну тэмпературу або ціск, бо гэтыя велічыні строга вызначаныя толькі пасля ўсталявання раўнавагі. У чорных дзірак тая ж праблема — пакуль не скарыстацца асаблівай уласцівасцю агульнай тэорыі адноснасці. Раўнаважная чорная дзірка, то-бок чорная дзірка Кера, цалкам задаецца толькі двума лікамі: памерам і кручэннем. Аўтары будуць адлюстраванне, якое для любога бурна эвалюцыянуючага нераўнаважнага гарызонту ў кожны момант здабывае два лікі раўнаважнай чорнай дзіркі, на якую ён у гэты момант падобны. Дзякуючы гэтаму чорнай дзірцы, што рэзка змяняецца, усё ж можна прызначыць **залежныя ад часу тэмпературу і кручэнне**.

Маючы лакальна вызначаную энергію, якая цячэ праз гарызонт, і імгненныя інтэнсіўныя велічыні, аўтары пашыраюць першы закон на чорныя дзіркі, як заўгодна далёкія ад раўнавагі. Ключавая розніца: новы закон апісвае **канечныя змены, выкліканыя рэальнымі фізічнымі працэсамі** — праходжаннем праз гарызонт рэчыва і гравітацыйных хваль, — а не бясконца малыя крокі паміж двума застылымі станамі. Яго дапаўняе адпаведны другі закон, цяпер ужо *колькасны*: плошча гарызонту расце на велічыню,

непасрэдна звязаную з энергіяй, якая паступіла. Разам першы і другі законы паказваюць на чыстую выснову: нават пасярод самай бурнай падзеі правільнай мерай энтрапіі чорнай дзіркі застаецца плошча яе гарызонту.

Чаго гэта не даказвае

- Праца **не развязвае квантавую гравітацыю**. Гэта вынік класічнай агульнай тэорыі адноснасці, які выкарыстоўвае стандартнае атаясамленне плошчы гарызонту з энтрапіяй. Ён не выводзіць гэтую энтрапію з больш фундаментальных прынцыпаў.
- Яна **не лічыць мікрастаны** і не тлумачыць, з чаго складаецца энтрапія чорнай дзіркі. Яна пашырае ўлік тэрмадынамікі чорных дзірак, але не адкрывае скрынку з мікраскапічнымі ступенямі свабоды.
- Яна **не развязвае інфармацыйны парадокс чорных дзірак**. Гэтая загадка датычыць квантавай тэорыі; артыкул яе не закранае.
- Гэта **не назіранне і не вымярэнне**. Тут няма тэлескопа, даных або сігналу гравітацыйных хваль — гэта матэматыка. «Тэмпература» чорнай дзіркі, што зліваецца, тут з’яўляецца дакладна вызначанай велічынёй у раўнаннях, а не паказаннем тэрмометра.
- Праца **не абвясняе Бекенштэйна і Хокінга**. Яна *пашырае* іх карціну на дынамічны рэжым, пра які пачатковы раўнаважны закон нічога не казаў.

Наколькі моцныя доказы

Для выніку такога тыпу яны моцныя: гэта акуратная і ўнутрана ўзгодненая праца па матэматычнай фізіцы ад вядучай групы, апублікаваная ў *Physical Review Letters* як *Editors’ Suggestion*; асобны суправаджальны артыкул змяшчае даўжэйшыя вывады.

Сумленныя агаворкі датычаць хутчэй *тыпу* выніку, чым яго якасці:

- Праца абавязваецца на звычайнае дапушчэнне, што плошча гарызонту ёсць энтрапія — плошча, падзеленая на чатыры з адпаведнымі сталымі Ньютана і Планка. Калі поўная квантавая тэорыя гравітацыі калі-небудзь зменіць гэта атаясамленне, інтэрпрэтацыя зменіцца разам з ім.
- Асноўныя вылічэнні выкананыя для найбольш распаўсюджанага выпадку — прасторападобных дынамічных гарызонтаў з восевай сіметрыяй. Аўтары сцвярджаюць, што абмежаванні неістотныя, але цалкам агульнае сцвярджанне часткова абавязваецца на вынікі іншых прац.
- Формула «энтрапія роўная плошчы гарызонту нават па-за раўнавагай» — пераканаўчае *атаясамленне*, якое натуральна вынікае з новых першага і другога законаў, але не тэарэма, выведзеная з мікраскапічнай статыстыкі.

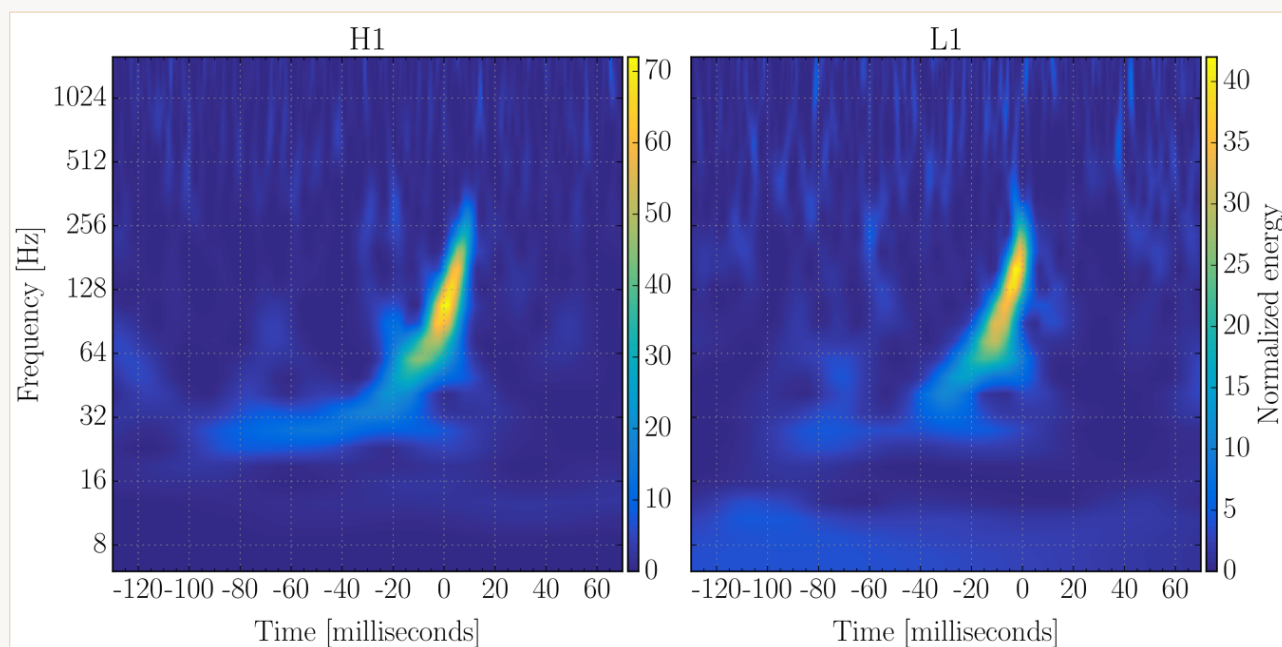
Такім чынам, гэта строгае абнаўленне пяцідзясяцігадовай сістэмы, а не эксперыментальнае

адкрыццё і не новы закон прыроды, які чакае праверкі.

Чаму гэта важна

Ёсць дзве прычыны: практычная і канцэптуальная.

Практычна чорныя дзіркі, якія мы сёння сапраўды вывучаем — тыя, чые зліцці чуюць LIGO і Virgo, — праводзяць найважнейшыя моманты далёка ад раўнавагі. Велічыні артыкула пабудаваныя на тых самых лакальна вызначаных гарызонтах, якія ўжо адсочваюць сімуляцыі, таму з'яўляецца прынцыповы спосаб гаварыць пра энтрапію і тэмпературу чорнай дзіркі *падчас* зліцця або калапсу, а не толькі да і пасля.



GW150914, першы непасрэдна зарэгістраваны сігнал гравітацыйных хваль, узнік падчас зліцця дзвюх чорных дзірак. Гэтыя частотна-часавыя карты паказваюць сігнал у LIGO Hanford злева і LIGO Livingston справа: у абодвух дэтэктарах яркі след выгінаецца ўверх з ростам частаты да моманту зліцця. Гэта рэальны прыклад сістэмы чорных дзірак далёка ад раўнавагі; ён дае кантэкст для новай тэрмадынамічнай схемы, але не з'яўляецца назіральным доказам гэтай схемы.

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

Канцэптуальная тэрмадынаміка чорных дзірак — адна з нямногіх канкрэтных падказак адносна квантавай гравітацыі, месца, дзе відавочна сустракаюцца гравітацыя, квантавая тэорыя і тэрмадынаміка. Чым дакладней мы разумеем, што азначаюць «энтрапія» і «тэмпература» для чорнай дзіркі, якая бурна змяняецца, тым дакладнейшая мішэнь, у якую павінна трапіць будучая квантавая тэорыя. Праца не адказвае на глыбокае пытанне, чым насамрэч з'яўляецца энтрапія чорнай дзіркі. Яна фармулюе пытанне дакладней — а ў гэтай галіне фізікі гэта вялікая частка працы.

Кароткі вынік

Чорныя дзіркі падпарадкоўваюцца законам, люстрана падобным да тэрмадынамікі, але чысты «першы закон» 1973 года параўноўваў толькі чорныя дзіркі, якія спакойна знаходзяцца ў раўнавазе, і не мог апісваць рэальны працэс. Аштэкар, Параіза і Шу пашырылі першы і другі законы на чорныя дзіркі, як заўгодна далёкія ад раўнавагі — такія, што зліваюцца, паглынаюць рэчыва, згасаюць, — выкарыстоўваючы лакальна вызначаныя «дынамічныя гарызонты» і адлюстраванне, якое прызначае чорнай дзірцы, што змяняецца, імгненную тэмпературу і кручэнне. Выснова ў тым, што плошча гарызонту застаецца правільнай мерай энтрапіі нават падчас бурных падзей. Гэта строгі вынік класічнай агульнай тэорыі адноснасці, а не квантавая гравітацыя, не назіранне, не падлік мікрастанаў і не развязанне інфармацыйнага парадоксу.

Праверка без перабольшанняў

Што паказвае артыкул: матэматычна ўзгодненае пашырэнне першага і другога законаў механікі чорных дзірак на цалкам дынамічныя чорныя дзіркі далёка ад раўнавагі, пабудаванае на квазілакальных дынамічных гарызонтах. Яно вызначае канечны, заснаваны на працэсе першы закон і колькасны другі закон і робіць натуральным атаясамленне энтрапіі дынамічнай чорнай дзіркі з плошчай яе гарызонту.

Што рэальна, але інтэрпрэтацыйна: атаясамленне «энтрапія = плошча гарызонту» па-за раўнавагай. Новыя законы робяць яго пераканаўчым, але яно наследуе стандартнае класічнае дапушчэнне плошча—энтрапія, а не выводзіць яго.

Чаго праца не паказвае: квантавай тэорыі гравітацыі; мікраскапічнага паходжання або «падліку» энтрапіі чорнай дзіркі; развязання інфармацыйнага парадоксу; любога назіральнага або эксперыментальнага выніку; тэмпературы, якую можна фізічна вымераць.

Галоўныя абмежаванні: паўсюль выкарыстоўваецца класічная агульная тэорыя адноснасці; асноўныя вынікі даказаныя для распаўсюджанага прасторападобнага восесіметрычнага выпадку, а агульнасць аргументуецца з дапамогай суправаджальных прац; атаясамленне плошчы і энтрапіі дапускаецца, а не выводзіцца са статыстычнай механікі.

Наколькі ўпэўненым можа быць звычайны чытач? Высокая ўпэўненасць, што гэта сур'ёзны і прызнаны тэарэтычны крок, які сапраўды пашырае тэрмадынаміку чорных дзірак на дынамічны рэжым. І такая ж высокая ўпэўненасць, што гэта *не* заява пра новыя назіранні, не квантавая гравітацыя і не развязанне вядомай інфармацыйнай загадкі. Правільная пазіцыя: рэальны крок у разуменні, зроблены крэйдай, а не тэлескопам.

Крыніцы

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

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