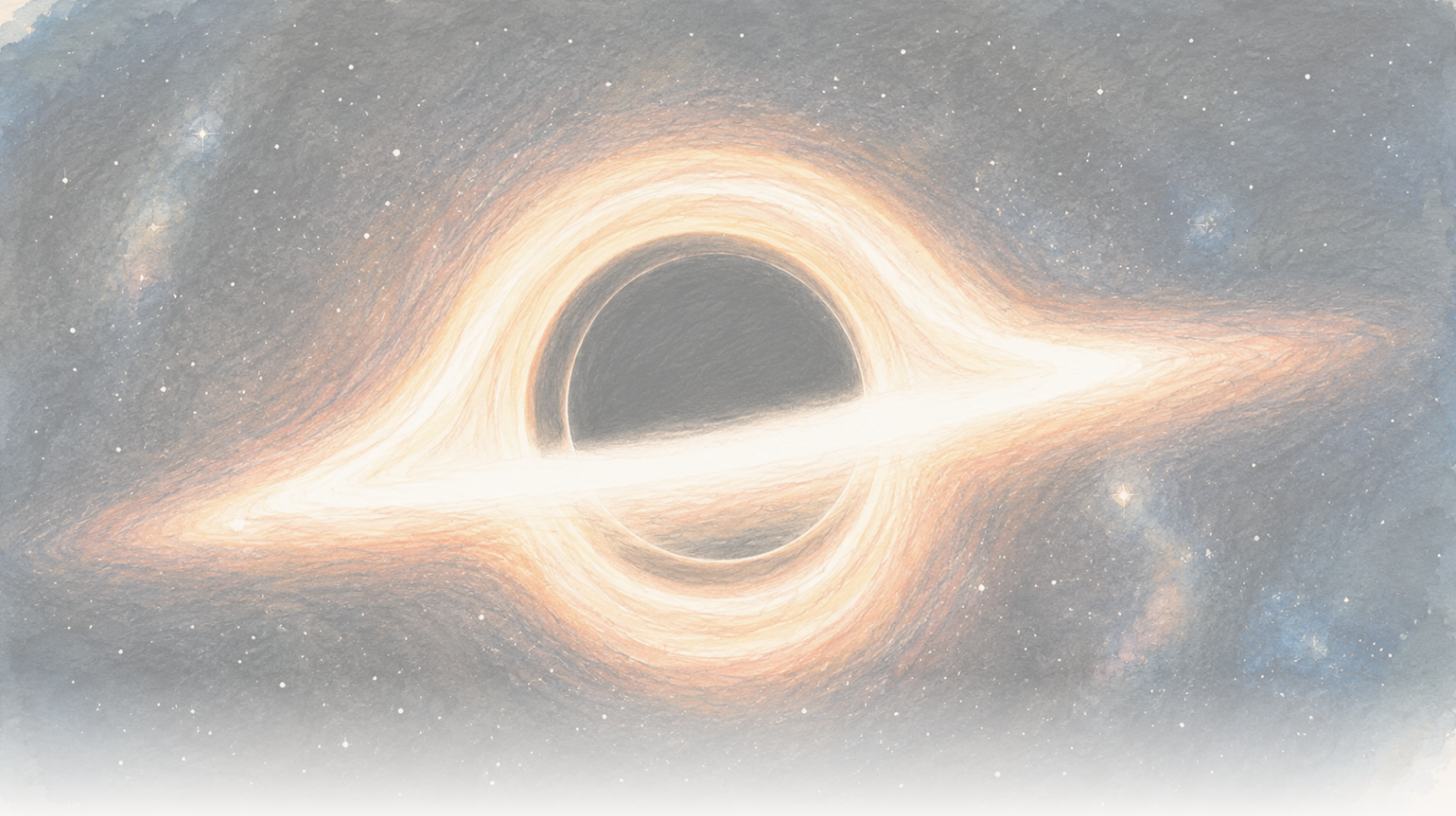




The CLEAN PAPER

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

Melnie caurumi ievēro termodinamiskus „likumus” — jauns rezultāts tos paplašina uz vardarbīgi no līdzsvara izsistiem melnajiem caurumiem

Kopš 20. gadsimta 70. gadiem zināms, ka melnie caurumi ievēro likumus, kas atgādina termodinamikas likumus, taču tīrākā versija attiecās tikai uz mierīgiem, līdzsvarā esošiem melnajiem caurumiem. Jauns Physical Review Letters darbs paplašina pirmo un otro likumu uz melnajiem caurumiem, kas strauji mainās — aprij vielu, saplūst, izstaro —, izmantojot lokāli definētus „dinamiskos horizontus”. Tas ļauj piešķirt temperatūru un entropiju pat vardarbīgi evolucionējošam melnajam caurumam. Tas ir matemātisks rezultāts klasiskajā vispārīgajā relativitātē, nevis jauna kvantu gravitācija, novērojums vai melnā cauruma informācijas problēmas atrisinājums.

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

Melnajiem caurumiem ir „likumi”, kas izskatās pēc termodinamikas. Glītā versija darbojās tikai tad, kad nekas nenotika.

Viens no divainākajiem fizikas faktiem ir tas, ka melnie caurumi uzvedas kā silti objekti. 20. gadsimta 70. gadu sākumā Bekenšteins un Hokings pamanīja, ka vienādojumi, kas apraksta melnos caurumus, pa locekļiem sakrīt ar termodinamikas likumiem: melnā cauruma entropija ir proporcionāla tā horizonta laukumam, bet temperatūra — virsmas gravitācijai. Pēc tam Hokings parādīja, ka temperatūra ir reāla visdziļākajā nozīmē — melnais caurums patiešām ļoti vāji spīd ar termisku starojumu.

Kas ir Hokinga starojums?

Klasiski no melnā cauruma nekas neizklūst, tāpēc tam vajadzētu būt pilnīgi melnam un bez jebkādas temperatūras. 1974. gadā Stīvens Hokings parādīja, ka situācija mainās, ja pie horizonta ņem vērā kvantu teoriju: melnais caurums izstaro vāju termisku starojumu un tāpēc lēnām zaudē masu jeb „iztvaiko”. Spektrs ir termisks pie Hokinga temperatūras, bet izplatīšanās caur izliektu telpaiku pārveido starojumu, kas sasniedz bezgalību. Populārā intuitīvā bildē — nevis Hokinga faktiskajā atvasinājumā — kvantu svārstības tieši ārpus horizonta rada pārus, no kuriem viens partneris aizbēg kā starojums, bet otrs iekrīt iekšā.

Galvenā īpašība ir tāda, ka šī temperatūra ir *apgriezti* proporcionāla melnā cauruma masai: jo mazāks caurums, jo karstāks. Jebkuram melnajam caurumam, ko varētu redzēt ar teleskopu, temperatūra ir fantastiski zema — daudz zemāka par tukšo telpu ap to —, tāpēc praksē starojums ir pilnīgi nenožīmīgs un nekad nav tieši izmērīts. Tā nozīme ir konceptuāla: Hokinga starojums pārvērš *analogiju* starp melno caurumu mehāniku un termodinamiku par īstu termodinamiku. Tā kā melnajam caurumam patiešām ir temperatūra, šo likumu „temperatūra” un „entropija” ir reāli termodinamiski lielumi, nevis formāla sakritība. (Tas ir šī darba fons, nevis viens no tā rezultātiem.)

Šo atbilstību nostiprina rezultāts, ko sauc par **melno caurumu mehānikas pirmo likumu** (Bardeen, Carter un Hawking, 1973). Vārdos tas saka: ja melno caurumu nedaudz pabīda no viena stacionāra stāvokļa uz tuvu citu stacionāru stāvokli, tā masas izmaiņa ir vienāda ar temperatūru reiz entropijas izmaiņa plus loceklis, kas saistīts ar rotāciju. Tā ir melnā cauruma versija idejai „siltums iekšā = temperatūra reiz entropijas izmaiņa”.

Āķis slēpjas vārdos *tuvs stacionārs stāvoklis*. Tīrais 1973. gada likums salīdzina divus līdzsvarā mierīgi sēdošus melnos caurumus, kas atšķiras tikai bezgalīgi maz. Tas faktiski neapraksta **procesu** — melno caurumu, kas aprij zvaigzni, divu melno caurumu saplūšanu, jaundzimušu caurumu, kas pēc vardarbīgas izveidošanās izdzēš svārstības. Tie ir tieši gadījumi, ko visvairāk gribam saprast, un tie ir pretstats „mierīgi sēdēt”. Glītais likums apklust tieši tad, kad melnais caurums kļūst interesants.

Kāpēc acīmredzamais labojums nestrādā

Varētu šķist, ka risinājums ir vienkāršs: vērot, kā horizonts aug, vielai krītot iekšā. Problēma ir — *kurš* horizonts.

Horizonts, ko vairums cilvēku iztēlojas — **notikumu horizonts**, īstais neatgriešanās punkts —, ir ar smalku un neērtu īpašību: to definē viss Visuma nākotnes stāsts. Lai zinātu, kur notikumu horizonts atrodas *tieši tagad*, būtu jāzina viss, kas caurumā jebkad nākotnē iekritīs. Tas nav sākums. Notikumu horizonts var sākt augt pilnīgi tukšā, plakanā telpas reģionā *pirms* viela, kas to vēlāk baros, vispār ir atnākusi, vienkārši tāpēc, ka šī viela ir lemta ierasties vēlāk. Tā laukums var palielināties vietā, kur lokāli nenotiek pilnīgi nekas.

Kā horizonts var augt pirms viela ierodas?

Šīs īpatnības zinātniskais nosaukums ir **notikumu horizonta teleoloģiskā daba**, ko sauc arī par tā **globālo definīciju**. Šeit „teleoloģisks” nenožīmē, ka horizontam būtu mērķis, ka tas paredz nākotni vai sūta ietekmi atpakaļ laikā. Tas nozīmē, ka jautājumu, vai kāds notikums atrodas horizonta iekšpusē, var izlemt tikai, zinot telplaika pilno nākotnes vēsturi.

Formālā definīcija saka to pašu īsāk. Iedomājieties **nākotnes nulles bezgalību** — sauktu „I-plus” un rakstītu $\mathcal{I}^+$ — kā galamērķi, ko sasniedz gaisma, kura uz visiem laikiem aizbēg citādi tukšā, bezgalīgi tālā nākotnē. Notikumu horizonts ir robeža starp notikumiem, no kuriem uz āru raidīts gaismas signāls galu galā var sasniegt šo galamērķi, un notikumiem, no kuriem neviens šāds signāls nekad nespēs izklūt. Vispārīgās relativitātes standarta pierakstā tas ir nākotnes nulles bezgalības kauzālās pagātnes robeža: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Tā kā definīcijā ir iestrādāts vārds *jebkad*, neviens tikai šeit un tagad veikts mērījums nevar precīzi noteikt notikumu horizonta atrašanās vietu.

Sabrūkoša sfēriska čaula padara dīvainību redzamu. Pirms čaula ierodas, tās iekšiene var būt tukša un lokāli plakana. Izstarojiet gaismas starus uz āru no centra arvien vēlākos brīžos: agrākie izklūst, bet vēlākie satiek sabrūkošo čaulu ģeometrijā, no kuras tie vairs nevar izklūt. Notikumu horizonts ir robeža starp šiem diviem iznākumiem. Izsekojot šo robežu atpakaļ laikā, tā sākas centrā un izplešas caur joprojām tukšo, plakano iekšieni pirms čaula to sasniedz. Augošais laukums tur neziņo par lokālu vielas plūsmu; tas fiksē, kuri izbēgšanas ceļi paliek atvērti pilnajā telplaikā.

Nekas šajā attēlā nedarbojas atpakaļ laikā. Ja čaulu novirzītu un melnais caurums neizveidotos, pilnais telplaiks būtu citāds un šis agrākais reģions nebūtu bijis notikumu horizonta daļa. Mācība nav tāda, ka nākotne maina pagātni, bet gan tāda, ka notikumu horizonts ir **globāla kauzāla robeža**, nevis virsma, ko tuvumā esošs novērotājs var noteikt vienā brīdī. Tieši tāpēc fiziķi izmanto kvazilokālus vai dinamiskus horizontus, kad viņiem jāseko melnajam caurumam tā izmaiņu laikā.

Tas padara notikumu horizontu nepiemērotu kā nepārtrauktu melnā cauruma „stāvokļa” uzskaiti. Datorsimulācijā to pat nevar precīzi atrast, pirms simulācija nav pabeigta, un to noteikti nevar izmantot, lai mīkliki pa mīklikiem sekotu temperatūrai vai entropijai.

Gājiens: horizonts, ko var definēt lokāli

Jaunais Abhaja Aštekaras, Daniela Paraizo un Džonatana Šu darbs balsta rezultātu uz citu horizonta jēdzienu — **kvazilokālu** horizontu, ko definē tikai ģeometrija tā tuvumā, bez atsaucēm uz bezgalīgo nākotni. Šie „dinamiskā horizonta segmenti” ir virsmas, ko skaitliskās relativitātes pētnieki jau izmanto, lai atrastu melnos caurumus saplūšanas simulācijās, tieši tāpēc, ka tie ir lokāli un godīgi: to laukums aug tikai tur, kur tiem faktiski pāri plūst enerģija.

Papildus tam autori atrisina grūtāko problēmas daļu. Parastajā termodinamikā sistēma tālu no līdzsvara ir bēdīgi grūti aprakstāma: tai nevar tīri piešķirt vienu temperatūru vai spiedienu, jo šie lielumi labi definējas tikai pēc sistēmas nomierināšanās. Melnajiem caurumiem ir tā pati problēma — līdz brīdim, kad, kā autori rāda, izmanto īpašu vispārīgās relativitātes iezīmi. Līdzsvarā esošu melno caurumu (Kerra melno caurumu) pilnībā nosaka tikai divi skaitļi: tā izmērs un rotācija. Tāpēc autori konstruē kartējumu, kas jebkuram vardarbīgi evolucionējošam, no līdzsvara tālam horizontam katrā brīdī nolasa divus tāda līdzsvara melnā cauruma skaitļus, kuram tas šajā brīdī līdzinās. Ar šo kartējumu strauji mainīgam melnajam caurumam tomēr var piešķirt **laikā mainīgu temperatūru un rotāciju**.

Ar šiem elementiem — lokāli definētu enerģijas plūsmu pāri horizontam un momentāniem intensīviem lielumiem — viņi paplašina pirmo likumu uz melnajiem caurumiem patvaļīgi tālu no līdzsvara. Būtiski ir tas, ka jaunais likums apraksta **galīgas izmaiņas, ko rada reāli fiziski procesi** (viela un gravitācijas viļņi šķērso horizontu), nevis bezgalīgi mazus soļus starp diviem sasaldētiem stāvokļiem. Tam blakus autori dod atbilstošu otro likumu, kura formulējums tagad ir *kvantitatīvs*: horizonta laukums pieaug par daudzumu, kas tieši saistīts ar ieplūdušo enerģiju. Kopā pirmais un otrais likums ved uz vienu skaidru secinājumu — pat melnajam caurumam visvardarbīgākā iespējamā notikuma vidū pareizais entropijas mērs joprojām ir tā horizonta laukums.

Ko tas nepierāda

- Tas **neatrisina** kvantu gravitāciju. Tas ir rezultāts *klasiskajā* vispārīgajā relativitātē, izmantojot standarta horizonta laukuma identificēšanu ar entropiju. Tas neatvasina šo entropiju no kaut kā fundamentālāka.
- Tas **nesaskaita mikrostāvokļus** un neizskaidro, *no kā* melnā cauruma entropija sastāv. Tas paplašina melno caurumu termodinamikas uzskaiti; tas neatver kasti un neatklāj mikroskopiskās brīvības pakāpes.
- Tas **neatrisina** melnā cauruma informācijas paradoksus. Šī problēma dzīvo kvantu teorijā; šis darbs tai nepieskaras.
- Tas **nav** novērojums vai mērījums. Nav teleskopa, datu vai gravitācijas viļņu signāla — tā ir matemātika. Saplūstoša melnā cauruma „temperatūra” šeit ir precīzi definēts lielums vienādojumos, nevis kaut kas, ko varētu nolasīt no termometra.
- Tas **neapgāž** Bekenšteinu un Hokingu. Tas *paplašina* viņu ainu dinamiskajā režīmā, par kuru sākotnējam tikai līdzsvaram paredzētajam likumam nebija ko teikt.

Cik pārliecinoši ir pierādījumi?

Spēcīgi tam, kas tas ir: rūpīgs, iekšēji konsekvents matemātiskās fizikas darbs no vadošas grupas šajā jomā, publicēts kā *Editors' Suggestion* žurnālā *Physical Review Letters* (pavadošais darbs izklāsta garākos atvasinājumus).

Godīgie ierobežojumi attiecas uz rezultāta *veidu*, nevis kvalitāti:

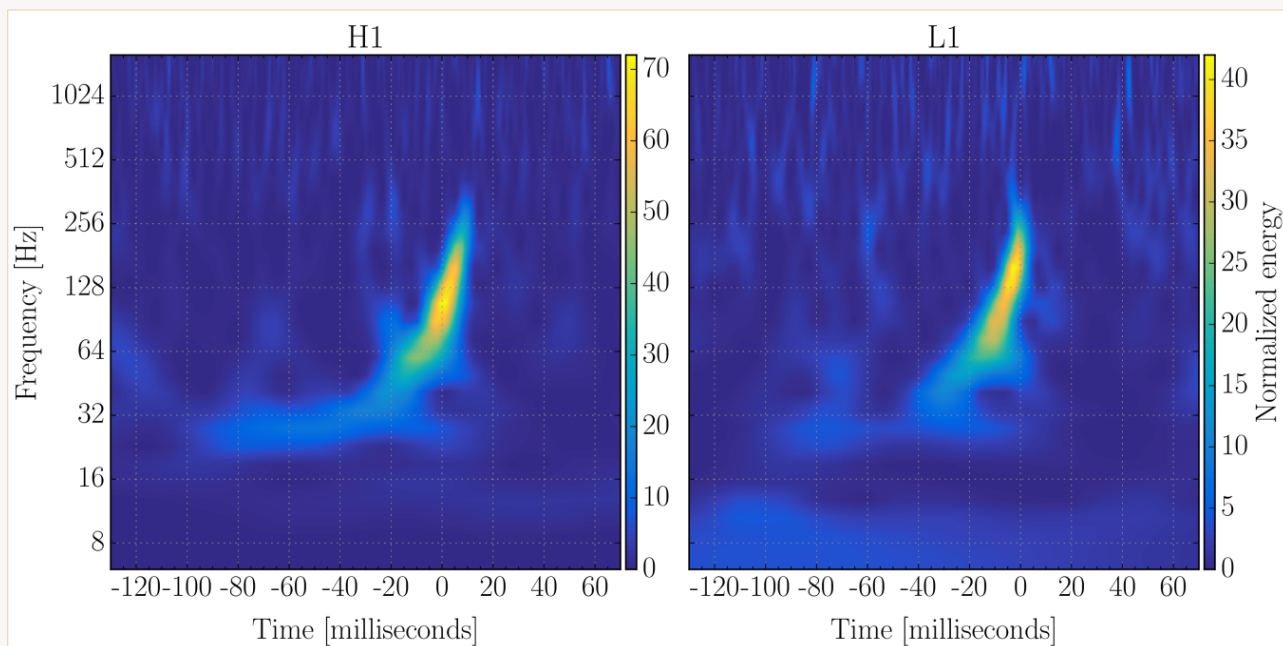
- Tas balstās uz tradicionālo pieņēmumu, ka horizonta laukums *ir* entropija (laukums dalīts ar četrkārt Ņūtona konstanti un Planka konstanti). Ja pilna kvantu gravitācijas teorija kādreiz šo identifikāciju mainītu, līdz ar to mainītos arī interpretācija.
- Galvenie aprēķini izstrādāti visbiežāk sastopamajam gadījumam (telpveida dinamiskiem, aksiāli simetriskiem horizontiem); autori argumentē, ka ierobežojumi nav būtiski, bet pilnīgi vispārīgais formulējums balstās arī uz citur iegūtiem rezultātiem.
- „Entropija ir horizonta laukums arī ārpus līdzsvara” ir pārliecinoša *identifikācija*, ko jaunie pirmais un otrais likums padara dabisku, — nevis teorēma, kas pierādīta no mikroskopiskās statistikas.

Tātad: stingrs piecdesmit gadus veca ietvara paplašinājums, nevis eksperimentāls atklājums un nevis jauns dabas likums, kas vēl gaida pārbaudi.

Kāpēc tas ir svarīgi

Divu iemeslu dēļ — viena praktiska un viena konceptuāla.

Praktiski melnie caurumi, kurus mēs tagad patiešām pētām — tie, kuru saplūšanu dzird LIGO un Virgo — savus svarīgākos brīžus pavada tālu no līdzsvara. Šajā darbā izmantotie lielumi ir būvēti no tiem pašiem lokāli definētajiem horizontiem, kuriem simulācijas jau seko, tāpēc tas dod principiālu veidu runāt par melnā cauruma entropiju un temperatūru *saplūšanas vai kolapsa laikā*, ne tikai pirms un pēc.



GW150914 — pirmais tieši detektētais gravitācijas viļņu signāls — radās, saplūstot diviem melnajiem caurumiem. Šīs laika–frekvences kartes rāda signālu LIGO Hanford (pa kreisi) un LIGO Livingston (pa labi): abos detektoros spīgtā līnija paceļas augšup, signāla frekvencei augot ceļā uz saplūšanu. Tas ir reāls piemērs melno caurumu sistēmai tālu no līdzsvara; tas ir konteksts jaunajam termodinamiskajam ietvaram, nevis novērojumu pierādījums šim ietvaram.

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

Konceptuāli melno caurumu termodinamiskā uzvedība ir viena no nedaudzajām konkrētajām norādēm, kas mums ir par kvantu gravitāciju — vieta, kur gravitācija, kvantu teorija un termodinamika redzami sastopas. Precizējot, ko tieši „entropija” un „temperatūra” nozīmē melnajam caurumam, kas vardarbīgi mainās, tiek sašaurināts mērķis, kurā būs jātrāpa jebkurai nākotnes kvantu teorijai. Tas neatbild uz dziļo jautājumu, kas īsti ir melnā cauruma entropija. Tas formulē jautājumu precīzāk — un šajā fizikas stūrī tas ir liela daļa darba.

Īss kopsavilkums

Melnie caurumi ievēro likumus, kas atgādina termodinamiku, taču tīrais 1973. gada „pirmais likums” salīdzināja tikai līdzsvarā mierīgi esošus melnos caurumus un nespēja aprakstīt reālu procesu. Aštekaris, Paraizo un Šu paplašina gan pirmo, gan otro likumu uz melnajiem caurumiem patvaļīgi tālu no līdzsvara — saplūstošiem, barojošiem, pēc izveidošanās svārstības dzēsošiem —, izmantojot lokāli definētus „dynamiskos horizontus” un kartējumu, kas mainīgam melnajam caurumam piešķir momentānu temperatūru un rotāciju. Rezultāts: horizonta laukums saglabājas kā pareizais entropijas mērs arī vardarbīgu notikumu laikā. Tas ir stingrs rezultāts klasiskajā vispārīgajā relativitātē, nevis kvantu gravitācija, novērojums, mikrostāvokļu skaitīšana vai informācijas paradoksa atrisinājums.

Bez pārspīlējumiem

Ko darbs parāda: Matemātiski konsekventu melno caurumu mehānikas pirmā un otrā likuma paplašinājumu uz pilnīgi dinamiskiem, tālu no līdzsvara esošiem melnajiem caurumiem, balstītu uz kvazilokāliem dinamiskiem horizontiem. Tas definē galīgu, procesa balstītu pirmo likumu un kvantitatīvu otro likumu un padara dabisku dinamiska melnā cauruma entropijas identificēšanu ar tā horizonta laukumu.

Kas ir patiess, bet interpretatīvs: Identifikācija „entropija = horizonta laukums” ārpus līdzsvara. Jaunie likumi to padara pārliecinošu, bet tā pārmanto standarta klasisko laukuma–entropijas pieņēmumu, nevis atvasina to.

Ko tas neparāda: Kvantu gravitācijas teoriju; melnā cauruma entropijas mikroskopisku izcelsmi vai „saskaitīšanu”; informācijas paradoksa atrisinājumu; jebkādu novērojumu vai eksperimentālu rezultātu; fiziski izmērāmu temperatūru.

Galvenie ierobežojumi: Viscaur klasiskā vispārīgā relativitāte; galvenie rezultāti pierādīti biežajam telpveida, aksiāli simetriskajam gadījumam, bet vispārīgums argumentēts ar pavadošā darba palīdzību; laukuma–entropijas identifikācija tiek pieņemta, nevis pierādīta no statistiskās mehānikas.

Cik lielai pārliecībai vajadzētu būt parastam lasītājam? Augstai pārliecībai, ka tas ir solīds, labi novērtēts teorētisks progress, kas patiešām paplašina melno caurumu termodinamiku dinamiskajā režīmā. Tikpat augstai pārliecībai, ka tas *nav* apgalvojums par jauniem novērojumiem, nav kvantu gravitācija un nav slavenās informācijas problēmas atrisinājums. Pareizā attieksme: īsts solis izpratnē, sperts ar krītu, nevis teleskopu.

Avoti

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

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