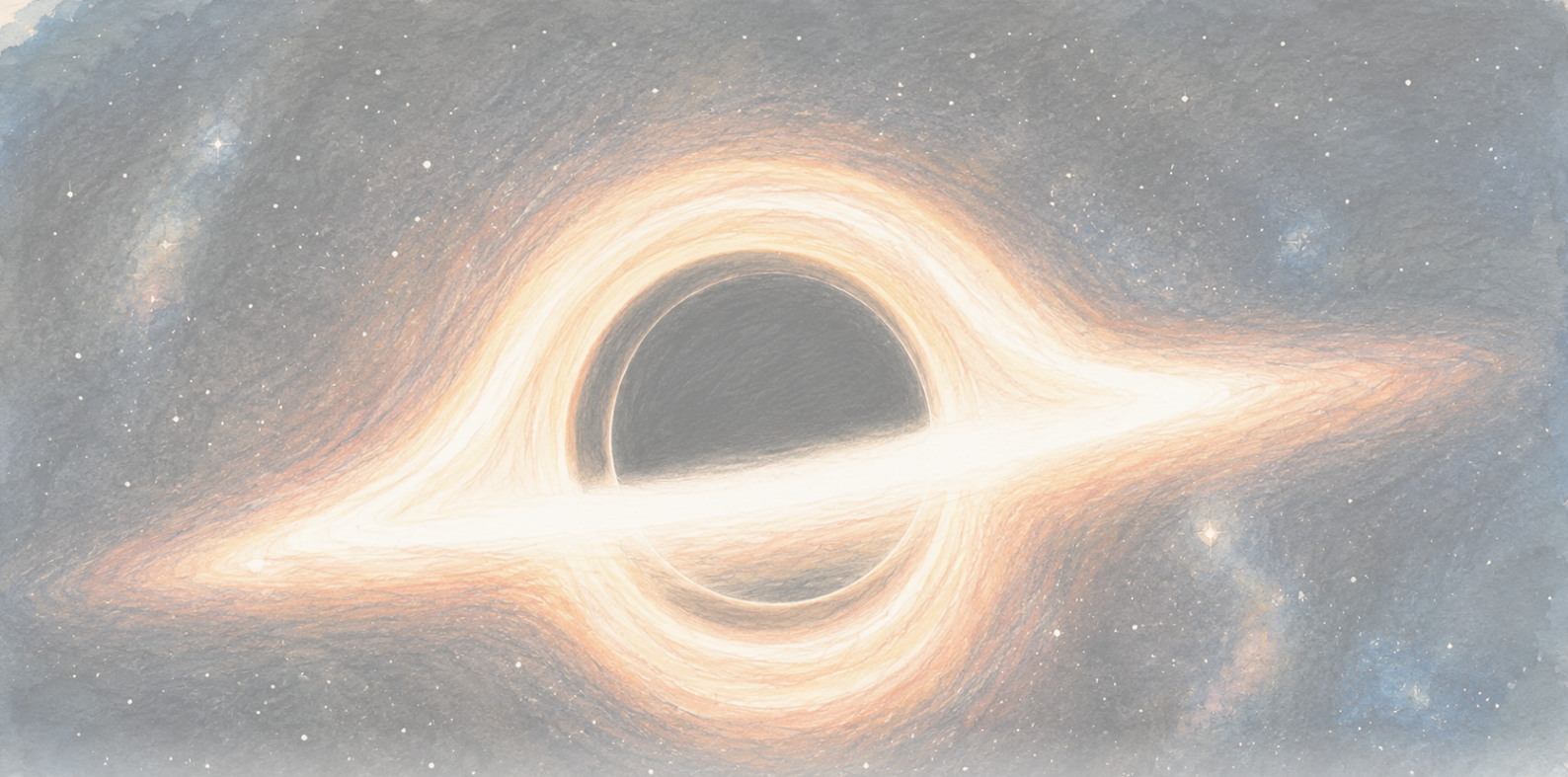




The CLEAN PAPER

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

Juodosios skylės paklūsta termodinamiką primenantiems „dėsniams“ — naujas rezultatas išplečia juos ir smarkiai nepusiausvioms juodosioms skylėms

Nuo XX a. aštuntojo dešimtmečio žinoma, kad juodosios skylės paklūsta termodinamiką atkartojantiems dėsniams, tačiau švariausia jų forma galiojo tik ramiai pusiausvyroje esančioms juodosioms skylėms. Naujas Physical Review Letters straipsnis išplečia pirmąjį ir antrąjį dėsnius greitai besikeičiančioms juodosioms skylėms — ryjančioms medžiagą, susiliejančioms, spinduliuojančioms — naudodamas lokaliai apibrėžtus „dinaminius horizontus“. Taip temperatūrą ir entropiją galima priskirti net audringai evoliucionuojančiai juodajai skylei. Tai matematinis klasikinės bendrosios reliatyvumo teorijos rezultatas, ne nauja kvantinė gravitacija, ne stebėjimas ir ne juodosios skylės informacijos paradokso sprendimas.

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

Juodosios skylės turi termodinamiką primenančius „dėsnius“. Tvarkinga jų forma veikė tik tada, kai nieko nevyko

Vienas keisčiausių fizikos faktų — juodosios skylės elgiasi kaip karšti objektai. XX a. aštuntojo dešimtmečio pradžioje Bekensteinas ir Hawkingas pastebėjo, kad juodąsias skyles valdančios lygtys narys po nario sutampa su termodinamikos dėsniais: juodoji skylė turi entropiją, proporcingą jos horizonto plotui, ir temperatūrą, proporcingą paviršiaus gravitacijai. Vėliau Hawkingas parodė, kad temperatūra giliausia prasme tikra — juodoji skylė iš tiesų labai silpnai švyti šilumine spinduliuote.

Kas yra Hawkingo spinduliuotė?

Klasikinėje fizikoje iš juodosios skylės niekas neišstrūksta, todėl ji turėtų būti visiškai juoda ir apskritai neturėti temperatūros. 1974 m. Stephenas Hawkingas parodė, kad prie horizonto įtraukus kvantinę teoriją tai pasikeičia: juodoji skylė skleidžia silpną šiluminį švytėjimą ir todėl pamažu netenka masės, arba „garuoja“. Spektras yra šiluminis Hawkingo temperatūroje, o sklidimas išlenktu erdvelaikiu pakeičia spinduliuotę, kuri pasiekia begalybę. Dažnai naudojame euristiciniame vaizde — tai nėra tikrasis Hawkingo išvedimas — kvantiniai svyravimai iškart už horizonto sukuria poras, kurių vienas narys pabėga kaip spinduliuotė, o kitas įkrenta vidun.

Svarbiausia savybė: ši temperatūra yra *atvirkščiai* proporcinga juodosios skylės masei — kuo skylė mažesnė, tuo ji karštesnė. Bet kurios teleskopu matomos juodosios skylės temperatūra būtų neįsivaizduojamai maža — daug mažesnė už ją supančios tuščios erdvės temperatūrą — todėl praktiškai švytėjimas visiškai nereikšmingas ir niekada nebuvo tiesiogiai išmatuotas. Jo svarba konceptuali: Hawkingo spinduliuotė paverčia juodųjų skylių mechanikos ir termodinamikos *analogiją* tikra termodinamika. Kadangi skylė išties turi temperatūrą, šių dėsnių „temperatūra“ ir „entropija“ yra tikri termodinaminiai dydžiai, o ne formalus sutapimas. (Tai šio straipsnio fonas, ne jo rezultatas.)

Šią atitiktį įtvirtina rezultatas, vadinamas **pirmuoju juodųjų skylių mechanikos dėsniu** (Bardeen, Carter ir Hawking, 1973). Žodžiais jis sako: jei juodąją skylę šiek tiek pastumsite iš vienos stacionarios būsenos į netolimą kitą stacionarią būseną, jos masės pokytis bus lygus temperatūros ir entropijos pokyčio sandaugai, pridėjus sukimosi narį. Tai juodosios skylės „įnešta šiluma lygi temperatūrai, padaugintai iš entropijos pokyčio“ versija.

Tačiau frazėje *netolima stacionari būseną* slepiasi problema. Tvarkingas 1973 m. dėsnis lygina dvi ramiai pusiausvyroje esančias juodąsias skyles, besiskiriančias tik be galo mažu pokyčiu. Jis iš tikrųjų neaprašo **procesą** — juodosios skylės, ryjančios žvaigždę, dviejų juodųjų skylių susilieimo ar ką tik gimusios skylės, po smurtinio susidarymo virpančios ir rimstančios. Būtent šias situacijas labiausiai norime suprasti, o jos yra priešingybė „ramiai sėdi“. Tvarkingas dėsnis nutyla kaip tik tada, kai juodoji skylė įdomiausia.

Kodėl akivaizdus pataisymas neveikia

Galėtumėte pagalvoti, kad sprendimas paprastas: tiesiog stebėkime, kaip horizontas auga krintant medžiagai. Problema — *kuris* horizontas.

Horizontas, kurį dažniausiai įsivaizduojame — **įvykių horizontas**, tikroji negrįžimo riba — turi subtilią ir nepatogią savybę: jį apibrėžia visa visatos ateitis. Kad tiksliai žinotume, kur įvykių horizontas yra *dabar*, turėtume žinoti viską, kas kada nors, per visą ateitį, įkris į skylę. Tai ne techninė smulkmena. Įvykių horizontas gali pradėti augti visiškai tuščiame, plokščiame erdvės regione *dar prieš* atvykstant medžiagai, kuri vėliau jį maitins, vien todėl, kad tai medžiagai lemta atvykti. Jo plotas gali didėti ten, kur lokaliai visai nieko nevyksta.

Kaip horizontas gali augti dar prieš atvykstant medžiagai?

Mokslinis šios keistenybės pavadinimas — **teleologinis įvykių horizonto pobūdis**, dar vadinamas jo **globaliu apibrėžimu**. Čia „teleologinis“ nereiškia, kad horizontas turi tikslą, numato ateitį ar siunčia poveikį atgal laiku. Tai reiškia, kad nustatyti, ar įvykis patenka į horizontą, galima tik žinant visą būsimą erdvėlaikio istoriją.

Formalus apibrėžimas tą patį pasako trumpiau. Įsivaizduokite **būsimąją nulinę begalybę** — vadinamą „I-plus“ ir žymimą $\mathcal{I}^+$ — kaip tikslą, kurį pasiekia šviesa, amžinai pabėganti į kitaip tuščią, be galo tolimą ateitį. Įvykių horizontas yra riba tarp įvykių, iš kurių į išorę siunčiamas šviesos signalas galiausiai gali pasiekti tą tikslą, ir įvykių, iš kurių joks signalas jo niekada nepasieks. Standartine bendrosios reliatyvumo teorijos žymena tai yra būsimosios nulinės begalybės priežastinės praeities riba: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Kadangi į apibrėžimą įdėtas žodis *kada nors*, vien dabartiniu lokaliu matavimu tiksliai nustatyti įvykių horizonto negalima.

Krentantis sferinis apvalkalas keistumą padaro matomą. Prieš apvalkalui atvykstant jo vidinė sritis gali būti tuščia ir lokaliai plokščia. Siųskite šviesos spindulius iš centro vis vėlesniais momentais: ankstesni pabėga, o vėlesni susitinka su krentančiu apvalkalu geometrijoje, iš kurios ištrūkti nebėgali. Įvykių horizontas yra riba, skirianti šiuos du rezultatus. Sekant ją atgal, ši riba prasideda centre ir plečiasi per dar tuščią, plokščią vidų prieš apvalkalui jį pasiekiant. Augantis jos plotas nepraneša apie jokią vietinį medžiagos srautą; jis fiksuoja, kurie pabėgimo keliai lieka atviri užbaigtame erdvėlaikyje.

Niekas šiame vaizde neveikia atgal laiku. Jei apvalkalas būtų nukreiptas kitur ir juodoji skylė nesusiformuotų, užbaigtas erdvėlaikis būtų kitoks, o ta ankstesnė sritis nebūtų buvusi įvykių horizonto dalis. Pamoka ne ta, kad ateitis pakeičia praeitį, o kad įvykių horizontas yra **globali priežastinė riba**, o ne paviršius, kurį netolimas stebėtojas gali aptikti vienu momentu. Būtent todėl fizikai naudoja kvazilokalius arba dinامينius horizontus, kai nori sekti besikeičiančią juodąją skylę.

Dėl to įvykių horizontas netinka kaip nuolatinė juodosios skylės „būsenos“ apskaita. Kompiuterinėje simuliacijoje jo net negalima tiksliai nustatyti, kol simuliacija nesibaigė, jau nekalbant apie temperatūros ar entropijos sekimą akimirka po akimirkos.

Sprendimas: lokaliai apibrėžiamas horizontas

Naujasis Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo ir Jonathan Shu straipsnis remiasi kita horizonto samprata — **kvazilokalia**, apibrėžiama tik geometrija savo pačios aplinkoje, be jokios nuorodos į begalinę ateitį. Šie „dinaminio horizonto segmentai“ yra paviršiai, kuriuos skaitmeniniai reliatyvistai jau naudoja juodosioms skylėms aptikti susiliejamų simuliacijose būtent todėl, kad jie lokalūs ir „sąžiningi“: jų plotas auga tik ten, kur iš tikrųjų per juos teka energija.

Be to, autoriai išsprendžia sunkesniąją problemos pusę. Įprastoje termodinamikoje labai toli nuo pusiausvyros esanti sistema yra slidus objektas: jai negalima vienareikšmiškai priskirti vienos temperatūros ar slėgio, nes tokie dydžiai gerai apibrėžiami tik sistemai nusistovėjus. Juodosios skylės turi tą pačią problemą — kol, kaip parodo autoriai, išnaudojama ypatinga bendrosios reliatyvumo teorijos savybė. Pusiausvyroje esanti juodoji skylė (Kerro juodoji skylė) visiškai nustatoma vos dviem skaičiais: dydžiu ir sukiniu. Autoriai sukuria atvaizdavimą, kuris bet kuriam audringai besikeičiančiam, nepusiausviram horizontui kiekvienu momentu priskiria du pusiausvyros juodosios skylės skaičius, kuriuos jis tuo metu primena. Per šį atvaizdavimą net smarkiai besikeičiančiai juodajai skylei galima priskirti **nuo laiko priklausančią temperatūrą ir sukinį**.

Turėdami šias dalis — lokaliai apibrėžtą per horizontą tekančią energiją ir momentinius intensyviuosius dydžius — jie išplečia pirmąjį dėsni juodosioms skylėms, esančioms savavališkai toli nuo pusiausvyros. Svarbiausia, naujasis dėsnis aprašo **baigtinius pokyčius, kuriuos sukelia tikri fizikiniai procesai** (medžiaga ir gravitacinės bangos, kertančios horizontą), o ne be galo mažus žingsnius tarp dviejų sustingusių būsenų. Greta pateikiamas atitinkamas antrasis dėsnis, kuris dabar yra *kiekybinis*: horizonto plotas padidėja dydžiu, tiesiogiai susietu su įtekėjusia energija. Kartu pirmasis ir antrasis dėsniai veda prie vienos aiškos išvados — net juodajai skylei esant pačiame smurtingiausiam įmanomame įvykyje tinkamas entropijos matas vis tiek yra jos horizonto plotas.

Ko tai neįrodo

- Tai **neišsprendžia** kvantinės gravitacijos. Tai *klasikinės* bendrosios reliatyvumo teorijos rezultatas, naudojantis standartinį horizonto ploto tapatinimą su entropija. Jis neišveda šios entropijos iš nieko fundamentalesnio.
- Tai **nesuskaičiuoja mikrobūsenų** ir nepaaiškina, iš ko sudaryta juodosios skylės entropija. Darbas išplečia juodųjų skylių termodinamikos apskaitą; jis neatidaro dėžės ir neparodo mikroskopinių laisvės laipsnių.
- Tai **neišsprendžia juodosios skylės informacijos paradokso**. Ši mįslė priklauso kvantinei teorijai; šis straipsnis jos neliečia.
- Tai **nėra stebėjimas ar matavimas**. Čia nėra teleskopo, duomenų ar gravitacinių bangų signalo — tai matematika. Susiliejančios juodosios skylės „temperatūra“ čia yra tiksliai apibrėžtas dydis lygtyse, o ne kažkas, ką būtų galima nuskaityti termometru.
- Tai **nepaneigia Bekensteino ir Hawkingo**. Jis *išplečia* jų paveikslą į dinaminį režimą, apie kurį pradinis, tik pusiausvyrai galiojęs dėsnis nieko nesakė.

Kiek tvirti yra įrodymai?

Stiprūs tam, kuo šis darbas yra: kruopštus ir viduje nuoseklus matematinės fizikos rezultatas iš pirmąjaujančios srities grupės, paskelbtas *Physical Review Letters* kaip *Editors' Suggestion* (lydintis straipsnis pateikia ilgesnius išvedimus).

Sąžiningos išlygos susijusios su *pobūdžiu*, o ne kokybe:

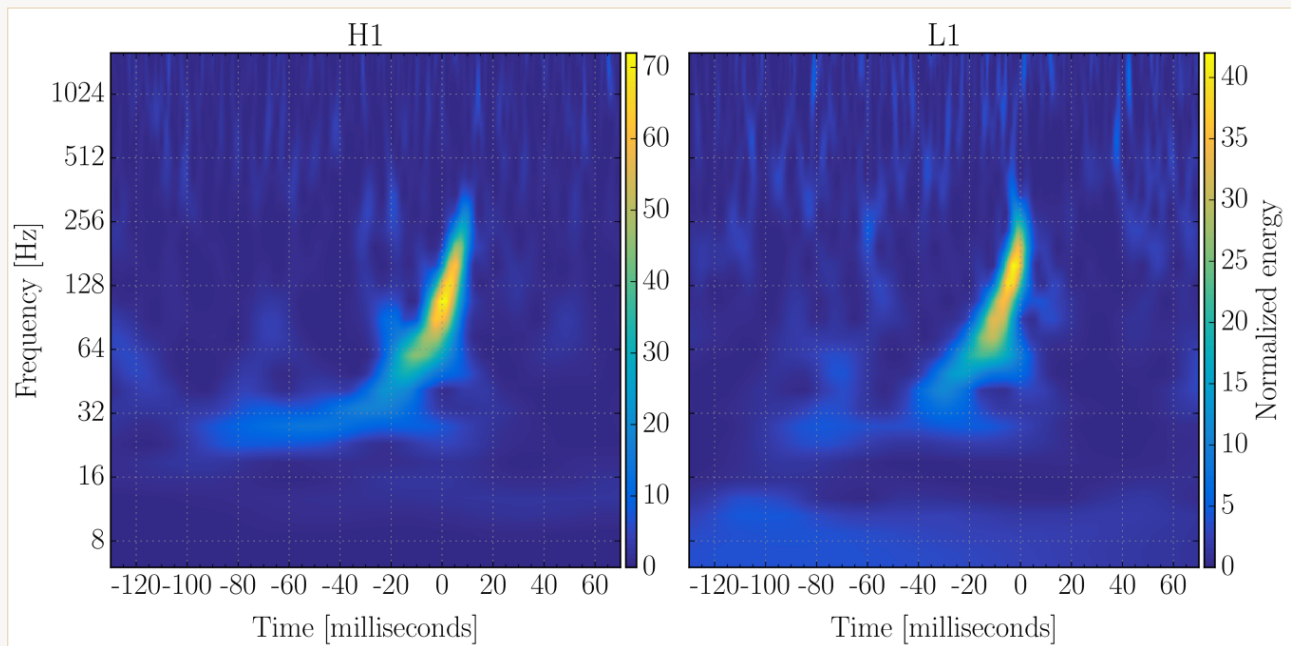
- Darbas remiasi įprasta prielaida, kad horizonto plotas *yra* entropija (plotas, padalytas iš keturių kartų Niutono konstantos ir Planko konstantos atitinkamais vienetais). Jei pilna kvantinės gravitacijos teorija kada nors šį tapatinimą pakeistų, kartu pasikeistų ir interpretacija.
- Pagrindiniai skaičiavimai išsamiai atlikti dažniausiam atvejui (erdviškieji dinaminiai horizontai, ašinė simetrija); autoriai teigia, kad apribojimai nėra esminiai, tačiau visiškai bendras teiginys remiasi ir kitur pateiktais rezultatais.
- „Entropija lygi horizonto plotui net toli nuo pusiausvyros“ yra įtikinamas *tapatinimas*, kurį natūraliai iškelia naujieji pirmasis ir antrasis dėsniai — ne teorema, išvesta iš mikroskopinės statistikos.

Taigi tai griežtas penkiasdešimties metų sistemos išplėtimas, o ne eksperimentinis atradimas ir ne naujas gamtos dėsnis, laukiantis patikrinimo.

Kodėl tai svarbu

Dvi priežastys — viena praktinė, kita konceptuali.

Praktiškai juodosios skylės, kurias dabar iš tikrųjų tiriamo — tos, kurių susilieėjimus girdi LIGO ir Virgo — svarbiausiomis akimirkomis yra labai toli nuo pusiausvyros. Šio straipsnio dydžiai konstruojami iš tų pačių lokaliai apibrėžtų horizontų, kuriuos simuliacijos jau seka, todėl dabar turime principingą būdą kalbėti apie juodosios skylės entropiją ir temperatūrą *susilieėjimo ar kolapso metu*, o ne tik prieš ir po.



GW150914, pirmasis tiesiogiai aptiktas gravitacinių bangų signalas, kilo susiliejus dviem juodosioms skylėms. Šie laiko ir dažnio žemėlapiai rodo signalą LIGO Hanford (kairėje) ir LIGO Livingston (dešinėje): abiejuose detektoriuose ryški trajektorija kyla aukštyn, signalo dažniui didėjant artėjant susiliejimui. Tai tikras toli nuo pusiausvyros esančios juodųjų skylių sistemos pavyzdys; jis yra naujosios termodinaminės sistemos kontekstas, o ne stebėjimo įrodymas jai.

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

Konceptualiai juodųjų skylių termodinaminis elgesys yra viena iš nedaugelio konkrečių užuominų apie kvantinę gravitaciją – vieta, kur gravitacija, kvantinė teorija ir termodinamika akivaizdžiai susitinka. Tiksliau apibrėžus, ką „entropija“ ir „temperatūra“ reiškia smarkiai besikeičiančiai juodajai skylei, sugriežtėja taikiny, kurį turės pataikyti bet kuri būsima kvantinė teorija. Darbas neatsako į gilų klausimą, kas iš tiesų yra juodosios skylės entropija. Jis tiksliau suformuluoja klausimą – o šiame fizikos kampe tai yra didžioji darbo dalis.

Trumpa santrauka

Juodosios skylės paklūsta termodinamiką atkartojantiems dėsniams, tačiau tvarkingas 1973 m. „pirmasis dėsnis“ lygino tik ramiai pusiausvyroje esančias juodąsias skyles ir negalėjo aprašyti tikro proceso. Ashtekar, Paraizo ir Shu išplečia tiek pirmąjį, tiek antrąjį dėsnius juodosioms skylėms, esančioms savavališkai toli nuo pusiausvyros – susiliejančioms, ryjančioms medžiagą, virpančioms ir rimstančioms – naudodami lokaliai apibrėžtus „dinaminis horizontus“ ir atvaizdavimą, kuris besikeičiančiai juodajai skylei priskiria momentinę temperatūrą ir sukinį. Rezultatas: horizonto plotas lieka tinkamas entropijos matas net smurtinių įvykių metu. Tai griežtas klasikinės bendrosios reliatyvumo teorijos rezultatas, o ne kvantinė gravitacija, ne stebėjimas, ne mikrobūsenų skaičiavimas ir ne informacijos paradokso sprendimas.

Be pagražinimų

Ką rodo straipsnis: matematiškai nuoseklų pirmojo ir antrojo juodųjų skylių mechanikos dėsnių išplėtimą visiškai dinaminėms, toli nuo pusiausvyros esančioms juodosioms skylėms, paremtą kvazilokaliais dinaminiais horizontais. Jis apibrėžia baigtinį, procesu paremtą pirmąjį dėsnį ir kiekybinį antrąjį dėsnį bei natūraliai skatina dinaminės juodosios skylės entropiją tapatinti su horizonto plotu.

Kas tikra, bet interpretacinė: tapatinimas „entropija = horizonto plotas“ nepusiausvyroje. Nauji dėsniai jį daro labai įtikinamą, tačiau jis paveldi standartinę klasikinę ploto ir entropijos prielaidą, o ne ją išveda.

Ko tai nerodo: kvantinės gravitacijos teorijos; mikroskopinės juodosios skylės entropijos kilmės ar „suskaiciavimo“; informacijos paradokso sprendimo; jokio stebėjimo ar eksperimentinio rezultato; temperatūros, kurią būtų galima fiziškai išmatuoti.

Pagrindiniai ribojimai: visur naudojama klasikinė bendroji reliatyvumo teorija; pagrindiniai rezultatai įrodyti dažnam erdviškojo, ašiesiškai simetriško horizonto atvejui, o bendrumas argumentuojamas lydinčiuose darbuose; ploto ir entropijos tapatinimas daromas kaip prielaida, o ne įrodomas statistine mechanika.

Kiek tuo turėtų pasitikėti nespecialistas? Didelis pasitikėjimas, kad tai tvirtas ir srities gerai vertinamas teorinis žingsnis, iš tikrųjų išplečiantis juodųjų skylių termodinamiką į dinaminį režimą. Lygiai toks pat didelis pasitikėjimas, kad tai nėra naujų stebėjimų teiginys, nėra kvantinė gravitacija ir nėra garsiojo informacijos paradokso sprendimas. Tinkama laikysena: tikras supratimo žingsnis, padarytas kreida, o ne teleskopu.

Šaltiniai

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

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