



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 aiškiausia jų forma buvo taikoma tik ramiai pusiausvyroje esančioms juodosioms skylėms. Naujame Physical Review Letters straipsnyje pirmasis ir antrasis dėsniai išplečiami toms kvazilokalių horizontų dalims, kurios atitinka dinaminio horizonto segmentų sąlygas ir gali būti kiek norima toli nuo pusiausvyros — akrecijos, kolapso ir didžiosios dalies juodųjų skylių susiliejoimo etapų metu. Modeliavimai seka kvazilokalų horizontą per visą susiliejoimą, tačiau dėsniai dar neaprepia trumpo intervalo aplink susijungimą, kai jis nėra dinaminio horizonto segmentas. Pagrindinė sistema priklauso bendrajai reliatyvumo teorijai, o garavimui ji taikoma pusiau klasikiniu artiniu; tai nėra nei nauja kvantinė gravitacija, nei stebėjimas, nei juodosios skylės informacijos problemos 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 erdvėlaikiu 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 susiliejo 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 nebėgalį. 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

Naujajame Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo ir Jonathan Shu straipsnyje rezultatas grindžiamas kitokia horizonto samprata — **kvazilokalija**, apibrėžiama vien geometrija jo paties aplinkoje, nesiremiant begaline ateitimi. Šie **kvazilokalūs horizontai** yra paviršiai, kuriuos skaitmeniniai reliatyvistai jau naudoja pradinėms juodosioms skylėms aptikti, susiliejimui sekti ir susiliežimo liekanai aptikti per visą modeliavimą. Čia sukurti termodinamikos dėsniai taikomi toms kvazilokalaus horizonto dalims, kurios atitinka papildomas **dinaminio horizonto segmento** sąlygas. Kiekviename tokiaame segmente plotas kinta tiesiogiai reaguodamas į vietinį energijos srautą, o ne į tolimos ateities įvykius: esant teigiamam įtekėjimui jis didėja, o garuojančio laikiškojo horizonto su neigiamu energijos srautu atveju — mažėja.

Be to, autoriai išsprendžia sunkesniąją problemos pusę. Įprastoje termodinamikoje labai toli nuo pusiausvyros esanti sistema yra sunkiai apibrėžiama: 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 ima kiekvieną būseną palei dinaminio horizonto segmentą ir kiekviename to segmento skerspjūvyje nustato du pusiausvyros juodosios skylės, kurią ta būsena tuo metu primena, skaičius. Per šį atvaizdavimą smarkiai besikeičiančiai juodajai skylei palei segmentą galima priskirti **nuo laiko priklausančią temperatūrą ir sukinį**.

Pasitelkę šiuos elementus — lokaliai apibrėžtą per horizontą tekančią energiją ir momentinius intensyviuosius dydžius — autoriai išplečia pirmąjį dėsni juodosioms skylėms, esančioms kiek norima toli nuo pusiausvyros. Svarbiausia, kad naujasis dėsnis aprašo **baigtinius pokyčius, sukeltus realių fizikinių procesų** (medžiagos ir gravitacinių bangų, kertančių horizontą), o ne nykstamai mažus žingsnius tarp dviejų sustingusių būsenų. Jį autoriai susieja su atitinkamu antruoju dėsniu, kurio formuluotė dabar yra *kiekybinė*: horizonto ploto pokytis tiesiogiai siejamas su vietiniu energijos srautu — plotas auga esant teigiamam įtekėjimui arba mažėja laikiškojo garuojančio horizonto atveju esant neigiamam srautui. Kartu pirmasis ir antrasis dėsniai veda prie vienos aiškos išvados: bet kuriame dinaminio horizonto segmentu vaizduojamame etape, kad ir koks audringas jis būtų, tinkamas entropijos matas tebėra horizonto plotas.

Ko tai neįrodo

- Tai **neišsprendžia** kvantinės gravitacijos problemos. Pagrindinė sistema suformuluota bendrojoje reliatyvumo teorijoje; ją taikant juodosios skylės garavimui naudojamas pusiau klasikinis artinys, kuriame kvantiniai medžiagos laukai veikia klasikinį erdvėlaikį. Be to, horizonto ploto tapatinimas su entropija tebėra standartinė prielaida, o pati entropija nėra išvedama iš ko nors 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 nei teleskopo, nei duomenų, nei gravitacinių bangų signalo — tai matematika. Juodajai skylei evoliucionuojant dinaminiam horizontui priskiriama „temperatūra“ yra tiksliai lygtyse apibrėžtas dydis, o ne tai, ką būtų galima nuskaityti termometru.
- Tai **dar** nepateikia ištisinio termodinaminio viso dviejų juodųjų skylių susijungimo aprašo. Skaitmeniniai modeliavimai seka kvazilokalų horizontą per visą evoliuciją — nuo pradinių juodųjų skylių per susiliejamą iki liekanos — tačiau trumpą laiką visai arti susilieimo tas horizontas neatitinka dinaminio horizonto segmentui keliamų sąlygų. Lydimajame straipsnyje nurodoma, kad šio intervalo termodinaminis aprašas tebėra rengiamas.
- 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, atsižvelgiant į darbo pobūdį: tai kruopštus, viduje nuoseklus pirmaujančios šios srities grupės matematinės fizikos darbas, paskelbtas *Physical Review Letters* kaip *Editors' Suggestion*. Recenzuotas lydimasis straipsnis pateikia išsamesnius išvedimus ir nagrinėja atvejus, kurie dėl glaustumo buvo praleisti trumpajame Letter.

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

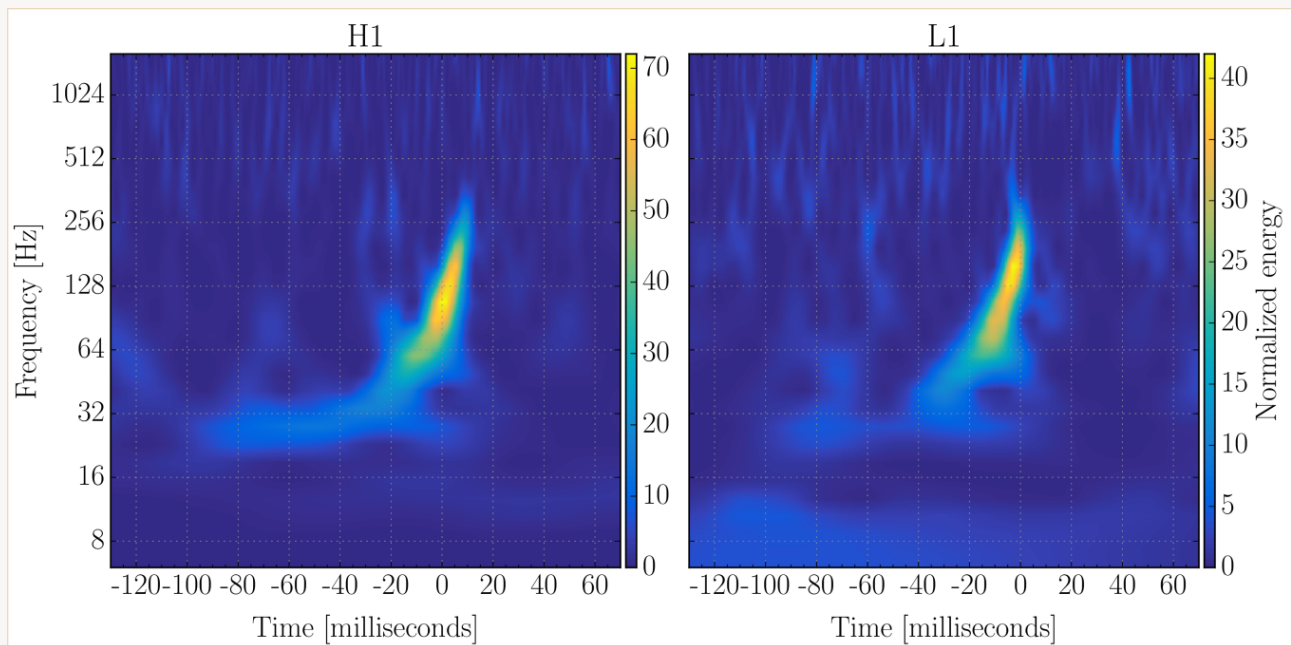
- Darbas remiasi įprasta prielaida, kad horizonto plotas *yra* entropija (plotas, padalytas iš keturių kartų Niutono konstantos ir Planko konstantos atitinkamais vienetais). Jei pilna kvantinės gravitacijos teorija kada nors šį tapatinimą pakeistų, kartu pasikeistų ir interpretacija.
- Siekiant glaustumo ir paprastumo, trumpajame Letter pagrindinis išvedimas pateikiamas naudojant erdviškuosius, ašiška simetriškus dinامينius horizontus. Recenzuotame lydimajame straipsnyje aiškiai analizuojami laikiškieji dinaminiai horizontai ir sukonstruojamas kampinis momentas be sukamojo Killingo lauko. Tačiau garuojančių laikiškųjų horizontų aiškus atgalinio poveikio nagrinėjimas apsiriboja sferine simetrija.
- „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 tiriame — tos, kurių susiliejimui girdi LIGO ir Virgo — svarbiausius savo raidos momentus praleidžia toli nuo pusiausvyros. Modeliavimai seka kvazilokalų horizontą nuo pradinių juodųjų skylių per susiliejamą iki liekanos. Šiame straipsnyje nagrinėjami dydžiai taikomi toms horizonto dalims, kurios atitinka dinaminio horizonto segmentų sąlygas, todėl darbas suteikia principinę būdą kalbėti apie juodosios skylės entropiją ir temperatūrą per didžiąją dalį susilieimo evoliucijos etapų ir kolapso metu, o ne tik viskam nusistovėjus. Trumpame intervale visai prie susijungimo kvazilokalus horizontas tebėra sekamas, tačiau lieka už dabartinio termodinaminio aprašo ribų.



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 taikynys, 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 aiškus 1973 m. „pirmasis dėsnis“ tik lygino nejudančias pusiausvyros juodąsias skyles ir negalėjo aprašyti realaus proceso.

Ashtekar, Paraizo ir Shu, naudodami kvazilokalius horizontus, taikydami termodinamikos dėsnius jų dinaminio horizonto segmentams ir sukurdami atvaizdavimą, kuris kiekvienai būsenai palei šiuos segmentus priskiria momentinę temperatūrą ir sukinį, išplečia pirmąjį ir antrąjį dėsnius juodosioms skylėms, esančioms kiek norima toli nuo pusiausvyros — akretuojančioms, kolapsuojančioms, pereinančioms rimstančių virpesių etapą ir didžiąją dalį susiliejo etapų. Esmė ta, kad horizonto plotas išlieka tinkamas entropijos matas kiekvienam dinaminio horizonto segmentu vaizduojamam etapui. Trumpas intervalas visai arti susijungimo dar neapreptas šiuo termodinaminiu aprašu, nors modeliavimai ir toliau seka kvazilokalų horizontą. Pagrindinė sistema priklauso bendrajai reliatyvumo teorijai, o garavimui ji taikoma pusiau klasikiniu artiniu; tai nėra nei kvantinė gravitacija, nei stebėjimas, nei mikrobūsenų skaičiavimas, nei 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 horizontais ir tomis jų dalimis, kurios atitinka dinaminio horizonto segmentams keliamas sąlygas. 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: Pagrindinis išvedimas atliekamas bendrojoje reliatyvumo teorijoje, o taikant sistemą laikiškojo horizonto garavimui naudojamas pusiau klasikinis artinys; trumpas intervalas visai arti dvinarės sistemos susijungimo nėra vaizduojamas dinaminio horizonto segmentu, o jo termodinaminis aprašas tebėra rengiamas, nors skaitmeniniai modeliavimai ir toliau seka kvazilokalų horizontą; aiškus garuojančių laikiškųjų horizontų atgalinio poveikio nagrinėjimas apsiriboja sferine simetrija; ploto ir entropijos tapatinimas yra prielaida, o ne statistinės mechanikos įrodytas rezultatas.

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.

Pakeitimai po publikavimo**• Pataisa · 2026-08-27**

Gavę atsakingojo autoriaus Abhay Ashtekar pastabas, pataisėme du teiginius, kuriuose buvo rašoma, kad laikiškieji ir neašiškaai simetriški atvejai recenzuotame lydimajame straipsnyje tik argumentuojami, nors iš tiesų jie ten aiškiai nagrinėjami. Peržiūros metu taip pat patikslinome, kad sistema dar neapima trumpo intervalo visai arti dvinarės sistemos susijungimo, kai kvazilokalus horizontas neatitinka dinaminio horizonto segmentui keliamų sąlygų.

• Pataisa · 2026-08-28

Po papildomo susirašinėjimo autoriaus Abhay Ashtekar paaiškinimo atskyrėme kvazilokalius horizontus, kuriuos skaitmeniniai modeliavimai seka nuo pradinių juodųjų skylių per susiliejimą iki liekanos, nuo tų jų dalių, kurios atitinka papildomas dinaminio horizonto segmentų sąlygas ir kurioms taikomi termodinamikos dėsniai.

Šaltiniai

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>