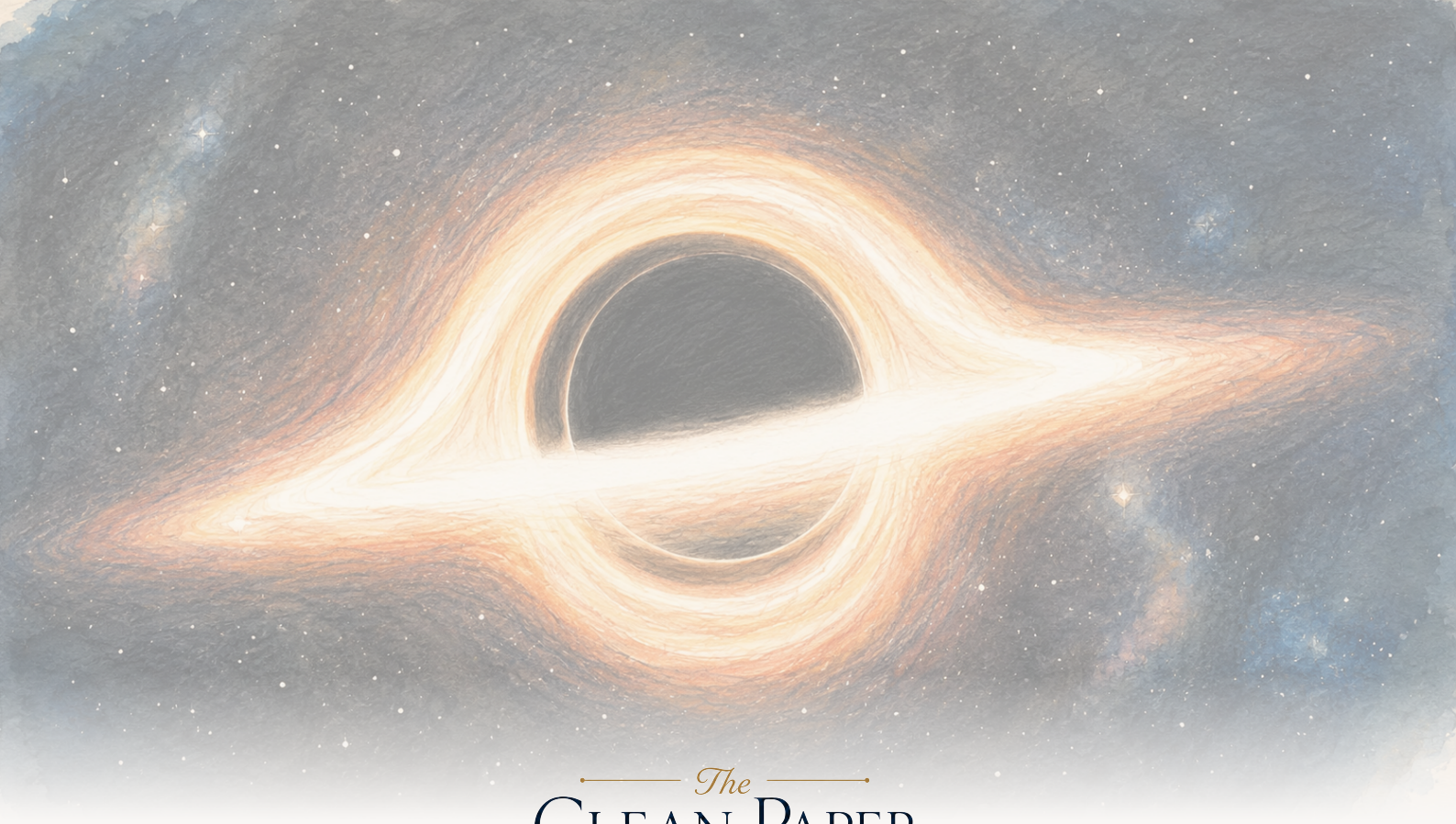




The CLEAN PAPER

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

Mustad augud järgivad termodünaamilisi „seadusi” — uus tulemus laiendab need vägivaldselt tasakaalust väljas mustadele aukudele

Alates 1970. aastatest on teada, et mustad augud järgivad termodünaamikat peegeldavaid seadusi, kuid kõige selgem versioon kehtis ainult vaikselt tasakaalus olevatele mustadele aukudele. Uus Physical Review Lettersi artikkel laiendab esimese ja teise seaduse kvaasilokaalsete horisontide osadele, mis vastavad dünaamilise horisondi segmentidele ja võivad olla tasakaalust kuitahes kaugel — akretsiooni, kollapsi ja mustade aukude ühinemise enamiku etappide ajal. Simulatsioonid jälgivad kvaasilokaalset horisonti kogu ühinemise vältel, kuid seadused ei hõlma veel kokkusulamise ümber olevat lühikest ajavahemikku, mil see ei ole dünaamilise horisondi segment. Alusraamistik kuulub üldrelatiivsusteooriasse ning aurustumist käsitletakse poolklassikalise rakendusena; see ei ole uus kvantgravitatsioon, vaatlus ega musta augu infomõistatuse lahendus.

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

Mustadel aukudel on termodünaamikat meenutavad „seadused”. Korras versioon töötab ainult siis, kui midagi ei juhtunud.

Üks füüsika kummalisemaid fakte on see, et mustad augud käituvad nagu kuumad kehad. 1970. aastate alguses märkasid Bekenstein ja Hawking, et musti auke kirjeldavad võrrandid langevad liikme liikmelt kokku termodünaamika seadustega: mustal augul on entroopia, mis on võrdeline selle horisondi pindalaga, ja temperatuur, mis on võrdeline pinnagravitatsiooniga. Seejärel näitas Hawking, et temperatuur on kõige sügavamas mõttes reaalne — must auk tõepoolest helendab, väga nõrgalt, soojuskiirguses.

Mis on Hawkingi kiirgus?

Klassikaliselt ei pääse mustast august miski välja, seega peaks see olema täiesti must ja ilma igasuguse temperatuurita. 1974. aastal näitas Stephen Hawking, et kvantteooria arvestamisel horisondi lähedal see muutub: must auk kiirgab nõrka termilist kuma ja kaotab seetõttu aeglaselt massi ehk „aurustub”. Spekter on Hawkingi temperatuuril termiline, samal ajal kui levik kõveras aegruumis muudab lõpmatusse jõudvat kiirgust. Levinud heuristilises pildis — mis ei ole Hawkingi tegelik tulemus — tekitavad kvantfluktuatsioonid vahetult horisondi taga osakeste paare, millest üks partner pääseb kiirgusena välja ja teine kukub sisse.

Oluline omadus on see, et temperatuur on musta augu massiga *pöördvõrdeline*: mida väiksem auk, seda kuumem. Iga teleskoobiga nähtava musta augu temperatuur on fantastiliselt madal — palju külmem kui seda ümbritsev tühi kosmos — nii et praktikas on kuma täiesti tühine ja seda pole kunagi otse mõõdetud. Selle tähtsus on kontseptuaalne: Hawkingi kiirgus muudab musta augu mehaanika ja termodünaamika *analoogia* päris vastavuseks. Kuna augul on tõesti temperatuur, on neis seadustes esinevad „temperatuur” ja „entroopia” päris termodünaamilised suurused, mitte formaalne kokkusattumus. (See on käesoleva artikli taust, mitte üks selle tulemustest.)

Seda vastavust ankurdatakse tulemus nimega **musta augu mehaanika esimene seadus** (Bardeen, Carter ja Hawking, 1973). Sõnadega: kui nihutada must auk ühest stabiilsest olekust veidi teistsugusesse lähedasse stabiilsesse olekusse, võrdub selle massi muutus temperatuuri ja entroopia muutuse korrutisega, millele lisandub pöörlemise liige. See on musta augu versioon mõttest „sissetulev soojus võrdub temperatuur korda entroopia muutus”.

Konks peitub väljendis *lähedane stabiilne olek*. 1973. aasta puhas seadus võrdleb kahte tasakaalus vaikselt istuvat musta auku, mis erinevad ainult infinitesimaalselt. See ei kirjelda kunagi tegelikku **protsessi** — tähte neelavat musta auku, kahe musta augu ühinemist või pärast vägivaldset sündi helisevat vastsündinud auku. Need on just olukorrad, mida tahame kõige rohkem mõista, ning need on „vaikselt istumise” täielik vastand. Korralik seadus vaikib täpselt siis, kui must auk muutub huvitavaks.

Miks ilmne parandus ei tööta

Võiks arvata, et lahendus on lihtne: jälgida lihtsalt horisondi kasvu, kui aine sisse langeb. Probleem on selles, *millist* horisonti.

Horisondil, mida enamik inimesi ette kujutab — **sündmuste horisondil**, tõelisel tagasipöördumatuse piiril — on peen ja ebamugav omadus: selle määratleb kogu universumi tulevik. Et teada, kus sündmuste horisont on *praegu*, peaks teadma kõike, mis kunagi tulevikus musta auku kukub, igaveseks. See pole tehniline piasia. Sündmuste horisont võib hakata kasvama täiesti tühjas ja lamedas ruumipiirkonnas *enne* seda, kui seda toitma hakkav aine kohale jõuab, lihtsalt seetõttu, et aine on määratud hiljem saabuma. Horisondi pindala võib suurenedagi seal, kus lokaalselt ei toimu mitte midagi.

Kuidas saab horisont kasvada enne aine saabumist?

Selle mõistatuse teaduslik nimetus on **sündmuste horisondi teleoloogiline olemus**, mida nimetatakse ka selle **globaalseks definitsiooniks**. „Teleoloogiline” ei tähenda siin, et horisondil on eesmärk, et see ennustab tulevikku või saadab mõju ajas tagasi. See tähendab, et selle üle, kas sündmus jääb horisondi sisse, saab otsustada ainult aegruumi täieliku tulevase ajaloo põhjal.

Formaalselt ütleb definitsioon sama kompaktsemalt. Kujutlege **tulevast null-lõpmatust** — „I-pluss”, tähistusega $\mathcal{I}^+$ — kui sihtkohta, kuhu jõuab valgus, mis pääseb muidu tühjas, lõpmata kauges tulevikus igaveseks välja. Sündmuste horisont on piir sündmuste vahel, millest väljapoole suunatud valgussignaal võib lõpuks sellesse sihtkohta jõuda, ja sündmuste vahel, kust ükski signaal kunagi sinna ei jõua. Üldrelatiivsusteooria tavakirjas on see tulevase null-lõpmatuse põhjusliku mineviku piir: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Kuna sõna *kunagi* on definitsiooni sisse ehitatud, ei saa üksnes siin ja praegu tehtud mõõtmine sündmuste horisonti täpselt määrata. Kokkuvarisev sfääriline kest teeb kummalisuse nähtavaks. Enne kesta saabumist võib selle sisemus olla tühi ja lokaalselt lame. Saatke keskpunkti järjest hilisematel aegadel väljapoole valguskiiri: varasemad kiired pääsevad välja, hilisemad kohtavad kokkuvarisevat kesta geomeetrias, kust nad enam välja ei saa. Sündmuste horisont on neid kahte tulemust eraldav piir. Tagasi ajas jälgides algab see piir keskpunkti ja laieneb läbi endiselt tühja, lameda sisemuse enne, kui kest sinna jõuab. Selle kasvav pindala ei registreeri lokaalset ainevoolu; see talletab, millised pääseteed jäävad valmis aegruumis avatuks.

Midagi selles pildis ei mõju ajas tagasi. Kui kest kõrvale juhitaks ja musta auku ei tekiks, oleks valmis aegruum teistsugune ning varasem piirkond poleks olnud sündmuste horisondi osa. Õppetund ei ole, et tulevik muudab minevikku, vaid et sündmuste horisont on **globaalne põhjuslik piir**, mitte pind, mida lähedane vaatleja saab ühel hetkel tuvastada. Just seetõttu kasutavad füüsikud kvaasilokaalseid või dünaamilisi horisonte siis, kui neil on vaja muutuvat musta auku jälgida.

See muudab sündmuste horisondi kasutuks musta augu „oleku” jooksva arvestusena. Arvutisimulatsioonis ei saa seda isegi täpselt lokaliseerida enne, kui simulatsioon on läbi, ning kindlasti ei saa selle abil hetkehaaval temperatuuri või entroopiat jälgida.

Käik: horisont, mida saab määratleda lokaalselt

Abhay Ashtekari, Daniel Paraizo ja Jonathan Shu uus artikkel rajab tulemuse teistsugusele horisondikäsitusele — **kvaasilokaalsele** horisondile, mille määrab üksnes selle enda ümbruse geomeetria, ilma viiteta lõpmatule tulevikule. Need **kvaasilokaalsed horisondid** on pinnad, mida arvrelativistid juba kasutavad eellasmustade aukude asukoha määramiseks, ühinemise jälgimiseks ja jäänuki asukoha määramiseks kogu simulatsiooni vältel. Siin välja töötatud termodünaamikaseadused kehtivad kvaasilokaalse horisondi nende osade kohta, mis vastavad **dünaamilise horisondi segmendi** lisatingimustele. Igal sellisel segmendil muutub pindala otsese vastusena kohalikule energiavoole, mitte kauges tulevikus toimuvatele sündmustele: positiivse sissevoolu korral pindala suureneb, negatiivse energiavooga aurustuva ajalaadse horisondi korral aga väheneb.

Lisaks lahendavad autorid probleemi raskema poole. Tavalises termodünaamikas on tasakaalust kaugel olev süsteem kurikuulsalt libe: sellele ei saa puhtalt omistada üht temperatuuri või rõhku, sest need suurused on hästi määratletud alles pärast rahunemist. Mustadel aukudel on sama raskus — kuni, nagu autorid näitavad, kasutada üht üldrelatiivsusteooria erilist omadust. Tasakaalus olev must auk (Kerri must auk) on täielikult määratud vaid kahe arvuga: selle suuruse ja pöörlemisega. Autorid ehitavad seega kaardistuse, mis võtab iga oleku dünaamilise horisondi segmendil ja loeb selle segmendi igal ristlõikel välja selle tasakaalulise musta augu kaks arvu, millega olek parajasti sarnaneb. Selle kaardistuse kaudu saab ka vägivaldselt muutuvale mustale augule omistada segmendi ulatuses **ajast sõltuva temperatuuri ja pöörlemise**.

Nende osadega — lokaalselt määratletud üle horisondi voolava energia ja hetkeliste intensiivsustega — laiendavad nad esimese seaduse mustadele aukudele, mis võivad olla tasakaalust kuitahes kaugel. Oluline on, et uus seadus kirjeldab **reaalsete füüsikaliste protsesside põhjustatud lõplikke muutusi** — aine ja gravitatsioonilainete liikumist üle horisondi —, mitte infinitesimaalseid samme kahe tardunud oleku vahel. Nad seovad selle vastava teise seadusega, mille sõnastus on nüüd *kvantitatiivne*: horisondi pindala muutus on otseselt seotud kohaliku energiavooga — positiivse sissevoolu korral pindala kasvab, negatiivse voo korral aurustuva ajalaadse horisondi pindala aga väheneb. Esimene ja teine seadus viivad koos ühe selge järelduseni: iga dünaamilise horisondi segmendiga esitatava faasi puhul, olgu see kui tahes tormiline, on entroopia õige mõõt endiselt horisondi pindala.

Mida see ei tõesta

- See **ei lahenda** kvantgravitatsiooni. Alusraamistik on sõnastatud üldrelatiivsusteoorias; selle rakendamisel musta augu aurustumisele kasutatakse poolklassikalist lähendust, milles kvantiseeritud aineväljad mõjuvad klassikalisele aegruumile. Endiselt eeldatakse horisondi pindala tavapärasest samastamist entroopiaga, mitte ei tuletata seda entropiat millestki fundamentaalsemast.
- See **ei loenda mikroolekuid ega selgita, millest musta augu entroopia koosneb**. See laiendab musta augu termodünaamika arvestust; see ei ava kasti ega paljasta mikroskoopilisi vabadusastmeid.
- See **ei lahenda musta augu infoparadoksi**. See mõistatus kuulub kvantteooriasse; artikkel seda

ei puuduta.

- See **ei ole** vaatlus ega mõõtmine. Sellega ei ole seotud teleskoopi, andmeid ega gravitatsiooni-lainesignaali — see on matemaatika. Musta augu arenedes dünaamilisele horisondile omistatav „temperatuur” on võrrandites täpselt määratletud suurus, mitte midagi sellist, mida saaks termomeetrilt lugeda.
- See **ei anna veel** kahe musta augu kogu kokkusulamise pidevat termodünaamilist kirjeldust. Arvulised simulatsioonid jälgivad kvaasilokaalset horisonti läbi kogu evolutsiooni — eellastest ühinemise kaudu jäänukini —, kuid väga ühinemise lähedal ei vasta see horisont ühe lühikese ajavahemiku jooksul dünaamilise horisondi segmendile esitatavatele tingimustele. Kaasartikkel märgib, et selle ajavahemiku termodünaamilise kirjelduse kallal alles töötatakse.
- See **ei lükka Bekensteini ja Hawkingi ümber**. See *laiendab* nende pilti dünaamilisse režiimi, kus algne, ainult tasakaalule kehtinud seadus ei öelnud midagi.

Kui tugevad on tõendid?

Tugev, arvestades seda, millega on tegu: valdkonna juhtiva uurimisrühma hoolikas ja sisemiselt kooskõlaline matemaatilise füüsika töö, mis avaldati ajakirjas *Physical Review Letters* kui *Editors' Suggestion*. Eelretsenseeritud kaasartikkel esitab pikemad tuletuskäigud ja käsitleb juhtumeid, mis lühikesest Letter-artiklist kokkuvõtlikkuse huvides välja jäeti.

Ausad mööndused puudutavad *liiki*, mitte kvaliteeti:

- Töö toetub tavapärasele eeldusele, et horisondi pindala *on* entroopia (pindala jagatud neljakordse Newtoni konstandi ja Plancki konstandiga). Kui täielik kvantgravitatsiooniteooria seda seost kunagi muudaks, liiguks tõlgendus koos sellega.
- Lühiduse ja lihtsuse huvides esitatakse lühikeses Letter-artiklis põhitulemus telgsümmeetriliste ruumilaadsete dünaamiliste horisontide abil. Eelretsenseeritud kaasartikkel analüüsib sõnaselgelt ajalaadseid dünaamilisi horisonte ja konstrueerib impulsimomendi ilma pöörlemise Killingi vektorväljata. Aurustuvate ajalaadsete horisontide puhul piirdub vastumõju otsene käsitlus siiski sfäärilise sümmeetriaga.
- „Entroopia võrdub horisondi pindalaga ka tasakaalust väljas” on uute esimese ja teise seaduse poolt loomulikuks tehtud veenev *identifikatsioon* — mitte mikroskoopilisest statistikast tõestatud teoreem.

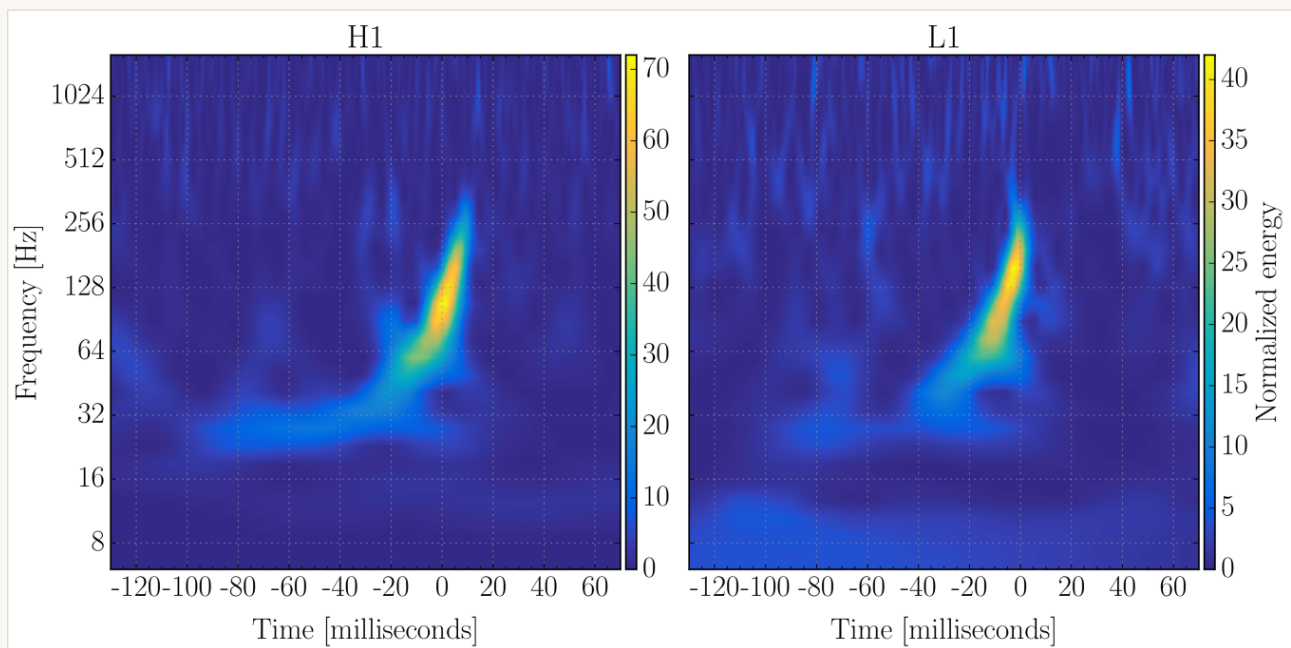
Seega: viiekümne aasta vanuse raamistiku range laiendus, mitte eksperimentaalne avastus ega uus loodusseadus, mis alles ootab testimist.

Miks see oluline on

Kahel põhjusel, üks praktiline ja teine kontseptuaalne.

Praktikas veedavad mustad augud, mida me nüüd päriselt uurime — need, mille ühinemist LIGO

ja Virgo kuulevad — oma kõige olulisemad hetked tasakaalust kaugel. Simulatsioonid jälgivad kvaasilokaalset horisonti eellastest ühinemise kaudu jäänukini. Selle artikli suurused kehtivad horisondi nende osade kohta, mis vastavad dünaamilise horisondi segmentidele, pakkudes nii põhimõtteliselt põhjendatud viisi rääkida musta augu entroopiast ja temperatuurist ühinemise evolutsiooni enamikus etappides ning kollapsi ajal, mitte üksnes pärast kõige stabiliseerumist. Vahetult kokkusulamise ümber oleva lühikese ajavahemiku jooksul jälgitakse kvaasilokaalset horisonti edasi, kuid see jääb praegusest termodünaamilisest kirjeldusest välja.



GW150914, esimene otseselt tuvastatud gravitatsioonilainesignaali, pärines kahe musta augu ühinemisest. Need aeg-sageduskaardid näitavad signaali LIGO Hanfordis (vasakul) ja LIGO Livingstonis (paremal): mõlemas detektoris tõuseb helesinine jälg ülespoole, kui signaali sagedus ühinemise poole suureneb. See on päris näide tasakaalust kaugel olevast musta augu süsteemist; see annab uuele termodünaamilisele raamistikule konteksti, mitte vaatlustõendeid selle kasuks.

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

Kontseptuaalselt on mustade aukude termodünaamiline käitumine üks väheseid konkreetseid viise kvantgravitatsiooni kohta — koht, kus gravitatsioon, kvantteooria ja termodünaamika nähtavalt kohtuvad. Täpsustades, mida „entroopia” ja „temperatuur” tähendavad vägivaldselt muutuva musta augu jaoks, täpsustatakse sihtmärki, millele iga tulevane kvantteooria peab pihta saama. See ei vasta sügavale küsimusele, mis musta augu entroopia tegelikult on. See sõnastab küsimuse täpsemalt — ja selles füüsikanurgas on see suurem osa tööst.

Lühidalt

Mustad augud järgivad termodünaamikat peegeldavaid seadusi, kuid 1973. aasta selge „esimene seadus” võrdles ainult tasakaalus paigal olevaid musti auge ega suutnud kirjeldada tegelikku protsessi. Ashtekar, Paraizo ja Shu laiendavad nii esimese kui ka teise seaduse mustadele aukudele,

mis on tasakaalust kuitahes kaugel — neelavad ainet, kollabeeruvad, summutavad võnkumisi ja läbivad ühinemise enamikku etappe —, kasutades kvaasilokaalseid horisonte, rakendades termodünaamikaseadusi nende dünaamilise horisondi segmentidele ning luues kaardistuse, mis omistab igale olekule nende segmentide ulatuses hetkelise temperatuuri ja impulsimomendi. Järeldus on, et horisondi pindala jääb entroopia õigeks mõõduks igas faasis, mida esitab dünaamilise horisondi segment. Väga kokkusulamise lähedal olev lühike ajavahemik ei ole selle termodünaamilise kirjeldusega veel hõlmatud, kuigi simulatsioonid jätkavad kvaasilokaalse horisondi jälgimist. Alusraamistik kuulub üldrelatiivsusteooriasse ning aurustumist käsitletakse poolklassikalise rakendusena; see ei ole kvantgravitatsioon, vaatlus, mikroolekute loendamine ega infoparadoksi lahendus.

Ilustamata kontroll

Mida artikkel näitab: Matemaatiliselt kooskõlalist esimese ja teise musta augu mehaanika seaduse laiendust täielikult dünaamilistele, tasakaalust kaugel olevatele mustadele aukudele, rajatuna kvaasilokaalsetele horisontidele ja nende osadele, mis vastavad dünaamilise horisondi segmentide tingimustele. See defineerib lõpliku, protsessipõhise esimese seaduse ja kvantitatiivse teise seaduse ning muudab loomulikuks dünaamilise musta augu entroopia samastamise selle horisondi pindalaga.

Mis on reaalne, kuid tõlgenduslik: Identifikatsioon „entroopia = horisondi pindala” tasakaalust väljas. Uued seadused teevad selle veenvaks, kuid see pärib standardse klassikalise pindala-entroopia eelduse, mitte ei tuleta seda.

Mida see ei näita: Kvantgravitatsiooni teooriat; musta augu entroopia mikroskoopilist päritolu või „loendust”; infoparadoksi lahendust; mistahes vaatlus- või eksperimentaalset tulemust; füüsiliselt termomeetriga mõõdetavat temperatuuri.

Peamised piirangud: Põhituletus tehakse üldrelatiivsusteoorias, ajalaadse aurustumise rakendus aga kasutab poolklassikalist lähendust; binaarse kokkusulamise vahetus läheduses olevat lühikest ajavahemikku ei esita dünaamilise horisondi segment ning selle termodünaamilise kirjelduse kallal alles töötatakse, kuigi arvulised simulatsioonid jätkavad kvaasilokaalse horisondi jälgimist; aurustuvate ajalaadsete horisontide vastumõju otsene käsitus piirdub sfäärilise sümmeetriaga; pindala ja entroopia samastamist eeldatakse, mitte ei tõestata statistilise mehaanika alusel.

Kui palju peaks tavalugeja seda usaldama? Kõrge kindlus, et tegu on tugeva ja hästi hinnatud teoreetilise edasimineku, mis tõepoolest laiendab mustade aukude termodünaamikat dünaamilisse režiimi. Sama kõrge kindlus, et see *ei ole* väide uutest vaatlustest, ei ole kvantgravitatsioon ega kuulsa infomõistatuse lahendus. Õige hoiak: päris samm mõistmises, tehtud kriidi, mitte teleskoobiga.

Avaldamisjärgsed uuendused

• Parandus • 2026-08-27

Pärast vastutava autori Abhay Ashtekari tagasisidet parandasime kaks väidet, milles ajalaadseid ja mittetelgsümmeetrilisi juhtumeid oli kirjeldatud üksnes argumenteerituna, kuigi eelretsenseeritud kaasartikkel käsitleb neid sõnaselgelt. Ülevaatamise käigus täpsustasime ka, et raamistik ei hõlma veel binaarse kokkusulamise vahetus läheduses olevat lühikest ajavahemikku, mil kvaasilokaalne horisont ei vasta dünaamilise horisondi segmenti tingimustele.

- **Parandus · 2026-08-28**

Pärast kirjavahetuse autori Abhay Ashtekari täiendavat selgitust eristasime kvaasilokaalseid horisonte, mida arvulised simulatsioonid jälgivad eellasmustadest aukudest ühinemise kaudu jäänukini, nende osadest, mis vastavad dünaamilise horisondi segmentide lisatingimustele ja mille suhtes termodünaamikaseadused kehtivad.

Allikad

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>