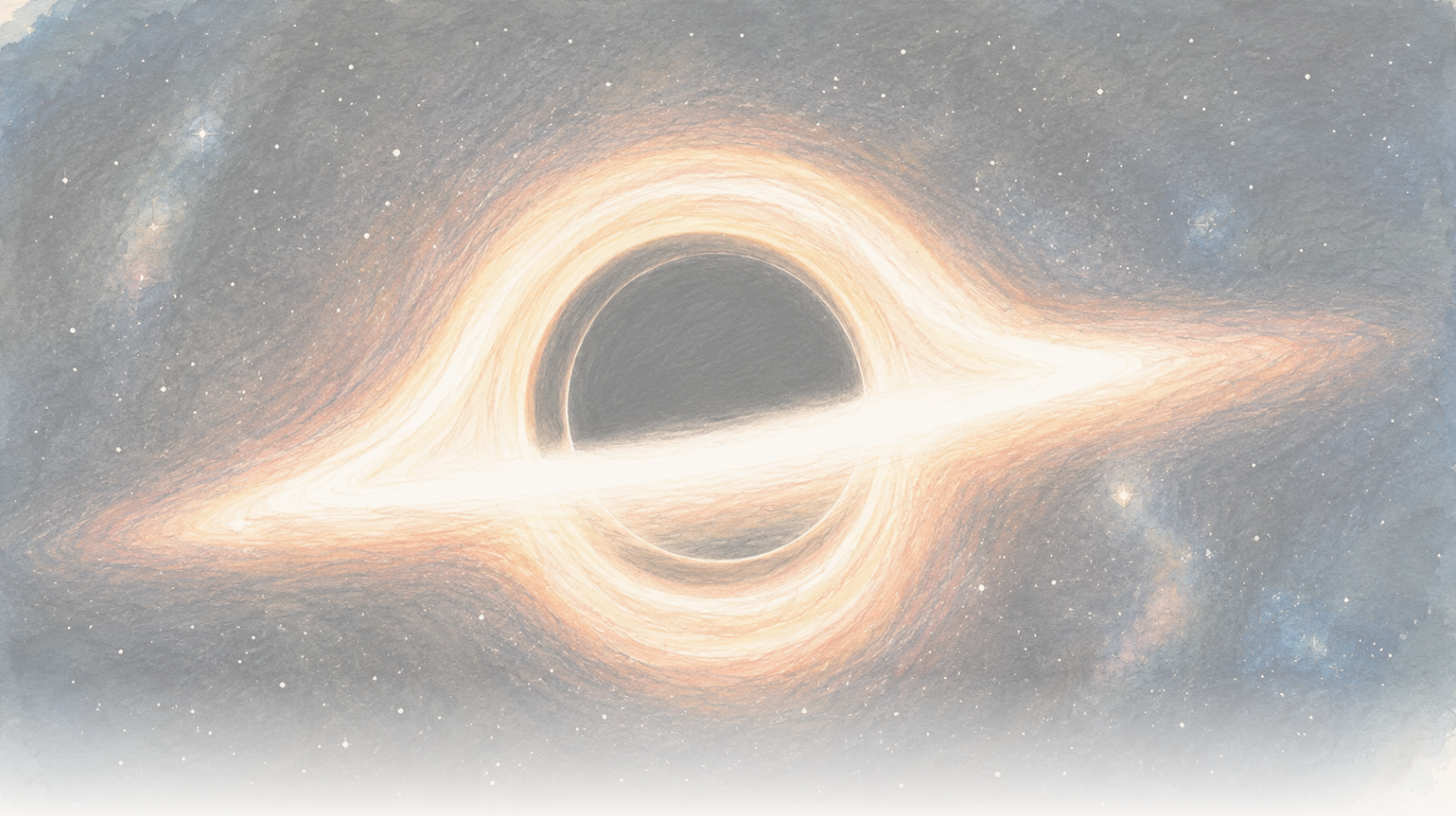




The CLEAN PAPER

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

Mustat aukot noudattavat termodynaamisia ”lakeja” — uusi tulos laajentaa ne rajusti pois tasapainosta oleviin mustiin aukkoihin

1970-luvulta lähtien mustien aukkojen on tiedetty noudattavan termodynamiikkaa muistuttavia lakeja, mutta siistein versio koski vain tasapainossa hiljaa olevia aukkoja. Uusi Physical Review Letters -artikkeli laajentaa ensimmäisen ja toisen lain nopeasti muuttaviin mustiin aukkoihin — ainetta nieleviin, sulautuviin ja säteileviin — käyttämällä paikallisesti määriteltyjä ”dynaamisia horisontteja”. Sen avulla fyysikot voivat määrittää lämpötilan ja entropian jopa rajusti muuttavalle mustalle aukolle. Kyse on klassisen yleisen suhteellisuusteorian matemaattisesta tuloksesta, ei uudesta kvanttigravitaatiosta, havainnosta tai informaatioparadoksin ratkaisusta.

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

Mustilla aukoilla on termodynamiikkaa muistuttavat ”lait”. Yksinkertainen versio toimi vain silloin, kun mitään ei tapahtunut.

Yksi fysiikan oudoimmista tosiasioista on, että mustat aukot käyttäytyvät kuin kuumat kappaleet. 1970-luvun alussa Bekenstein ja Hawking huomasivat, että mustia aukkoja hallitsevat yhtälöt vastaavat kohta kohdalta termodynamiikan lakeja: mustalla aukolla on entropia, joka on verrannollinen sen horisontin pinta-alaan, ja lämpötila, joka on verrannollinen sen pintagravitaatioon. Hawking osoitti sitten, että lämpötila on syvimmissä mielessä todellinen — musta aukko todella hehkuu hyvin heikosti lämpösäteilynä.

Mitä Hawkingin säteily on?

Klassisesti mikään ei pääse ulos mustasta aukosta, joten sen pitäisi olla täysin musta eikä sillä pitäisi olla lämpötilaa lainkaan. Vuonna 1974 Stephen Hawking osoitti, että tilanne muuttuu, kun kvanttiteoria otetaan huomioon horisontin lähellä: musta aukko lähettää heikkoa lämpösäteilyä ja menettää siksi hitaasti massaansa eli ”haihtuu”. Spektri on Hawkingin lämpötilassa terminen, vaikka eteneminen kaarevassa aika-avaruudessa muuttaa äärettömyyteen saapuvaa säteilyä. Yleisessä heuristisessa kuvassa — joka ei ole Hawkingin varsinainen johdannainen — horisontin ulkopuoliset kvanttivaihtelut synnyttävät pareja, joista toinen osapuoli pakenee säteilynä ja toinen putoaa sisään.

Keskeistä on, että lämpötila on *kääntäen* verrannollinen mustan aukon massa: mitä pienempi aukko, sitä kuumempi se on. Kaikille teleskoopilla havaittaville mustille aukoille lämpötila on uskomattoman matala — paljon kylmempi kuin niitä ympäröivä tyhjä avaruus — joten käytännössä hehku on mitättömän pieni eikä sitä ole koskaan mitattu suoraan. Sen merkitys on käsitteellinen: Hawkingin säteily tekee mustien aukkojen mekaniikan ja termodynamiikan *analogiasta* todellisen termodynamiikan. Koska aukolla todella on lämpötila, näiden lakien ”lämpötila” ja ”entropia” ovat oikeita termodynaamisia suureita eivätkä pelkkä formaali sattuma. (Tämä on taustaa nykyiselle artikkelille, ei sen tulos.)

Tätä vastaavuutta ankkuroi tulos nimeltä **mustan aukon mekaniikan ensimmäinen laki** (Bardeen, Carter ja Hawking, 1973). Sanallisesti se sanoo: jos mustaa aukkoa siirretään hieman yhdestä vakaasta tilasta läheiseen vakaaseen tilaan, sen massan muutos vastaa lämpötilaa kertaa entropian muutos plus pyörimiseen liittyvä termi. Se on mustan aukon versio ajatuksesta ”sisään tuleva lämpö = lämpötila kertaa entropian muutos”.

Ongelma piilee ilmauksessa *läheinen vakaa tila*. Vuoden 1973 laki vertaa kahta tasapainossa olevaa mustaa aukkoa, jotka poikkeavat toisistaan vain äärettömän vähän. Se ei koskaan oikeastaan kuvaa **prosesssia** — mustaa aukkoa nielemässä tähteä, kahta mustaa aukkoa sulautumassa tai vastasyntyntä mustaa aukkoa värähtelemässä rauhaan väkivaltaisen syntynsä jälkeen. Juuri näitä tilanteita haluaisimme ymmärtää eniten, ja ne ovat ”hiljaa istumisen” vastakohta. Tämä yksinkertainen laki vaikenee juuri silloin, kun musta aukko on kiinnostavimmillaan.

Miksi ilmeinen korjaus ei toimi

Voisi ajatella, että ratkaisu on helppo: seurataan vain horisontin kasvua aineen pudotessa sisään. Ongelma on, *mikä* horisontti.

Useimpien mielessä oleva horisontti — **tapahtumahorisontti**, todellinen piste josta ei ole paluuta — on hienovarainen ja hankala: sen määritelmä riippuu koko maailmankaikkeuden tulevaisuudesta. Jotta tietäisit, missä tapahtumahorisontti on *juuri nyt*, sinun pitäisi tietää kaikki, mikä koskaan tulevaisuudessa putoaa aukkoon. Tämä ei ole tekninen yksityiskohta. Tapahtumahorisontti voi alkaa kasvaa täysin tyhjässä, tasaisessa avaruuden osassa *ennen* kuin sitä ruokkiva aine saapuu, yksinkertaisesti siksi, että aine tulee myöhemmin saapumaan. Sen pinta-ala voi kasvaa paikassa, jossa paikallisesti ei tapahdu mitään.

Miten horisontti voi kasvaa ennen aineen saapumista?

Tämän pulman tieteellinen nimi on **tapahtumahorisontin teleologinen luonne**, jota kutsutaan myös sen **globaaliksi määritelmäksi**. Tässä ”teleologinen” ei tarkoita, että horisontilla olisi tarkoitus, että se ennustaisi tulevaisuutta tai lähettäisi vaikutuksen taaksepäin ajassa. Se tarkoittaa, että se, kuuluuko jokin tapahtuma horisontin sisäpuolelle, voidaan ratkaista vain aika-avaruuden koko tulevan historian perusteella.

Muodollinen määritelmä sanoo saman tiiviimmin. Kuvittele **tuleva nolläärettömyys** — ”I-plus”, merkintänä $\mathcal{I}^+$ — määränpäänä, johon ikuisesti pakeneva valo päättyy muuten tyhjässä, äärettömän kaukaisessa tulevaisuudessa. Tapahtumahorisontti on raja niiden tapahtumien välillä, joista ulospäin lähtevä valosignaali voi joskus saavuttaa tämän määränpään, ja niiden, joista mikään signaali ei koskaan pääse sinne. Yleisen suhteellisuusteorian vakiomerkinällä se on tulevan nolläärettömyyden kausaalisen menneisyyden raja: $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$. Koska sana *koskaan* sisältyy määritelmään, mikään vain tässä ja nyt tehty mittaaminen ei voi paikantaa tapahtumahorisonttia täsmälleen.

Luhistuva pallomainen kuori tekee oudon piirteen näkyväksi. Ennen kuoren saapumista sen sisäpuolinen alue voi olla tyhjä ja paikallisesti tasainen. Lähetä keskeltä ulospäin valonsäteitä yhä myöhemminä hetkinä: aikaisemmat säteet pakenevat, myöhemmät kohtaavat luhistuvan kuoren geometriassa, josta ne eivät pääse ulos. Tapahtumahorisontti on näitä kahta lopputulosta erottava raja. Kun rajaa seurataan taaksepäin, se alkaa keskeltä ja laajenee yhä tyhjän ja tasaisen sisäosan läpi ennen kuin kuori saavuttaa sen. Sen kasvava pinta-ala ei kerro paikallisesta ainevirtauksesta siellä; se kertoo siitä, mitkä pakoreitit säilyvät avoimina valmiissa aika-avaruudessa.

Mikään tässä kuvassa ei vaikuta taaksepäin ajassa. Jos kuori ohjattaisiin pois eikä mustaa aukkoa syntyisi, valmis aika-avaruus olisi erilainen eikä tuo aikaisempi alue olisi koskaan kuulunut tapahtumahorisonttiin. Oppi ei ole, että tulevaisuus muuttaa menneisyyttä, vaan että tapahtumahorisontti on **globaali kausaalinen raja**, ei pinta, jonka lähellä oleva havaitsija voisi havaita yhdellä hetkellä. Juuri siksi fyysikot käyttävät kvasilokaaleja tai dynaamisia horisontteja, kun mustan aukon muutosta täytyy seurata.

Tämä tekee tapahtumahorisontista huonon välineen mustan aukon ”tilan” jatkuvaan seurantaan. Sitä

ei voi tietokonesimulaatiossakaan paikantaa ennen kuin simulaatio on päättynyt, eikä sitä siksi voi käyttää lämpötilan tai entropian seuraamiseen hetki hetkeltä.

Ratkaisu: paikallisesti määriteltävä horisontti

Abhay Ashtekar, Daniel Paraizon ja Jonathan Shun uusi artikkeli rakentaa tuloksensa toisenlaisen horisontin varaan — **kvasilokaalin** horisontin, jonka määritelmä tarvitsee vain sen lähiympäristön geometrian eikä viittaa äärettömän kaukaiseen tulevaisuuteen. Nämä ”dynaamisen horisontin segmentit” ovat samoja pintoja, joita numeerisen suhteellisuusteorian tutkijat jo käyttävät löytääkseen mustat aukot sulautumissimulaatioista juuri siksi, että ne ovat paikallisia ja rehellisiä: niiden pinta-ala kasvaa vain siellä, missä energiaa todella kulkee niiden läpi.

Tämän lisäksi kirjoittajat ratkaisevat ongelman vaikeamman puolikkaan. Tavallisessa termodynamiikassa kaukana tasapainosta oleva järjestelmä on tunnetusti hankala: sille ei voi puhtaasti määrittää yhtä lämpötilaa tai painetta, koska suureet määrittyvät kunnolla vasta järjestelmän rauhoituttua. Mustilla aukoilla on sama ongelma — kunnes kirjoittajat hyödyntävät yleisen suhteellisuusteorian erityispiirrettä. Tasapainossa oleva musta aukko (Kerrin musta aukko) määrätty vain kahdesta luvusta: koosta ja pyörimisestä. Kirjoittajat rakentavat kartoituksen, joka ottaa mielivaltaisesti muuttuvan, kaukana tasapainosta olevan horisontin ja lukee siitä joka hetkellä sen tasapainomustan aukon kaksi lukua, jota se juuri silloin muistuttaa. Tämän kartoituksen kautta rajustikin muuttavalle mustalle aukolle voidaan määrittää **ajasta riippuva lämpötila ja pyöriminen**.

Näiden osien avulla — paikallisesti määritelty horisontin yli kulkeva energia ja hetkelliset intensiivisuudet — he laajentavat ensimmäisen lain mustiin aukkoihin mielivaltaisen kauas tasapainosta. Ratkaisevaa on, että uusi laki kuvaa **todellisten fysikaalisten prosessien aiheuttamia äärellisiä muutoksia** (aineen ja gravitaatioaaltojen kulkiessa horisontin läpi), ei äärettömän pieniä siirtymiä kahden jäätyneen tilan välillä. Sen rinnalle tulee vastaava toinen laki, jonka väite on nyt *kvantitatiivinen*: horisontin pinta-ala kasvaa määrällä, joka liittyy suoraan sisään virranneeseen energiaan. Yhdessä ensimmäinen ja toinen laki osoittavat selkeään johtopäätökseen — jopa keskellä äärimmäisen väkivaltaista tapahtumaa oikea entropian mitta mustalle aukolle on edelleen sen horisontin pinta-ala.

Mitä tämä ei todista

- Se **ei** ratkaise kvanttigravitaatiota. Tulos kuuluu *klassiseen* yleiseen suhteellisuusteoriaan ja käyttää tavanomaista horisontin pinta-alan samaistamista entropiaan. Se ei johda tätä entropiaa perustavammasta teoriasta.
- Se **ei** laske mikroiloja eikä selitä, *mistä* mustan aukon entropia koostuu. Se laajentaa mustan aukon termodynaamista kuvausta; se ei avaa laatikkoa ja paljasta mikroskooppisia vapausasteita.
- Se **ei** ratkaise mustan aukon informaatioparadoksia. Pulma kuuluu kvanttiteoriaan; tämä artikkeli ei käsittele sitä.
- Se **ei** ole havainto tai mittaus. Teleskooppia, dataa tai gravitaatioaalto-signaalia ei käytetä — kyse

on matematiikasta. Sulautuvan mustan aukon ”lämpötila” on tässä tarkasti määritelty yhtälöiden suure, ei lämpömittarilla luettava arvo.

- Se **ei** kumoa Bekensteinin ja Hawkingin työtä. Se *laajentaa* heidän kuvaansa dynaamiselle alueelle, josta alkuperäinen vain tasapainoa koskeva laki ei sanonut mitään.

Kuinka vahvaa näyttö on?

Vahvaa siinä mielessä, mikä tämä työ on: huolellinen ja sisäisesti johdonmukainen matemaattisen fysiikan tutkimus johtavalta ryhmältä, julkaistu *Editors’ Suggestion* -artikkelina *Physical Review Letters*issä (rinnakkaisartikkeli käy läpi pidemmät johdannaiset).

Rehelliset varaukset koskevat *näytön lajia*, eivät työn laatua:

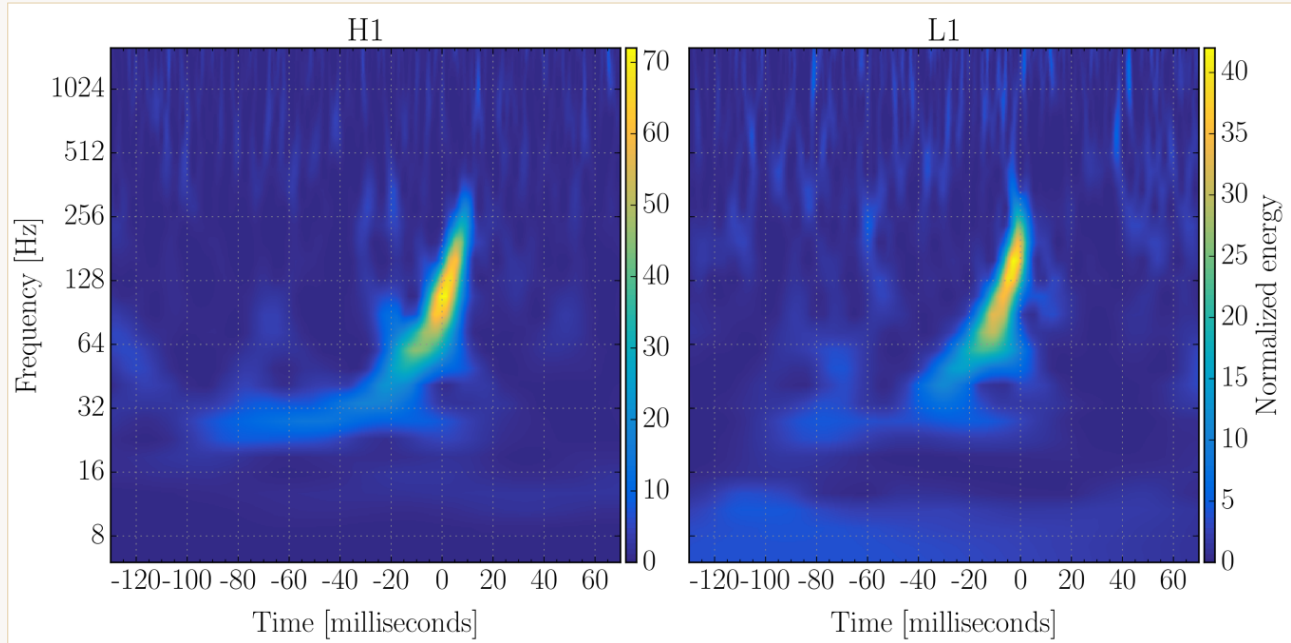
- Se nojaa tavanomaiseen oletukseen, että horisontin pinta-ala *on* entropiaa (pinta-ala jaettuna neljällä kertaa Newtonin vakio ja Planckin vakio). Jos täydellinen kvanttigravitaatioteoria joskus muuttaisi tätä samaistusta, tulkinta muuttuisi sen mukana.
- Pääasialliset laskelmat tehdään yleisimmässä tapauksessa (avaruuden kaltaiset dynaamiset horisontit, aksiaalisymmetria); kirjoittajat perustelevat, etteivät rajoitukset ole olennaisia, mutta täysin yleinen muoto nojaa muualla esitettyihin tuloksiin.
- ”Entropia = horisontin pinta-ala myös kaukana tasapainosta” on vakuuttava *samaistus*, jonka uudet ensimmäinen ja toinen laki tekevät luonnolliseksi — ei mikroskooppisesta tilastomekaniikasta johdettu teoreema.

Kyse on siis viisikymmentä vuotta vanhan kehyksen tiukasta laajennuksesta, ei kokeellisesta löydöstä eikä uudesta luonnonlaista, joka odottaisi testaamista.

Miksi sillä on merkitystä

Kaksi syytä: yksi käytännöllinen ja yksi käsitteellinen.

Käytännössä ne mustat aukot, joita nykyään todella tutkimme — ne, joiden sulautumisen LIGO ja Virgo kuulevat — viettävät tärkeimmät hetkensä kaukana tasapainosta. Tämän artikkelin suuret rakentuvat samoista paikallisesti määritellyistä horisonteista, joita simulaatiot jo seuraavat, joten työ antaa periaatteellisen tavan puhua mustan aukon entropiasta ja lämpötilasta *sulautumisen tai luhistumisen aikana*, ei vain ennen ja jälkeen.



GW150914, ensimmäinen suoraan havaittu gravitaatioaalto-signaali, syntyi kahden mustan aukon sulautumisesta. Nämä aika-taajuus-kartat näyttävät signaalin LIGO Hanfordissa (vasemmalla) ja LIGO Livingstonissa (oikealla): molemmissa kirkas jälki kaartuu ylöspäin taajuuden kasvaessa kohti sulautumista. Tämä on todellinen esimerkki kaukana tasapainosta olevasta mustien aukkojen järjestelmästä; se on uuden termodynaamisen kehyksen taustaa, ei havaintonäyttöä kehykselle.

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

Käsitteellisesti mustien aukkojen termodynaaminen käyttäytyminen on yksi harvoista konkreettisista vihjeistämme kvanttigravitaatiosta — siinä gravitaatio, kvanttiteoria ja termodynamiikka kohtaavat näkyvästi. Sen täsmentäminen, mitä ”entropia” ja ”lämpötila” tarkoittavat rajusti muuttavalle mustalle aukolle, tarkoittaa maalia, johon tulevan kvanttiteorian täytyy osua. Työ ei vastaa syvään kysymykseen siitä, mitä mustan aukon entropia todella on. Se muotoilee kysymyksen täsmällisemmin — mikä tällä fysiikan alueella on suuri osa työstä.

Tiivistelmä ilman turhaa koristelua

Mustat aukot noudattavat termodynamiikkaa muistuttavia lakeja, mutta vuoden 1973 ”ensimmäinen laki” vertasi vain tasapainossa olevia mustia aukkoja eikä pystynyt kuvaamaan todellista prosessia. Ashtekar, Paraizo ja Shu laajentavat sekä ensimmäisen että toisen lain mielivaltaisen kauas tasapainosta oleviin mustiin aukkoihin — sulautuviin, ainetta nieleviin ja rauhoittumisvaiheessa oleviin — käyttämällä paikallisesti määriteltyjä ”dynaamisia horisontteja” ja kartoitusta, joka antaa muuttavalle mustalle aukolle hetkellisen lämpötilan ja pyörimisen. Lopputulos on, että horisontin pinta-ala säilyy oikeana entropian mittana myös väkivaltaisissa tapahtumissa. Kyse on klassisen yleisen suhteellisuusteorian tiukasta tuloksesta, ei kvanttigravitaatiosta, havainnosta, mikrotilojen laskemisesta tai informaatioparadoksin ratkaisusta.

Realistinen arvio

Mitä artikkeli osoittaa: Matemaattisesti johdonmukaisen laajennuksen mustan aukon mekaniikan ensimmäiselle ja toiselle laille täysin dynaamisiin, kaukana tasapainosta oleviin mustiin aukkoihin kvasilokaalien dynaamisten horisonttien avulla. Se määrittelee äärellisen, prosessipohjaisen ensimmäisen lain ja kvantitatiivisen toisen lain ja tekee dynaamisen mustan aukon entropian samaistamisen horisontin pinta-alaan luonnolliseksi.

Mikä on aitoa mutta tulkinnanvaraista: Samaistus ”entropia = horisontin pinta-ala” kaukana tasapainosta. Uudet lait tekevät siitä vakuuttavan, mutta se perii klassisen pinta-ala–entropia-oletuksen eikä johda sitä perustavasta mikroskooppisesta teoriasta.

Mitä se ei osoita: Kvanttigravitaation teoriaa; mustan aukon entropian mikroskooppista alkuperää tai ”laskua”; informaatioparadoksin ratkaisua; mitään havainto- tai koetulosta; fyysisesti mitattavissa olevaa lämpötilaa.

Tärkeimmät rajoitukset: Koko työ on klassista yleistä suhteellisuusteoriaa; pääresultaatit todistetaan tavallisessa avaruuden kaltaisessa, aksiaalisymmetrisessä tapauksessa ja yleisyys perustellaan rinnakkaistyon avulla; pinta-ala–entropia-samaistus oletetaan eikä johdeta tilastomekaniikasta.

Kuinka paljon luottamusta yleislukijan kannattaa antaa? Suuri luottamus siihen, että kyse on vahvasta ja arvostetusta teoreettisesta edistysaskeleesta, joka todella laajentaa mustan aukon termodynamiikan dynaamiseen alueeseen. Yhtä suuri luottamus siihen, että *kyse ei ole* uusista havainnoista, kvanttigravitaatiosta tai kuuluisan informaatio-ongelman ratkaisusta. Oikea asenne: todellinen ymmärrysaskel, tehty liidulla eikä teleskoopilla.

Lähteet

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

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