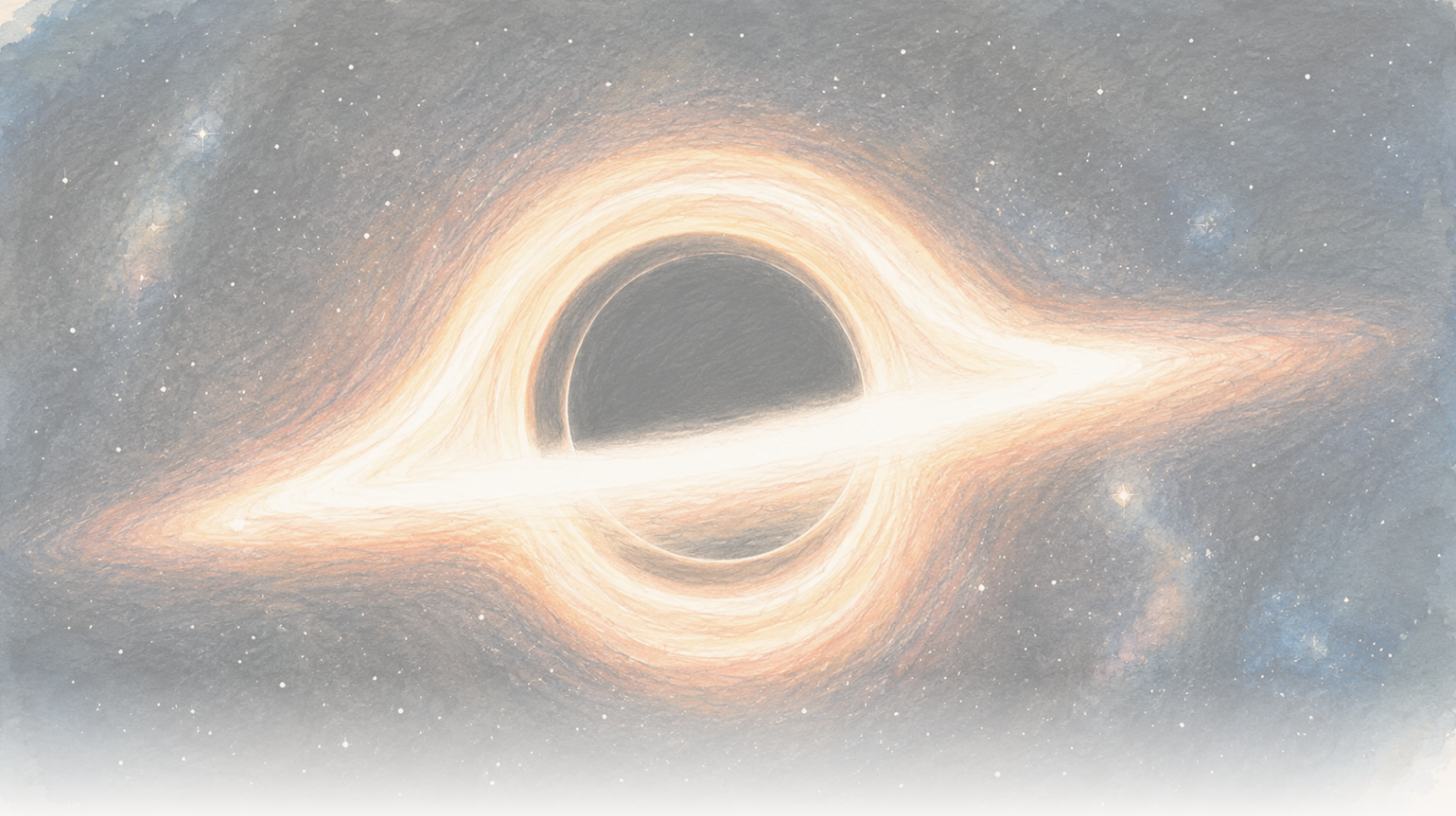




The CLEAN PAPER

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

Svarthol fylgja varmafræðilegum „lögmálum“ — ný niðurstaða víkkar þau yfir á svarthol langt úr jafnvægi

Frá áttunda áratugnum hefur verið vitað að svarthol fylgja lögmálum sem spegla varmafræði, en hreinasta útgáfan átti aðeins við svarthol sem sátu róleg í jafnvægi. Ný grein í Physical Review Letters víkkar fyrsta og annað lögmálið yfir á svarthol sem breytast hratt — gleypa efni, sameinast eða geisla — með staðbundið skilgreindum „kvikum sjóndeildarhringjum“. Þannig má úthluta hitastigi og óreiðu jafnvel svartholi í ofsafenginni þróun. Þetta er stærðfræðileg niðurstaða í klassískri almennri afstæðiskenningu, ekki ný skammtaþyngdarfræði, ekki athugun og ekki lausn á upplýsingavanda svarthola.

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

Svarthol hafa „lögmál“ sem líkjast varmafræði. Snyrtilega útgáfan virkaði aðeins þegar ekkert var að gerast

Eitt undarlegasta atriði eðlisfræðinnar er að svarthol hegða sér eins og heitir hlutir. Snemma á átunda áratugnum tóku Bekenstein og Hawking eftir því að jöfnurnar sem stjórna svartholum falla lið fyrir lið að lögmálum varmafræðinnar: svarthol hefur óreiðu sem er í hlutfalli við flatarmál sjóndeildarhrings þess og hitastig sem er í hlutfalli við yfirborðsþyngd þess. Hawking sýndi síðan að hitastigið er raunverulegt í dýpsta skilningi — svarthol gefur í raun frá sér örveika varmageislun.

Hvað er Hawking-geislun?

Í klassískri eðlisfræði sleppur ekkert úr svartholi, þannig að það ætti að vera fullkomlega svart og alls ekki hafa hitastig. Árið 1974 sýndi Stephen Hawking að þetta breytist þegar skammtafræði er tekin með í reikninginn nálægt sjóndeildarhringnum: svarthol gefur frá sér örveikan varmageisla og missir því hægt massa, eða „gufar upp“. Litrófið er varmalitróf við Hawking-hitastigið, en ferð geislunarinnar í gegnum sveigt tímarúm breytir þeirri geislun sem nær út í óendanleikann. Í algengri hugmyndamynd — sem er ekki sjálf afleiðsla Hawkings — búa skammtasveiflur rétt utan við sjóndeildarhringinn til þör þar sem annar þátturinn sleppur sem geislun en hinn fellur inn.

Lykileiginleikinn er að hitastigið er *öfugt* hlutfallslegt massa svartholsins: því minna sem svartholið er, því heitara er það. Fyrir hvaða svarthol sem sjónauki gæti séð er hitastigið ótrúlega lágt — langt undir hitastigi tóms rýmisins í kring — þannig að í reynd er glóðin hverfandi og hefur aldrei verið mæld beint. Mikilvægi hennar er hugmyndalegt: Hawking-geislun er það sem breytir *hliðstæðunni* milli svartholsaflfræði og varmafræði í raunverulega varmafræði. Þar sem svartholið hefur raunverulega hitastig eru „hitastig“ og „óreiða“ í þessum lögmálum raunverulegar varmafræðilegar stærðir, ekki formleg tilviljun. (Þetta er bakgrunnur fyrir núverandi grein, ekki niðurstaða hennar.)

Þessi samsvörun er studd af niðurstöðu sem kallast **fyrsta lögmál svartholsaflfræðinnar** (Bardeen, Carter og Hawking, 1973). Með orðum segir það: ef svartholi er ýtt örlítið úr einu stöðugu ástandi í annað nálægt stöðugt ástand, þá jafngildir breytingin á massa þess hitastiginu sinnum breytingunni á óreiðunni, auk liðar fyrir snúninginn. Þetta er svartholsútgáfan af „varmi inn jafngildir hitastigi sinnum breytingu á óreiðu“.

En gildra leynist í orðunum *nálægt stöðugt ástand*. Hreina lögmálið frá 1973 ber saman tvö svarthol sem sitja róleg í jafnvægi og eru aðeins óendanlega lítið ólík. Það lýsir í raun aldrei **ferli** — svartholi sem gleypir stjörnu, tveimur svartholum að sameinast eða nýfæddu svartholi sem hringir niður eftir ofbeldisfulla myndun. Þetta eru einmitt aðstæðurnar sem okkur langar mest að skilja og þær eru andstæða þess að „sitja róleg“. Snyrtilega lögmálið þagnar einmitt þegar svartholið verður áhugavert.

Hvers vegna augljósa lagfæringin virkar ekki

Manni gæti dottið í hug að lausnin sé einföld: fylgjast bara með sjóndeildarhringnum stækka þegar efni fellur inn. Vandinn er *hvaða* sjóndeildarhringur.

Sjóndeildarhringurinn sem flestir sjá fyrir sér — **atburðarsjóndeildarhringurinn**, hinn raunverulegi punktur þar sem ekki verður snúið við — hefur lúmskan og óþægilegan eiginleika: hann er skilgreindur af allri framtíð alheimsins. Til að vita hvar atburðarsjóndeildarhringurinn er *núna* þyrfti að vita allt sem mun nokkurn tíma falla í svartholið, að eilífu. Þetta er ekki smáatriði. Atburðarsjóndeildarhringur getur byrjað að vaxa í alveg tómu, flötu rúmi *áður* en efnið sem mun næra hann kemur, einfaldlega vegna þess að efnið mun síðar koma. Flatarmál hans getur vaxið þar sem ekkert er að gerast á staðnum.

Hvernig getur sjóndeildarhringur vaxið áður en efnið kemur?

Vísindaheitið á þessari ráðgátu er **teleológískt eðli atburðarsjóndeildarhringsins**, einnig kallað **hnattræn skilgreining** hans. Hér merkir „teleológískt“ ekki að sjóndeildarhringurinn hafi tilgang, spái fyrir um framtíðina eða sendi áhrif aftur í tímann. Það þýðir að aðeins er hægt að ákvarða hvort atburður sé innan sjóndeildarhringsins út frá fullkominni framtíðarsögu tímarúmsins.

Formlega skilgreiningin segir það sama þéttara. Ímyndið ykkur **framtíðarljósóendanleika** — kallaðan „I-plús“ og skrifaðan $\mathcal{I}^+$ — sem áfangastað ljóss sem sleppur að eilífu út í annars tóma, óendanlega fjarlæga framtíð. Atburðarsjóndeildarhringurinn er mörkin milli atburða þáðan sem útávið stefnt ljósmerki getur að lokum náð þeim áfangastað og atburða þáðan sem ekkert slíkt merki kemst nokkurn tíma út. Í venjulegri tákun almennrar afstæðiskenningar er hann jaðar orsakalands framtíðarljósóendanleikans: $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$. Þar sem orðið *nokkurn tíma* er innbyggt í skilgreininguna getur engin mæling sem gerð er aðeins hér og nú staðsett atburðarsjóndeildarhringinn nákvæmlega.

Samfallandi kúlulaga skel sýnir undarlegheitin. Áður en skelin kemur getur svæðið innan hennar verið tóm og staðbundið flatt. Sendið ljósgeisla út frá miðjunni á sífellt seinni tímum: fyrri geislarnir sleppa, en hinir seinni mæta samfallandi skelinni í rúmfræði þáðan sem þeir komast ekki út. Atburðarsjóndeildarhringurinn er mörkin sem skilja niðurstöðurnar tvær að. Sé hann rakinn afturábak byrjar jaðarinn í miðjunni og þenst út í gegnum enn tóma, flata innri hlutann áður en skelin kemur. Vaxandi flatarmál hans segir ekki frá neinu staðbundnu efnisflæði þar; það skráir hvaða flóttaleiðir eru enn opnar í fullgerðu tímarúminu.

Ekkert í þessari mynd verkar aftur í tímann. Ef skelinni væri beint annað og ekkert svarthol myndaðist væri fullgerða tímarúmið annað og fyrra svæðið hefði ekki verið hluti af atburðarsjóndeildarhring. Lærdómurinn er ekki að framtíðin breyti fortíðinni heldur að atburðarsjóndeildarhringur er **hnattræn orsakamörk**, ekki flötur sem nálægur athugandi getur greint á einu augnabliki. Einmitt þess vegna nota eðlisfræðingar hálf-staðbundna eða kvika sjóndeildarhringi þegar fylgjast þarf með svartholi á meðan það breytist.

Þetta gerir atburðarsjóndeildarhringinn ónothæfan sem gangandi lýsingu á „ástandi“ svarthols. Í tölvuhermun er ekki einu sinni hægt að staðsetja hann fyrr en hermunin er búin og alls ekki nota

hann til að fylgjast með hitastigi eða óreiðu augnablik fyrir augnablik.

Færslan: sjóndeildarhringur sem má skilgreina staðbundið

Nýja greinin, eftir Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo og Jonathan Shu, byggir niðurstöðuna á annarri hugmynd um sjóndeildarhring — **hálf-staðbundinni** (*quasi-local*) — sem er skilgreind aðeins af rúmfræðinni í eigin nágrenni, án tilvísunar til óendanlegrar framtíðar. Þessir „kviku sjóndeildarhringshlutar“ eru fletirnir sem tölulegir afstæðisfræðingar nota nú þegar til að finna svarthol í samrunahermunum, einmitt vegna þess að þeir eru staðbundnir og hreinskilnir: flatarmál þeirra vex aðeins þar sem orka fer í raun yfir þá.

Ofan á þetta leysa höfundarnir erfiðari helming vandans. Í venjulegri varmafræði er kerfi langt frá jafnvægi alræmt erfitt viðfangs: ekki er hægt að úthluta því hreint einu hitastigi eða einum þrýstingi, því slíkar stærðir verða vel skilgreindar fyrst þegar kerfið sest. Svarthol eiga við sama vanda að stríða — þar til, eins og höfundarnir sýna, nýttur er sérstakur eiginleiki almennrar afstæðiskenningar. Svarthol í jafnvægi (Kerr-svarthol) er ákvarðað af aðeins tveimur tölum: stærð og snúningi. Höfundarnir byggja því vörpun sem tekur hvaða ofsafenginn, úr-jafnvægi sjóndeildarhring sem er og les, á hverju augnabliki, tvær tölur jafnvægissvartholsins sem hann líkist þá. Með þessari vörpun má loks úthluta hraðbreytilegu svartholi **tímaháðu hitastigi og snúningi**.

Með þessa hluti — staðbundið skilgreinda orku sem fer yfir sjóndeildarhringinn og augnabliksákafsstærðir — víkka þeir fyrsta lögmálið út til svarthola sem geta verið hversu langt sem er frá jafnvægi. Mikilvægt er að nýja lögmálið lýsir **endanlegum breytingum af völdum raunverulegra eðlisferla** (efni og þyngdarbylgjur fara yfir sjóndeildarhringinn), ekki óendanlega litlum skrefum milli tveggja frosinna ástanda. Þeir para það við samsvarandi annað lögmál sem er nú *magnbundið*: flatarmál sjóndeildarhringsins vex um magn sem tengist beint orkunni sem flæddi inn. Saman benda fyrsta og annað lögmálið á eina hreina niðurstöðu — jafnvel þegar svarthol er mitt í ofbeldisfyllsta atburði sem hægt er að ímynda sér er rétti mælikvarðinn á óreiðu enn flatarmál sjóndeildarhringsins.

Hvað þetta sannar ekki

- Það **leysir ekki skammtaþyngdarfræði**. Þetta er niðurstaða í *klassískri* almennri afstæðiskenningu með venjulegri samsömun flatarmáls sjóndeildarhrings við óreiðu. Hún leiðir ekki þá óreiðu út frá einhverju grunnlögum.
- Hún **telur ekki örástand** og útskýrir ekki úr *hverju* óreiða svarthols er gerð. Hún víkkar formalisma svartholsvarmafræðinnar; hún opnar ekki kassann og sýnir smásæju frelsisgráðurnar.
- Hún **leysir ekki upplýsingaþversögn svarthola**. Sú ráðgáta tilheyrir skammtafræðinni; greinin snertir hana ekki.
- Þetta er **ekki athugun eða mæling**. Enginn sjónauki, engin gögn og ekkert þyngdarbylgjumerki koma við sögu — þetta er stærðfræði. „Hitastig“ sameinandi svarthols hér er nákvæmlega skilgreind stærð í jöfnunum, ekki eitthvað sem mætti lesa af hitamæli.

- Greinin **fellir ekki Bekenstein og Hawking úr gildi**. Hún *víkkar* mynd þeirra yfir í kvika sviðið þar sem upphaflega jafnvægislögmálið hafði ekkert að segja.

Hversu sterk eru gögnin?

Sterk, miðað við hvað þau eru: vandlega unnin, innbyrðis samkvæm stærðfræðieðlisfræði frá leiðandi hópi á sviðinu, birt sem *Editors' Suggestion* í *Physical Review Letters* (fylgigrein fer í gegnum lengri afleiðslurnar).

Heiðarlegu fyrirvararnir snúast um *tegund* fremur en gæði:

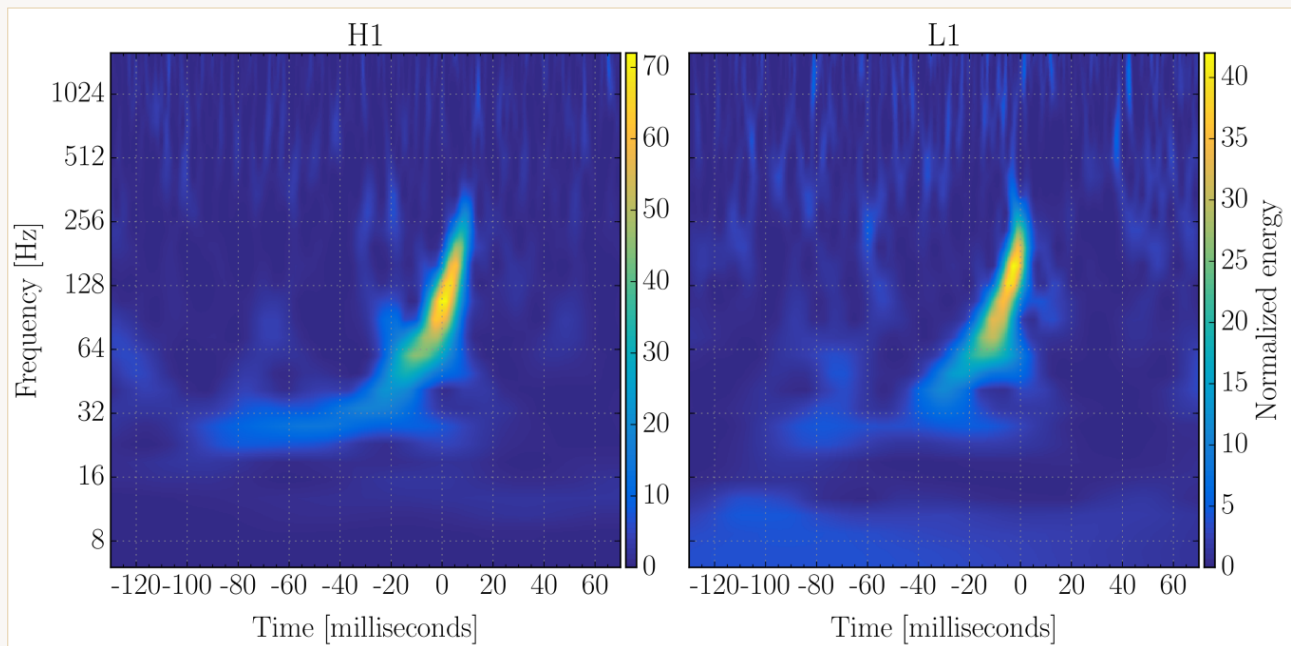
- Niðurstaðan byggir á hefðbundinni forsendu um að flatarmál sjóndeildarhrings sé óreiða (flatarmál deilt með fjórföldu Newton-fastanum og Planck-fastanum). Ef fullkomin skammtaþyngdarfræði breytti þeirri samsömun myndi túlkunin færast með henni.
- Meginútreikningarnir eru framkvæmdir fyrir algengasta tilfellið (rúm-líka kvika sjóndeildarhringi með ásamhverfu); höfundarnir halda því fram að takmarkanirnar séu ekki grundvallaratriði, en full almenningur fullyrðingarinnar styðst við niðurstöður annars staðar.
- „Óreiða jafngildir flatarmáli sjóndeildarhrings, jafnvel utan jafnvægis“ er sannfærandi *samsömun* sem nýju fyrsta og öðru lögmálin gera eðlilega — ekki setning sönnuð úr smásærri tölfræði.

Þannig að: ströng útvíkkun á fimmtíu ára gömlum ramma, ekki tilraunauppgötvun og ekki nýtt náttúrulögmál sem bíður prófunar.

Hvers vegna þetta skiptir máli

Tvær ástæður, önnur hagnýt og hin hugmyndaleg.

Hagnýtt séð eyða svartholin sem við rannsökum nú í raun — þau sem LIGO og Virgo heyra sameinast — mikilvægustu augnablikum sínum langt frá jafnvægi. Stærðirnar í þessari grein eru byggðar á sömu staðbundnu sjóndeildarhringjunum og hermarnir fylgjast nú þegar með, þannig að þetta gefur fræðilega trausta leið til að tala um óreiðu og hitastig svarthols *á meðan* samruni eða hrun stendur yfir, ekki aðeins fyrir og eftir.



GW150914, fyrsta þyngdarbylgjumerkið sem greint var beint, kom frá samruna tveggja svarthola. Þessi tíma-tíðni kort sýna merkið í LIGO Hanford (til vinstri) og LIGO Livingston (til hægri): í báðum nemum sveigir bjarta slóðin upp á við þegar tíðni merkisins hækkar í átt að samrunanum. Þetta er raunverulegt dæmi um svartholakerfi langt frá jafnvægi; það gefur samhengi fyrir nýja varmafræðilega rammann en er ekki athugunarsönnun fyrir honum.

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

Hugmyndalega er varmafræðileg hegðun svarthola ein af fáum áþreifanlegum vísbendingum sem við höfum um skammtaþyngdarfræði — þar mætast þyngdarafl, skammtafræði og varmafræði sýnilega. Að skerpa nákvæmlega hvað „óreiða“ og „hitastig“ þýða fyrir svarthol sem breytist ofsalega skerpir líka merkið sem framtíðarkenning um skammtaþyngdarfræði verður að hitta. Það svarar ekki djúpu spurningunni um hvað óreiða svarthols *er* í raun. Það setur spurninguna fram nákvæmar — sem í þessum hluta eðlisfræðinnar er stór hluti vinnunnar.

Í stuttu máli

Svarthol fylgja lögmálum sem spegla varmafræði, en hreina „fyrsta lögmálið“ frá 1973 bar aðeins saman svarthol sem sátu kyrr í jafnvægi og gat ekki lýst raunverulegu ferli. Ashtekar, Paraizo og Shu víkka bæði fyrsta og annað lögmálið út til svarthola hversu langt sem er frá jafnvægi — í samruna, að gleypa efni, að hringja niður — með staðbundnum „kvikum sjóndeildarhringjum“ og vörpun sem úthlutar breytilegu svartholi augnablikshitastigi og snúningi. Niðurstaðan er að flatarmál sjóndeildarhrings er áfram rétti mælikvarðinn á óreiðu jafnvel í ofbeldisfullum atburðum. Þetta er ströng niðurstaða í klassískri almennri afstæðiskenningu, ekki skammtaþyngdarfræði, ekki athugun, ekki talning örátanda og ekki lausn á upplýsingaþversögninni.

Raunsætt mat

Það sem greinin sýnir: Stærðfræðilega samkvæma útvíkkun á fyrsta og öðru lögmáli svartholsaflfræðinnar yfir á fullkvíkt svarthol langt frá jafnvægi, byggða á hálf-staðbundnum kvikum sjóndeildarhringjum. Hún skilgreinir endanlegt, ferlibundið fyrsta lögmál og magnbundið annað lögmál og gerir eðlilegt að samsama óreiðu kvíks svarthols við flatarmál sjóndeildarhrings þess.

Það sem er raunverulegt en túlkun: Samsömunin „óreiða = flatarmál sjóndeildarhrings“ utan jafnvægis. Nýju lögmálin gera hana mjög sannfærandi, en hún erfir hefðbundnu klassísku flatarmál-óreiðu forsenduna fremur en að leiða hana út.

Það sem hún sýnir ekki: Skammtakenningu um þyngdarafi; smásæjan uppruna eða „talningu“ óreiðu svarthola; lausn á upplýsingaþversögninni; neina athugunar- eða tilraunaniðurstöðu; hitastig sem hægt væri að mæla líkamlega.

Helstu takmarkanir: Klassísk almenn afstæðiskenning í gegn; meginniðurstöður sannaðar fyrir algenga rúm-líka, ásamhverfa tilfellið með almenning rökstuddan í fylgivinnu; flatarmál-óreiðu samsömunin er forsenda, ekki sönnun úr tölfræðilegri aflfræði.

Hversu mikið traust ætti almennur lesandi að hafa? Mikið traust á því að þetta sé traust og vel metið fræðilegt framfaraskref sem víkkar svartholsvarmafræði raunverulega yfir á kvika sviðið. Jafn mikið traust á því að þetta sé *ekki* fullyrðing um nýjar athuganir, ekki skammtaþyngdarfræði og ekki lausn á hinu fræga upplýsingavandamáli. Réttu afstaðan: raunverulegt skref í skilningi, tekið með krít en ekki sjónauka.

Heimildir

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

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