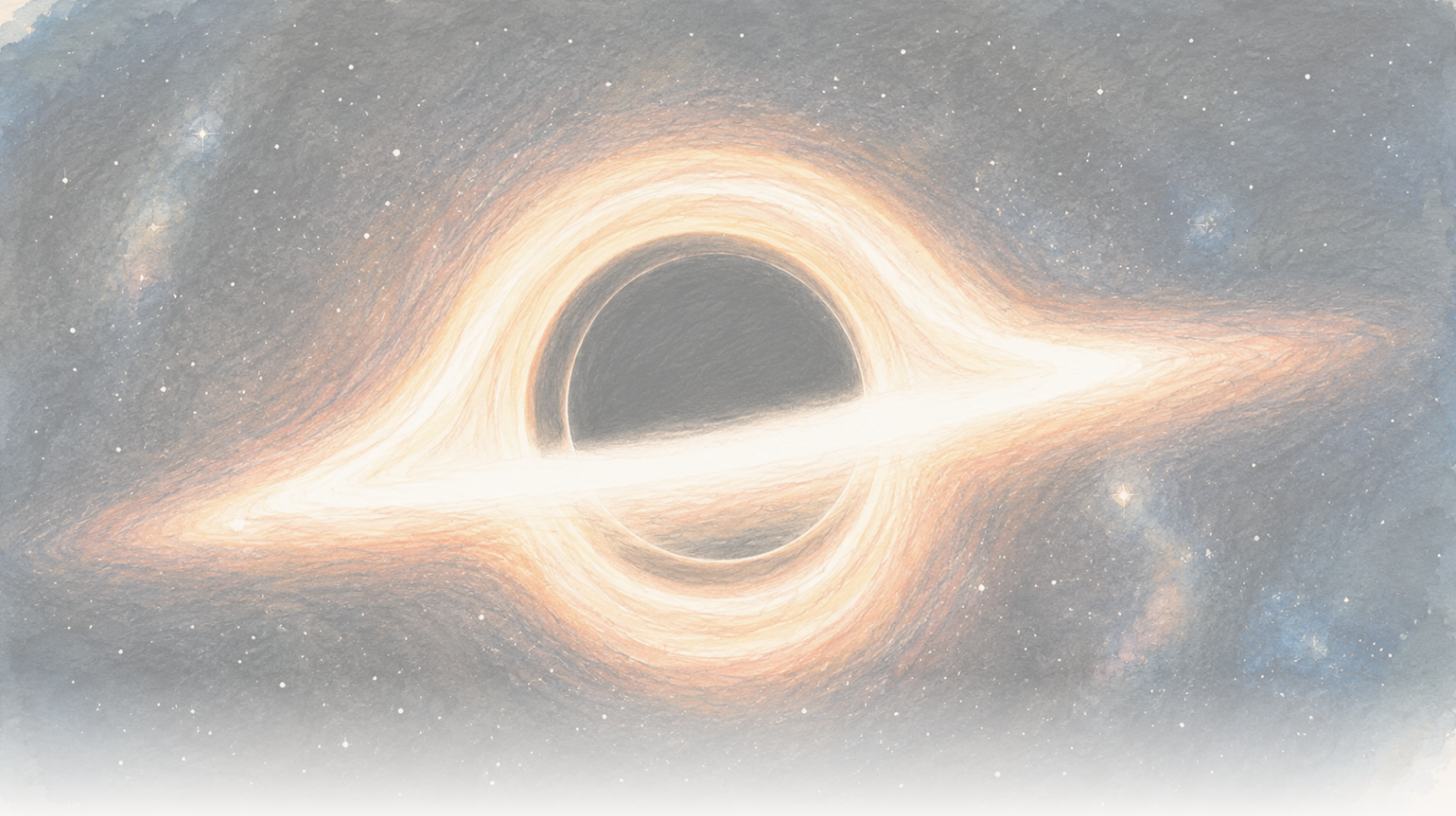




The CLEAN PAPER

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

A fekete lyukak termodinamikai „törvényeket” követnek — egy új eredmény ezeket hevesen egyensúlyon kívüli fekete lyukakra is kiterjeszti

Az 1970-es évek óta tudjuk, hogy a fekete lyukak a termodinamikára emlékeztető törvényeket követnek, de a legtisztább változat csak nyugodtan egyensúlyban levő fekete lyukakra vonatkozott. Egy új Physical Review Letters-tanulmány helyileg definiált „dinamikus horizontok” segítségével kiterjeszti az első és második törvényt gyorsan változó — anyagot elnyelő, összeolvadó, sugárzó — fekete lyukakra. Így még egy hevesen fejlődő fekete lyukhoz is rendelhető hőmérséklet és entrópia. Ez matematikai eredmény a klasszikus általános relativitáselméletben, nem új kvantumgravitáció, nem megfigyelés, és nem a fekete lyukak információs paradoxonának megoldása.

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

A fekete lyukaknak a termodinamikához hasonló „törvényeik” vannak. A rendezett változat csak akkor működött, amikor semmi sem történt.

A fizika egyik legfurcsább ténye, hogy a fekete lyukak forró testekként viselkednek. Az 1970-es évek elején Bekenstein és Hawking felismerte, hogy a fekete lyukakat leíró egyenletek tagról tagra megfelelnek a termodinamika törvényeinek: egy fekete lyuk entrópiája arányos a horizontjának területével, hőmérséklete pedig a felszíni gravitációjával. Hawking ezután megmutatta, hogy a hőmérséklet a legmélyebb értelemben valós — a fekete lyuk valóban sugároz, nagyon halványan, termikus sugárzást.

Mi a Hawking-sugárzás?

Klasszikusan semmi sem menekülhet ki egy fekete lyukból, ezért annak tökéletesen feketének kellene lennie, és egyáltalán nem lehetne hőmérséklete. Stephen Hawking 1974-ben megmutatta, hogy ez megváltozik, ha a horizont közelében a kvantumelméletet is figyelembe vesszük: a fekete lyuk gyenge termikus sugárzást bocsát ki, ezért lassan veszít a tömegéből, vagyis „elpárolog”. A spektrum a Hawking-hőmérsékleten termikus, miközben a görbült téridőn való terjedés módosítja a végtelenbe eljutó sugárzást. Egy elterjedt szemléltető kép szerint — amely nem Hawking tényleges levezetése — a horizonton kívüli kvantumfluktuációk részecskepárokat hoznak létre, amelyek egyik tagja sugárzásként megszökik, a másik pedig belezuhan.

A kulcs az, hogy ez a hőmérséklet *fordítottan* arányos a fekete lyuk tömegével: minél kisebb a lyuk, annál forróbb. Minden olyan fekete lyuk esetében, amelyet egy távcső egyáltalán észlelhetne, a hőmérséklet elképesztően alacsony — jóval hidegebb a körülötte levő üres térnél —, ezért a gyakorlatban a sugárzás teljesen elhanyagolható, és közvetlenül még soha nem mérték. A jelentősége fogalmi: a Hawking-sugárzás változtatja a fekete lyukak mechanikája és a termodinamika közötti *analógiát* valódi termodinamikává. Mivel a fekete lyuk ténylegesen rendelkezik hőmérséklettel, e törvények „hőmérséklete” és „entrópiája” valódi termodinamikai mennyiségek, nem pusztán formai egybeesések. (Ez háttér a jelenlegi tanulmányhoz, nem annak eredménye.)

Ezt a megfelelést a **fekete lyukak mechanikájának első törvénye** néven ismert eredmény rögzíti (Bardeen, Carter és Hawking, 1973). Szavakkal: ha egy fekete lyukat egy állandósult állapotból egy közeli állandósult állapotba kissé elmozdítunk, tömegének változása egyenlő a hőmérséklete és entrópiaváltozása szorzatával, plusz a forgásához tartozó taggal. Ez a fekete lyukas megfelelője annak, hogy „a bevitt hő egyenlő a hőmérséklet és az entrópiaváltozás szorzatával”.

Van azonban egy bökkenő a *közeli állandósult állapot* kifejezésben. A letisztult 1973-as törvény két, nyugodtan egyensúlyban levő fekete lyukat hasonlít össze, amelyek csak végtelenül kis mértékben térnek el egymástól. Valójában soha nem ír le **folymatot** — egy csillagot elnyelő fekete lyukat, két fekete lyuk összeolvadását vagy egy erőszakos születés után lecsengő új fekete lyukat. Pontosan ezeket a helyzeteket szeretnénk a leginkább megérteni, és ezek az „ül csendben” állapot szöges ellentétei. A

rendezett törvény éppen akkor hallgat el, amikor a fekete lyuk érdekes.

Miért nem működik a kézenfekvő javítás?

Azt gondolhatnánk, egyszerű a megoldás: csak figyeljük, ahogy a horizont növekszik a behulló anyag hatására. A probléma az, hogy *melyik* horizontot.

Az a horizont, amelyet a legtöbben elképzelnek — az **eseményhorizont**, a valódi visszatérés nélküli határ — finom, de kellemetlen tulajdonsággal rendelkezik: az egész világegyetem teljes jövője határozza meg. Ahhoz, hogy tudjuk, hol van az eseményhorizont *most*, ismernünk kellene mindazt, ami valaha, a végtelen jövőben bele fog esni a fekete lyukba. Ez nem pusztán technikai részlet. Egy eseményhorizont teljesen üres, sík térrészben is növekedni kezdhet *mielőtt* az őt majd tápláló anyag megérkezne, pusztán azért, mert az anyag később elkerülhetetlenül oda fog érni. A területe ott is nőhet, ahol helyileg semmi sem történik.

Hogyan nőhet a horizont még az anyag megérkezése előtt?

Ennek a furcsaságnak a tudományos neve az **eseményhorizont teleologikus jellege**, másként annak **globális definíciója**. A „teleologikus” itt nem azt jelenti, hogy a horizontnak célja van, megjósolja a jövőt vagy visszafelé küld hatást az időben. Azt jelenti, hogy csak a téridő teljes jövőbeli történetéből dönthető el, egy esemény a horizonton belül van-e.

A formális definíció ugyanezt tömörebben mondja. Képzeljük el a **jövőbeli fényszerű végtelen** — „I-plus”, jele $\mathcal{I}^+$ — úgy, mint azt a végpontot, amelyet az örökre elszökő fény elér egy egyébként üres, végtelenül távoli jövőben. Az eseményhorizont azon események határa, amelyekből kifelé küldött fényjel végül elérheti ezt a célt, és azoké, amelyekből semmilyen fényjel *soha* nem érhet oda. Az általános relativitáselmélet szokásos jelölésével ez a jövőbeli fényszerű végtelen oksági múltjának határa: $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$. Mivel a *soha* szó bele van építve ebbe a definícióba, csak itt és most végzett mérésből nem lehet pontosan meghatározni az eseményhorizont helyét.

Egy összeomló gömbhéj szemléletesen megmutatja a furcsaságot. Mielőtt a héj megérkezik, a belsejében levő tartomány üres és helyileg sík lehet. Küldjünk kifelé fénysugarakat a középpontból egymást követő időpontokban: a korábbi sugarak megszöknek, a későbbiek viszont olyan geometriában találkoznak az összeomló héjjal, amelyből már nem tudnak kijutni. Az eseményhorizont a két kimenetet elválasztó határ. Ha ezt a határt visszafelé követjük, a középpontban kezdődik és a még mindig üres, sík belső térben tágul, mielőtt a héj odaérne. Növekvő területe nem helyi anyagáramlásról számol be; azt rögzíti, mely menekülési utak maradnak nyitva a teljes téridőben.

Ebben a képben semmi sem hat visszafelé az időben. Ha a héjat eltérítenénk és nem alakulna ki fekete lyuk, a teljes téridő más lenne, és az a korábbi térrész nem lett volna eseményhorizont része. A tanulság nem az, hogy a jövő megváltoztatja a múltat, hanem az, hogy az eseményhorizont **globális oksági határ**, nem pedig olyan felszín, amelyet egy közeli megfigyelő egyetlen pillanatban felismerhet. Pontosán ezért használnak a fizikusok kvázi-

lokális vagy dinamikus horizontokat, amikor egy változó fekete lyukat akarnak követni.

Emiatt az eseményhorizont használhatatlan egy fekete lyuk „állapotának” folyamatos nyilvántartására. Számítógépes szimulációban sem lehet pontosan megtalálni addig, amíg a szimuláció véget nem ér, és végképp nem alkalmas arra, hogy pillanatról pillanatra hőmérsékletet vagy entrópiát kövessünk vele.

A lépés: helyileg definiálható horizont

Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo és Jonathan Shu új tanulmánya egy másfajta horizontra épít — egy **kvázi-lokális** horizontra, amelyet kizárólag a közvetlen környezet geometriája határoz meg, a végtelen jövőre való hivatkozás nélkül. Ezek a „dinamikus horizontszakaszok” azok a felszínek, amelyeket a numerikus relativitáselmélettel dolgozó kutatók már most is használnak fekete lyukak megtalálására összeolvadási szimulációkban, éppen azért, mert helyiek és „őszinték”: területük csak ott nő, ahol ténylegesen energia áramlik át rajtuk.

Erre építve a szerzők a probléma nehezebb felét is megoldják. A hétköznapi termodinamikában egy egyensúlytól távoli rendszer közismerten nehezen kezelhető: nem rendelhetünk hozzá tisztán egyetlen hőmérsékletet vagy nyomást, mert ezek a mennyiségek csak akkor definiálhatók egyértelműen, amikor a rendszer lenyugszik. A fekete lyukaknál ugyanez a probléma — egészen addig, amíg, ahogy a szerzők megmutatják, ki nem használjuk az általános relativitáselmélet egyik különleges tulajdonságát. Egy egyensúlyban levő fekete lyukat (egy Kerr-fekete lyukat) mindössze két szám rögzíti: a mérete és a forgása. A szerzők ezért olyan leképezést építenek, amely bármely vadul fejlődő, egyensúlytól távoli horizontból minden pillanatban kiolvassa annak az egyensúlyi fekete lyuknak a két számát, amelyre éppen leginkább hasonlít. E leképezés segítségével még egy hevesen változó fekete lyukhoz is rendelhető **időfüggő hőmérséklet és forgás**.

E két elem — a horizonton átáramló, helyileg definiált energia és a pillanatnyi intenzív mennyiségek — birtokában az első törvényt tetszőlegesen messze az egyensúlytól levő fekete lyukakra is kiterjesztik. Lényeges, hogy az új törvény **valós fizikai folyamatok által okozott véges változásokat** ír le (anyag és gravitációs hullámok áthaladását a horizonton), nem pedig két befagyott állapot közötti végtelenül kicsi lépéseket. Ehhez egy megfelelő második törvényt társítanak, amelynek állítása immár *kvantitatív*: a horizont területe közvetlenül a beáramló energiához kötött mennyiséggel nő. Az első és második törvény együtt egyetlen világos következtetéshez vezet — még az elképzelhető legerőszakosabb esemény közepén levő fekete lyuk esetében is a horizont területe marad az entrópia megfelelő mértéke.

Mit *nem* bizonyít ez?

- **Nem** oldja meg a kvantumgravitáció problémáját. Ez a *klasszikus* általános relativitáselmélet eredménye, a horizont területének entrópiával való szokásos azonosításával. Nem vezeti le ezt az entrópiát valamilyen alapvetőbb elméletből.
- **Nem** számolja meg a mikroállapotokat, és nem magyarázza meg, *miből* áll a fekete lyuk entrópiája. Kiterjeszti a fekete lyukak termodinamikai könyvelését; nem nyitja fel a dobozt, hogy megmutassa a mikroszkopikus szabadsági fokokat.
- **Nem** oldja fel a fekete lyuk információs paradoxonát. Az a probléma a kvantumelméletben él; ez a tanulmány nem foglalkozik vele.
- **Nem** megfigyelés vagy mérés. Nincs benne távcső, adat vagy gravitációshullám-jel — ez matematika. Egy összeolvadó fekete lyuk „hőmérséklete” itt pontosan definiált mennyiség az egyenletekben, nem olyasmi, amit hőmérővel le lehetne olvasni.
- **Nem** dönti meg Bekenstein és Hawking képét. *Kiterjeszti* azt arra a dinamikus tartományra, ahol az eredeti, csak egyensúlyra érvényes törvénynek nem volt mondanivalója.

Mennyire erős a bizonyíték?

Erős — annak tekintetében, ami: gondosan felépített, belsőleg konzisztens matematikai fizikai munka a terület vezető kutatócsoportjától, a *Physical Review Letters Editors' Suggestion* kiemelésével (egy kísérőtanulmány részletesebben levezeti a számításokat).

Az őszinte fenntartások inkább az eredmény *fajtajára*, mint minőségére vonatkoznak:

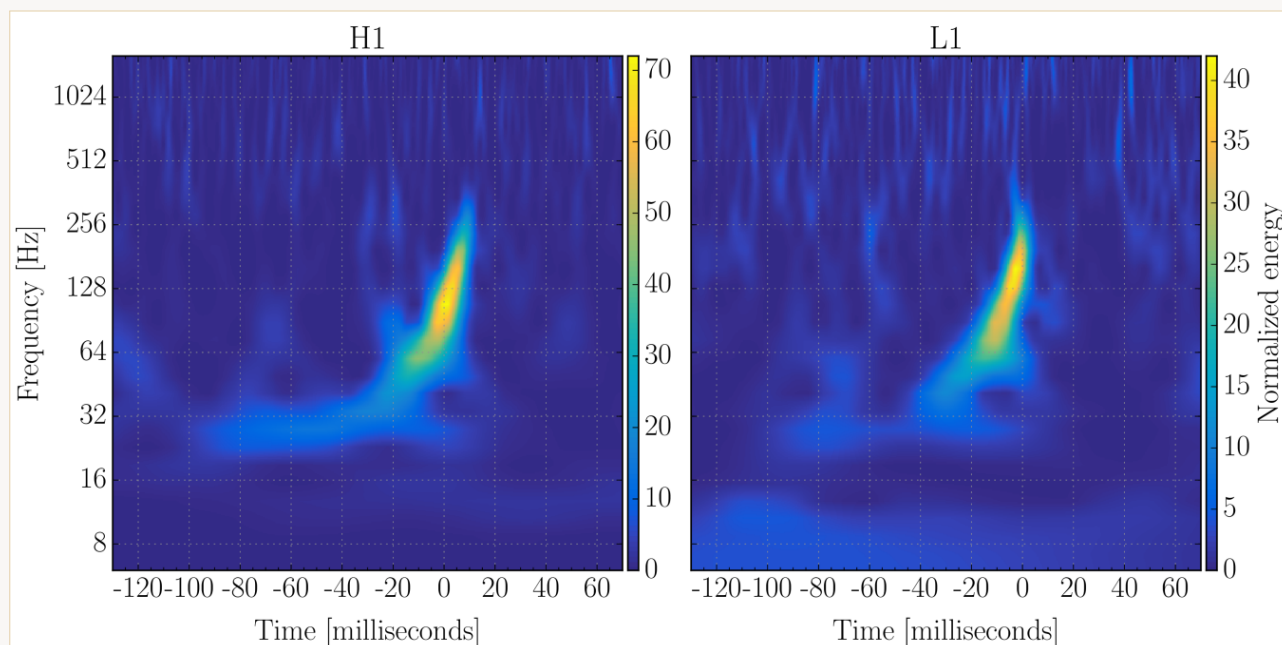
- A szokásos feltételezésre épül, miszerint a horizont területe az entrópia (a terület osztva Newton állandójának és Planck állandójának négyszeresével). Ha ezt az azonosítást egy teljes kvantumgravitációs elmélet valaha módosítaná, az értelmezés is vele változna.
- A fő számításokat a leggyakoribb esetre dolgozzák ki (térszerű dinamikus horizontok, axiális szimmetria); a szerzők szerint a korlátozások nem alapvetők, de a teljesen általános állítás részben más munkák eredményeire támaszkodik.
- Az, hogy „az entrópia egyenlő a horizont területével még egyensúlyon kívül is”, meggyőző *azonosítás*, amelyet természetessé tesz az új első és második törvény — nem mikroszkopikus statisztikából levezetett tétel.

Vagyis: egy ötvenéves keretrendszer szigorú kiterjesztése, nem kísérleti felfedezés és nem új természeti törvény, amely még tesztelésre vár.

Miért fontos?

Két okból: egy gyakorlati és egy fogalmi miatt.

Gyakorlati szempontból azok a fekete lyukak, amelyeket ma ténylegesen tanulmányozunk — amelyeket a LIGO és a Virgo összeolvadni „hall” — a legfontosabb pillanataikat az egyensúlytól távol töltik. A tanulmány mennyiségei ugyanazokra a helyileg definiált horizontokra épülnek, amelyeket a szimulációk már követnek, ezért elvi alapot adnak arra, hogyan beszéljünk egy fekete lyuk entrópiájáról és hőmérsékletéről *egy összeolvadás vagy összeomlás közben*, nem csak előtte és utána.



A GW150914, az első közvetlenül észlelt gravitációshullám-jel két fekete lyuk összeolvadásából származott. Ezek az idő–frekvencia térképek a jelet mutatják a LIGO Hanford (balra) és LIGO Livingston (jobbra) detektorában: mindkettőben egy fényes nyom ível felfelé, ahogy a jel frekvenciája az összeolvadás felé nő. Ez egy valós példa egy egyensúlytól távoli fekete lyukrendszerre; az új termodinamikai keret háttéréül szolgál, nem megfigyelési bizonyítékként mellette.

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

Fogalmilag a fekete lyukak termodinamikai viselkedése egyike annak a kevés konkrét nyomnak, amely a kvantumgravitáció felé mutat — itt találkozunk látható módon a gravitáció, a kvantumelmélet és a termodinamika. Ha pontosabban meghatározzuk, mit jelent az „entrópia” és a „hőmérséklet” egy hevesen változó fekete lyuknál, azzal szűkebb célpontot adunk minden jövőbeli kvantumelmélet számára. Ez nem válaszolja meg azt a mély kérdést, mi valójában a fekete lyuk entrópiája. Pontosabban fogalmazza meg a kérdést — és a fizika ezen sarkában ez a munka nagy része.

Röviden

A fekete lyukak a termodinamikát tükröző törvényeket követnek, de a letisztult 1973-as „első törvény” csak nyugodt, egyensúlyban levő fekete lyukakat hasonlított össze, és nem tudott tényleges folyamatot leírni. Ashtekar, Paraizo és Shu mind az első, mind a második törvényt kiterjesztik tetszőlegesen messze az egyensúlytól levő fekete lyukakra — összeolvadás, anyagbefogás, lecsengés közben — helyileg definiált „dinamikus horizontok” és egy olyan leképezés segítségével, amely a változó

fekete lyukhoz pillanatnyi hőmérsékletet és forgást rendel. A lényeg: a horizont területe még heves események közben is megmarad az entrópia megfelelő mértékének. Ez a klasszikus általános relativitáselmélet szigorú eredménye, nem kvantumgravitáció, nem megfigyelés, nem mikroállapotok megszámlálása, és nem az információs paradoxon megoldása.

Tárgyilagos mérleg

Mit mutat a tanulmány: A fekete lyukak mechanikájának első és második törvényének matematikailag konzisztens kiterjesztését teljesen dinamikus, egyensúlytól távoli fekete lyukakra, kvázi-lokális dinamikus horizontokra építve. Véges, folyamat-alapú első törvényt és kvantitatív második törvényt definiál, és természetessé teszi, hogy egy dinamikus fekete lyuk entrópiáját a horizont területével azonosítsuk.

Mi valós, de értelmezés kérdése: Az „entrópia = horizontterület” azonosítás egyensúlyon kívül. Az új törvények ezt meggyőzővé teszik, de a szokásos klasszikus terület–entrópia feltételezést örökli, nem vezeti le.

Mit nem mutat: Kvantumgravitációs elméletet; a fekete lyuk entrópiájának mikroszkopikus eredetét vagy „megszámlálását”; az információs paradoxon megoldását; megfigyelési vagy kísérleti eredményt; fizikailag közvetlenül mérhető hőmérsékletet.

Fő korlátok: Végig klasszikus általános relativitáselmélet; a fő eredményeket a gyakori térszerű, tengelyszimmetrikus esetre bizonyítják, a nagyobb általánosságot kísérő munkákra támaszkodva indokolják; a terület–entrópia azonosítás feltételezés, nem statisztikus mechanikából levezetett eredmény.

Mennyi bizalma legyen egy általános olvasónak? Nagy bizalommal tekinthető ez szilárd, jól megbecsült elméleti előrelépésnek, amely valóban kiterjeszti a fekete lyukak termodinamikáját a dinamikus tartományra. Ugyanilyen nagy bizalommal mondható, hogy *nem* új megfigyelésekről szól, nem kvantumgravitáció, és nem oldja meg a híres információs rejtvényt. A helyes hozzáállás: valódi lépés a megértés felé — krétával, nem távcsővel.

Források

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

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