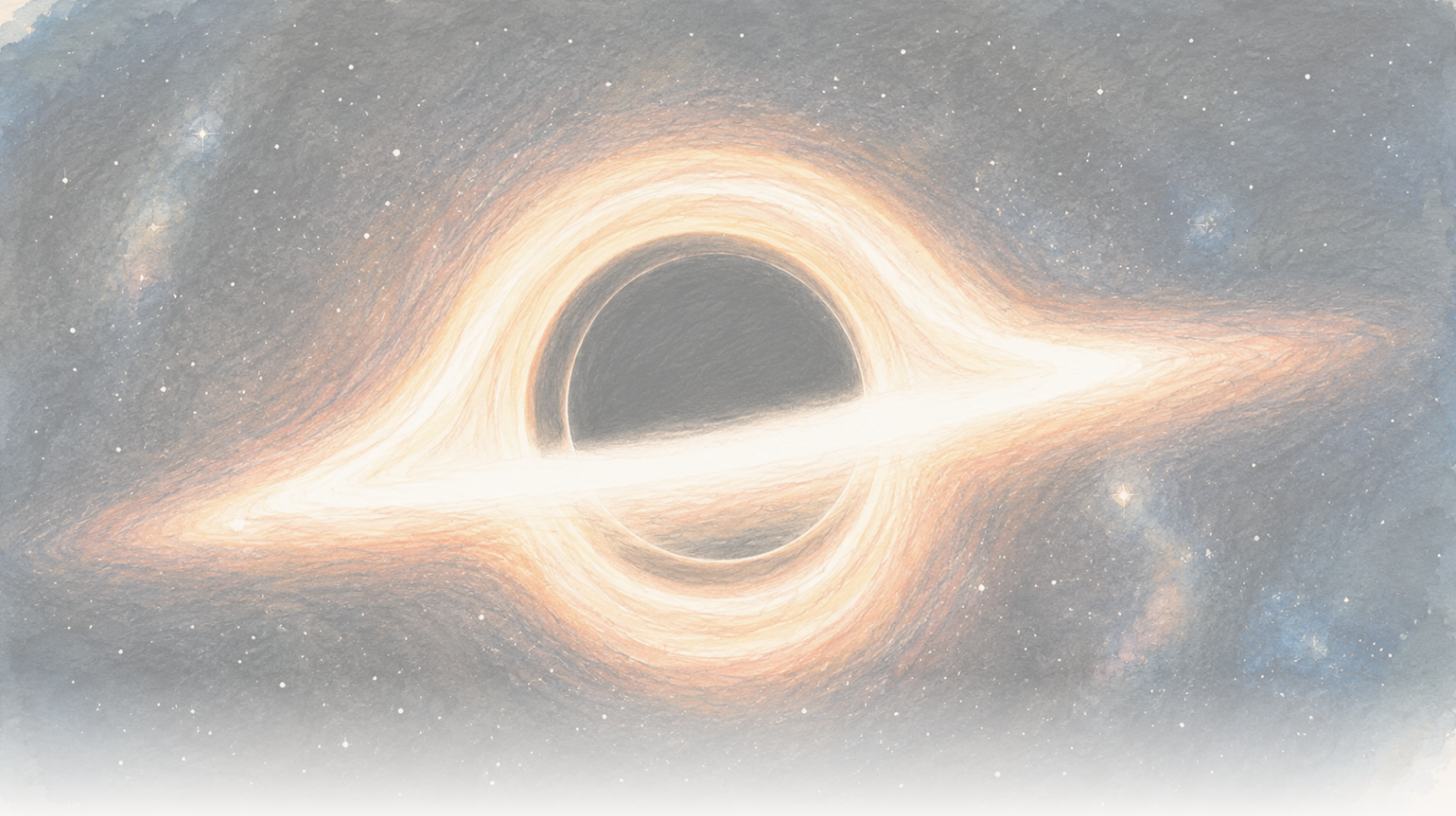




The CLEAN PAPER

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

Vrimat e zeza u binden ‘ligjeve’ termodinamike — një rezultat i ri i zgjeron te vrimat e zeza dhunshëm larg ekuilibrit

Që nga vitet 1970 dihet se vrimat e zeza u binden ligjeve që pasqyrojnë termodinamikën, por versioni më i pastër vlente vetëm për vrima të zeza që qëndronin qetë në ekuilibër. Një punim i ri në Physical Review Letters i zgjeron ligjin e parë dhe të dytë te vrimat e zeza që ndryshojnë shpejt — duke gëlltitur materie, duke u bashkuar, duke rrezatuar — përmes ‘horizonteve dinamike’ të përkufizuara lokalisht. Kjo u lejon fizikanëve t’i caktojnë temperaturë dhe entropi edhe një vrime të zezë që evoluon dhunshëm. Është rezultat matematikor në relativitetin e përgjithshëm klasik, jo gravitetin e ri kuantik, jo vëzhgim dhe jo zgjidhje e enigmës së informacionit të vrimave të zeza.

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

Vrimat e zeza kanë “ligje” që duken si termodinamikë. Versioni i rregullt funksiononte vetëm kur nuk po ndodhte asgjë.

Një nga faktet më të çuditshme në fizikë është se vrimat e zeza sillen si objekte të nxehta. Në fillim të viteve 1970, Bekenstein dhe Hawking vunë re se ekuacionet që qeverisin vrimat e zeza përputhen, term për term, me ligjet e termodinamikës: një vrimë e zezë ka entropi proporcionale me sipërfaqen e horizontit të saj dhe temperaturë proporcionale me gravitetin sipërfaqësor. Më pas Hawking tregoi se temperatura është reale në kuptimin më të thellë — një vrimë e zezë vërtet rrezaton, shumë zbehtë, rrezatim termik.

Çfarë është rrezatimi Hawking?

Në fizikën klasike asgjë nuk shpëton nga një vrimë e zezë, kështu që ajo duhet të jetë krejtësisht e zezë dhe të mos ketë fare temperaturë. Në vitin 1974 Stephen Hawking tregoi se kjo ndryshon kur pranë horizontit merret parasysh teoria kuantike: një vrimë e zezë lëshon një shkëlqim të zbehtë termik dhe për këtë arsye humbet ngadalë masë, ose “avullon”. Spektri është termik në temperaturën Hawking, ndërsa përhapja nëpër hapësirë-kohën e lakuar modifikon rrezatimin që arrin në pafundësi. Në një figurë heuristike të zakonshme — jo derivimi i vërtetë i Hawking — luhatjet kuantike pak jashtë horizontit krijojnë çifte ku njëri partner shpëton si rrezatim dhe tjetri bie brenda.

Veçoria kryesore është se kjo temperaturë është *në përpjesëtim të zhdrejtë* me masën e vrimës së zezë: sa më e vogël vrima, aq më e nxehtë është. Për çdo vrimë të zezë që një teleskop mund të shohë, temperatura është jashtëzakonisht e ulët — shumë më e ftohtë se hapësira e zbrazët përreth — kështu që në praktikë shkëlqimi është krejt i papërfillshëm dhe nuk është matur kurrë drejtpërdrejt. Rëndësia e tij është konceptuale: rrezatimi Hawking është ai që e shndërron *analogjinë* midis mekanikës së vrimave të zeza dhe termodinamikës në diçka reale. Meqë vrima vërtet ka temperaturë, “temperatura” dhe “entropia” në këto ligje janë madhësi termodinamike reale, jo një përkim formal. (Ky është sfond për punimin e tanishëm, jo një nga rezultatet e tij.)

Kjo përputhje mbështetet në një rezultat të quajtur **ligji i parë i mekanikës së vrimave të zeza** (Bardeen, Carter dhe Hawking, 1973). Me fjalë, ai thotë: nëse e shtyn pak një vrimë të zezë nga një gjendje e qëndrueshme në një tjetër të afërt, ndryshimi i masës së saj barazohet me temperaturën shumëzuar me ndryshimin e entropisë, plus një term për rrotullimin. Është versioni i vrimës së zezë i idesë “nxehtësia që hyn barazohet me temperaturën herë ndryshimin e entropisë”.

Ka një problem të fshehur te shprehja *gjendje e qëndrueshme e afërt*. Ligji i pastër i vitit 1973 krahason dy vrima të zeza që qëndrojnë qetë në ekuilibër, të ndryshme vetëm në mënyrë infinitesimale. Ai nuk përshkruan në të vërtetë një **proces** — një vrimë të zezë që gëlltit një yll, dy vrima të zeza që bashkohen, një vrimë të sapolindur që lëkundet pasi u krijua në mënyrë të dhunshme. Pikërisht këto janë situatat që duam më shumë të kuptojmë dhe janë e kundërta e “qëndrimit qetë”. Ligji i rregullt hesht pikërisht kur vrima e zezë bëhet interesante.

Pse zgjidhja e dukshme nuk funksionon

Mund të mendoni se zgjidhja është e lehtë: thjesht vëzhgoni horizontin ndërsa rritet kur materia bie brenda. Problemi është *cilin* horizont.

Horizonti që shumica e njerëzve përfytyrojnë — **horizonti i ngjarjeve**, pika e vërtetë pa kthim — ka një veti të hollë dhe të sikletshme: përcaktohet nga e gjithë e ardhmja e universit. Për të ditur se ku ndodhet horizonti i ngjarjeve *pikërisht tani*, do t'ju duhej të dinit gjithçka që do të bjerë ndonjëherë në vrimë, përgjithmonë. Kjo nuk është një hollësi teknike. Një horizont ngjarjesh mund të fillojë të rritet në një rajon plotësisht bosh e të sheshtë të hapësirës *përpara* se të ketë mbërritur materia që do ta ushqejë, thjesht sepse ajo materie është e destinuar të mbërrijë më vonë. Sipërfaqja e tij mund të rritet aty ku, lokalisht, nuk po ndodh asgjë.

Si mund të rritet një horizont përpara se të mbërrijë materia?

Emri shkencor për këtë enigmë është **natyra teleologjike e horizontit të ngjarjeve**, e quajtur edhe **përkufizimi i tij global**. Këtu “teleologjik” nuk do të thotë se horizonti ka një qëllim, parashikon të ardhmen ose dërgon ndikim mbrapsht në kohë. Do të thotë se nëse një ngjarje gjendet apo jo brenda horizontit mund të vendoset vetëm nga historia e plotë e ardhshme e hapësirë-kohës.

Përkufizimi formal thotë të njëjtën gjë në mënyrë më të përmblodhur. Përfytyroni **pafundësinë nule të së ardhmes** — të quajtur “I-plus” dhe të shkruar $\mathcal{I}^+$ — si destinacionin ku arrin drita që shpëton përgjithmonë drejt një të ardhmeje ndryshe bosh dhe pafundësisht të largët. Horizonti i ngjarjeve është kufiri midis ngjarjeve prej të cilave një sinjal drite i drejtuar jashtë mund ta arrijë përfundimisht atë destinacion dhe ngjarjeve prej të cilave asnjë sinjal i tillë nuk mund të arrijë *kurrrë*. Në shënimin standard të relativitetit të përgjithshëm, ai është kufiri i së kaluarës kauzale të pafundësisë nule të së ardhmes: $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$. Meqë fjala *kurrrë* është e ndërtuar brenda këtij përkufizimi, asnjë matje e bërë vetëm këtu dhe tani nuk mund ta lokalizojë saktësisht horizontin e ngjarjeve.

Një guaskë sferike që shembet e bën të dukshme çuditshmërinë. Përpara se të mbërrijë guaska, rajoni brenda saj mund të jetë bosh dhe lokalisht i sheshtë. Dërgoni rreze drite jashtë nga qendra në kohë gjithnjë e më të vona: rrezet më të hershme shpëtojnë, ndërsa ato më të vonshme takojnë guaskën në shembje në një gjeometri prej së cilës nuk mund të dalin. Horizonti i ngjarjeve është kufiri që ndan këto dy rezultate. Nëse ndiqet mbrapsht, ky kufi fillon në qendër dhe zgjerohet nëpër brendësinë ende bosh e të sheshtë përpara se ta arrijë guaska. Sipërfaqja e tij në rritje nuk raporton ndonjë rrjedhje lokale të materies aty; ajo regjistron cilat rrugë arratisjeje mbeten të hapura në hapësirë-kohën e plotë.

Asgjë në këtë figurë nuk vepron mbrapsht në kohë. Nëse guaska do të devijojë dhe nuk do të formojë asnjë vrimë e zezë, hapësirë-koha e plotë do të ishte tjetër dhe ai rajon i mëparshëm nuk do të kishte qenë pjesë e një horizonti ngjarjesh. Mësimi nuk është se e ardhmja ndryshon të kaluarën, por se horizonti i ngjarjeve është një **kufi kauzal global**, jo një sipërfaqe që një vëzhgues aty pranë mund ta zbulojë në një çast. Pikërisht për këtë arsye fizikanët përdorin horizonte kuazi-lokale ose dinamike kur u duhet të ndjekin një vrimë të zezë ndërsa ajo ndryshon.

Kjo e bën horizontin e ngjarjeve të papërshtatshëm si një përshkrim i vazhdueshëm i “gjendjes” së një vrime të zezë. As në një simulim kompjuterik nuk mund ta lokalizosh deri sa simulimi të ketë përfunduar, e aq më pak ta përdorësh për të ndjekur temperaturën ose entropinë nga çasti në çast.

Lëvizja kryesore: një horizont që mund ta përkufizosh lokalisht

Punimi i ri, nga Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo dhe Jonathan Shu, e ndërton rezultatin mbi një nocion tjetër horizonti — një nocion **kuazi-lokal**, të përkufizuar vetëm nga gjeometria në lagjen e vet, pa asnjë referencë te e ardhmja e pafundme. Këto “segmente horizonti dinamik” janë sipërfaqet që relativistët numerikë tashmë përdorin për të gjetur vrima të zeza në simulimet e bashkimeve, pikërisht sepse janë lokale dhe të ndershme: sipërfaqja e tyre rritet vetëm aty ku energjia i përshkon realisht.

Mbi këtë, autorët zgjidhin gjysmën më të vështirë të problemit. Në termodinamikën e zakonshme, një sistem larg ekuilibrit është jashtëzakonisht i vështirë për t’u përshkruar: nuk mund t’i caktohet pastër një temperaturë ose presion i vetëm, sepse këto madhësi përkufizohen mirë vetëm pasi gjërat qetësohen. Vrimat e zeza kanë të njëjtin problem — derisa, siç tregojnë autorët, përdor një veçori të posaçme të relativitetit të përgjithshëm. Një vrimë e zezë në ekuilibër (një vrimë e zezë Kerr) përcaktohet vetëm nga dy numra: madhësia dhe rrotullimi i saj. Prandaj autorët ndërtojnë një hartë që merr çdo horizont që evoluon egërsisht dhe është jashtë ekuilibrit, dhe në çdo çast lexon dy numrat e vrimës së zezë në ekuilibër të cilës ai i ngjan për momentin. Përmes kësaj harte, edhe një vrimë të zezë që ndryshon dhunshëm mund t’i caktohen një **temperaturë dhe rrotullim që varen nga koha**.

Me këto pjesë — një energji e përkufizuar lokalisht që kalon përmes horizontit dhe madhësi intensive të çastit — ata e zgjerojnë ligjin e parë për vrima të zeza arbitrarisht larg ekuilibrit. Në mënyrë vendimtare, ligji i ri përshkruan **ndryshime të fundme të shkaktuara nga procese fizike reale** (materie dhe valë gravitacionale që kalojnë horizontin), jo hapa infinitesimalë midis dy gjendjeve të ngrira. Ata e çiftëzojnë me një ligj të dytë përkatës, pohimi i të cilit tani është *sasior*: sipërfaqja e horizontit rritet me një sasi të lidhur drejtpërdrejt me energjinë që hyri. Të marra së bashku, ligji i parë dhe i dytë drejtojnë te një përfundim i vetëm dhe i pastër — edhe për një vrimë të zezë në mes të ngjarjes më të dhunshme që mund të imagjinohet, masa e duhur e entropisë mbetet sipërfaqja e horizontit të saj.

Çfarë nuk provon kjo

- **Nuk** zgjidh gravitetin kuantik. Ky është një rezultat në relativitetin e përgjithshëm *klasik*, duke përdorur identifikimin standard të sipërfaqes së horizontit me entropinë. Nuk e nxjerr këtë entropi nga diçka më themelore.
- **Nuk** numëron mikro-gjendje dhe nuk shpjegon *prej çfarë* përbëhet entropia e një vrime të zezë. Zgjeron kontabilitetin e termodinamikës së vrimave të zeza; nuk hap kutinë për të treguar shkallët

mikroskopike të lirisë.

- **Nuk** zgjidh paradoksin e informacionit të vrimave të zeza. Ajo enigmë jeton në teorinë kuantike; ky punim nuk e prek.
- **Nuk** është vëzhgim ose matje. Nuk ka teleskop, të dhëna apo sinjal valësh gravitacionale — kjo është matematikë. “Temperatura” e një vrime të zezë që bashkohet është këtu një madhësi e përkufizuar saktësisht në ekuacione, jo diçka që mund ta lexosh me termometër.
- **Nuk** i përmbys Bekenstein dhe Hawking. Ai e zgjeron tablonë e tyre në regjimin dinamik ku ligji fillestar, i vlefshëm vetëm në ekuilibër, nuk kishte çfarë të thoshte.

Sa të forta janë provat?

Të forta, për atë që janë: një pjesë e kujdesshme dhe e qëndrueshme nga brenda e fizikës matematike, nga një grup udhëheqës i fushës, botuar si *Editors’ Suggestion* në Physical Review Letters (një punim shoqërues shtjellon derivimet më të gjata).

Kufizimet e ndershme lidhen me *llojin* e rezultatit, jo me cilësinë:

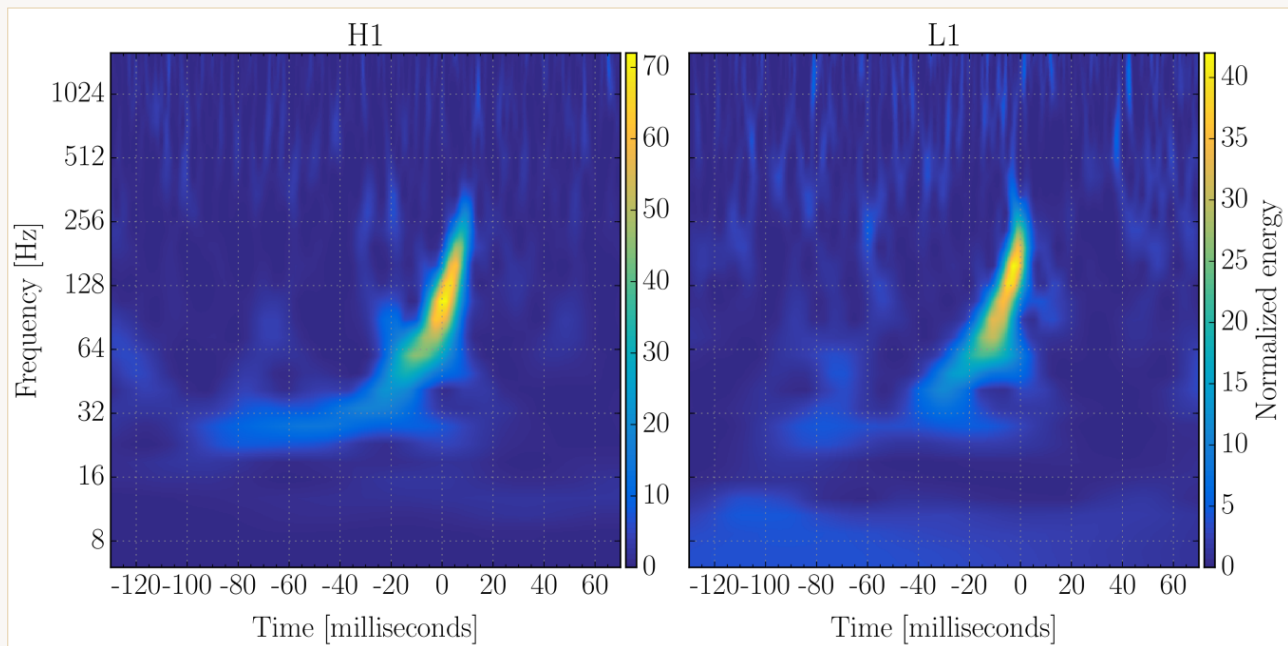
- Mbështetet në supozimin konvencional se sipërfaqja e horizontit është entropia (sipërfaqja e ndarë me katër herë konstantat e Njutonit dhe Planckut, sipas njësive standarde). Nëse ky identifikim do të rishikohej ndonjëherë nga një teori e plotë kuantike e gravitetit, interpretimi do të ndryshonte bashkë me të.
- Llogaritjet kryesore zhvillohen për rastin më të zakonshëm (horizonte dinamike të tipit hapësinor, me simetri boshtore); autorët argumentojnë se kufizimet nuk janë thelbësore, por pohimi plotësisht i përgjithshëm mbështetet edhe në rezultate të tjera.
- “Entropia barazohet me sipërfaqen e horizontit, edhe jashtë ekuilibrit” është një *identifikim* bindës që bëhet natyror nga ligjet e reja — jo një teoremë e provuar nga statistika mikroskopike.

Pra: një zgjerim rigoroz i një kuadri pesëdhjetëvjeçar, jo një zbulim eksperimental dhe jo një ligj i ri i natyrës që pret të testohet.

Pse ka rëndësi

Për dy arsye, një praktike dhe një konceptuale.

Praktikisht, vrimat e zeza që studiojmë realisht sot — ato që LIGO dhe Virgo dëgjojnë duke u bashkuar — i kalojnë çastet e tyre më të rëndësishme larg ekuilibrit. Madhësitë e këtij punimi ndërtohen nga të njëjtat horizonte të përkufizuara lokalisht që simulimet tashmë ndjekin, kështu që ai jep një mënyrë me bazë parimore për të folur për entropinë dhe temperaturën e një vrime të zezë *gjatë* një bashkimi ose kolapsi, jo vetëm para dhe pas.



GW150914, sinjali i parë i valëve gravitacionale i zbuluar drejtpërdrejt, erdhi nga bashkimi i dy vrimave të zeza. Këto harta kohë-frekuencë tregojnë sinjalin në LIGO Hanford (majtas) dhe LIGO Livingston (djathtas): në të dy detektorët, gjurma e ndritshme ngjitet lart ndërsa frekuenca e sinjalit rritet drejt bashkimit. Ky është një shembull real i një sistemi vrimash të zeza larg ekuilibrit; është kontekst për kuadrin e ri termodinamik, jo provë vëzhguese për të.

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

Konceptualisht, sjellja termodinamike e vrimave të zeza është një nga të paktat pista konkrete që kemi për gravitetin kuantik — është vendi ku graviteti, teoria kuantike dhe termodinamika takohen dukshëm. Saktësimi i kuptimit të “entropisë” dhe “temperaturës” për një vrimë të zezë që po ndryshon dhunshëm e bën më të mprehtë objektivin që çdo teori e ardhshme kuantike duhet të godasë. Nuk i përgjigjet pyetjes së thellë se çfarë *është* në të vërtetë entropia e një vrimë të zezë. E formulon pyetjen më saktë — dhe, në këtë cep të fizikës, kjo është pjesa më e madhe e punës.

Përmbledhje e shkurtër

Vrimat e zeza u binden ligjeve që pasqyrojnë termodinamikën, por “ligji i parë” i pastër i vitit 1973 krahasonte vetëm vrima të zeza që rrinin në ekuilibër dhe nuk mund të përshkruante një proces real. Ashtekar, Paraizo dhe Shu zgjerojnë si ligjin e parë, ashtu edhe të dytin, për vrima të zeza arbitrarisht larg ekuilibrit — duke u bashkuar, duke u ushqyer, duke u qetësuar pas lëkundjeve — përmes “horizonteve dinamike” të përkufizuara lokalisht dhe një harte që i cakton një vrimë të zezë në ndryshim një temperaturë dhe rrotullim të çastit. Përfundimi është se sipërfaqja e horizontit mbetet masa e duhur e entropisë edhe gjatë ngjarjeve të dhunshme. Është një rezultat rigoroz në relativitetin e përgjithshëm klasik, jo gravitet kuantik, jo vëzhgim, jo numërim mikro-gjendjesh dhe jo zgjidhje e paradoksit të informacionit.

Kontroll pa teprime

Çfarë tregon punimi: Një zgjerim matematikisht të qëndrueshëm të ligjit të parë dhe të dytë të mekanikës së vrimave të zeza për vrima të zeza plotësisht dinamike e larg ekuilibrit, të ndërtuar mbi horizonte dinamike kuazi-lokale. Ai përkufizon një ligj të parë me ndryshim të fundëm, të bazuar në proces, dhe një ligj të dytë sasiar, duke e bërë të natyrshme identifikimin e entropisë së një vrimë të zezë dinamike me sipërfaqen e horizontit të saj.

Çfarë është reale, por interpretuese: Identifikimi “entropi = sipërfaqe e horizontit” jashtë ekuilibrit. Ligjet e reja e bëjnë këtë shumë bindës, por ai trashëgon supozimin standard klasik sipërfaqe–entropi në vend që ta nxjerrë prej tij.

Çfarë nuk tregon: Një teori kuantike të gravitetit; origjinën mikroskopike ose një “numërim” të entropisë së vrimës së zezë; zgjidhjen e paradoksit të informacionit; ndonjë rezultat vëzhgues ose eksperimental; një temperaturë që mund të matej fizikisht.

Kufizimet kryesore: Relativitet i përgjithshëm klasik gjatë gjithë punës; rezultatet kryesore të provuara për rastin e zakonshëm hapësinor dhe me simetri boshtore, me përgjithësinë të argumentuar përmes punës shoqëruese; identifikimi sipërfaqe–entropi supozohet, nuk provohet nga mekanika statistikore.

Sa besim duhet të ketë një lexues i përgjithshëm? Besim të lartë se ky është një përparim teorik solid dhe i vlerësuar, që vërtet e zgjeron termodinamikën e vrimave të zeza në regjimin dinamik. Po aq besim të lartë se *nuk* është pretendim për vëzhgime të reja, nuk është gravitet kuantik dhe nuk zgjidh enigmën e famshme të informacionit. Qëndrimi i duhur: një hap real në të kuptuar, i bërë me shumës e jo me teleskop.

Burimet

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

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