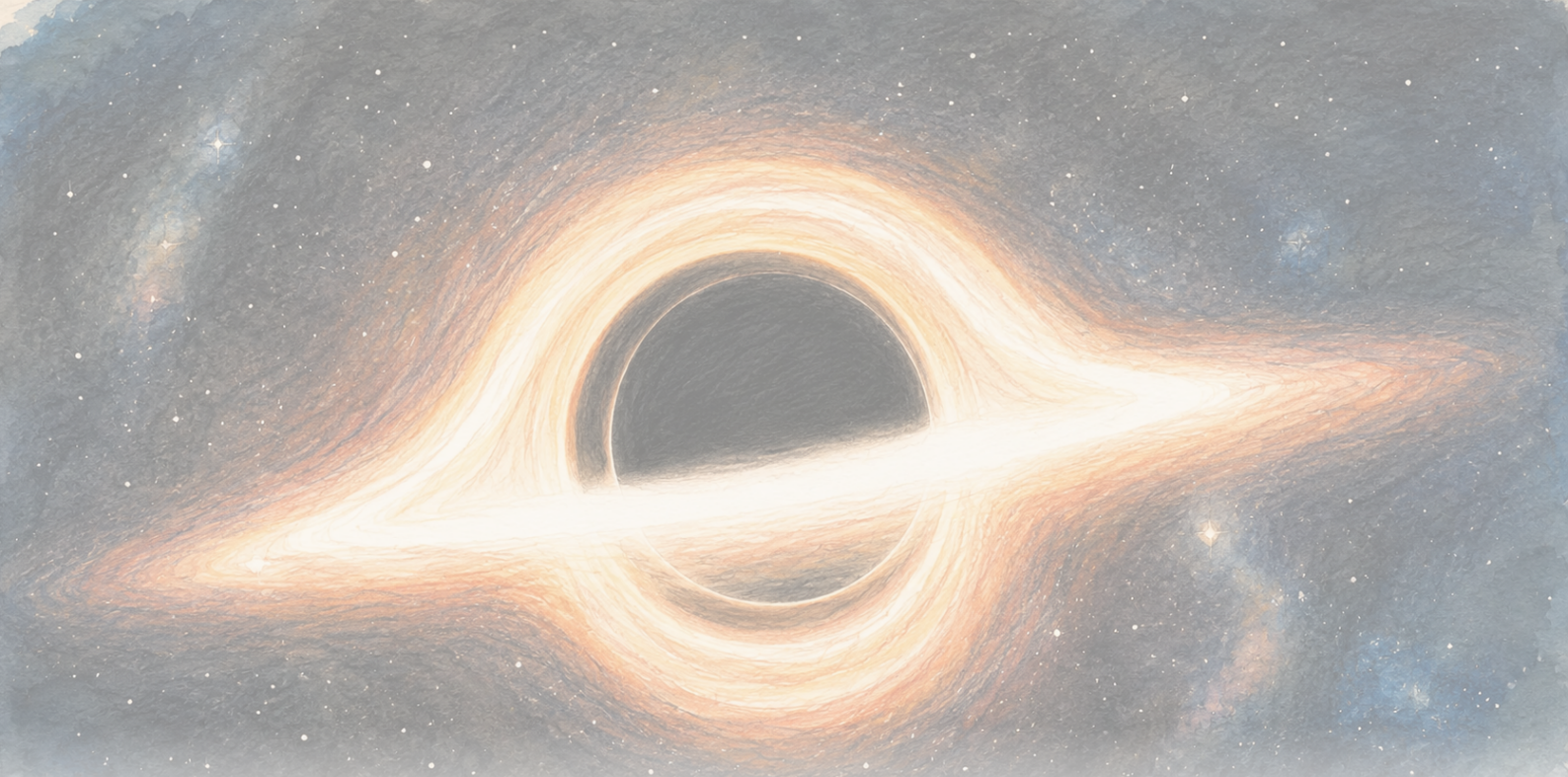




The CLEAN PAPER

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

Black holes seera thermodynamics hordofu — result haaraan black holes equilibrium irraa violently fagaatanitti seerota sana bal'isa

Bara 1970moota irraa eegalee, black holes seerota teermoodaynaamikii calaqqisiisan akka hordofan beekama; garuu bocni isaanii inni qulqulluun black holes madaallii keessatti tasgabbaa'anii jiran qofa irratti hojjeta ture. Barruun Physical Review Letters haaraan seera jalqabaa fi lammaffaa gara kutaalee horizonoota quasi-local ulaagaalee kutaa horizonii socho'aa guutanii fi madaallii irraa hangamiyyuu fagaatanitti — yeroo accretion, collapse fi marsaalee merger black hole baay'ee — bal'isa. Simulations horizonii quasi-local merger guutuu keessatti hordofu, garuu yeroo gabaabaa coalescence marsu kan inni kutaa horizonii socho'aa hin taane seerotni hanga ammaatti hin hammatan. Bu'uuri framework kanaa general relativity keessa jira; hurkaan baduu irratti hojii irra oolmaa semiclassical qaba; quantum gravity haaraa, ilaalcha yookaan furmaata rakkoo odeeffannoo black hole miti.

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

Gurraacha boollota “seera” teermoodaynaamikii fakkaatu qabu. Gosa qulqulluun isaa garuu yeroo homtuu hin ta’in qofa hojjeta ture.

Fiiziksii keessatti facts nama ajaa’iban keessaa tokko gurraacha boollota akka wanta ho’aa behave gochuu isaanii. Bara 1970s jalqabaa keessatti, Bekenstein fi Hawking equations gurraacha boollota to’atan term-by-term seerota teermoodaynaamikii waliin akka wal siman hubatan: gurraacha boolla entiroopii bal’ina horizonii isaa waliin proportional, ho’a immoo fuula gravity isaa waliin proportional qaba. Hawking sana booda ho’a kun hiika gadi fageenyaan dhugaa ta’uu agarsiise — gurraacha boolla dhugumaan baay’ee dadhabinaan thermal radiation’n ifa.

Hawking radiation maal?

Kilaasikaalaa fiiziksii keessatti homtuu gurraacha boolla keessaa hin miliqu, kanaaf perfectly gurraacha fi ho’a homaa hin qabu ta’uu qaba. Bara 1974 Stephen Hawking quantum tiyoorii horizonii bira yeroo fudhatamu kun akka jijjiiramu agarsiise: gurraacha boolla faint thermal glow baasa, kanaaf maassaa isaa suuta suuta dhaba, ykn “evaporates.” Speektrumii Hawking ho’a irratti thermal dha; propagation curved yeroo-iddoo keessa immoo radiation infinity ga’u jijjiira. Heuristic picture yeroo baay’ee fayyadamu — Hawking derivation dhugaa miti — keessatti, quantum fluctuations horizonii alaa zarraawwan pairs uumu, partner tokko radiation ta’ee miliqa, kan biraa immoo keessaa kufa.

Amaloota ijoo: ho’a kun gurraacha boolla maassaa isaa waliin *inverse* proportional dha: gurraacha boolla xiqqaan caalaatti ho’aa dha. Gurraacha boolla teleskooppiin argu danda’u kam iyyuu ho’a baay’ee, baay’ee gadi-aanaa qaba — duwwaa space naannoo isaa caalaa qabbanaa’aa — kanaaf practice keessatti glow isaa negligible dha, kallattiin hin safaramne. Barbaachisummaa isaa conceptual dha: Hawking radiation’n *analogy* black-hole makaanikaa fi teermoodaynaamikii gidduu jiru gara dhugaa teermoodaynaamikii’tti jijjiira. Gurraacha boolla dhugumaan ho’a waan qabuuf, “ho’a” fi “entiroopii” seerota kana keessaa dhugaa teermoodaynaamikii hangawwan dha, idilee coincidence qofa miti. (Kun duubbee barruu ammaa ti, bu’aa isaa miti.)

Wal-simni kun bu’aa **jalqabaa seera makaanikaa boolla gurraachaa** (Bardeen, Carter fi Hawking, 1973) jedhuun cime. Jecha salphaatti: gurraacha boolla steady haala tokko irraa gara steady haala itti dhihoo, xiqqoo adda ta’etti yoo nudge goote, jijjiirama maassaa isaa ho’a $\times$ jijjiirama entiroopii isaa, plus term spin isaa, waliin walqixa. Kun black-hole gosa “ho’a in = ho’a yeroowwan jijjiirama in entiroopii” ti.

Garuu catch tokko phrase *nearby steady haala* keessa dhokata. Seera 1973 qulqulluun gurraacha boollota lama madaallii tasgabbaa’aa keessatti callisanii taa’an, infinitesimally qofa adda ta’an, walbira qaba. **Adeemsa** tokko — gurraacha boolla urjii tokko liqimsu, gurraacha boollota lama merge godhan, ykn newborn boolla violent birth booda ring down godhu — hin ibsu. Kun situations nuti caalaatti hubachuu barbaannu, fi “quietly sitting” faallaa guutuu dha. Seera qulqulluun yeroo gurraacha boolla nama hawwatu ta’u sirriitti callisa.

Fix obvious maaliif hin hojjenne

Tarii fix'n salphaa fakkaata: barbaachisaa keessaa kufaa yeroo deemu horizonii guddatu ilaali. Rakkoon *horizonii kam* jedhu.

Horizonii namoonni baay'een yaadan — **horizonii taateerii**, qabxii of lakki return dhugaa — amaloota subtle fi awkward tokko qaba: guutuu fuuldura addunyaa'n define godhama. horizonii taateerii *amma* eessa akka jiru beekuuf, forever keessa homtuu boolla keessa kufu hundumaa beeku qabda. Kun technicality miti. horizonii taateerii duwwaa, flat naannoo space keessatti *barbaachisaa isa nyaachisu hin ga'in dura* guddachuu jalqabuu danda'a, sababni barbaachisaa sun boodaa dhufuuf destiny qaba. Bal'ina isaa bakka locally homtuu hin ta'in keessatti ol ka'uu danda'a.

Horizon barbaachisaa hin ga'in dura akkamitti guddachuu danda'a?

Maqaan saayinsawaa puzzle kanaa **amaloota teeleolojikaalaa daangaa taatee**, ykn **waliigalaa hiika** jedhama. As “teleological” jechuun horizonii kaayyoo qaba, fuuldura tilmaama, ykn dhiibbaa yeroo keessatti backwards erga jechuu miti. Event tokko horizonii keessa jira moo ala jechuun guutuu fuuldura seenaa yeroo-iddoo irraa qofa murtaa'uu danda'a jechuu dha.

Idilee hiika jecha gabaabaadhaan sanuma dubbata. **Fuuldura null infinity** — “I-plus” jedhamee waamamu, $\mathcal{I}^+$ jedhamee barreeffamu — bakka ga'umsaa ifa forever miliqee duwwaa fuuldura infinitely distant keessatti ga'u yaadi. horizonii taateerii daangaa events outward ifa mallattoo eventually bakka ga'umsaa sana ga'uu danda'an fi events mallattoo akkasii *ever* hin ga'in gidduu jiru. Istaandaardii notation waliigalaa relativity keessatti, daangaa sababa-qabeessa darbe fuuldura null infinity: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Sababni jechi *ever* hiika keessaa waan jiruuf, safartuu here-and-amma qofa horizonii taateerii exactly arguu gochuu hin danda'u.

Kufaa jiru spherical qola strangeness kana ifa godha. Qola hin ga'in dura naannoo inside duwwaa fi locally flat ta'uu danda'a. Giddugala irraa outward ifa rays yeroo itti aanu itti aanu ergi: rays duraa miliqu; rays boodaa kufaa jiru qola ji'oometirii keessaa ba'uu hin dandeenye keessatti qunnamu. horizonii taateerii daangaa bu'aawwan lamaan addaan baasu dha. Backwards trace godhamuun, daangaa sun giddugala irraa jalqabee still-empty, flat interior keessa qola hin ga'in dura babal'ata. Bal'ina isaa guddachuun naannoo keessaa barbaachisaa flow achitti jiru hin gabaasu; completed yeroo-iddoo keessatti miliquu routes kamtu banaa akka hafe galmeessa.

Picture kana keessatti homtuu yeroo keessatti backwards hin hojjetu. Qola divert godhamee gurraacha boolla hin uumamne taanaan, completed yeroo-iddoo adda ta'a; earlier naannoo sun horizonii taateerii keessaa hin ta'u ture. Lesson fuuldura darbe jijjiira jechuu miti; horizonii taateerii **waliigalaa sababa-qabeessa daangaa** dha, fuula nearby observer instant tokko keessatti adda baasuu miti. Kanaaf physicists yeroo gurraacha boolla changing hordofu barbaadan quasi-local ykn socho'aa horizons fayyadamu.

Kun horizonii taateerii gurraacha boolla “haala” isaa running account ta'ee faayidaa hin qabne godha. Kompiitara fakkeessuu keessatti illee fakkeessuu xumuramee booda qofa arguu gochuu dandeessa; ho'a ykn entiroopii moment-by-moment hordofuuf immoo caalaatti hin mijatu.

Move: horizonii locally define gochuu dandeessu

Barruun haaraan Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo fi Jonathan Shu barreessan bu'aa isaa yaad-rimee horizonii adda ta'e irratti ijaara — jechuunis isa **quasi-local**, kan fuuldura daangaa hin qabne osoo hin wabeeffatin ji'oomeetirii naannoo mataa isaa qofaan ibsamu. **Horizonoonni quasi-local** kun fuulota qorattoonni relativity lakkoofsaa simulation guutuu keessatti black holes jalqabaa adda baasu, merger hordofuu fi isa hafee adda baasuuf duraanuu fayyadamani dha. Seerotni teermooday-naamikii as keessatti qophaa'an kutaalee horizonii quasi-local ulaagaalee dabalataa **kutaa horizonii socho'aa** ta'uuf barbaachisan guutan irratti hojjatu. Kutaa akkasii tokko tokko irratti bal'inni taateewwan fuuldura fagoo osoo hin taane yaa'a anniisaa naannoo sanaatiif kallattiin deebii kenna: yaa'i anniisaa poozatiivii gara keessaatti seenu bal'ina sana ni guddisa; horizonii time-like hurkaan badu kan yaa'a anniisaa negaatiivii qabu keessatti ammoo bal'inni ni hir'ata.

Kana irratti, barreessitoonni kutaa rakkoo caalaatti rakkisaa furu. Teermoodaynaamikii idilee keessatti, sirna madaallii tasgabbaa'aa irraa fagoo ta'e ibsuun baay'ee rakkisaa dha: ho'i ykn dhiibbaan tokko qulqulluun kennamuu hin danda'u, sababni isaas hangawwan sun yeroo sirni tasgabbaa'u qofa sirriitti ibsamaniif. Black holes rakkoo walfakkaataa qabu — garuu, barreessitoonni akka agarsiisanitti, amala addaa general relativity fayyadamuun furmaata argamu. Black hole madaallii tasgabbaa'aa keessa jiru (Kerr black hole) lakkoofsota lama qofa — hammamtaa fi spin — tiin guutumaan murtaa'a. Kanaaf barreessitoonni kaartaa tokko ijaaru: inni haala tokko tokko kutaa horizonii socho'aa irra jiru fudhatee, cross-section kutaa sanaa tokko tokko irratti lakkoofsota lama black hole madaallii tasgabbaa'aa haalli sun yeroo sana fakkaatu dubbisa. Kaartaa sanaan, black hole saffisaan jijjiiramu tokko kutaa sana irratti **ho'aa fi spin yeroo waliin jijjiiramu** qabaachuu danda'a.

Qaamolee kanaan — anniisaa naannoo irratti ibsamee horizonii qaxxaamuru fi hammawwan intensive battalumatti murtaa'an — seera jalqabaa gara black holes madaallii irraa hangamiyyuu fagaataniitti bal'isu. Wanti murteessaan, seerri haaraan **jijjiiramoota daangeffamoo adeemsa fiizikaalaa dhugaatiin uumaman** (materiyaa fi gravitational waves horizonii qaxxaamuran) ibsa malee, tarkaanfiiwwan infinitesimal haalota dhaabbataa lama gidduu jiran miti. Seera kana seera lammaffaa isa wajjin walsimu, ibsi isaa amma *lakkoofsaan safaramu*, waliin kaa'u: jijjiiramni bal'ina horizonii yaa'a anniisaa naannoo sanaa wajjin kallattiin walqabata — yaa'a poozatiivii gara keessaatiin guddachuu, yookaan horizonii time-like hurkaan badu irratti yaa'a negaatiiviitiin hir'achuu. Walitti qabamanii, seerri jalqabaa fi lammaffaan xumura qulqulluu tokko agarsiisu — marsaa kutaa horizonii socho'aatiin bakka buufame kamiyyuu keessatti, hammam jeeqamaa ta'us, safartuun entiroopii sirrii ammas bal'ina horizonii isaa ti.

Kun maal hin mirkaneessu

- Quantum gravity **hin furu**. Bu'uuri framework kanaa general relativity keessatti bocame; hojii irra oolmaan isaa hurkaan baduu black hole irratti approximation semiclassical fayyadama, isa keessatti quantum matter fields spacetime classical irratti dhiibbaa geessisan. Entiroopii kana waan caalaatti bu'uura ta'e irraa baasuu mannaa, ammas bal'ina horizonii entiroopii wajjin

walqabsiisuu beekamaa sana akka tilmaamaatti fudhata.

- Haala xixiqqoo **hin lakkaa’u**, ykn gurraacha boolla entiroopii *maal irraa ijaarame* hin ibsu. Book-keeping black-hole teermoodaynaamikii bal’isa; box banee microscopic degrees of freedom hin mul’isu.
- Black-hole odeeffannoo walfaallaa **hin furu**. Puzzle sun quantum tiyoorii keessa jira; barruu kun hin tuqu.
- **Ilaalcha yookaan safartuu miti**. Teleskooppiin, daataan yookaan gravitational-wave signal tokko illee hin hirmaatu — kun herrega. „Ho’i” black hole tokko yeroo jijjiiramaa deemutti horizonii socho’aadhaaf ramadamu hamma walqixxaattoota keessatti sirriitti ibsame dha malee, waan thermometer irraa dubbisuu dandeessan miti.
- Walitti makamni black holes lamaa guutuun isaa ibsa teermoodaynaamikii walitti fufiinsa qabu **hanga ammaatti hin arganne**. Simulations lakkoofsaa horizonii quasi-local evolushinii guutuu keessatti — black holes jalqabaa irraa merger keessa darbuun gara isa hafee — hordofu; garuu yeroo gabaabaa mergeritti baay’ee dhihoo ta’e keessatti horizoniin sun ulaagaalee kutaa horizonii socho’aadhaaf barbaachisan hin guutu. Barruun companion ibsi teermoodaynaamikii yeroo sanaa ammallee hojii adeemsifamaa jiru ta’uu dubbata.
- Bekenstein fi Hawking **hin overturn godhu**. Picture isaanii socho’aa haala jalqabaa equilibrium-only seera keessatti homaa hin jenneetti *extends* godha.

Ragaan hammam cimaa dha?

Wanta inni ta’eef ragaan cimaa dha: hojii mathematical physics of-eeggannoodhaan hojjetamee fi keessaa wal-simu, garee damee kana keessatti dursaa ta’e irraa dhufe, Physical Review Letters keessatti *Editors’ Suggestion* ta’ee maxxanfame. Barruun companion peer review darbe derivations bal’aa dhiheessa; akkasumas haalota Letter gabaabaa keessaa cuunfamanii hafan ilaala.

Caveats honest qulqullina irratti miti, *kind* irratti:

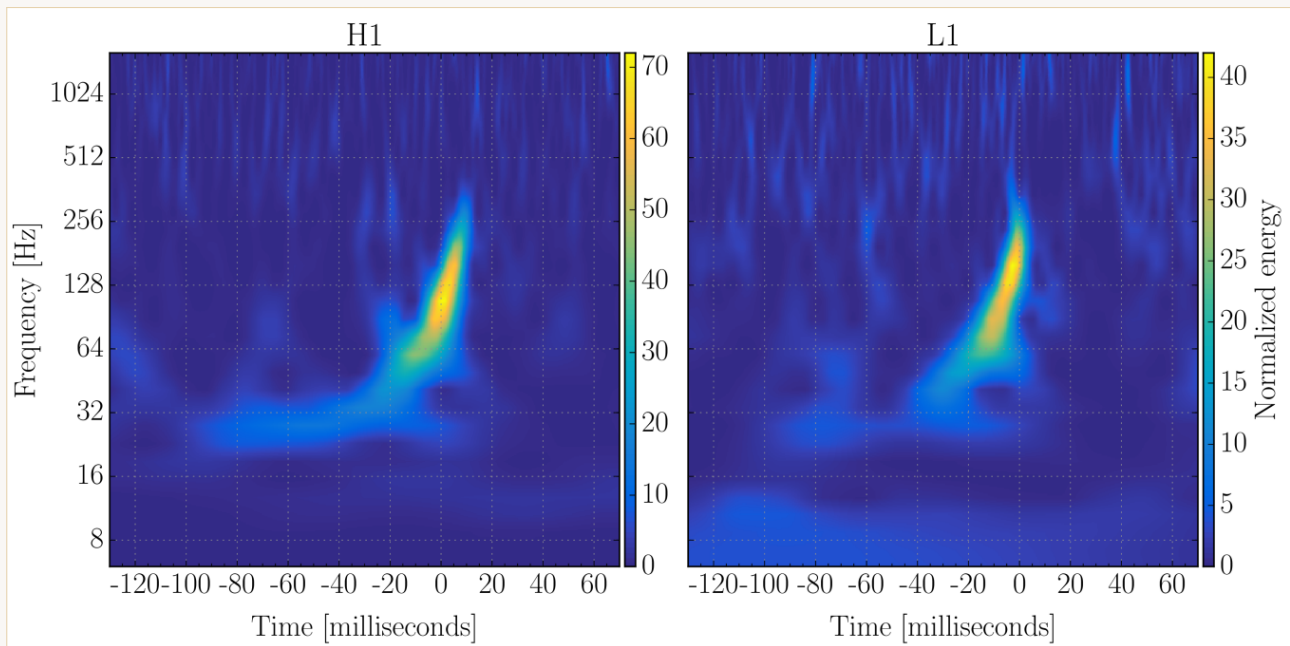
- Conventional yaada bu’uuraa horizonii bal’ina *entiroopii dha* jedhu irratti hunda’a (bal’ina divided by four yeroowwan Newton’s dhaabbataa fi Planck’s dhaabbataa). Guutuu quantum gravity tiyoorii’n identification sana yeroo tokko revise godhe, hiika isaas waliin sochoosa.
- Gabaabinaa fi salphinaaf, Letter gabaabaan derivation ijoo horizonoota socho’aa spacelike fi axisymmetric ta’an fayyadamuun dhiheessa. Barruun companion peer review darbe horizonoota socho’aa time-like ifatti xiinxala; rotational Killing field malee angular momentum illee ijaara. Haa ta’u malee, horizonoota time-like hurkaan badaniif, qorannoon backreaction ifatti dhihaate spherical symmetry qofaan daangeffama.
- “Entiroopii equals horizonii bal’ina, even out of madaallii tasgabbaa’aa” compelling *identification* seerota haaraan natural godhan dha; microscopic istaastikii irraa theorem ragaa godhame miti.

Kanaaf: bu’uura waggaa shantama dursanii jiru rigorous extension; yaalii discovery miti, seera nature haaraa qormaata eeggatu miti.

Maaliif barbaachisaa dha

Sababoota lama: tokko hojiirra oolu, tokko conceptual.

Gama hojii irra oolmaatiin, black holes amma dhugumaan qorannu — kan LIGO fi Virgo yeroo walitti makaman dhaga’an — yeroo isaanii murteessaa madaallii irraa fagaatanii dabarsu. Simulations horizonii quasi-local black holes jalqabaa irraa merger keessa darbuun gara isa hafee hordofu. Ham-mawwan barruu kana keessaa kutaalee horizonii sanaa kan ulaagaalee kutaa horizonii socho’aa gu-utan irratti hojjatu; kanaaf marsaalee evolushinii merger baay’ee keessatti fi collapse yeroo ta’u entiroopii fi ho’a black hole tokkoo haala bu’uura qabuun ibsuuf karaa kenna, erga wanti hundi tasgab-baa’ee booda qofa miti. Yeroo gabaabaa coalescence marsu keessatti horizoniin quasi-local hordofa-muunsaa itti fufa, garuu ibsa teermoodaynaamikii ammaa keessaa ala hafa.



GW150914, kallattiin detected gravitational-wave mallattoo jalqabaa, gurraacha boollota lama merge godhan irraa dhufe. Time-frequency kaartawwan kun mallattoo LIGO Hanford (bita) fi LIGO Livingston (mirga) keessatti agarsiisu: detectors lamaan keessatti, bright trace frequency mallattoo walitti makamu’tti dhiyaachaa yeroo ol ka’u upward sweep godha. Kun black-hole sirna far irraa madaallii tasgabbaa’aa dhugaa fakkeenya dha; bu’uura teermoodaynaamikii haaraaf haala qofa, observational ragaa miti.

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

Conceptual ahaan, teermoodaynaamikii amala gurraacha boollota quantum gravity irratti clues ifa ta’e muraasa qabnu keessaa tokko — bakka gravity, quantum tiyoorii fi teermoodaynaamikii ifatti wal qunnamu. Gurraacha boolla violently changing tokkoof “entiroopii” fi “ho’a” exactly maal jechuu akka ta’e sharpen gochuun galma fuuldura quantum tiyoorii kam iyyuu hit gochuu qabu cimsu. Gurraacha boolla entiroopii dhugumaan maal akka ta’e gaaffii gadi fagoo hin deebisu. Gaaffii sana caalaatti sirrii godha — fiiziksii corner kana keessatti, kun hojii keessaa harki guddaan.

Cuunfaa gabaabaa

Black holes seerota teermoodaynaamikii calaqqisiisan hordofu; garuu „seerri jalqabaa” qulqulluun bara 1973 black holes madaallii keessatti dhaabbatanii jiran qofa walbira qaba malee adeemsa dhugaa ibsuu hin dandeenye. Ashtekar, Paraizo fi Shu horizonoota quasi-local fayyadamuun, seerota teermoodaynaamikii kutaalee horizonii socho’aa isaanii irratti hojii irra oolchuun, akkasumas kaartaa haala tokko tokko kutaalee sana irra jiruuf ho’aa fi spin battalaa ramadu ijaaruun seera jalqabaa fi lammaffaa gara black holes madaallii irraa hangamiyyuu fagaataniitti — anniisaa fudhatan, collapse ta’an, ringing down keessa darban fi marsaalee merger baay’ee keessa jiranitti — bal’isu. Bu’aan isaa, marsaa kutaa horizonii socho’aatiin bakka buufame hundaaf bal’inni horizonii safartuu entiroopii sirrii ta’ee hafa. Simulations horizonii quasi-local hordofuu itti fufanis, yeroon gabaabaan coalescence-tti baay’ee dhihoo ta’e ibsa teermoodaynaamikii sana keessatti hanga ammaatti hin hammatamne. Bu’uuri framework kanaa general relativity keessa jira; hurkaan baduu irratti ammoo hojii irra oolmaa semiclassical qaba; quantum gravity, ilaalcha, lakkaa’insa microstates yookaan furmaata information paradox miti.

Sakatta’a ifaa

Wanti barruu agarsiisu: Seerota jalqabaa fi lammaffaa makaanikaa black hole gara black holes guutummaatti socho’aa fi madaallii tasgabbaa’aa irraa fagoo ta’anitti mathematically wal-simuun bal’isuu, kan horizonoota quasi-local fi kutaalee isaanii ulaagaalee kutaa horizonii socho’aa guutan irratti ijaarame. Seera jalqabaa daangeffamaa fi adeemsa irratti hundaa’e, akkasumas seera lammaffaa quantitative ta’e ibsa; entiroopii black hole socho’aa bal’ina horizonii isaa waliin walqabsiisuun kan uumamaa akka ta’u godha.

Wanti dhugaa garuu interpretive: “Entiroopii = horizonii bal’ina” out of madaallii tasgabbaa’aa identification. Seerota haaraan compelling godhu, garuu istaandaardii kilaasikaalaa area-entropy yaada bu’uuraa dhaala; derive hin godhu.

Wanti inni hin agarsiifne: Quantum tiyoorii gravity; microscopic origin ykn “count” black-hole entiroopii; odeeffannoo walfaallaa furmaata; observational ykn yaalii bu’aa; ho’a physically safaramuu danda’u.

Daangaawwan ijoo: Derivation bu’uuraa general relativity keessatti argama; hojii irra oolmaan hurkaan baduu time-like ammoo approximation semiclassical fayyadama; yeroon gabaabaan binary coalescence-tti baay’ee dhihoo ta’e kutaa horizonii socho’aatiin bakka hin buufamu, ibsi teermoodaynaamikii isaas ammallee hojii adeemsifamaa jira, simulations lakkoofsaa horizonii quasi-local hordofuu itti fufanis; qorannoon backreaction ifatti dhihaate kan horizonoota time-like hurkaan badanii spherical symmetry qofaan daangeffama; walqabsiisni bal’ina-entiroopii akka tilmaamaatti fudhatama malee statistical mechanics irraa hin mirkanoofne.

Dubbisaan waliigalaa hammam amantaa qabaachuu qaba? Kun jajjabaa, well-regarded tiyoorii advance black-hole teermoodaynaamikii socho’aa haala’tti dhugumaan extend godhu irratti amantaa guddaa. Akkasuma haaraa ilaalchawwan himannaa miti, quantum gravity miti, famous odeeffannoo

puzzle furmaata miti. Stance sirrii: understanding keessatti tarkaanfii dhugaa, chalk’n fudhatame — telescope’n miti.

Fooyya’iinsa maxxansa boodaa

- **Sirreeffama · 2026-08-27**

Yaada barreessaa quunnamtii Abhay Ashtekar irraa arganneen booda, himoota lama kan haalota time-like fi non-axisymmetric barruu companion peer review darbe keessatti ifatti ilaalamuu mannaa akka falmii qofaan deeggaramanitti ibsan sirreessine. Yeroo gamaaggamaattis, yeroon gabaabaan binary coalescence-tti baay’ee dhihoo ta’e, yeroo horizoniin quasi-local ulaagaalee kutaa horizonii socho’aadhaaf barbaachisan hin guunne, framework kanaan hanga ammaatti akka hin hammatanne ifa goone.

- **Sirreeffama · 2026-08-28**

Ibsa dabalataa barreessaa quunnamtii Abhay Ashtekar irraa kenname hordofuun, horizonoota quasi-local kan simulations lakkoofsaa black holes jalqabaa irraa merger keessa darbuun gara isa hafee hordofan, kutaalee ulaagaalee dabalataa kutaa horizonii socho’aa guutanii fi seerotni teermoodaynaamikii irratti hojjatan irraa adda baafne.

Maddoota

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>