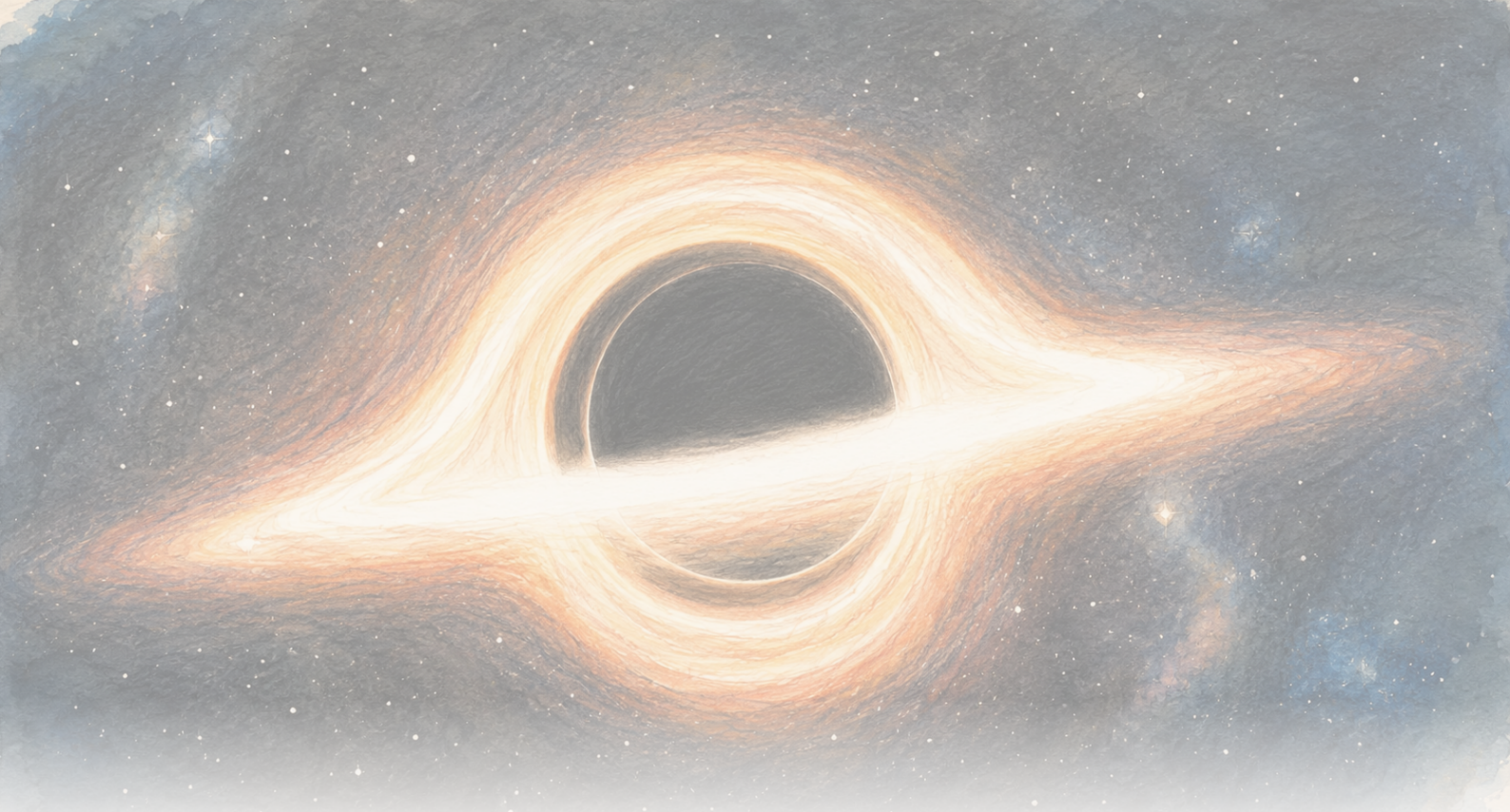




The CLEAN PAPER

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

Black hole ñ tẹlẹ ‘òfin’ thermodynamics — abajade tuntun fa wọn dé black hole tó ñ yí padà gidigidi níta equilibrium

Láti àwọn ọdún 1970 ni a ti mọ pé black hole ñ tẹlẹ àwọn òfin tó jọ thermodynamics, sùgbón èyà tó ẹ kedere jù lọ ẹsẹ fún àwọn black hole tó jókòó ní idákẹjẹ nínú equilibrium nìkan. Paper tuntun kan nínú Physical Review Letters fa first àti second law dé àwọn apá quasi-local horizon tí ó kún condition fún dynamical horizon segment, tí ó sì lè jìnnà sí equilibrium láìsí ààlà — nígbà accretion, collapse àti ọpọ̀ jù lọ àwọn ipele black-hole merger. Simulation ñ tọpinpin quasi-local horizon jálẹ merger, sùgbón àwọn òfin náà kò tii bo àkókò kúkúrú tó yí coalescence ká nígbà tí horizon náà kì í ẹ dynamical horizon segment. Core framework náà wà nínú general relativity, pẹ̀lú semiclassical application fún evaporation; kì í ẹ quantum gravity tuntun, observation tàbí ojútíú sí black-hole information puzzle.

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

Black hole ní “òfin” tó dà bí thermodynamics. Èyà tó mó dáadáa ṣiṣẹ́ nígbà tí kò sí ohun tó n ṣelẹ̀ nìkan.

Òkan lára òtítọ́ tó yà jù nínú physics ni pé black hole ní huwa bí ohun tó gbóná. Ní ìbèrẹ̀ àwọn ọdún 1970, Bekenstein àti Hawking rí i pé equation tó n ṣàkóso black hole bá òfin thermodynamics mu, ọrọ̀ fún ọrọ̀: black hole ní entropy tó proportional sí area horizon rẹ̀, àti temperature tó proportional sí ojú agbára walẹ̀ rẹ̀. Lẹ́yìn náà Hawking fi hàn pé temperature náà jẹ́ gidi ní itumọ̀ tó jinlẹ̀ jù — black hole ní tàn thermal radiation tó rẹwèsì gan-an ní tòótọ́.

Kí ni Hawking radiation?

Ní classical physics kò sí ohun tó lè sá kúrò nínú black hole, nítorí náà ó yẹ kí ó jẹ́ dúdú pátápátá, kí ó sì má ní temperature rárá. Ní 1974 Stephen Hawking fi hàn pé ohun yí yí padà nígbà tí a bá ka quantum àbá-ẹ̀kọ̀ sí lẹ́gbẹ́ horizon: black hole ní tú thermal glow tó rẹwèsì síta, nítorí náà mass rẹ̀ n dín díẹ̀díẹ̀, tàbí ó n “evaporate.” Spectrum náà jẹ́ thermal ní Hawking temperature, nígbà tí propagation kojá curved spacetime n yí radiation tí ó dé infinity padà. Nínú àwòrán imọ̀ràn kan tí a sàbà lò — kì í ṣe derivation Hawking gangan — quantum fluctuation lẹ́gbẹ́ horizon n dá pair sílẹ̀, partner kan n sá jáde gégé bí radiation, ẹ̀lẹ́kejì sì n ṣubú sínú black hole.

Èka pàtàkì ni pé temperature yí *inverse proportional* sí mass black hole: bí hole ẹ̀ kéré sí i, bẹ́ẹ̀ ni ó ẹ̀ gbóná sí i. Fún black hole kankan tí telisíkoòpù lè rí, temperature náà kéré ju àròsọ̀ lẹ̀ — ó tutù ju àyè sofo tó yí i ká lẹ̀ — nítorí náà ní ẹ̀se glow náà kò ẹ̀se pàtàkì, a kò sì tii díwọ̀n rẹ̀ tààrà. Ẹ̀se pàtàkì rẹ̀ jẹ́ conceptual: Hawking radiation ni ó yí *àfiwé* láàárín black-hole mechanics àti thermodynamics padà sí nkan gidi. Nítorí pé hole náà ní temperature gidi, “temperature” àti “entropy” nínú àwọn òfin wònyí jẹ́ thermodynamic quantity gidi, kì í ṣe ìbámu equation lasan. (Èyí jẹ́ abẹ̀lẹ̀ fún ìwé ìwádíí lẹ̀wọ̀lẹ̀wọ̀, kì í ṣe ọ̀kan nínú abajade rẹ̀.)

Ìbámu yẹn dúró lórí abajade tí a n pè ní **first law of black hole mechanics** (Bardeen, Carter àti Hawking, 1973). Ní ọ̀rọ̀, ó sọ̀ pé: tí o bá ta black hole díẹ̀ látí steady ipò kan sí steady ipò mii tó sunmọ̀, iyípadà mass rẹ̀ dọ́gba sí temperature rẹ̀ ilọ́po iyípadà entropy rẹ̀, pẹ̀lú term kan fún spin rẹ̀. Ó jẹ́ èyà black-hole tí “heat tí wọ̀lé dọ́gba sí temperature ilọ́po iyípadà entropy.”

Ṣùgbọ́n ètan kan wà nínú ọ̀rọ̀ *steady ipò tó sunmọ̀*. Òfin mímọ̀ 1973 fi black hole méjì tó jókòó ní ìdákẹ́jẹ́ nínú equilibrium wé ara wọn, tí iyàtọ̀ wọn sì jẹ́ infinitesimal nìkan. Kò ṣàpẹ́júwe **ìlànà** gangan rí — black hole tó n jẹ́ ìràwọ̀, black hole méjì tó n merge, hole tuntun tó n ring down lẹ́yìn ibi tó lágbára. Ẫwònyí ni àwọn ipo tí a fẹ́ lóye jù, wọn sì jẹ́ ọ̀dikejì “jòkó ní ìdákẹ́jẹ́.” Òfin tó mó náà dákẹ́ nígbà gangan tí black hole bá n ẹ̀se ohun tó nífẹ́ sí.

Kí ló dé tí ojútùú tó dà bí ẹ̀ni pé ó rọ̀rùn kò fi ṣiṣẹ́?

Ó lè dà bí ẹ̀ni pé ojútùú rọ̀rùn: kan wo horizon bí ó ẹ̀se n gbooro nígbà tí matter bá n ṣubú sínú rẹ̀. Ẫsòro ni *horizon wo?*

Horizon tí ọ̀pọ̀ ènìyàn máa n ronú — **ìṣẹ̀lẹ̀ horizon**, ààlà gidi tí kò sí ipadabọ̀ kojá — ní property kan tó subtle tí ó sì nira: gbogbo ọ̀jọ̀ iwájú àgbáyé ló n ṣàlàyé rẹ̀. Kí o lè mọ̀ ibi tí ìṣẹ̀lẹ̀ horizon wà ní *báyíl*, o ní látí mọ̀ gbogbo

ohun tí yòò ṣubú sínú hole náà láéláé. Èyí kì í ṣe technicality kékeré. Event horizon lè bèrè sí í gbooro nínú àyè tí ó ṣofo, flat pátápátá *ṣáájú* kí matter tí yòò wólé tó dé, nìkan nítórí pé matter yèn ti pinnu ní geometry gbogbo spacetime pé yòò dé lẹyin. Area rẹ lè pò sí i nìbí tí, ní agbègbè, kò sí ohun tó nì ṣẹlẹ rárá.

Báwo ni horizon ṣe lè gbooro ṣáájú kí matter tó dé?

Orúkọ scientific fún ìṣòro yìí ni **teleological nature of the ìṣẹlẹ horizon**, tí a tún nì pè ní **global definition** rẹ. Níbi yìí, “teleological” kò tùmọ sí pé horizon ní ète kan, pé ó mọ ojọ iwájú, tàbí pé ó nì rán influence padà sẹyin nínú àkókò. Ó tùmọ sí pé bóyá ìṣẹlẹ kan wà nínú horizon lè pinnu nìkan láti inú gbogbo ìtàn ojọ iwájú spacetime.

Formal definition náà sọ ohun kan náà ní kúkúrú. Foju inú wo **future null infinity** — tí a nì pè ní “I-plus” tí a sì kọ sí $\mathcal{I}^+$ — gégé bí ibi tí ìmọlẹ tó sá lẹ títí láéláé dé nínú ojọ iwájú tó ṣofo tí ó jìnnà láinípèkun. Event horizon ni ààlà láàárín ìṣẹlẹ tí light àmì tó lẹ síta lè dé ibẹ nígbà kan àti ìṣẹlẹ tí light àmì kankan kò lè dé ibẹ láéláé. Nínú notation standard ti gbogbogbò relativity, ó jẹ ààlà ti causal past future null infinity: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Nítórí pé ọrọ *láéláé* wà nínú definition náà, measurement tí a ṣe nìbí àti bá yìí nìkan kò lè tọka ibi ìṣẹlẹ horizon dájú.

Collapsing spherical shell kan mú iyàlẹnu náà hàn kedere. *Ṣáájú* kí shell náà tó dé, agbègbè inú rẹ lè ṣofo, geometry agbègbè rẹ sì flat. Rán light ray jáde láti centre ní àkókò tó nì pè sí i lèsèsè: ray àkókó sá jáde, ṣùgbón àwọn tó pè sí i padà shell tó nì collapse nínú geometry tí wọn kò lè sá kúrò nínú rẹ. Event horizon ni ààlà tó ya èsì méjèjì. Tí a bá tọ ọ padà sẹyin, ààlà yèn bèrè ní centre, ó sì nì gbooro kojá inú tó sì ṣofo, flat *ṣáájú* kí shell tó dé. Area tó nì gbooro rẹ kì í sọ agbègbè flow matter kankan nìbẹ; ó nì ṣe àkọsílẹ àwọn escape route wo ni ó sì sí nínú spacetime tó parí.

Kò sí ohun nínú àwòrán yìí tó nì ṣiṣe sẹyin nínú àkókò. Tí a bá yí shell náà kúrò, tí black hole kò sì dá sílẹ, spacetime tó parí yòò yàtò, agbègbè *ṣáájú* yèn kò sì nì jẹ apá ìṣẹlẹ horizon. Èkọ náà kì í ṣe pé ojọ iwájú nì yí ohun tó ti ṣẹlẹ padà; ó jẹ pé ìṣẹlẹ horizon jẹ **global causal ààlà**, kì í ṣe ojú tí observer tó wà nítòsì lè detect ní instant kan. Ìdídí gangan nìyẹn tí physicist fi lo quasi-local tàbí dynamical horizon nígbà tí wọn fẹ tọpinpin black hole bí ó ṣe nì yí padà.

Èyí mú ìṣẹlẹ horizon má wúlò gégé bí account tí nì lẹ ní gbogbo ìgbà fún “ipò” black hole. O kò tilẹ lè mọ ibi rẹ nínú computer simulation títí simulation náà yòò fi parí, ó sì dájú pé o kò lè lẹ ó láti tọpinpin temperature tàbí entropy ní gbogbo moment.

Ìgbésẹ tuntun: horizon tí a lè ṣàlàyé ní agbègbè

Ìwé iwádíí tuntun láti ọwọ Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo àti Jonathan Shu gbé àbájáde rẹ karí ìtumọ horizon mífàràn — èyí tí ó jẹ **quasi-local**, tí geometry inú àdúgbò rẹ fúnra rẹ nìkan nì ṣàlàyé, láitọka sí ojọ ọlẹ ailópín. Àwọn **quasi-local horizon** wònyí ni àwọn ojú tí àwọn numerical relativist tí nì lẹ tẹlẹ láti mọ ibi tí àwọn black hole ibèrè wà, láti tọpinpin merger, àti láti mọ ibi tí èyí tó ṣe kù wà jálẹ simulation kan. Àwọn òfin thermodynamics tí a ṣe nínú ìṣe yìí kan àwọn apá quasi-local horizon tí ó kún àwọn condition àfikún fún **dynamical horizon segment**. Lórí segment bèṣe kòòkan, area nì yí padà ní ìdáhùn taara sí local energy flux, kì í ṣe sí ìṣẹlẹ ní ojọ ọlẹ jìjìn: ó nì pò sí i nígbà positive influx; fún time-like horizon tó nì evaporate tí negative energy flux sì nì kojá rẹ, ó nì dín kù.

Lórí èyí, àwọn onkọwe tún yanju apá tó nira jù ti ìṣòro náà. Nínú thermodynamics deede, ètò tó jìnnà sí equilibrium

ṣòro gan-an: o kò lè fi temperature tàbí pressure kan ṣoṣo fún un ní ọ̀nà tó mọ́, nítorí pé àwọn quantity wònyí ní definition tó pé nígbà tí ohun gbogbo bá ti settle. Black hole ní ìṣòro kan náà — tíí àwọn onkọ̀we fi fi hàn pé a lè lo àbùdá pàtàkì ti general relativity. Black hole tó wà ní equilibrium (Kerr black hole) ni nǹbà méjì nikan ní pinnu rẹ̀: iwọn rẹ̀ àti spin rẹ̀. Nítorí náà wọn kọ́ map kan tí ó gba state kòòkan légbẹ́ dynamical horizon segment, tí ó sì ka ní cross-section kòòkan ti segment náà, nǹbà méjì ti equilibrium black hole tí state náà jọ ní moment yẹn. Nípasẹ̀ map yẹn, a lè fi **temperature àti spin tó ní yí pèlú àkókò** fún black hole tó ní yí padà gidigidi légbẹ́ segment náà.

Pèlú àwọn èròjà wònyí — energy tí a ṣàlàyé ní local tí ní Ẹ̀kọ́ horizon, àti instantaneous intensive quantities — wọn fa first law dé àwọn black hole tó lè jìnnà sí equilibrium láísí ààlà. Ohun tó ẹ̀ pàtàkì ni pé ọ̀fin tuntun náà ṣàpèjúwe **àwọn ìyípadà finite tí àwọn physical process gidi ní fa** (matter àti gravitational wave tó ní Ẹ̀kọ́ horizon), kì í ẹ̀ infinitesimal step láàárín state méjì tí kò yí padà. Wọn so second law tó bá a mu pọ́ mọ́ ọ̀n, tí statement rẹ̀ ti di *quantitative*: ìyípadà area horizon ní ìbáṣepọ̀ taara pèlú local energy flux — ó ní pọ́ sí i nígbà positive influx, ó sì ní dín kù fún time-like horizon tó ní evaporate nígbà negative flux. Ní àpapọ̀, first àti second law tọ́ka sí ìparí kan tó ẹ̀ kedere — fún phase èyíkéyí ti dynamical horizon segment dúró fún, bó ti le koko tó, area horizon rẹ̀ sì ni iwọn entropy tó tó.

Ohun tí èyí kò fi hàn

- Kò **yanju quantum gravity**. A gbé core framework kalẹ̀ nínú general relativity; lílò rẹ̀ fún black-hole evaporation ní lo semiclassical approximation, nínú èyí tí quantum matter field ní ní ipa lórí classical spacetime. Ó sì gba standard identification ti horizon area pèlú entropy gégé bí assumption, dípò kí ó derive entropy náà láti ohun tó fundamental jù bẹ́ẹ̀ lọ.
- Kò **ka microstate**, kò sì ṣàlàyé *kí ni* entropy black hole fi ẹ̀. Ó fa bookkeeping thermodynamics black hole gbooro; kò sí apoti láti fi microscopic degree of freedom hàn.
- Kò **yanju black-hole information paradox**. Ìṣòro yẹn wà nínú quantum àbá-ẹ̀kọ́; ìwé ìwádíí yí kò kan án.
- Kì í ẹ̀ **observation tàbí measurement**. Kò sí telescope, dátà tàbí gravitational-wave signal tó kópa — mathematics ni èyí. “Temperature” tí a fún dynamical horizon bí black hole ẹ̀ ní evolve jẹ́ quantity tí a ṣàlàyé pèlú precision nínú equation, kì í ẹ̀ ohun tí o lè kà lórí thermometer.
- Kò **tí** fún wa ní thermodynamic description tó ní bá a lọ láidáwọ́dúró fún gbogbo coalescence black hole méjì. Àwọn numerical simulation ní tọ́pinpin quasi-local horizon jálẹ̀ gbogbo evolution — láti àwọn black hole ìbèrẹ̀, gba merger Ẹ̀kọ́, tíí dé èyí tó ẹ̀ kù — ṣùgbọ́n fún àkókò kùkúru kan tó sún mọ́ merger gan-an, horizon náà kò kún àwọn condition tí dynamical horizon segment gbọ́dọ̀ ní. Companion paper náà sọ pé thermodynamic account fún àkókò yẹn sì jẹ́ iṣẹ́ tí ní lọ lẹ́wọ́.
- Kò **dojú òye Bekenstein àti Hawking bolẹ̀**. Ó fa picture wọn gbooro sí dynamical regime níbi tí ọ̀fin equilibrium-only àkókò kò ní ohun tó sọ.

Báwo ni èrí náà ẹ̀ lágbara tó?

Ó lágbara, fún irú ohun tí ó jẹ́: iṣẹ́ mathematical physics tó sọra, tó sì consistent nínú ara rẹ̀, láti ọ̀dọ̀ egbé aṣájú kan nínú field, tí a tẹ̀ jáde gégé bí *Editors’ Suggestion* nínú Physical Review Letters. Companion paper tí peer review

ti yè wò fún wa ní derivation tó gùn sí i, ó sì ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ wò àwọn case tí a mú kúrò nínú Letter náà láti jẹ kúkúrí.

Àwọn caveat tó yẹ jẹ nípa *irú* ẹ̀rì, kì í ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ quality rẹ̀:

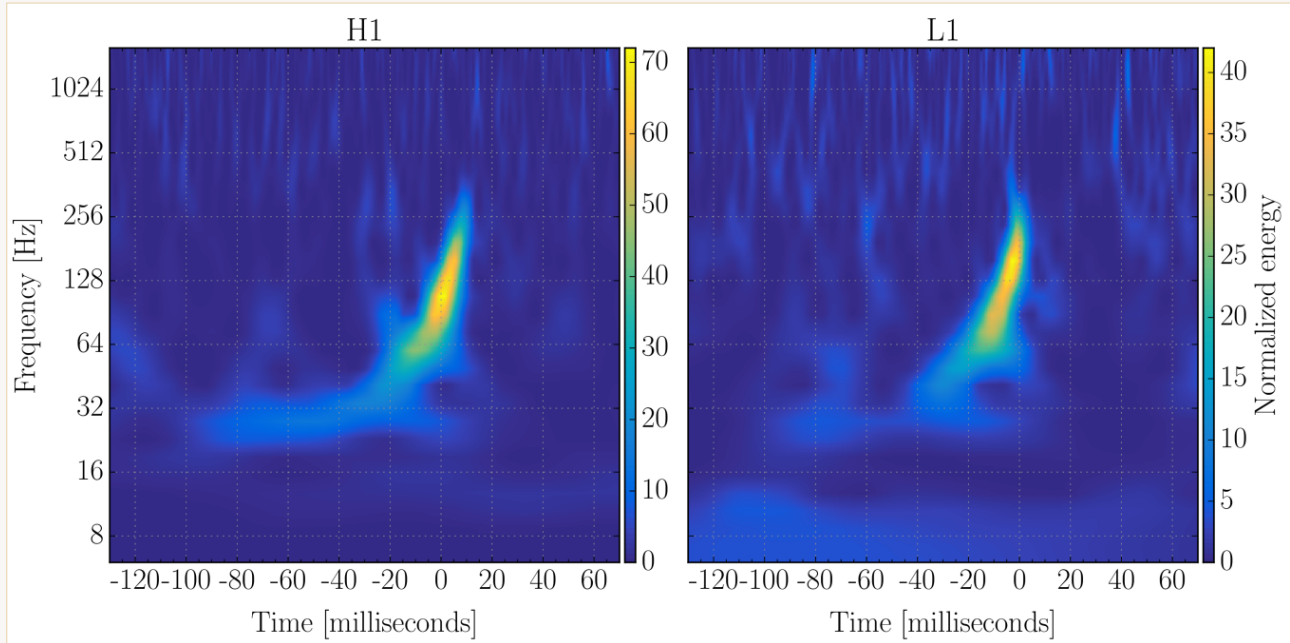
- Ó gbẹ̀kẹ̀ lé assumption standard pé horizon area *ni* entropy (area pín sí ilópo méréin Newton's constant àti Planck's constant). Tí quantum àbá-ẹ̀kọ̀ agbára walẹ̀ pípé kan bá tún identification yẹn ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ iwájú, interpretation náà yóò yí pẹ̀lú rẹ̀.
- Nítorí kí ó lè kúkúrí kí ó sì rọ̀rùn, Letter kúkúrí náà ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ main derivation nípa lílo spacelike dynamical horizon tó ní axial symmetry. Companion paper tí peer review ti yè wò ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ explicit analysis fún time-like dynamical horizon, ó sì construct angular momentum láìlò rotational Killing field. Síbẹ̀, fún time-like horizon tó ní evaporate, explicit backreaction treatment náà ní ààlà sí spherical symmetry.
- “Entropy dọ̀gba sí horizon area, kódà ní out of equilibrium” jẹ́ **identification** tó lagbára tí first àti second law tuntun mú kí ó natural — kì í ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ theorem tí a derive láti microscopic statistics.

Nítorí náà: extension rigorous ti àgbékalẹ̀ ọ̀dún àádọ́ta, kì í ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ experimental discovery, kì í sì ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ physical tuntun tó ní dúró de ìdánwò.

Ìdí tí ó fi ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ pàtàkì

Ìdí méjì: ọ̀kan practical, ọ̀kan conceptual.

Ní practical, àwọn black hole tí a ní kẹ̀kọ̀ọ̀ gangan bá yí — àwọn tí LIGO àti Virgo ní gbọ̀ bí wọn ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ní merge — ní lo àwọn àsìkò wọn tó ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ pàtàkì jù lọ ní ipò tó jìnnà sí equilibrium. Simulation ní tọ̀pinpin quasi-local horizon láti àwọn black hole ìbẹ̀rẹ̀, gba merger kọ́já, tí tí dé ẹ̀yí tó ẹ̀ ẹ̀ kù. Àwọn quantity inú paper yí kan àwọn apa horizon náà tí ó kún condition fún dynamical horizon segment, nítorí náà ẹ̀yí fún wa ní ọ̀nà tó ní ilàna láti sọ̀rọ̀ nípa entropy àti temperature black hole la ọ̀pọ̀ jù lọ àwọn ipele merger evolution àti nígbà collapse, kì í ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ lẹ́yìn tí ohun gbogbo bá ti balẹ̀ nikan. Ní àkókò kúkúrí tó yí coalescence ká, a sì ní tọ̀pinpin quasi-local horizon, ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ẹ̀ ó wà níta thermodynamic description tó wà lẹ́wọ̀lẹ́wọ̀.



GW150914, gravitational-wave àmì àkókò tí a detect tààrà, wá láti black hole méjì tó n merge. Àwọn time-frequency map wònyí fi àmì hàn nínú LIGO Hanford (òsì) àti LIGO Livingston (ọtún): nínú detector méjèèjì, trace tó mọ̀lẹ̀ n gòkè bí frequency àmì ẹ̀ n pọ̀ sí i sí merger. Èyí jẹ̀ àpẹẹrẹ̀ gidi tí black-hole ètò tó jìnnà sí equilibrium; ó jẹ̀ context fún thermodynamic àgbékalẹ̀ tuntun, kì í ẹ̀ ẹ̀ observational ẹ̀rì fún àgbékalẹ̀ nàà.

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

Ní conceptual, thermodynamic ìhùwàsí black hole jẹ̀ ọ̀kan lára clue concrete diẹ̀ tí a ní nípa quantum agbára walẹ̀ — ibi tí agbára walẹ̀, quantum àbá-ẹ̀kọ̀ àti thermodynamics ti pàdé ní kedere. Ẹ̀jẹ̀ precision sí ohun tí “entropy” àti “temperature” túmọ̀ sí fún black hole tó n yí padà gidigidi n mú target tó yẹ kí quantum àbá-ẹ̀kọ̀ ojọ̀ iwájú dé sí di kedere sí i. Kò dàhùn ibèèrè jìnlẹ̀ pé kí ni entropy black hole gangan. Ó kan sọ ibèèrè nàà ní precision tó pọ̀ sí i — àti ní apá physics yí, iye ni púpọ̀ jù lọ nínú isẹ̀ nàà.

Àkótán mímọ̀

Black hole n tẹ̀lé àwọn òfin tó jọ thermodynamics, sùgbón ‘first law’ tó ẹ̀ kedere ti 1973 fi àwọn black hole tó jókòó ní equilibrium wé ara wọn nìkan, kò sì lè sàpẹ̀júwe process gidi kan. Ashtekar, Paraizo àti Shu fa first àti second law méjèèjì dé àwọn black hole tó lè jìnnà sí equilibrium láìsí ààlà — bí wọn ẹ̀ n jẹ̀ matter, n collapse, n ring down, tí wọn sì n la ọ̀pọ̀ jù lọ àwọn ipele merger kọ́já — nípa lílo quasi-local horizon, lílo àwọn òfin thermodynamics lórí dynamical horizon segment wọn, àti kíkó map kan tí ó fún state kòòkan lẹ́gbẹ̀ẹ̀ àwọn segment wònyí ní instantaneous temperature àti spin. Ìtumọ̀ rẹ̀ ni pé horizon area sì jẹ̀ iwọn entropy tó tó fún gbogbo phase tí dynamical horizon segment dúró fún. Àkókò kúkúru tó sún mó coalescence gan-an kò tii wà lábẹ̀ thermodynamic description yẹn, bó tilẹ̀ jẹ̀ pé simulation n bá a lọ láti tọ́pinpin quasi-local horizon. Core framework nàà wà nínú general relativity, pẹ̀lú semiclassical application fún evaporation; kì í ẹ̀ quantum gravity, observation, kíkà microstate tàbí ojútùú sí information paradox.

àyèwò láìsí àsoḍùn

Ohun tí iwé iwádíí náà fi hàn: Extension mathematically consistent ti first àti second law black-hole mechanics sí black hole fully dynamical, far-from-equilibrium, tí a kọ lórí quasi-local horizon àti àwọn apá wọn tí ó kún condition fún dynamical horizon segment. Ó ṣàlàyé finite, process-based first law àti quantitative second law, ó sì mú kí identification entropy black hole dynamical pèlú horizon area jẹ natural.

Ohun tí ó jẹ gidi ṣùgbón interpretive: Identification “entropy = horizon area” ní out of equilibrium. Òfin tuntun mú kí ó compelling, ṣùgbón ó jogún standard classical area-entropy assumption dípò kí ó derive rẹ.

Ohun tí kò fi hàn: Quantum àbá-ẹkọ agbára walẹ; microscopic origin tàbí “count” entropy black hole; ojútúú information paradox; observational tàbí experimental èsì kankan; temperature tí o lè díwọ̀n physically.

Àwọn ààlà pàtàkì: Core derivation náà wà nínú general relativity, nígbà tí time-like evaporation application ní lo semiclassical approximation; àkókò kúkúró tó sún mọ binary coalescence gan-an kò ní representation gégé bí dynamical horizon segment, thermodynamic description rẹ sì jẹ iṣẹ tó ní lẹ́lẹ̀, bó tilẹ̀ jẹ pé àwọn numerical simulation ní bá a lẹ́lẹ̀ tọ́pinpin quasi-local horizon; explicit backreaction treatment fún time-like horizon tó ní evaporate ní ààlà sí spherical symmetry; area–entropy identification jẹ assumption, a kò prove rẹ láti statistical mechanics.

Ìgbọyà mélòò ni olùkà gbogbogbòò yẹ kí ó ní? Ìgbọyà gígá pé èyí jẹ theoretical advance tó lágbara, tí field gba dáadáa, tí ó fa thermodynamics black hole gangan wọ dynamical regime. Ìgbọyà gígá bakan náà pé *kì í ṣe* claim nípa observation tuntun, kì í ṣe quantum agbára walẹ, kò sì yanju information puzzle olókíkí. Ihà tó tọ: ìgbésẹ̀ gidi nínú òye, tí chalk ṣe, kì í ṣe telisíkoòpù.

Àwọn àtúnṣe lẹyìn itẹ́jádé

- **Àtúnṣe · 2026-08-27**

Lẹyìn feedback láti ọdọ corresponding author Abhay Ashtekar, a ṣe àtúnṣe statement méjì tí ó ti sọ pé companion paper tí peer review ti yẹ wò jiyàn fún time-like àti non-axisymmetric case nikan, dípò pé ó ṣe explicit treatment wọn. Nígbà review náà, a tún ṣàlàyé pé framework náà kò tì bo àkókò kúkúró tó sún mọ binary coalescence gan-an, nígbà tí quasi-local horizon kò kún àwọn condition fún dynamical horizon segment.

- **Àtúnṣe · 2026-08-28**

Lẹyìn àlàyé mii láti ọwọ corresponding author Abhay Ashtekar, a ya quasi-local horizon tí numerical simulation ní tọ́pinpin láti àwọn black hole ibẹ̀rẹ̀, gba merger kọjá, títi dé èyí tó ṣe kù, sọ̀tọ̀ kúrò nínú àwọn apá wọn tí ó kún àwọn condition àfikún fún dynamical horizon segment, níbi tí àwọn òfin thermodynamics ti kan.

Àwọn orísun

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>