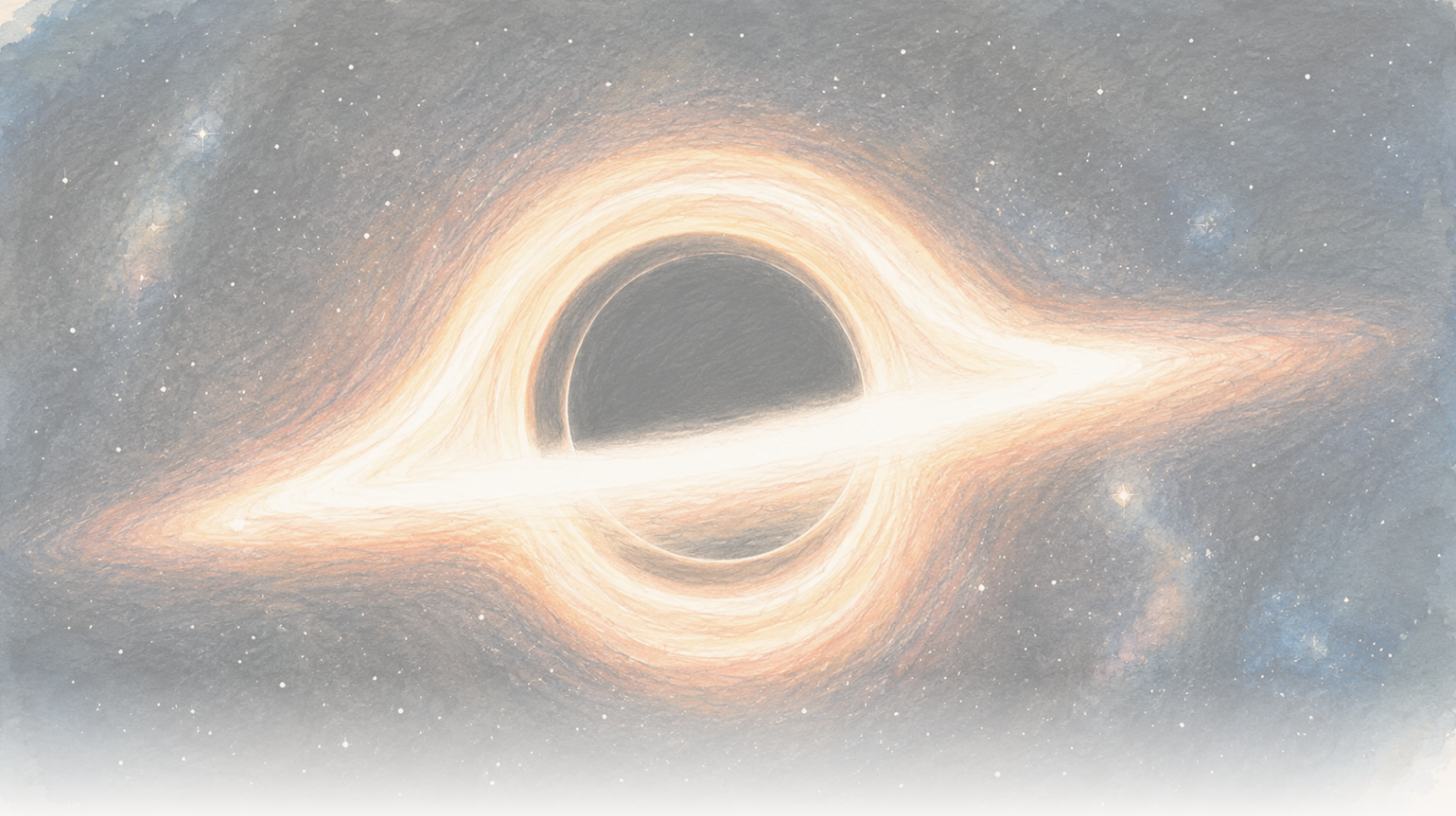




The CLEAN PAPER

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

Black hole ní tẹlẹ 'òfin' thermodynamics — abajade tuntun fa wọn dé black hole tó ní yí padà gidigidi níta equilibrium

Láti àwọn ọdún 1970 ní a ti mọ pé black hole ní tẹlẹ òfin tó dà bí thermodynamics, sùgbón èyà tó mọ jù sìşẹ fún black hole tó jókòó ní ìdákẹjẹ nínú equilibrium nìkan. Paper tuntun nínú Physical Review Letters fa first àti second law dé black hole tó ní yí padà kíákíá — tó ní jẹ matter, tó ní merge, tó ní radiate — nípa lílo 'dynamical horizon' tí a şàlàyé ní local. Ó jẹ kí physicist lè fún black hole tó ní evolve pèlú ìwa-ipa ní temperature àti entropy. Èyí jẹ abajade mathematics nínú classical general relativity, kì í şe quantum gravity tuntun, kì í şe observation, kò sì yanju 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 sáà lẹ̀ — kí 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 ṣe kéré sí i, bẹ́ẹ̀ ni ó ṣe 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 iṣe glow náà kò ṣe pàtàkì, a kò sì tii díwọ̀n rẹ̀ tààrà. Iṣe 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, kí í ṣe ìbámu equation lasan. (Èyí jẹ́ abẹ̀lẹ̀ fún ìwé ìwádìí lẹ́wọ̀lẹ́wọ̀, kí 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 sọ pé: tí o bá ta black hole díẹ̀ látí steady ipò kan sí steady ipò mún 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 wọ́lẹ̀ 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 iyàtò 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. Ìwònyí ni àwọn ipo tí a fẹ́ lóye jù, wọn sì jẹ́ òdikejì “jòkó ní ìdákẹ́jẹ́.” Òfin tó mó náà dákẹ́ nígbà gangan tí black hole bá n ṣe 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 ṣe n gbooro nígbà tí matter bá n ṣubú sínú rẹ̀. Ìṣòro ni *horizon wo?*

Horizon tí ọ̀pọ̀ ènìyàn maa 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 nàà láálá. 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 níbi tí, ní agbègbè, kò sí ohun tó nì ṣelẹ rára.

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

Orúkọ scientific fún ìṣòro yìí ni **teleological nature of the ìṣelẹ 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 ìṣelẹ kan wà nínú horizon lè pinnu nìkan láti inú gbogbo itàn ojọ iwájú spacetime.

Formal definition nàà sọ ohun kan nàà 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 lọ títí láálá dé nínú ojọ iwájú tó ṣofo tí ó jìnnà láinípèkun. Event horizon ni ààlà láàárín ìṣelẹ tí light àmì tó lọ síta lè dé ibẹ nígbà kan àti ìṣelẹ tí light àmì kankan kò lè dé ibẹ láálá. Nínú notation standard ti gbogbogbò relativity, ó jẹ ààlà ti causal past future null infinity: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Nítórí pé ọrọ *láálá* wà nínú definition nàà, measurement tí a ṣe níbi àti báyí nìkan kò lè tọka ibi ìṣelẹ horizon dájú.

Collapsing spherical shell kan mú iyàlenu nàà hàn kedere. *Ṣáájú* kí shell nàà 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 padé 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 níbẹ; ó nì ṣe àkọsílẹ àwọn escape route wo ni ó sì ní nínú spacetime tó parí.

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

Èyí mú ìṣelẹ horizon má wúlò gégé bí account tí nì lọ ní gbogbo ìgbà fún “ipò” black hole. O kò tilẹ lè mọ ibi rẹ nínú computer simulation títí simulation nàà yòò fi parí, ó sì dájú pé o kò lè lò 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, kọ abajade rẹ lórí ìtumọ horizon mǐràn — **quasi-local** horizon, tí geometry nínú agbègbè tirẹ nìkan fi nì ṣàlàyé rẹ, láitọka sí ojọ iwájú ailopin. “Dynamical horizon segment” wònyí ni ojú tí numerical relativist ti nì lò tẹlẹ láti rí black hole nínú merger simulation, nítórí pé wọn jẹ agbègbè, wọn sì sọ ohun tí nì ṣelẹ gangan: area wọn nì pò nìkan níbi tí agbára bá nì kojá wọn.

Lórí èyí, àwọn onkọwe tún yanju apá tó nira jù ti ìṣòro nàà. 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 mọ, nítórí pé àwọn quantity wònyí ní definition tó pé nígbà tí ohun gbogbo bá ti settle. Black hole ní ìṣòro kan nàà — títí àwọn onkọwe fi fi hàn pé a lè lo àbùdá pàtàkì ti gbogbogbò relativity. Black hole tó wà ní equilibrium (Kerr black hole) ni nọ́nibá méjì nìkan nì

pinnu rẹ: iwọn rẹ àti spin rẹ. Nítorí nàà wọn kọ map kan tí ó gba horizon kankan tó ní yí padà gidigidi, tó jìnnà sí equilibrium, tí ó sì ka, ní instant kòòkan, nǹbà méjì ti equilibrium black hole tí ó jọ ní moment yẹn. Nípasẹ map yẹn, a lè fi **temperature àti spin tó ní yí pèlú àkókò** fún black hole tó ní yí padà pèlú ìwa-ipa.

Pèlú àwọn nkan yìí — agbára tí a sàlàyé ní agbègbè tí ní kọjá horizon, àti instantaneous intensive quantities — wọn fa first law nàà dé black hole tó jìnnà sí equilibrium bó ti wù kí ó rí. Ohun tó ẹ pàtàkì ní pé òfin tuntun sàpèjúwe **ìyípadà finite tí ilànà physical gidi ní fa** (matter àti gravitational wave tó ní kọjá horizon), kì í ẹ infinitesimal step láàárín frozen ipò méjì. Wọn fi second law tó bá a mu légbèyè rẹ, tí statement rẹ di *quantitative*: area horizon ní pọ ní iye tó so taara mó agbára tí ó wólé. Tí a bá kó first àti second law jọ, wọn tókà sí ìparí tó mó kan — kódà fún black hole tó wà láàárín ìṣẹlẹ tó lágbára jù tí a lè foju inú wo, iwọn entropy tó tọ ẹ jẹ area horizon rẹ.

Ohun tí èyí kò fi hàn

- Kò **yanju quantum agbára walẹ**. Èyí jẹ abajade nínú *classical* gbogbogbò relativity, tí ó lo identification standard ti horizon area pèlú entropy. Kò derive entropy yẹn láti nkan tó jinlẹ sí i.
- Kò **ka microstate**, kò sì sàlàyé *kí ni* entropy black hole fi ẹ. Ó fa bookkeeping thermodynamics black hole gbooro; kò ẹ apoti láti fi microscopic degree of freedom hàn.
- Kò **yanju black-hole information paradox**. Ìṣòro yẹn wà nínú quantum àbá-ẹkọ; ìwé iwádíí yìí kò kan án.
- Kì í ẹ **observation tàbí measurement**. Kò sí telisíkoòpù, kò sí dátà, kò sí gravitational-wave àmì — mathematics ni èyí. “Temperature” black hole tó ní merge níbí jẹ quantity tí equation sàlàyé pèlú precision, kì í ẹ ohun tí o lè ka lórí thermometer.
- Kò **dojú òye Bekenstein àti Hawking bolẹ**. Ó fa picture wọn gbooro sí dynamical regime níbi tí òfin equilibrium-only àkókò kò ní ohun tó sọ.

Báwo ni èrí nàà ẹe lágbára tó?

Ó lágbára, fún irú ohun tí ó jẹ: ịṣe mathematical physics tó sọra, tó consistent nínú ara rẹ, láti egbé olókíkí nínú field, tí a tẹ jáde gégé bí *Editors’ Suggestion* nínú Physical Review Letters (companion ìwé iwádíí kan ní ẹṣẹ lórí derivation gígùn).

Àwọn caveat tó yẹ jẹ nípa *irú* èrí, kì í ẹ quality rẹ:

- Ó gbèkẹ lé assumption standard pé horizon area *ni* entropy (area pín sí ìlọpo méréin Newton’s constant àti Planck’s constant). Tí quantum àbá-ẹkọ agbára walẹ pípé kan bá tún identification yẹn ẹe lójọ iwájú, interpretation nàà yòò yí pèlú rẹ.
- Calculation pàtàkì wà fún ọràn tó wópò jù (spacelike dynamical horizon, axially symmetric); àwọn onkọwe jiyàn pé restriction wònyí kì í ẹ essential, sùgbón statement gbogbogbò pípé gbèkẹ lé èsì níbi mǹràn.
- “Entropy dọgba sí horizon area, kódà ní out of equilibrium” jẹ **identification** tó lágbára tí first àti second law tuntun mú kí ó natural — kì í ẹ theorem tí a derive láti microscopic statistics.

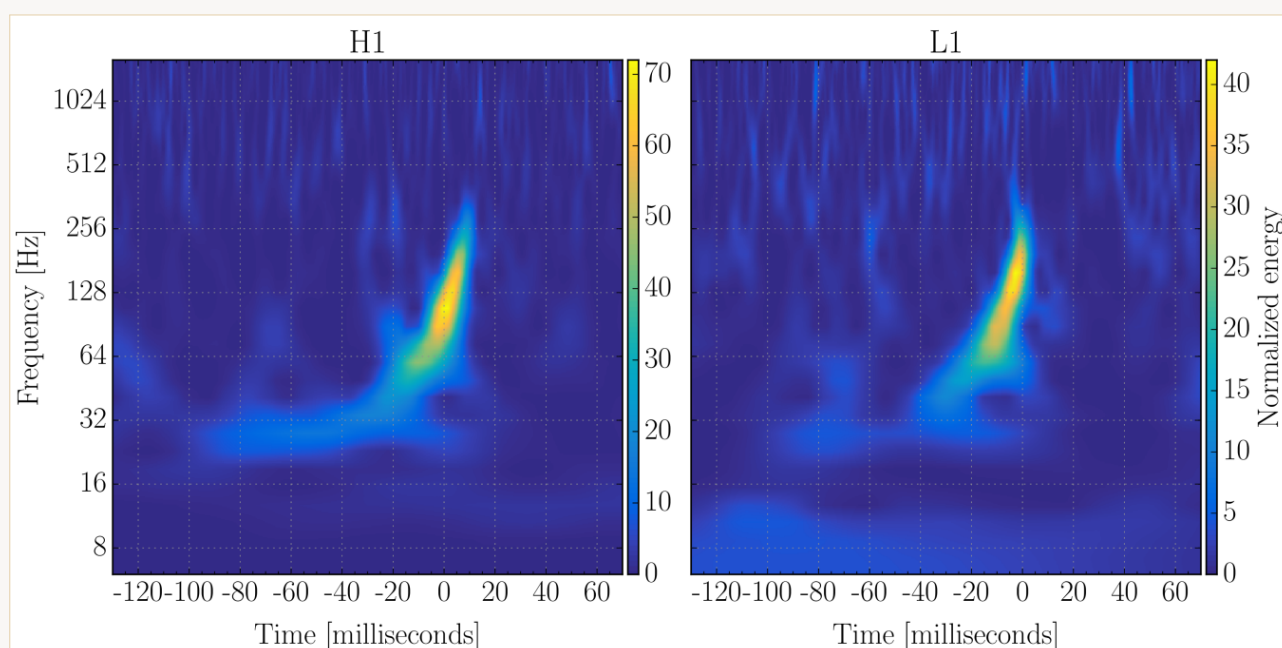
Nítorí nàà: extension rigorous ti àgbékalẹ ọdún àádọta, kì í ẹ experimental discovery, kì í sì ẹ òfin physical tuntun

tó n dúró de ìdánwò.

Ìdí tí ó fi ẹ̀ pàtàkì

Ìdí méjì: ọ̀kan practical, ọ̀kan conceptual.

Ní practical, black hole tí a n kẹkọọ gangan báyii — àwọn tí LIGO àti Virgo n gbọ tí wọn n merge — lo moment to se pàtàkì jù ní ipo to jìnnà sí equilibrium. Quantity nínú iwé iwádìí yìí ni a kọ láti horizon agbègbè kan nàà tí simulation ti n tọpinpin tẹlẹ, nítorí nàà ó fún wa ní ònà principled láti sọrọ nípa entropy àti temperature black hole *nígbà merger* tàbí collapse, kì í se sáájú àti léyìn nikan.



GW150914, gravitational-wave àmì àkókò tí a detect tààrà, wá láti black hole méjì tó ní merge. Àwọn time-frequency map wònyí fí àmì hàn nínú LIGO Hanford (òsì) àti LIGO Livingston (òtún): nínú detector méjèjèì, trace tó mọ̀lẹ̀ ní gòkè bí frequency àmì ẹ̀ẹ̀ ní pọ̀ sí í sí merger. Èyí jẹ́ àpẹẹrẹ̀ gidi ti black-hole ètò tó jìnnà sí equilibrium; ó jẹ́ context fún thermodynamic àgbékalẹ̀ tuntun, kì í ẹ̀ẹ̀ observational èrì fún àgbékalẹ̀ náà.

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

Ní conceptual, thermodynamic ìhùwàsí black hole jẹ ọkan lára clue concrete diẹ tí a ní nípa quantum agbára walẹ — ibi tí agbára walẹ, quantum àbá-ẹkọ àti thermodynamics ti pàdé ní kedere. Sísẹ precision sí ohun tí “entropy” àti “temperature” tùmọ sí fún black hole tó n yí padà digidigi ní mú target tó yẹ kí quantum àbá-ẹkọ ojò iwájú dé sí di kedere sí i. Kò dáhùn ìbéèrè jinlẹ pé kí ni entropy black hole gangan. Ó kan sọ ìbéèrè nàà ní precision tó pọ sí i — àti ní apá physics yí, ìyẹn ni púpọ̀ jù lọ nínú isé nàà.

Àkótán mímó

Black hole ní tẹlẹ̀ òfin tó dà bí thermodynamics, sùgbón “first law” mímó ti 1973 fi black hole tó dúró ní equilibrium wé ara wọn nìkan, kò sì lè sàpèjúwe ilàna gidi. Ashtekar, Paraizo àti Shu fa first àti second law méjèèjì dé black hole tó jìnnà sí equilibrium bó ti wù kí ó rí — merger, feeding, ring-down — nípa lílo “dynamical horizon” tí a sàlàyé ní agbègbè àti map kan tí ó fún black hole tó ní yí padà ní instantaneous temperature àti spin. Abajade ni pé horizon area sì jẹ̀ iwọn entropy tó tọ́ kó dà nígbà ìṣẹ̀lẹ̀ tó lágbára. Èyí jẹ́ abajade rigorous nínú classical gbogbogbò relativity, kì í ṣe quantum agbára walẹ̀, kì í ṣe observation, kì í ṣe count microstate, kò sì yanju information paradox.

àyèwò láìsí àsoḍùn

Ohun tí iwé iwádíí nàà fi hàn: Extension mathematically consistent ti first àti second law black-hole mechanics sí black hole fully dynamical, far-from-equilibrium, tí a kọ́ lórí quasi-local dynamical horizon. Ó sàlàyé finite, process-based first law àti quantitative second law, ó sì mú kí identification entropy black hole dynamical pèlú horizon area jẹ́ natural.

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

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

Àwọn ààlà pàtàkì: Classical gbogbogbò relativity ní gbogbo ibi; àkólẹ̀ èsì tí a fi ẹ̀rí múlẹ̀ fún common spacelike, axisymmetric ọ̀ràn pèlú generality tí companion ìṣẹ̀ ní jiyàn; area-entropy identification jẹ́ assumption, kì í ṣe proof láti statistical mechanics.

Ìgboyà mélòò ni olùkà gbogbogbòò yẹ kí ó ní? Ìgboyà gíga pé èyí jẹ́ theoretical advance tó lágbára, tí field gba dàadáa, tí ó fa thermodynamics black hole gangan wọ́ dynamical regime. Ìgboyà gíga bakan nàà pé *kì í ṣe* claim nípa observation tuntun, kì í ṣe quantum agbára walẹ̀, kò sì yanju information puzzle olókíkí. Ìhà tó tọ́: ìgbésẹ̀ gidi nínú òye, tí chalk ṣe, kì í ṣe telisíkoòpù.

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>