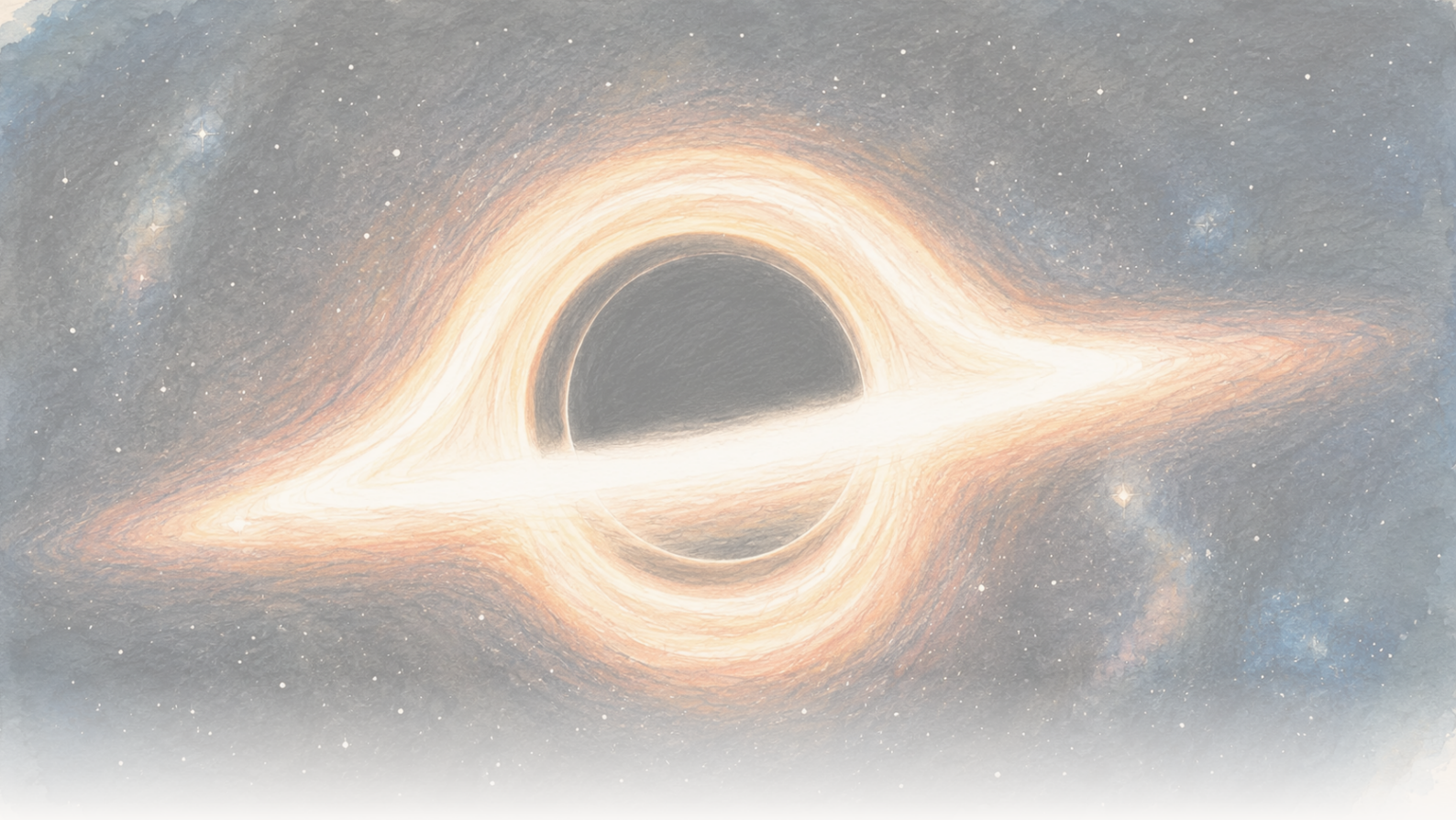


The CLEAN PAPER

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

ब्लैक होल thermodynamic 'laws' मानते हैं—नया result उन्हें हसिक रूप से बदलते black holes तक बढ़ाता है

1970 के दशक से black holes के ऐसे laws ज्ञात हैं जो thermodynamics से मिलते हैं, लेकिन clean version केवल equilibrium में शांत black holes पर लागू होता था। नया Physical Review Letters paper locally defined dynamical horizons के जरिए first और second laws को तेजी से बदलते—matter निगलते, merge होते, radiation छोड़ते—black holes तक extend करता है। यह classical general relativity का mathematical result है, quantum gravity, observation या information paradox का समाधान नहीं।

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

ब्लैक होल के “नियम” ऊष्मागतिकीजैसे दिखते हैं। उनकासाफ़-सुथरारूप तभीकाम करताथाजब कुछ बदल नहींरहाहो

भौतिकीके सबसे अजीब तथ्योंमें से एक यह है कि ब्लैक होल गर्म वस्तुओं कीतरह व्यवहार करते हैं। 1970 के दशक की शुरुआत में Bekenstein और Hawking ने देखाकि ब्लैक होल कोनियंत्रित करने वाले समीकरण, पद-दर-पद, ऊष्मागतिकी के नियमोंसे मेल खाते हैं: ब्लैक होल कीएंट्रॉपीउसके क्षितिज के क्षेत्रफल के अनुपात में होतीहै, और उसकातापमान सतही गुरुत्वाकर्षण के अनुपात में। Hawking ने बाद में दिखायाकि यह तापमान गहरे भौतिक अर्थ में वास्तविक है — ब्लैक होल सचमुच बहुत हल्काऊष्मीय विकिरण निकालताहै।

> **Hawking radiation क्याहै?**
>
> शास्त्रीय भौतिकीमें ब्लैक होल से कुछ भीबाहर नहींनिकलता; इसलिए उसे पूरीतरह कालाऔर शून्य-तापमान वाला होनाचाहिए। 1974 में Stephen Hawking ने दिखायाकि क्षितिज के पास क्वांटम सिद्धांत शामिल करने पर तस्वीर बदल जातीहै: ब्लैक होल हल्कीऊष्मीय चमक निकालताहै और इसलिए धीरे-धीरे द्रव्यमान खोताहै, यानी“वाष्पित” होताहै। स्पेक्ट्रम Hawking तापमान पर ऊष्मीय होताहै, हालांकि विकृति स्पेसटाइम से गुजरते समय विकिरण में बदलाव आते हैं। एक आम सहज चित्र में — जोHawking कीवास्तविक व्युत्पत्ति नहींहै — क्षितिज के बाहर क्वांटम उतार-चढ़ाव कणोंकीजोड़ियाँबनाते हैं, जिनमें एक बाहर निकलताहै और दूसराअंदर गिरताहै।
> मुख्य बात यह है कि तापमान ब्लैक-होल द्रव्यमान के **उलटे अनुपात** में है: छोटाब्लैक होल अधिक गर्म। किसीभी ऐसे ब्लैक होल के लिए जिसे दूरबीन देख सके, तापमान अवश्विसनीय रूप से कम होगा— उसके आसपास के खाली अंतरिक्ष से भीबहुत ठंडा— इसलिए यह चमक व्यवहार में नगण्य है और सीधे कभीमापीनहींगई। इसकामहत्व वैचारिक है: Hawking विकिरण ब्लैक-होल यांत्रिकीऔर ऊष्मागतिकीके बीच की*समानता*कोवास्तविक ऊष्मागतिकी से जोड़ताहै। क्योंकि ब्लैक होल सचमुच तापमान रखताहै, इन नियमोंमें “तापमान” और “एंट्रॉपी” केवल औपचारिक संयोग नहींरह जाते। (यह वर्तमान शोधपत्र कीपृष्ठभूमि है, उसकानतीजानहीं।)

इस मेल काआधार **ब्लैक-होल यांत्रिकीकापहलानियम** है (Bardeen, Carter और Hawking, 1973)। शब्दोंमें: यदि आप एक स्थिर ब्लैक होल कोबहुत थोड़ाबदलकर पास कीदूसरीस्थिर अवस्थामें ले जाएँ, तोद्रव्यमान में बदलाव उसके तापमान × एंट्रॉपीबदलाव, साथ हीघूर्णन से जुड़े पद, के बराबर होताहै। यह ब्लैक-होल रूप है “ऊर्जाकाबदलाव = तापमान × एंट्रॉपी बदलाव” जैसीऊष्मागतिक संरचनाका।

लेकिन “पास कीस्थिर अवस्था” में एक छिपीशर्त है। 1973 कासाफ़ नियम दोऐसे ब्लैक होलोंकीतुलनाकरताहै जोसंतुलन में शांत बैठे हैं और अत्यल्प मात्रासे अलग हैं। वह असली**प्रक्रिया**— तारानिगलताब्लैक होल, दोब्लैक होलोंकाविलय, याहिंसक जन्म के बाद रिंगडाउन — कावर्णन नहींकरता। जबकि हमें इन्हींस्थितियोंकोसमझनाहै। पुरानियम ठीक तब चुप होजाताहै जब ब्लैक होल सबसे दिलचस्प होताहै।

आसान लगने वालासमाधान क्योंकाम नहींकरता

पहलाखयाल होसकताहै: पदार्थ गिरते समय क्षितिज काक्षेत्रफल बढ़ते देखिए। समस्याहै — कौन-साक्षितिज?

जिस क्षितिज कीआम तौर पर कल्पनाकीजातीहै, **घटनाक्षितिज (घटनाhorizon)**, यानीवास्तविक लौटने-न-पाने कीसीमा, कीएक असहज विशेषताहै: उसकीपरिभाषापूरे ब्रह्मांड के भविष्य पर निर्भर करतीहै। अभीघटनाक्षितिज कहाँहै, यह ठीक-ठीक जानने के लिए आपकोयह जाननाहोगाकि भविष्य में हमेशाके लिए क्याक्याउसमें गिरेगा। यह केवल तकनीकीबारीकी

नहीं है। घटना-क्षितिज पदार्थ के पहुँचने **से पहले** एक खाली समतल क्षेत्र में बढ़ना शुरू कर सकता है, सिर्फ इसलिए कि वह पदार्थ भविष्य में जरूर गिरने वाला है। उसका क्षेत्रफल वहाँ बढ़ सकता है जहाँ स्थानीय तौर पर कुछ भी नहीं हो रहा।

> **पदार्थ आने से पहले क्षितिज कैसे बढ़ सकता है?**
>
> इस पहेली को **घटना-horizon की teleological nature**, या उसकी **वैश्विक परिभाषा** कहा जाता है। यहाँ "teleological" का मतलब यह नहीं कि क्षितिज का कोई उद्देश्य है, वह भविष्य जानता है, या कोई प्रभाव समय में पीछे भेजता है। मतलब सिर्फ इतना है कि किसी घटना के क्षितिज के अंदर या बाहर होने का फैसला स्पेसटाइम के पूरे भविष्य को देखकर ही किया जा सकता है।
>
> औपचारिक परिभाषा यही बात संक्षेप में कहती है। **भविष्य का null infinity** — "I-plus", लिखा $\mathscr{I}^+$ — को उस गंतव्य की तरह सोचिए जहाँ वह प्रकाश पहुँचता है जो हमेशा के लिए बाहर निकल जाता है। घटना-क्षितिज उन घटनाओं की सीमा है जिनसे बाहर की ओर भेजा गया प्रकाश-संकेत अंततः इस गंतव्य तक पहुँच सकता है और जिनसे कभी नहीं पहुँच सकता। सामान्य सापेक्षता के मानक संकेतन में यह future null infinity के causal past की सीमा है: $\partial J^-(\mathscr{I}^+)$। परिभाषा में ही पूरे *भविष्य* की जानकारी शामिल होने के कारण केवल यहाँ और अभी किए गए माप से घटना-क्षितिज को ठीक-ठीक चिन्हित नहीं किया जा सकता।
>
> ढहता हुआ गोलाकार खोल यह अजीब पन साफ़ दिखाता है। खोल के आने से पहले अंदर का क्षेत्र खाली और स्थानीय रूप से समतल हो सकता है। केंद्र से अलग-अलग देर के समय पर बाहर की ओर प्रकाश-किरणें भेजिए: पहले वाली निकल जाती हैं; बढ़ वाली ढहते खोल से ऐसी ज्यामिति में मिलती हैं जहाँ से बाहर नहीं निकल सकतीं। घटना-क्षितिज इन दो परिणामों की सीमा है। इसे समय में पीछे ले जाकर देखें तो यह सीमा केंद्र से शुरू होकर खोल पहुँचने से पहले खाली समतल भीतरी क्षेत्र में फैलती दिखती है। उसका बढ़ता क्षेत्रफल वहाँ स्थानीय पदार्थ-प्रवाह नहीं दिखा रहा, वह पूरे स्पेसटाइम में उपलब्ध बाहर निकलने के रास्तों का रिकॉर्ड है।
>
> इसमें कुछ भी समय में पीछे प्रभाव नहीं डालता। यदि खोल मुड़ जाता और ब्लैक होल बनता ही नहीं, तो पूरा स्पेसटाइम अलग होता और पहले वाला क्षेत्र घटना-क्षितिज का हिस्सा नहीं होता। सबक यह है कि घटना-क्षितिज एक **वैश्विक कारणात्मक सीमा** है, ऐसी सतह नहीं जिसे पास का पर्यवेक्षक किसी एक क्षण में खोज सके। इसी वजह से बदलते ब्लैक होल का पीछा करने के लिए भौतिकविद quasi-स्थानीय या dynamical horizons इस्तेमाल करते हैं।

इस वजह से घटना-क्षितिज ब्लैक होल की चलते-चलते बदलती "अवस्था" बताने के लिए खराब साधन है। कंप्यूटर सिमुलेशन में भी उसे ठीक-ठीक चिन्हित करने के लिए सिमुलेशन खत्म होने तक इंतजार करना पड़ता है; क्षण-दर-क्षण तापमान या एंट्रॉपी पर नज़र रखना तो और कठिन है।

समाधान: ऐसा क्षितिज जिसे स्थानीय ज्यामिति से परिभाषित किया जा सके

Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo और Jonathan Shu का नया शोधपत्र दूसरे प्रकार के क्षितिज पर नतीजा बनता है — **quasi-स्थानीय** क्षितिज, जिसे केवल अपने आसपास की ज्यामिति से परिभाषित किया जाता है, अनंत भविष्य से नहीं। ये "dynamical horizon segments" वही सतहें हैं जिन्हें संख्यात्मक सापेक्षता के शोधकर्ता विलय के सिमुलेशन में ब्लैक होल खोजने के लिए पहले से इस्तेमाल करते हैं, क्योंकि उनका क्षेत्रफल वहीं बढ़ता है जहाँ ऊर्जा सचमुच उन्हें पार करती है।

फिर लेखक कठिन दूसरा हिस्सा हल करते हैं। सामान्य ऊष्मागतिकी में संतुलन से बहुत दूर किसी तंत्र को साफ़ तापमान या दाब देना मुश्किल है; ये राशियाँ चीज़ें स्थिर होने के बाद ठीक से परिभाषित होती हैं। ब्लैक होल में भी यही समस्या है — लेकिन सामान्य सापेक्षता की एक खास विशेषता मदद करती है। संतुलन में **Kerr ब्लैक होल** (Kerr ब्लैक होल) को केवल दो संख्याओं — आकार और घूर्णन — से तय किया जा सकता है। लेखक एक मानचित्र बनाते हैं जो किसी भी तेजी से बदलते, संतुलन से

बहुत दूर क्षितिज को हर क्षण उस संतुलित ब्लैक होल के आकार और घूर्णन से जोड़ता है जिससे वह उस समय मेल खाता है। इस मानचित्र से हर क्षण रूप से बदलते ब्लैक होल को भी **समय-निर्भर तापमान और घूर्णन** दिया जा सकता है।

इन दो चीज़ों— क्षितिज पार करती स्थानीय रूप से परिभाषित ऊर्जा और क्षण की सघन राशियों— से वे पहले नियम को मनमाने रूप से संतुलन से दूर ब्लैक होलों तक बढ़ाते हैं। नया नियम **वास्तविक भौतिक प्रक्रियाओं** से पैदा सीमित बदलावों (पदार्थ और गुरुत्वीय तरंगों का क्षितिज पार करना) का वर्णन करता है, जभी हुई अवस्थाओं के बीच अत्यल्प कदमों का नहीं। साथ ही मेल खाता दूसरा नियम मिलता है, अब मात्रात्मक रूप में: क्षितिज का क्षेत्रफल उतना बढ़ता है जितना आने वाले ऊर्जा-प्रवाह से जुड़ा है। दोनों नियम मिलकर साफ़ निष्कर्ष देते हैं — हर क्षितिज के बीच भी एंट्रॉपी का सही माप क्षितिज का क्षेत्रफल ही रहता है।

यह क्या साबित नहीं करता

- यह **क्वांटम गुरुत्वाकर्षण हल नहीं करता**। यह *शास्त्रीय* समान्य सापेक्षता का नतीजा है और क्षितिज क्षेत्रफल को एंट्रॉपी मानने की मानक पहचान इस्तेमाल करता है; उस एंट्रॉपी को किसी गहरे सूक्ष्म सिद्धांत से व्युत्पन्न नहीं करता।
- यह सूक्ष्म अवस्थाएँ (microstates) नहीं गिनता और यह नहीं बताता कि ब्लैक-होल एंट्रॉपी “किससे बनी” है।
- यह ब्लैक-होल सूचना-विरोधाभास (information paradox) हल नहीं करता। वह क्वांटम सिद्धांत की पहेली है।
- यह कोई प्रेक्षण या माप नहीं है। किसी दूरबीन, डेटा या गुरुत्वीय-तरंग संकेत ने इस नतीजे का सत्यापन नहीं किया— यह गणित है। वलिय के दौरान “तापमान” समीकरण में सटीक रूप से परिभाषित राशि है, थर्मामीटर की रीडिंग नहीं।
- यह Bekenstein-Hawking तस्वीर को उलटता नहीं; उसे उस गतिशील क्षेत्र तक **बढ़ाता** है जहाँ केवल-संतुलन वाला नियम कुछ नहीं कहता था।

सत्यापन कितना मजबूत है?

यह जिस प्रकार का नतीजा है, उसके लिए सत्यापन मजबूत है: क्षेत्र के अग्रणी शोधकर्ताओं का सावधानी से बनाया गया गणितीय-भौतिकी परिणाम, *भौतिक समीक्षा Letters* में Editors’ Suggestion के रूप में प्रकाशित; साथ का शोधपत्र लंबी व्युत्पत्तियाँ देता है।

असल सीमाएँ गुणवत्ता की नहीं, **प्रकार** की हैं:

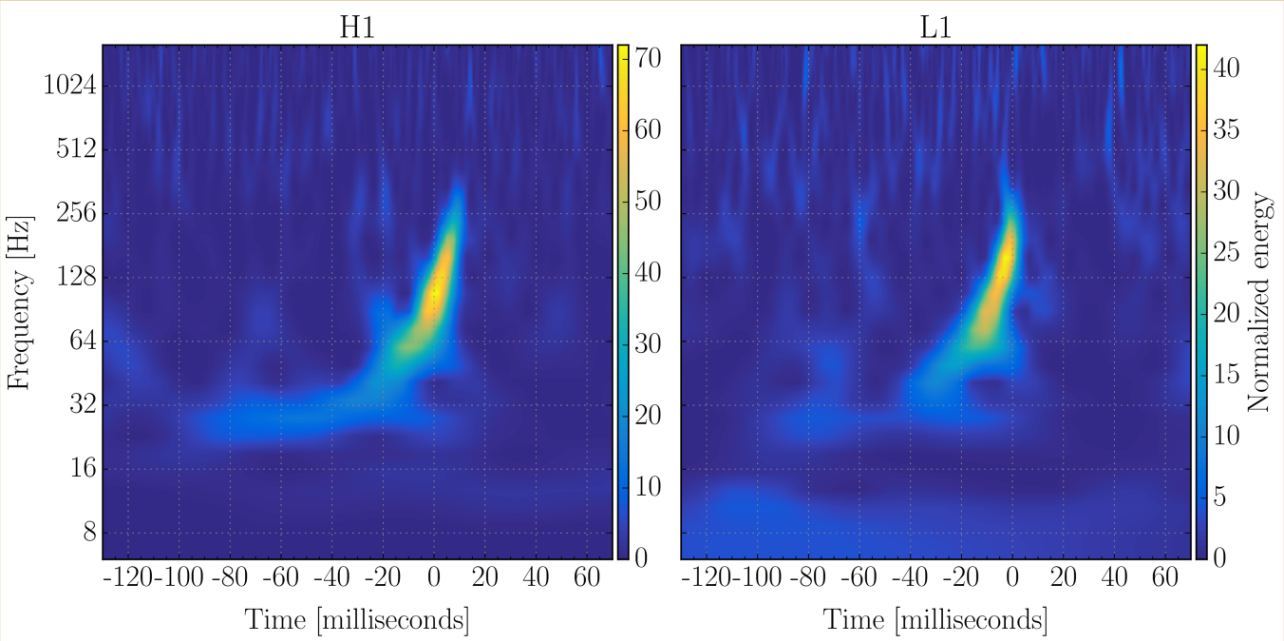
- यह मानक धारणा पर टिका है कि क्षितिज क्षेत्रफल ही एंट्रॉपी है (क्षेत्रफल को Newton और Planck स्थिरांकों के मानक संयोजन के चार गुने से भाग देने वाली अभिव्यक्ति)। पूरा क्वांटम गुरुत्वाकर्षण यदि इस पहचान को बदले, तो व्याख्या भी बदलेगी।
- मुख्य गणनाएँ सबसे आम मामले — spacelike dynamical horizons और अक्षीय सममिति — में की गई हैं। लेखक तर्क देते हैं कि ये पाबंदियाँ मूलभूत नहीं हैं, लेकिन पूरी तरह सामान्य कथन सत्य के काम पर निर्भर करता है।
- “संतुलन से बाहर भी एंट्रॉपी = क्षितिज क्षेत्रफल” नई विधियों से बहुत स्वाभाविक पहचान बनती है, लेकिन सूक्ष्म संख्या की से निकला प्रमेय नहीं है।

इसलिए: पचास साल पुराने ढाँचे का काकटेल विस्तार; प्रयोग की खोज नहीं और न ही किसी नए अनुभवजन्य नियम की तरह परीक्षण का इंतजार करता दावा।

यह क्योंमायने रखताहै

दोकारण हैं — एक व्यावहारिक, एक वैचारिक।

व्यावहारिक: जिन ब्लैक होलोंकाहम अब वास्तव में अध्ययन करते हैं — जिनके विलय LIGO और Virgo सुनते हैं — उनके सबसे महत्वपूर्ण क्षण संतुलन से बहुत दूर होते हैं। इस शोधपत्र कीरचनायाँउन्हींस्थानीय रूप से परिभाषित क्षितिजों से बनीहैं जिन्हें समिुलेशन पहले से ट्रैक करते हैं। इससे विलय यापतन **के दौरान** एंट्रॉपीऔर तापमान कीसिद्धांत-सम्मत भाषामिलतीहै, केवल पहले/बाद कीनहीं।



GW150914, पहलासीधे पहचानागयागुरुत्वीय-तरंग संकेत, दोब्लैक होलोंके विलय से आया। ये समय-आवृत्ति मानचित्र LIGO Hanford (बाएँ) और LIGO Livingston (दाएँ) में संकेत दिखाते हैं: दोनोंडिटेक्टरोंमें चमकीलीरेखाविलय के पास आवृत्ति बढ़ने के साथ ऊपर जातीहै। यह संतुलन से बहुत दूर ब्लैक-होल तंत्र कावास्तविक उदाहरण है; नए ऊष्मागतिकि ढाँचे के लिए संदर्भ है, परीक्षणीय साक्ष्य नहीं।

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

वैचारिक: ब्लैक-होल ऊष्मागतिकीउन कुछ ठोस संकेतोंमें से है जहाँगुरुत्वाकर्षण, क्वांटम सिद्धांत और ऊष्मागतिकीसाफ़ मिलते हैं। तेजीसे बदलते ब्लैक होल के लिए “एंट्रॉपी” और “तापमान” काअर्थ अधिक सटीक करनाभविष्य के क्वांटम सिद्धांत के लिए लक्ष्य कोऔर स्पष्ट बनाताहै। यह गहरे प्रश्न — ब्लैक-होल एंट्रॉपीवास्तव में क्याहै — काजवाब नहींदेता। यह प्रश्न कोअधिक सटीक बनाताहै, और इस क्षेत्र में यह बड़ीउपलब्धि है।

साफ़ सारांश

ब्लैक होल ऐसे नियमोंकापालन करते हैं जोऊष्मागतिकीसे मिलते हैं, लेकिन 1973 कासाफ़ पहलानियम केवल संतुलन में शांत ब्लैक होलोंकीतुलनाकरताथाऔर वास्तविक प्रक्रियाकावर्णन नहींकर सकताथा। Ashtekar, Paraizo और Shu स्थानीय रूप से परिभाषित **dynamical horizons** और बदलते ब्लैक होल कोक्षणिक संतुलन-जैसातापमान और घूर्णन देने वाले मानचित्र काइस्तेमाल करके पहले और दूसरे नियम कोमानमाने रूप से संतुलन से दूर ब्लैक होलों— विलय करते,

पदार्थ निगलते या रिंगडाउन से गुजरते — तक बढ़ते हैं। नतीजा बताता है कि हिंसक घटनाओं के दौरान भी क्षितिज क्षेत्रफल एंट्रॉपी का सही मान बना रहता है। यह शास्त्रीय समझ सापेक्षता का कठोर गणितीय नतीजा है; क्वांटम गुरुत्वाकर्षण, प्रेक्षण, सूक्ष्म-अवस्था गणना या सूचना-विरोधाभास का समाधान नहीं।

बिना बढ़ा-चढ़ाकर जाँच

शोधपत्र क्या दिखाता है: quasi-स्थानीय dynamical horizons पर आधारित ब्लैक-होल यांत्रिकी के पहले और दूसरे नियमों का गणितीय रूप से संगत विस्तार, जो पूरी तरह गतिशील और संतुलन से बहुत दूर ब्लैक होलों पर लागू होता है। यह सीमित प्रक्रियाओं वाला पहला नियम और मज़बूत दूसरा नियम देता है और गतिशील ब्लैक होल की एंट्रॉपी को क्षितिज क्षेत्रफल से पहचानने का स्वाभाविक बनता है।

क्या वास्तविक है लेकिन व्याख्या पर निर्भर: संतुलन से बहुत “एंट्रॉपी = क्षितिज क्षेत्रफल” की पहचान। नए नियम इसे बहुत मजबूती देते हैं, लेकिन माप क शास्त्रीय क्षेत्रफल-एंट्रॉपी धारणा को वरिष्ठता में लेते हैं, उससे इसे व्युत्पन्न नहीं करते।

यह क्या नहीं दिखाता क्वांटम गुरुत्वाकर्षण सिद्धांत; ब्लैक-होल एंट्रॉपी की सूक्ष्म उत्पत्ति या सूक्ष्म-अवस्था गणना; सूचना-विरोधाभास का समाधान; कोई प्रेक्षणीय/प्रयोगिक नतीजा; या भौतिक थर्मामीटर से मापा जा सकने वाला तापमान।

मुख्य सीमाएँ: पूरी तरह शास्त्रीय समझ सापेक्षता; मुख्य नतीजे आम spacelike, अक्षीय-सममति मामले में; व्यापक समझ्यता साध्य के काम पर निर्भर; क्षेत्रफल-एंट्रॉपी पहचान सांख्यिकीय यांत्रिकी से सिद्ध नहीं की गई।

समझ्य पाठक को कितना भरोसा होना चाहिए? यह सैद्धांतिक प्रगति ठोस और सम्मानित है — इस पर ऊँचा भरोसा। उतना ही ऊँचा भरोसा इस बात पर भी होना चाहिए कि यह नया प्रेक्षण, क्वांटम गुरुत्वाकर्षण या सूचना-पहेली का समाधान **नहीं** है। सही प्रस्तुति: दूरबीन नहीं, गणित से उठाया गया वास्तविक कदम।

स्रोत

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium, Phys. Rev. Lett. 136, 251405 (2026)
https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1