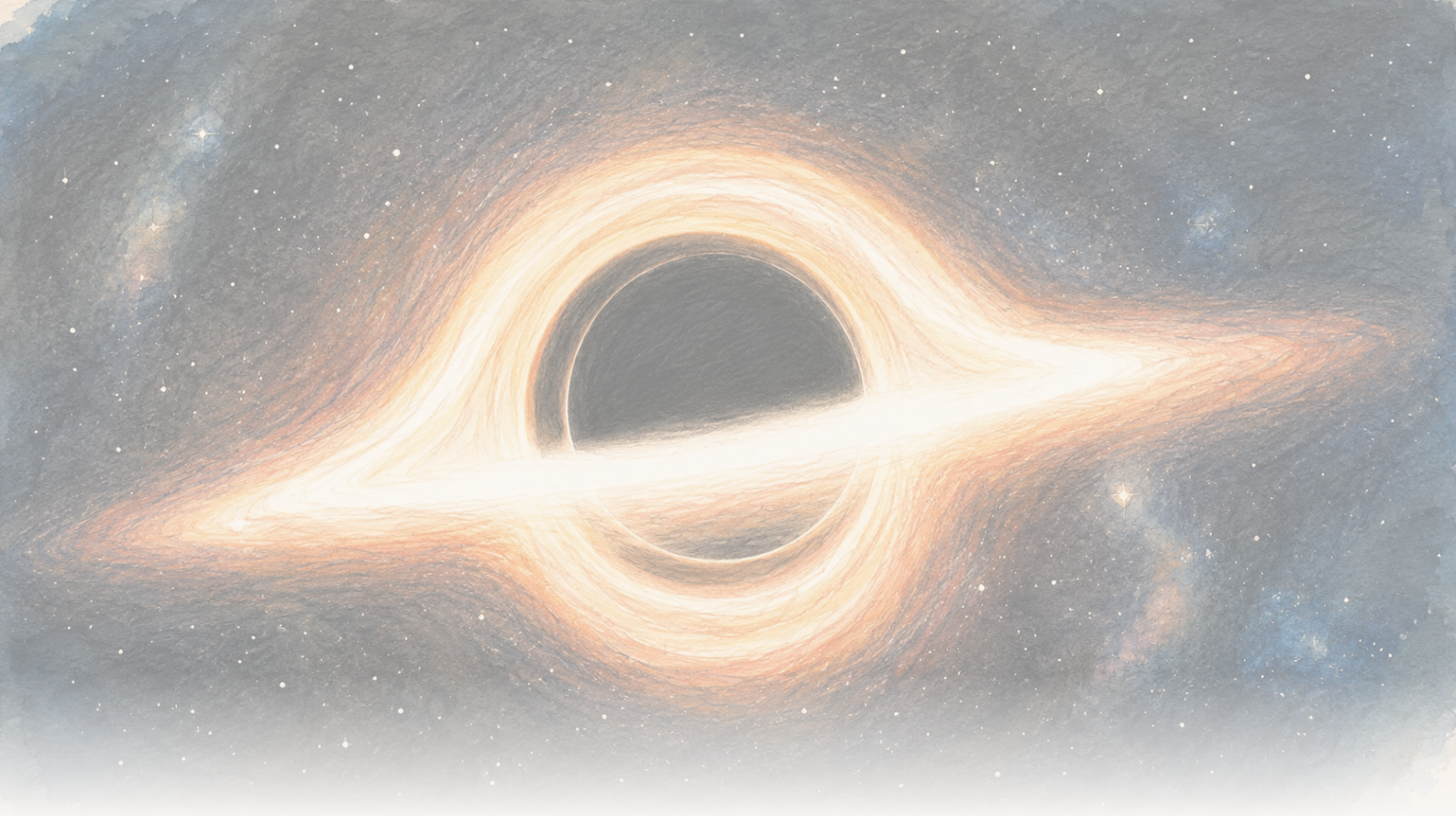




The CLEAN PAPER

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

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

1970 के दशक से यह ज्ञात है कि ब्लैक होल ऐसे नियमों का पालन करते हैं जो ऊष्मगतिकी को प्रतबिंबित करते हैं, लेकिन उनका सबसे सुव्यवस्थित रूप केवल संतुलन में शांत बैठे ब्लैक होल पर लागू होता था। *Physical Review Letters* का एक नया शोधपत्र पहले और दूसरे नियम को क्वाज़ीस्थायी क्षतिजों के उन भागों तक विस्तारित करता है जो dynamical horizon segments के रूप में योग्य हैं और संतुलन से मनमानी दूरी पर हो सकते हैं — अभिवृद्धि, पतन और ब्लैक-होल वलियों के अधिकांश चरणों के दौरान। समिलेशन पूरे वलियों में क्वाज़ीस्थायी क्षतिजों को ट्रैक करते हैं, लेकिन नियम सह-वलियों के आसपास के उस संक्षिप्त अंतराल को अभी नहीं समेटते जब वह dynamical horizon segment नहीं होता। मूल ढाँचा समन्य समीक्षा में है और वाष्पीकरण के लिए अर्धशस्त्रीय अनुप्रयोग है; यह न नया क्वंटम गुरुत्व कर्षण है, न प्रेक्षण और न ब्लैक-होल सूचना स्पेहलीका समग्र।

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” ऊष्मगतिकीजैसे देखते हैं। उनकासाफ़-सुथरारूप तभीकम 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 कोनयंत्रित करने वाले समीकरण, पद-दर-पद, ऊष्मगतिकी के नियमोंसे मेल खते हैं: ब्लैक होल कीएंट्रॉपीउसके क्षतिज के क्षेत्रफल के अनुपात में होतीहै, और उसकातपमन सतही गुरुत्वकर्षण के अनुपात में। Hawking ने ब्रह्म में दिखायाकि यह तपमन गहरे भौतिक अर्थ में वस्तुवर्क है — ब्लैक होल सचमुच बहुत हल्काऊष्मीय विकिरण निकलताहै।

Hawking radiation क्याहै?

शस्त्रीय भौतिकीमें ब्लैक होल से कुछ भीबहर नहींनिकलता इसलिए उसे पूरीतरह कालाऔर शून्य-तपमन बना होनाचहिए। 1974 में Stephen Hawking ने दिखायाकि क्षतिज के पक्ष क्वंटम सिद्धांत शामिल करने पर तस्वीर बदल जातीहै: ब्लैक होल हल्कीऊष्मीय चमक निकलताहै और इसलिए धीरे-धीरे द्रव्यमान खोताहै, यानी“वाष्पति” होताहै। स्पेक्ट्रम Hawking तपमन पर ऊष्मीय होताहै, हलंका विक्रति स्पेसटाइम से गुजरते समय विकिरण में बदलना आते हैं। एक आम सहज चित्र में — जोHawking कीवस्तुवर्क व्युत्पत्तिनहींहै — क्षतिज के बहर क्वंटम उतार-चढ़ाव कणोंकीजोड़ियाँबनते हैं, जिनमें एक बहर निकलताहै और दूसराअंदर गरिताहै।

मुख्य बात यह है कि तपमन ब्लैक-होल द्रव्यमान के उलटे अनुपात में है: छोटाब्लैक होल अधिक गर्म। किसीभी ऐसे ब्लैक होल के लिए जसि दूरबीन देख सके, तपमन अवशिवसनीय रूप से कम होगा— उसके आसपास के खाली अंतरिक्ष से भीबहुत ठंडा— इसलिए यह चमक व्यवहार में नगण्य है और सिधे कभीमपीनहीगई। इसकामहत्व वैचारिक है: Hawking विकिरण ब्लैक-होल यंत्रकीऔर ऊष्मगतिकीके बीच कीसमताकोवस्तुवर्क ऊष्मगतिकी से जोड़ताहै। क्योंकि ब्लैक होल सचमुच तपमन रखताहै, इन नियमोंमें “तपमन” और “एंट्रॉपी” केवल औपचारिक संयोग नहींरह जाते। (यह वर्तमान शोधपत्र कीपृष्ठभूमिहै, उसकानतीजानहीहै।)

इस मेल काआधार ब्लैक-होल यंत्रकीकापहलानियम है (Bardeen, Carter और Hawking, 1973)। शब्दोंमें: यदि आप एक स्थिर ब्लैक होल कोबहुत थोड़ाबदलकर पक्ष कीदूसरीस्थिर अवस्थामें ले जाएँ, तोद्रव्यमान में बदलना उसके तपमन $\times$ एंट्रॉपीबदलना, सग हीघूर्णन से जुड़े पद, के बराबर होताहै। यह ब्लैक-होल रूप है “ऊर्जाकाबदलना = तपमन $\times$ एंट्रॉपी बदलना” जैसीऊष्मगतिकी संरचनाका।

लेकिन “पक्ष कीस्थिर अवस्था” में एक छिपीशर्त है। 1973 कासाफ़ नियम दोऐसे ब्लैक होलोंकीतुलनाकरताहै जोसंतुलन में शांत बैठे हैं और अत्यल्प मात्रासे अलग हैं। वह असलीप्रक्रिया— तहानगिलताब्लैक होल, दोब्लैक होलोंकावलय, याहसिक जन्म के ब्रह्म रगिडसन — कावर्णन नहींकरता। जबकि हमें इन्हीस्थितियोंकोसमझनाहै। पुरानानियम ठीक तब चुप होजाताहै जब ब्लैक होल सबसे दलिचस्प होताहै।

आसम लगने वालासमाप्त क्योकम नहींकरता

पहलाखयाल होसकताहै: पदार्थ गरिते समय क्षतिज काक्षेत्रफल बढ़ते देखिए। समस्याहै — कैम-साक्षतिज?

जसि क्षतिज कीआम तौर पर कल्पनाकीजातीहै, घटनाक्षतिज (घटनाhorizon), यानीवस्तुवर्क लाइने-न-पक्ष कीसीमा कीएक असहज विशेषताहै: उसकीपरभिन्नापूरे ब्रह्मंड के भविष्य पर निर्भर करतीहै। अभीघटनाक्षतिज कहाँहै, यह ठीक-ठीक जन्म के लिए आपकोयह जन्मनाहोगाकि भविष्य में हमेशाके लिए क्याक्याउसमें गरिगा। यह केवल तकनीकीबारीकी

नहीं है। घटनाक्षतिजि पदार्थ के पहुँचने से पहले एक खली समतल क्षेत्र में बढ़ना शुरू कर सकता है, सिर्फ इसलिए कि वह पदार्थ भविष्य में जरूर गरिने वला है। उसका क्षेत्रफल वहाँ बढ़ सकता है जहाँ स्थानीय तौर पर कुछ भी नहीं हो रहा।

पदार्थ आने से पहले क्षतिजि कैसे बढ़ सकता है?

इस पहेली को घटनाhorizon की teleological nature, या उसकी वैश्विक परिभाषा कहा जाता है। यहाँ “teleological” का मतलब यह नहीं कि क्षतिजि का कोई उद्देश्य है, वह भविष्य जन्मता है, या कोई प्रभु समय में पीछे भेजता है। मतलब सिर्फ इतना है कि किसी घटना के क्षतिजि के अंदर या बहर हमें काफ़ी सलास्पेसटाइम के पूरे भविष्य को देखकर ही किया जा सकता है।

औपचारिक परिभाषा हीबत संक्षेप में कहती है। भविष्य का null infinity — “I-plus”, लिखा I^+ — को उस गंतव्य की तरह सोचिए जहाँ वह प्रकाश पहुँचता है जो हमेशा के लिए बहर निकल जाता है। घटनाक्षतिजि उन घटनाओं की सीमा है जिनसे बहर की ओर भेजा गया प्रकाश-संकेत अंततः इस गंतव्य तक पहुँच सकता है और जिनसे कभी नहीं पहुँच सकता। समग्र सपेक्षता के मजक संकेतन में यह future null infinity के causal past की सीमा है: $\partial J^-(I^+)$ । परिभाषा में ही पूरे भविष्य की जन्मकरीशमलि हमें के कारण केवल यहाँ और अभीकिए गए मज से घटनाक्षतिजि को ठीक-ठीक चनिहति नहीं किया जा सकता।

दहताहुआ गोलका खेल यह अजीबपन साफ़ दिखाता है। खेल के आने से पहले अंदर का क्षेत्र खली और स्थानीय रूप से समतल हो सकता है। केंद्र से अलग-अलग देर के समय पर बहर की ओर प्रकाश-करिणें भेजिए: पहले वाली निकल जाती है; बह वाली दहते खेल से ऐसी ज्यमति में मलिती है जहाँ से बहर नहीं निकल सकती। घटनाक्षतिजि इन दो परिणामों की सीमा है। इसे समय में पीछे ले जाकर देखें तो यह सीमा केंद्र से शुरू होकर खेल पहुँचने से पहले खली समतल भीतरी क्षेत्र में फैलती दिखती है। उसका बढ़ता क्षेत्रफल वहाँ स्थानीय पदार्थ-प्रवह नहीं दिखा रहा वह पूरे स्पेसटाइम में उपलब्ध बहर निकलने के रस्तों का किण्ड है।

इसमें कुछ भी समय में पीछे प्रभु नहीं डलता। यदि खेल मुड़ जाता और ब्लैक होल बनता ही नहीं तो पूरा स्पेसटाइम अलग होता और पहले वाला क्षेत्र घटनाक्षतिजि का हिसान ही होता। सबक यह है कि घटनाक्षतिजि एक वैश्विक कारणत्मक सीमा है, ऐसी सतह नहीं जिससे पस 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 घटनाक्षतिजि ब्लैक होल की चलते-चलते बदलती “अवस्था” बताने के लिए खरब सघन है। कंप्यूटर समिलेशन में भी उसे ठीक-ठीक चनिहति करने के लिए समिलेशन खत्म होने तक इंतज़ार करना पड़ता है; क्षण-दर-क्षण तमम या एंटरपीयर नज़र रखना तो और कठिन है।

समाप्त: ऐसा क्षतिजि जसि स्थानीय ज्यमति से परिभाषित किया जा सके

Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo और Jonathan Shu कानयाशेपत्र अपने परिणाम को क्षतिजि की एक अलग अवधारणा पर आधारित करता है — एक **क्वाज़ी-स्थानीय** अवधारणा जो केवल अपने आस-पस की ज्यमति से परिभाषित होती है और अनंत भविष्य का कोई संदर्भ नहीं लेती। ये **क्वाज़ी-स्थानीय क्षतिजि** वही सतहें हैं जिनका संख्यत्मक सपेक्षता के शोधकर्ता पूरे समिलेशन के दौरान मूल ब्लैक होल का स्थान निर्धारित करने, वलिय कोट्रैक करने और अवशेष का स्थान निर्धारित करने के लिए पहले से उपयोग करते हैं। यहाँ वकिसति ऊष्मगतिक नियम क्वाज़ी-स्थानीय क्षतिजि के उन भागों पर लागू होते हैं जो dynamical horizon segment की अतिरिक्त शर्तें पूरी करते हैं। ऐसे प्रत्येक segment पर क्षेत्रफल दूर भविष्य की घटनाओं के बजय स्थानीय ऊर्जाप्रवह की सीधी प्रतिक्रिया में बदलता है: धनत्मक अंतप्रवह हमें पर वह बढ़ता है और ऋणत्मक ऊर्जाप्रवह वाले वक्षति होते काल-सदृश क्षतिजि के मामले में घटता है।

फिर लेखक कठिनी दूसराहसिाहल करते हैं। समस्य ऊष्मगतिकीमें संतुलन से बहुत दूर कसितंत्र कोसफ़ तममस या दस देनामुशकलि है; ये रशायिाँचीं स्थरि हें के बस ठीक से परभिषति होतीहैं। ब्लैक होल में भीयहीसमस्याहै — लेकनि समस्य सप्केषताकीएक खस वशिषतामदद करतीहै। संतुलन में ब्लैक होल (Kerr ब्लैक होल) कोकेवल दोसंख्यओं — आकर और घूर्णन — से तय कयाजासकताहै। लेखक एक मसचत्र बनते हैं जोdynamical horizon segment के सस प्रत्येक अवस्थाकोलेताहै और उस segment के प्रत्येक अनुप्रस्थ कट पर उस संतुलति ब्लैक होल कीदोसंख्याएँ पढता है जससे वह अवस्थाउस समय मेल खतीहै। इस मसचत्र से हसिक रूप से बदलते ब्लैक होल कोभीsegment के सस समय-नरिभर तममस और घूर्णन दयाजासकताहै।

इन घटको— क्षतिजि के पर बहने वलीस्थमीय रूप से परभिषति ऊर्जाऔर तत्कलकि सघन रशायो— के सस वे पहले नयिम कोसंतुलन से मनममीदूरीपर स्थति ब्लैक होलोतक वसितरति करते हैं। नरिणयक बस यह है किनयानयिम वसूतवकि भैतिक प्रक्रयिओं से उत्पन्न परमिति परविरतनो(क्षतिजि के पर जते पदार्थ और गुरुत्वी तरंगों) कावरणन करताहै, दोस्थरि अवस्थाओं के बीध के अत्यल्प चरणोकानही। वे इसके सस एक संगत दूसरानयिम देते हैं, जसिकाकथन अब मसूमक है: क्षतिजि के क्षेत्रफल में परविरतन सीधे स्थमीय ऊर्जाप्रवह से जुड़ाहै — धनसूमक अंतप्रवह में वृद्धि, याऋणसूमक प्रवह के अंतरगत वसूति होते कल-सदृश क्षतिजि में कमी। दोनयिम मलिकर एक स्पष्ट नषिकरष कीओर संकेत करते हैं: dynamical horizon segment दवरानरूपति कसीभीचरण के लिए, वह कतिनाभीहसिक क्योन हो एंटरमीकासहीमस अब भीउसके क्षतिजि काक्षेत्रफल है।

यह क्याससति नहीकरता

- यह क्वंटम गुरुत्वकर्षण कोहल नहीकरता। मूल ढँवासमस्य सप्केषतामें सूत्रबद्ध है; ब्लैक-होल वसूपकरण पर इसकाअनुप्रयोग अर्धशसूत्रिय सन्नकिटन काउपयोग करताहै, जसमें क्वंटम पदार्थ-क्षेत्र शसूत्रिय दक्कल पर प्रभस डलते हैं। यह अब भीक्षतिजि के क्षेत्रफल और एंटरमीकीमसक पहचन कोमसकर चलताहै, न कि उस एंटरमीकोकसीअधकि मूलभूत चीज से व्युत्पन्न करताहै।
- यह सूक्ष्म अवस्थाएँ (microstates) नहीगनिताऔर यह नहीबतताकि ब्लैक-होल एंटरमी“कससे बनी” है।
- यह ब्लैक-होल सूचनमवरिधमस (information paradox) हल नहीकरता। वह क्वंटम सदिधंत कीपहेलीहै।
- यह कोई प्रेक्षण यामसन नहीहै। इसमें कोई दूरबीन, डेटायागुरुत्वी-तरंग संकेत शमलि नहीहै — यह गणति है। ब्लैक होल के वकिसति हें के दौरम dynamical horizon कोदयागया“तममस” समकरणोंमें सटीक रूप से परभिषति रशतिहै, ऐसीकोई चीज नहीजसि थर्ममिटर पर पढाजासके।
- यह दोब्लैक होलोकीपूरीसह-वलिय प्रक्रयिकानरंतर ऊष्मगतिकि वरणन अभीनहीदेता। संख्यसूमक समिलेशन पूरे वकिस में क्वजीस्थमीय क्षतिजि कोट्रैक करते हैं — मूल ब्लैक होलोसे वलिय होते हुए अवशेष तक — लेकनि वलिय के बहुत नकिट एक संक्षपित अंतरल के दौरम वह क्षतिजि dynamical horizon segment के लिए आवश्यक शरूकोपूरानहीकरता। सहवर्तीशेषपत्र के अनुसार, उस अंतरल काऊष्मगतिकि ववरणन अभीतयार कयाजारहाहै।
- यह Bekenstein-Hawking तस्वीर कोउलटतानही उसे उस गतशील क्षेत्र तक बढताहै जहाँकेवल-संतुलन वला नयिम कुछ नहीकहताथा।

सक्ष्य कतिनामजबूत है?

यह जसि प्रकार काक्य है, उसके लिए सक्ष्य मजबूत है: क्षेत्र के एक अग्रणीसमूह कासधमीपूरण और आंतरकि रूप से सुसंगत गणतिभैतिकीशेष, जोPhysical Review Letters में Editors' Suggestion के रूप में प्रकशति हुआ है। एक सहकर्मिसमीक्षति सहवर्तीशेषपत्र अधकि वसूत व्युत्पत्तयिाँदेताहै और उन मसलोकाउपचर करताहै जनिहें संक्षपित Letter से संक्षपितताके कारण हटादयागयाथा।

असल सीमाएँ गुणवत्ताकीनहीं प्रकार कीहैं:

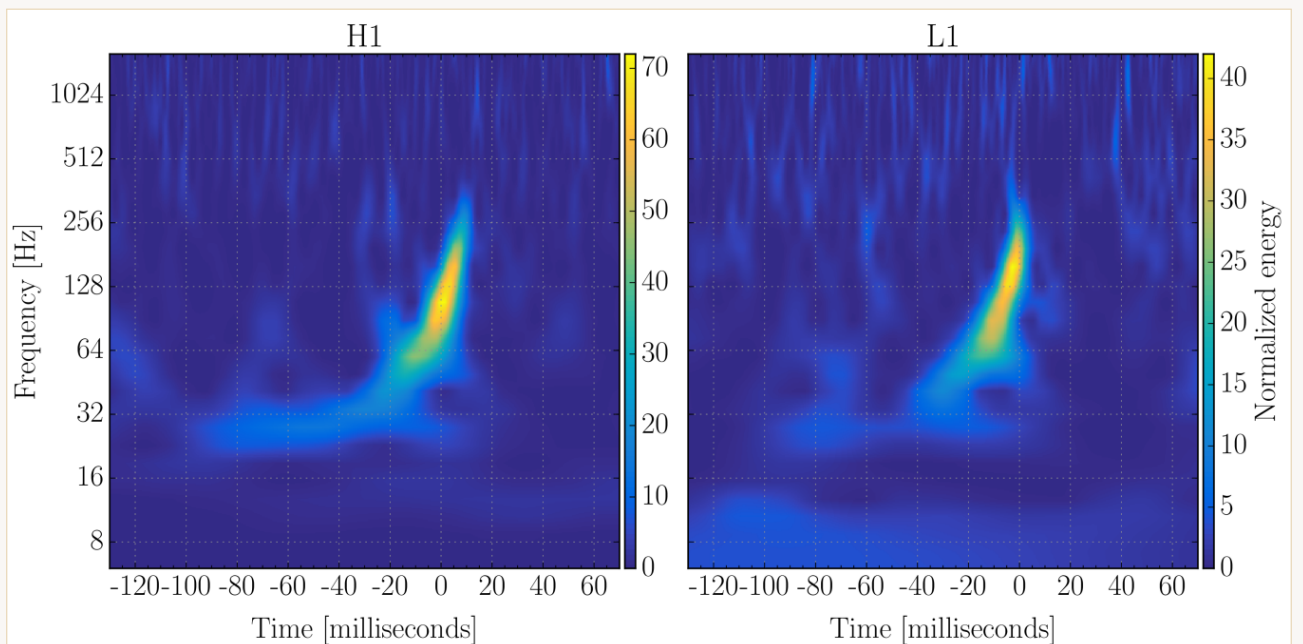
- यह मजक धारणापर टिकाहै कि क्षतिजि क्षेत्रफल हीएंट्रपीहै (क्षेत्रफल कोNewton और Planck स्थरिंकोके मजक संयोजन के चार गुने से भाग देने वालीअभिव्यक्ति)। पूराकंवंटम गुरुत्वकर्षण यदि इस पहचान कोबदले, तो व्याख्याभीबदलेगी।
- संक्षिप्तताऔर सरलताके लिए छोटाLetter मुख्य व्युत्पत्ति कोअक्षय-सममति, स्थल-सदृश dynamical horizons काउपयोग करके प्रस्तुत करताहै। सहकर्मिसमीक्षति सहवर्तीशेषपत्र कल-सदृश dynamical horizons का स्पष्ट वशिलेण करताहै और घूर्णनसमक Killing field के बनाविकोणीय संवेग कीरचनाकरताहै। हलँक, वक्षपति हसे कल-सदृश क्षतिजिोंके लिए केवल स्पष्ट पश्च-प्रतकिरियाउपचार गलेका सममति तिक सीमति है।
- “संतुलन से बहर भीएंट्रपी= क्षतिजि क्षेत्रफल” नई वधियोंसे बहुत स्वममकि पहचान बनतीहै, लेकिन सूक्ष्म संख्याकीसे निकलाप्रमेय नहींहै।

इसलिए: पचस सल पुरसे ढँचे काकठोर वसितार; प्रयोगिक खोज नहीं और न हीकसीनए अनुभवजन्य नियम कीतरह परिक्षण काइंतजार करतादवा।

यह क्योंमयने रखताहै

दोकारण हैं — एक व्यग्रहकि, एक वैचारिक।

व्यग्रहकि रूप से, जनि ब्लैक होलोकाहम अब वस्तव में अध्ययन करते हैं — जनिके वलिय कोLIGO और Virgo सुनते हैं — वे अपने सबसे महत्वपूर्ण क्षण संतुलन से बहुत दूर बतिते हैं। समिलेशन मूल ब्लैक होलोसे वलिय हसे हुए अवशेष तक क्वाज़िस्थनीय क्षतिजि कोट्रैक करते हैं। इस शेषपत्र कीरशायिँउस क्षतिजि के उन भागोपर लगू होती हैं जोdynamical horizon segments के रूप में योग्य हैं, इसलिए यह वलिय-वकिस के अधकिंश चरणोऔर पतन के दौरम ब्लैक होले कीएंट्रपीऔर तममम पर बस करने काएक सदिधंत-सम्मत तरीकादेताहै, न कि केवल सब कुछ शंत होजमे के बन्न। सह-वलिय के ठीक आसपस के संक्षिप्त अंतराल में क्वाज़िस्थनीय क्षतिजि ट्रैक हसेतरहताहै, लेकिन वर्तमम ऊष्मगतिक वर्णन से बहर रहताहै।



GW150914, पहला सीधे पहचाना गया गुरुत्व-तरंग संकेत, दो ब्लैक होलों के विलय से आया। ये समय-आवृत्ति मंच LIGO Hanford (बाएँ) और LIGO Livingston (दाएँ) में संकेत देखते हैं: दोमोडलिट्रोमें चमकीली रेखा विलय के पक्ष आवृत्ति बढ़ने के साथ ऊपर जाती है। यह संतुलन से बहुत दूर ब्लैक-होल तंत्र का वास्तविक उदहरण है; नए ऊष्मगतिक ढँचे के लिए संदर्भ है, प्रेक्षणीय सम्बन्ध नहीं।

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

वैचारिक: ब्लैक-होल ऊष्मगतिकी उन कुछ ठोस संकेतों में से है जहाँ गुरुत्वकर्षण, क्वंटम सदिश और ऊष्मगतिकी सम्मिलित हैं। तेजी से बदलते ब्लैक होल के लिए “एंट्रॉपी” और “तन्मन्त्र” का अर्थ अधिक सटीक करना भविष्य के क्वंटम सदिश के लिए लक्ष्य को और स्पष्ट बनाता है। यह गहरे प्रश्न — ब्लैक-होल एंट्रॉपीवास्तव में क्या है — का जवाब नहीं देता। यह प्रश्न को अधिक सटीक बनाता है, और इस क्षेत्र में यह बड़ी उपलब्धि है।

सफ़ सारांश

ब्लैक होल ऐसे नियमोकापलन करते हैं जो ऊष्मगतिकी को प्रतिबिंबित करते हैं, लेकिन 1973 का सुव्यवस्थित “पहला नियम” केवल संतुलन में स्थिर ब्लैक होलों की तुलना करता था और किसी वास्तविक प्रक्रिया का वर्णन नहीं कर सकता था। Ashtekar, Paraizo और Shu क्वाज़िस्थानीय क्षतिजों का उपयोग करके, उनके dynamical horizon segments पर ऊष्मगतिक नियम लागू करके और उन segments के साथ प्रत्येक अवस्था को तत्कालिक तन्मन्त्र तथा स्पनि प्रदान करने वाला मंच बनाकर पहले और दूसरे दोमोनियमोको संतुलन से मनमनीदूरी पर स्थिति ब्लैक होलों— पदार्थ ग्रहण करते, ढहते, रगड़ान से गुजरते और विलय के अधिकांश चरण पार करते ब्लैक होलों— तक वसतिरहित करते हैं। निष्कर्ष यह है कि dynamical horizon segment द्वारानुरूपित प्रत्येक चरण में क्षतिज का क्षेत्रफल एंट्रॉपी का सीमा बनारहता है। सह-विलय के बहुत नजिक का संक्षिप्त अंतराल अभी इस ऊष्मगतिक वर्णन के दायरे में नहीं है, फिर भी समिलेशन क्वाज़िस्थानीय क्षतिज को ट्रैक करते रहते हैं। मूल ढँचा समन्वय समेक्षता में है और वृष्णिकरण के लिए अर्धशस्त्रीय अनुप्रयोग है; यह न क्वंटम गुरुत्वकर्षण है, न प्रेक्षण, न सूक्ष्म-अवस्थाओं की गणना और न सूचना वरिधिमन्त्र का समन्वय।

बनाबढ़ाचढ़कर जँच

शेषपत्र क्या देखता है: ब्लैक-होल यंत्रिकी के पहले और दूसरे नियमोकागणितिय रूप से संगत वसतिरहित, जो पूरी तरह गतिशील और संतुलन से बहुत दूर ब्लैक होलों पर लागू होता है तथा क्वाज़िस्थानीय क्षतिजों और उनके उन भागों पर आधारित है जो dynamical horizon segments की शर्तें पूरी करते हैं। यह सीमा, प्रक्रिया आधारित पहला नियम और मत्तस्मक दूसरा नियम देता है और गतिशील ब्लैक होल की एंट्रॉपी को क्षतिज क्षेत्रफल से पहचाना स्वमन्त्रिक बनाता है।

क्या वास्तविक है लेकिन व्याख्या पर निर्भर: संतुलन से बहर “एंट्रॉपी = क्षतिज क्षेत्रफल” की पहचान। नए नियम इसे बहुत मजबूती देते हैं, लेकिन मन्त्र शस्त्रीय क्षेत्रफल-एंट्रॉपी धारणा को वरिधिमन्त्र में लेते हैं, उससे इसे व्युत्पन्न नहीं करते।

यह क्या नहीं देखता क्वंटम गुरुत्वकर्षण सदिश; ब्लैक-होल एंट्रॉपी की सूक्ष्म उत्पत्ति या सूक्ष्म-अवस्था गणना सूचना वरिधिमन्त्र का समन्वय; कई प्रेक्षणीय/प्रयोगिक नतीजा या भौतिक थर्मामीटर से मन्त्राज्ञा करने वाला तन्मन्त्र।

मुख्य सीमाएँ: मूल व्युत्पत्ति समन्वय समेक्षता में है, जबकि काल-सदृश वृष्णिकरण का अनुप्रयोग अर्धशस्त्रीय सन्निकटन का उपयोग करता है; द्विआधारी सह-विलय के बहुत नजिक का संक्षिप्त अंतराल dynamical horizon segment द्वारानुरूपित नहीं होता और उसका ऊष्मगतिक वर्णन अभी तैयार किया जा रहा है, हालाँकि संख्यत्मक समिलेशन क्वाज़ि

स्थानीय क्षतिजि कोट्रैक करते रहते हैं; वाष्पति होते कल-सदृश क्षतिजिोंकीस्पष्ट पश्च-प्रतक्रियाकाउपचार गोलका सममतिगत समिति है; क्षेत्रफल और एंटरमीकीपहचान कोमन लियागयाहै, संख्यकीय यंत्रकीसे सिद्ध नहीं कियागया।

समस्य पठक कोकतिनाभरेसाहेमाचहएि? यह सैद्धांतिक प्रगति ठोस और सम्मति है — इस पर ऊँचाभरेसा उतनाही ऊँचाभरेसाइस बात पर भीहेमाचहएि कि यह नयाप्रेक्षण, क्वंटम गुरुत्वकर्षण यासूचनपहेलीकासममन नहींहै। सही प्रस्तुति: दूरबीन नहीं गणति से उठयागयावस्तवकि कदम।

प्रकाशन के बढ के अपडेट

• सुधा • 2026-08-27

संपर्क लेखक Abhay Ashtekar कीप्रतक्रियाके बढ हमने उन दोकथनोंकोसुधाराजनिमें कल-सदृश और गैर-अक्षीय-सममति ममलोकोसहकर्मिसमीक्षति सहवर्तीशोधपत्र में स्पष्ट रूप से उपचरति कएि जमे के बजय केवल तर्क द्वारा समर्थति बतयागयाथा। समीक्षाके दौरम हमने यह भीस्पष्ट कियाकि यह ढँवादवआधरीसह-वलिय के बहुत नकिट के उस संक्षिप्त अंतरल कोअभीनहीसमेटता जब क्वजिस्थानीय क्षतिजि dynamical horizon segment कीशर्तोंकोपूरा नहींकरता।

• सुधा • 2026-08-28

संबंधति लेखक Abhay Ashtekar के एक और स्पष्टीकरण के बढ हमने क्वजिस्थानीय क्षतिजिों जिन्हें संख्यत्मक समिलेशन मूल ब्लैक होलोसे वलिय होते हुए अवशेष तक ट्रैक करते हैं, कोउन भगोसे अलग कियाजो dynamical horizon segments कीअतिरिक्त शर्तें पूरीकरते हैं और जहाँऊष्मगतिक नियम लागू होते हैं।

स्रोत

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>