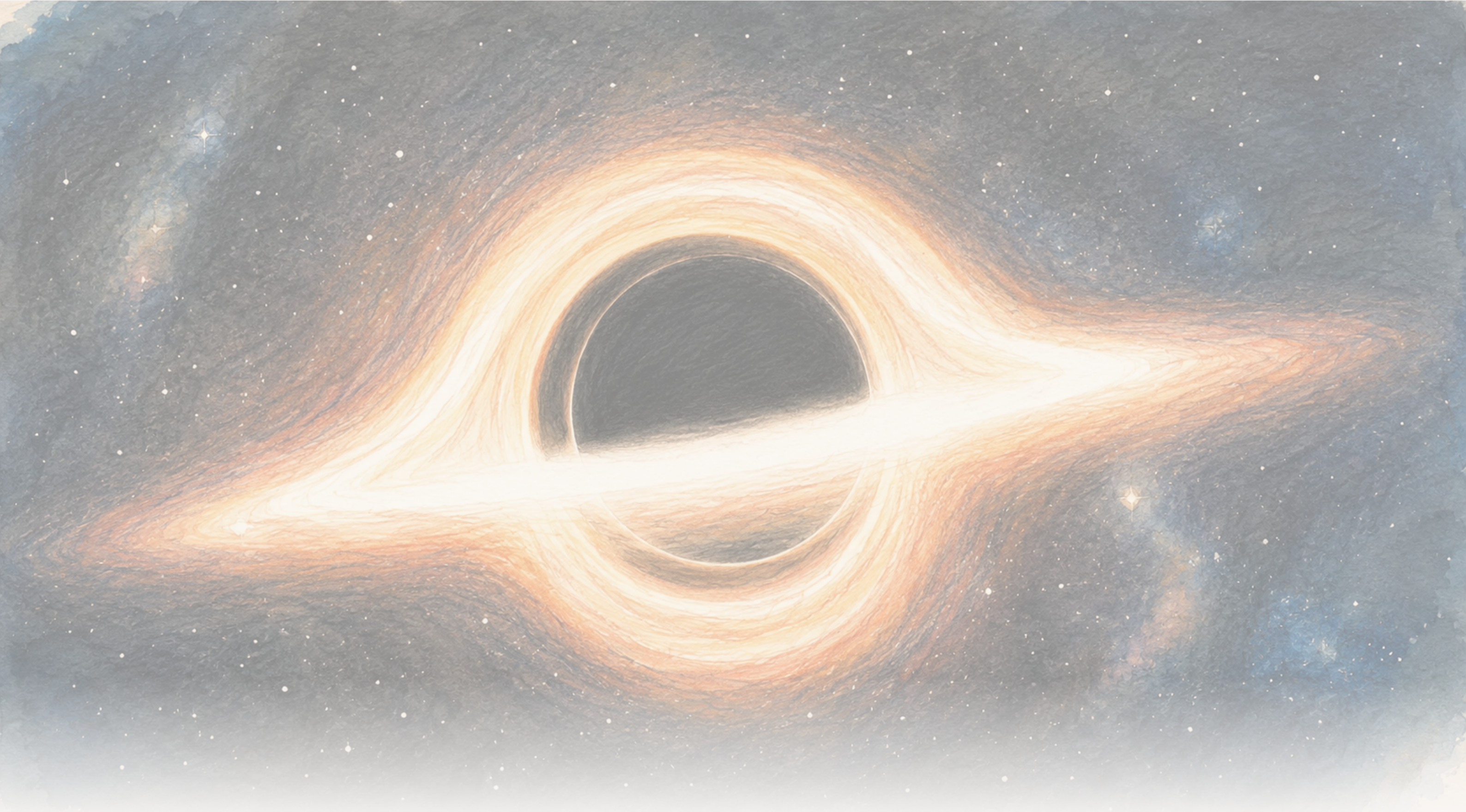


The Clean Paper

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

بلیک ھول کے حراریاتی قوانین اب شدید، توازن سے باھر حالات تک بڑھائے گئے ھیں

1970 کی دھائی سے بلیک ھولز کے قوانین حراریات سے مشابہ سمجھے جاتے ھیں، مگر صاف صورت صرف *equilibrium* کے لیے تھی۔ *Physical Review Letters* کا نیا *mathematical result* *locally defined dynamical horizons* کے ذریعے *first* اور *second laws* کو تیزی سے بدلتے بلیک ھولز تک بڑھاتا ھے۔ یہ *classical general relativity* ھے، *quantum gravity* یا *observational discovery* نہیں۔

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

بلیک ہول کے بھی ایسے “قوانین” ہیں جو حراریات جیسے دکھتے ہیں۔ پرانی صاف صورت تب چلتی تھی جب کچھ ہو ہی نہ رہا ہو۔

طبیعیات کی عجیب ترین باتوں میں سے ایک یہ ہے کہ بلیک ہول گرم اجسام کی طرح برتاؤ کرتے ہیں۔ 1970 کی دھائی کے آغاز میں Bekenstein اور Hawking نے دیکھا کہ بلیک ہولز کو بیان کرنے والی مساوات، ایک ایک جزو کے ساتھ، حراریات کے قوانین سے ملتی ہیں: بلیک ہول کی اینٹروپی اس کے افق کے رقبے کے متناسب ہے، اور اس کا درجۂ حرارت اس کی سطح کششِ ثقل کے متناسب۔ بعد میں Hawking نے دکھایا کہ یہ درجۂ حرارت صرف رسمی مشابہت نہیں؛ بلیک ہول واقعی انتہائی مدھم حرارتی شعاع ریزی خارج کرتا ہے۔

radiation Hawking کیا ہے؟

ہونا کے حرارت درجۂ بغیر اور سیاہ پر طور مکمل اسے لیے اس سکتا، نکل نہیں کچھ سے ہول بلیک میں طبیعیات کلاسیکی ہے: جاتی بدل تصویر پر کرنے شامل نظریہ کوانٹم قریب کے افق کہ دکھایا نے Stephen Hawking میں 1974 چاہیے۔ ہے۔ ہوتا ”evaporate“ یا ہے، کھوتا کمیت آہستہ آہستہ طرح اس ہے، کرتا خارج تابکاری حرارتی کمزور نہایت ہول بلیک ہے جاتی بدل تابکاری وہ ہوئے گزرتے سے مکان و زمان خمیدہ جبکہ ہے، ہوتا حرارتی پر حرارت درجۂ Hawking طیف کے افق — نہیں derivation اصل کی Hawking یہ — میں تصویر وضاحتی محض مگر مشہور ایک ہے۔ پہنچتی تک دور جو ہے۔ جاتا گر اندر دوسرا اور ہے جاتا نکل میں صورت کی تابکاری ساتھی ایک ہیں؛ بناتے جوڑے fluctuations کوانٹم باہر اہم بات یہ ہے کہ یہ درجۂ حرارت بلیک ہول کی کمیت کے **الٹ تناسب** میں ہے: بلیک ہول جتنا چھوٹا، اتنا گرم۔ کسی بھی ایسے بلیک ہول کے لیے جسے telescope دیکھ سکے، یہ درجۂ حرارت ناقابلِ تصور حد تک کم ہے، اپنے گرد کے تقریباً خالی خلا سے بھی بہت ٹھنڈا۔ اسی لیے عملی طور پر یہ چمک نہایت معمولی ہے اور اسے براہِ راست کبھی ناپا نہیں گیا۔ اس کی اہمیت تصوراتی ہے: Hawking تابکاری ہی بلیک ہول میکانیات اور حراریات کی مشابہت کو حقیقی حراریاتی تعلق بناتی ہے۔ چونکہ بلیک ہول واقعی درجۂ حرارت رکھتا ہے، ان قوانین میں “درجۂ حرارت” اور “اینٹروپی” حقیقی تھرموڈائنامک quantities ہیں، صرف مساوات کا اتفاق نہیں۔ (یہ موجودہ مقالے کا پس منظر ہے، اس کا نتیجہ نہیں۔)

اس تعلق کی بنیاد **بلیک ہول میکانیات کا پہلا قانون** ہے، جسے Bardeen، Carter اور Hawking نے 1973 میں بیان کیا۔ سادہ الفاظ میں: اگر بلیک ہول کو ایک مستحکم حالت سے بہت قریب دوسری مستحکم حالت تک معمولی سا بدلا جائے، تو اس کی کمیت میں تبدیلی اس کے درجۂ حرارت ضرب اینٹروپی کی تبدیلی کے برابر ہوتی ہے، ساتھ spin کا ایک جزو بھی آتا ہے۔ یہ بلیک ہول کی زبان میں “حرارت کا داخلہ = درجۂ حرارت × اینٹروپی کی تبدیلی” جیسا تعلق ہے۔

مسئلہ عبارت قریب کی مستحکم حالت میں چھپا ہے۔ 1973 کا قانون توازن میں خاموش بیٹھے دو بلیک ہولز کا موازنہ کرتا ہے جن میں فرق نہایت چھوٹا ہو۔ وہ خود کسی **عمل** کو بیان نہیں کرتا: ستارہ نگلتا بلیک ہول، آپس میں ملتے دو بلیک ہولز، یا شدید پیدائش کے بعد ارتعاش ختم کرتا نیا بلیک ہول۔ یہی وہ حالات ہیں جنہیں ہم سب سے زیادہ سمجھنا چاہتے ہیں، اور یہی “خاموش توازن” کے بالکل برعکس ہیں۔ بلیک ہول جیسے ہی دلچسپ ہوتا ہے، پرانا صاف قانون خاموش ہو جاتا ہے۔

بظاہر آسان حل کیوں نہیں چلتا

پہلا خیال یہ ہو سکتا ہے کہ مادہ اندر گرتا جائے اور ہم افق کا بڑھتا ہوا رقبہ دیکھتے رہیں۔ مگر سوال ہے: **کون سا افق؟**

جس افق کا عام طور پر تصور کیا جاتا ہے — **واقعہ افق**، یعنی واپس نہ آنے کی حقیقی حد — اس کی ایک باریک مگر پریشان کن

خاصیت ہے: اسے کائنات کے پورے مستقبل سے متعین کیا جاتا ہے۔ یہ جاننے کے لیے کہ واقعہ افق ابھی کہاں ہے، اصولاً یہ جاننا پڑے گا کہ ہمیشہ کے لیے مستقبل میں کیا کچھ بلیک ہول میں گرے گا۔ یہ محض تکنیکی نکتہ نہیں۔ واقعہ افق ایک مکمل خالی اور locally ہموار خطے میں اس مادے کے پہنچنے سے پہلے بڑھنا شروع کر سکتا ہے جو بعد میں بلیک ہول کو خوراک دے گا۔ اس کا رقبہ ایسی جگہ بڑھ سکتا ہے جہاں مقامی طور پر کچھ بھی نہیں ہو رہا۔

> **مادہ پہنچنے سے پہلے horizon کیسے بڑھ سکتا ہے؟**
>
> کا "teleological" یہاں ہے۔ جاتا کہا **global definition** کی اس یا **نیچر teleological کی افق واقعہ** کو الجھن اس ہے۔ بھیجتا پیچھے میں وقت کو اثرات یا ہے، کرتا گوئی پیش کی مستقبل وہ ہے، مقصد کوئی کا افق کہ نہیں یہ مطلب قطعی بغیر جانے تاریخ مستقبل مکمل کی مکان و زمان فیصلہ یہ باہر، یا ہے اندر کے افق واقعہ کوئی کہ ہے یہ صرف مطلب سکتا۔ جا کیا نہیں پر طور
>
> رسمی تعریف یہی بات مختصر کرتی ہے۔ **مستقبل infinity null** — جسے "I-plus" کہا جاتا ہے اور $\mathcal{I}^+$ لکھا جاتا ہے — کو اس منزل کے طور پر سمجھیں جہاں وہ روشنی پہنچتی ہے جو ہمیشہ کے لیے باہر نکل کر لامحدود دور مستقبل تک جا سکے۔ واقعہ افق ان واقعات کی حد ہے جہاں سے باہر کی طرف بھیجا گیا روشنی کا اشارہ کبھی $\mathcal{I}^+$ تک پہنچ سکتا ہے، اور ان واقعات کی جہاں سے کوئی اشارہ کبھی نہیں پہنچ سکتا۔ عمومی اضافیت کی معیاری notation میں یہ مستقبل null infinity کے سببی past کی سرحد ہے: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$۔ تعریف میں "کبھی" شامل ہونے کی وجہ سے صرف یہاں اور ابھی کی پیمائش واقعہ افق کی جگہ عین طور پر نہیں بتا سکتی۔
>
> گرتا ہوا کروی shell اس عجیب بات کو واضح کرتا ہے۔ shell پہنچنے سے پہلے اس کے اندر کا خطہ خالی اور locally ہموار ہو سکتا ہے۔ مرکز سے یکے بعد دیگرے مختلف اوقات میں باہر کی طرف روشنی کی شعاعیں بھیجیں: پہلے والی نکل جاتی ہیں، جبکہ بعد والی shell collapsing سے ایسی جیومیٹری میں ملتی ہیں جہاں سے نکلنا ممکن نہیں۔ واقعہ افق ان دونوں نتائج کی حد ہے۔ اگر اس حد کو وقت میں پیچھے پیچھا کیا جائے تو وہ مرکز سے شروع ہو کر ابھی تک خالی، ہموار اندرونی حصے میں پھیلتی نظر آتی ہے، shell کے وہاں پہنچنے سے پہلے۔ اس وقت بڑھتا ہوا رقبہ کسی مقامی مادے کے بہاؤ کو نہیں دکھا رہا؛ وہ مکمل spacetime میں باقی بچنے والے فرار کے راستوں کو درج کر رہا ہے۔
>
> اس تصویر میں کوئی اثر وقت میں پیچھے نہیں جاتا۔ اگر shell کا راستہ بدل جاتا اور بلیک ہول بنتا ھی نہیں، تو مکمل spacetime مختلف ہوتا اور وہ پہلے والا خطہ واقعہ افق کا حصہ نہ بنتا۔ سبق یہ نہیں کہ مستقبل ماضی کو بدلتا ہے، بلکہ یہ کہ واقعہ افق ایک **عالمی سببی حد** ہے، ایسی سطح نہیں جسے قریب بیٹھا مبصر ایک لمحے میں detect کر سکے۔ اسی لیے بدلتے بلیک ہول کا پیچھا کرنے کے لیے طبیعیات دان quasi-local یا dynamical افق استعمال کرتے ہیں۔

اسی وجہ سے واقعہ افق بلیک ہول کی بدلتی "حالت" کا لمحہ بہ لمحہ حساب رکھنے کے لیے ناموزوں ہے۔ کمپیوٹر سیمولیشن میں بھی سیمولیشن ختم ہونے سے پہلے اسے عین طور پر متعین نہیں کیا جا سکتا، درجۂ حرارت یا اینٹروپی کو ہر لمحہ نظر رکھنا تو اور بھی مشکل ہے۔

اصل قدم: ایسا افق جسے مقامی طور پر متعین کیا جا سکے

Abhay Ashtekar، Daniel Paraizo اور Jonathan Shu کا نیا مقالہ افق کی ایک مختلف قسم پر کام کرتا ہے: **quasi-local افق**، جس کی تعریف صرف اس کے اپنے آس پاس کی جیومیٹری سے ہوتی ہے اور لامحدود مستقبل جاننے کی ضرورت نہیں پڑتی۔ یہ "dynamical افق حصے" وہی سطحیں ہیں جنہیں عددی relativists merger سیمولیشنز میں بلیک ہول تلاش کرنے کے لیے پہلے ہی استعمال کرتے ہیں۔ وجہ سادہ ہے: یہ مقامی ہیں، اور ان کا رقبہ وہیں بڑھتا ہے جہاں حقیقت میں توانائی ان سے گزرتی ہے۔

پھر مصنفین مسئلے کے زیادہ مشکل حصے کو حل کرتے ہیں۔ عام حراریات میں توازن سے بہت دور نظام کو ایک واحد درجۂ

حرارت یا دباؤ دینا مشکل ہوتا ہے، کیونکہ یہ quantities عموماً نظام کے ٹھہرنے پر صاف معنی رکھتی ہیں۔ بلیک ہول کے ساتھ بھی یہی مسئلہ ہے۔ مصنفین عمومی اضافیت کی ایک خاص خاصیت استعمال کرتے ہیں: توازن میں موجود Kerr بلیک ہول صرف دو اعداد سے متعین ہو جاتا ہے، اس کی جسامت اور spin۔ وہ ایک ایسا نقشہ بناتے ہیں جو تیزی سے بدلتے، out-of-equilibrium افق کے ہر لمحے سے اس equilibrium بلیک ہول کے دو اعداد اخذ کرتا ہے جس سے وہ اس لمحے مشابہ ہے۔ یوں شدید طور پر بدلتے بلیک ہول کو بھی **وقت کے ساتھ بدلتا درجۂ حرارت اور spin** دیا جا سکتا ہے۔

ان دو اجزا کے ساتھ — افق سے گزرنے والی مقامی طور پر متعین توانائی، اور ہر لمحے کی intensive quantities — پہلا قانون ایسے بلیک ہولز تک بڑھایا جاتا ہے جو توازن سے جتنے چاہیں دور ہوں۔ اہم بات یہ ہے کہ نیا قانون دو منجمد حالتوں کے درمیان infinitesimal فرق نہیں، بلکہ **حقیقی طبیعی عمل سے پیدا ہونے والی محدود تبدیلی** بیان کرتا ہے: مادہ اور gravitational waves کا افق سے گزرنا۔ اس کے ساتھ ایک ہم آہنگ دوسرا قانون بھی آتا ہے جو اب مقداری ہے: افق کا رقبہ اتنی مقدار میں بڑھتا ہے جس کا براہِ راست تعلق اندر آنے والی توانائی سے ہے۔ دونوں قوانین مل کر ایک صاف نتیجہ دیتے ہیں: انتہائی پرتشدد واقعے کے بیچ بھی بلیک ہول کی اینٹروپی کی مناسب پیمائش اس کے افق کا رقبہ ہی رہتا ہے۔

یہ کیا ثابت نہیں کرتا

- یہ کوانٹم کششِ ثقل **حل نہیں کرتا**۔ نتیجہ کلاسیکی عمومی اضافیت کے اندر ہے اور افق علاقہ کو اینٹروپی کے ساتھ جوڑنے والی معیاری شناخت استعمال کرتا ہے۔ اینٹروپی کو کسی زیادہ بنیادی نظریے سے اخذ نہیں کیا گیا۔
- یہ microstates **نہیں گنتا** اور یہ نہیں بتاتا کہ بلیک ہول کی اینٹروپی آخر کس microscopic چیز سے بنتی ہے۔ تھرموڈائنامک حسابی زبان آگے بڑھتی ہے، اندر کے آزادی کے درجات نہیں کھلتے۔
- یہ سیاہ hole-معلومات paradox **حل نہیں کرتا**۔ وہ مسئلہ کوانٹم نظریے میں ہے؛ یہ مقالہ اسے نہیں چھیڑتا۔
- یہ **مشاہدہ یا پیمائش نہیں**۔ نہ telescope، نہ ڈیٹا، نہ gravitational-wave اشارہ اس نتیجے کی بنیاد ہے؛ یہ ریاضیاتی طبیعیات ہے۔ merging بلیک ہول کا "درجۂ حرارت" یہاں مساوات میں ٹھیک طرح متعین quantity ہے، thermometer کی reading نہیں۔
- یہ Bekenstein اور Hawking کی تصویر کو **الٹتا نہیں**؛ اسے اس dynamical حالت تک بڑھاتا ہے جہاں equilibrium والا اصل قانون خاموش تھا۔

شواہد کتنے مضبوط ہیں؟

اپنی نوعیت کے لحاظ سے مضبوط: میدان کے ایک نمایاں گروہ کا احتیاط سے بنایا ہوا، internally consistent ریاضیاتی طبیعیات کا کام، جو طبعی جائزہ حروف میں *Editors' Suggestion* کے طور پر شائع ہوا؛ ایک companion طویل مقالہ derivations پیش کرتا ہے۔

اصل احتیاط معیار کے بارے میں نہیں، **نتیجے کی نوعیت** کے بارے میں ہے:

- کام اس روایتی شناخت پر قائم ہے کہ افق علاقہ ہی اینٹروپی ہے، یعنی رقبہ کو Newton اور Planck کے constants کے مناسب مجموعے سے تقسیم کیا جاتا ہے۔ اگر مکمل کوانٹم کششِ ثقل نظریہ کبھی اس شناخت کو بدل دے تو تشریح بھی بدلے گی۔
- مرکزی حسابات سب سے عام صورت، یعنی spacelike dynamical افق اور axial symmetry، کے لیے تفصیل سے کیے گئے ہیں۔ مصنفین کہتے ہیں کہ یہ پابندیاں بنیادی نہیں، مگر مکمل عمومی صورت دوسرے نتائج پر بھی انحصار کرتی ہے۔
- "توازن سے باہر بھی اینٹروپی = افق علاقہ" ایک بہت مضبوط **شناخت** ہے جسے نئے پہلے اور دوسرے قوانین قدرتی بناتے ہیں،

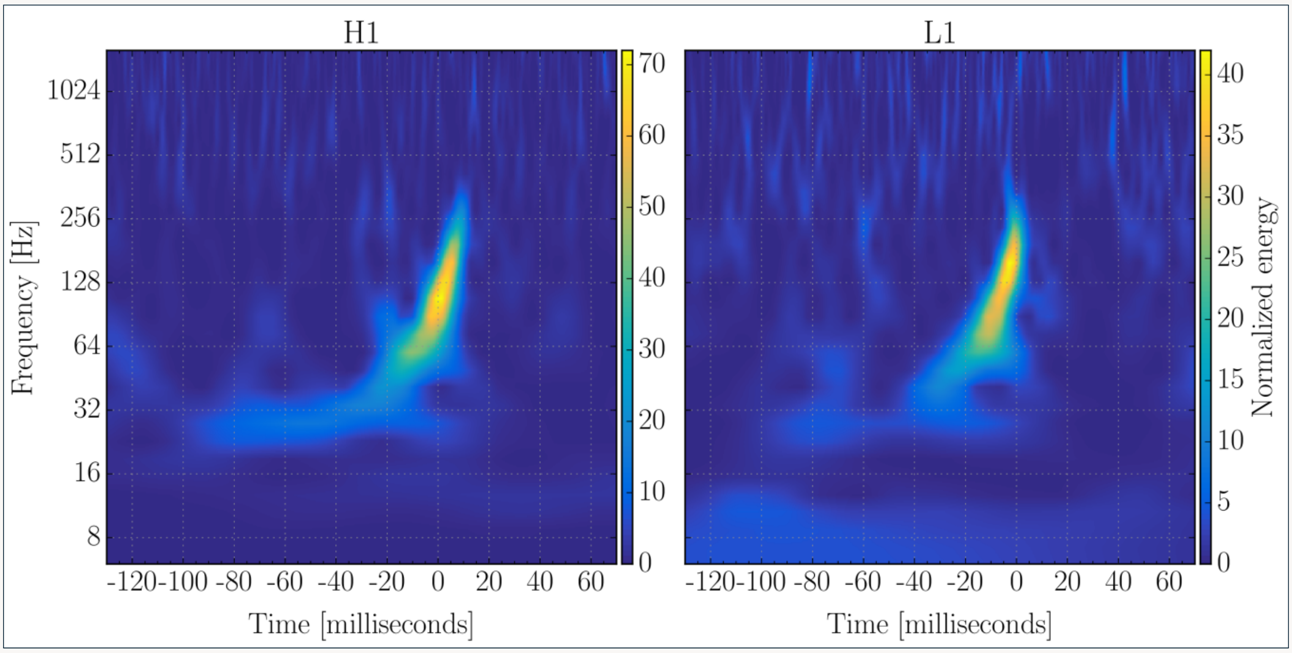
یہ microscopic شماریات سے اخذ شدہ theorem نہیں۔

یعنی یہ پچاس سال پرانے فریم ورک کی سخت توسیع ہے، تجرباتی دریافت نہیں اور نہ کوئی نیا قدرتی قانون جسے ابھی telescope سے جانچا گیا ہو۔

یہ کیوں اہم ہے

دو وجوہ ہیں: ایک عملی، ایک تصوراتی۔

عملی طور پر، جن بلیک ہولز کا ہم آج واقعی مطالعہ کرتے ہیں — جن کے mergers کو LIGO اور Virgo سنتے ہیں — وہ اپنے اہم ترین لمحات توازن سے بہت دور گزارتے ہیں۔ اس مقالے کی quantities انہی مقامی افق سے بنتی ہیں جنہیں سیمولیشنز پہلے ہی نظر رکھتی ہیں، اس لیے merger یا collapse کے **دوران** بلیک ہول کی اینٹروپی اور درجۂ حرارت پر اصولی طور پر بات کرنے کا راستہ ملتا ہے، صرف پہلے اور بعد میں نہیں۔



GW150914، براہِ راست دریافت ہونے والا پہلا gravitational-wave اشارہ، دو بلیک ہولز کے merger سے آیا تھا۔ یہ تعدد-time نقشے Hanford LIGO (بائیں) اور Livingston LIGO (دائیں) میں اشارہ دکھاتے ہیں: دونوں آلاتِ شناخت میں روشن لکیر اوپر جاتی ہے کیونکہ merger کے قریب تعدد بڑھتی ہے۔ یہ توازن سے بہت دور بلیک ہول نظام کی حقیقی مثال ہے؛ نئے تھرموڈائنامک فریم ورک کے لیے پس منظر ہے، اس فریم ورک کا مشاہداتی شواہد نہیں۔

LIGO Scientfiic Collaboration and Virgo Collaboration / Classical and Quantum Gravity, Fig. 10 CC BY 0.3

تصوراتی طور پر، بلیک ہولز کا تھرموڈائنامک رویہ کوانٹم کششِ ثقل کے بارے میں ہمارے چند ٹھوس اشارے میں سے ایک ہے — یہی وہ جگہ ہے جہاں کششِ ثقل، کوانٹم نظریہ اور حراریات کھل کر ایک دوسرے سے ملتے ہیں۔ تیزی سے بدلتے بلیک ہول کے لیے "اینٹروپی" اور "درجۂ حرارت" کا مطلب زیادہ درست بنانا اس ہدف کو واضح کرتا ہے جسے مستقبل کے کسی کوانٹم-کششِ ثقل نظریے کو پورا کرنا ہو گا۔ یہ اس گہرے سوال کا جواب نہیں دیتا کہ بلیک ہول اینٹروپی حقیقت میں **ہے کیا**۔ یہ سوال کو زیادہ ٹھیک انداز میں بیان کرتا ہے — اور اس شعبے میں یہ خود اہم پیش رفت ہے۔

صاف خلاصہ

بلیک ہولز ایسے قوانین مانتے ہیں جو حراریات کی نقل دکھائی دیتے ہیں، مگر 1973 کا صاف "پہلا قانون" صرف توازن میں موجود دو خاموش بلیک ہولز کا موازنہ کرتا تھا اور حقیقی عمل بیان نہیں کر سکتا تھا۔ Ashtekar، Paraizo اور Shu مقامی طور پر متعین dynamical افق اور ایک ایسے نقشہ کی مدد سے، جو بدلتے بلیک ہول کو ہر لمحے کا درجۂ حرارت اور spin دیتا ہے، پہلے اور دوسرے دونوں قوانین کو merger، مادہ جمع ہونے اور ringdown جیسے far-سے-equilibrium حالات تک بڑھاتے ہیں۔ نتیجہ یہ ہے کہ شدید واقعات کے دوران بھی افق علاقہ اینٹروپی کی مناسب پیمائش رہتا ہے۔ یہ کلاسیکی عمومی اضافیت کا سخت نتیجہ ہے؛ کوانٹم کششِ ثقل نہیں، مشاہدہ نہیں، microstates کی گنتی نہیں، اور معلومات paradox کا حل نہیں۔

بلا مبالغہ جائزہ

مقالے کیا دکھاتا ہے: بلیک ہول میکانیات کے پہلے اور دوسرے قوانین کی ایک ریاضیاتی طور پر consistent توسیع مکمل، dynamical، far-سے-equilibrium بلیک ہولز تک، جو dynamical quasi-local افق پر قائم ہے۔ یہ عمل-پر مبنی محدود پہلا قانون اور مقداری دوسرا قانون متعین کرتا ہے، اور dynamical بلیک ہول کی اینٹروپی کو افق علاقہ سے جوڑنا قدرتی بناتا ہے۔

کیا حقیقی نتیجہ ہے مگر تشریح پر منحصر: توازن سے باہر بھی "اینٹروپی = افق علاقہ" کی شناخت۔ نئے قوانین اسے بہت معقول بناتے ہیں، مگر یہ معیاری کلاسیکی علاقہ-اینٹروپی assumption کو استعمال کرتی ہے، اسے microscopic شماریات سے اخذ نہیں کرتی۔

یہ کیا نہیں دکھاتا: کوانٹم کششِ ثقل کا نظریہ، بلیک ہول اینٹروپی کی microscopic اصل یا اس کی "گنتی"، معلومات paradox کا حل، کوئی مشاہداتی یا experimental نتیجہ، یا ایسا درجۂ حرارت جسے عملی thermometer سے پڑھا جا سکے۔

اہم حدود: پورا تجزیہ کلاسیکی عمومی اضافیت میں ہے؛ مرکزی نتائج عام، axisymmetric spacelike صورت کے لیے ثابت کیے گئے ہیں اور زیادہ عمومی صورت work companion کے ذریعے جواز پاتی ہے؛ علاقہ-اینٹروپی شناخت مفروضہ ہے، شماریاتی mechanics سے ثابت شدہ نتیجہ نہیں۔

عام قاری کو کتنا اعتماد رکھنا چاہیے؟ اس بات پر زیادہ اعتماد کہ یہ ایک مضبوط، معتبر نظریاتی پیش رفت ہے جو بلیک ہول حراریات کو واقعی dynamical حالت تک بڑھاتی ہے۔ اتنا ہی زیادہ اعتماد کہ یہ نئی مشاہداتی دریافت، کوانٹم کششِ ثقل، یا مشہور معلومات معما کا حل نہیں ہے۔ درست خلاصہ: telescope سے نہیں، ریاضی سے اٹھایا گیا ایک حقیقی قدم۔

ماخذ

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