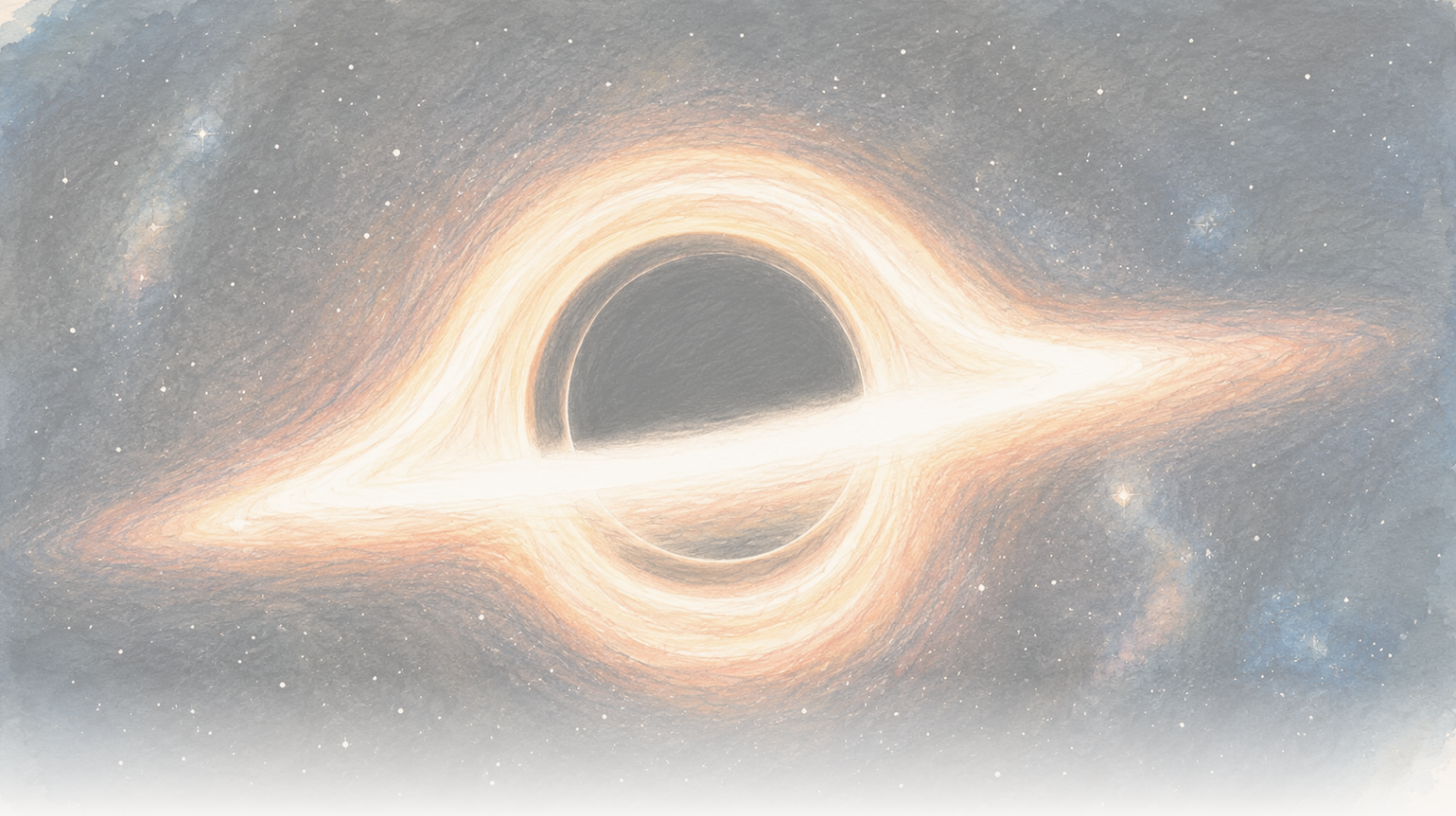




The CLEAN PAPER

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

الثقوب السوداء تخضع لـ«قوانين» ترموديناميكية — نتيجة جديدة تمدها إلى ثقوب سوداء بعيدة بعنف عن الاتزان

منذ سبعينيات القرن العشرين يُعرف أن الثقوب السوداء تخضع لقوانين تشبه الديناميكا الحرارية، لكن أنظف صياغة كانت تنطبق فقط على ثقوب سوداء ساكنة في الاتزان. تمدد ورقة جديدة في *Letters Review Physical* القانونين الأول والثاني إلى ثقوب سوداء تتغير بسرعة — تبتلع مادة، تندمج، وتشتع — باستخدام «آفاق ديناميكية» معرفة محلياً. وتتيح للفيزيائيين إسناد حرارة وإنتروبيا حتى لثقب أسود يتطور بعنف. إنها نتيجة رياضية في النسبية العامة الكلاسيكية، لا جاذبية كمومية جديدة، ولا رصدًا، ولا حلاً لمعضلة معلومات الثقب الأسود.

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: 1103/3c1r-v8f1.10

لثقوب السوداء «قوانين» تشبه الديناميكا الحرارية. النسخة المرتبة منها كانت تعمل فقط عندما لا يحدث شيء

من أغرب حقائق الفيزياء أن الثقوب السوداء تنصرف كأجسام ساخنة. ففي أوائل سبعينيات القرن العشرين لاحظ Bekenstein و Hawking أن المعادلات التي تحكم الثقوب السوداء تتطابق، حداً مقابل حد، مع قوانين الديناميكا الحرارية: للثقب الأسود إنتروبيا تتناسب مع مساحة أفقه، ودرجة حرارة تتناسب مع جاذبية سطحه. ثم أظهر Hawking أن درجة الحرارة حقيقية بأعمق معنى للكلمة — فالثقب الأسود يتوهج فعلاً، وإن بخفوت شديد، بإشعاع حراري.

ما إشعاع هوكينغ؟

في الإطلاق. على حرارة درجة له تكون وألا تماماً أسود يكون أن يفترض ولذلك الأسود، الثقب من شيء يفلت لا كلاسيكياً توهجاً الأسود الثقب يصدر الأفق: قرب الحسبان في الكم نظرية تؤخذ عندما يتغير هذا أن Stephen Hawking أظهر 1974 عام عبر الانتشار عملية تعدل بينما هوكينغ، حرارة درجة عند حرارياً الطيف يكون «يتبخّر». أو ببطء، ككته يفقد ولذلك خافتاً، حرارياً التقلبات تنشئ — لهوكينغ الفعلي الاشتقاق وليست — شائعة توضيحية صورة وفي اللانهاية. إلى يصل الذي الإشعاع المنحني الزمكان الداخل. إلى الآخر يسقط بينما كإشعاع طرفياً أحد يهرب أزواجاً مباشرة الأفق خارج الكومية السمة الأساسية هي أن هذه الحرارة تتناسب عكسياً مع كتلة الثقب الأسود: كلما صغر الثقب ارتفعت حرارته. وبالنسبة إلى أي ثقب أسود يمكن لتلسكوب أن يراه، تكون الحرارة منخفضة بصورة مذهلة — أبعد بكثير من الفضاء المحيط — لذلك يكون التوهج عملياً ضئيلاً إلى حد لم يُقَس مباشرة قط. أهميته مفاهيمية: إشعاع هوكينغ هو ما يحول التشابه بين ميكانيكا الثقوب السوداء والديناميكا الحرارية إلى علاقة فيزيائية حقيقية. ولأن للثقب حرارة فعلية، فإن «الحرارة» و«الإنتروبيا» في هذه القوانين كميات ترموديناميكية حقيقية، لا مجرد مصادفة شكلية. (هذا خلفية للورقة الحالية، وليس إحدى نتائجها.)

يرتكز هذا التطابق على نتيجة تسمى القانون الأول لميكانيكا الثقوب السوداء (Bardeen و Carter و Hawking، 1973). وبالكلمات، يقول: إذا دفعت ثقباً أسود من حالة مستقرة إلى حالة مستقرة قريبة منها، فإن تغير كتلته يساوي حرارته مضروبة في تغير إنتروبيته، إضافة إلى حد يخص دورانه. إنه النسخة الخاصة بالثقب الأسود من «الحرارة الداخلة تساوي درجة الحرارة في تغير الإنتروبيا».

لكن هناك مشكلة مخفية في عبارة حالة مستقرة قريبة. فالقانون النظيف لعام 1973 يقارن بين ثقبين أسودين جالسين بهدوء في حالة اتزان، لا يختلفان إلا اختلافاً متناهياً في الصغر. ولا يصف فعلياً عملية — مثل ثقب أسود يبتلع نجماً، أو ثقبين أسودين يندجان، أو ثقب وولد يهدأ بعد ولادة عنيفة. وهذه بالضبط هي الحالات التي نريد فهمها أكثر، وهي نقيض «الجلوس بهدوء». يصمت القانون المرتب في اللحظة التي يصبح فيها الثقب الأسود مثيراً للاهتمام.

لماذا لا يعمل الحل البديهي؟

قد يبدو الحل سهلاً: راقب الأفق وهو يكبر عندما تسقط المادة. المشكلة هي: أي أفق؟

الأفق الذي يتصوره معظم الناس — أفق الحدث، أي حد اللاعودة الحقيقي — يملك خاصية دقيقة ومحرجة: يُعرّف بتاريخ الكون المستقبلي كله. لكي تعرف أين يقع أفق الحدث الآن، ستحتاج إلى معرفة كل ما سيسقط في الثقب إلى الأبد. هذه ليست تفصيلاً تقنية. يمكن لأفق الحدث أن يبدأ بالفو في منطقة من الفضاء فارغة ومسطحة تماماً قبل وصول المادة التي ستغذي، لمجرد أن تلك المادة مقدر لها أن تصل لاحقاً.

ويمكن لمساحته أن تزداد في مكان لا يحدث فيه محلياً أي شيء.

كيف يمكن للأفق أن يفوق وصول المادة؟

غرضاً، للأفق أن تعني لا هنا «غائي» كلمة. العالمي تعريفه أيضاً ويقال، الحدث لأفق الغائية الطبيعة هو المعضلة لهذه العلبي الاسم أن يمكن لا الأفق داخل يقع ما حدث كان إذا ما تحديد أن تعني بل الزمن. عبر الورا إلى تأثيراً يرسل أو بالمستقبل، يتنبأ أنه أو للزمكان. الكامل المستقبلي التاريخ من إلا يتم التعريف الرسمي يقول الشيء نفسه بصورة أكثر اختصاراً. تخيل اللانهاية الضوئية المستقبلية — التي تسمى «آي-بلس» وكتب I^+ — بوصفها الوجهة التي يصل إليها الضوء الذي يهرب إلى الأبد نحو مستقبل فارغ وبعيد بلا نهاية. أفق الحدث هو الحد الفاصل بين الأحداث التي يمكن لإشارة ضوئية خارجة منها أن تصل في النهاية إلى تلك الوجهة والأحداث التي لا تستطيع أي إشارة منها الوصول إليها أبداً. وفي الترميز القياسي للنسبية العامة، هو حد الماضي السببي لللانهاية الضوئية المستقبلية: $J^0(I^+)$. ولأن كلمة أبداً جزء من التعريف نفسه، فلا يمكن لأي قياس يُجرى هنا والآن فقط أن يحدد أفق الحدث بدقة. يجعل غلاف كروي منهار الغرابة مرئية. قبل وصول الغلاف، يمكن أن تكون المنطقة داخله فارغة ومسطحة محلياً. أرسل أشعة ضوئية إلى الخارج من المركز في أزمنة متعاقبة: الأشعة المبكرة تهرب، بينما تلتقي الأشعة اللاحقة بالغلاف المنهار داخل هندسة لا يمكنها الخروج منها. أفق الحدث هو الحد الفاصل بين النتيجة. وإذا تتبعناه إلى الورا، يبدأ هذا الحد من المركز ويمتد عبر الداخل الذي ما يزال فارغاً ومسطحاً قبل أن يصل الغلاف إليه. ثم المساحة لا يبلغ عن تدفق محلي للمادة هناك؛ بل يسجل أي مسارات للهروب تبقى مفتوحة في الزمكان المكتمل. لا شيء في هذه الصورة يعمل إلى الورا في الزمن. لو حُرِف الغلاف ولم يتشكل ثقب أسود، لكان الزمكان المكتمل مختلفاً ولما كانت تلك المنطقة السابقة جزءاً من أفق حدث. الدرس ليس أن المستقبل يغير الماضي، بل أن أفق الحدث حد سببي عالمي، لا سطحاً يستطيع مراقب قريب اكتشافه في لحظة واحدة. ولهذا تحديداً يستخدم الفيزيائيون آفاقاً شبه محلية أو ديناميكية عندما يحتاجون إلى تتبع ثقب أسود أثناء تغيره.

وهذا يجعل أفق الحدث غير مناسب كسجل جارٍ لـ «حالة» الثقب الأسود. فلا يمكنك حتى تحديد مكانه في محاكاة حاسوبية قبل انتهاء المحاكاة، وبالتأكيد لا تستطيع استخدامه لتتبع حرارة أو إنتروبيا لحظة بلحظة.

الخطوة الأساسية: أفق يمكنك تعريفه محلياً

تبني الورقة الجديدة، لـ Shu، Jonathan و Paraizo Daniel و Ashtekar Abhay، نتيجتها على مفهوم مختلف للأفق — مفهوم شبه محلي، يُعرف فقط من الهندسة في جواره، من دون الرجوع إلى المستقبل اللانهائي. هذه «مقاطع الأفق الديناميكي» هي الأسطح التي يستخدمها بالفعل باحثو النسبية العددية للعثور على الثقوب السوداء في محاكاة الاندماجات، بالضبط لأنها محلية وصريحة: لا تنمو مساحتها إلا حيث تعبر الطاقة فعلياً خلالها.

وفوق ذلك، يحل المؤلفون النصف الأصعب من المشكلة. ففي الديناميكا الحرارية العادية، يكون النظام البعيد عن الاتزان مرادفاً: لا يمكنك أن تعطيه بدقة درجة حرارة أو ضغطاً واحداً لأن هذه الكميات لا تُعرف جيداً إلا بعد استقرار الأشياء. وتعاني الثقوب السوداء من المشكلة نفسها — إلى أن تستفيد، كما يبين المؤلفون، من خاصية خاصة للنسبية العامة. فالثقب الأسود في الاتزان (ثقب Kerr) تحدده رقان فقط: حجمه ودورانه. لذلك يبنّي المؤلفون خريطة تأخذ أي أفق يتطور بعنف وبعيداً عن الاتزان وتقرأ، عند كل لحظة، الرقن الخاصين بالثقب الأسود المترن الذي يشبهه آنياً. ومن خلال هذه الخريطة يمكن إسناد درجة حرارة ودوران معتمدين على الزمن إلى ثقب أسود يتغير بعنف.

بهذه المكونات — طاقة معرفة محلياً تعبر الأفق، وكميات مكثفة آتية — يمددون القانون الأول إلى ثقوب سوداء بعيدة كيفما كان عن الاتزان. والأهم أن القانون الجديد يصف تغيرات منتهية ناتجة عن عمليات فيزيائية حقيقية (مادة وموجات ثقالية تعبر الأفق)، لا خطوات متناهية في الصغر بين حالتين مجعدين. ويقرنونه بقانون ثان مطابق أصبحت عبارته الآن كمية: تزداد مساحة الأفق بمقدار مرتبط مباشرة بالطاقة التي تدفقت إلى الداخل. وجميع القانونين، يشيران إلى خلاصة واحدة نظيفة — حتى بالنسبة إلى ثقب أسود في قلب أعنف حدث يمكن تخيله، يبقى المقياس الصحيح للإنتروبيا هو مساحة أفقه.

ما الذي لا تثبته هذه الدراسة؟

- إنها لا تحل الجاذبية الكمومية. هذه نتيجة في النسبية العامة الكلاسيكية، تستخدم التعريف القياسي لمساحة الأفق باعتبارها إنتروبيا. ولا تشتق تلك الإنتروبيا من شيء أكثر أساسية.
- إنها لا تعد الحالات المجهرية ولا تفسر مع تتكون إنتروبيا الثقب الأسود. إنها توسع الإطار الحسابي لترموديناميك الثقوب السوداء؛ ولا تفتح الصندوق لتكشف درجات الحرية المجهرية.
- إنها لا تحل مفارقة معلومات الثقب الأسود. تلك المعضلة تعيش في النظرية الكمومية؛ وهذه الورقة لا تعالجها.
- إنها ليست رصداً أو قياساً. لا تلسكوب ولا بيانات ولا إشارة موجات ثقالية تدخل في النتيجة — هذا عمل رياضي. و«حرارة» الثقب الأسود المندمج هنا كمية معرفة بدقة في المعادلات، لا شيئاً يمكن قراءته بميزان حرارة.
- إنها لا تقلب عمل Hawking و Bekenstein. بل تمدده إلى النظام الديناميكي الذي لم يكن للقانون الأصلي، المقصور على الاتزان، ما يقوله عنه.

ما مدى قوة الأدلة؟

قوية بالنسبة إلى نوعها: قطعة دقيقة ومتسقة داخلياً من الفيزياء الرياضية من مجموعة بارزة في المجال، نُشرت كـ *Suggestion Editors' Letters Review Physical* (مع ورقة مصاحبة تعرض الاشتقاقات الأطول).

أما التحفظات الصادقة فتتعلق بالنوع، لا بالجودة:

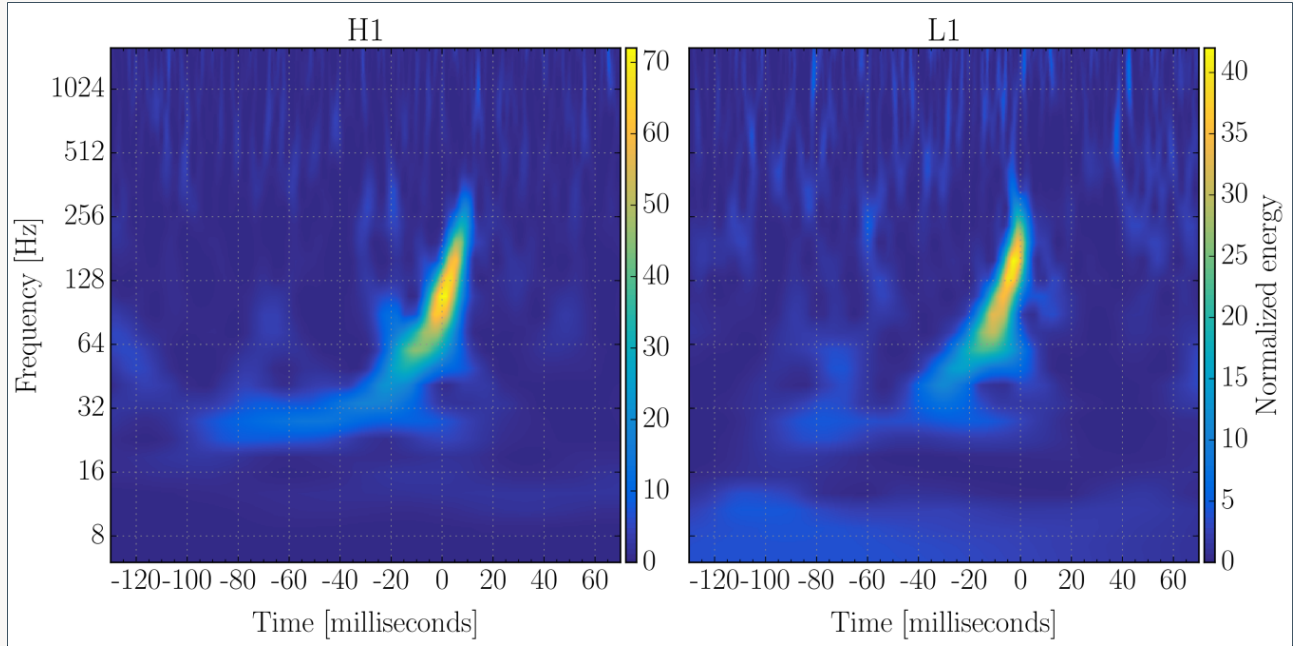
- تعتمد النتيجة على الافتراض التقليدي أن مساحة الأفق هي الإنتروبيا (المساحة مقسومة على أربعة أضعاف ثابت نيوتن وثابت بلانك). إذا عدلت نظرية كاملة للجاذبية الكمومية هذا التعريف يوماً، فسيتغير التفسير معه.
- الحسابات الرئيسية مفصلة للحالة الأكثر شيوعاً (آفاق ديناميكية مكانية ومتناظرة محورياً)، ويجادل المؤلفون بأن القيود ليست جوهرية، لكن العبارة العامة بالكامل تعتمد على نتائج في أعمال أخرى.
- «الإنتروبيا تساوي مساحة الأفق حتى خارج الاتزان» تعريف مقنع تجعله القوانين الجديدة طبيعياً — وليس مبرهنة مشتقة من إحصاء مجهري.

إذن: تمديد صارم لإطار عمره خمسون عاماً، لا اكتشافاً تجريبياً ولا قانوناً جديداً للطبيعة ينتظر الاختبار.

لماذا يهم هذا؟

لسببين، أحدهما عملي والآخر مفاهيمي.

عملياً، الثقوب السوداء التي ندرسها الآن فعلياً — تلك التي يسمع LIGO وVirgo اندماجها — تقضي أهم لحظاتها بعيداً عن الاتزان. الكميات في هذه الورقة مبنية من الآفاق المحلية نفسها التي تتبعها المحاكاة بالفعل، ولذلك تعطي طريقة مبدئية للحديث عن إنتروبيا وحرارة ثقب أسود أثناء اندماج أو انهيار، لا قبل الحدث وبعده فقط.



GW150914، أول إشارة موجات ثقالية كُشفت مباشرة، جاءت من اندماج ثقبين أسودين. تعرض خريطتنا الزمن-التردد الإشارة في LIGO Hanford (يسار) وLivingston LIGO (يمين): في كلا الكاشفين يرتفع المسار الساطع مع ازدياد تردد الإشارة نحو الاندماج. هذا مثال حقيقي على نظام ثقوب سوداء بعيد عن الاتزان؛ وهو سياق للإطار الترموديناميكي الجديد، لا دليل رصدي عليه.

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

ومفاهيمياً، السلوك الترموديناميكي للثقوب السوداء واحد من الأدلة القليلة الملموسة لدينا عن الجاذبية الكمومية — فهو المكان الذي تلتقي فيه الجاذبية ونظرية الكم والديناميكا الحرارية بصورة ظاهرة. إن جعل معنى «الإنتروبيا» و«درجة الحرارة» أكثر دقة لثقب أسود يتغير بعنف يجعل الهدف الذي يجب على أي نظرية كمومية مستقبلية إصابته أكثر تحديداً. ولا يجب عن السؤال العميق: ما هي إنتروبيا الثقب الأسود حقاً؟ لكنه يصوغ السؤال بدقة أكبر — وفي هذا الركن من الفيزياء، ذلك جزء كبير من العمل.

الخلاصة الواضحة

تخضع الثقوب السوداء لقوانين تشبه الديناميكا الحرارية، لكن «القانون الأول» النظيف لعام 1973 كان يقارن فقط ثقوباً سوداء ساكنة في الاتزان ولم يستطع وصف عملية فعلية. يمدد Shu وParaizo وAshtekar القانونين الأول والثاني إلى ثقوب سوداء بعيدة كيفما كان عن الاتزان — تندمج، أو تبتلع مادة، أو تهدأ بعد الاضطراب — باستخدام «آفاق ديناميكية» معرفة محلياً وخريطة تسند إلى الثقب الأسود

المتغير حرارة ودوراناً لحظيين. والخلاصة أن مساحة الأفق تبقى المقياس المناسب للإنتروبيا حتى أثناء الأحداث العنيفة. هذه نتيجة صارمة في النسبية العامة الكلاسيكية، لا في الجاذبية الكمومية، وليست رصدًا، ولا إحصاء للحالات المجهرية، ولا حلاً لمفارقة المعلومات.

مراجعة بلا تهويل

ما الذي تُظهره الورقة: تمديد متسق رياضياً للقانونين الأول والثاني لميكانيكا الثقوب السوداء إلى ثقوب سوداء ديناميكية بالكامل وبعيدة عن الاتزان، مبني على آفاق ديناميكية شبه محلية. ويعرّف قانوناً أول منتبهاً قائماً على العملية وقانوناً ثانياً كمياً، ويجعل من الطبيعي تعريف إنتروبيا الثقب الأسود الديناميكي بمساحة أفقه.

ما هو حقيقي لكنه تفسيري: تعريف «الإنتروبيا = مساحة الأفق» خارج الاتزان. تجعله القوانين الجديدة مقنعاً، لكنه يرث الافتراض الكلاسيكي القياسي الخاص بالمساحة والإنتروبيا بدلاً من اشتقاقه.

ما الذي لا تُظهره: نظرية كمومية للجاذبية؛ أصلاً مجهرياً أو «عداً» لإنتروبيا الثقب الأسود؛ حلاً لمفارقة المعلومات؛ أي نتيجة رصدية أو تجريبية؛ أو درجة حرارة يمكن قياسها فيزيائياً.

القيود الرئيسية: النسبية العامة الكلاسيكية في كل مكان؛ أثبتت النتائج الرئيسية للحالة الشائعة المكانية المتناظرة محورياً مع الاستدلال على العمومية عبر عمل مصاحب، وتعريف المساحة-الإنتروبيا مفترض لا مشتق من الميكانيكا الإحصائية.

ما مقدار الثقة المناسبة للقارئ العام؟ ثقة عالية بأن هذا تقدم نظري متين ومحترم يوسع ترموديناميك الثقوب السوداء فعلاً إلى النظام الديناميكي. وثقة عالية بالقدر نفسه بأنه ليس ادعاءً عن رصد جديد، ولا جاذبية كمومية، ولا حلاً لمعضلة المعلومات الشهيرة. الموقف الصحيح: خطوة حقيقية في الفهم، أُنجزت بالطباشير لا بالتلسكوب.

المصادر

251405 ,136 Lett. Rev. Phys. Equilibrium, from Far Holes, Black of Thermodynamics Shu, & Paraizo Ashtekar, (2026)

<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>