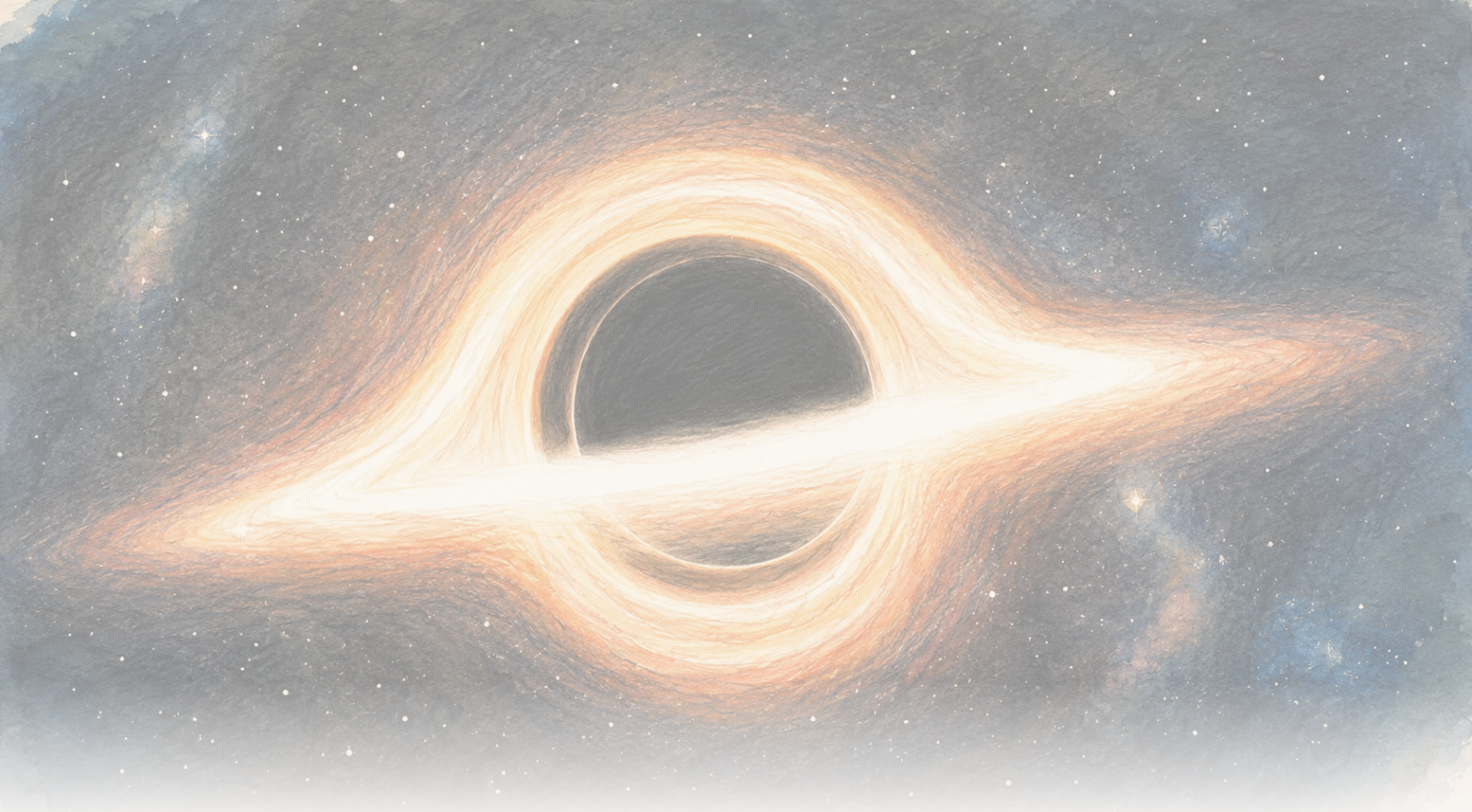




The CLEAN PAPER

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

Los agujeros negros obedecen «leyes» termodinámicas — un nuevo resultado las extiende a agujeros negros violentamente alejados del equilibrio

Desde la década de 1970 se sabe que los agujeros negros obedecen leyes que reflejan la termodinámica, pero la versión más limpia solo se aplicaba a agujeros negros quietos y en equilibrio. Un nuevo artículo de Physical Review Letters extiende la primera y la segunda ley a agujeros negros que cambian con rapidez —engullendo materia, fusionándose o radiando— mediante «horizontes dinámicos» definidos localmente. Permite asignar temperatura y entropía incluso a un agujero negro en evolución violenta. Es un resultado matemático de relatividad general clásica, no nueva gravedad cuántica, no una observación y no una resolución del problema de la información de los agujeros negros.

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

Los agujeros negros tienen «leyes» parecidas a la termodinámica. La versión ordenada solo funcionaba cuando no ocurría nada

Uno de los hechos más extraños de la física es que los agujeros negros se comportan como objetos calientes. A principios de la década de 1970, Bekenstein y Hawking observaron que las ecuaciones que gobiernan los agujeros negros coinciden, término por término, con las leyes de la termodinámica: un agujero negro tiene una entropía proporcional al área de su horizonte y una temperatura proporcional a su gravedad superficial. Hawking demostró después que la temperatura es real en el sentido más profundo: un agujero negro brilla realmente, aunque de forma muy débil, mediante radiación térmica.

¿Qué es la radiación de Hawking?

Clásicamente, nada escapa de un agujero negro, por lo que debería ser perfectamente negro y no tener temperatura alguna. En 1974, Stephen Hawking mostró que eso cambia cuando se tiene en cuenta la teoría cuántica cerca del horizonte: un agujero negro emite un débil resplandor térmico y, por tanto, pierde masa lentamente o «se evapora». El espectro es térmico a la temperatura de Hawking, aunque la propagación por el espacio-tiempo curvo modifica la radiación que llega al infinito. En una imagen heurística común —que no es la derivación real de Hawking—, las fluctuaciones cuánticas justo fuera del horizonte crean pares en los que una partícula escapa como radiación y la otra cae dentro.

La característica clave es que esta temperatura es *inversamente* proporcional a la masa del agujero negro: cuanto menor es, más caliente está. Para cualquier agujero negro que pudiera ver un telescopio, la temperatura es extraordinariamente baja —muy inferior a la del espacio vacío que lo rodea—, por lo que en la práctica el resplandor es completamente despreciable y nunca se ha medido directamente. Su importancia es conceptual: la radiación de Hawking convierte la *analogía* entre la mecánica de los agujeros negros y la termodinámica en algo real. Como el agujero posee de verdad una temperatura, la «temperatura» y la «entropía» de estas leyes son magnitudes termodinámicas reales, no una coincidencia formal. (Es contexto para el artículo actual, no uno de sus resultados.)

Esa correspondencia está anclada por un resultado llamado **primera ley de la mecánica de los agujeros negros** —Bardeen, Carter y Hawking, 1973—. Expresada con palabras, afirma lo siguiente: si se desplaza ligeramente un agujero negro desde un estado estacionario hasta otro estado estacionario cercano, el cambio de su masa es igual a su temperatura multiplicada por el cambio de su entropía, más un término correspondiente a su giro. Es la versión para agujeros negros de «el calor aportado es igual a la temperatura por el cambio de entropía».

Hay una dificultad escondida en la expresión *estado estacionario cercano*. La elegante ley de 1973 compara dos agujeros negros que permanecen tranquilamente en equilibrio y difieren solo de manera infinitesimal. Nunca describe realmente un **proceso**: un agujero negro que engulle una estrella, dos agujeros negros que se fusionan o uno recién nacido que oscila tras un origen violento. Son

precisamente las situaciones que más queremos comprender, y son lo contrario de «permanecer quieto». La ley ordenada se queda muda justo cuando el agujero negro se vuelve interesante.

Por qué no funciona la solución obvia

Podría parecer que la solución es fácil: basta con observar cómo crece el horizonte mientras cae materia. El problema es *qué* horizonte.

El horizonte que la mayoría imagina —el **horizonte de sucesos**, el verdadero punto de no retorno— posee una propiedad sutil e incómoda: se define mediante todo el futuro del universo. Para saber dónde está el horizonte de sucesos *ahora mismo*, habría que conocer todo lo que caerá alguna vez en el agujero, para siempre. No es una técnica. Un horizonte de sucesos puede empezar a crecer en una región del espacio completamente vacía y plana *antes* de que llegue la materia que lo alimentará, simplemente porque esa materia está destinada a llegar más tarde. Su área puede aumentar donde, localmente, no ocurre absolutamente nada.

¿Cómo puede crecer un horizonte antes de que llegue la materia?

El nombre científico de este rompecabezas es **naturaleza teleológica del horizonte de sucesos**, también llamada su **definición global**. Aquí, «teleológico» no significa que el horizonte tenga un propósito, prediga el futuro o envíe una influencia hacia atrás en el tiempo. Significa que solo puede decidirse si un suceso pertenece al interior del horizonte conociendo la historia futura completa del espacio-tiempo.

La definición formal expresa lo mismo de forma más compacta. Imagine el **infinito nulo futuro** —llamado «I más» y escrito $\mathcal{I}^+$ — como el destino al que llega la luz que escapa para siempre hacia un futuro por lo demás vacío e infinitamente lejano. El horizonte de sucesos es la frontera entre los acontecimientos desde los que una señal luminosa dirigida hacia fuera puede llegar finalmente a ese destino y aquellos desde los que ninguna señal podrá hacerlo jamás. En la notación estándar de la relatividad general, es la frontera del pasado causal del infinito nulo futuro: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Como la palabra *jamás* está incorporada en la definición, ninguna medición realizada únicamente aquí y ahora puede localizar exactamente el horizonte de sucesos.

Una capa esférica en colapso hace visible la rareza. Antes de que llegue la capa, la región de su interior puede estar vacía y ser localmente plana. Envíe rayos de luz hacia fuera desde el centro en momentos cada vez posteriores: los primeros escapan, mientras que los posteriores encuentran la capa en colapso dentro de una geometría de la que ya no pueden salir. El horizonte de sucesos es la frontera que separa ambos resultados. Si se sigue hacia atrás, esa frontera comienza en el centro y se expande por el interior todavía vacío y plano antes de que llegue la capa. El crecimiento de su área no comunica ningún flujo local de materia; registra qué rutas de escape siguen abiertas en el espacio-tiempo completo.

Nada en esta imagen actúa hacia atrás en el tiempo. Si la capa se desviara y no se formara un agujero negro, el espacio-tiempo completo sería distinto y aquella región anterior no habría

formado parte de un horizonte de sucesos. La lección no es que el futuro cambie el pasado, sino que el horizonte de sucesos es una **frontera causal global**, no una superficie que pueda detectar un observador cercano en un instante. Precisamente por eso los físicos utilizan horizontes cuasilocales o dinámicos cuando necesitan seguir un agujero negro mientras cambia.

Eso vuelve inútil al horizonte de sucesos como registro continuo del «estado» de un agujero negro. Ni siquiera puede localizarse en una simulación informática hasta que esta ha terminado, y mucho menos utilizarse para seguir una temperatura o una entropía instantánea a instantánea.

El cambio: un horizonte que puede definirse localmente

El nuevo artículo, de Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo y Jonathan Shu, construye su resultado sobre una noción distinta de horizonte: una noción **cuasilocal**, definida únicamente por la geometría de su entorno inmediato, sin referencia al futuro infinito. Estos «segmentos de horizonte dinámico» son las superficies que ya utilizan los relativistas numéricos para localizar agujeros negros en simulaciones de fusiones, precisamente porque son locales y honestas: su área solo crece donde realmente cruza energía.

Además, los autores resuelven la mitad más difícil del problema. En la termodinámica ordinaria, un sistema lejos del equilibrio resulta notoriamente escurridizo: no puede asignársele de manera limpia una única temperatura o presión, porque esas magnitudes solo quedan definidas cuando las cosas se estabilizan. Los agujeros negros presentan el mismo problema, hasta que —muestran los autores— se utiliza una característica especial de la relatividad general. Un agujero negro *en* equilibrio —un agujero negro de Kerr— queda determinado por solo dos números: su tamaño y su giro. Los autores construyen así un mapa que toma cualquier horizonte en evolución violenta y fuera del equilibrio y extrae, en cada instante, los dos números del agujero negro de equilibrio al que se parece momentáneamente. Mediante ese mapa, incluso a un agujero negro que cambia violentamente puede asignársele una **temperatura y un giro dependientes del tiempo**.

Con esas piezas —una energía definida localmente que fluye a través del horizonte y magnitudes intensivas instantáneas—, extienden la primera ley a agujeros negros arbitrariamente alejados del equilibrio. De manera crucial, la nueva ley describe **cambios finitos causados por procesos físicos reales** —materia y ondas gravitacionales cruzando el horizonte—, no pasos infinitesimales entre dos estados congelados. La acompañan de una segunda ley correspondiente cuyo enunciado pasa a ser *cuantitativo*: el área del horizonte aumenta en una cantidad ligada directamente a la energía que entró. Juntas, la primera y la segunda ley apuntan a una conclusión limpia: incluso para un agujero negro en medio del acontecimiento más violento imaginable, la medida adecuada de la entropía sigue siendo el área de su horizonte.

Lo que esto *no* demuestra

- **No** resuelve la gravedad cuántica. Es un resultado de relatividad general *clásica* que utiliza la identificación estándar del área del horizonte con la entropía. No deriva esa entropía de algo más fundamental.
- **No** cuenta microestados ni explica *de qué* está hecha la entropía de un agujero negro. Extiende la contabilidad de la termodinámica de agujeros negros; no abre la caja para revelar los grados de libertad microscópicos.
- **No** resuelve la paradoja de la información de los agujeros negros. Ese problema pertenece a la teoría cuántica; este artículo no lo aborda.
- **No** es una observación ni una medición. No hay telescopio, datos ni señal de ondas gravitacionales: son matemáticas. La «temperatura» de un agujero negro en fusión es aquí una magnitud definida con precisión en las ecuaciones, no algo que pudiera leerse con un termómetro.
- **No** contradice a Bekenstein y Hawking. *Extiende* su imagen al régimen dinámico en el que la ley original, limitada al equilibrio, no tenía nada que decir.

¿Qué solidez tienen las pruebas?

Sólidas para lo que son: un trabajo de física matemática cuidadoso y coherente internamente, procedente de un grupo destacado del campo y publicado como *Editors' Suggestion* en *Physical Review Letters* —un artículo complementario desarrolla las derivaciones más extensas—.

Las cautelas honestas se refieren al *tipo* de resultado, no a su calidad:

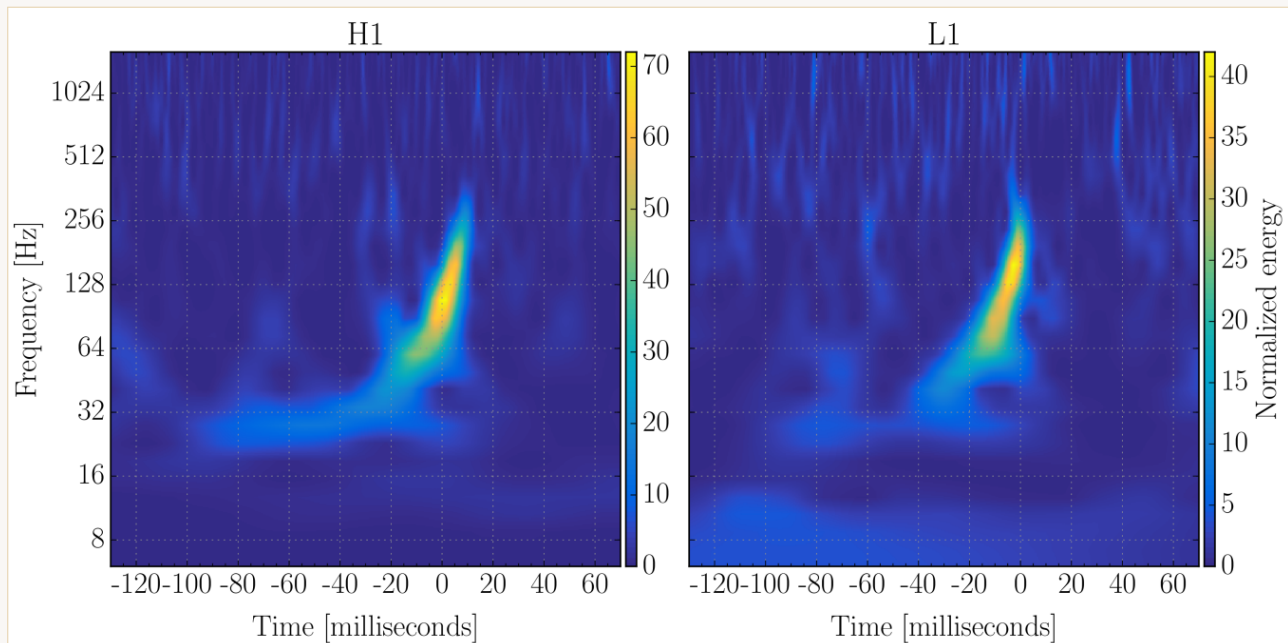
- Se apoya en el supuesto convencional de que el área del horizonte *es* entropía —el área dividida por cuatro veces la constante de Newton y la constante de Planck—. Si una teoría completa de gravedad cuántica revisara alguna vez esa identificación, la interpretación cambiaría con ella.
- Los cálculos principales se desarrollan para el caso más común —horizontes dinámicos espaciales y con simetría axial—; los autores sostienen que las restricciones no son esenciales, pero la afirmación plenamente general se apoya en resultados presentados en otros trabajos.
- «La entropía equivale al área del horizonte incluso fuera del equilibrio» es una *identificación* convincente que las nuevas primera y segunda leyes hacen natural, no un teorema derivado de la estadística microscópica.

En resumen: una extensión rigurosa de un marco de hace cincuenta años, no un descubrimiento experimental ni una nueva ley física pendiente de ser puesta a prueba.

Por qué importa

Por dos razones, una práctica y otra conceptual.

En la práctica, los agujeros negros que ahora estudiamos realmente —los que LIGO y Virgo oyen fusionarse— pasan sus momentos más importantes lejos del equilibrio. Las magnitudes de este artículo se construyen a partir de los mismos horizontes definidos localmente que ya siguen las simulaciones, por lo que ofrecen una forma fundamentada de hablar de la entropía y la temperatura de un agujero negro *durante* una fusión o un colapso, no solo antes y después.



GW150914, la primera señal de ondas gravitacionales detectada directamente, procedía de la fusión de dos agujeros negros. Estos mapas tiempo-frecuencia muestran la señal en LIGO Hanford —izquierda— y LIGO Livingston —derecha—: en ambos detectores, la traza brillante asciende mientras la frecuencia de la señal aumenta hacia la fusión. Es un ejemplo real de un sistema de agujeros negros lejos del equilibrio; aporta contexto al nuevo marco termodinámico, no pruebas observacionales a su favor.

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

Conceptualmente, el comportamiento termodinámico de los agujeros negros es una de las pocas pistas concretas que tenemos sobre la gravedad cuántica: es el lugar donde la gravedad, la teoría cuántica y la termodinámica se encuentran de forma visible. Precisar qué significan exactamente «entropía» y «temperatura» para un agujero negro que cambia violentamente hace más definido el objetivo que cualquier futura teoría cuántica deberá alcanzar. No responde a la pregunta profunda de qué es realmente la entropía de un agujero negro. Formula la pregunta con mayor precisión, lo cual, en este rincón de la física, representa gran parte del trabajo.

En pocas palabras

Los agujeros negros obedecen leyes que reflejan la termodinámica, pero la elegante «primera ley» de 1973 solo comparaba agujeros negros quietos y en equilibrio y no podía describir un proceso real. Ashtekar, Paraizo y Shu extienden tanto la primera como la segunda ley a agujeros negros arbitrariamente alejados del equilibrio —en fusión, alimentándose o amortiguando sus oscilaciones—

mediante «horizontes dinámicos» definidos localmente y un mapa que asigna a un agujero negro cambiante una temperatura y un giro instantáneos. La conclusión es que el área del horizonte sigue siendo la medida correcta de la entropía incluso durante acontecimientos violentos. Es un resultado riguroso de relatividad general clásica, no gravedad cuántica, no una observación, no un recuento de microestados y no una solución a la paradoja de la información.

Sin rodeos

Lo que muestra el artículo: una extensión matemáticamente coherente de la primera y la segunda ley de la mecánica de los agujeros negros a agujeros negros plenamente dinámicos y lejos del equilibrio, construida sobre horizontes dinámicos cuasilocales. Define una primera ley finita basada en procesos y una segunda ley cuantitativa, y hace natural identificar la entropía de un agujero negro dinámico con el área de su horizonte.

Lo que es genuino, pero interpretativo: la identificación «entropía = área del horizonte» fuera del equilibrio. Las nuevas leyes la hacen convincente, pero hereda el supuesto clásico estándar de área-entropía en lugar de derivarlo.

Lo que no muestra: una teoría cuántica de la gravedad; un origen microscópico o «recuento» de la entropía de los agujeros negros; una resolución de la paradoja de la información; ningún resultado observacional o experimental; ni una temperatura que pudiera medirse físicamente.

Limitaciones principales: relatividad general clásica en todo el trabajo; resultados principales demostrados para el caso común espacial y axialmente simétrico, con la generalidad defendida mediante trabajos complementarios; e identificación área-entropía asumida, no demostrada a partir de la mecánica estadística.

¿Cuánta confianza debería tener un lector general? Confianza alta en que se trata de un avance teórico sólido y bien valorado que extiende realmente la termodinámica de los agujeros negros al régimen dinámico. Confianza igualmente alta en que *no* es una afirmación sobre nuevas observaciones, ni gravedad cuántica, ni una resolución del famoso problema de la información. La postura correcta: un paso real en la comprensión, dado con tiza y no con un telescopio.

Fuentes

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