



The CLEAN PAPER

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

Schwarze Löcher gehorchen thermodynamischen „Gesetzen“ – ein neues Ergebnis erweitert sie auf heftig veränderliche Schwarze Löcher fernab des Gleichgewichts

Seit den 1970er-Jahren ist bekannt, dass Schwarze Löcher Gesetzen gehorchen, die der Thermodynamik entsprechen; die klarste Fassung galt jedoch nur für ruhig im Gleichgewicht befindliche Schwarze Löcher. Eine neue Arbeit in Physical Review Letters erweitert den ersten und den zweiten Hauptsatz auf Teile quasi-lokaler Horizonte, die als dynamische Horizontsegmente gelten und beliebig weit vom Gleichgewicht entfernt sein können – während der Akkretion, des Kollapses und der meisten Phasen einer Verschmelzung Schwarzer Löcher. Simulationen verfolgen den quasi-lokalen Horizont während der gesamten Verschmelzung, doch die Gesetze erfassen das kurze Intervall um die Koaleszenz noch nicht, in dem er kein dynamisches Horizontsegment ist. Der grundlegende Rahmen gehört zur Allgemeinen Relativitätstheorie und wird semiklassisch auf die Verdampfung angewandt; es handelt sich weder um neue Quantengravitation noch um eine Beobachtung oder eine Lösung des Informationsproblems Schwarzer Löcher.

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

Schwarze Löcher besitzen „Gesetze“, die wie Thermodynamik aussehen. Die saubere Fassung funktionierte nur, wenn nichts geschah.

Eine der seltsamsten Tatsachen der Physik ist, dass sich Schwarze Löcher wie heiße Körper verhalten. Anfang der 1970er-Jahre bemerkten Bekenstein und Hawking, dass die Gleichungen für Schwarze Löcher Glied für Glied mit den Hauptsätzen der Thermodynamik übereinstimmen: Ein Schwarzes Loch besitzt eine Entropie proportional zur Fläche seines Horizonts und eine Temperatur proportional zu seiner Oberflächengravitation. Hawking zeigte anschließend, dass die Temperatur im tiefsten Sinn real ist – ein Schwarzes Loch leuchtet tatsächlich, wenn auch äußerst schwach, mit thermischer Strahlung.

Was ist Hawking-Strahlung?

Klassisch entkommt nichts aus einem Schwarzen Loch, daher müsste es vollkommen schwarz sein und überhaupt keine Temperatur besitzen. 1974 zeigte Stephen Hawking, dass sich dies ändert, sobald die Quantentheorie nahe dem Horizont berücksichtigt wird: Ein Schwarzes Loch sendet ein schwaches thermisches Leuchten aus und verliert dadurch langsam Masse, es „verdampft“. Das Spektrum ist bei der Hawking-Temperatur thermisch, während die Ausbreitung durch gekrümmte Raumzeit die Strahlung verändert, die im Unendlichen ankommt. In einem verbreiteten heuristischen Bild – nicht Hawkings eigentlicher Herleitung – erzeugen Quantenfluktuationen unmittelbar außerhalb des Horizonts Paare, von denen ein Partner als Strahlung entkommt und der andere hineinfällt.

Entscheidend ist, dass diese Temperatur *umgekehrt* proportional zur Masse des Schwarzen Lochs ist: Je kleiner das Loch, desto heißer ist es. Für jedes Schwarze Loch, das ein Teleskop sehen könnte, ist die Temperatur fantastisch niedrig – weit kälter als der leere Raum darum herum –, sodass das Leuchten praktisch vollkommen vernachlässigbar ist und nie direkt gemessen wurde. Seine Bedeutung ist konzeptionell: Hawking-Strahlung verwandelt die *Analogie* zwischen Mechanik Schwarzer Löcher und Thermodynamik in die reale Sache. Weil das Loch tatsächlich eine Temperatur besitzt, sind „Temperatur“ und „Entropie“ in diesen Gesetzen echte thermodynamische Größen und kein formaler Zufall. Dies ist Hintergrund zur aktuellen Arbeit, nicht eines ihrer Ergebnisse.

Diese Entsprechung wird durch ein Ergebnis verankert, das **erster Hauptsatz der Mechanik Schwarzer Löcher** heißt, von Bardeen, Carter und Hawking aus dem Jahr 1973. In Worten: Verschiebt man ein Schwarzes Loch geringfügig von einem stationären Zustand in einen benachbarten stationären Zustand, entspricht die Änderung seiner Masse seiner Temperatur mal der Änderung seiner Entropie plus einem Term für seinen Drehimpuls. Es ist die Version des Schwarzen Lochs von „zugeführte Wärme gleich Temperatur mal Entropieänderung“.

In der Formulierung *benachbarter stationärer Zustand* verbirgt sich ein Haken. Das saubere Gesetz von 1973 vergleicht zwei ruhig im Gleichgewicht sitzende Schwarze Löcher, die sich nur infinitesimal unterscheiden. Es beschreibt nie wirklich einen **Prozess** – ein Schwarzes Loch, das einen Stern

verschlingt, zwei verschmelzende Schwarze Löcher oder ein neugeborenes Loch, das nach einer heftigen Geburt ausschwingt. Genau diese Situationen wollen wir am dringendsten verstehen, und sie sind das Gegenteil von „ruhig sitzen“. Das saubere Gesetz verstummt genau dann, wenn das Schwarze Loch interessant wird.

Warum die naheliegende Lösung nicht funktioniert

Man könnte denken, die Lösung sei einfach: Man beobachtet, wie der Horizont wächst, während Materie hineinfällt. Das Problem ist: *welcher* Horizont?

Der Horizont, den sich die meisten vorstellen – der **Ereignishorizont**, der wahre Punkt ohne Rückkehr –, besitzt eine subtile und unbequeme Eigenschaft: Er wird durch die gesamte Zukunft des Universums definiert. Um zu wissen, wo sich der Ereignishorizont *jetzt* befindet, müsste man alles wissen, was jemals und für immer in das Loch fallen wird. Das ist keine technische Nebensächlichkeit. Ein Ereignishorizont kann in einer vollkommen leeren, flachen Raumregion zu wachsen beginnen, *bevor* die Materie, die ihn speisen wird, eintrifft – schlicht weil diese Materie später eintreffen wird. Seine Fläche kann dort zunehmen, wo lokal überhaupt nichts geschieht.

Wie kann ein Horizont wachsen, bevor die Materie eintrifft?

Der wissenschaftliche Name dieses Rätsels ist die **teleologische Natur des Ereignishorizonts**, auch seine **globale Definition** genannt. „Teleologisch“ bedeutet hier nicht, dass der Horizont einen Zweck besitzt, die Zukunft vorhersagt oder einen Einfluss rückwärts durch die Zeit sendet. Es bedeutet, dass erst aus der vollständigen zukünftigen Geschichte der Raumzeit entschieden werden kann, ob ein Ereignis innerhalb des Horizonts liegt.

Die formale Definition sagt dasselbe kompakter. Stellen Sie sich die **zukünftige lichtartige Unendlichkeit** – „I-plus“, geschrieben $\mathcal{I}^+$ – als das Ziel vor, das Licht erreicht, wenn es für immer in eine ansonsten leere, unendlich entfernte Zukunft entkommt. Der Ereignishorizont ist die Grenze zwischen Ereignissen, von denen ein nach außen gesendetes Lichtsignal dieses Ziel irgendwann erreichen kann, und Ereignissen, von denen kein solches Signal jemals entkommt. In der Standardschreibweise der Allgemeinen Relativitätstheorie ist er die Grenze der kausalen Vergangenheit der zukünftigen lichtartigen Unendlichkeit: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Weil das Wort *jemals* in diese Definition eingebaut ist, kann keine Messung ausschließlich hier und jetzt den Ereignishorizont exakt lokalisieren.

Eine kollabierende kugelförmige Schale macht die Seltsamkeit sichtbar. Bevor die Schale eintrifft, kann der Raum in ihrem Inneren leer und lokal flach sein. Sendet man vom Zentrum zu immer späteren Zeitpunkten Lichtstrahlen nach außen, entkommen die früheren, während die späteren auf die kollabierende Schale in einer Geometrie treffen, aus der sie nicht mehr herausgelangen. Der Ereignishorizont ist die Grenze zwischen diesen beiden Ergebnissen. Rückwärts verfolgt beginnt diese Grenze im Zentrum und breitet sich durch das noch leere, flache Innere aus, bevor die Schale es erreicht. Seine wachsende Fläche meldet dort keinen lokalen Materiefluss; sie hält fest, welche Fluchtwege in der vollständigen Raumzeit offen bleiben.

Nichts in diesem Bild wirkt rückwärts in der Zeit. Würde die Schale umgelenkt und kein Schwarzes Loch entstehen, wäre die vollständige Raumzeit anders, und jene frühere Region wäre nicht Teil eines Ereignishorizonts gewesen. Die Lehre lautet nicht, dass die Zukunft die Vergangenheit verändert, sondern dass ein Ereignishorizont eine **globale kausale Grenze** ist, keine Oberfläche, die ein naher Beobachter in einem Augenblick erkennen kann. Genau deshalb verwenden Physiker quasi-lokale oder dynamische Horizonte, wenn sie ein sich veränderndes Schwarzes Loch verfolgen müssen.

Das macht den Ereignishorizont als laufende Beschreibung des „Zustands“ eines Schwarzen Lochs unbrauchbar. In einer Computersimulation lässt er sich erst lokalisieren, nachdem die Simulation beendet ist, und gewiss nicht, um Temperatur oder Entropie von Moment zu Moment zu verfolgen.

Der Schritt: ein lokal definierbarer Horizont

Die neue Arbeit von Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo und Jonathan Shu baut ihr Ergebnis auf einem anderen Horizontbegriff auf – einem **quasi-lokalen**, der ausschließlich durch die Geometrie seiner eigenen Umgebung und ohne Bezug zur unendlich fernen Zukunft definiert ist. Diese **quasi-lokalen Horizonte** sind die Flächen, die numerische Relativisten bereits verwenden, um die ursprünglichen Schwarzen Löcher zu lokalisieren, die Verschmelzung zu verfolgen und das verbleibende Schwarze Loch während der gesamten Simulation zu lokalisieren. Die hier entwickelten thermodynamischen Gesetze gelten für jene Teile eines quasi-lokalen Horizonts, die die zusätzlichen Bedingungen für ein **dynamisches Horizontsegment** erfüllen. Auf jedem solchen Segment ändert sich die Fläche unmittelbar als Reaktion auf den lokalen Energiefluss und nicht auf Ereignisse in ferner Zukunft: Bei positivem Einstrom nimmt sie zu; bei einem verdampfenden zeitartigen Horizont mit negativem Energiefluss nimmt sie ab.

Darauf lösen die Autoren die schwierigere Hälfte des Problems. In gewöhnlicher Thermodynamik ist ein System weit vom Gleichgewicht notorisch schwer zu fassen: Eine einzige Temperatur oder einen einzigen Druck kann man ihm nicht sauber zuordnen, weil solche Größen erst definiert sind, nachdem sich alles eingependelt hat. Schwarze Löcher haben dasselbe Problem – bis man, wie die Autoren zeigen, eine besondere Eigenschaft der Allgemeinen Relativitätstheorie nutzt. Ein Schwarzes Loch *im* Gleichgewicht, ein Kerr-Schwarzes-Loch, ist durch nur zwei Zahlen festgelegt: seine Größe und seinen Drehimpuls. Die Autoren konstruieren daher eine Abbildung, die jeden Zustand entlang eines dynamischen Horizontsegments nimmt und an jedem Querschnitt dieses Segments die zwei Zahlen des Gleichgewichts-Schwarzen-Lochs ausliest, dem er momentan ähnelt. Über diese Abbildung lassen sich einem heftig veränderlichen Schwarzen Loch entlang des Segments eine **zeitabhängige Temperatur und ein zeitabhängiger Drehimpuls** zuordnen.

Mit diesen Bausteinen – einer lokal definierten Energie, die den Horizont überquert, und momentanen intensiven Größen – erweitern sie den ersten Hauptsatz auf Schwarze Löcher, die beliebig weit vom Gleichgewicht entfernt sind. Entscheidend ist, dass das neue Gesetz **endliche Änderungen infolge realer physikalischer Prozesse** beschreibt – Materie und Gravitationswellen, die den

Horizont überqueren –, nicht infinitesimale Schritte zwischen zwei eingefrorenen Zuständen. Sie verbinden es mit einem entsprechenden zweiten Hauptsatz, dessen Aussage nun *quantitativ* ist: Die Änderung der Horizontfläche ist unmittelbar an den lokalen Energiefluss gekoppelt – Wachstum bei positivem Einstrom oder Abnahme bei einem verdampfenden zeitartigen Horizont unter negativem Fluss. Zusammengenommen führen der erste und der zweite Hauptsatz zu einer einzigen klaren Schlussfolgerung: Für jede Phase, die durch ein dynamisches Horizontsegment repräsentiert wird, und sei sie noch so heftig, bleibt die Fläche ihres Horizonts das richtige Maß der Entropie.

Was dies *nicht* beweist

- Es löst die Quantengravitation **nicht**. Der grundlegende Rahmen ist in der Allgemeinen Relativitätstheorie formuliert; seine Anwendung auf die Verdampfung Schwarzer Löcher verwendet die semiklassische Näherung, in der Quantenmateriefelder auf eine klassische Raumzeit einwirken. Weiterhin wird die übliche Identifikation der Horizontfläche mit der Entropie vorausgesetzt, statt diese Entropie aus etwas Fundamentalerem herzuleiten.
- Es zählt **keine** Mikrozustände und erklärt nicht, *woraus* die Entropie eines Schwarzen Lochs besteht. Es erweitert die Buchführung der Thermodynamik Schwarzer Löcher; es öffnet nicht die Box und enthüllt die mikroskopischen Freiheitsgrade.
- Es löst **nicht** das Informationsparadoxon Schwarzer Löcher. Dieses Rätsel lebt in der Quantentheorie; die Arbeit berührt es nicht.
- Es handelt sich **nicht** um eine Beobachtung oder Messung. Weder Teleskope noch Daten oder Gravitationswellensignale sind beteiligt – dies ist Mathematik. Die „Temperatur“, die einem dynamischen Horizont während der Entwicklung eines Schwarzen Lochs zugeordnet wird, ist eine präzise definierte Größe in den Gleichungen und nichts, was sich an einem Thermometer ablesen ließe.
- Es liefert **noch keine** kontinuierliche thermodynamische Beschreibung der gesamten Koaleszenz zweier Schwarzer Löcher. Numerische Simulationen verfolgen den quasi-lokalen Horizont durch die gesamte Entwicklung – von den ursprünglichen Schwarzen Löchern über die Verschmelzung bis zum verbleibenden Schwarzen Loch; während eines kurzen Intervalls unmittelbar um die Verschmelzung erfüllt dieser Horizont jedoch nicht die Bedingungen, die für ein dynamisches Horizontsegment erforderlich sind. Der Begleitartikel hält fest, dass eine thermodynamische Beschreibung dieses Intervalls noch in Arbeit ist.
- Es widerlegt Bekenstein und Hawking **nicht**. Es *erweitert* ihr Bild in den dynamischen Bereich, zu dem das ursprüngliche, nur für Gleichgewicht geltende Gesetz nichts zu sagen hatte.

Wie belastbar sind die Belege?

Stark, gemessen an dem, was es ist: eine sorgfältige, in sich konsistente Arbeit der mathematischen Physik von einer führenden Gruppe des Fachgebiets, veröffentlicht als *Editors' Suggestion* in *Physical Review Letters*. Ein begutachteter Begleitartikel enthält die ausführlicheren Herleitungen und behandelt Fälle, die aus Gründen der Kürze nicht in die Letter-Fassung aufgenommen wurden.

Die ehrlichen Vorbehalte betreffen die *Art*, nicht die Qualität:

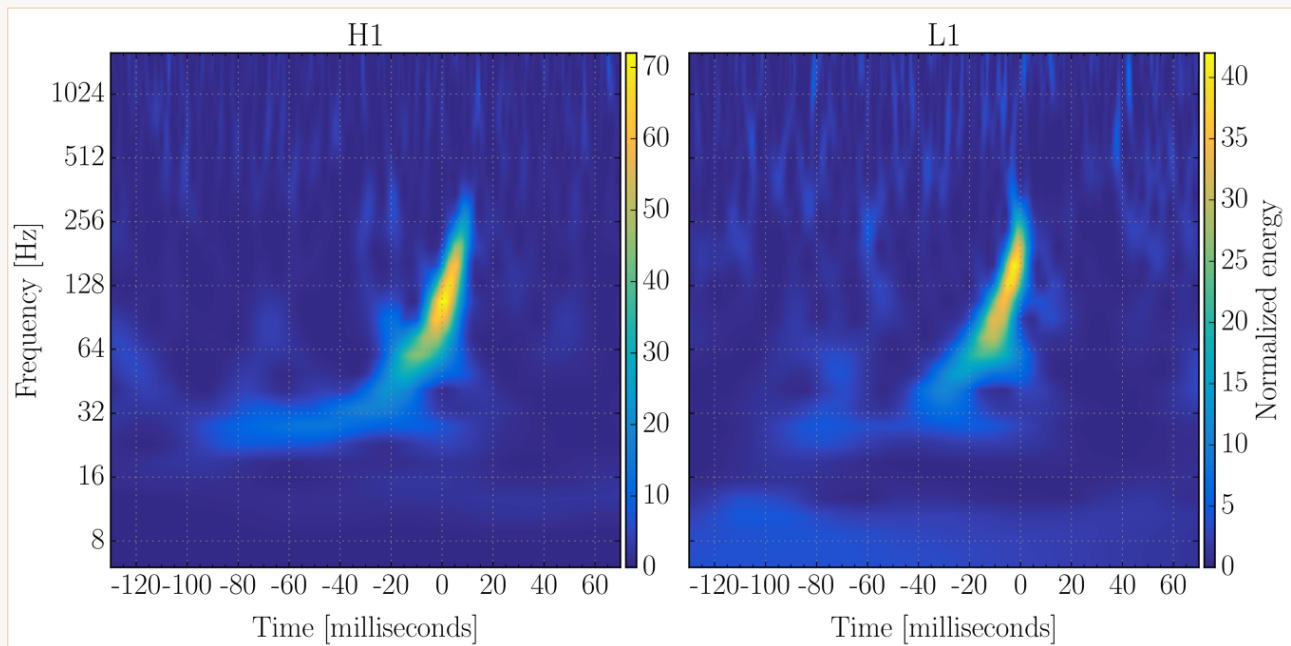
- Sie beruht auf der üblichen Annahme, dass Horizontfläche *Entropie ist* – Fläche geteilt durch viermal Newtonsche Konstante und Plancksches Wirkungsquantum. Sollte eine vollständige Quantengravitation diese Identifikation jemals revidieren, würde sich die Deutung entsprechend verschieben.
- Der Kürze und Einfachheit halber stellt die kurze Letter-Fassung die Hauptherleitung anhand axialsymmetrischer, raumartiger dynamischer Horizonte dar. Der begutachtete Begleitartikel analysiert ausdrücklich zeitartige dynamische Horizonte und konstruiert den Drehimpuls ohne ein rotationelles Killing-Vektorfeld. Bei verdampfenden zeitartigen Horizonten ist allerdings die explizite Behandlung der Rückwirkung auf Kugelsymmetrie beschränkt.
- „Entropie gleich Horizontfläche, auch außerhalb des Gleichgewichts“ ist eine überzeugende *Identifikation*, die durch die neuen Hauptsätze natürlich wird, kein aus mikroskopischer Statistik bewiesenes Theorem.

Also: eine rigorose Erweiterung eines fünfzig Jahre alten Rahmens, keine experimentelle Entdeckung und kein neues Naturgesetz, das auf seine Prüfung wartet.

Warum es wichtig ist

Aus zwei Gründen, einem praktischen und einem konzeptionellen.

In der Praxis verbringen die Schwarzen Löcher, die wir heute tatsächlich untersuchen – jene, deren Verschmelzungen LIGO und Virgo hören –, ihre wichtigsten Momente weit vom Gleichgewicht entfernt. Simulationen verfolgen den quasi-lokalen Horizont von den ursprünglichen Schwarzen Löchern über die Verschmelzung bis zum verbleibenden Schwarzen Loch. Die Größen in dieser Arbeit gelten für jene Teile dieses Horizonts, die als dynamische Horizontsegmente gelten. Damit bietet sie eine fundierte Möglichkeit, über Entropie und Temperatur eines Schwarzen Lochs während der meisten Phasen einer Verschmelzung sowie bei einem Kollaps zu sprechen, nicht nur nachdem sich alles beruhigt hat. Während des kurzen Intervalls unmittelbar um die Koaleszenz wird der quasi-lokale Horizont weiterhin verfolgt, liegt aber außerhalb der gegenwärtigen thermodynamischen Beschreibung.



GW150914, das erste direkt detektierte Gravitationswellensignal, stammte von zwei verschmelzenden Schwarzen Löchern. Diese Zeit-Frequenz-Karten zeigen das Signal in LIGO Hanford links und LIGO Livingston rechts: In beiden Detektoren steigt die helle Spur nach oben, während die Signalfrequenz zur Verschmelzung hin zunimmt. Dies ist ein reales Beispiel für ein Schwarzes-Loch-System weit vom Gleichgewicht; es liefert Kontext für den neuen thermodynamischen Rahmen, aber keine Beobachtungsevidenz dafür.

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

Konzeptionell gehört das thermodynamische Verhalten Schwarzer Löcher zu den wenigen konkreten Hinweisen, die wir auf Quantengravitation besitzen – dort treffen Gravitation, Quantentheorie und Thermodynamik sichtbar zusammen. Genauer festzulegen, was „Entropie“ und „Temperatur“ für ein heftig veränderliches Schwarzes Loch bedeuten, schärft das Ziel, das jede zukünftige Quantentheorie treffen muss. Die tiefe Frage, was die Entropie eines Schwarzen Lochs wirklich ist, beantwortet es nicht. Es formuliert sie präziser – und das ist in diesem Winkel der Physik ein großer Teil der Arbeit.

Kurz zusammengefasst

Schwarze Löcher gehorchen Gesetzen, die der Thermodynamik entsprechen, doch der klare „erste Hauptsatz“ von 1973 verglich lediglich unbewegte Schwarze Löcher im Gleichgewicht und konnte keinen tatsächlichen Prozess beschreiben. Ashtekar, Paraizo und Shu erweitern sowohl den ersten als auch den zweiten Hauptsatz auf Schwarze Löcher, die beliebig weit vom Gleichgewicht entfernt sind – während sie Materie aufnehmen, kollabieren, ausschwingen und die meisten Phasen einer Verschmelzung durchlaufen. Dazu verwenden sie quasi-lokale Horizonte, wenden die thermodynamischen Gesetze auf deren dynamische Horizontsegmente an und konstruieren eine Abbildung, die jedem Zustand entlang dieser Segmente eine momentane Temperatur und einen momentanen Drehimpuls zuordnet. Das Ergebnis lautet, dass die Horizontfläche für jede durch ein dynamisches Horizontsegment repräsentierte Phase das richtige Maß der Entropie bleibt. Das kurze Intervall unmittelbar um die Koaleszenz ist von dieser thermodynamischen Beschreibung noch nicht erfasst,

obwohl Simulationen den quasi-lokalen Horizont weiterhin verfolgen. Der grundlegende Rahmen gehört zur Allgemeinen Relativitätstheorie und wird semiklassisch auf die Verdampfung angewandt; er ist weder Quantengravitation noch eine Beobachtung, eine Zählung von Mikrozuständen oder eine Lösung des Informationsparadoxons.

Nüchtern geprüft

Was die Arbeit zeigt: Eine mathematisch konsistente Erweiterung des ersten und zweiten Hauptsatzes der Mechanik Schwarzer Löcher auf vollständig dynamische, weit vom Gleichgewicht entfernte Schwarze Löcher, aufgebaut auf quasi-lokalen Horizonten und den Teilen davon, welche die Bedingungen für dynamische Horizontsegmente erfüllen. Sie definiert einen endlichen, prozessbasierten ersten Hauptsatz und einen quantitativen zweiten Hauptsatz und macht es natürlich, die Entropie eines dynamischen Schwarzen Lochs mit seiner Horizontfläche zu identifizieren.

Was echt, aber interpretativ ist: Die Identifikation „Entropie = Horizontfläche“ außerhalb des Gleichgewichts. Sie wird durch die neuen Gesetze überzeugend, übernimmt aber die klassische Standardannahme von Fläche und Entropie, statt sie herzuleiten.

Was sie nicht zeigt: Eine Quantentheorie der Gravitation; einen mikroskopischen Ursprung oder eine „Zählung“ der Entropie Schwarzer Löcher; eine Lösung des Informationsparadoxons; irgendein beobachtetes oder experimentelles Ergebnis; eine physisch messbare Temperatur.

Wichtigste Einschränkungen: Die grundlegende Herleitung erfolgt in der Allgemeinen Relativitätstheorie, während die Anwendung auf zeitartige Verdampfung die semiklassische Näherung verwendet; das kurze Intervall unmittelbar um die binäre Koaleszenz wird nicht durch ein dynamisches Horizontsegment repräsentiert, und seine thermodynamische Beschreibung ist noch in Arbeit, obwohl numerische Simulationen den quasi-lokalen Horizont weiterhin verfolgen; die explizite Behandlung der Rückwirkung bei verdampfenden zeitartigen Horizonten ist auf Kugelsymmetrie beschränkt; die Identifikation von Fläche und Entropie wird vorausgesetzt und nicht aus der statistischen Mechanik bewiesen.

Wie viel Vertrauen sollte ein allgemeines Publikum haben? Hohes Vertrauen darin, dass dies ein solides, angesehenes theoretisches Ergebnis ist, das die Thermodynamik Schwarzer Löcher tatsächlich in den dynamischen Bereich erweitert. Ebenso hohes Vertrauen darin, dass es *keine* neue Beobachtung, keine Quantengravitation und keine Lösung des berühmten Informationsrätsels ist. Die richtige Haltung: ein echter Erkenntnissschritt, gemacht mit Kreide und nicht mit einem Teleskop.

Aktualisierungen nach der Veröffentlichung

- **Korrektur · 2026-08-27**

Nach einer Rückmeldung des korrespondierenden Autors Abhay Ashtekar haben wir zwei Aussagen korrigiert, in denen zeitartige und nicht axialsymmetrische Fälle als lediglich argumentativ begründet

dargestellt worden waren, obwohl sie im begutachteten Begleitartikel ausdrücklich behandelt werden. Im Zuge der Überprüfung haben wir außerdem klargestellt, dass der Rahmen das kurze Intervall unmittelbar um die binäre Koaleszenz noch nicht erfasst, in dem der quasi-lokale Horizont die Bedingungen für ein dynamisches Horizontsegment nicht erfüllt.

- **Korrektur · 2026-08-28**

Nach einer weiteren Klarstellung des korrespondierenden Autors Abhay Ashtekar haben wir quasi-lokale Horizonte, die numerische Simulationen von den ursprünglichen Schwarzen Löchern über die Verschmelzung bis zum verbleibenden Schwarzen Loch verfolgen, von den Teilen unterschieden, welche die zusätzlichen Bedingungen für dynamische Horizontsegmente erfüllen und auf die die thermodynamischen Gesetze anwendbar sind.

Quellen

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>