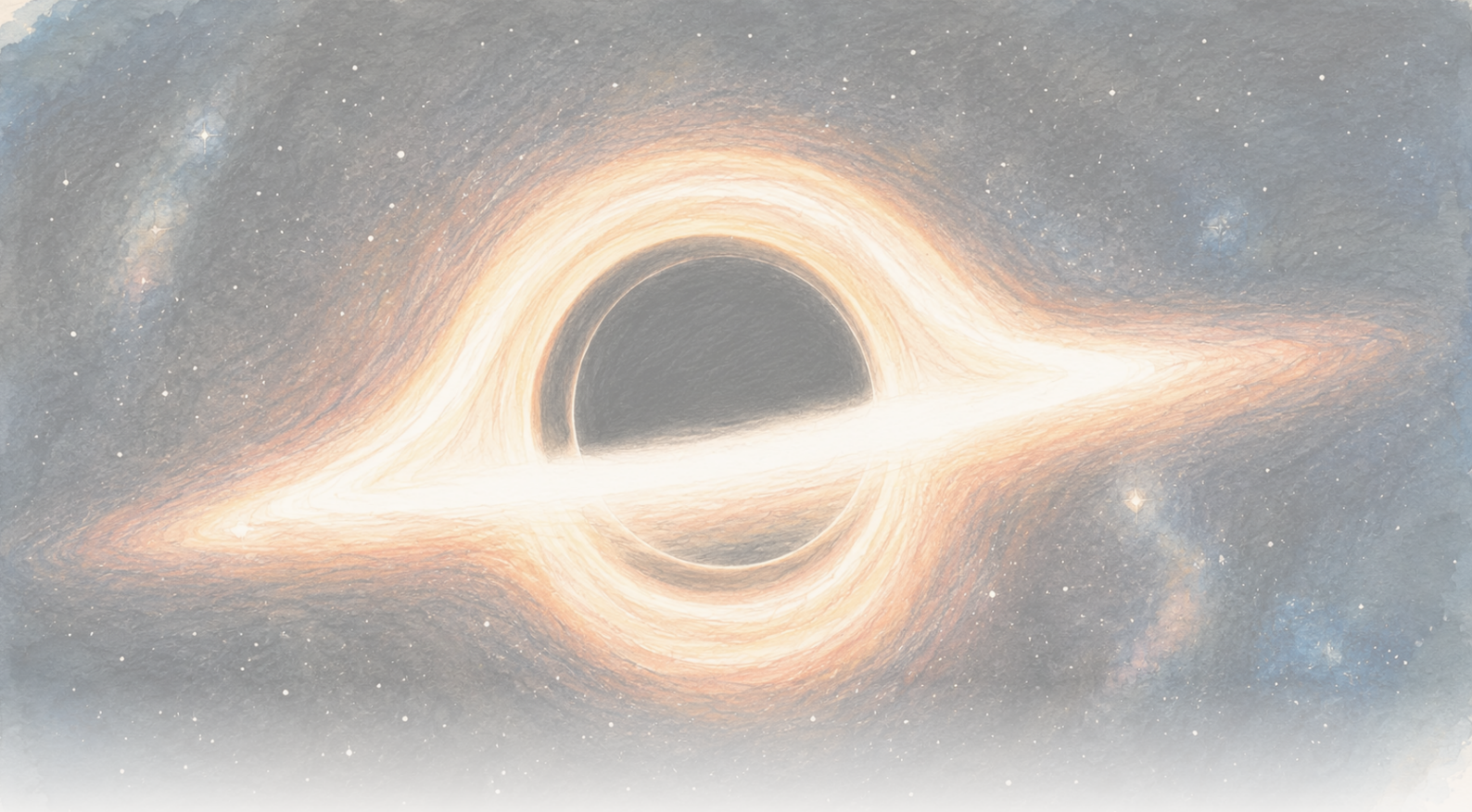




The CLEAN PAPER

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

Czarne dziury przestrzegają termodynamicznych „praw” — nowy wynik rozszerza je na czarne dziury gwałtownie wytrącone z równowagi

*Od lat 70. wiadomo, że czarne dziury przestrzegają praw przypominających termodynamikę, lecz najczystsza wersja dotyczyła tylko czarnych dziur spokojnie trwających w równowadze. Nowa praca w *Physical Review Letters* rozszerza pierwsze i drugie prawo na czarne dziury szybko się zmieniające — pochłaniające materię, zderzające się i promieniujące — za pomocą lokalnie zdefiniowanych „horyzontów dynamicznych”. Pozwala przypisać temperaturę i entropię nawet gwałtownie ewoluującej czarnej dziurze. To matematyczny wynik klasycznej ogólnej teorii względności, nie nowa grawitacja kwantowa, nie obserwacja i nie rozwiązanie paradoksu informacji czarnych dziur.*

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

Czarne dziury mają „prawa” przypominające termodynamikę. Elegancka wersja działała tylko wtedy, gdy nic się nie działo

Jednym z najdziwniejszych faktów w fizyce jest to, że czarne dziury zachowują się jak gorące obiekty. Na początku lat 70. Bekenstein i Hawking zauważyli, że równania rządzące czarnymi dziurami odpowiadają, człon po członie, prawom termodynamiki: czarna dziura ma entropię proporcjonalną do powierzchni horyzontu i temperaturę proporcjonalną do grawitacji powierzchniowej. Hawking pokazał następnie, że temperatura jest rzeczywista w najgłębszym sensie – czarna dziura naprawdę świeci, choć niezwykle słabo, promieniowaniem cieplnym.

Czym jest promieniowanie Hawkinga?

Klasycznie nic nie może uciec z czarnej dziury, dlatego powinna być idealnie czarna i nie mieć żadnej temperatury. W 1974 roku Stephen Hawking wykazał, że sytuacja zmienia się po uwzględnieniu teorii kwantowej w pobliżu horyzontu: czarna dziura emituje słabe promieniowanie cieplne, a więc powoli traci masę, czyli „paruje”. Widmo jest termiczne przy temperaturze Hawkinga, natomiast propagacja przez zakrzywioną czasoprzestrzeń modyfikuje promieniowanie docierające do nieskończoności. W popularnym obrazie heurystycznym – nie w faktycznym wyprowadzeniu Hawkinga – fluktuacje kwantowe tuż na zewnątrz horyzontu tworzą pary, z których jeden składnik ucieka jako promieniowanie, a drugi wpada do środka.

Kluczową cechą jest to, że temperatura ta jest *odwrotnie* proporcjonalna do masy czarnej dziury: im mniejsza dziura, tym jest gorętsza. Dla każdej czarnej dziury, którą mógłby zobaczyć teleskop, temperatura jest niewyobrażalnie niska – znacznie niższa niż temperatura pustej przestrzeni wokół – dlatego w praktyce blask jest całkowicie pomijalny i nigdy nie został zmierzony bezpośrednio. Jego znaczenie jest pojęciowe: promieniowanie Hawkinga zamienia *analogię* między mechaniką czarnych dziur a termodynamiką w coś rzeczywistego. Ponieważ czarna dziura faktycznie ma temperaturę, „temperatura” i „entropia” w tych prawach są prawdziwymi wielkościami termodynamicznymi, a nie formalnym zbiegiem okoliczności. (To tło dla obecnej pracy, nie jeden z jej wyników.)

Związek ten opiera się na wyniku zwanym **pierwszym prawem mechaniki czarnych dziur** (Bardeen, Carter i Hawking, 1973). Słownie mówi ono: jeśli lekko przesuniemy czarną dziurę z jednego stanu ustalonego do pobliskiego stanu ustalonego, zmiana jej masy równa się temperaturze pomnożonej przez zmianę entropii, plus człon związany z obrotem. Jest to czarnodziurowy odpowiednik „dopływ ciepła równa się temperaturze razy zmiana entropii”.

Haczyk kryje się w wyrażeniu *pobliskiego stanu ustalonego*. Eleganckie prawo z 1973 roku porównuje dwie czarne dziury spokojnie trwające w równowadze i różniące się jedynie nieskończenie mało. W ogóle nie opisuje **procesu** – czarnej dziury połykającej gwiazdę, zderzenia dwóch czarnych dziur czy nowo powstałej dziury wybrzmiewającej po gwałtownych narodzinach. To właśnie sytuacje, które chcemy rozumieć najbardziej, i są one przeciwieństwem „spokojnego trwania”. Eleganckie prawo

milknie dokładnie wtedy, gdy czarna dziura staje się interesująca.

Dlaczego oczywista poprawka nie działa

Można by pomyśleć, że rozwiązanie jest proste: obserwować, jak horyzont rośnie, gdy wpada materia. Problem brzmi: *który horyzont?*

Horyzont, który większość ludzi ma na myśli — **horyzont zdarzeń**, prawdziwy punkt bez powrotu — ma subtelny i niewygodny właściwość: jest zdefiniowany przez całą przyszłość wszechświata. Aby wiedzieć, gdzie znajduje się horyzont zdarzeń *w tej chwili*, należałoby znać wszystko, co kiedykolwiek wpadnie do czarnej dziury, aż do końca czasu. To nie jest techniczny szczegół. Horyzont zdarzeń może zacząć rosnąć w całkowicie pustym, płaskim obszarze przestrzeni *zanim* dotrze materia, która go zasili, wyłącznie dlatego, że materia ta ma dotrzeć później. Jego powierzchnia może zwiększać się tam, gdzie lokalnie nic się nie dzieje.

Jak horyzont może rosnąć, zanim dotrze materia?

Naukowa nazwa tej zagadki to **teleologiczna natura horyzontu zdarzeń**, zwana także jego **definicją globalną**. „Teleologiczny” nie oznacza tutaj, że horyzont ma cel, przewiduje przyszłość lub wysyła wpływ wstecz w czasie. Oznacza, że o tym, czy dane zdarzenie znajduje się wewnątrz horyzontu, można zdecydować dopiero na podstawie pełnej przyszłej historii czasoprzestrzeni.

Formalna definicja mówi to samo zwięźlej. Wyobraźmy sobie **przyszłą nieskończoność świetlną** — nazywaną „I-plus” i zapisywaną $\mathcal{I}^+$ — jako cel osiągnięty przez światło, które ucieka na zawsze do pustej, nieskończonej odległej przyszłości. Horyzont zdarzeń jest granicą między zdarzeniami, z których zewnętrzny sygnał świetlny może ostatecznie dotrzeć do tego celu, a zdarzeniami, z których żaden taki sygnał nigdy nie ucieknie. W standardowym zapisie ogólnej teorii względności jest to brzeg przyczynowej przeszłości przyszłej nieskończoności świetlnej: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Ponieważ słowo *kiedykolwiek* jest wpisane w definicję, żaden pomiar wykonany wyłącznie tutaj i teraz nie może dokładnie zlokalizować horyzontu zdarzeń.

Zapadająca się sferyczna powłoka uwidacznia tę dziwność. Zanim powłoka dotrze, obszar w jej wnętrzu może być pusty i lokalnie płaski. Wysyłamy promienie światła na zewnątrz ze środka w kolejnych chwilach: wcześniejsze promienie uciekają, późniejsze spotykają zapadającą się powłokę w geometrii, z której nie mogą się wydostać. Horyzont zdarzeń jest granicą między tymi wynikami. Śledzona wstecz granica zaczyna się w centrum i rozszerza przez nadal pusty, płaski obszar wewnętrzny, zanim dotrze do niego powłoka. Rosnąca powierzchnia nie informuje o lokalnym przepływie materii; rejestruje, które drogi ucieczki pozostają otwarte w ukończonej czasoprzestrzeni.

Nic w tym obrazie nie działa wstecz w czasie. Gdyby powłokę odchyłono i czarna dziura nie powstała, ukończona czasoprzestrzeń byłaby inna, a wcześniejszy obszar nie należałby do horyzontu zdarzeń. Wniosek nie brzmi, że przyszłość zmienia przeszłość, lecz że horyzont zdarzeń jest **globalną granicą przyczynową**, a nie powierzchnią wykrywalną przez

pobliskiego obserwatora w jednej chwili. Właśnie dlatego fizycy używają horyzontów quasi-lokalnych lub dynamicznych, gdy chcą śledzić zmieniającą się czarną dziurę.

To czyni horyzont zdarzeń bezużytecznym jako bieżący opis „stanu” czarnej dziury. Nie można go nawet zlokalizować w symulacji komputerowej, dopóki symulacja się nie skończy, a tym bardziej nie można za jego pomocą śledzić temperatury czy entropii chwila po chwili.

Ruch: horyzont, który można zdefiniować lokalnie

Nowa praca Abhaya Ashtekara, Daniela Paraizo i Jonathana Shu buduje wynik na innym pojęciu horyzontu — **quasi-lokalnym**, zdefiniowanym wyłącznie przez geometrię w jego sąsiedztwie, bez odwoływania się do nieskończonej przyszłości. Te „segmenty horyzontu dynamicznego” są powierzchniami, których relatywiści numeryczni już używają do znajdowania czarnych dziur w symulacjach zderzeń, właśnie dlatego, że są lokalne i uczciwe: ich powierzchnia rośnie tylko tam, gdzie rzeczywiście przekracza je energia.

Następnie autorzy rozwiązują trudniejszą połowę problemu. W zwykłej termodynamice układ daleki od równowagi jest notorycznie nieuchwytny: nie można jednoznacznie przypisać mu jednej temperatury lub jednego ciśnienia, ponieważ wielkości te są dobrze określone dopiero po ustaleniu się układu. Czarne dziury mają ten sam problem — dopóki, jak pokazują autorzy, nie wykorzysta się szczególnej cechy ogólnej teorii względności. Czarna dziura w równowadze — czarna dziura Kerra — jest określona przez zaledwie dwie liczby: rozmiar i spin. Autorzy budują więc odwzorowanie, które bierze dowolny gwałtownie ewoluujący horyzont daleki od równowagi i w każdej chwili odczytuje dwie liczby odpowiadające równowagowej czarnej dziurze, do której jest chwilowo podobny. Dzięki temu gwałtownie zmieniającej się czarnej dziurze można mimo wszystko przypisać **zależną od czasu temperaturę i spin**.

Mając te elementy — lokalnie zdefiniowaną energię przepływającą przez horyzont i chwilowe wielkości intensywne — rozszerzają pierwsze prawo na czarne dziury dowolnie dalekie od równowagi. Co kluczowe, nowe prawo opisuje **skończone zmiany wywołane przez rzeczywiste procesy fizyczne** — materię i fale grawitacyjne przekraczające horyzont — a nie nieskończenie małe kroki między dwoma zamrożonymi stanami. Autorzy łączą je z odpowiadającym drugim prawem, którego treść jest teraz *ilościowa*: powierzchnia horyzontu rośnie o wielkość bezpośrednio związaną z energią, która wpłynęła. Pierwsze i drugie prawo razem prowadzą do jednego jednoznacznego wniosku — nawet dla czarnej dziury w środku najgwałtowniejszego możliwego zdarzenia właściwą miarą entropii nadal jest powierzchnia horyzontu.

Czego to *nie* dowodzi

- **Nie** rozwiązuje grawitacji kwantowej. Jest to wynik w *klasycznej* ogólnej teorii względności, korzystający ze standardowej identyfikacji powierzchni horyzontu z entropią. Nie wyprowadza tej entropii z czegoś bardziej fundamentalnego.
- **Nie** liczy mikrostanów ani nie wyjaśnia, *z czego* zbudowana jest entropia czarnej dziury. Rozszerza rachunkowość termodynamiki czarnych dziur; nie otwiera pudełka i nie pokazuje mikroskopowych stopni swobody.
- **Nie** rozwiązuje paradoksu informacji czarnych dziur. Ta zagadka należy do teorii kwantowej; praca jej nie dotyka.
- **Nie** jest obserwacją ani pomiarem. Nie ma teleskopu, danych ani sygnału fali grawitacyjnej — to matematyka. „Temperatura” zderzającej się czarnej dziury jest tutaj precyzyjnie zdefiniowaną wielkością w równaniach, nie czymś, co można odczytać termometrem.
- **Nie** obala Bekensteina i Hawkinga. *Rozszerza* ich obraz na reżim dynamiczny, w którym pierwotne prawo ograniczone do równowagi nie miało nic do powiedzenia.

Jak mocne są dowody?

Mocne w ramach tego, czym są: staranna, wewnętrznie spójna praca z fizyki matematycznej od czołowej grupy w dziedzinie, opublikowana jako *Editors' Suggestion* w *Physical Review Letters*; praca towarzysząca zawiera dłuższe wyprowadzenia.

Uczciwe zastrzeżenia dotyczą *rodzaju*, nie jakości:

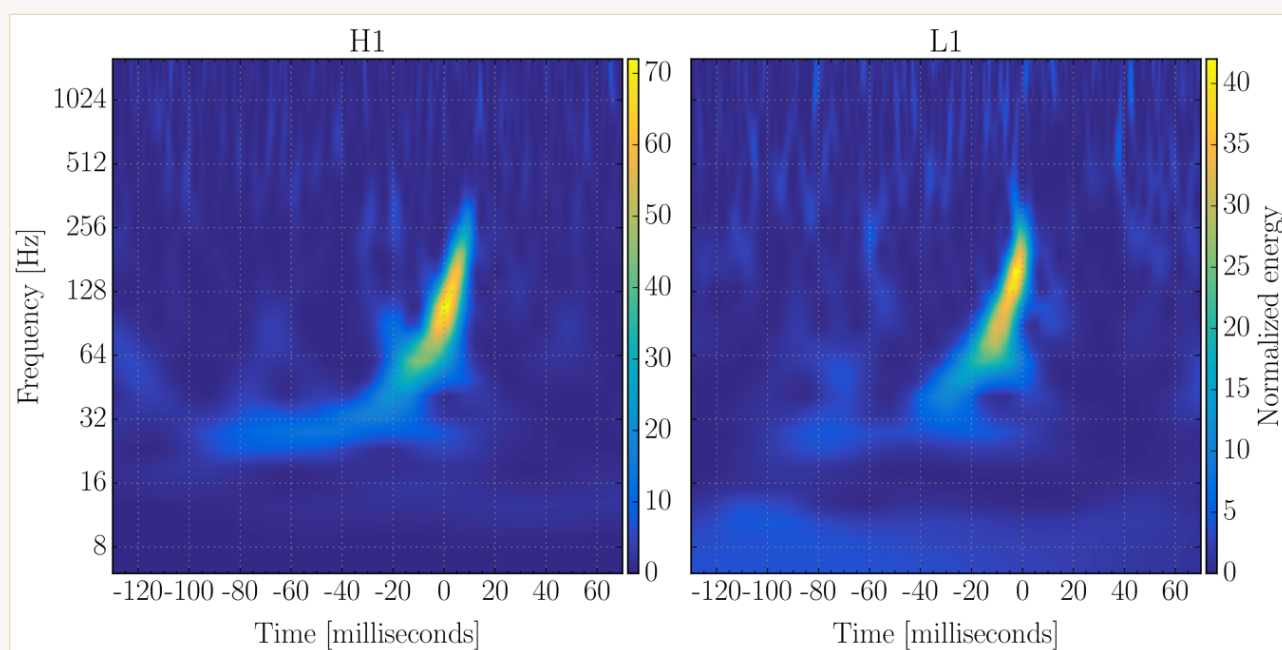
- Wynik opiera się na konwencjonalnym założeniu, że powierzchnia horyzontu *jest* entropią — powierzchnia podzielona przez czterokrotność stałej Newtona i stałej Plancka. Gdyby pełna kwantowa teoria grawitacji kiedyś zrewidowała tę identyfikację, interpretacja zmieniłaby się razem z nią.
- Główne obliczenia wykonano dla najczęstszego przypadku — przestrzennych horyzontów dynamicznych o symetrii osiowej. Autorzy argumentują, że ograniczenia nie są istotne, lecz w pełni ogólne twierdzenie opiera się na wynikach przedstawionych gdzie indziej.
- „Entropia równa się powierzchni horyzontu nawet poza równowagą” jest przekonującą *identyfikacją*, naturalnie wynikającą z nowych pierwszego i drugiego prawa — nie twierdzeniem wyprowadzonym z mikroskopowej statystyki.

A więc: rygorystyczne rozszerzenie pięćdziesięcioletnich ram, nie odkrycie eksperymentalne i nie nowe prawo natury czekające na test.

Dlaczego to ma znaczenie

Z dwóch powodów: praktycznego i pojęciowego.

Praktycznie czarne dziury, które obecnie naprawdę badamy — te, których zderzenia „słyszą” LIGO i Virgo — spędzają najważniejsze chwile daleko od równowagi. Wielkości z tej pracy są zbudowane z tych samych lokalnie zdefiniowanych horyzontów, które symulacje już śledzą, dlatego dają zasadniczy sposób mówienia o entropii i temperaturze czarnej dziury *podczas* zderzenia lub kolapsu, a nie tylko przed i po.



GW150914, pierwszy bezpośrednio wykryty sygnał fali grawitacyjnej, pochodził ze zderzenia dwóch czarnych dziur. Mapy czas–częstotliwość pokazują sygnał w LIGO Hanford po lewej i LIGO Livingston po prawej: w obu detektorach jasny ślad wznosi się, gdy częstotliwość rośnie ku zderzeniu. To rzeczywisty przykład układu czarnych dziur dalekiego od równowagi; stanowi kontekst dla nowych ram termodynamicznych, a nie dowód obserwacyjny tych ram.

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

Pojęciowo termodynamiczne zachowanie czarnych dziur jest jedną z niewielu konkretnych wskazówek, jakie mamy na temat grawitacji kwantowej — miejscem, w którym grawitacja, teoria kwantowa i termodynamika spotykają się w widoczny sposób. Doprecyzowanie, co dokładnie znaczą „entropia” i „temperatura” dla gwałtownie zmieniającej się czarnej dziury, zaostreza cel, w który każda przyszła teoria kwantowa będzie musiała trafić. Nie odpowiada na głębokie pytanie, czym naprawdę jest entropia czarnej dziury. Formułuje pytanie precyzyjniej — a w tym zakątku fizyki to większość pracy.

Zwięzłe podsumowanie

Czarne dziury przestrzegają praw przypominających termodynamikę, lecz eleganckie „pierwsze prawo” z 1973 roku porównywało tylko czarne dziury spokojnie trwające w równowadze i nie potrafiło opisać rzeczywistego procesu. Ashtekar, Paraizo i Shu rozszerzają pierwsze i drugie prawo na czarne dziury dowolnie dalekie od równowagi — zderzające się, pochłaniające materię i wybrzmiewające — wykorzystując lokalnie definiowane „horyzonty dynamiczne” oraz odwzorowanie przypisujące zmieniającej się czarnej dziurze chwilową temperaturę i spin. Wynik jest taki, że powierzchnia horyzontu pozostaje właściwą miarą entropii nawet podczas gwałtownych zdarzeń. To rygorystyczny wynik klasycznej ogólnej teorii względności, nie grawitacja kwantowa, nie obserwacja, nie policzenie mikrostanów i nie rozwiązanie paradoksu informacji.

Kontrola bez upiększeń

Co pokazuje praca: Matematycznie spójne rozszerzenie pierwszego i drugiego prawa mechaniki czarnych dziur na w pełni dynamiczne czarne dziury dalekie od równowagi, oparte na quasi-lokalnych horyzontach dynamicznych. Definiuje skończone, procesowe pierwsze prawo i ilościowe drugie prawo oraz czyni naturalną identyfikację entropii dynamicznej czarnej dziury z powierzchnią jej horyzontu.

Co jest rzeczywiste, lecz interpretacyjne: Identyfikacja „entropia = powierzchnia horyzontu” poza równowagą. Nowe prawa czynią ją przekonującą, ale dziedziczy standardowe klasyczne założenie o entropii powierzchniowej, zamiast je wyprowadzać.

Czego praca nie pokazuje: Kwantowej teorii grawitacji; mikroskopowego pochodzenia ani „liczby” entropii czarnej dziury; rozwiązania paradoksu informacji; jakiegokolwiek wyniku obserwacyjnego lub eksperymentalnego; temperatury, którą można fizycznie zmierzyć.

Główne ograniczenia: W całej pracy obowiązuje klasyczna ogólna teoria względności; główne wyniki udowodniono dla częstego przypadku przestrzennego o symetrii osiowej, a ogólność uzasadniono pracą towarzyszącą; identyfikację powierzchnia–entropia założono, a nie wyprowadzono z mechaniki statystycznej.

Jak duże zaufanie powinien mieć ogólny czytelnik? Wysokie do tego, że jest to solidny, dobrze przyjęty postępek teoretyczny, rzeczywiście rozszerzający termodynamikę czarnych dziur na reżim dynamiczny. Równie wysokie do tego, że *nie* jest to twierdzenie o nowych obserwacjach, nie grawitacja kwantowa i nie rozwiązanie słynnego paradoksu informacji. Właściwe nastawienie: realny krok w rozumieniu, wykonany kredą, nie teleskopem.

Źródła

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

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