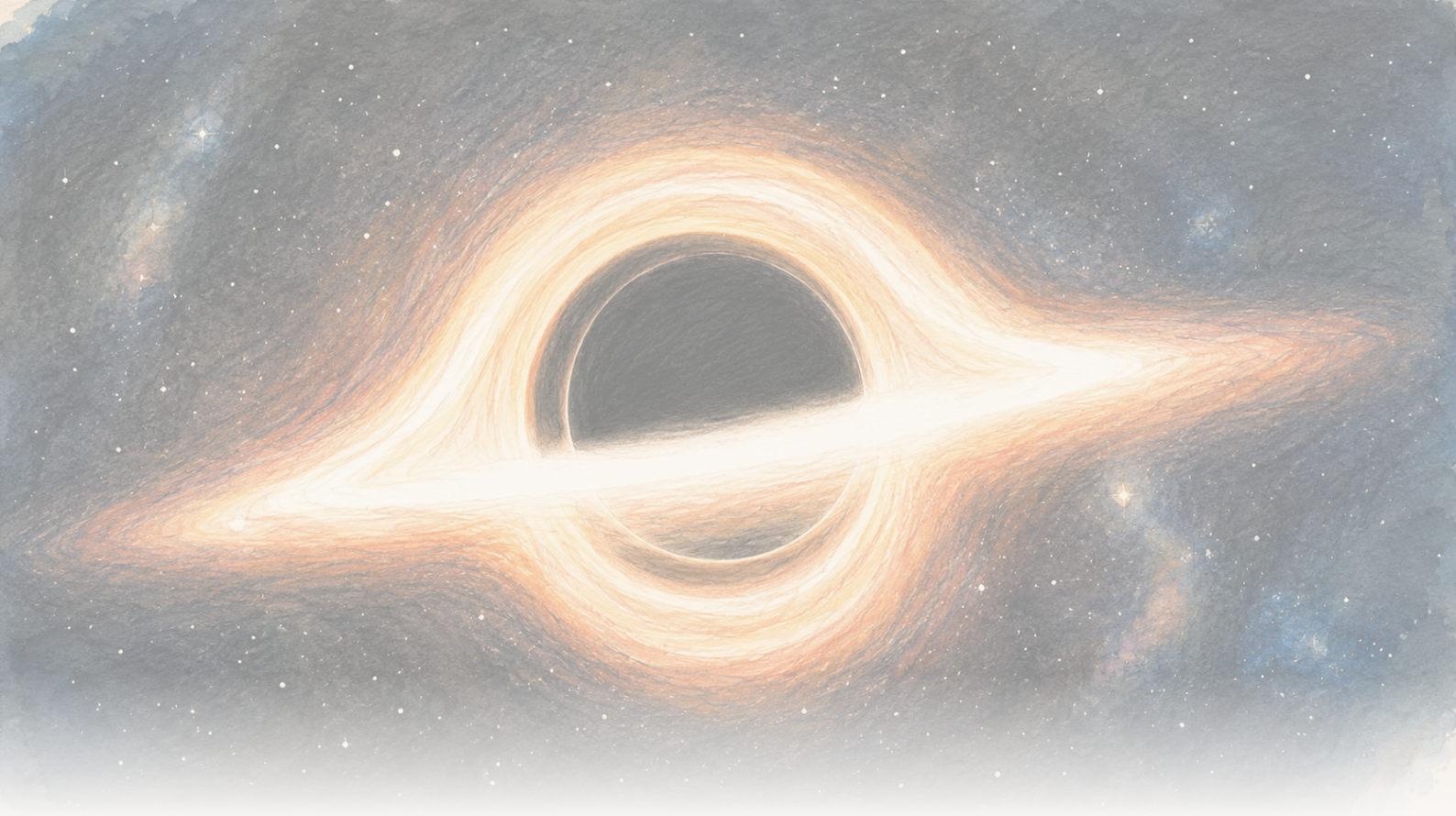




## The CLEAN PAPER

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

# Găurile negre respectă „legi” termodinamice — un nou rezultat le extinde la găuri negre violent scoase din echilibru

*Din anii 1970 se știe că găurile negre respectă legi care oglindesc termodinamica, dar cea mai elegantă versiune se aplica numai găurilor negre aflate liniștit în echilibru. O nouă lucrare din Physical Review Letters extinde prima și a doua lege la găuri negre care se schimbă rapid — înghit materie, fuzionează sau radiază — folosind «orizonturi dinamice» definite local. Astfel, fizicienii pot atribui o temperatură și o entropie chiar și unei găuri negre aflate într-o evoluție violentă. Este un rezultat matematic din relativitatea generală clasică, nu o nouă teorie a gravitației cuantice, nu o observație și nu o rezolvare a paradoxului informației găurilor negre.*

---

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

# Găurile negre au „legi” care seamănă cu termodinamica. Versiunea elegantă funcționa însă numai când nu se întâmpla nimic.

Unul dintre cele mai stranii fapte din fizică este că găurile negre se comportă ca obiecte fierbinți. La începutul anilor 1970, Bekenstein și Hawking au observat că ecuațiile care guvernează găurile negre corespund, termen cu termen, legilor termodinamicii: o gaură neagră are o entropie proporțională cu aria orizontului și o temperatură proporțională cu gravitația sa de suprafață. Hawking a arătat apoi că temperatura este reală în sensul cel mai profund — o gaură neagră chiar emite o radiație termică extrem de slabă.

## Ce este radiația Hawking?

În fizica clasică, nimic nu poate scăpa dintr-o gaură neagră, deci aceasta ar trebui să fie perfect neagră și să nu aibă deloc temperatură. În 1974, Stephen Hawking a arătat că situația se schimbă atunci când teoria cuantică este luată în calcul în apropierea orizontului: o gaură neagră emite o radiație termică slabă și, prin urmare, pierde lent masă, adică „se evaporă”. Spectrul este termic la temperatura Hawking, în timp ce propagarea prin spațiul-timp curbat modifică radiația care ajunge la infinit. Într-o imagine euristică frecvent folosită — care nu este demonstrația propriu-zisă a lui Hawking — fluctuațiile cuantice din imediata apropiere a orizontului creează perechi în care un partener scapă ca radiație, iar celălalt cade în gaură. Caracteristica esențială este că această temperatură este *invers* proporțională cu masa găurii negre: cu cât gaura este mai mică, cu atât este mai fierbinte. Pentru orice gaură neagră pe care ar putea-o vedea un telescop, temperatura este fantastic de scăzută — mult sub cea a spațiului din jur — astfel încât, în practică, strălucirea este cu totul neglijabilă și nu a fost niciodată măsurată direct. Importanța ei este conceptuală: radiația Hawking transformă *analogia* dintre mecanica găurilor negre și termodinamică într-o echivalență fizică reală. Deoarece gaura are într-adevăr o temperatură, „temperatura” și „entropia” din aceste legi sunt mărimi termodinamice reale, nu o coincidență formală. (Aceasta este informație de fundal pentru lucrarea de față, nu unul dintre rezultatele ei.)

Această corespondență este ancorată de un rezultat numit **prima lege a mecanicii găurilor negre** — Bardeen, Carter și Hawking, 1973. Exprimată în cuvinte, legea spune: dacă modifici ușor o gaură neagră, trecând-o dintr-o stare staționară într-o stare staționară apropiată, schimbarea masei sale este egală cu temperatura înmulțită cu schimbarea entropiei, plus un termen pentru rotație. Este versiunea pentru găuri negre a ideii „căldura introdusă este egală cu temperatura înmulțită cu variația entropiei”.

Există însă o problemă ascunsă în expresia *stare staționară apropiată*. Legea elegantă din 1973 compară două găuri negre aflate liniștit în echilibru, diferite numai infinitesimal. Ea nu descrie niciodată un **proces** propriu-zis — o gaură neagră care înghite o stea, două găuri negre care fuzionează, o gaură nou-născută care oscilează și se stabilizează după o formare violentă. Acestea sunt tocmai situațiile pe care dorim cel mai mult să le înțelegem și sunt opusul lui „stă liniștită”. Legea ordonată tace exact

atunci când gaura neagră devine interesantă.

## De ce soluția evidentă nu funcționează

S-ar putea crede că remediul este simplu: urmărești cum crește orizontul pe măsură ce materia cade înăuntru. Problema este *care* orizont.

Orizontul pe care și-l imaginează cei mai mulți oameni — **orizontul evenimentelor**, adevăratul punct fără întoarcere — are o proprietate subtilă și incomodă: este definit de întregul viitor al Universului. Pentru a ști unde se află orizontul evenimentelor *acum*, ar trebui să cunoști tot ceea ce va cădea vreodată în gaură, pentru totdeauna. Nu este un detaliu tehnic. Un orizont al evenimentelor poate începe să crească într-o regiune de spațiu complet goală și plată *înainte* să sosească materia care îl va alimenta, doar pentru că acea materie este destinată să ajungă mai târziu. Aria lui poate crește acolo unde, local, nu se întâmplă absolut nimic.

### Cum poate crește un orizont înainte să ajungă materia?

Denumirea științifică a acestei dificultăți este **natura teleologică a orizontului evenimentelor**, numită și **definiția sa globală**. Aici, „teleologic” nu înseamnă că orizontul are un scop, prezice viitorul sau trimite o influență înapoi în timp. Înseamnă că se poate decide dacă un eveniment se află în interiorul orizontului numai cunoscând istoria viitoare completă a spațiului-timp.

Definiția formală spune același lucru mai compact. Imaginează-ți **infinitul nul viitor** — numit „I-plus” și scris  $\mathcal{I}^+$  — ca destinația la care ajunge lumina ce scapă pentru totdeauna într-un viitor altfel gol și infinit de îndepărtat. Orizontul evenimentelor este granița dintre evenimentele din care un semnal luminos emis spre exterior poate ajunge în cele din urmă la această destinație și evenimentele din care niciun asemenea semnal nu poate ajunge vreodată. În notația standard a relativității generale, este frontiera trecutului cauzal al infinitului nul viitor:  $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$ . Deoarece cuvântul *vreodată* este inclus în definiție, nicio măsurătoare făcută numai aici și acum nu poate localiza exact orizontul evenimentelor.

O coajă sferică aflată în colaps face straniețea vizibilă. Înainte să ajungă coaja, regiunea din interiorul ei poate fi goală și local plată. Trimite raze de lumină spre exterior din centru la momente succesiv mai târzii: razele mai timpurii scapă, în timp ce cele mai târzii întâlnesc coaja în colaps într-o geometrie din care nu mai pot ieși. Orizontul evenimentelor este granița dintre aceste două rezultate. Urmărită înapoi în timp, această graniță începe în centru și se extinde prin interiorul încă gol și plat înainte ca învelișul să ajungă acolo. Aria ei în creștere nu indică vreun flux local de materie în acea regiune; ea înregistrează ce trasee de scăpare rămân deschise în spațiu-timp complet.

Nimic din această imagine nu acționează înapoi în timp. Dacă învelișul ar fi deviat și nu s-ar forma nicio gaură neagră, spațiu-timp complet ar fi diferit, iar regiunea anterioară nu ar fi făcut parte dintr-un orizont al evenimentelor. Lecția nu este că viitorul schimbă trecutul, ci că orizontul evenimentelor este o **graniță cauzală globală**, nu o suprafață pe care un observator apropiat o poate detecta într-un anumit moment. Tocmai de aceea fizicienii folosesc orizonturi

cvasi-locale sau dinamice atunci când trebuie să urmărească o gaură neagră în schimbare.

Această proprietate face orizontul evenimentelor inutil ca descriere în timp real a „stării” unei găuri negre. Într-o simulare pe calculator nici măcar nu îl poți localiza înainte ca simularea să se fi încheiat și, cu atât mai puțin, nu îl poți folosi pentru a urmări moment cu moment o temperatură sau o entropie.

## Ideea-cheie: un orizont care poate fi definit local

Noua lucrare, semnată de Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo și Jonathan Shu, își construiește rezultatul pe o altă noțiune de orizont — una **cvasi-locală**, definită numai prin geometria din vecinătatea sa, fără nicio referire la viitorul infinit. Aceste „segmente de orizont dinamic” sunt suprafețele pe care specialiștii în relativitate numerică le folosesc deja pentru a identifica găurile negre în simulări de fuziune, tocmai pentru că sunt locale și sincere: aria lor crește numai acolo unde energia chiar le traversează.

Pe această bază, autorii rezolvă partea mai dificilă a problemei. În termodinamica obișnuită, un sistem aflat departe de echilibru este notoriu de greu de descris: nu îi poți atribui fără ambiguitate o singură temperatură sau presiune, deoarece aceste mărimi sunt bine definite numai după ce sistemul se stabilizează. Găurile negre au aceeași problemă — până când, arată autorii, este folosită o particularitate a relativității generale. O gaură neagră *aflată* în echilibru — o gaură neagră Kerr — este determinată de doar două numere: dimensiunea și rotația sa. Autorii construiesc, prin urmare, o corespondență care ia orice orizont aflat într-o evoluție violentă și departe de echilibru și extrage, în fiecare moment, cele două numere ale găurii negre de echilibru cu care seamănă atunci. Prin această corespondență, chiar și unei găuri negre care se schimbă violent îi pot fi atribuite o **temperatură dependentă de timp și o rotație**.

Cu aceste elemente — energia definită local care traversează orizontul și mărimile intensive instantanee — ei extind prima lege la găuri negre aflate oricât de departe de echilibru. Esențial este că noua lege descrie **schimbări finite produse de procese fizice reale** — materie și unde gravitaționale care traversează orizontul — nu pași infinitezimali între două stări înghețate. Autorii o asociază unei a doua legi corespunzătoare, a cărei formulare devine acum *cantitativă*: aria orizontului crește cu o cantitate legată direct de energia care a intrat. Împreună, prima și a doua lege conduc la o concluzie simplă — chiar și pentru o gaură neagră aflată în mijlocul celui mai violent eveniment imaginabil, măsura potrivită a entropiei rămâne aria orizontului.

## Ce nu demonstrează studiul

- **Nu** rezolvă gravitația cuantică. Este un rezultat din relativitatea generală *clasică*, care folosește identificarea standard a ariei orizontului cu entropia. Nu derivă această entropie din ceva mai



fundamental.

- **Nu** numără microstări și nu explică *din ce* este alcătuită entropia unei găuri negre. Extinde bilanțul termodinamic al găurilor negre; nu deschide cutia pentru a dezvălui gradele de libertate microscopice.
- **Nu** rezolvă paradoxul informației găurilor negre. Acea problemă aparține teoriei cuantice; lucrarea nu o abordează.
- **Nu** este o observație sau o măsurătoare. Nu implică telescop, date sau semnal de unde gravitaționale — este matematică. „Temperatura” unei găuri negre în fuziune este aici o mărime definită riguros în ecuații, nu ceva ce ar putea fi citit cu un termometru.
- **Nu** îi contrazice pe Bekenstein și Hawking. Le *extinde* imaginea în regimul dinamic, în care legea originală, valabilă numai la echilibru, nu avea nimic de spus.

## Cât de solide sunt dovezile?

Puternice pentru tipul de rezultat despre care este vorba: o lucrare atentă și coerentă intern de fizică matematică, realizată de un grup important din domeniu și publicată ca *Editors' Suggestion* în *Physical Review Letters* — o lucrare însoțitoare prezintă demonstrațiile mai lungi.

Rezervele importante privesc *natura* rezultatului, nu calitatea sa:

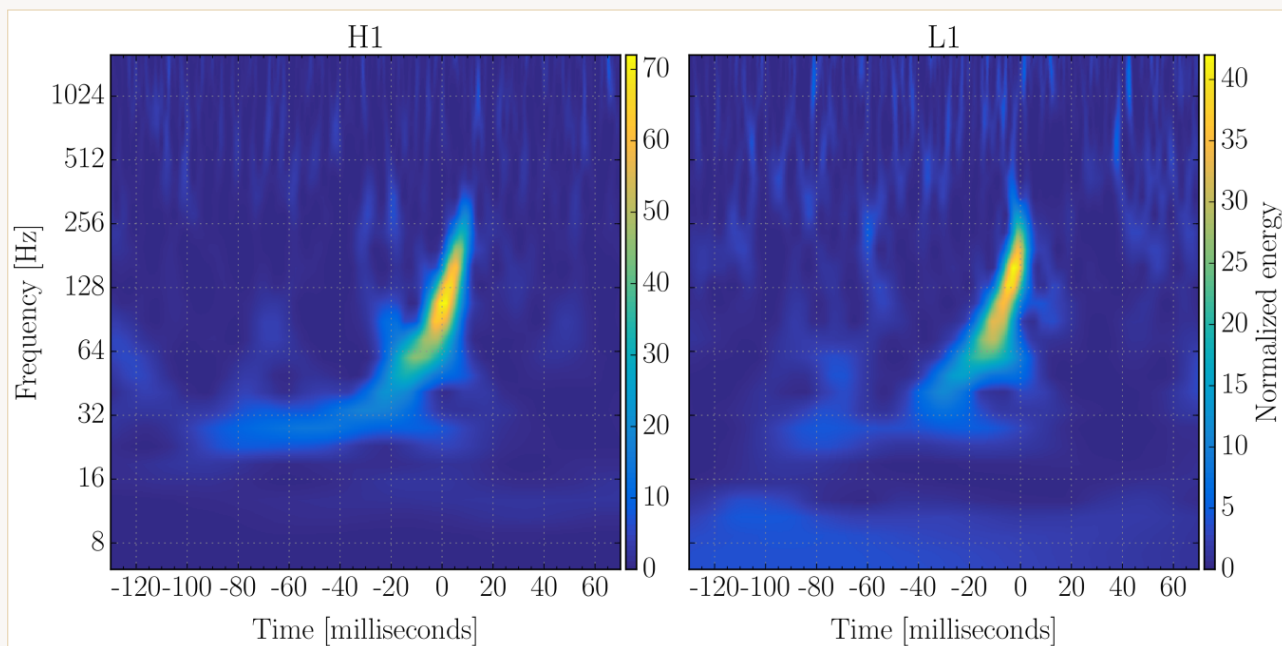
- Se bazează pe presupunerea convențională că aria orizontului *este* entropie — aria împărțită la de patru ori constanta lui Newton și constanta lui Planck. Dacă această identificare ar fi revizuită vreodată de o teorie completă a gravitației cuantice, interpretarea s-ar modifica odată cu ea.
- Calculele principale sunt dezvoltate pentru cazul cel mai comun — orizonturi dinamice de tip spațial și cu simetrie axială. Autorii susțin că restricțiile nu sunt esențiale, dar formularea complet generală se sprijină și pe rezultate din alte lucrări.
- „Entropia este egală cu aria orizontului, chiar și în afara echilibrului” este o *identificare* convingătoare, făcută naturală de noile legi, nu o teoremă derivată din statistica microscopică.

Așadar: o extindere riguroasă a unui cadru vechi de cincizeci de ani, nu o descoperire experimentală și nici o nouă lege a naturii care așteaptă să fie testată.

## De ce contează

Din două motive, unul practic și unul conceptual.

Practic, găurile negre pe care le studiem astăzi în mod direct — cele pe care LIGO și Virgo le aud fuzionând — își petrec momentele cele mai importante departe de echilibru. Mărimile din această lucrare sunt construite din aceleași orizonturi definite local pe care simulările le urmăresc deja, astfel încât oferă un mod principal de a vorbi despre entropia și temperatura unei găuri negre *în timpul* unei fuziuni sau al unui colaps, nu doar înainte și după.



GW150914, primul semnal de unde gravitaționale detectat direct, a provenit din fuziunea a două găuri negre. Aceste hărți timp-frecvență arată semnalul în LIGO Hanford, în stânga, și LIGO Livingston, în dreapta: în ambele detectoare, urma luminoasă urcă pe măsură ce frecvența semnalului crește spre momentul fuziunii. Este un exemplu real de sistem de găuri negre aflat departe de echilibru; oferă context pentru noul cadru termodinamic, nu dovezi observaționale pentru acesta.

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

Conceptual, comportamentul termodinamic al găurilor negre este unul dintre puținele indicii concrete pe care le avem despre gravitația cuantică — locul în care gravitația, teoria cuantică și termodinamica se întâlnesc în mod vizibil. Clarificarea exactă a sensului „entropiei” și „temperaturii” pentru o gaură neagră aflată într-o schimbare violentă restrânge ținta pe care orice viitoare teorie cuantică trebuie să o atingă. Nu răspunde la întrebarea profundă privind natura reală a entropiei unei găuri negre. Formulează întrebarea mai precis — ceea ce, în această zonă a fizicii, reprezintă cea mai mare parte a muncii.

## Pe scurt

Găurile negre respectă legi care oglindesc termodinamica, dar „prima lege” elegantă din 1973 compara numai găuri negre aflate în repaus și echilibru și nu putea descrie un proces real. Ashtekar, Paraizo și Shu extind atât prima, cât și a doua lege la găuri negre aflate oricât de departe de echilibru — care fuzionează, absorb materie sau se stabilizează după o perturbare — folosind „orizonturi dinamice” definite local și o corespondență care atribuie unei găuri negre în schimbare o temperatură și o rotație instantanee. Concluzia este că aria orizontului rămâne măsura potrivită a entropiei chiar și în timpul evenimentelor violente. Este un rezultat riguros din relativitatea generală clasică, nu gravitație cuantică, nu o observație, nu o numărare a microstărilor și nu o soluție la paradoxul informației.

## Verificare fără exagerări

**Ce arată lucrarea:** O extindere matematic coerentă a primei și celei de-a doua legi ale mecanicii găurilor negre la găuri negre complet dinamice, aflate departe de echilibru, construită pe orizonturi dinamice cvasi-locale. Definește o primă lege finită, bazată pe procese, și o a doua lege cantitativă și face naturală identificarea entropiei unei găuri negre dinamice cu aria orizontului său.

**Ce este real, dar interpretativ:** Identificarea „entropie = aria orizontului” în afara echilibrului. Noile legi o fac convingătoare, dar ea moștenește presupunerea clasică standard privind relația arie-entropie, în loc să o derive.

**Ce nu arată:** O teorie cuantică a gravitației; originea microscopică sau o „numărare” a entropiei găurii negre; rezolvarea paradoxului informației; vreun rezultat observațional sau experimental; o temperatură care ar putea fi măsurată fizic.

**Limitări principale:** Relativitate generală clasică pe tot parcursul; rezultatele principale demonstrate pentru cazul comun, spațial și axial simetric, cu generalitatea argumentată prin lucrări însoțitoare; identificarea arie-entropie este presupusă, nu derivată din mecanica statistică.

**Câtă încredere ar trebui să aibă un cititor obișnuit?** Încredere mare că este un progres teoretic solid și bine primit, care extinde cu adevărat termodinamica găurilor negre în regimul dinamic. La fel de multă încredere că *nu* este o afirmație despre observații noi, nu este gravitație cuantică și nu rezolvă celebrul paradox al informației. Atitudinea potrivită: un pas real în înțelegere, făcut cu creta, nu cu telescopul.

---

## Surse

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

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