

The
CLEAN PAPER

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

I buchi neri obbediscono a «leggi» termodinamiche: un nuovo risultato le estende ai buchi neri violentemente fuori equilibrio

Dagli anni Settanta è noto che i buchi neri obbediscono a leggi che rispecchiano la termodinamica, ma la formulazione più nitida si applicava soltanto a buchi neri quieti in equilibrio. Un nuovo articolo su Physical Review Letters estende il primo e il secondo principio alle porzioni di orizzonti quasi-locali che soddisfano le condizioni per essere segmenti di orizzonte dinamico e possono trovarsi arbitrariamente lontane dall'equilibrio — durante l'accrescimento, il collasso e la maggior parte delle fasi di una fusione di buchi neri. Le simulazioni seguono l'orizzonte quasi-locale durante l'intera fusione, ma le leggi non coprono ancora il breve intervallo attorno alla coalescenza, quando non è un segmento di orizzonte dinamico. Il quadro teorico fondamentale è nella relatività generale, con un'applicazione semiclassica all'evaporazione; non è nuova gravità quantistica, un'osservazione né una soluzione dell'enigma dell'informazione dei buchi neri.

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

I buchi neri hanno «leggi» simili a quelle della termodinamica. La versione ordinata funzionava soltanto quando non accadeva nulla.

Uno dei fatti più strani della fisica è che i buchi neri si comportano come oggetti caldi. All'inizio degli anni Settanta, Bekenstein e Hawking notarono che le equazioni che governano i buchi neri corrispondono, termine per termine, alle leggi della termodinamica: un buco nero possiede un'entropia proporzionale all'area del proprio orizzonte e una temperatura proporzionale alla gravità superficiale. Hawking mostrò poi che la temperatura è reale nel senso più profondo: un buco nero emette davvero, debolissimamente, radiazione termica.

Che cos'è la radiazione di Hawking?

Nella fisica classica nulla può sfuggire a un buco nero, che dovrebbe quindi essere perfettamente nero e non avere alcuna temperatura. Nel 1974 Stephen Hawking mostrò che la situazione cambia quando si tiene conto della teoria quantistica vicino all'orizzonte: un buco nero emette un debole bagliore termico e perde quindi lentamente massa, cioè «evapora». Lo spettro è termico alla temperatura di Hawking, mentre la propagazione nello spaziotempo curvo modifica la radiazione che raggiunge l'infinito. In una comune immagine intuitiva — che non è la vera derivazione di Hawking — le fluttuazioni quantistiche appena fuori dall'orizzonte creano coppie nelle quali un componente sfugge come radiazione e l'altro cade all'interno.

La caratteristica essenziale è che questa temperatura è *inversamente* proporzionale alla massa del buco nero: più il buco nero è piccolo, più è caldo. Per qualunque buco nero osservabile con un telescopio, la temperatura è incredibilmente bassa — molto inferiore a quella dello spazio vuoto che lo circonda — per cui, nella pratica, il bagliore è del tutto trascurabile e non è mai stato misurato direttamente. La sua importanza è concettuale: la radiazione di Hawking trasforma l'*analogia* tra meccanica dei buchi neri e termodinamica in una relazione fisica reale. Poiché il buco nero possiede davvero una temperatura, la «temperatura» e l'«entropia» di queste leggi sono vere quantità termodinamiche, non una coincidenza formale. Questo è il contesto dell'articolo, non uno dei suoi risultati.

Questa corrispondenza è fondata su un risultato chiamato **primo principio della meccanica dei buchi neri**, formulato da Bardeen, Carter e Hawking nel 1973. A parole: se si perturba leggermente un buco nero facendolo passare da uno stato stazionario a un altro vicino, la variazione della sua massa è uguale alla temperatura moltiplicata per la variazione dell'entropia, più un termine relativo alla rotazione. È la versione per i buchi neri di «il calore in ingresso è uguale alla temperatura per la variazione di entropia».

Esiste però un problema nascosto nell'espressione *stato stazionario vicino*. La pulita legge del 1973 confronta due buchi neri fermi in equilibrio, che differiscono soltanto infinitesimamente. Non descrive mai davvero un **processo**: un buco nero che inghiotte una stella, due buchi neri che si fondono, un buco nero appena nato che si assesta oscillando dopo una nascita violenta. Sono proprio le situazioni che ci interessa maggiormente comprendere, e sono l'opposto dello «stare fermi». La legge ordinata

tace esattamente quando il buco nero diventa interessante.

Perché la soluzione più ovvia non funziona

Si potrebbe pensare che la soluzione sia semplice: basta osservare l'orizzonte crescere mentre cade la materia. Il problema è *quale* orizzonte.

L'orizzonte che la maggior parte delle persone immagina — l'**orizzonte degli eventi**, il vero punto di non ritorno — possiede una proprietà sottile e scomoda: è definito dall'intero futuro dell'universo. Per sapere dove si trova l'orizzonte degli eventi *in questo momento*, bisognerebbe conoscere tutto ciò che cadrà nel buco nero per sempre. Non è un dettaglio tecnico. Un orizzonte degli eventi può iniziare a crescere in una regione di spazio completamente vuota e piatta *prima* che arrivi la materia destinata ad alimentarlo, semplicemente perché quella materia arriverà in seguito. La sua area può aumentare dove, localmente, non sta accadendo assolutamente nulla.

Come può un orizzonte crescere prima che arrivi la materia?

Il nome scientifico di questo enigma è **natura teleologica dell'orizzonte degli eventi**, chiamata anche **definizione globale**. Qui «teleologico» non significa che l'orizzonte abbia uno scopo, preveda il futuro o invii un'influenza all'indietro nel tempo. Significa che si può stabilire se un evento appartenga all'interno dell'orizzonte soltanto conoscendo la storia futura completa dello spaziotempo.

La definizione formale dice la stessa cosa in modo più compatto. Immaginate l'**infinito nullo futuro** — detto «I-plus» e scritto $\mathcal{I}^+$ — come la destinazione raggiunta dalla luce che fugge per sempre verso un futuro altrimenti vuoto e infinitamente lontano. L'orizzonte degli eventi è il confine tra gli eventi dai quali un segnale luminoso diretto verso l'esterno può infine raggiungere quella destinazione e quelli dai quali nessun segnale potrà mai farlo. Nella notazione standard della relatività generale, è il confine del passato causale dell'infinito nullo futuro: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Poiché la parola *mai* è incorporata nella definizione, nessuna misura eseguita soltanto qui e ora può localizzare esattamente l'orizzonte degli eventi.

Un guscio sferico in collasso rende visibile la stranezza. Prima che il guscio arrivi, la regione al suo interno può essere vuota e localmente piatta. Inviare dal centro raggi luminosi verso l'esterno in istanti via via successivi: quelli precedenti sfuggono, mentre quelli successivi incontrano il guscio in collasso in una geometria dalla quale non possono uscire. L'orizzonte degli eventi è il confine che separa i due esiti. Seguendolo all'indietro, il confine comincia al centro e si espande attraverso l'interno ancora vuoto e piatto prima che il guscio lo raggiunga. La sua area crescente non segnala un flusso locale di materia; registra quali vie di fuga rimangono aperte nello spaziotempo completo.

Nulla in questa descrizione agisce all'indietro nel tempo. Se il guscio venisse deviato e non si formasse alcun buco nero, lo spaziotempo completo sarebbe diverso e quella regione precedente non avrebbe fatto parte di un orizzonte degli eventi. La lezione non è che il futuro cambi il passato, ma che un orizzonte degli eventi è un **confine causale globale**, non una

superficie che un osservatore vicino possa rilevare in un singolo istante. È precisamente per questo che i fisici usano orizzonti quasi-locali o dinamici quando devono seguire un buco nero mentre cambia.

Ciò rende l'orizzonte degli eventi inutilizzabile come resoconto continuo dello «stato» di un buco nero. Non è possibile localizzarlo in una simulazione al computer finché la simulazione non è terminata, e di certo non può essere usato per seguire temperatura o entropia istante per istante.

La mossa: un orizzonte definibile localmente

Il nuovo articolo, di Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo e Jonathan Shu, fonda il proprio risultato su una diversa nozione di orizzonte: una nozione **quasi-locale**, definita soltanto dalla geometria nelle sue vicinanze, senza alcun riferimento al futuro infinito. Questi **orizzonti quasi-locali** sono le superfici che i relativisti numerici usano già per localizzare i buchi neri progenitori, seguire la fusione e localizzare il residuo durante l'intera simulazione. Le leggi termodinamiche sviluppate qui si applicano alle porzioni di un orizzonte quasi-locale che soddisfano le condizioni aggiuntive per essere un **segmento di orizzonte dinamico**. In ciascun segmento di questo tipo, l'area cambia in risposta diretta al flusso locale di energia, anziché a eventi nel lontano futuro: aumenta in presenza di un flusso positivo in entrata e, nel caso di un orizzonte evaporante di tipo temporale con flusso di energia negativo, diminuisce.

Su questa base, gli autori risolvono la metà più difficile del problema. Nella termodinamica ordinaria, un sistema lontano dall'equilibrio è notoriamente sfuggente: non è possibile assegnargli in modo pulito un'unica temperatura o pressione, perché queste quantità sono ben definite soltanto dopo che il sistema si è assestato. I buchi neri presentano lo stesso problema, finché — mostrano gli autori — non si sfrutta una proprietà speciale della relatività generale. Un buco nero *in equilibrio*, cioè un buco nero di Kerr, è determinato da appena due numeri: dimensione e rotazione. Gli autori costruiscono quindi una mappa che prende ogni stato lungo un segmento di orizzonte dinamico e legge, in ogni sezione trasversale del segmento, i due numeri del buco nero di equilibrio al quale quello stato assomiglia momentaneamente. Grazie a questa mappa, a un buco nero che cambia violentemente si possono assegnare una **temperatura e una rotazione dipendenti dal tempo** lungo il segmento.

Con questi elementi — un'energia definita localmente che fluisce attraverso l'orizzonte e quantità intensive istantanee — gli autori estendono il primo principio ai buchi neri arbitrariamente lontani dall'equilibrio. È essenziale che la nuova legge descriva **variazioni finite causate da processi fisici reali** (materia e onde gravitazionali che attraversano l'orizzonte), non passaggi infinitesimi tra due stati congelati. La affiancano a un secondo principio corrispondente, la cui formulazione è ora *quantitativa*: la variazione dell'area dell'orizzonte è legata direttamente al flusso locale di energia — crescita in presenza di un flusso positivo in entrata o diminuzione, per un orizzonte evaporante di tipo temporale, in presenza di un flusso negativo. Insieme, il primo e il secondo principio conducono a un'unica, netta conclusione: per ogni fase rappresentata da un segmento di orizzonte dinamico, per quanto violenta, la misura corretta dell'entropia resta l'area del suo orizzonte.

Che cosa *non* dimostra

- **Non** risolve la gravità quantistica. Il quadro teorico fondamentale è formulato nella relatività generale; la sua applicazione all'evaporazione dei buchi neri usa l'approssimazione semiclassica, nella quale i campi quantistici della materia agiscono su uno spaziotempo classico. Continua inoltre ad assumere la consueta identificazione dell'area dell'orizzonte con l'entropia, anziché derivare tale entropia da qualcosa di più fondamentale.
- **Non** conta i microstati e non spiega *di che cosa* sia fatta l'entropia di un buco nero. Estende la contabilità della termodinamica dei buchi neri; non apre la scatola per rivelarne i gradi di libertà microscopici.
- **Non** risolve il paradosso dell'informazione dei buchi neri. Questo enigma appartiene alla teoria quantistica; l'articolo non lo affronta.
- **Non** è un'osservazione né una misura. Non vi sono telescopi, dati o segnali di onde gravitazionali: è matematica. La «temperatura» assegnata a un orizzonte dinamico durante l'evoluzione di un buco nero è una quantità definita con precisione nelle equazioni, non qualcosa che si possa leggere su un termometro.
- **Non** fornisce ancora una descrizione termodinamica continua dell'intera coalescenza di due buchi neri. Le simulazioni numeriche seguono l'orizzonte quasi-locale durante l'intera evoluzione — dai progenitori, attraverso la fusione, fino al residuo — ma, per un breve intervallo molto vicino alla fusione, quell'orizzonte non soddisfa le condizioni richieste a un segmento di orizzonte dinamico. L'articolo complementare afferma che una descrizione termodinamica di quell'intervallo è ancora in corso di elaborazione.
- **Non** rovescia Bekenstein e Hawking. *Estende* la loro descrizione al regime dinamico nel quale la legge originale, limitata all'equilibrio, non aveva nulla da dire.

Quanto sono solide le prove?

Solide, per ciò che sono: un lavoro di fisica matematica accurato e internamente coerente, proveniente da un gruppo di primo piano nel settore e pubblicato come *Editors' Suggestion* in *Physical Review Letters*. Un articolo complementare sottoposto a revisione paritaria presenta le derivazioni più estese e tratta i casi omissi dalla Lettera per ragioni di sintesi.

Le cautele oneste riguardano il *tipo* di risultato, non la sua qualità:

- Si basa sull'ipotesi convenzionale che l'area dell'orizzonte *sia* l'entropia — l'area divisa per quattro volte la costante di Newton e la costante di Planck. Se una teoria completa della gravità quantistica rivedesse un giorno questa identificazione, l'interpretazione cambierebbe con essa.
- Per brevità e semplicità, la Lettera presenta la derivazione principale usando orizzonti dinamici di tipo spaziale e assialsimmetrici. L'articolo complementare sottoposto a revisione paritaria analizza esplicitamente gli orizzonti dinamici di tipo temporale e costruisce il momento angolare senza un campo di Killing rotazionale. Per gli orizzonti evaporanti di tipo temporale, tuttavia, la trattazione esplicita della retroazione è limitata alla simmetria sferica.
- «L'entropia è uguale all'area dell'orizzonte anche fuori equilibrio» è un'*identificazione* convincente,

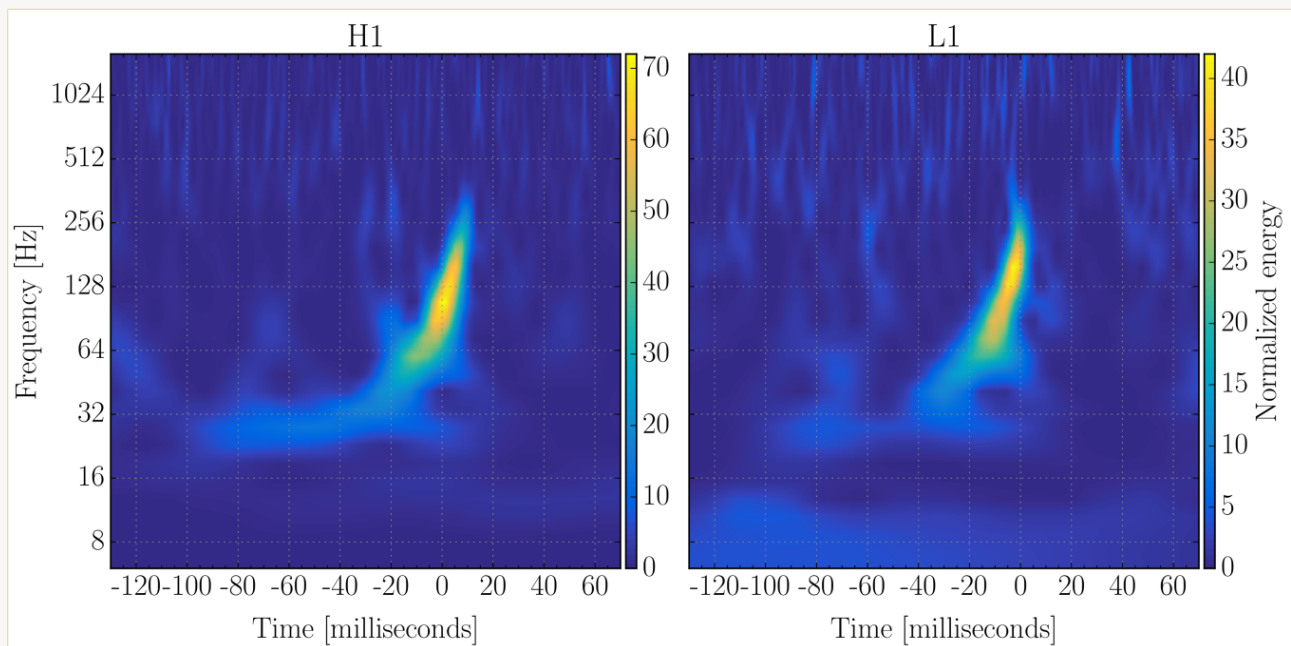
resa naturale dai nuovi primo e secondo principio, non un teorema derivato dalla statistica microscopica.

Dunque: un'estensione rigorosa di un quadro vecchio di cinquant'anni, non una scoperta sperimentale e non una nuova legge della natura in attesa di verifica.

Perché è importante

Per due motivi, uno pratico e uno concettuale.

Sul piano pratico, i buchi neri che oggi studiamo davvero — quelli che LIGO e Virgo sentono fondersi — trascorrono i loro momenti più importanti lontano dall'equilibrio. Le simulazioni seguono l'orizzonte quasi-locale dai progenitori, attraverso la fusione, fino al residuo. Le quantità definite in questo articolo si applicano alle porzioni di quell'orizzonte che soddisfano le condizioni per essere segmenti di orizzonte dinamico; il lavoro offre quindi un modo fondato di parlare dell'entropia e della temperatura di un buco nero durante la maggior parte delle fasi dell'evoluzione di una fusione e durante il collasso, non soltanto dopo che tutto si è assestato. Durante il breve intervallo immediatamente attorno alla coalescenza, l'orizzonte quasi-locale continua a essere seguito, ma resta al di fuori dell'attuale descrizione termodinamica.



GW150914, il primo segnale di onde gravitazionali rilevato direttamente, proveniva dalla fusione di due buchi neri. Queste mappe tempo-frequenza mostrano il segnale in LIGO Hanford, a sinistra, e LIGO Livingston, a destra: in entrambi i rivelatori la traccia luminosa sale mentre la frequenza del segnale aumenta verso la fusione. È un esempio reale di un sistema di buchi neri lontano dall'equilibrio; costituisce il contesto del nuovo quadro termodinamico, non una prova osservativa di quel quadro.

Sul piano concettuale, il comportamento termodinamico dei buchi neri è uno dei pochi indizi concreti che possediamo sulla gravità quantistica: è il luogo in cui gravità, teoria quantistica e termodinamica si incontrano visibilmente. Precisare che cosa significhino esattamente «entropia» e «temperatura» per un buco nero che cambia violentemente restringe il bersaglio che ogni futura teoria quantistica dovrà colpire. Non risponde alla domanda profonda su che cosa sia davvero l'entropia di un buco nero. Formula la domanda con maggiore precisione, che in questo angolo della fisica rappresenta gran parte del lavoro.

In breve

I buchi neri obbediscono a leggi che rispecchiano la termodinamica, ma il nitido «primo principio» del 1973 confrontava soltanto buchi neri immobili in equilibrio e non poteva descrivere un processo reale. Ashtekar, Paraizo e Shu estendono sia il primo sia il secondo principio ai buchi neri arbitrariamente lontani dall'equilibrio — mentre si alimentano, collassano, attraversano il ring-down e passano per la maggior parte delle fasi di una fusione — usando orizzonti quasi-locali, applicando le leggi termodinamiche ai loro segmenti di orizzonte dinamico e costruendo una mappa che assegna a ogni stato lungo quei segmenti una temperatura e uno spin istantanei. Ne consegue che l'area dell'orizzonte resta la misura corretta dell'entropia per ogni fase rappresentata da un segmento di orizzonte dinamico. Il breve intervallo molto vicino alla coalescenza non è ancora coperto da questa descrizione termodinamica, anche se le simulazioni continuano a seguire l'orizzonte quasi-locale. Il quadro teorico fondamentale è nella relatività generale, con un'applicazione semiclasica all'evaporazione; non è gravità quantistica, un'osservazione, un conteggio dei microstati né una soluzione del paradosso dell'informazione.

Valutazione critica

Che cosa mostra l'articolo: un'estensione matematicamente coerente del primo e del secondo principio della meccanica dei buchi neri ai buchi neri pienamente dinamici e lontani dall'equilibrio, costruita su orizzonti quasi-locali e sulle loro porzioni che soddisfano le condizioni per essere segmenti di orizzonte dinamico. Definisce un primo principio finito e basato sui processi e un secondo principio quantitativo, rendendo naturale identificare l'entropia di un buco nero dinamico con l'area del suo orizzonte.

Che cosa è reale ma interpretativo: l'identificazione «entropia = area dell'orizzonte» fuori equilibrio. I nuovi principi la rendono convincente, ma eredita l'ipotesi classica standard area-entropia anziché derivarla.

Che cosa non mostra: una teoria quantistica della gravità; l'origine microscopica o un «conteggio» dell'entropia dei buchi neri; una soluzione del paradosso dell'informazione; alcun risultato osservativo o sperimentale; una temperatura fisicamente misurabile.

Principali limiti: La derivazione fondamentale è nella relatività generale, mentre l'applicazione

all'evaporazione con orizzonti di tipo temporale usa l'approssimazione semiclassica; il breve intervallo molto vicino alla coalescenza binaria non è rappresentato da un segmento di orizzonte dinamico e la sua descrizione termodinamica è ancora in corso di elaborazione, anche se le simulazioni numeriche continuano a seguire l'orizzonte quasi-locale; la trattazione esplicita della retroazione degli orizzonti evaporanti di tipo temporale è limitata alla simmetria sferica; l'identificazione tra area ed entropia è assunta, non dimostrata a partire dalla meccanica statistica.

Quanta fiducia dovrebbe avere un lettore non specialista? Fiducia elevata nel fatto che si tratti di un solido e riconosciuto progresso teorico che estende realmente la termodinamica dei buchi neri al regime dinamico. Fiducia altrettanto elevata nel fatto che *non* sia un'affermazione su nuove osservazioni, non sia gravità quantistica e non risolva il famoso enigma dell'informazione. L'atteggiamento corretto: un vero passo avanti nella comprensione, compiuto con il gesso e non con un telescopio.

Aggiornamenti dopo la pubblicazione

- **Correzione · 2026-08-27**

In seguito alle osservazioni dell'autore corrispondente Abhay Ashtekar, abbiamo corretto due affermazioni secondo cui i casi di tipo temporale e non assialsimmetrici erano soltanto argomentati, anziché trattati esplicitamente nell'articolo complementare sottoposto a revisione paritaria. Durante la revisione abbiamo inoltre chiarito che il quadro teorico non copre ancora il breve intervallo molto vicino alla coalescenza binaria, nel quale l'orizzonte quasi-locale non soddisfa le condizioni richieste a un segmento di orizzonte dinamico.

- **Correzione · 2026-08-28**

In seguito a un ulteriore chiarimento dell'autore corrispondente Abhay Ashtekar, abbiamo distinto gli orizzonti quasi-locali, che le simulazioni numeriche seguono dai buchi neri progenitori, attraverso la fusione, fino al residuo, dalle porzioni che soddisfano le condizioni aggiuntive per essere segmenti di orizzonte dinamico, alle quali si applicano le leggi termodinamiche.

Fonti

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>