

The
CLEAN PAPER

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

Les trous noirs obéissent à des « lois » thermodynamiques — un nouveau résultat les étend aux trous noirs violemment hors équilibre

Depuis les années 1970, on sait que les trous noirs obéissent à des lois qui font écho à la thermodynamique, mais leur formulation la plus nette ne s'appliquait qu'à des trous noirs demeurant tranquillement à l'équilibre. Un nouvel article de Physical Review Letters étend la première et la deuxième loi aux portions des horizons quasi locaux qui constituent des segments d'horizon dynamique et peuvent être arbitrairement éloignées de l'équilibre — pendant l'accrétion, l'effondrement et la plupart des étapes d'une fusion de trous noirs. Les simulations suivent l'horizon quasi local pendant toute la fusion, mais les lois ne couvrent pas encore le bref intervalle autour de la coalescence durant lequel il ne constitue pas un segment d'horizon dynamique. Le cadre fondamental relève de la relativité générale, avec une application semi-classique à l'évaporation ; il ne s'agit ni d'une nouvelle théorie de la gravité quantique, ni d'une observation, ni d'une résolution du problème de l'information des trous noirs.

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

Les trous noirs ont des « lois » qui ressemblent à la thermodynamique. La version bien ordonnée ne fonctionnait que lorsque rien ne se passait.

L'un des faits les plus étranges de la physique est que les trous noirs se comportent comme des objets chauds. Au début des années 1970, Bekenstein et Hawking ont remarqué que les équations régissant les trous noirs correspondaient, terme par terme, aux lois de la thermodynamique : un trou noir possède une entropie proportionnelle à l'aire de son horizon et une température proportionnelle à sa gravité de surface. Hawking a ensuite montré que cette température est réelle au sens le plus profond : un trou noir émet véritablement, quoique très faiblement, un rayonnement thermique.

Qu'est-ce que le rayonnement de Hawking ?

Dans la physique classique, rien ne s'échappe d'un trou noir ; celui-ci devrait donc être parfaitement noir et n'avoir aucune température. En 1974, Stephen Hawking a montré que cela change lorsque l'on prend en compte la théorie quantique au voisinage de l'horizon : le trou noir émet une faible lueur thermique et perd donc lentement de la masse, ou « s'évapore ». Le spectre est thermique à la température de Hawking, tandis que la propagation dans l'espace-temps courbe modifie le rayonnement qui atteint l'infini. Une image heuristique courante — qui n'est pas la véritable dérivation de Hawking — décrit des fluctuations quantiques créant juste à l'extérieur de l'horizon des paires dont un membre s'échappe sous forme de rayonnement tandis que l'autre tombe dans le trou.

La caractéristique essentielle est que cette température est *inversement* proportionnelle à la masse du trou noir : plus le trou est petit, plus il est chaud. Pour tout trou noir qu'un télescope pourrait observer, la température est extraordinairement basse — bien inférieure à celle de l'espace vide environnant — de sorte que cette lueur est en pratique totalement négligeable et n'a jamais été mesurée directement. Son importance est conceptuelle : le rayonnement de Hawking transforme l'*analogie* entre la mécanique des trous noirs et la thermodynamique en véritable thermodynamique. Comme le trou possède réellement une température, la « température » et l'« entropie » de ces lois sont de vraies grandeurs thermodynamiques, pas une simple coïncidence formelle. (Il s'agit du contexte de l'article présent, pas de l'un de ses résultats.)

Cette correspondance repose notamment sur un résultat appelé la **première loi de la mécanique des trous noirs**, formulée par Bardeen, Carter et Hawking en 1973. En mots, elle dit ceci : si l'on perturbe légèrement un trou noir pour le faire passer d'un état stationnaire à un autre état stationnaire voisin, la variation de sa masse est égale à sa température multipliée par la variation de son entropie, plus un terme lié à sa rotation. C'est la version trou noir de « la chaleur reçue est égale à la température multipliée par la variation d'entropie ».

Un piège se cache toutefois dans l'expression *état stationnaire voisin*. La loi nette de 1973 compare deux trous noirs immobiles à l'équilibre, ne différant que de façon infinitésimale. Elle ne décrit jamais réellement un **processus** : un trou noir avalant une étoile, deux trous noirs en train de fusionner ou

un trou noir nouveau-né oscillant après une naissance violente. Ce sont précisément les situations que nous souhaitons le plus comprendre, et elles sont l'opposé d'un système « immobile ». La loi bien ordonnée devient muette exactement lorsque le trou noir devient intéressant.

Pourquoi la correction évidente ne fonctionne pas

On pourrait croire que la solution est simple : il suffit d'observer l'horizon grandir à mesure que la matière tombe. Le problème est de savoir *quel* horizon.

L'horizon auquel la plupart des gens pensent — l'**horizon des événements**, le véritable point de non-retour — possède une propriété subtile et gênante : il est défini par l'avenir entier de l'Univers. Pour savoir où se trouve l'horizon des événements *maintenant*, il faudrait connaître tout ce qui tombera un jour dans le trou, pour toujours. Ce n'est pas un détail technique. Un horizon des événements peut commencer à croître dans une région d'espace totalement vide et plate *avant* l'arrivée de la matière qui l'alimentera, simplement parce que cette matière est destinée à arriver plus tard. Son aire peut augmenter alors que, localement, il ne se passe absolument rien.

Comment un horizon peut-il croître avant l'arrivée de la matière ?

Le nom scientifique de cette difficulté est la **nature téléologique de l'horizon des événements**, également appelée sa **définition globale**. Ici, « téléologique » ne signifie pas que l'horizon a un but, prévoit l'avenir ou envoie une influence à rebours dans le temps. Cela signifie que l'appartenance d'un événement à l'intérieur de l'horizon ne peut être déterminée qu'à partir de l'histoire future complète de l'espace-temps.

La définition formelle exprime la même chose plus brièvement. Imaginons l'**infini nul futur** — appelé « I-plus » et noté $\mathcal{I}^+$ — comme la destination atteinte par une lumière qui s'échappe pour toujours dans un futur autrement vide et infiniment lointain. L'horizon des événements est la frontière entre les événements depuis lesquels un signal lumineux dirigé vers l'extérieur peut finalement atteindre cette destination et ceux depuis lesquels aucun signal ne le pourra jamais. Dans la notation standard de la relativité générale, c'est la frontière du passé causal de l'infini nul futur : $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$. Comme le mot *jamais* est intégré à cette définition, aucune mesure limitée à l'ici et maintenant ne peut localiser exactement l'horizon des événements.

Une coquille sphérique en effondrement rend l'étrangeté visible. Avant son arrivée, la région intérieure peut être vide et localement plate. Envoyons depuis le centre des rayons lumineux vers l'extérieur à des instants successifs : les premiers s'échappent, tandis que les derniers rencontrent la coquille en effondrement dans une géométrie dont ils ne peuvent plus sortir. L'horizon des événements est la frontière séparant ces deux destins. Si on la remonte vers le passé, cette frontière commence au centre et s'étend à travers l'intérieur encore vide et plat avant que la coquille ne l'atteigne. L'augmentation de son aire n'indique aucun flux local de matière à cet endroit ; elle enregistre les voies d'évasion qui restent ouvertes dans l'espace-temps complet.

Rien dans cette image n'agit à rebours dans le temps. Si la coquille était détournée et qu'aucun

trou noir ne se formait, l'espace-temps complet serait différent et cette région antérieure n'aurait pas fait partie d'un horizon des événements. La leçon n'est pas que le futur modifie le passé, mais qu'un horizon des événements est une **frontière causale globale**, et non une surface qu'un observateur proche peut détecter à un instant donné. C'est précisément pour cette raison que les physiciens utilisent des horizons quasi locaux ou dynamiques lorsqu'ils doivent suivre l'évolution d'un trou noir.

Cela rend l'horizon des événements inutilisable comme compte rendu continu de l'« état » d'un trou noir. Dans une simulation informatique, on ne peut même pas le localiser avant la fin de la simulation, et encore moins l'utiliser pour suivre une température ou une entropie instant après instant.

Le changement décisif : un horizon définissable localement

Le nouvel article d'Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo et Jonathan Shu fonde son résultat sur une autre notion d'horizon — une notion **quasi locale**, définie uniquement par la géométrie de son propre voisinage, sans aucune référence au futur infini. Ces **horizons quasi locaux** sont les surfaces que les spécialistes de la relativité numérique utilisent déjà pour localiser les trous noirs progéniteurs, suivre la fusion et localiser le trou noir résiduel tout au long d'une simulation. Les lois thermodynamiques élaborées ici s'appliquent aux portions d'un horizon quasi local qui satisfont aux conditions supplémentaires définissant un **segment d'horizon dynamique**. Sur chacun de ces segments, l'aire varie en réponse directe au flux d'énergie local, et non à des événements situés dans un futur lointain : elle augmente sous l'effet d'un flux entrant positif et diminue dans le cas d'un horizon de type temps en évaporation soumis à un flux d'énergie négatif.

Les auteurs résolvent ensuite la moitié la plus difficile du problème. En thermodynamique ordinaire, un système très loin de l'équilibre est notoirement difficile à décrire : on ne peut pas lui attribuer proprement une température ou une pression unique, car ces grandeurs ne sont bien définies qu'après stabilisation. Les trous noirs rencontrent la même difficulté — jusqu'à ce que les auteurs exploitent une propriété particulière de la relativité générale. Un trou noir à l'équilibre — un trou noir de Kerr — est entièrement déterminé par seulement deux nombres : sa taille et sa rotation. Les auteurs construisent donc une application qui prend chaque état le long d'un segment d'horizon dynamique et, à chaque section de ce segment, lit les deux nombres du trou noir à l'équilibre auquel il ressemble momentanément. Grâce à cette application, même un trou noir en évolution violente peut recevoir une **température et une rotation dépendantes du temps** le long du segment.

Avec ces éléments — une énergie définie localement qui traverse l'horizon et des grandeurs intensives instantanées —, ils étendent la première loi aux trous noirs arbitrairement éloignés de l'équilibre. Point crucial, la nouvelle loi décrit des **variations finies causées par des processus physiques réels** (le passage de matière et d'ondes gravitationnelles à travers l'horizon), et non des pas infinitésimaux entre deux états figés. Ils lui associent une deuxième loi correspondante, dont l'énoncé est désormais *quantitatif* : la variation de l'aire de l'horizon est directement liée au flux d'énergie local — croissance sous un flux entrant positif, ou diminution pour un horizon de type temps en évaporation sous un flux négatif. Ensemble, les première et deuxième lois conduisent à une conclusion unique et nette :

pour toute phase représentée par un segment d'horizon dynamique, aussi violente soit-elle, la bonne mesure de l'entropie reste l'aire de son horizon.

Ce que cela ne démontre *pas*

- Il ne **résout pas** la gravité quantique. Le cadre fondamental est formulé en relativité générale ; son application à l'évaporation des trous noirs emploie l'approximation semi-classique, dans laquelle des champs de matière quantiques agissent sur un espace-temps classique. Il suppose toujours l'identification habituelle de l'aire de l'horizon à l'entropie, au lieu de dériver cette entropie de quelque chose de plus fondamental.
- Cela ne **compte pas les micro-états** et n'explique pas *de quoi* est faite l'entropie d'un trou noir. Le travail étend la comptabilité de la thermodynamique des trous noirs ; il n'ouvre pas la boîte pour révéler les degrés de liberté microscopiques.
- Cela ne **résout pas le paradoxe de l'information** des trous noirs. Cette énigme appartient à la théorie quantique ; l'article ne l'aborde pas.
- Ce n'est **ni une observation ni une mesure**. Aucun télescope, aucune donnée et aucun signal d'onde gravitationnelle n'interviennent — il s'agit de mathématiques. La « température » attribuée à un horizon dynamique au fil de l'évolution d'un trou noir est une grandeur précisément définie dans les équations, et non quelque chose que l'on pourrait lire sur un thermomètre.
- Il ne fournit **pas encore** une description thermodynamique continue de toute la coalescence de deux trous noirs. Les simulations numériques suivent l'horizon quasi local pendant toute l'évolution — des progéniteurs à la fusion puis au trou noir résiduel — mais, durant un bref intervalle tout près de la fusion, cet horizon ne satisfait plus aux conditions requises pour constituer un segment d'horizon dynamique. Selon l'article compagnon, la description thermodynamique de cet intervalle reste un travail en cours.
- Cela ne **renverse pas** Bekenstein et Hawking. Le travail *étend* leur cadre au régime dynamique sur lequel la loi initiale, limitée à l'équilibre, ne disait rien.

Quelle est la solidité des preuves ?

Forte, au regard de la nature du résultat : un travail de physique mathématique soigneux et cohérent, issu d'un groupe de premier plan dans le domaine et publié comme *Editors' Suggestion* dans Physical Review Letters. Un article compagnon évalué par les pairs présente les dérivations plus longues et traite les cas omis de la Letter par souci de concision.

Les réserves honnêtes portent sur la *nature* du résultat, pas sur sa qualité :

- Il repose sur l'hypothèse conventionnelle selon laquelle l'aire de l'horizon *est* l'entropie — l'aire divisée par quatre fois la constante de Newton et la constante de Planck. Si une théorie complète de la gravité quantique devait un jour réviser cette identification, l'interprétation évoluerait avec elle.

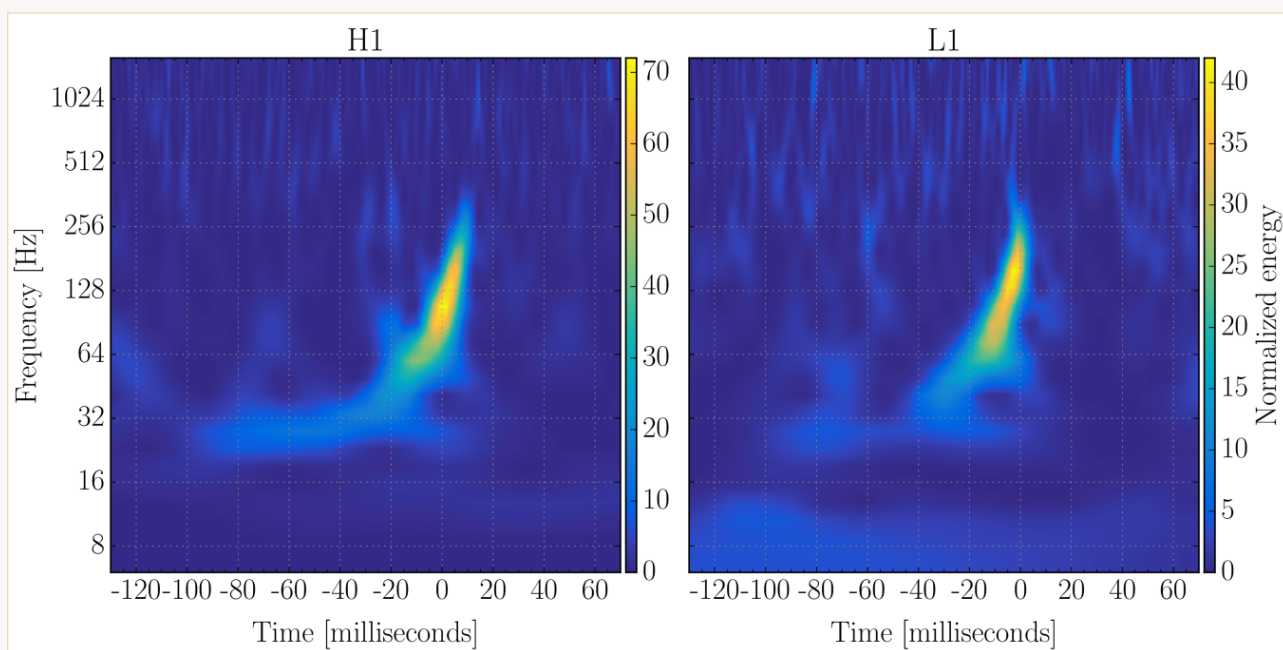
- Par souci de concision et de simplicité, la courte Letter présente la dérivation principale pour des horizons dynamiques de type espace et à symétrie axiale. L'article compagnon évalué par les pairs analyse explicitement les horizons dynamiques de type temps et construit le moment angulaire sans champ de Killing rotationnel. Pour les horizons de type temps en évaporation, le traitement explicite de la rétroaction est toutefois limité à la symétrie sphérique.
- « L'entropie est égale à l'aire de l'horizon, même hors équilibre » est une *identification* convaincante rendue naturelle par les nouvelles première et deuxième lois — pas un théorème démontré à partir de statistiques microscopiques.

Il s'agit donc d'une extension rigoureuse d'un cadre vieux de cinquante ans, pas d'une découverte expérimentale ni d'une nouvelle loi physique attendant d'être testée.

Pourquoi c'est important

Pour deux raisons, l'une pratique et l'autre conceptuelle.

En pratique, les trous noirs que nous étudions réellement aujourd'hui — ceux que LIGO et Virgo entendent fusionner — passent leurs moments les plus importants très loin de l'équilibre. Les simulations suivent l'horizon quasi local à travers les progéniteurs, la fusion et le trou noir résiduel. Les grandeurs introduites dans cet article s'appliquent aux portions de cet horizon qui constituent des segments d'horizon dynamique, offrant ainsi une manière fondée de parler de l'entropie et de la température d'un trou noir pendant la plupart des étapes de l'évolution d'une fusion et au cours d'un effondrement, et non uniquement lorsque tout s'est stabilisé. Durant le bref intervalle qui entoure immédiatement la coalescence, l'horizon quasi local reste suivi, mais sort du domaine de la description thermodynamique actuelle.



GW150914, le premier signal d'onde gravitationnelle détecté directement, provenait de la fusion de deux trous

noirs. Ces cartes temps-fréquence montrent le signal dans LIGO Hanford — à gauche — et LIGO Livingston — à droite : dans les deux détecteurs, la trace lumineuse monte lorsque la fréquence du signal augmente à l'approche de la fusion. C'est un exemple réel de système de trous noirs loin de l'équilibre ; il donne un contexte au nouveau cadre thermodynamique, mais n'en constitue pas une preuve observationnelle.

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

Sur le plan conceptuel, le comportement thermodynamique des trous noirs est l'un des rares indices concrets dont nous disposons sur la gravité quantique — l'endroit où gravité, théorie quantique et thermodynamique se rencontrent visiblement. Préciser ce que signifient exactement « entropie » et « température » pour un trou noir en évolution violente resserre la cible que toute future théorie quantique devra atteindre. Cela ne répond pas à la question profonde de la véritable nature de l'entropie d'un trou noir. Cela formule la question plus précisément — ce qui, dans ce domaine de la physique, représente une grande partie du travail.

Résumé clair

Les trous noirs obéissent à des lois qui font écho à la thermodynamique, mais la formulation nette de la « première loi » de 1973 ne comparait que des trous noirs immobiles à l'équilibre et ne pouvait décrire un processus réel. Ashtekar, Paraizo et Shu étendent la première et la deuxième loi aux trous noirs arbitrairement éloignés de l'équilibre — qui absorbent de la matière, s'effondrent, passent par la phase d'amortissement ou traversent la plupart des étapes d'une fusion — en utilisant des horizons quasi locaux, en appliquant les lois thermodynamiques à leurs segments d'horizon dynamique et en construisant une application qui attribue à chaque état le long de ces segments une température et un spin instantanés. Il en ressort que l'aire de l'horizon reste la bonne mesure de l'entropie pour chaque phase représentée par un segment d'horizon dynamique. Le bref intervalle tout près de la coalescence n'est pas encore couvert par cette description thermodynamique, même si les simulations continuent de suivre l'horizon quasi local. Le cadre fondamental relève de la relativité générale, avec une application semi-classique à l'évaporation ; il ne s'agit ni de gravité quantique, ni d'une observation, ni d'un décompte des micro-états, ni d'une solution au paradoxe de l'information.

Mise au point

Ce que montre l'article : Une extension mathématiquement cohérente de la première et de la deuxième loi de la mécanique des trous noirs aux trous noirs pleinement dynamiques et très éloignés de l'équilibre, construite sur des horizons quasi locaux et sur les portions de ceux-ci qui satisfont aux conditions définissant des segments d'horizon dynamique. Elle définit une première loi finie fondée sur les processus et une deuxième loi quantitative, et rend naturelle l'identification de l'entropie d'un trou noir dynamique avec l'aire de son horizon.

Ce qui est réel mais interprétatif : L'identification « entropie = aire de l'horizon » hors équilibre. Les nouvelles lois la rendent convaincante, mais elle hérite de l'hypothèse classique standard aire-

entropie au lieu de la dériver.

Ce que l'étude ne montre pas : Une théorie quantique de la gravité ; une origine microscopique ou un « comptage » de l'entropie des trous noirs ; une résolution du paradoxe de l'information ; un résultat observationnel ou expérimental ; une température physiquement mesurable.

Principales limites : La dérivation fondamentale relève de la relativité générale, tandis que l'application à l'évaporation d'un horizon de type temps emploie l'approximation semi-classique ; le bref intervalle tout près de la coalescence binaire n'est pas représenté par un segment d'horizon dynamique, et sa description thermodynamique reste un travail en cours, même si les simulations numériques continuent de suivre l'horizon quasi local ; le traitement explicite de la rétroaction des horizons de type temps en évaporation est limité à la symétrie sphérique ; l'identification entre aire et entropie est supposée, et non démontrée à partir de la mécanique statistique.

Quel niveau de confiance un lecteur non spécialiste devrait-il avoir ? Une forte confiance dans le fait qu'il s'agit d'un progrès théorique solide et reconnu, qui étend réellement la thermodynamique des trous noirs au régime dynamique. Une confiance tout aussi forte dans le fait qu'il ne s'agit *pas* de nouvelles observations, ni de gravité quantique, ni d'une résolution du célèbre problème de l'information. La bonne attitude : un vrai pas en avant dans la compréhension, réalisé à la craie plutôt qu'au télescope.

Mises à jour après publication

- **Correction · 2026-08-27**

À la suite des remarques de l'auteur correspondant Abhay Ashtekar, nous avons corrigé deux affirmations qui présentaient les cas de type temps et non axisymétriques comme étant seulement argumentés, alors qu'ils sont explicitement traités dans l'article compagnon évalué par les pairs. Au cours de cette révision, nous avons également précisé que le cadre ne couvre pas encore le bref intervalle tout près de la coalescence binaire, durant lequel l'horizon quasi local ne satisfait plus aux conditions requises pour constituer un segment d'horizon dynamique.

- **Correction · 2026-08-28**

À la suite d'une précision supplémentaire de l'auteur correspondant Abhay Ashtekar, nous avons distingué les horizons quasi locaux, que les simulations numériques suivent depuis les trous noirs progéniteurs jusqu'au trou noir résiduel en passant par la fusion, des portions qui satisfont aux conditions supplémentaires définissant des segments d'horizon dynamique, auxquels s'appliquent les lois thermodynamiques.

Sources

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>