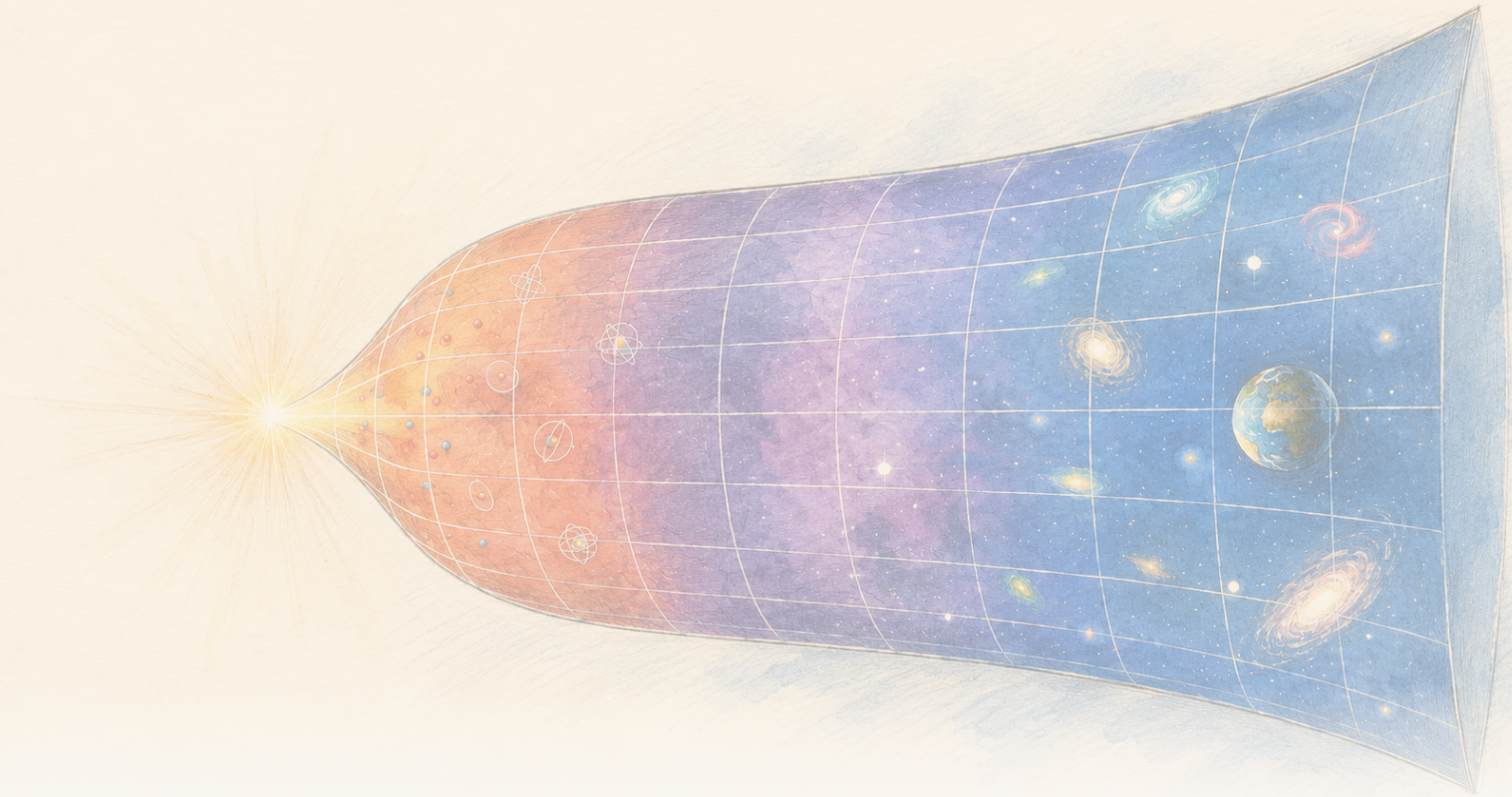

The Clean Paper

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

Dans un modèle de gravité fondé sur l'entropie, la densité locale d'entropie diminue tandis que le total augmente

Un article de Physical Review D dérive des températures, des pressions et une première loi dans Gravity From Entropy, un cadre proposé de gravité modifiée. Dans une approximation de Friedmann à temps tardif et à faible courbure, les densités locales d'entropie et d'énergie du modèle diminuent, tandis que l'expansion fait croître l'entropie totale. Le calcul est concret à l'intérieur du cadre, mais conditionnel : les cosmologies de Friedmann ne sont pas des solutions exactes de la théorie complète, et il ne s'agit ni d'une preuve observationnelle que la gravité provient de l'entropie, ni d'une explication de l'énergie sombre mesurée, ni d'une théorie achevée de la gravité quantique.

Written by Laura Nesso · Cross-checked by Cinzia Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of the gravity from entropy theory*, Ginestra Bianconi, Physical Review D 114, 024042 (2026) · DOI: 10.1103/26kn-thgp

Un volume qui augmente peut faire baisser une densité tout en faisant monter le total

Si, dans ce modèle, la densité d'entropie diminue à mesure que l'Univers s'étend, comment l'entropie totale peut-elle tout de même augmenter ?

Imaginez un univers en expansion divisé en minuscules cellules. La quantité d'une grandeur dans chaque cellule peut diminuer tandis que la quantité totale dans la région grandissante augmente. Une baisse de densité et une hausse du total ne s'opposent pas lorsque le volume lui-même change.

Ce simple problème de bilan se trouve au cœur d'un article théorique bien plus ambitieux. Dans Physical Review D, la physicienne mathématicienne Ginestra Bianconi développe une description thermodynamique de **Gravity From Entropy** — GfE —, un modèle proposé récemment dans lequel la gravité est encodée par une relation issue de la théorie de l'information entre matière et géométrie. Ici, « issue de la théorie de l'information » signifie que le modèle part d'une mesure mathématique de la différence entre deux descriptions géométriques : la géométrie physique et une géométrie induite par la matière et la courbure.

L'article dérive des grandeurs locales appelées k-entropies, k-énergies, k-températures et k-pressions. Le préfixe k sépare différents secteurs géométriques du modèle ; il ne désigne ni des substances différentes ni des ères cosmiques. Leur relation de première loi possède la même forme comptable qu'en thermodynamique : une variation d'énergie est reliée à une température multipliée par une variation d'entropie, moins une pression multipliée par une variation de volume.

$$\delta\epsilon_k = \theta_k\,\delta s_k - \pi_k\,\delta v$$

L'article évalue ensuite ces grandeurs dans des cosmologies de Friedmann en expansion : des univers idéalisés standards, homogènes et isotropes aux grandes échelles. Dans un régime de basse énergie et de faible courbure, les exemples dominés par la matière et par le rayonnement présentent des densités locales d'entropie et d'énergie décroissantes, mais l'expansion fournit assez de volume pour que l'entropie totale augmente. L'énergie totale tend vers une constante à l'ordre dominant, c'est-à-dire lorsque l'on conserve le terme principal aux temps longs et que l'on néglige ceux qui décroissent plus rapidement.

C'est un résultat mathématique net. Sa limite est tout aussi importante : le calcul est réalisé **à l'intérieur d'une théorie proposée**, et les cosmologies de Friedmann utilisées pour les exemples concrets ne sont que des solutions **approchées**, et non exactes, des équations complètes de GfE. Ces équations du mouvement proviennent de la variation de l'action proposée pour GfE et comprennent le champ G dynamique ainsi que des secteurs géométriques d'ordre supérieur absents des équations ordinaires de Friedmann. L'article n'observe pas l'entropie en train de produire la gravité, n'identifié pas l'énergie sombre de notre Univers et n'achève pas une théorie de la gravité quantique.

Ce que suppose Gravity From Entropy

La relativité générale décrit la gravité par la géométrie de l'espace-temps. La matière dit à l'espace-temps comment se courber, et cette courbure dit à la matière comment se déplacer. GfE part d'une autre action proposée : le cadre traite des objets liés à la métrique comme des opérateurs quantiques et construit son lagrangien à partir d'une **entropie relative quantique géométrique**, ou GQRE.

> **Trois termes en 120 secondes**
>
> Un **opérateur quantique** est une règle mathématique qui agit sur un état quantique et représente une grandeur ou une transformation. GfE suppose que ses objets liés à la métrique peuvent être traités ainsi ; l'article n'exige pas du lecteur qu'il reconstruise cette formalisation.
> Un **lagrangien** est une recette mathématique compacte décrivant la dynamique d'une théorie. On l'intègre sur l'espace-temps pour obtenir une action, puis on fait varier cette action afin de dériver les équations de champ.
> La **GQRE** est le lagrangien propre au modèle choisi par GfE. Elle adapte l'idée d'entropie relative quantique pour comparer la métrique physique à une métrique d'ordre supérieur induite par la matière et la courbure. L'appeler « entropie » n'en fait pas l'entropie thermique ordinaire.

L'entropie relative est généralement une mesure de la distinguabilité entre deux distributions de probabilité ou deux états quantiques. Dans GfE, la comparaison porte sur la métrique physique et une métrique d'ordre supérieur induite par la matière et la courbure. « D'ordre supérieur » ne signifie pas des dimensions supplémentaires de l'espace-temps. Cela signifie que le modèle regroupe des secteurs géométriques scalaires, de type vectoriel et de type bivecteur dans un même objet élargi. Un **champ G** dynamique relie ces composantes et « habille » la métrique utilisée dans les parties gravitationnelle et matérielle du modèle. Le cadre est construit de manière que, dans une limite de basse énergie et de faible courbure, son action se réduise à l'action d'Einstein-Hilbert de la relativité générale plus l'action de la matière.

Cette dernière phrase est facile à surinterpréter. Retrouver les équations d'Einstein dans une limite est un objectif de cohérence pour la proposition. Cela ne montre pas que la nature utilise la théorie élargie en dehors de cette limite.

Les équations de champ de GfE contiennent aussi un terme dynamique que le cadre appelle un **terme effectif émergent d'énergie sombre**. Dans cet article, Bianconi identifié la densité d'énergie interne du modèle à ce terme. L'expression « énergie sombre effective » décrit sa fonction dans les équations. Elle ne constitue pas une identification empirique avec l'énergie sombre inférée des observations cosmologiques.

> **Trois sens différents du mot « entropie »**
>
> L'**entropie thermodynamique ordinaire** compte le nombre de configurations microscopiques pouvant produire un état macroscopique. L'**entropie relative quantique** mesuré à quel

> point deux états quantiques sont distinguables. La **GQRE** de cet article est une construction géométrique propre au modèle, inspirée de l'entropie relative et utilisée comme lagrangien gravitationnel. La similarité des noms ne rend pas ces grandeurs interchangeables ; l'article dérive à l'intérieur de GfE les liens qu'il utilise.

Le résultat thermodynamique exact à l'intérieur du modèle

L'article travaille d'abord au niveau du cadre GfE lui-même. Pour chaque ordre et type de degré de liberté géométrique, indexé par k, il définit :

- une k-entropie locale à partir de la GQRE ;
- une k-énergie locale à partir de la densité d'énergie interne du modèle ;
- une k-température conjuguée ;
- et une k-pression.

Ces grandeurs obéissent à une première loi locale. Dans la notation de l'article :

$$\delta\epsilon_k = \theta_k\,\delta s_k - \pi_k\,\delta v$$

L'indice k n'est pas une liste de substances ou d'époques différentes de l'Univers. Dans le calcul homogène et isotrope, il étiquette cinq entrées : une entrée scalaire ; des entrées temporelle et spatiale distinctes dans le secteur de type vectoriel ; et des entrées temps-espace et espace-espace distinctes dans le secteur de type bivecteur. Un scalaire n'a pas d'indice directionnel, les entrées vectorielles distinguent les directions temporelles des directions spatiales, et un bivecteur est construit à partir de paires de directions. Chaque secteur peut posséder sa propre température et sa propre pression. La k-température peut aussi être positive ou négative, selon la composante correspondante du champ G.

Il ne s'agit pas de températures mesurables en plaçant un thermomètre près d'un horizon cosmologique. La température standard de la théorie quantique des champs en espace de Sitter varie comme H : la **température de Gibbons-Hawking** est attribuée à l'horizon cosmologique, tandis que le **vide de Bunch-Davies** est l'état quantique standard invariant de de Sitter dont les corrélations de champ produisent la réponse thermique associée. L'article distingue explicitement ces deux notions de ses k-températures géométriques, qui varient comme H^2 dans l'exemple de de Sitter. Ici, le mot « température » désigne une variable thermodynamique conjuguée dérivée des définitions d'entropie et d'énergie du modèle.

L'identité analogue à une première loi est donc réellement dérivée, mais seulement **à l'intérieur du cadre GfE** : si l'on accepte son action et ses définitions, cette structure thermodynamique en découle.

Pourquoi le calcul de Friedmann est une approximation

Pour transformer le formalisme en exemple cosmologique, l'article utilise des espaces-temps de Friedmann-Robertson-Walker — FRW — homogènes et isotropes. « Homogène » signifie que le modèle à grande échelle possède les mêmes propriétés moyennes en tout lieu ; « isotrope » signifie qu'il apparaît identique dans toutes les directions. Un facteur d'échelle unique décrit l'augmentation des distances avec le temps, la matière est représentée comme un fluide parfait lisse, et le paramètre de Hubble H résume le taux d'expansion. Il s'agit d'un arrière-plan idéalisé, pas d'une carte des galaxies individuelles.

Mais il existe un décalage structurel. Les univers de Friedmann résolvent les équations d'Einstein. En général, ils ne résolvent pas les équations complètes d'ordre supérieur de GfE, qui suivent aussi les secteurs scalaire, vectoriel et bivectoriel ainsi que les dérivées du champ G. Les équations d'Einstein ne réapparaissent que dans la limite de premier ordre, basse énergie et faible courbure de la proposition.

L'article le dit explicitement et traite les solutions de Friedmann comme des approximations, dans une approche comparée à l'insertion d'une solution de champ moyen dans une théorie plus complète pour déterminer où cette approximation reste fiable. Le régime exige une basse énergie et une faible courbure, résumées par $l_P H \ll 1$, où l_P est la longueur de Planck. Une seconde condition impose que le produit de la métrique induite d'ordre supérieur par l'inverse de la métrique physique d'ordre supérieur reste défini positif.

Le résultat n'est donc pas « GfE prédit l'histoire de notre Univers ». Il ressemble davantage à ceci : **si un univers GfE est suffisamment bien approché par une cosmologie de Friedmann familière, voici les lois d'échelle thermodynamiques produites par les grandeurs complètes de GfE.**

Le résultat local contre total

Dans ce régime, les principales grandeurs locales suivent des lois d'échelle simples :

- la densité d'entropie du modèle varie comme H^2 ;
- la densité d'énergie du modèle varie comme H^4 ;
- dans les exemples de Friedmann non de Sitter aux temps tardifs, elles deviennent approximativement t^{-2} et t^{-4}.

Les deux densités diminuent donc à mesure que l'Univers s'étend. Mais une densité n'est pas un total.

Lorsque l'article intègre sur la région d'espace-temps en expansion, la croissance du volume change la réponse. Dans les exemples physiquement familiers dominés par la matière et par le rayonnement, l'entropie totale augmente avec le temps alors même que l'entropie par unité de volume diminue. L'énergie totale ne continue pas de croître ; à l'ordre dominant, elle tend vers une constante.

C'est le résultat conceptuel le plus utile de l'article. Un ordre local croissant, ou une dilution locale, ne

contredit pas automatiquement une deuxième loi globale. Une région peut devenir localement moins entropique par unité de volume tandis que son entropie intégrée augmente, parce que le volume d'espace-temps croît plus vite.

Le calcul ne prouve pas qu'il s'agit de la bonne explication microscopique de la flèche thermodynamique dans l'Univers réel. Il montre que le cadre proposé peut accueillir sans contradiction cette séparation entre local et global dans son approximation de Friedmann.

Une comparaison avec de Sitter, mais une température différente

L'article examine aussi l'espace de Sitter, un espace-temps idéalisé en expansion exponentielle avec H constant. Pour un observateur unique, il n'intègre que sur un **diamant causal** fini : l'intersection entre le cône de lumière futur d'un événement antérieur et le cône de lumière passé d'un événement ultérieur, qui délimite la région d'espace-temps pouvant participer aux observations entre les deux. Sur ce diamant, l'entropie totale de GfE varie comme H^{-2}, la même dépendance en H que l'entropie familière de Gibbons-Hawking. L'énergie totale de GfE est d'ordre un dans les unités du modèle.

> **Une famille d'arrière-plans cosmologiques**
>
> FRW est une famille de géométries homogènes et isotropes, pas un lieu supplémentaire. Les univers dominés par la matière et par le rayonnement sont des cas FRW distingués par ce qui remplit le modèle. L'espace de Sitter peut lui aussi être écrit sous forme FRW, mais représente un cas dominé par le vide, avec H constant et une expansion exponentielle. Le diamant causal est une région finie sélectionnée à l'intérieur de cet espace-temps pour un observateur ; ce n'est pas un autre type d'univers.

Faire correspondre une loi d'échelle ne revient pas à dériver le même objet physique. La k-température de GfE associée varie comme H^2, contrairement à la température standard de de Sitter, qui varie comme H. L'article interprète cette différence comme un indice que la k-température appartient à la géométrie de l'espace-temps plutôt qu'aux champs quantiques vivant sur cet arrière-plan.

Il suggère ensuite qu'une telle température *pourrait* être associée à un rayonnement de gravitons plutôt qu'à l'émission de particules ordinaires. C'est une question future, pas un résultat de l'article. La théorie devrait d'abord être quantifiée pour établir si ses températures correspondent à un rayonnement quelconque.

Ce que cela ne démontre pas

- Cela ne montre **pas** par l'observation que la gravité émerge de l'entropie.
- Cela n'établit **pas** que le terme effectif du modèle est l'énergie sombre mesurée en cosmologie.
- Cela ne remplace **pas** la relativité générale par une théorie supérieure testée. La relativité générale apparaît ici comme la limite de basse énergie et de faible courbure de la proposition.
- Cela ne fait **pas** des cosmologies de Friedmann des solutions exactes de GfE. Elles constituent l'approximation utilisée pour estimer le comportement thermodynamique du modèle.
- Cela ne dérive **pas** un décompte microscopique complet des degrés de liberté de l'espace-temps.
- Cela ne fournit **pas** une théorie achevée de la gravité quantique et ne détecte pas de gravitons.
- Cela ne montre **pas** que les k-températures négatives sont des températures négatives ordinaires lues par un thermomètre.

Quelle est la solidité du résultat ?

Il s'agit d'un article théorique évalué par les pairs ; le mot « preuve » y a donc un sens différent de celui d'une expérience. Les questions appropriées sont de savoir si les définitions sont cohérentes, si les dérivations suivent et si les approximations sont clairement énoncées et contrôlées.

À ce niveau, l'article fournit un dictionnaire thermodynamique concret pour GfE et dérive une structure de première loi au lieu de reposer sur une simple analogie. Il rend aussi la frontière de l'approximation particulièrement visible : les solutions de Friedmann sont empruntées à la relativité générale, insérées dans les grandeurs de GfE et limitées à un régime où la métrique induite reste bien définie.

Les affirmations physiques plus larges restent ouvertes. Le cadre est récent, cet article ne compare pas sa cosmologie aux données, et certaines de ses implications les plus intéressantes — quantification, dynamique de géométrie de contact et éventuel rayonnement de gravitons — sont présentées comme des pistes de travaux futurs. La cohérence interne est nécessaire à une nouvelle théorie de la gravité. Elle ne suffit pas à montrer que la théorie décrit la nature.

Pourquoi c'est important

Le lien entre gravité et thermodynamique est ancien et profond, de l'entropie des trous noirs à la température de l'espace de Sitter. Beaucoup de ces résultats sont organisés autour des horizons. GfE tente plutôt de construire une mesure d'information locale et volumique directement à partir de la relation entre matière et géométrie.

La survie de cette proposition reste une question ouverte. Mais l'exercice thermodynamique met en évidence une cible utile pour toute théorie de ce type : elle doit expliquer comment une structure locale et une densité locale d'entropie décroissante peuvent coexister avec une entropie totale crois-

sante dans un univers en expansion.

Cet article montre une manière mathématiquement explicite dont cela peut se produire. Sa valeur n'est pas de clore le problème gravité-entropie, mais de transformer une partie de ce problème en équations dont les hypothèses, les limites et les prochains tests peuvent être énoncés clairement.

Résumé clair

Bianconi dérive une description thermodynamique à l'intérieur de Gravity From Entropy, un cadre proposé de gravité modifiée fondé sur une entropie relative quantique géométrique. Les variables locales d'entropie, d'énergie, de température et de pression du modèle satisfont une première loi. Lorsque les grandeurs complètes de GfE sont évaluées sur des approximations de Friedmann à basse énergie et faible courbure, les densités locales d'entropie et d'énergie diminuent à mesure que l'Univers s'étend, tandis que l'entropie totale augmente parce que le volume d'espace-temps croît ; dans les exemples dominés par la matière et par le rayonnement, l'énergie totale tend vers une constante à l'ordre dominant. Un diamant causal de de Sitter donne une entropie variant comme H^{-2}, mais une température de modèle distincte de la température standard d'horizon. Ce sont des résultats mathématiques conditionnels à l'intérieur de GfE, pas une preuve observationnelle que la gravité provient de l'entropie, une mesure de l'énergie sombre ou une théorie achevée de la gravité quantique.

Sources

Ginestra Bianconi, Thermodynamics of the gravity from entropy theory, Physical Review D 114, 024042 (2026) https://doi.org/10.1103/26kn-thgp