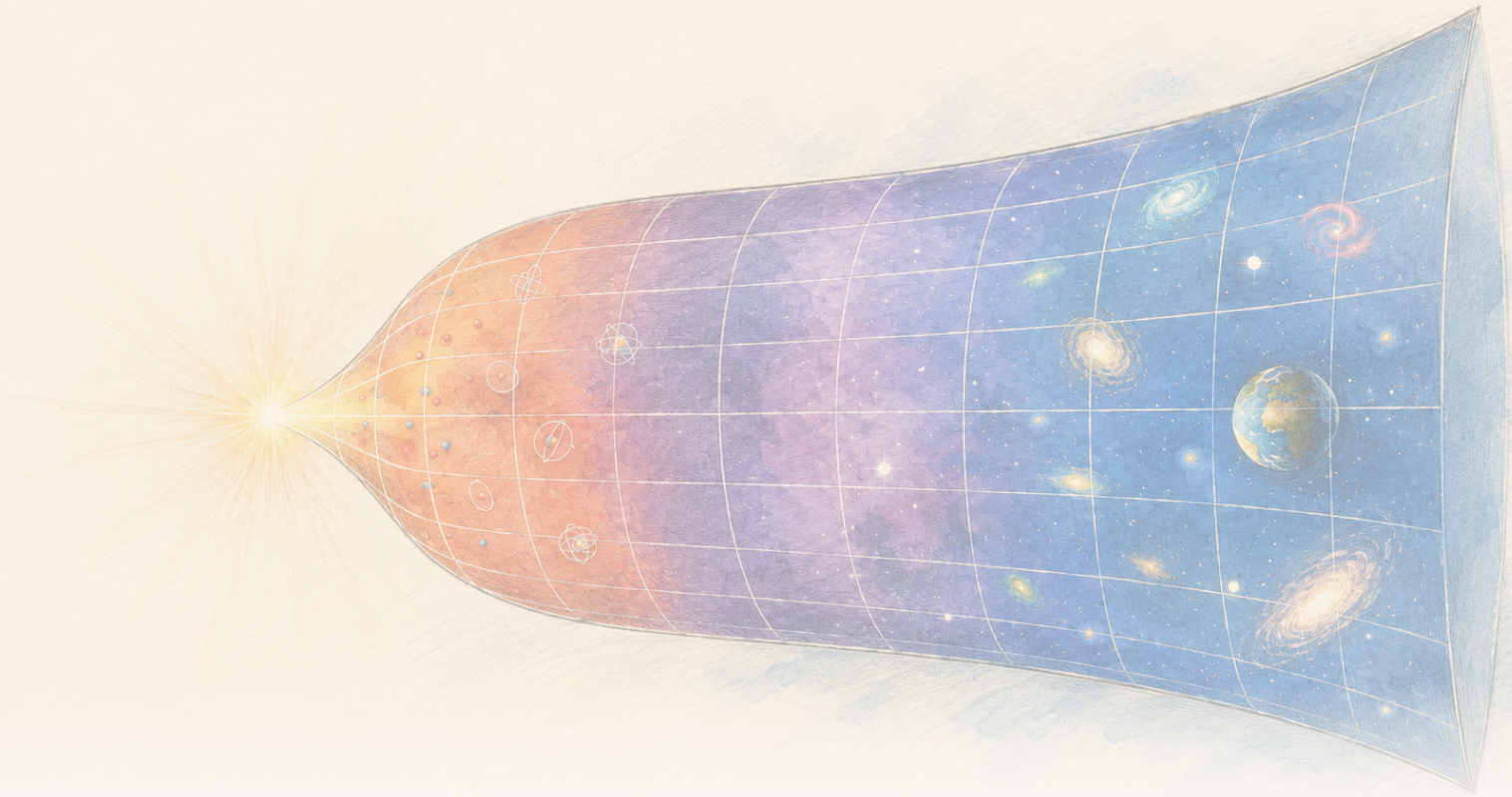

The Clean Paper

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

W modelu grawitacji opartym na entropii lokalna gęstość entropii maleje, podczas gdy suma rośnie

Praca w Physical Review D wyprowadza temperatury, ciśnienia i pierwsze prawo wewnątrz Gravity From Entropy, proponowanych ram zmodyfikowanej grawitacji. W późnoczasowym przybliżeniu Friedmanna o małej krzywiźnie lokalne gęstości entropii i energii modelu maleją, podczas gdy ekspansja sprawia, że całkowita entropia rośnie. Obliczenie jest wewnętrznie konkretne, ale warunkowe: kosmologie Friedmanna nie są dokładnymi rozwiązaniami pełnej teorii, a wynik nie jest obserwacyjnym dowodem, że grawitacja pochodzi z entropii, wyjaśnieniem zmierzonej ciemnej energii ani ukończoną teorią grawitacji kwantowej.

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

Rosnąca objętość może obniżać gęstość, a jednocześnie zwiększać sumę

Jeśli w tym modelu gęstość entropii maleje wraz z rozszerzaniem się wszechświata, jak całkowita entropia może mimo to rosnąć?

Wyobraźmy sobie rozszerzający się wszechświat podzielony na maleńkie komórki. Ilość czegoś w każdej komórce może spadać, nawet gdy całkowita ilość w rosnącym obszarze wzrasta. Spadek gęstości i wzrost sumy nie są przeciwieństwami, jeśli zmienia się sama objętość.

Ten elementarny problem rachunkowy leży w centrum znacznie ambitniejszej pracy teoretycznej. W Physical Review D fizyczka matematyczna Ginestra Bianconi rozwija termodynamiczny opis **Gravity From Entropy** (GfE), niedawno zaproponowanego modelu, w którym grawitacja jest kodowana przez relację informacyjno-teoretyczną między materią a geometrią. „Informacyjno-teoretyczna" oznacza tutaj, że model wychodzi od matematycznej miary różnicy między dwoma opisami geometrii: geometrią fizyczną i geometrią indukowaną przez materię oraz krzywiznę.

Praca wyprowadza lokalne wielkości nazwane k-entropiami, k-energiami, k-temperaturami i k-ciśnieniami. Prefiks k rozdziela różne sektory geometryczne w modelu; nie oznacza różnych substancji ani epok kosmicznych. Ich relacja pierwszego prawa ma taką samą formę rachunkową jak w termodynamice: zmiana energii jest związana z temperaturą pomnożoną przez zmianę entropii, minus ciśnienie pomnożone przez zmianę objętości.

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

Następnie praca oblicza te wielkości w rozszerzających się kosmologiach Friedmanna: standardowych, wyidealizowanych wszechświatach jednorodnych i izotropowych w dużej skali. W reżimie niskiej energii i małej krzywizny przykłady zdominowane przez materię i promieniowanie mają malejące lokalne gęstości entropii i energii, lecz rozszerzanie dostarcza dostatecznie dużo objętości, by całkowita entropia rosła. Całkowita energia zbliża się w najniższym rzędzie do stałej, czyli po zachowaniu dominującego członu dla dużych czasów i pominięciu składników zanikających szybciej wraz z upływem czasu.

To przejrzysty wynik matematyczny. Równie ważna jest jego granica: obliczenie wykonano **wewnątrz jednej proponowanej teorii**, a kosmologie Friedmanna użyte w konkretnych przykładach są jedynie **przybliżonymi**, nie dokładnymi, rozwiązaniami pełnych równań GfE. Równania ruchu wynikają z wariacji proponowanego działania GfE i zawierają dynamiczne pole G oraz geometryczne sektory wyższego rzędu, nieobecne w zwykłych równaniach Friedmanna. Praca nie obserwuje entropii wytwarzającej grawitację, nie identyfikuje ciemnej energii naszego Wszechświata i nie kończy teorii grawitacji kwantowej.

Co zakłada Gravity From Entropy

Ogólna teoria względności opisuje grawitację za pomocą geometrii czasoprzestrzeni. Materia mówi czasoprzestrzeni, jak ma się zakrzywiać, a krzywizna mówi materii, jak ma się poruszać. GfE wychodzi od innego proponowanego działania: traktuje obiekty związane z metryką jako operatory kwantowe i buduje lagranżjan z **Geometrycznej Kwantowej Entropii Względnej** (Geometric Quantum Relative Entropy, GQRE).

Trzy pojęcia w 120 sekund

Operator kwantowy jest matematyczną regułą działającą na stan kwantowy i reprezentującą wielkość lub transformację. GfE zakłada, że jego obiekty związane z metryką można traktować w ten sposób; artykuł nie wymaga od czytelnika odtwarzania tej konstrukcji.
Lagranżjan jest zwartym matematycznym przepisem na dynamikę teorii. Całkuje się go po czasoprzestrzeni, uzyskując działanie, a następnie wariuje działanie, by wyprowadzić równania pola.
GQRE jest specyficznym dla modelu lagranżjanem wybranym w GfE. Adaptuje ideę kwantowej entropii względnej, aby porównywać metrykę fizyczną z metryką wyższego rzędu indukowaną przez materię i krzywiznę. Nazwanie jej entropią nie czyni jej zwykłą entropią cieplną.

Entropia względna jest zwykle miarą rozróżnialności dwóch rozkładów prawdopodobieństwa lub stanów kwantowych. W GfE porównanie dotyczy metryki fizycznej i metryki wyższego rzędu indukowanej przez materię oraz krzywiznę. „Wyższy rząd” nie oznacza dodatkowych wymiarów czasoprzestrzeni. Oznacza, że model pakuje sektory geometryczne typu skalarnego, wektorowego i biwektorowego do jednego rozszerzonego obiektu. Dynamiczne **pole G** wiąże te składniki i „ubiera” metrykę używaną zarówno w grawitacyjnej, jak i materialnej części modelu. Ramy skonstruowano tak, aby w granicy niskiej energii i małej krzywizny działanie redukowało się do działania Einsteina–Hilberta ogólnej teorii względności plus działania materii.

Ostatnie zdanie łatwo przeczytać zbyt szeroko. Odzyskanie równań Einsteina w pewnej granicy jest celem zgodności propozycji. Nie pokazuje, że natura korzysta z szerszej teorii poza tą granicą.

Równania pola GfE zawierają także dynamiczny człon, który ramy nazywają **wyłaniającym się efektywnym członem ciemnej energii**. W tej pracy Bianconi identyfikuje gęstość energii wewnętrznej modelu z tym członem. „Efektywna ciemna energia” opisuje jego rolę w równaniach. Nie jest empiryczną identyfikacją z ciemną energią wnioskowaną z obserwacji kosmologicznych.

Trzy różne użycia słowa „entropia”

Zwykła entropia termodynamiczna liczy, ile mikroskopowych układów może wytworzyć stan makroskopowy. **Kwantowa entropia względna** mierzy, jak rozróżnialne są dwa stany kwantowe. **GQRE** w tej pracy jest modelową konstrukcją geometryczną inspirowaną entropią względną i używaną jako lagranżjan grawitacyjny. Podobne nazwy nie czynią tych wielkości wymiennymi; praca wyprowadza powiązania, z których korzysta wewnątrz GfE.

Dokładny wynik termodynamiczny wewnątrz modelu

Praca najpierw działa na poziomie samych ram GfE. Dla każdego rzędu i typu geometrycznego stopnia swobody, indeksowanego przez k, definiuje:

- lokalną k-entropię na podstawie GQRE;
- lokalną k-energię na podstawie gęstości energii wewnętrznej modelu;
- sprzężoną k-temperaturę;
- oraz k-ciśnienie.

Wielkości te spełniają lokalne pierwsze prawo. W zapisie pracy:

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

Indeks k nie jest listą różnych substancji ani epok Wszechświata. W obliczeniu jednorodnym i izotropowym oznacza pięć pozycji: jedną skalarną; oddzielne czasową i przestrzenną z sektora typu wektorowego; oraz oddzielne czasoprzestrzenną i przestrzenno-przestrzenną z sektora typu biwektorowego. Skalar nie ma indeksu kierunkowego, pozycje typu wektorowego rozróżniają kierunek czasowy od przestrzennych, a biwektor jest zbudowany z par kierunków. Każdy sektor może mieć własną temperaturę i ciśnienie. K-temperatura może być również dodatnia lub ujemna, zależnie od odpowiadającego składnika pola G.

Nie są to temperatury mierzone przez umieszczenie termometru przy horyzoncie kosmologicznym. Standardowa temperatura kwantowych pól w de Sitterze skaluje się z H: **temperaturę Gibbonsa–Hawkinga** przypisuje się horyzontowi kosmologicznemu, natomiast **próżnia Buncha–Daviesa** jest standardowym stanem kwantowym niezmienniczym w de Sitterze, którego korelacje pól dają związany z nim odczyt termiczny. Praca wyraźnie odróżnia obie te wielkości od swoich geometrycznych k-temperatur, które w przykładzie de Sittera skalują się jak H^2. „Temperatura” oznacza tutaj termodynamiczną zmienną sprzężoną wyprowadzoną z definicji entropii i energii modelu.

Tożsamość pierwszego prawa jest więc rzeczywistym wyprowadzeniem, ale **wynikiem wewnętrznym**: jeśli przyjmie się działanie i definicje GfE, struktura termodynamiczna z nich wynika.

Dlaczego obliczenie Friedmanna jest przybliżeniem

Aby zamienić formalizm w przykład kosmologiczny, praca wykorzystuje jednorodne i izotropowe czasoprzestrzenie Friedmanna–Robertsona–Walkera (FRW). „Jednorodny” oznacza, że model w dużej skali ma takie same średnie właściwości w każdym miejscu; „izotropowy”, że wygląda tak samo w każdym kierunku. Jeden czynnik skali opisuje wzrost odległości w czasie, materia jest przedstawiona jako gładki płyn doskonały, a parametr Hubble'a H podsumowuje tempo ekspansji. To wyidealizowane tło, nie mapa poszczególnych galaktyk.

Istnieje jednak niedopasowanie strukturalne. Wszechświaty Friedmanna rozwiązują równania Einsteina. Ogólnie nie rozwiązują pełnych równań GfE wyższego rzędu, które śledzą także sektory skalarny, wektorowy i biwektorowy oraz pochodne pola G. Równania Einsteina pojawiają się ponownie tylko w pierwszorzędowej granicy niskiej energii i małej krzywizny proponowanej teorii.

Praca mówi o tym bezpośrednio i traktuje rozwiązania Friedmanna jako przybliżenia, w podejściu porównywanym z wstawianiem rozwiązania pola średniego do pełniejszej teorii, by sprawdzić, gdzie przybliżenie pozostaje wiarygodne. Reżim wymaga niskiej energii i małej krzywizny, podsumowanych warunkiem $l_P H \ll 1$, gdzie l_P jest długością Plancka. Drugi warunek wymaga, aby iloczyn indukowanej metryki wyższego rzędu i odwrotności fizycznej metryki wyższego rzędu pozostawał dodatnio określony.

Wynik nie brzmi więc „GfE przewiduje historię naszego Wszechświata". Jest bliższy zdaniu: **jeśli wszechświat GfE jest dostatecznie dobrze przybliżany przez znaną kosmologię Friedmanna, takie skalowania termodynamiczne dają pełne wielkości GfE.**

Wynik lokalny kontra całkowity

W tym reżimie dominujące wielkości lokalne mają proste skalowania:

- modelowa gęstość entropii skaluje się jak H^2;
- modelowa gęstość energii skaluje się jak H^4;
- dla niedesitterowskich przykładów Friedmanna w późnych czasach stają się one w przybliżeniu t^{-2} i t^{-4}.

Obie gęstości maleją więc wraz z rozszerzaniem się wszechświata. Gęstość nie jest jednak sumą.

Gdy praca całkuje po rozszerzającym się obszarze czasoprzestrzeni, rosnąca objętość zmienia odpowiedź. Dla fizycznie znanych przykładów zdominowanych przez materię i promieniowanie całkowita entropia rośnie z czasem, mimo że entropia na jednostkę objętości maleje. Całkowita energia nie rośnie bez końca; w najniższym rzędzie zbliża się do stałej.

To najbardziej użyteczny wynik pojęciowy pracy. Lokalne uporządkowanie lub rozcieńczenie nie musi być sprzeczne z globalnym drugim prawem. Obszar może lokalnie stawać się mniej entropijny na jednostkę objętości, a zintegrowana entropia może rosnąć, ponieważ objętość czasoprzestrzeni rośnie szybciej.

Obliczenie nie dowodzi, że jest to poprawne mikroskopowe wyjaśnienie strzałki termodynamicznej w rzeczywistym Wszechświecie. Pokazuje, że proponowane ramy mogą bez sprzeczności pomieścić rozdział lokalne–globalne w przybliżeniu Friedmanna.

Porównanie de Sittera z inną temperaturą

Praca rozważa także przestrzeń de Sittera, wyidealizowaną wykładniczo rozszerzającą się czasoprzestrzeń o stałym H. Dla pojedynczego obserwatora całkuje tylko po skończonym **diamencie przyczynowym**: części wspólnej przyszłego stożka świetlnego wcześniejszego zdarzenia i przeszłego stożka świetlnego późniejszego zdarzenia, wyznaczającej obszar czasoprzestrzeni, który może uczestniczyć w obserwacjach między nimi. W tym diamencie całkowita entropia GfE skaluje się jak H^{-2}, czyli tak samo względem H jak znana entropia Gibbonsa–Hawkinga. Całkowita energia GfE jest rzędu jedności w jednostkach modelu.

> **Jedna rodzina teł kosmologicznych**
>
> FRW jest rodziną jednorodnych i izotropowych geometrii, a nie osobnym miejscem. Wszechświaty zdominowane przez materię i promieniowanie są przypadkami FRW różniącymi się tym, co wypełnia model. Przestrzeń de Sittera również można zapisać w postaci FRW, lecz przedstawia przypadek zdominowany przez próżnię, ze stałym H i wykładniczą ekspansją. Diament przyczynowy jest skończonym obszarem wybranym wewnątrz tej czasoprzestrzeni dla jednego obserwatora; nie jest innym rodzajem wszechświata.

Zgodność skalowania nie jest tym samym co wyprowadzenie tego samego obiektu fizycznego. Odpowiadająca k-temperatura GfE skaluje się jak H^2, inaczej niż standardowa temperatura de Sittera, która skaluje się jak H. Praca interpretuje różnicę jako wskazówkę, że k-temperatura należy do geometrii czasoprzestrzeni, a nie do pól kwantowych żyjących na tym tle.

Następnie sugeruje, że taka temperatura *mogłaby* być związana z promieniowaniem grawitonowym zamiast zwykłej emisji cząstek. To pytanie na przyszłość, nie wynik tej pracy. Najpierw teorię należałoby skwantować, aby ustalić, czy jej temperatury w ogóle odpowiadają promieniowaniu.

Czego to nie dowodzi

- **Nie** pokazuje obserwacyjnie, że grawitacja wyłania się z entropii.
- **Nie** ustala, że efektywny człon modelu jest ciemną energią zmierzoną w kosmologii.
- **Nie** zastępuje ogólnej teorii względności przetestowaną, lepszą teorią. Ogólna teoria względności pojawia się tutaj jako granica niskiej energii i małej krzywizny propozycji.
- **Nie** czyni kosmologii Friedmanna dokładnymi rozwiązaniami GfE. Są przybliżeniem użytym do oszacowania zachowania termodynamicznego modelu.
- **Nie** wyprowadza pełnego mikroskopowego zliczenia stopni swobody czasoprzestrzeni.
- **Nie** dostarcza ukończonej teorii grawitacji kwantowej ani nie wykrywa grawitonów.
- **Nie** pokazuje, że ujemne k-temperatury są zwykłymi ujemnymi odczytami termometru.

Jak mocny jest wynik?

Jest to recenzowana praca teoretyczna, dlatego „dowody” znaczą tutaj coś innego niż w eksperymencie. Właściwe pytania brzmią: czy definicje są spójne, czy wyprowadzenia wynikają z założeń i czy przybliżenia są jawne oraz kontrolowane.

Na tym poziomie praca dostarcza konkretnego słownika termodynamicznego dla GfE i wyprowadza strukturę pierwszego prawa, zamiast opierać się wyłącznie na analogii. Wyjątkowo wyraźnie pokazuje także granicę przybliżenia: rozwiązania Friedmanna pożyczono z ogólnej teorii względności, wstawiono do wielkości GfE i ograniczono do reżimu, w którym indukowana metryka pozostaje dobrze zachowana.

Szersze twierdzenia fizyczne pozostają otwarte. Ramy są nowe, praca nie porównuje swojej kosmologii z danymi, a niektóre z najciekawszych konsekwencji — kwantyzacja, dynamika geometrii kontaktowej i możliwe promieniowanie grawitonowe — przedstawiono jako kierunki przyszłych badań. Wewnętrzna spójność jest konieczna dla nowej teorii grawitacji. Nie wystarcza, by pokazać, że teoria opisuje naturę.

Dlaczego to ma znaczenie

Związek między grawitacją a termodynamiką jest stary i głęboki, od entropii czarnych dziur po temperaturę przestrzeni de Sittera. Wiele takich wyników organizuje się wokół horyzontów. GfE próbuje zamiast tego zbudować lokalną, objętościową miarę informacji bezpośrednio z relacji między materią a geometrią.

To, czy propozycja przetrwa, pozostaje pytaniem otwartym. Ćwiczenie termodynamiczne ujawnia jednak użyteczny cel dla każdej takiej teorii: powinna wyjaśniać, jak lokalna struktura i malejąca lokalna gęstość entropii mogą współistnieć z rosnącą całkowitą entropią w rozszerzającym się wszechświecie.

Praca pokazuje jeden matematycznie jawny sposób, w jaki może się to zdarzyć. Jej wartość nie polega na zamknięciu problemu grawitacja–entropia. Zamienia część tego problemu w równania, których założenia, granice i następne testy można jasno wskazać.

Zwięzłe podsumowanie

Bianconi wyprowadza termodynamiczny opis wewnątrz Gravity From Entropy, proponowanych ram zmodyfikowanej grawitacji opartych na geometrycznej kwantowej entropii względnej. Lokalne zmienne entropii, energii, temperatury i ciśnienia modelu spełniają pierwsze prawo. Gdy pełne wielkości GfE ocenia się na przybliżeniach Friedmanna o niskiej energii i małej krzywiźnie, lokalne gęstości entropii i energii maleją wraz z rozszerzaniem się wszechświata, podczas gdy całkowita entropia rośnie dzięki zwiększaniu objętości czasoprzestrzeni; dla przykładów zdominowanych

przez materię i promieniowanie całkowita energia w najniższym rzędzie zbliża się do stałej. Diament przyczynowy de Sittera daje entropię skalującą się jak H^{-2}, lecz temperaturę modelową odmienną od standardowej temperatury horyzontu. Są to warunkowe wyniki matematyczne wewnątrz GfE, nie obserwacyjne dowody, że grawitacja pochodzi z entropii, pomiar ciemnej energii ani ukończona teoria grawitacji kwantowej.

Źródła

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