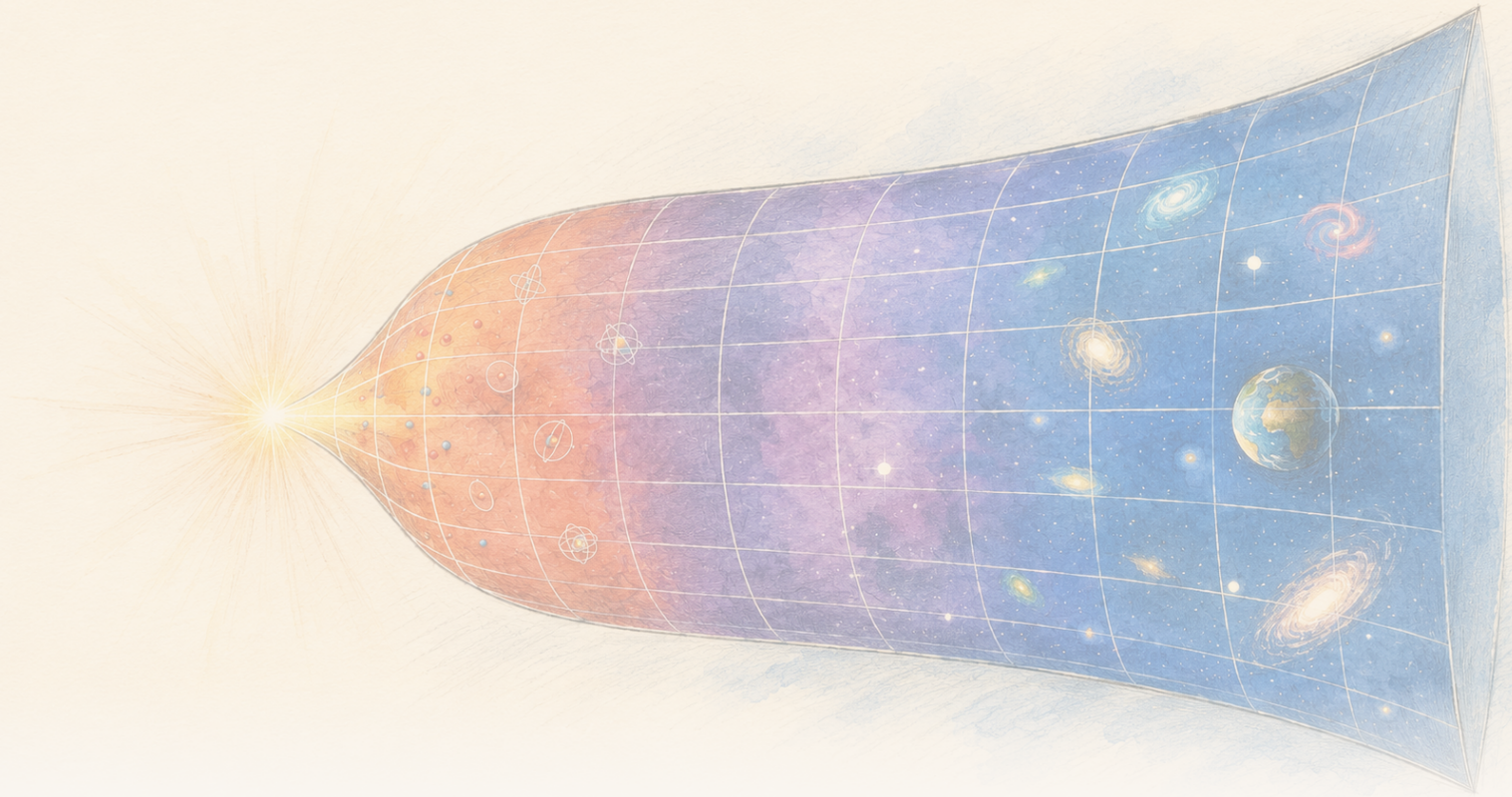

The Clean Paper

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

У моделі гравітації на основі ентропії локальна густина ентропії падає, а повна зростає

Стаття в Physical Review D виводить температури, тиски й перший закон усередині Gravity From Entropy — запропонованої модифікованої теорії гравітації. У пізньочасовому наближенні Фрідмана з малою кривиною локальні густини ентропії та енергії моделі падають, тоді як розширення змушує повну ентропію зростати. Обчислення внутрішньо конкретне, але умовне: космології Фрідмана не є точними розв'язками повної теорії, а результат не слугує спостережним доказом походження гравітації з ентропії, поясненням виміряної темної енергії чи завершеною теорією квантової гравітації.

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

Зростання об'єму може знижувати густину й водночас збільшувати повну кількість

Якщо в цій моделі густина ентропії падає під час розширення Всесвіту, як його повна ентропія все ж може зростати?

Уявіть Всесвіт, що розширюється, поділений на маленькі комірки. Кількість чогось у кожній комірці може зменшуватися, навіть якщо загальна кількість у всій області, що зростає, збільшується. Зниження густини й зростання повної кількості не суперечать одне одному, якщо змінюється сам об'єм.

Ця проста задача обліку лежить у центрі значно амбітнішої теоретичної статті. У Physical Review D математична фізикиня Джинестра Б'янконі розвиває термодинамічний опис **Gravity From Entropy** (GfE, «гравітація з ентропії») — нещодавно запропонованої моделі, у якій гравітація кодується інформаційно-теоретичним відношенням між матерією та геометрією. Тут «інформаційно-теоретичний» означає, що модель починається з математичної міри відмінності між двома описами геометрії: фізичною геометрією та геометрією, індукованою матерією й кривиною.

У статті виводяться локальні величини, названі k-ентропіями, k-енергіями, k-температурами та k-тисками. Префікс k розділяє різні геометричні сектори моделі; це не різні речовини й не космічні епохи. Їхнє співвідношення першого закону має ту саму облікову форму, що й у термодинаміці: зміна енергії пов'язана з температурою, помноженою на зміну ентропії, мінус тиск, помножений на зміну об'єму.

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

Далі стаття обчислює ці величини для космологій Фрідмана, що розширюються, — стандартних ідеалізованих Всесвітів, однорідних та ізотропних у великих масштабах. У низькоенергетичному режимі малої кривини в прикладах, де домінують матерія або випромінювання, локальні густини ентропії й енергії зменшуються, але розширення додає достатньо об'єму, щоб повна ентропія зростала. Повна енергія в провідному порядку наближається до сталої — тобто якщо зберегти член, який домінує на великих часах, і відкинути члени, що згасають швидше.

Це чіткий математичний результат. Не менш важлива його межа: обчислення виконано **всередині однієї запропонованої теорії**, а космології Фрідмана, використані для конкретних прикладів, є лише **наближеними**, а не точними розв'язками повних рівнянь GfE. Ці рівняння руху отримують варіюванням запропонованої дії GfE; вони містять динамічне G-поле та геометричні сектори вищого порядку, відсутні у звичайних рівняннях Фрідмана. Стаття не спостерігає, як ентропія породжує гравітацію, не ототожнює темну енергію нашого Всесвіту й не завершує теорію квантової гравітації.

Що припускає Gravity From Entropy

Загальна теорія відносності описує гравітацію через геометрію простору-часу. Матерія повідомляє простору-часу, як викривлятися, а кривина повідомляє матерії, як рухатися. GfE починається з іншої запропонованої дії: пов'язані з метрикою об'єкти розглядаються як квантові оператори, а лагранжіан будується з **геометричної квантової відносної ентропії** (GQRE).

> **Три терміни за 120 секунд**
>
> **Квантовий оператор** — математичне правило, яке діє на квантовий стан і представляє величину або перетворення. GfE припускає, що пов'язані з метрикою об'єкти можна розглядати таким чином; стаття не вимагає від читача відтворювати цю конструкцію.
> **Лагранжіан** — компактний математичний рецепт динаміки теорії. Його інтегрують за простором-часом, отримуючи дію, а потім варіюють дію, щоб вивести рівняння поля.
> **GQRE** — обраний у GfE специфічний лагранжіан моделі. Він адаптує ідею квантової відносної ентропії для порівняння фізичної метрики з метрикою вищого порядку, індукованою матерією й кривиною. Назва «ентропія» не перетворює його на звичайну теплову ентропію.

Відносна ентропія зазвичай вимірює розрізнюваність двох розподілів імовірності або квантових станів. У GfE порівнюються фізична метрика та метрика вищого порядку, індукована матерією й кривиною. «Вищого порядку» не означає додаткові виміри простору-часу. Це означає, що модель об'єднує скалярні, вектороподібні та бівектороподібні геометричні сектори в один розширений об'єкт. Динамічне **G-поле** пов'язує ці компоненти й «одягає» метрику, використану і в гравітаційній, і в матеріальній частинах моделі. Конструкцію влаштовано так, щоб у низькоенергетичній межі малої кривини її дія переходила в дію Ейнштейна—Гільберта загальної теорії відносності плюс дію матерії.

Останнє речення легко прочитати надто широко. Відновлення рівнянь Ейнштейна в певній межі — перевірка узгодженості пропозиції. Воно не показує, що природа використовує більшу теорію поза цією межею.

Рівняння поля GfE також містять динамічний член, який схема називає **ефективним членом темної енергії, що виникає**. У цій статті Б'янконі ототожнює густину внутрішньої енергії моделі з цим членом. «Ефективна темна енергія» описує його роль у рівняннях. Це не емпіричне ототожнення з темною енергією, виведеною з космологічних спостережень.

Три різні значення слова «ентропія»

Звичайна термодинамічна ентропія рахує, скільки мікроскопічних конфігурацій можуть давати один макроскопічний стан. **Квантова відносна ентропія** вимірює розрізнюваність двох квантових станів. **GQRE** у цій статті — специфічна для моделі геометрична конструкція, натхненна відносною ентропією й використана як гравітаційний лагранжіан. Подібні назви не роблять ці величини взаємозамінними; зв'язки, які використовує стаття, виводяться всередині GfE.

Точний термодинамічний результат усередині моделі

Спочатку стаття працює на рівні самої схеми GfE. Для кожного порядку й типу геометричного ступеня свободи, індексованого k, вона визначає:

- локальну k-ентропію з GQRE;
- локальну k-енергію з густини внутрішньої енергії моделі;
- спряжену k-температуру;
- і k-тиск.

Ці величини підкоряються локальному першому закону. У позначеннях статті:

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

Індекс k — не перелік різних речовин або епох Всесвіту. В однорідному й ізотропному обчисленні він позначає п'ять позицій: одну скалярну; окремі часоподібну та простороподібну позиції векторoподібного сектора; й окремі часопросторову та просторопросторову позиції бівекторoподібного сектора. Скаляр не має напрямного індексу, векторoподібні позиції розрізняють часовий і просторові напрямки, а бівектор будується з пар напрямків. Кожен сектор може мати власні температуру й тиск. K-температура може бути додатною або від'ємною залежно від відповідного компонента G-поля.

Це не температури, які виміряв би термометр біля космологічного горизонту. Стандартна температура квантового поля в просторі де Сіттера масштабується як H: **температура Гіббонса—Гокінга** призначається космологічному горизонту, а **вакуум Банча—Девіса** — стандартний інваріантний щодо де Сіттера квантовий стан, чиї кореляції поля дають пов'язану теплову відповідь. Стаття прямо відрізняє обидва поняття від геометричних k-температур, які в прикладі де Сіттера масштабуються як H^2. Тут «температура» позначає термодинамічно спряжену змінну, виведену з визначень ентропії та енергії моделі.

Тому тотожність першого закону справді виведена, але є **внутрішнім результатом**: якщо прийняти дію й визначення GfE, з них випливає ця термодинамічна структура.

Чому обчислення Фрідмана є наближенням

Щоб перетворити формалізм на космологічний приклад, стаття використовує однорідні та ізотропні простори-часи Фрідмана—Робертсона—Вокера (FRW). «Однорідний» означає, що великомасштабна модель має однакові середні властивості в кожній точці; «ізотропний» — що вона виглядає однаково в усіх напрямках. Один масштабний фактор описує зростання відстаней із часом, матерія представляється гладкою ідеальною рідиною, а параметр Габбла H характеризує швидкість розширення. Це ідеалізоване тло, а не карта окремих галактик.

Але існує структурна невідповідність. Всесвіти Фрідмана розв'язують рівняння Ейнштейна. У загальному випадку вони не розв'язують повні рівняння GfE вищого порядку, які також відстежують скалярні, вектороподібні й бівектороподібні сектори та похідні G-поля. Рівняння Ейнштейна повертаються лише в першому порядку, у низькоенергетичній межі малої кривини запропонованої моделі.

Стаття говорить про це прямо й розглядає розв'язки Фрідмана як наближення, порівнюючи підхід із підстановкою розв'язку середнього поля в повнішу теорію, щоб перевірити область надійності наближення. Режим вимагає низької енергії та малої кривини, що виражається умовою $l_P H \ll 1$, де l_P — планківська довжина. Друга умова вимагає, щоб добуток індукованої метрики вищого порядку й оберненої фізичної метрики вищого порядку залишався додатно визначеним.

Тому результат — не «GfE передбачає історію нашого Всесвіту». Він ближчий до формулювання: **якщо Всесвіт GfE достатньо добре наближається знайомою космологією Фрідмана, ось які термодинамічні масштабні залежності дають повні величини GfE.**

Локальний результат проти повного

Усередині цього режиму провідні локальні величини мають прості масштабні залежності:

- густина ентропії моделі масштабується як H^2;
- густина енергії моделі — як H^4;
- для недесіттерівських прикладів Фрідмана на пізніх часах це приблизно t^{-2} і t^{-4}.

Обидві густини зменшуються в міру розширення Всесвіту. Але густина — не повна кількість.

Коли стаття інтегрує величини за областю простору-часу, що розширюється, зростання об'єму змінює відповідь. У звичних фізичних прикладах із домінуванням матерії й випромінювання повна ентропія зростає з часом, навіть якщо ентропія на одиницю об'єму знижується. Повна енергія не продовжує зростати; у провідному порядку вона наближається до сталої.

Це найкорисніший концептуальний результат статті. Локальне впорядкування або розрідження не обов'язково суперечить глобальному другому закону. Область може ставати локально менш ентропійною на одиницю об'єму, а інтегральна ентропія — зростати, якщо об'єм простору-часу збільшується швидше.

Обчислення не доводить, що це правильне мікроскопічне пояснення термодинамічної стріли часу в реальному Всесвіті. Воно показує, що запропонована схема може несуперечливо вмістити різницю між локальним і глобальним у наближенні Фрідмана.

Порівняння з де Сіттером — але з іншою температурою

Стаття також розглядає простір де Сіттера — ідеалізований простір-час, що експоненційно розширюється зі сталим H. Для одного спостерігача інтегрування виконується лише за скінченним **причинним ромбом**: перетином майбутнього світлового конуса ранішої події з минулим світловим конусом пізнішої, який обмежує область простору-часу, що може брати участь у спостереженнях між ними. У цьому ромбі повна ентропія GfE масштабується як H^{-2}, тобто так само за H, як знайома ентропія Гіббонса—Гокінга. Повна енергія GfE має порядок одиниці в одиницях моделі.

> **Одна родина космологічних тлів**
>
> FRW — родина однорідних та ізотропних геометрій, а не додаткове місце. Всесвіти з домінуванням матерії й випромінювання — випадки FRW, що відрізняються вмістом моделі. Простір де Сіттера теж можна записати у формі FRW, але він представляє вакуумно-домінований випадок зі сталим H та експоненційним розширенням. Причинний ромб — скінченна область, обрана всередині такого простору-часу для одного спостерігача; це не ще один тип Всесвіту.

Збіг масштабування не означає виведення того самого фізичного об'єкта. Пов'язана k-температура GfE масштабується як H^2, на відміну від стандартної температури де Сіттера, що масштабується як H. Стаття інтерпретує різницю як вказівку на те, що k-температура належить геометрії простору-часу, а не квантовим полям на цьому тлі.

Далі пропонується, що така температура *могла б* бути пов'язана з випромінюванням гравітонів, а не звичайних частинок. Це питання для майбутнього, не результат статті. Спочатку теорію довелося б квантувати, щоб установити, чи відповідають її температури будь-якому випромінюванню взагалі.

Чого це не доводить

- Робота **не показує спостережно**, що гравітація виникає з ентропії.

- Вона **не встановлює**, що ефективний член моделі є темною енергією, вимірюваною в космології.
- Вона **не замінює** загальну теорію відносності перевіреною досконалішою теорією. Загальна відносність з'являється тут як низькоенергетична межа малої кривини пропозиції.
- Вона **не робить** космології Фрідмана точними розв'язками GfE. Вони є наближенням, використаним для оцінювання термодинамічної поведінки моделі.
- Вона **не виводить** повний мікроскопічний підрахунок ступенів свободи простору-часу.
- Вона **не надає** завершеної теорії квантової гравітації й не виявляє гравітони.
- Вона **не показує**, що від'ємні k-температури є звичайними від'ємними показами термометра.

Наскільки сильним є результат

Це рецензована теоретична стаття, тому «докази» тут означають не те саме, що в експерименті. Доречні питання: чи узгоджені визначення, чи випливають висновки і чи явно задані й контрольовані наближення.

На цьому рівні стаття дає конкретний термодинамічний словник для GfE та виводить структуру першого закону, а не спирається лише на аналогію. Вона також незвично прямо показує межу наближення: розв'язки Фрідмана запозичуються із загальної теорії відносності, підставляються у величини GfE й обмежуються режимом, де індукована метрика залишається коректною.

Ширші фізичні твердження залишаються відкритими. Схема нова, стаття не порівнює її космологію з даними, а деякі найцікавіші наслідки — квантування, контактно-геометрична динаміка й можливе випромінювання гравітонів — подані як напрямки майбутньої роботи. Внутрішня узгодженість необхідна новій теорії гравітації, але недостатня, щоб показати, що теорія описує природу.

Чому це важливо

Зв'язок між гравітацією й термодинамікою старий і глибокий — від ентропії чорних дір до температури простору де Сіттера. Багато таких результатів організовані навколо горизонтів. GfE натомість намагається побудувати локальну об'ємну інформаційну міру безпосередньо з відношення між матерією та геометрією.

Чи виживе пропозиція, невідомо. Але термодинамічна вправа виявляє корисну вимогу до будь-якої подібної теорії: вона має пояснити, як локальна структура й спадна локальна густина ентропії можуть співіснувати зі зростанням повної ентропії у Всесвіті, що розширюється.

Стаття показує один математично явний спосіб, як це може відбуватися. Її цінність не в закритті проблеми зв'язку гравітації та ентропії. Вона перетворює частину проблеми на рівняння, чиї передумови, межі й подальші перевірки можна чітко сформулювати.

Короткий підсумок

Б'янконі виводить термодинамічний опис усередині Gravity From Entropy — запропонованої модифікованої гравітаційної схеми, заснованої на геометричній квантовій відносній ентропії. Локальні змінні ентропії, енергії, температури й тиску моделі підкоряються першому закону. Коли повні величини GfE обчислюються на низькоенергетичних наближеннях Фрідмана з малою кривиною, локальні густини ентропії та енергії падають під час розширення Всесвіту, але повна ентропія зростає через збільшення об'єму простору-часу; у прикладах із домінуванням матерії та випромінювання повна енергія в провідному порядку наближається до сталої. Причинний ромб де Сіттера дає ентропію, що масштабується як H^{-2}, але температуру моделі, відмінну від стандартної температури горизонту. Це умовні математичні результати всередині GfE, а не спостережне свідчення того, що гравітація походить з ентропії, не вимірювання темної енергії й не завершена теорія квантової гравітації.

Джерела

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