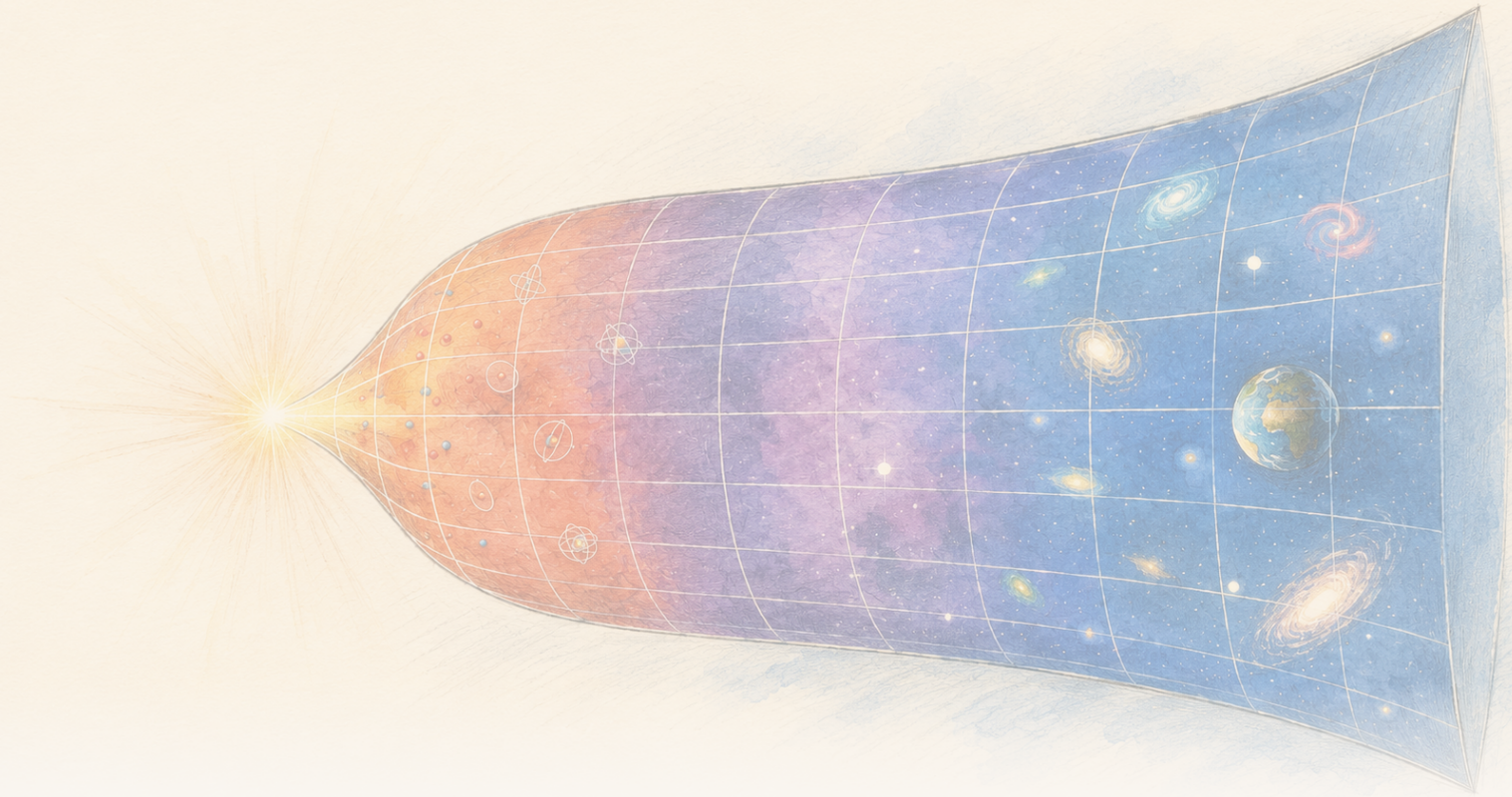

The Clean Paper

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

Într-un model al gravitației bazat pe entropie, densitatea locală a entropiei scade, dar totalul crește

O lucrare din Physical Review D derivă temperaturi, presiuni și o primă lege în cadrul Gravity From Entropy, un model propus de gravitație modificată. Într-o aproximație Friedmann la timpi târzii, energie joasă și curbură mică, densitățile locale de entropie și energie ale modelului scad, în timp ce expansiunea face entropia totală să crească. Calculul este concret în interiorul modelului, dar condiționat: cosmologiile Friedmann nu sunt soluții exacte ale teoriei complete, iar rezultatul nu este o dovadă observațională că gravitația provine din entropie, o explicație a energiei întunecate măsurate sau o teorie finalizată a gravitației cuantice.

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 volum în creștere poate reduce densitatea și, în același timp, mări totalul

Dacă densitatea entropiei din acest model scade pe măsură ce Universul se extinde, cum poate entropia totală să continue să crească?

Imaginează-ți un Univers în expansiune împărțit în celule minuscule. Cantitatea din fiecare celulă poate scădea, chiar dacă valoarea totală din întreaga regiune aflată în creștere se mărește. O scădere a densității și o creștere a totalului nu se contrazic atunci când volumul însuși se schimbă.

Acest bilanț aritmetic simplu se află în centrul unei lucrări teoretice mult mai ambițioase. În Physical Review D, fiziciana matematică Ginestra Bianconi dezvoltă o descriere termodinamică a modelului **Gravity From Entropy** (GfE), propus recent, în care gravitația este codificată printr-o relație informațională între materie și geometrie. Aici, „informațională" înseamnă că modelul pornește de la o măsură matematică a diferenței dintre două descrieri ale geometriei: geometria fizică și una indusă de materie și curbură.

Lucrarea derivă mărimi locale numite entropii-k, energii-k, temperaturi-k și presiuni-k. Prefixul k separă diferite sectoare geometrice ale modelului; acestea nu sunt substanțe diferite sau ere cosmice distincte. Relația dintre ele are forma unei prime legi termodinamice: o schimbare a energiei este legată de temperatura înmulțită cu schimbarea entropiei, minus presiunea înmulțită cu schimbarea volumului.

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

Lucrarea evaluează apoi aceste mărimi folosind cosmologii Friedmann în expansiune: Universuri standard idealizate, omogene și izotrope la scară mare. Într-un regim de energie joasă și curbură mică, exemplele dominate de materie și radiație au densități locale de entropie și energie în scădere, dar expansiunea adaugă suficient volum pentru ca entropia totală să crească. Energia totală se apropie de o constantă la ordinul dominant, adică atunci când este păstrat termenul principal la timpi mari și sunt eliminate contribuțiile care se sting mai repede pe măsură ce timpul crește.

Este un rezultat matematic clar. Limita sa este la fel de importantă: calculul este realizat **în interiorul unei singure teorii propuse**, iar cosmologiile Friedmann folosite pentru exemplele concrete sunt doar soluții **aproximative**, nu exacte, ale ecuațiilor complete GfE. Aceste ecuații de mișcare provin din variația acțiunii GfE propuse și includ câmpul G dinamic și sectoare geometrice de ordin superior care lipsesc din ecuațiile Friedmann obișnuite. Lucrarea nu observă entropia generând gravitație, nu identifică energia întunecată din Universul nostru și nu finalizează o teorie a gravitației cuantice.

Ce presupune Gravity From Entropy

Relativitatea generală descrie gravitația prin geometria spațiului-timp. Materia îi spune spațiului-timp cum să se curbeze, iar curbura îi spune materiei cum să se miște. GfE pornește de la o altă

acțiune propusă: tratează obiectele legate de metrică drept operatori cuantici și își construiește lagrangianul dintr-o **entropie cuantică relativă geometrică** (Geometric Quantum Relative Entropy, GQRE).

Trei termeni în 120 de secunde

Un **operator cuantic** este o regulă matematică ce acționează asupra unei stări cuantice și reprezintă o mărime sau o transformare. GfE presupune că obiectele sale legate de metrică pot fi tratate astfel; articolul nu îi cere cititorului să reproducă această construcție.
Un **lagrangian** este o rețetă matematică compactă pentru dinamica unei teorii. Prin integrarea lui în spațiu-timp se obține o acțiune, iar prin variația acelei acțiuni se derivă ecuațiile de câmp.
GQRE este lagrangianul specific modelului ales de GfE. El adaptează ideea entropiei cuantice relative pentru a compara metrica fizică cu o metrică de ordin superior indusă de materie și curbură. Faptul că se numește entropie nu o transformă în entropie termică obișnuită.

Entropia relativă este de obicei o măsură a cât de ușor pot fi deosebite două distribuții de probabilitate sau două stări cuantice. În GfE, comparația se face între metrica fizică și o metrică de ordin superior indusă de materie și curbură. „De ordin superior” nu înseamnă dimensiuni suplimentare ale spațiului-timp. Înseamnă că modelul împachetează într-un singur obiect extins sectoare geometrice scalare, de tip vectorial și de tip bivectorial. Un **câmp G** dinamic leagă aceste componente și „îmbracă” metrica folosită atât în partea gravitațională, cât și în cea de materie a modelului. Cadrul este construit astfel încât, în limita energiilor joase și a curburii mici, acțiunea sa să se reducă la acțiunea Einstein–Hilbert a relativității generale plus acțiunea materiei.

Ultima propoziție poate fi ușor supraevaluată. Recuperarea ecuațiilor lui Einstein într-o anumită limită este o condiție de consistență pentru propunere. Nu arată că natura folosește teoria mai largă în afara acelei limite.

Ecuațiile de câmp GfE conțin și un termen dinamic pe care cadrul îl numește **termen efectiv emergent de energie întunecată**. În această lucrare, Bianconi identifică densitatea energiei interne a modelului cu acest termen. „Energie întunecată efectivă” descrie rolul lui în ecuații. Nu este o identificare empirică cu energia întunecată dedusă din observațiile cosmologice.

Trei sensuri diferite ale cuvântului „entropie”

Entropia termodinamică obișnuită numără câte aranjamente microscopice pot produce o stare macroscopică. **Entropia cuantică relativă** măsoară cât de ușor pot fi deosebite două stări cuantice. **GQRE** din această lucrare este o construcție geometrică specifică modelului, inspirată de entropia relativă și folosită drept lagrangian gravitațional. Numele asemănătoare nu fac aceste mărimi interschimbabile; lucrarea derivă în interiorul GfE legăturile pe care le folosește.

Rezultatul termodinamic exact din interiorul modelului

Lucrarea începe la nivelul cadrului GfE însuși. Pentru fiecare ordin și tip de grad de libertate geometrică, indexat prin k, definește:

- o entropie-k locală pornind de la GQRE;
- o energie-k locală pornind de la densitatea energiei interne a modelului;
- o temperatură-k conjugată;
- și o presiune-k.

Aceste mărimi respectă o primă lege locală. În notația lucrării,

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

Indicele k nu enumeră substanțe diferite sau ere ale Universului. În calculul omogen și izotrop, el etichetează cinci elemente: unul scalar; elemente temporale și spațiale distincte din sectorul de tip vectorial; și elemente timp–spațiu și spațiu–spațiu distincte din sectorul de tip bivectorial. Un scalar nu are indice direcțional, elementele vectoriale disting direcțiile temporale de cele spațiale, iar un bivector este construit din perechi de direcții. Fiecare sector poate avea propria temperatură și presiune. Temperatura-k poate fi și pozitivă sau negativă, în funcție de componenta corespunzătoare a câmpului G.

Acestea nu sunt temperaturi măsurate prin plasarea unui termometru lângă un orizont cosmologic. Temperatura cuantică standard din spațiul de Sitter este proporțională cu H: **temperatura Gibbons–Hawking** este atribuită orizontului cosmologic, iar **vidul Bunch–Davies** este starea cuantică standard, invariantă în de Sitter, ale cărei corelații de câmp produc răspunsul termic asociat. Lucrarea le deosebește explicit pe amândouă de temperaturile-k geometrice, care în exemplul de Sitter sunt proporționale cu H^2. Aici, „temperatură” denumește o variabilă termodinamică conjugată, derivată din definițiile entropiei și energiei modelului.

Prin urmare, identitatea cu forma primei legi este derivată efectiv, dar rămâne un **rezultat care decurge din premisele modelului**: dacă accepți acțiunea și definițiile GfE, structura termodinamică urmează din ele.

De ce calculul Friedmann este o aproximare

Pentru a transforma formalismul într-un exemplu cosmologic, lucrarea folosește spații-timp Friedmann–Robertson–Walker (FRW), omogene și izotrope. „Omogen” înseamnă că modelul la scară mare are aceleași proprietăți medii în fiecare loc; „izotrop” înseamnă că arată la fel în toate direcțiile. Un singur factor de scară descrie cum cresc distanțele în timp, materia este reprezentată ca un fluid perfect neted, iar parametrul Hubble H rezumă rata expansiunii. Este un fundal idealizat, nu o hartă a galaxiilor individuale.

Există însă o nepotrivire structurală. Universurile Friedmann rezolvă ecuațiile lui Einstein. În general, ele nu rezolvă ecuațiile complete GfE de ordin superior, care urmăresc și sectoarele scalar, vectorial și bivectorial, precum și derivatele câmpului G. Ecuațiile lui Einstein reapar numai în limita de ordin întâi, energie joasă și curbură mică a propunerii.

Lucrarea spune acest lucru direct și tratează soluțiile Friedmann drept aproximații, printr-o abordare comparată cu introducerea unei soluții de câmp mediu într-o teorie mai completă pentru a testa domeniul în care aproximarea rămâne fiabilă. Regimul cere energie joasă și curbură mică, rezumate de condiția $l_P H \ll 1$, unde l_P este lungimea Planck. O a doua condiție cere ca produsul dintre metrica indusă de ordin superior și inversa metricii fizice de ordin superior să rămână pozitiv definit.

Prin urmare, rezultatul nu este „GfE prezice istoria Universului nostru". Formularea corectă este mai degrabă: **dacă un Univers GfE poate fi aproximat suficient de bine printr-o cosmologie Friedmann familiară, acestea sunt scalările termodinamice produse de mărimile complete GfE.**

Rezultatul local în raport cu totalul

În interiorul acelui regim, mărimile locale dominante au scalări simple:

- densitatea entropiei modelului este proporțională cu H^2;
- densitatea energiei modelului este proporțională cu H^4;
- pentru exemplele Friedmann care nu sunt de Sitter, la timpi mari acestea devin aproximativ t^{-2} și t^{-4}.

Ambele densități scad, așadar, pe măsură ce Universul se extinde. Dar densitatea nu este totalul.

Când lucrarea integrează pe regiunea de spațiu-timp aflată în expansiune, volumul în creștere schimbă răspunsul. Pentru exemplele fizic familiare dominate de materie și radiație, entropia totală crește în timp chiar dacă entropia pe unitate de volum scade. Energia totală nu continuă să crească; la ordinul dominant, se apropie de o constantă.

Acesta este rezultatul conceptual cel mai util al lucrării. Scăderea densității locale nu intră automat în conflict cu o creștere globală a entropiei. O regiune poate deveni local mai puțin entropică pe unitate de volum, în timp ce entropia integrată crește deoarece volumul spațiului-timp crește mai repede.

Calculul nu demonstrează că aceasta este explicația microscopică corectă a săgeții termodinamice a timpului în Universul real. Arată că, în aproximația Friedmann, cadrul propus poate acomoda fără contradicție diferența dintre local și global.

O comparație cu spațiul de Sitter, dar cu o altă temperatură

Lucrarea analizează și spațiul de Sitter, un spațiu-timp idealizat aflat în expansiune exponențială, cu H constant. Pentru un singur observator, integrează numai pe un **diamant cauzal** finit: intersecția

dintre conul de lumină viitor al unui eveniment anterior și conul de lumină trecut al unui eveniment ulterior, care delimitează regiunea de spațiu-timp ce poate participa la observații între cele două. În acest diamant, entropia totală GfE este proporțională cu H^{-2}, aceeași dependență de H ca entropia familiară Gibbons–Hawking. Energia totală GfE este de ordinul unității în unitățile modelului.

> **O singură familie de fundaluri cosmologice**
>
> FRW este o familie de geometrii omogene și izotrope, nu un alt loc separat. Universurile dominate de materie și cele dominate de radiație sunt cazuri FRW, deosebite prin ceea ce umple modelul. Spațiul de Sitter poate fi și el scris în formă FRW, dar reprezintă un caz dominat de vid, cu H constant și expansiune exponențială. Diamantul cauzal este o regiune finită selectată pentru un observator în interiorul acelui spațiu-timp; nu este un alt tip de Univers.

Potrivirea unei scalări nu înseamnă derivarea aceluiași obiect fizic. Temperatura-k GfE asociată este proporțională cu H^2, spre deosebire de temperatura standard de Sitter, proporțională cu H. Lucrarea interpretează diferența drept indiciu că temperatura-k aparține geometriei spațiului-timp, nu câmpurilor cuantice care trăiesc pe acel fundal.

Apoi sugerează că o asemenea temperatură *ar putea* fi asociată cu radiația de gravitoni, nu cu emisia obișnuită de particule. Aceasta este o întrebare pentru viitor, nu un rezultat al lucrării. Teoria ar trebui mai întâi cuantificată pentru a stabili dacă temperaturile sale corespund într-adevăr vreunei radiații.

Ce nu demonstrează

- **Nu** arată observațional că gravitația ia naștere din entropie.
- **Nu** stabilește că termenul efectiv al modelului este energia întunecată măsurată în cosmologie.
- **Nu** înlocuiește relativitatea generală cu o teorie mai fundamentală și verificată experimental. Relativitatea generală apare aici ca limita de energie joasă și curbură mică a propunerii.
- **Nu** transformă cosmologiile Friedmann în soluții exacte ale GfE. Ele sunt aproximația folosită pentru estimarea comportamentului termodinamic al modelului.
- **Nu** derivă o numărare microscopică completă a gradelor de libertate ale spațiului-timp.
- **Nu** oferă o teorie finalizată a gravitației cuantice și nu detectează gravitoni.
- **Nu** arată că temperaturile-k negative ar corespunde unor temperaturi negative măsurabile cu un termometru obișnuit.

Cât de solid este rezultatul?

Aceasta este o lucrare teoretică evaluată de specialiști, astfel încât „dovezi” înseamnă aici altceva decât într-un experiment. Întrebările potrivite sunt dacă definițiile sunt coerente, dacă derivările

urmează logic și dacă aproximațiile sunt declarate și controlate.

La acest nivel, lucrarea oferă un dicționar termodinamic concret pentru GfE și derivă o relație cu forma primei legi, în loc să se bazeze numai pe analogie. În plus, delimitează foarte clar domeniul aproximației: soluțiile Friedmann sunt împrumutate din relativitatea generală, introduse în mărimile GfE și restrânse la un regim în care metrica indusă rămâne bine comportată.

Afirmațiile fizice mai ample rămân deschise. Cadrul este recent, lucrarea nu compară cosmologia sa cu date, iar unele dintre implicațiile sale cele mai interesante — cuantificarea, dinamica geometriei de contact și posibila radiație de gravitoni — sunt prezentate drept direcții viitoare. Coerența internă este necesară pentru o nouă teorie a gravitației. Nu este suficientă pentru a arăta că teoria descrie natura.

De ce contează

Relația dintre gravitație și termodinamică este veche și profundă, de la entropia găurilor negre la temperatura spațiului de Sitter. Multe dintre aceste rezultate sunt organizate în jurul orizonturilor. GfE încearcă, în schimb, să construiască direct o măsură informațională locală, definită în volum, din relația dintre materie și geometrie.

Rămâne o întrebare deschisă dacă propunerea va rezista. Dar exercițiul termodinamic expune o țintă utilă pentru orice asemenea teorie: trebuie să explice cum structura locală și scăderea densității locale a entropiei pot coexista cu creșterea entropiei totale într-un Univers aflat în expansiune.

Lucrarea arată un mod matematic explicit în care acest lucru se poate întâmpla. Valoarea ei nu constă în închiderea problemei gravitație–entropie, ci în transformarea unei părți din problemă în ecuații ale căror ipoteze, limite și teste următoare pot fi formulate clar.

Pe scurt

Bianconi derivă o descriere termodinamică în interiorul Gravity From Entropy, un cadru propus de gravitație modificată bazat pe o entropie cuantică relativă geometrică. Variabilele locale de entropie, energie, temperatură și presiune ale modelului satisfac o relație cu forma primei legi termodinamice. Când mărimile complete GfE sunt evaluate în aproximații Friedmann cu energie joasă și curbură mică, densitățile locale de entropie și energie scad pe măsură ce Universul se extinde, în timp ce entropia totală crește deoarece volumul spațiului-timp se mărește; în exemplele dominate de materie și radiație, energia totală se apropie de o constantă la ordinul dominant. Un diamant cauzal de Sitter produce o entropie proporțională cu H^{-2}, dar o temperatură a modelului distinctă de temperatura standard a orizontului. Acestea sunt rezultate matematice condiționate, obținute în interiorul GfE, nu dovezi observaționale că gravitația provine din entropie, o măsurare a energiei întunecate sau o teorie finalizată a gravitației cuantice.

Surse

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