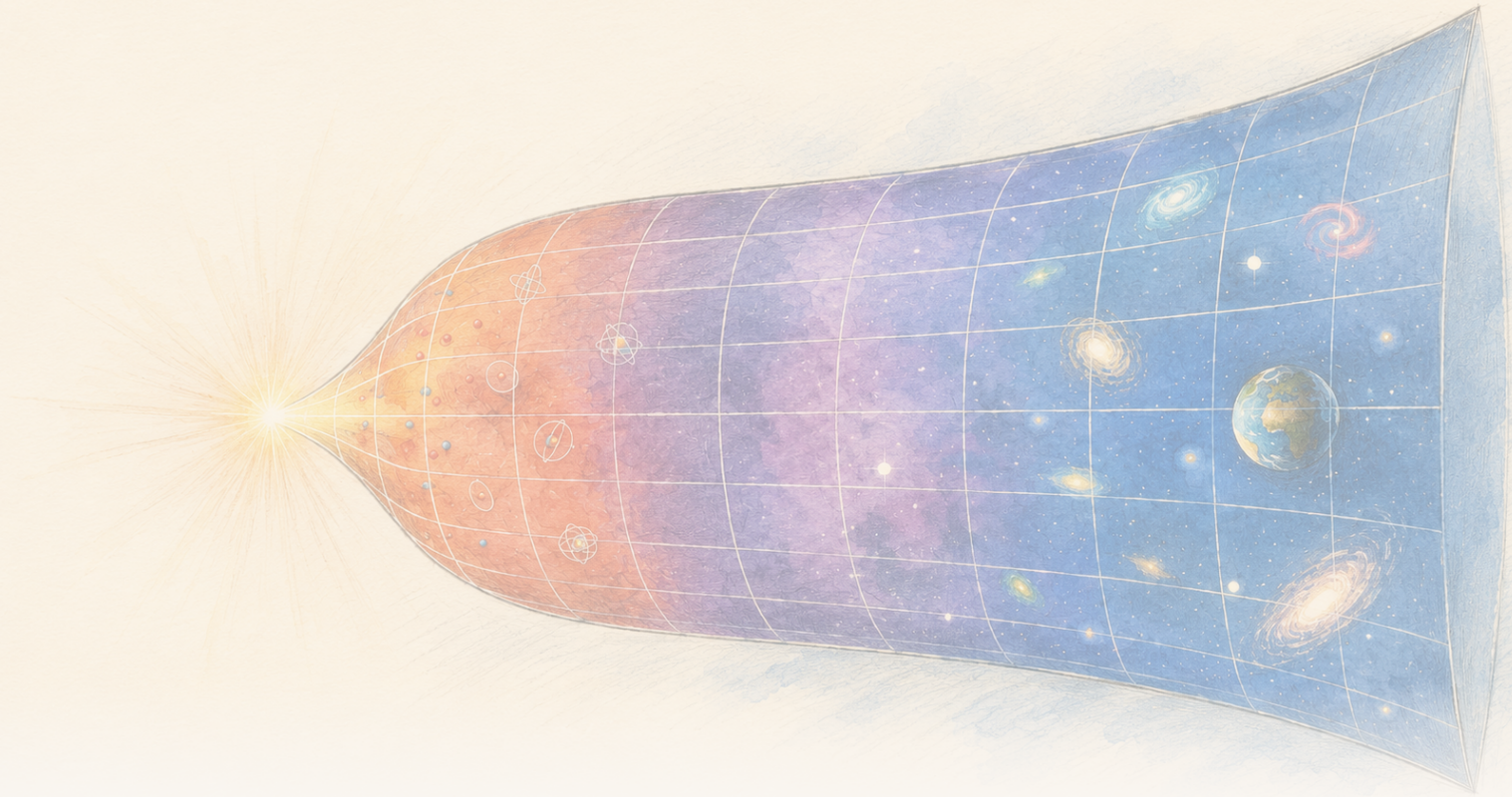

The Clean Paper

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

Egy entrópiaalapú gravitációs modellben a helyi entrópiasűrűség csökken, miközben a teljes entrópia nő

Egy Physical Review D-tanulmány hőmérsékleteket, nyomásokat és első törvényt vezet le a Gravity From Entropy nevű javasolt módosított gravitációs kereten belül. Késői időkre, kis görbületre érvényes Friedmann-közelítésben a modell helyi entrópia- és energiasűrűsége csökken, miközben a tágulás miatt a teljes entrópia nő. A számítás belsőleg konkrét, de feltételes: a Friedmann-kozmológiák nem egzakt megoldásai a teljes elméletnek, és ez nem megfigyelési bizonyíték arra, hogy a gravitáció entrópiából ered, nem a mért sötét energia magyarázata és nem kész kvantumgravitációs elmélet.

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

A növekvő térfogat csökkentheti a sűrűséget, miközben növeli az összmennyiséget

Ha ebben a modellben az entrópiasűrűség csökken a világegyetem tágulásával, hogyan nőhet mégis a teljes entrópia?

Képzeljünk el egy táguló univerzumot apró cellákra osztva. Valaminek a mennyisége minden egyes cellában csökkenhet, miközben a növekvő teljes régióban összesen mégis több lesz belőle. A sűrűség csökkenése és az összmennyiség növekedése nem ellentmondás, ha maga a térfogat is változik.

Ez az egyszerű összesítési kérdés áll egy sokkal ambiciózusabb elméleti tanulmány középpontjában. A Physical Review D folyóiratban Ginestra Bianconi matematikai fizikus termodinamikai leírást dolgoz ki a **Gravity From Entropy** (GfE) számára, egy nemrég javasolt módosított gravitációs modellhez, amelyben a gravitációt az anyag és a geometria közötti információelméleti kapcsolat kódolja. Az „információelméleti” itt azt jelenti, hogy a modell egy matematikai mértékből indul ki, amely két geometriai leírás különbségét méri: a fizikai geometriáét és az anyag, illetve a görbület által indukált geometriáét.

A tanulmány helyi mennyiségeket vezet le, amelyeket k-entrópiáknak, k-energiáknak, k-hőmérsékleteknek és k-nyomásoknak nevez. A k előtag a modell különböző geometriai szektorait választja szét; ezek nem különböző anyagok vagy kozmikus korszakok. Az első törvényük alakja megegyezik a termodinamikában megszokottal: az energiaváltozás kapcsolatban áll a hőmérséklet és az entrópiaváltozás szorzatával, mínusz a nyomás és a térfogatváltozás szorzatával.

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

A tanulmány ezután ezeket a mennyiségeket táguló Friedmann-kozmológiákon értékeli: olyan standard idealizált univerzumokon, amelyek nagy léptékben homogének és izotrópok. Alacsony energiájú, kis görbületű tartományban az anyag- és sugárzásdominált példák helyi entrópia- és energiasűrűsége csökken, de a tágulás elegendő térfogatot biztosít ahhoz, hogy a teljes entrópia növekedjen. A teljes energia vezető rendben állandóhoz tart, vagyis akkor, ha a nagy időknél domináns tagot megtartjuk, a gyorsabban eltűnő tagokat pedig elhagyjuk.

Ez egyértelmű matematikai eredmény. Ugyanolyan fontos azonban a határa: a számítás **egyetlen javasolt elméleten belül** történik, és a konkrét példákhoz használt Friedmann-kozmológiák csak **közelítő**, nem pedig egzakt megoldásai a teljes GfE-egyenleteknek. Ezek a mozgásegyenletek a javasolt GfE-hatás variálásából származnak, és tartalmazzák a dinamikus G-mezőt, valamint a közönséges Friedmann-egyenletekből hiányzó magasabb rendű geometriai szektorokat. A tanulmány nem figyeli meg, hogy az entrópia gravitációt hozna létre, nem azonosítja a Világegyetemünkben mért sötét energiát, és nem fejez be egy kvantumgravitációs elméletet.

Mit feltételez a Gravity From Entropy?

Az általános relativitáselmélet a gravitációt a téridő geometriájával írja le. Az anyag megmondja a téridőnek, hogyan görbüljön, a görbület pedig megmondja az anyagnak, hogyan mozogjon. A GfE egy másfajta javasolt hatásból indul ki: a metrikához kapcsolódó objektumokat kvantumoperátorokként kezeli, Lagrange-sűrűségét pedig egy **Geometric Quantum Relative Entropy** (GQRE) alapján építi fel.

Három fogalom 120 másodpercben

A **kvantumoperátor** olyan matematikai szabály, amely egy kvantumállapotra hat, és valamilyen mennyiséget vagy transzformációt reprezentál. A GfE feltételezi, hogy a metrikához kapcsolódó objektumai így kezelhetők; a cikk nem várja el az olvasótól ennek a konstrukciónak a reprodukálását.
A **Lagrange-sűrűség** egy elmélet dinamikájának tömör matematikai receptje. A téridőn integrálva hatást kapunk, majd a hatás variálásával levezethetők a téregyenletek.
A **GQRE** a GfE modell-specifikus Lagrange-sűrűsége. A kvantumos relatív entrópia ötletét adaptálva hasonlítja össze a fizikai metrikát az anyag és görbület által indukált magasabb rendű metrikával. Attól, hogy entrópiának nevezik, még nem válik közönséges hőentrópiává.

A relatív entrópia általában két valószínűségi eloszlás vagy kvantumállapot megkülönböztethetőségének mértéke. A GfE-ben a fizikai metrikát hasonlítják össze az anyag és görbület által indukált magasabb rendű metrikával. A „magasabb rendű” nem extra téridődimenziókat jelent. Azt jelenti, hogy a modell skalár-, vektortípusú és bivektortípusú geometriai szektorokat csomagol egyetlen kibővített objektumba. Egy dinamikus **G-mező** kapcsolja össze ezeket az összetevőket, és „felöltözteti” a gravitációs és anyagi részben egyaránt használt metrikát. A keretet úgy konstruálták, hogy alacsony energiájú és kis görbületű határesetben a hatása az általános relativitáselmélet Einstein–Hilbert-hatására és az anyag hatására redukálódjon.

Ezt az utolsó mondatot könnyű túlértelmezni. Einstein egyenleteinek visszanyerése egy határesetben konzisztenciacél a javaslat számára. Nem mutatja meg, hogy a természet ezen a határon kívül is a nagyobb elméletet használja.

A GfE téregyenletei tartalmaznak egy dinamikus tagot is, amelyet a keret **emergens effektív sötétenergia-tagnak** nevez. Ebben a tanulmányban Bianconi a modell belső energiasűrűségét ezzel a taggal azonosítja. Az „effektív sötét energia” az egyenletekben betöltött szerepét írja le. Nem empirikus azonosítás a kozmológiai megfigyelésekből következtetett sötét energiával.

Az „entrópia” szó három különböző használata

A **közönséges termodinamikai entrópia** azt számlálja, hány mikroszkopikus elrendezés hozhat létre egy makroszkopikus állapotot. A **kvantumos relatív entrópia** azt méri, mennyire megkülönböztethető két kvantumállapot. A tanulmány **GQRE-je** egy relatív entrópiából ihletett, modell-specifikus geometriai konstrukció, amelyet gravitációs Lagrange-sűrűségként használnak. A hasonló nevek nem teszik ezeket a mennyiségeket felcserélhetővé; a tanulmány

> a GfE-n belül vezeti le az általa használt kapcsolatokat.

Az egzakt termodinamikai eredmény a modellen belül

A tanulmány először magának a GfE-keretnek a szintjén dolgozik. A geometriai szabadsági fokok minden rendjéhez és típusához, k indexszel jelölve, definiál:

- egy helyi k-entrópiát a GQRE-ből;
- egy helyi k-energiát a modell belső energiasűrűségéből;
- egy konjugált k-hőmérsékletet;
- és egy k-nyomást.

Ezek a mennyiségek helyi első törvényt elégítenek ki. A tanulmány jelölésével:

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

A k index nem különböző anyagok vagy univerzumkorszakok listája. A homogén és izotróp számításban öt bejegyzést jelöl: egy skalárbejegyzést; külön időszerű és térszerű bejegyzést a vektortípusú szektorból; valamint külön idő–tér és tér–tér bejegyzést a bivektortípusú szektorból. A skalárnak nincs irányindexe, a vektortípusú bejegyzések különválasztják az időbeli és térbeli irányokat, a bivektor pedig iránypárokból épül fel. Minden szektor saját hőmérsékletet és nyomást hordozhat. A k-hőmérséklet pozitív vagy negatív is lehet a megfelelő G-mezőkomponenstől függően.

Ezek nem olyan hőmérsékletek, amelyeket kozmológiai horizont közelében hőmérővel mérnénk. A standard de Sitter kvantumtérelméleti hőmérséklet H-val skálázódik: a **Gibbons–Hawking-hőmérsékletet** a kozmológiai horizonthoz rendelik, míg a **Bunch–Davies-vákuum** a standard de Sitter-invariáns kvantumállapot, amelynek térkorrelációi a hozzá tartozó termikus választ adják. A tanulmány mindkettőt kifejezetten megkülönbözteti saját geometriai k-hőmérsékleteitől, amelyek a de Sitter-példában H^2-tel skálázódnak. A „hőmérséklet” itt a modell entrópia- és energiadefinícióiból levezetett termodinamikai konjugált változó neve.

Az első törvény azonossága tehát valódi levezetés, de **a modell feltevéseiből következő eredmény**: ha elfogadjuk a GfE-hatást és a definíciókat, ez a termodinamikai szerkezet adódik belőlük.

Miért közelítés a Friedmann-számítás?

A formalizmus kozmológiai példává alakításához a tanulmány homogén és izotróp Friedmann–Robertson–Walker (FRW) téridőket használ. A „homogén” azt jelenti, hogy nagy léptékben a modell átlagos tulajdonságai minden helyen azonosak; az „izotróp” azt, hogy minden irányban ugyanolyannak látszik. Egyetlen skálatényező írja le, hogyan nőnek a távolságok az idővel, az

anyagot sima tökéletes folyadékként reprezentálják, a H Hubble-paraméter pedig a tágulási ütemet foglalja össze. Ez idealizált háttér, nem egyedi galaxisok térképe.

Van azonban egy szerkezeti eltérés. A Friedmann-univerzumok Einstein egyenleteit oldják meg. Általában nem oldják meg a teljes magasabb rendű GfE-egyenleteket, amelyek a skalár-, vektortípusú és bivektortípusú szektorokat, valamint a G-mező deriváltjait is követik. Einstein egyenletei csak a javaslat elsőrendű, alacsony energiájú és kis görbületű határesetében jelennek meg újra.

A tanulmány ezt közvetlenül ki is mondja, és a Friedmann-megoldásokat közelítésként kezeli, hasonlóan ahhoz, amikor egy teljesebb elméletbe átlagtér-megoldást helyezünk be annak vizsgálatára, hol marad megbízható a közelítés. A tartomány alacsony energiát és kis görbületet igényel, amit a $l_P H \ll 1$ feltétel foglal össze, ahol l_P a Planck-hossz. Egy második feltétel megköveteli, hogy az indukált magasabb rendű metrika és a fizikai magasabb rendű metrika inverzének szorzata pozitív definit maradjon.

Az eredmény tehát nem az, hogy „a GfE megjósolja a Világegyetemünk történetét”. Inkább ez: **ha egy GfE-univerzumot kellően jól közelít egy ismerős Friedmann-kozmológia, akkor ezeket a termodinamikai skálázásokat adják a teljes GfE-mennyiségek.**

A helyi és teljes mennyiség közötti eredmény

Ebben a tartományban a vezető helyi mennyiségek egyszerűen skálázódnak:

- a modell entrópiasűrűsége H^2 szerint;
- a modell energiasűrűsége H^4 szerint;
- a nem de Sitter Friedmann-példák késői időszakában ezek körülbelül t^{-2} és t^{-4} skálázássá válnak.

Mindkét sűrűség csökken tehát az univerzum tágulásával. A sűrűség azonban nem azonos a teljes mennyiséggel.

Amikor a tanulmány a táguló téridőrégióra integrál, a növekvő térfogat megváltoztatja a választ. A fizikailag ismerős anyagdominált és sugárzásdominált példákban a teljes entrópia idővel növekszik, miközben az egységnyi térfogatra jutó entrópia csökken. A teljes energia nem növekszik tovább; vezető rendben egy állandóhoz tart.

Ez a tanulmány fogalmilag leghasznosabb eredménye. A helyi rendeződés vagy hígulás nem feltétlenül ütközik a globális második törvénnyel. Egy régió egységnyi térfogatra vetítve helyileg kevésbé entrópikus lehet, miközben az integrált entrópia nő, mert a téridő térfogata még gyorsabban növekszik.

A számítás nem bizonyítja, hogy ez a valós Világegyetem termodinamikai időnyilának helyes mikroszkopikus magyarázata. Azt mutatja meg, hogy a javasolt keret Friedmann-közelítésében ellentmondás nélkül elfér a helyi–globális különbség.

De Sitter-összehasonlítás, másfajta hőmérséklettel

A tanulmány de Sitter-teret is vizsgál, egy idealizált, exponenciálisan táguló téridőt állandó H-val. Egyetlen megfigyelő számára csak egy véges **oksági gyémántra** integrál: ez egy korábbi esemény jövőbeli fénykúpjának és egy későbbi esemény múltbeli fénykúpjának átfedése, amely behatárolja azt a téridőrégiót, amely a kettő közötti megfigyelésekben részt vehet. E gyémánt felett a teljes GfE-entrópia H^{-2} szerint skálázódik, ugyanúgy H szerint, mint az ismert Gibbons–Hawking-entrópia. A teljes GfE-energia a modell egységeiben egyes nagyságrendű.

> **Kozmológiai hátterek egy családja**
>
> Az FRW homogén és izotróp geometriák családja, nem egy külön „hely”. Az anyagdominált és sugárzásdominált univerzumok olyan FRW-esetek, amelyek abban különböznek, mi tölti ki a modellt. A de Sitter-tér is felírható FRW-formában, de vákuumdominált esetet képvisel állandó H-val és exponenciális tágulással. Az oksági gyémánt egy adott megfigyelő számára kijelölt véges régió ebben a téridőben; nem egy másik univerzumfajta.

Azonos skálázás nem ugyanaz, mint ugyanannak a fizikai objektumnak a levezetése. A kapcsolódó GfE k-hőmérséklet H^2 szerint skálázódik, eltérően a standard de Sitter-hőmérséklettől, amely H-val skálázódik. A tanulmány ezt a különbséget annak jeleként értelmezi, hogy a k-hőmérséklet a téridő geometriájához tartozik, nem az azon a háttéren élő kvantumterekhez.

Ezután felveti, hogy egy ilyen hőmérséklet *esetleg* gravitonsugárzáshoz kapcsolódhat, nem közönséges részecskekibocsátáshoz. Ez jövőbeli kérdés, nem a tanulmány eredménye. Az elméletet először kvantálni kellene annak megállapításához, hogy a hőmérsékletei egyáltalán megfelelnek-e valamilyen sugárzásnak.

Mit nem bizonyít ez?

- **Nem** mutatja meg megfigyelésileg, hogy a gravitáció az entrópiából emergál.
- **Nem** állapítja meg, hogy a modell effektív tagja azonos a kozmológiában mért sötét energiával.
- **Nem** váltja fel az általános relativitáselméletet egy tesztelt, jobb elmélettel. Az általános relativitáselmélet itt a javaslat alacsony energiájú, kis görbületű határeseteként jelenik meg.
- **Nem** teszi a Friedmann-kozmológiákat a GfE egzakt megoldásaivá. Ezek csak a modell termodinamikai viselkedésének becsléséhez használt közelítések.
- **Nem** adja meg a téridő szabadsági fokainak teljes mikroszkopikus megszámlálását.
- **Nem** ad kész kvantumgravitációs elméletet és nem detektál gravitonokat.
- **Nem** mutatja meg, hogy a negatív k-hőmérsékletek közönséges negatív hőmérő-leolvasások lennének.

Mennyire erős az eredmény?

Ez szakmailag lektorált elméleti tanulmány, ezért a „bizonyíték” itt mást jelent, mint egy kísérletnél. A megfelelő kérdések: koherensek-e a definíciók, következnek-e a levezetések, és világosan meg vannak-e adva, illetve kontrollálva vannak-e a közelítések.

Ezen a szinten a tanulmány konkrét termodinamikai szótárt ad a GfE-hez, és analógiára támaszkodás helyett elsőtörvény-szerkezetet vezet le. A közelítés határát szokatlanul láthatóvá is teszi: a Friedmann-megoldásokat az általános relativitáselméletből veszi át, behelyettesíti őket a GfE-mennyiségekbe, és olyan tartományra korlátozza őket, ahol az indukált metrika jól viselkedik.

A nagyobb fizikai állítások nyitottak maradnak. A keret új, ez a tanulmány nem hasonlítja össze kozmológiáját adatokkal, és legérdekesebb következményeinek egy részét — a kvantálást, a kontaktgeometriai dinamikát és a lehetséges gravitonsugárzást — jövőbeli kutatási irányként mutatja be. A belső konzisztencia szükséges egy új gravitációelmélethez. Nem elegendő annak bizonyítására, hogy az elmélet a természetet írja le.

Miért fontos?

A gravitáció és termodinamika kapcsolata régi és mély, a fekete lyukak entrópiájától a de Sitter-tér hőmérsékletéig. Sok ilyen eredmény a horizontok köré szerveződik. A GfE ehelyett helyi, térfogati információmértéket próbál közvetlenül az anyag és geometria kapcsolatából felépíteni.

Nyitott kérdés, hogy ez a javaslat kiállja-e a próbát. A termodinamikai gyakorlat azonban hasznos célt tár fel minden ilyen elmélet számára: meg kell magyaráznia, hogyan férhet össze a helyi struktúra és a csökkenő helyi entrópiasűrűség a növekvő teljes entrópiával egy táguló univerzumban.

Ez a tanulmány egy matematikailag explicit módot mutat arra, hogyan történhet ez. Értéke nem az, hogy lezárja a gravitáció–entrópia problémát. Hanem hogy annak egy részét olyan egyenletekké alakítja, amelyek feltételezései, korlátai és következő tesztjei világosan megfogalmazhatók.

Röviden

Bianconi termodinamikai leírást vezet le a Gravity From Entropy keretén belül, amely egy geometriai kvantumos relatív entrópiára épülő javasolt módosított gravitációs elmélet. A modell helyi entrópia-, energia-, hőmérséklet- és nyomásváltozói első törvényt elégítenek ki. Amikor a teljes GfE-mennyiségeket alacsony energiájú, kis görbületű Friedmann-közelítéseken értékelik, a helyi entrópia- és energiasűrűség csökken az univerzum tágulásával, miközben a teljes entrópia a téridőtérfogat növekedése miatt emelkedik; az anyag- és sugárzásdominált példákban a teljes energia vezető rendben állandóhoz tart. Egy de Sitter-oksági gyémánt H^{-2} szerint skálázódó entrópiát ad, de a standard horizonthőmérséklettől eltérő modellhőmérsékletet. Ezek feltételes matematikai eredmények a GfE-n belül, nem megfigyelési bizonyíték arra, hogy a gravitáció

entrópiából származik, nem sötétenergia-mérés és nem kész kvantumgravitációs elmélet.

Források

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