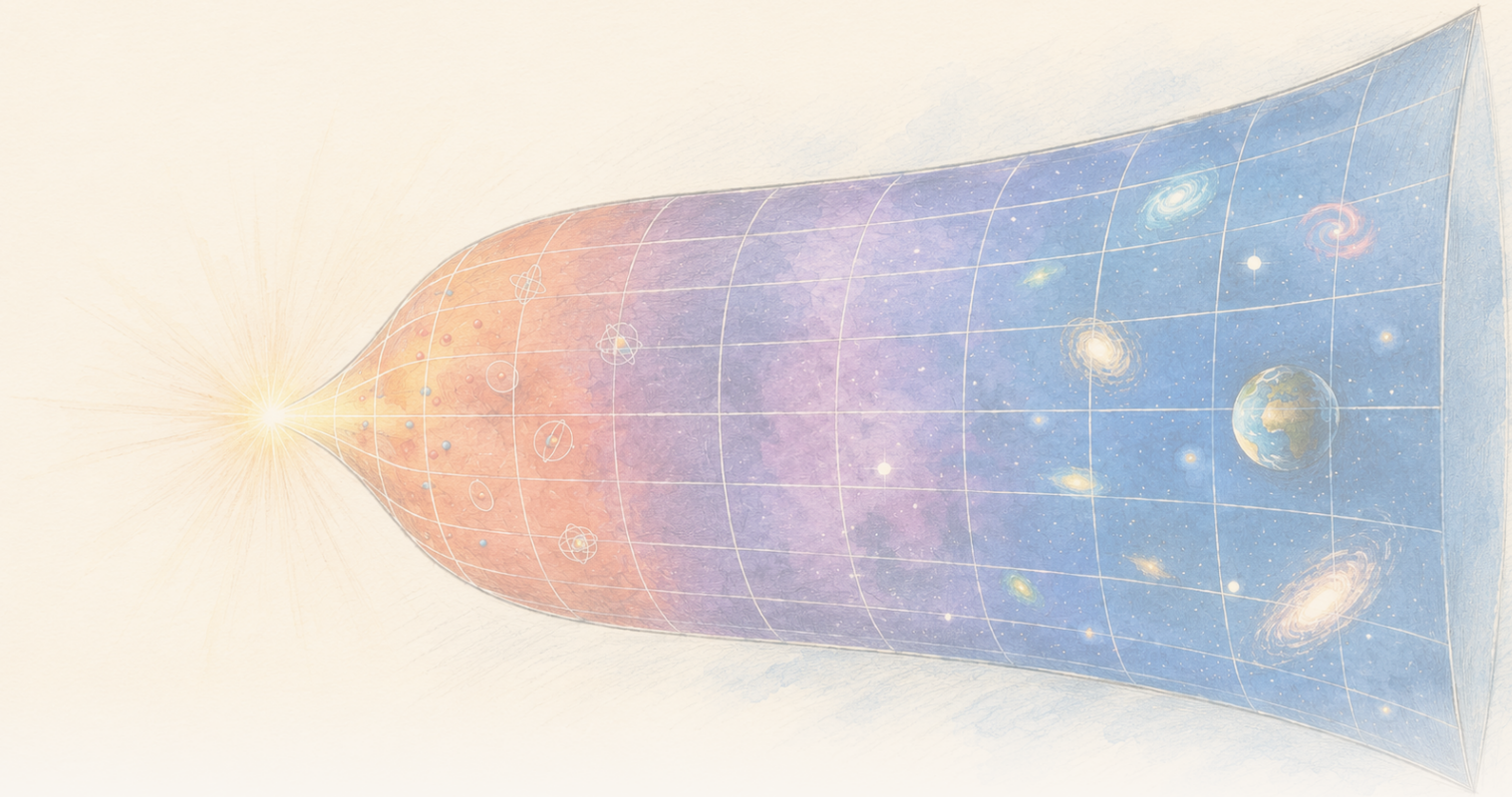

The Clean Paper

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

U modelu gravitacije zasnovanom na entropiji lokalna gustoća entropije pada dok ukupna entropija raste

Rad u Physical Review D izvodi temperature, tlakove i prvi zakon unutar Gravity From Entropy, predloženog okvira modificirane gravitacije. U kasnovremenskoj Friedmannovoj aproksimaciji male zakrivljenosti lokalne gustoće entropije i energije modela padaju, dok širenje uzrokuje rast ukupne entropije. Izračun je interno konkretan, ali uvjetan: Friedmannove kozmologije nisu egzaktna rješenja pune teorije, a ovo nije opažački dokaz da gravitacija proizlazi iz entropije, objašnjenje izmjerene tamne energije ili dovršena teorija kvantne gravitacije.

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

Rastući volumen može smanjiti gustoću i istodobno povećati ukupnu količinu

Ako gustoća entropije u ovom modelu pada dok se svemir širi, kako ukupna entropija ipak može rasti?

Zamislite svemir koji se širi i podijeljen je na sićušne ćelije. Količina nečega u svakoj ćeliji može padati, iako ukupna količina u cijelom rastućem području raste. Pad gustoće i rast ukupne količine nisu suprotnosti kada se mijenja i sam volumen.

Ta jednostavna računica nalazi se u središtu mnogo ambicioznijeg teorijskog rada. U Physical Review D matematička fizičarka Ginestra Bianconi razvija termodinamički opis **Gravity From Entropy** (GfE), nedavno predloženog modela u kojem je gravitacija kodirana informacijskoteorijskim odnosom između tvari i geometrije. Ovdje „informacijskoteorijski" znači da model polazi od matematičke mjere razlike između dvaju opisa geometrije: fizičke geometrije i one koju induciraju tvar i zakrivljenost.

Rad izvodi lokalne veličine nazvane k-entropije, k-energije, k-temperature i k-tlakovi. Prefiks k razdvaja različite geometrijske sektore u modelu; to nisu različite tvari ni kozmološka razdoblja. Njihov odnos prvog zakona ima isti matematički oblik kao u termodinamici: promjena energije povezana je s temperaturom puta promjena entropije, umanjeno za tlak puta promjena volumena.

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

Rad zatim procjenjuje te veličine pomoću Friedmannovih kozmologija u širenju: standardnih idealiziranih svemira koji su na velikim skalama homogeni i izotropni. U režimu niske energije i male zakrivljenosti primjeri kojima dominiraju tvar i zračenje imaju opadajuće lokalne gustoće entropije i energije, ali širenje daje dovoljno volumena da ukupna entropija raste. Ukupna energija u vodećem redu približava se konstanti, što znači da se zadržava dominantni član pri velikim vremenima, a odbacuju članovi koji s vremenom brže nestaju.

To je matematički rezultat unutar samog modela. Jednako je važno gdje mu je granica: izračun se provodi **unutar jedne predložene teorije**, a Friedmannove kozmologije korištene u konkretnim primjerima samo su **aproksimativna**, ne egzaktna, rješenja punih GfE jednadžbi. Te jednadžbe gibanja dobivaju se variranjem predloženog GfE djelovanja i uključuju dinamičko G-polje i geometrijske sektore višeg reda kojih nema u običnim Friedmannovim jednadžbama. Rad ne opaža kako entropija stvara gravitaciju, ne identificira tamnu energiju našeg svemira niti dovršava teoriju kvantne gravitacije.

Što Gravity From Entropy pretpostavlja

Opća relativnost opisuje gravitaciju geometrijom prostor-vremena. Tvar govori prostor-vremenu kako da se zakrivi, a zakrivljenost tvari kako da se giba. GfE polazi od drukčijeg predloženog djelovanja: objekte povezane s metrikom tretira kao kvantne operatore i svoj Lagrangian gradi iz

geometrijske kvantne relativne entropije (GQRE).

> **Tri pojma u 120 sekundi**
>
> **Kvantni operator** matematičko je pravilo koje djeluje na kvantno stanje i predstavlja neku veličinu ili transformaciju. GfE pretpostavlja da se njegovi objekti povezani s metrikom mogu tako tretirati; članak ne traži od čitatelja da rekonstruira tu konstrukciju.
> **Lagrangian** je sažet matematički recept za dinamiku teorije. Integrira se preko prostor-vremena kako bi se dobilo djelovanje, a zatim se djelovanje varira da bi se izvele jednadžbe polja.
> **GQRE** je specifični Lagrangian koji GfE odabire za svoj model. Prilagođava ideju kvantne relativne entropije za usporedbu fizičke metrike s metrikom višeg reda koju induciraju tvar i zakrivljenost. To što se naziva entropijom ne čini je običnom toplinskom entropijom.

Relativna entropija obično je mjera razlikovnosti dviju distribucija vjerojatnosti ili kvantnih stanja. U GfE-u uspoređuju se fizička metrika i metrika višeg reda inducirana tvari i zakrivljenošću. „Višeg reda” ne znači dodatne dimenzije prostor-vremena. Znači da model u jedan prošireni objekt pakira skalarni, vektorski i bivektorski geometrijski sektor. Dinamičko **G-polje** povezuje te komponente i „odijeva” metriku koja se koristi i u gravitacijskom i u materijskom dijelu modela. Okvir je konstruiran tako da se u granici niske energije i male zakrivljenosti njegovo djelovanje svodi na Einstein-Hilbertovo djelovanje opće relativnosti plus djelovanje tvari.

Tu posljednju rečenicu lako je previše interpretirati. Povrat Einsteinovih jednadžbi u određenoj granici cilj je konzistentnosti prijedloga. Ne pokazuje da priroda koristi širu teoriju izvan te granice.

Jednadžbe polja GfE-a sadrže i dinamički član koji okvir naziva **emergentnim efektivnim članom tamne energije**. U ovom radu Bianconi poistovjećuje gustoću unutarnje energije modela s tim članom. „Efektivna tamna energija” opisuje njegovu ulogu u jednadžbama. Nije empirijska identifikacija s tamnom energijom zaključenom iz kozmoloških opažanja.

> **Tri različite uporabe riječi „entropija”**
>
> **Obična termodinamička entropija** broji koliko mikroskopskih rasporeda može dati neko makroskopsko stanje. **Kvantna relativna entropija** mjeri koliko se dva kvantna stanja razlikuju. **GQRE** u ovom radu specifična je geometrijska konstrukcija modela nadahnuta relativnom entropijom i korištena kao gravitacijski Lagrangian. Slični nazivi ne čine te veličine međusobno zamjenjivima; rad izvodi veze koje koristi unutar GfE-a.

Egzaktni termodinamički rezultat unutar modela

Rad prvo radi na razini samog GfE okvira. Za svaki red i vrstu geometrijskog stupnja slobode, indeksiranog s k, definira:

- lokalnu k-entropiju iz GQRE-a;
- lokalnu k-energiju iz gustoće unutarnje energije modela;
- konjugiranu k-temperaturu;
- i k-tlak.

Te veličine zadovoljavaju lokalni prvi zakon. U notaciji rada,

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

Indeks k nije popis različitih tvari ili epoha svemira. U homogenom i izotropnom izračunu označava pet stavki: jednu skalarnu; odvojene vremensku i prostornu iz vektorskog sektora; te odvojene vrijeme-prostor i prostor-prostor iz bivektorskog sektora. Skalar nema usmjereni indeks, vektorske stavke razlikuju vremenski od prostornih smjerova, a bivektor je izgrađen iz parova smjerova. Svaki sektor može imati vlastitu temperaturu i tlak. K-temperatura također može biti pozitivna ili negativna, ovisno o odgovarajućoj komponenti G-polja.

To nisu temperature izmjerene stavljanjem termometra kraj kozmološkog horizonta. Standardna de Sitterova temperatura kvantnog polja skalira s H: **Gibbons-Hawkingova temperatura** pripisuje se kozmološkom horizontu, dok je **Bunch-Daviesov vakuum** standardno de Sitter-invarijantno kvantno stanje čije korelacije polja daju odgovarajući toplinski odziv. Rad izričito razlikuje oboje od svojih geometrijskih k-temperatura, koje u de Sitterovu primjeru skaliraju s H^2. Ovdje „temperatura" označava termodinamički konjugiranu varijablu izvedenu iz definicija entropije i energije modela.

Dakle, identitet prvog zakona stvaran je izvod, ali je **unutarnji rezultat**: prihvatite GfE djelovanje i definicije i ta termodinamička struktura slijedi.

Zašto je Friedmannov izračun aproksimacija

Da bi formalizam pretvorio u kozmološki primjer, rad koristi homogena i izotropna Friedmann-Robertson-Walkerova (FRW) prostor-vremena. „Homogeno" znači da model na velikoj skali ima ista prosječna svojstva na svakom mjestu; „izotropno" da izgleda isto u svakom smjeru. Jedan faktor skale opisuje kako udaljenosti rastu s vremenom, tvar se prikazuje kao glatki savršeni fluid, a Hubbleov parametar H sažima brzinu širenja. To je idealizirana pozadina, a ne karta pojedinačnih galaksija.

No postoji strukturno nepoklapanje. Friedmannovi svemiri rješavaju Einsteinove jednadžbe. Općenito ne rješavaju pune GfE jednadžbe višeg reda, koje prate i skalarni, vektorski i bivektorski sektor te derivacije G-polja. Einsteinove se jednadžbe ponovno pojavljuju samo u prvom redu prijedloga, u granici niske energije i male zakrivljenosti.

Rad to izravno kaže i Friedmannova rješenja tretira kao aproksimacije, pristup koji uspoređuje s umetanjem rješenja srednjeg polja u puniju teoriju kako bi se ispitalo gdje ta aproksimacija ostaje pouzdana. Režim zahtijeva nisku energiju i malu zakrivljenost, sažeto uvjetom $l_P H \ll 1$, gdje je l_P Planckova duljina. Drugi uvjet zahtijeva da umnožak inducirane metrike višeg reda i inverzne fizičke metrike višeg reda ostane pozitivno definitan.

Rezultat zato nije „GfE predviđa povijest našeg svemira”. Bliži je ovome: **ako se GfE svemir dovoljno dobro aproksimira poznatom Friedmannovom kozmologijom, ovo su termodinamička skaliranja koja daju pune GfE veličine.**

Lokalni nasuprot ukupnom rezultatu

Unutar tog režima vodeće lokalne veličine imaju jednostavna skaliranja:

- gustoća entropije modela skalira kao H^2;
- gustoća energije modela skalira kao H^4;
- za ne-de-Sitterove Friedmannove primjere pri kasnim vremenima to približno postaje t^{-2} i t^{-4}.

Obje gustoće zato padaju kako se svemir širi. Ali gustoća nije ukupna količina.

Kada rad integrira preko širećeg područja prostor-vremena, rastući volumen mijenja rezultat. Za fizički poznate primjere kojima dominiraju tvar i zračenje ukupna entropija s vremenom raste iako entropija po jedinici volumena pada. Ukupna energija ne nastavlja rasti; u vodećem redu približava se konstanti.

To je konceptualno najkorisniji rezultat rada. Lokalno uređenje ili razrjeđivanje nije automatski u sukobu s globalnim drugim zakonom. Područje može lokalno postajati manje entropično po jedinici volumena dok integrirana entropija raste jer volumen prostor-vremena raste još brže.

Izračun ne dokazuje da je to točno mikroskopsko objašnjenje termodinamičke strelice u stvarnom svemiru. Pokazuje da predloženi okvir može bez proturječja sadržavati razliku između lokalnog i globalnog u svojoj Friedmannovoj aproksimaciji.

De Sitterova usporedba, s drukčijom temperaturom

Rad također razmatra de Sitterov prostor, idealizirano eksponencijalno šireće prostor-vrijeme s konstantnim H. Za jednog promatrača integrira samo preko konačnog **kauzalnog dijamanta**: presjeka budućeg svjetlosnog stošca ranijeg događaja i prošlog svjetlosnog stošca kasnijeg događaja, koji omeđuje područje prostor-vremena sposobno sudjelovati u opažanjima između njih. Preko tog dijamanta ukupna GfE entropija skalira kao H^{-2}, isto skaliranje s H kao poznata Gibbons-Hawkingova entropija. Ukupna GfE energija reda je jedan u jedinicama modela.

> **Jedna obitelj kozmoloških pozadina**
>
> FRW je obitelj homogenih i izotropnih geometrija, a ne jedno dodatno mjesto. Svemiri kojima dominiraju tvar i zračenje slučajevi su FRW-a koji se razlikuju po sadržaju modela. De Sitterov prostor također se može zapisati u FRW obliku, ali predstavlja slučaj kojim

> dominira vakuum, s konstantnim H i eksponencijalnim širenjem. Kauzalni dijamant konačno je područje odabrano unutar tog prostor-vremena za jednog promatrača; nije druga vrsta svemira.

Podudaranje skaliranja nije isto što i izvođenje istog fizičkog objekta. Pridružena GfE k-temperatura skalira kao H^2, za razliku od standardne de Sitterove temperature koja skalira kao H. Rad tu razliku tumači kao znak da k-temperatura pripada geometriji prostor-vremena, a ne kvantnim poljima koja žive na toj pozadini.

Zatim sugerira da bi se takva temperatura *možda* mogla povezati s gravitonskim zračenjem, a ne s običnom emisijom čestica. To je buduće pitanje, a ne rezultat ovog rada. Teoriju bi prvo trebalo kvantizirati kako bi se uopće utvrdilo odgovaraju li njezine temperature ikakvu zračenju.

Što ovo ne dokazuje

- **Ne** pokazuje opažački da gravitacija nastaje iz entropije.
- **Ne** utvrđuje da je efektivni član modela tamna energija izmjerena u kozmologiji.
- **Ne** zamjenjuje opću relativnost ispitanom, nadmoćnom teorijom. Opća relativnost pojavljuje se kao granica prijedloga pri niskoj energiji i maloj zakrivljenosti.
- **Ne** čini Friedmannove kozmologije egzaktnim rješenjima GfE-a. One su aproksimacija korištena za procjenu termodinamičkog ponašanja modela.
- **Ne** izvodi potpuni mikroskopski broj stupnjeva slobode prostor-vremena.
- **Ne** daje dovršenu teoriju kvantne gravitacije niti detektira gravitone.
- **Ne** pokazuje da su negativne k-temperature obična negativna očitanja termometra.

Koliko je rezultat snažan?

Ovo je recenzirani teorijski rad, pa „dokaz” ovdje znači nešto drugo nego u eksperimentu. Prava pitanja su jesu li definicije koherentne, slijede li izvodi i jesu li aproksimacije jasno navedene i kontrolirane.

Na toj razini rad daje konkretan termodinamički rječnik za GfE i izvodi strukturu prvog zakona umjesto da se oslanja samo na analogiju. Granicu aproksimacije čini neuobičajeno vidljivom: Friedmannova rješenja posuđena su iz opće relativnosti, umetnuta u GfE veličine i ograničena na režim u kojem inducirana metrika ostaje dobro definirana.

Šire fizičke tvrdnje ostaju otvorene. Okvir je nov, ovaj rad ne uspoređuje njegovu kozmologiju s podacima, a neke od najzanimljivijih implikacija — kvantizacija, kontaktno-geometrijska dinamika i moguće gravitonsko zračenje — predstavljene su kao smjerovi budućeg rada. Unutarnja konzistentnost nužna je za novu teoriju gravitacije. Nije dovoljna da pokaže da teorija opisuje prirodu.

Zašto je važno

Veza između gravitacije i termodinamike stara je i duboka, od entropije crnih rupa do temperature de Sitterova prostora. Mnogi od tih rezultata organizirani su oko horizonata. GfE umjesto toga pokušava izgraditi lokalnu, volumensku informacijsku mjeru izravno iz odnosa tvari i geometrije.

Hoće li taj prijedlog opstati otvoreno je pitanje. Ali termodinamička analiza razotkriva koristan cilj za svaku takvu teoriju: treba objasniti kako lokalna struktura i padajuća lokalna gustoća entropije mogu koegzistirati s rastućom ukupnom entropijom u svemiru koji se širi.

Ovaj rad pokazuje jedan matematički eksplicitan način na koji se to može dogoditi. Njegova vrijednost nije u tome da zatvara problem gravitacije i entropije. Pretvara dio tog problema u jednadžbe čije se pretpostavke, granice i sljedeći testovi mogu jasno izreći.

Sažetak bez uljepšavanja

Bianconi izvodi termodinamički opis unutar Gravity From Entropy, predloženog okvira modificirane gravitacije zasnovanog na geometrijskoj kvantnoj relativnoj entropiji. Lokalne varijable entropije, energije, temperature i tlaka modela zadovoljavaju prvi zakon. Kada se pune GfE veličine procijene na Friedmannovim aproksimacijama niske energije i male zakrivljenosti, lokalne gustoće entropije i energije padaju dok se svemir širi, dok ukupna entropija raste jer volumen prostor-vremena raste; ukupna energija u vodećem redu približava se konstanti za primjere kojima dominiraju tvar i zračenje. De Sitterov kauzalni dijamant daje entropiju koja skalira kao H^{-2}, ali temperaturu modela različitu od standardne temperature horizonta. To su uvjetni matematički rezultati unutar GfE-a, a ne opažački dokaz da gravitacija dolazi iz entropije, mjerenje tamne energije ili dovršena teorija kvantne gravitacije.

Izvori

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