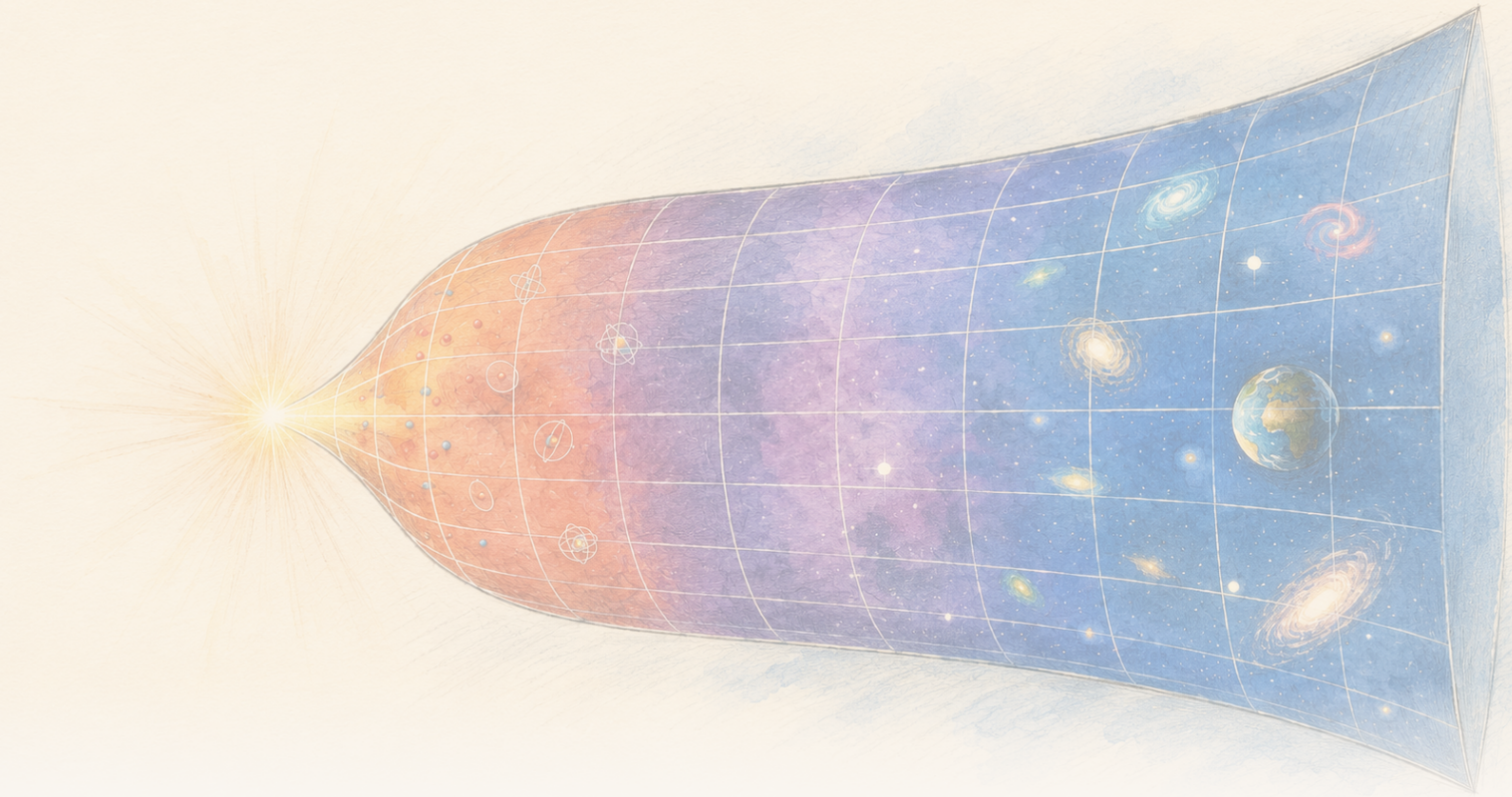

The Clean Paper

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

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

Rad u Physical Review D izvodi temperature, pritiske i prvi zakon u okviru Gravity From Entropy, predloženog modela modifikovane gravitacije. U kasnovremenskoj Friedmannovoj aproksimaciji male zakrivljenosti lokalne gustine entropije i energije modela padaju, dok širenje uzrokuje rast ukupne entropije. Izračun je interno konkretan, ali uslovan: Friedmannove kozmologije nisu egzaktna rešenja pune teorije, a ovo nije posmatrački dokaz da gravitacija proizlazi iz entropije, objašnjenje izmerene tamne energije ili završena 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 gustinu i istovremeno povećati ukupnu količinu

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

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

To jednostavno pitanje bilansa nalazi se u centru 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 informaciono-teorijskim odnosom između supstance i geometrije. Ovde „informaciono-teorijski" znači da model polazi od matematičke mere razlike između dvaju opisa geometrije: fizičke geometrije i one koju induciraju supstanca i zakrivljenost.

Rad izvodi lokalne veličine nazvane k-entropije, k-energije, k-temperature i k-pritisci. Prefiks k razdvaja različite geometrijske sektore u modelu; to nisu različite supstance ni kozmološka perioda. Njihov odnos prvog zakona ima isti knjigovodstveni oblik kao u termodinamici: promena energije povezana je s temperaturom puta promena entropije, umanjeno za pritisak puta promena volumena.

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

Rad zatim procenjuje te veličine pomoću Friedmannovih kozmologija u širenju: standardnih idealizovanih svemira koji su na velikim skalama homogeni i izotropni. U režimu niske energije i male zakrivljenosti primeri kojima dominiraju supstanca i zračenje imaju opadajuće lokalne gustine 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 jasan matematički rezultat. Njegova je granica jednako važna: izračun se provodi **unutar jedne predložene teorije**, a Friedmannove kozmologije korišćene u konkretnim primerima samo su **aproksimativna**, ne egzaktna, rešenja punih GfE jednačini. Te jednačine kretanja dobijaju se variranjem predloženog GfE delovanja i uključuju dinamičko G-polje i geometrijske sektore višeg reda kojih nema u običnim Friedmannovim jednačinama. Rad ne pokazuje opažanjem da entropija stvara gravitaciju, ne identifikuje tamnu energiju našeg svemira niti dovršava teoriju kvantne gravitacije.

Šta Gravity From Entropy pretpostavlja

Opšta relativnost opisuje gravitaciju geometrijom prostor-vremena. Supstanca govori prostor-vremenu kako da se zakrivi, a zakrivljenost supstance kako da se giba. GfE polazi od drukčijeg predloženog delovanja: objekte povezane s metrikom tretira kao kvantne operatore i svoj Lagrangian

gradi iz **geometrijske kvantne relativne entropije** (GQRE).

Three pojma u 120 sekundi

Kvantni operator matematičko je pravilo koje deluje 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 čitaoca da rekonstruiše tu konstrukciju.
Lagrangian je sažet matematički recept za dinamiku teorije. Integrira se preko prostor-vremena kako bi se dobilo delovanje, a zatim se delovanje varira da bi se izvele jednačine polja.
GQRE je specifični Lagrangian koji GfE odabire za svoj model. Prilagođava ideju kvantne relativne entropije za poređenje fizičke metrike s metrikom višeg reda koju induciraju supstanca i zakrivljenost. To što se naziva entropijom ne čini je običnom toplotnom entropijom.

Relativna entropija obično je mera razlikovnosti dveju distribucija verovatnoće ili kvantnih stanja. U GfE-u upoređuju se fizička metrika i metrika višeg reda inducirana supstance i zakrivljenošću. „Višeg reda" ne znači dodatne dimenzije prostor-vremena. Znači da model u jedan prošireni objekt pakuje skalarni, vektorski i bivektorski geometrijski sektor. Dinamičko **G-polje** povezuje te komponente i „odeva" metriku koja se koristi i u gravitacionom i u materijskom delu modela. Okvir je konstruisan tako da se u granici niske energije i male zakrivljenosti njegovo delovanje svodi na Einstein-Hilbertovo delovanje opšte relativnosti plus delovanje supstance.

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

Jednačine polja GfE-a sadrže i dinamički član koji okvir naziva **emergentnim efektivnim članom tamne energije**. U ovom radu Bianconi poistovećuje gustinu unutrašnje energije modela s tim članom. „Efektivna tamna energija" opisuje njegovu ulogu u jednačinama. Nije empirijska identifikacija s tamnom energijom zaključenom iz kozmoloških opažanja.

Three različite upotrebe reči „entropija"

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

Egzaktni termodinamički rezultat unutar modela

Rad prvo radi na nivou samog GfE okvira. Za svaki red i vrstu geometrijskog stepena slobode, indeksiranog s k, definiše:

- lokalnu k-entropiju iz GQRE-a;

- lokalnu k-energiju iz gustine unutrašnje energije modela;
- konjugiranu k-temperaturu;
- i k-pritisak.

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 supstance ili epoha svemira. U homogenom i izotropnom izračunu označava pet stavki: jednu skalarnu; odvojene vremensku i prostornu iz vektorskog sektora; te odvojene vreme-prostor i prostor-prostor iz bivektorskog sektora. Skalar nema usmereni indeks, vektorske stavke razlikuju vremenski od prostornih smerova, a bivektor je izgrađen iz parova smerova. Svaki sektor može imati vlastitu temperaturu i pritisak. K-temperatura takođe može biti pozitivna ili negativna, zavisno o odgovarajućoj komponenti G-polja.

To nisu temperature izmerene 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 toplotni odziv. Rad izričito razlikuje oboje od svojih geometrijskih k-temperatura, koje u de Sitterovu primeru skaliraju s H^2. Ovde „temperatura” označava termodinamički konjugiranu varijablu izvedenu iz definicija entropije i energije modela.

Dakle, identitet prvog zakona stvaran je izvod, ali je **rezultat uslovljen pretpostavkama modela**: ako prihvatite GfE delovanje i definicije, ta termodinamička struktura iz njih sledi.

Zašto je Friedmannov izračun aproksimacija

Da bi formalizam pretvorio u kozmološki primer, rad koristi homogena i izotropna Friedmann-Robertson-Walkerova (FRW) prostor-vremena. „Homogeno” znači da model na velikoj skali ima ista prosečna svojstva na svakom mestu; „izotropno” da izgleda isto u svakom smeru. Jedan faktor skale opisuje kako udaljenosti rastu s vremenom, supstanca 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 rešavaju Einsteinove jednačine. Uopšteno ne rešavaju pune GfE jednačine višeg reda, koje prate i skalarni, vektorski i bivektorski sektor te derivacije G-polja. Einsteinove se jednačine ponovo pojavljuju samo u prvom redu predloga, u granici niske energije i male zakrivljenosti.

Rad to direktno kaže i Friedmannova rešenja tretira kao aproksimacije, pristup koji upoređuje s umetanjem rešenja srednjeg polja u puniju teoriju kako bi se ispitalo gde ta aproksimacija ostaje pouzdana. Režim zahteva nisku energiju i malu zakrivljenost, sažeto uslovom $l_P H \ll 1$, gde je l_P Planckova dužina. Drugi uslov zahteva da umnožak inducirane metrike višeg reda i inverzne fizičke metrike višeg reda ostane pozitivno definitan.

Rezultat zato nije „GfE predviđa istoriju 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:

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

Obe gustine zato padaju kako se svemir širi. Ali gustina nije ukupna količina.

Kada rad integrira preko širećeg područja prostor-vremena, rastući volumen menja rezultat. Za fizički poznate primere kojima dominiraju supstanca 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 tačno mikroskopsko objašnjenje termodinamičke strelice u stvarnom svemiru. Pokazuje da predloženi okvir može bez proturječja sadržati razliku između lokalnog i globalnog u svojoj Friedmannovoj aproksimaciji.

De Sitterova poređenje, s drukčijom temperaturom

Rad takođe razmatra de Sitterov prostor, idealizirano eksponencijalno šireće prostor-vreme s konstantnim H. Za jednog posmatrača integrira samo preko konačnog **kauzalnog dijamanta**: preseka budućeg svetlosnog stošca ranijeg događaja i prošlog svetlosnog stošca kasnijeg događaja, koji omeđuje područje prostor-vremena sposobno učestvovati 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.

> **One porodica kozmoloških pozadina**
>
> FRW je porodica homogenih i izotropnih geometrija, a ne jedno dodatno mesto. Svemiri kojima dominiraju supstanca i zračenje slučajevi su FRW-a koji se razlikuju po sadržaju modela. De Sitterov prostor takođe se može zapisati u FRW obliku, ali predstavlja slučaj

> kojim dominira vakuum, s konstantnim H i eksponencijalnim širenjem. Kauzalni dijamant konačno je područje izabrano unutar tog prostor-vremena za jednog posmatrača; 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 sugeriše 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 uopšte utvrdilo odgovaraju li njene temperature ikakvu zračenju.

Šta ovo ne dokazuje

- **Ne** pokazuje posmatrački da gravitacija nastaje iz entropije.
- **Ne** utvrđuje da je efektivni član modela tamna energija izmerena u kozmologiji.
- **Ne** zamenjuje opštu relativnost ispitanom, nadmoćnom teorijom. Opšta relativnost pojavljuje se kao granica predloga pri niskoj energiji i maloj zakrivljenosti.
- **Ne** čini Friedmannove kozmologije egzaktnim rešenjima GfE-a. One su aproksimacija korišćena za procenu termodinamičkog ponašanja modela.
- **Ne** izvodi potpuni mikroskopski broj stepeni 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” ovde znači nešto drugo nego u eksperimentu. Prava pitanja su jesu li definicije koherentne, slede li izvodi i jesu li aproksimacije jasno navedene i kontrolisane.

Na toj nivou rad daje konkretan termodinamički rečnik za GfE i izvodi strukturu prvog zakona umesto da se oslanja samo na analogiju. Granicu aproksimacije čini neuobičajeno vidljivom: Friedmannova rešenja posuđena su iz opšte relativnosti, umetnuta u GfE veličine i ograničena na režim u kojem inducirana metrika ostaje dobro definisana.

Šire fizičke tvrdnje ostaju otvorene. Okvir je nov, ovaj rad ne upoređuje njegovu kozmologiju s podacima, a neke od najzanimljivijih implikacija — kvantizacija, kontaktno-geometrijska dinamika i moguće gravitonsko zračenje — predstavljene su kao smerovi budućeg rada. Unutrašnja 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 organizovani su oko horizonata. GfE umesto toga pokušava izgraditi lokalnu, volumensku informacijsku meru direktno iz odnosa supstance i geometrije.

Hoće li taj predlog opstati otvoreno je pitanje. Ali termodinamička analiza razotkriva koristan cilj za svaku takvu teoriju: treba objasniti kako lokalna struktura i padajuća lokalna gustina 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 vrednost nije u tome da zatvara problem gravitacije i entropije. Pretvara deo tog problema u jednačine čije se pretpostavke, granice i sledeći testovi mogu jasno izreći.

Kratak rezime

Bianconi izvodi termodinamički opis unutar Gravity From Entropy, predloženog okvira modifikovane gravitacije zasnovanog na geometrijskoj kvantnoj relativnoj entropiji. Lokalne varijable entropije, energije, temperature i pritiska modela zadovoljavaju prvi zakon. Kada se pune GfE veličine procene na Friedmannovim aproksimacijama niske energije i male zakrivljenosti, lokalne gustine 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 primere kojima dominiraju supstanca i zračenje. De Sitterov kauzalni dijamant daje entropiju koja skalira kao H^{-2}, ali temperaturu modela različitu od standardne temperature horizonta. To su uslovni matematički rezultati unutar GfE-a, a ne posmatrački dokaz da gravitacija dolazi iz entropije, merenje tamne energije ili završena 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