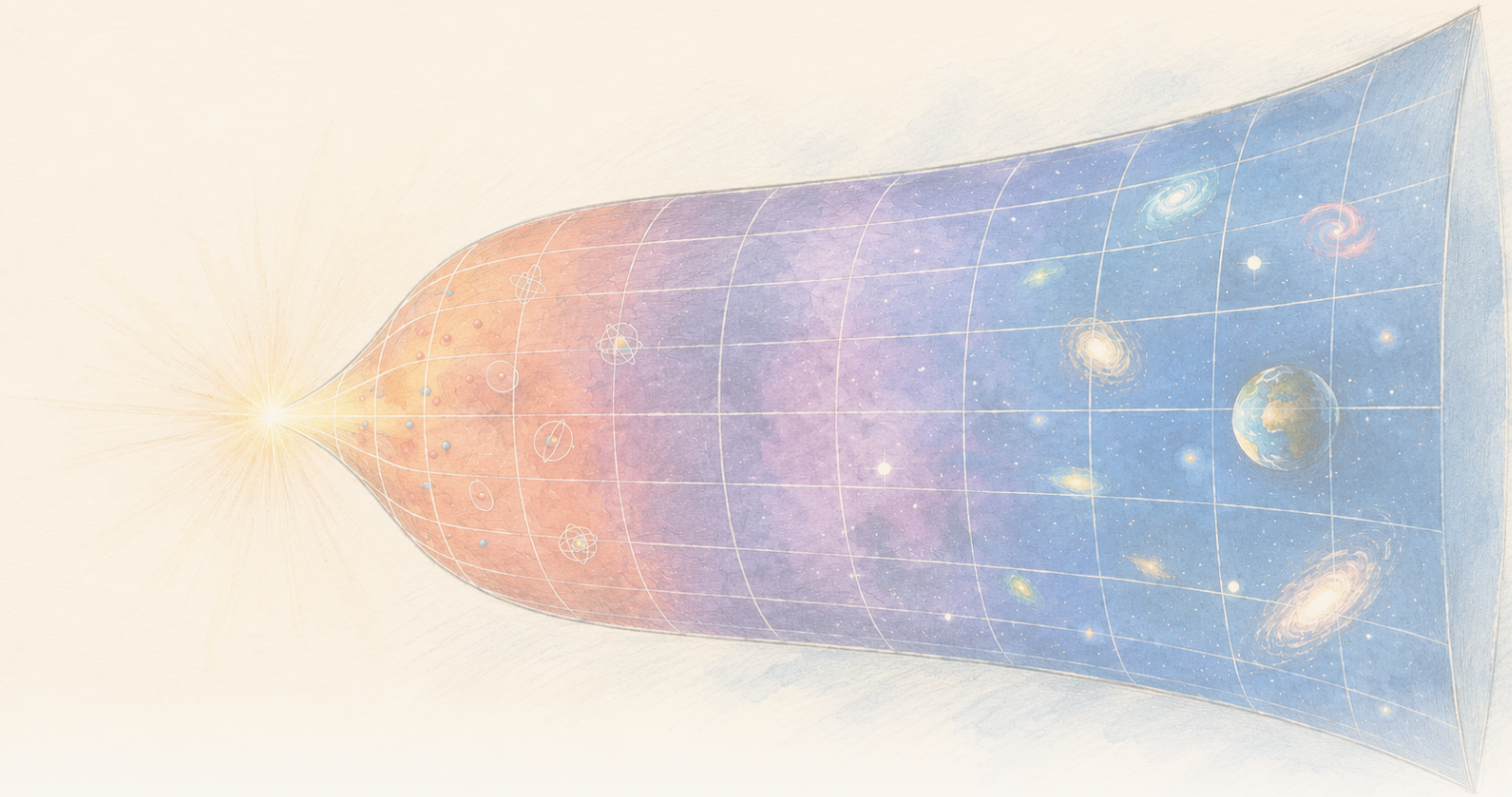

The Clean Paper

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

V modeli gravitácie založenom na entropii lokálna hustota entropie klesá, zatiaľ čo celková entropia rastie

Článok v Physical Review D odvodzuje teploty, tlaky a prvý zákon v rámci Gravity From Entropy, navrhovaného modelu modifikovanej gravitácie. V neskorom, nízkozakrivenom Friedmannovom priblížení klesajú lokálne hustoty entropie a energie modelu, no rozpínanie spôsobuje rast celkovej entropie. Výpočet je vnútorne konkrétny, ale podmienený: Friedmannove kozmológie nie sú presnými riešeniami úplnej teórie a nejde o pozorovací dôkaz, že gravitácia vzniká z entropie, vysvetlenie meranej tmavej energie ani hotovú teóriu kvantovej gravitácie.

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

Rastúci objem môže znižovať hustotu a zároveň zvyšovať celkové množstvo

Ak hustota entropie v tomto modeli pri rozpínaní vesmíru klesá, ako môže celková entropia napriek tomu rásť?

Predstavte si rozpínajúci sa vesmír rozdelený na drobné bunky. Množstvo určitej veličiny v každej bunke môže klesať, zatiaľ čo jej celkové množstvo v celej rastúcej oblasti stúpa. Pokles hustoty a rast celku nie sú protikladmi, keď sa mení samotný objem.

Táto jednoduchá otázka bilancie stojí v centre omnoho ambicióznejšej teoretickej práce. V časopise Physical Review D rozvíja matematická fyzička Ginestra Bianconi termodynamický opis modelu **Gravity From Entropy** (GfE), nedávno navrhnutého rámca, v ktorom je gravitácia zakódovaná prostredníctvom informačno-teoretického vzťahu medzi hmotou a geometriou. „Informačno-teoretický“ tu znamená, že model vychádza z matematickej miery rozdielu medzi dvoma opismi geometrie: fyzickou geometriou a geometriou indukovanou hmotou a zakrivením.

Článok odvodzuje lokálne veličiny nazývané k-entropie, k-energie, k-teploty a k-tlaky. Predpona k oddeľuje rozličné geometrické sektory modelu; nejde o rôzne látky ani kozmické epochy. Vzťah prvého zákona medzi nimi má rovnakú bilančnú podobu ako v termodynamike: zmena energie súvisí s teplotou násobenou zmenou entropie mínus tlak násobený zmenou objemu.

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

Práca potom tieto veličiny vyhodnocuje v rozpínajúcich sa Friedmannových kozmológiách: štandardných idealizovaných vesmíroch, ktoré sú vo veľkých mierkach homogénne a izotropné. V nízkoenergetickom režime s malým zakrivením majú príklady dominované hmotou a žiarením klesajúce lokálne hustoty entropie a energie, no rozpínanie poskytuje dostatočne veľký objem, aby celková entropia rástla. Celková energia sa v vedúcom ráde približuje ku konštante — teda po ponechaní dominantného člena pri veľkých časoch a zanedbaní členov, ktoré s časom zanikajú rýchlejšie.

Je to jasne odvodený matematický výsledok. Rovnako dôležité je však jeho obmedzenie: výpočet sa vykonáva **vo vnútri jednej navrhovanej teórie** a Friedmannove kozmológie použité v konkrétnych príkladoch sú iba **približnými**, nie presnými riešeniami úplných rovníc GfE. Tieto pohybové rovnice vznikajú variáciou navrhovanej akcie GfE a obsahujú dynamické G-pole a geometrické sektory vyššieho rádu, ktoré v bežných Friedmannových rovniciach chýbajú. Článok nepozoruje, ako entropia vytvára gravitáciu, neurčuje tmavú energiu nášho vesmíru a nedokončuje teóriu kvantovej gravitácie.

Čo model Gravity From Entropy predpokladá

Všeobecná relativita opisuje gravitáciu geometriou časopriestoru. Hmota hovorí časopriestoru, ako sa má zakriviť, a zakrivenie hovorí hmote, ako sa má pohybovať. GfE vychádza z inej navrhovanej

akcie: s objektmi súvisiacimi s metrikou zaobchádza ako s kvantovými operátormi a svoj Lagrangián buduje z **geometrickej kvantovej relatívnej entropie** (Geometric Quantum Relative Entropy, GQRE).

Tri pojmy za 120 sekúnd

Kvantový operátor je matematické pravidlo, ktoré pôsobí na kvantový stav a reprezentuje veličinu alebo transformáciu. GfE predpokladá, že s objektmi súvisiacimi s metrikou možno takto zaobchádzať; článok od čitateľa nežiada, aby túto konštrukciu reprodukoval.
Lagrangián je kompaktný matematický predpis dynamiky teórie. Jeho integráciou cez časopriestor získame akciu a variáciou tejto akcie odvodíme rovnice poľa.
GQRE je modelovo špecifický Lagrangián zvolený v GfE. Prispôsobuje myšlienku kvantovej relatívnej entropie na porovnanie fyzickej metriky s metrikou vyššieho rádu indukovanou hmotou a zakrivením. To, že sa nazýva entropiou, z nej nerobí bežnú tepelnú entropiu.

Relatívna entropia je zvyčajne mierou rozlíšiteľnosti dvoch pravdepodobnostných rozdelení alebo kvantových stavov. V GfE sa porovnáva fyzická metrika s metrikou vyššieho rádu indukovanou hmotou a zakrivením. „Vyšší rád“ neznamená ďalšie rozmery časopriestoru. Znamená, že model spája skalárne, vektorové a bivektorové geometrické sektory do jedného rozšíreného objektu. Dynamické **G-pole** tieto zložky prepája a „oblieka“ metriku používanú v gravitačnej aj hmotovej časti modelu. Rámec je zostrojený tak, aby sa v nízkoenergetickom limite s malým zakrivením jeho akcia redukovala na Einsteinovu-Hilbertovu akciu všeobecnej relativity plus akciu hmoty.

Poslednej vete možno ľahko pripísať väčší význam, než má. Obnovenie Einsteinových rovníc v určitom limite je cieľom konzistencie návrhu. Neukazuje, že príroda používa širšiu teóriu mimo tohto limitu.

Rovnice poľa GfE obsahujú aj dynamický člen, ktorý rámec nazýva **emergentným efektívnym členom tmavej energie**. Bianconi v tejto práci stotožňuje hustotu vnútornej energie modelu s týmto členom. „Efektívna tmavá energia“ opisuje jeho úlohu v rovniciach. Nie je to empirické stotožnenie s tmavou energiou odvodenou z kozmologických pozorovaní.

Tri rôzne použitia slova „entropia“

Bežná termodynamická entropia počíta, koľko mikroskopických usporiadaní môže vytvoriť makroskopický stav. **Kvantová relatívna entropia** meria, nakoľko sú dva kvantové stavy rozlíšiteľné. **GQRE** v tejto práci je modelovo špecifická geometrická konštrukcia inšpirovaná relatívnou entropiou a použitá ako gravitačný Lagrangián. Podobné názvy nerobia z týchto veličín vzájomne zameniteľné objekty; práca odvodzuje iba spojenia, ktoré používa v rámci GfE.

Presný termodynamický výsledok vo vnútri modelu

Práca najprv postupuje na úrovni samotného rámca GfE. Pre každý rád a typ geometrického stupňa voľnosti označený indexom k definuje:

- lokálnu k-entropiu z GQRE;
- lokálnu k-energiu z hustoty vnútornej energie modelu;
- konjugovanú k-teplotu;
- a k-tlak.

Tieto veličiny spĺňajú lokálny prvý zákon. V zápise článku:

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

Index k nie je zoznamom rôznych látok ani epoch vesmíru. V homogénnom a izotropnom výpočte označuje päť položiek: jednu skalárnu; oddelenú časovú a priestorovú položku vektorového sektora; a oddelenú časovo-priestorovú a priestorovo-priestorovú položku bivektorového sektora. Skalár nemá smerový index, vektorové položky odlišujú časový smer od priestorových a bivektor je zostavený z dvojíc smerov. Každý sektor môže mať vlastnú teplotu a tlak. K-teplota môže byť kladná aj záporná v závislosti od príslušnej zložky G-poľa.

Nejde o teploty merané teplomerom pri kozmologickom horizonte. Štandardná kvantovo-poľová teplota de Sitterovho priestoru škáluje s H: **Gibbonsova-Hawkingova teplota** sa priraďuje kozmologickému horizontu, zatiaľ čo **Bunchovo-Daviesovo vákuum** je štandardný de Sitterovsky invariantný kvantový stav, ktorého korelácie poľa poskytujú súvisiacu tepelnú odozvu. Článok obe výslovne odlišuje od svojich geometrických k-teplôt, ktoré v príklade de Sitterovho priestoru škálujú s H^2. „Teplota“ tu označuje termodynamicky konjugovanú veličinu odvodenú z definícií entropie a energie v modeli.

Identita prvého zákona je teda skutočným odvodením, ale **výsledkom platným v rámci modelu**: ak prijmeme akciu a definície GfE, táto termodynamická štruktúra z nich vyplynie.

Prečo je Friedmannov výpočet iba priblížením

Na premenenie formalizmu na kozmologický príklad používa článok homogénne a izotropné Friedmannove-Robertsonove-Walkerove (FRW) časopriestory. „Homogénny“ znamená, že model má vo veľkých mierkach rovnaké priemerné vlastnosti na každom mieste; „izotropný“ znamená, že vyzerá rovnako vo všetkých smeroch. Jediný mierkový faktor opisuje rast vzdialeností s časom, hmota sa reprezentuje ako hladká dokonalá tekutina a Hubbleov parameter H zhŕňa rýchlosť rozpínania. Ide o idealizované pozadie, nie mapu jednotlivých galaxií.

Existuje však štrukturálny nesúlad. Friedmannove vesmíry riešia Einsteinove rovnice. Vo všeobecnosti neriešia úplné rovnice GfE vyššieho rádu, ktoré sledujú aj skalárny, vektorový a bivektorový

sektor a derivácie G-poľa. Einsteinove rovnice sa v návrhu znovu objavujú iba v prvom, nízkoenergetickom ráde s malým zakrivením.

Článok to uvádza priamo a s Friedmannovými riešeniami zaobchádza ako s aproximáciami, podobne ako keď sa riešenie stredného poľa vloží do úplnejšej teórie, aby sa preskúmalo, kde je aproximácia spoľahlivá. Režim vyžaduje nízku energiu a malé zakrivenie, čo zhŕňa podmienka $l_P H \ll 1$, kde l_P je Planckova dĺžka. Druhá podmienka vyžaduje, aby súčin indukovanej metriky vyššieho rádu a inverznej fyzickej metriky vyššieho rádu zostal pozitívne definitný.

Výsledok teda nehovorí „GfE predpovedá dejiny nášho vesmíru“. Presnejšie znie: **ak je vesmír GfE dostatočne dobre aproximovaný známou Friedmannovou kozmológiou, úplné veličiny GfE nadobúdajú tieto termodynamické škálovania.**

Výsledok lokálne verzus celkovo

V tomto režime majú vedúce lokálne veličiny jednoduché škálovania:

- hustota entropie modelu škáluje ako H^2;
- hustota energie modelu škáluje ako H^4;
- pri neskorých časoch v ne-de Sitterovských Friedmannových príkladoch sa menia približne ako t^{-2} a t^{-4}.

Obe hustoty teda pri rozpínaní vesmíru klesajú. Hustota však nie je celkové množstvo.

Keď práca integruje cez rozpínajúcu sa oblasť časopriestoru, rastúci objem zmení výsledok. V fyzikálne známych príkladoch dominovaných hmotou a žiarením celková entropia s časom rastie, hoci entropia na jednotku objemu klesá. Celková energia ďalej nerastie; vo vedúcom ráde sa približuje ku konštante.

Toto je najužitočnejší koncepčný výsledok článku. Lokálne usporiadanie alebo riedenie nemusí byť v rozpore s globálnym druhým zákonom. Oblasť môže mať lokálne menšiu entropiu na jednotku objemu, zatiaľ čo integrovaná entropia rastie, pretože objem časopriestoru rastie rýchlejšie.

Výpočet nedokazuje, že ide o správne mikroskopické vysvetlenie termodynamickej šípky času v skutočnom vesmíre. Ukazuje, že navrhovaný rámec dokáže vo svojom Friedmannovom priblížení bez rozporu obsahovať rozdiel medzi lokálnym a globálnym opisom.

Porovnanie s de Sitterovým priestorom, ale s inou teplotou

Práca sa zaoberá aj de Sitterovým priestorom, idealizovaným exponenciálne sa rozpínajúcim časopriestorom s konštantným H. Pre jedného pozorovateľa integruje iba cez konečný **kauzálny diamant**: prienik budúceho svetelného kužeľa skoršej udalosti a minulého svetelného kužeľa neskoršej udalosti, ktorý ohraničuje oblasť časopriestoru schopnú zúčastniť sa pozorovaní medzi nimi. V tomto

diamante škáluje celková entropia GfE ako H^{-2}, rovnako ako známa Gibbonsova-Hawkingova entropia. Celková energia GfE je v jednotkách modelu rádu jedna.

> **Jedna rodina kozmologických pozadí**
>
> FRW je rodina homogénnych a izotropných geometrií, nie ďalšie miesto. Vesmíry dominované hmotou a žiarením sú prípady FRW, ktoré sa líšia obsahom modelu. Aj de Sitterov priestor možno zapísať vo forme FRW, ale predstavuje prípad dominovaný vákuom s konštantným H a exponenciálnym rozpínaním. Kauzálny diamant je konečná oblasť vybraná pre jedného pozorovateľa vo vnútri tohto časopriestoru; nejde o iný druh vesmíru.

Zhoda škálovania nie je to isté ako odvodenie toho istého fyzikálneho objektu. Príslušná k-teplota GfE škáluje ako H^2, na rozdiel od štandardnej de Sitterovej teploty, ktorá škáluje ako H. Článok interpretuje tento rozdiel ako náznak, že k-teplota patrí geometrii časopriestoru, nie kvantovým poliam žijúcim na tomto pozadí.

Následne navrhuje, že takáto teplota *by mohla* súvisieť skôr s gravitačným žiarením než s emisiou bežných častíc. To je otázka do budúcnosti, nie výsledok tejto práce. Najprv by bolo potrebné teóriu kvantovať a zistiť, či jej teploty vôbec zodpovedajú nejakému žiareniu.

Čo to nedokazuje

- **Nepozoruje**, že gravitácia vzniká z entropie.
- **Nestanovuje**, že efektívny člen modelu je tmavou energiou meranou v kozmológii.
- **Nenahrádza** všeobecnú relativitu experimentálne overenou lepšou teóriou. Všeobecná relativita sa tu objavuje ako nízkoenergetický limit návrhu s malým zakrivením.
- **Nerobí** z Friedmannových kozmológií presné riešenia GfE. Sú aproximáciou použitou na odhad termodynamického správania modelu.
- **Neodvodzuje** úplné mikroskopické počítanie stupňov voľnosti časopriestoru.
- **Neposkytuje** dokončenú teóriu kvantovej gravitácie ani nedeteguje gravitóny.
- **Neukazuje**, že záporné k-teploty sú obyčajnými zápornými údajmi teplomera.

Aký silný je výsledok?

Ide o recenzovanú teoretickú prácu, takže „dôkaz“ tu znamená niečo iné než v experimente. Primerané otázky sú, či sú definície konzistentné, či odvodenia logicky nasledujú a či sú aproximácie jasne uvedené a kontrolované.

Na tejto úrovni práca poskytuje konkrétny termodynamický slovník pre GfE a odvodzuje štruktúru prvého zákona namiesto toho, aby sa spoliehala iba na analógiu. Hranicu aproximácie navyše ukazuje nezvyčajne otvorene: Friedmannove riešenia si požičiava zo všeobecnej relativity, dosadzuje

ich do veličín GfE a obmedzuje sa na režim, v ktorom indukovaná metrika zostáva dobre definovaná.

Širšie fyzikálne tvrdenia zostávajú otvorené. Rámec je nový, táto práca neporovnáva jeho kozmológiu s dátami a niektoré z najzaujímavejších dôsledkov — kvantovanie, kontaktno-geometrická dynamika a možné gravitačné žiarenie — uvádza ako smery budúceho výskumu. Vnútorná konzistencia je pre novú gravitačnú teóriu nevyhnutná. Nestačí však na preukázanie, že teória opisuje prírodu.

Prečo na tom záleží

Vzťah medzi gravitáciou a termodynamikou je starý a hlboký, od entropie čiernych dier po teplotu de Sitterovho priestoru. Mnohé z týchto výsledkov sa sústreďujú na horizonty. GfE sa namiesto toho pokúša vytvoriť lokálnu objemovú mieru informácie priamo zo vzťahu medzi hmotou a geometriou.

Otázka, či návrh obstojí, zostáva otvorená. Termodynamická analýza však odhaľuje užitočnú požiadavku na každú podobnú teóriu: mala by vysvetliť, ako môže lokálna štruktúra a klesajúca lokálna hustota entropie existovať súčasne s rastúcou celkovou entropiou v rozpínajúcom sa vesmíre.

Táto práca ukazuje jeden matematicky explicitný spôsob, ako sa to môže stať. Jej hodnota nespočíva v uzavretí problému gravitácie a entropie. Premieňa časť problému na rovnice, ktorých predpoklady, hranice a ďalšie testy možno jasne pomenovať.

Stručné zhrnutie

Bianconi odvodzuje termodynamický opis v rámci Gravity From Entropy, navrhovaného modelu modifikovanej gravitácie založeného na geometrickej kvantovej relatívnej entropii. Lokálne veličiny entropie, energie, teploty a tlaku v modeli spĺňajú prvý zákon. Keď sa úplné veličiny GfE vyhodnotia vo Friedmannových priblíženiach s nízkou energiou a malým zakrivením, lokálne hustoty entropie a energie pri rozpínaní vesmíru klesajú, zatiaľ čo celková entropia rastie vďaka rastúcemu objemu časopriestoru; celková energia sa v príkladoch dominovaných hmotou a žiarením vo vedúcom ráde približuje ku konštante. Kauzálny diamant v de Sitterovom priestore poskytuje entropiu škálujúcu ako H^{-2}, ale modelovú teplotu odlišnú od štandardnej teploty horizontu. Ide o podmienené matematické výsledky vo vnútri GfE, nie o pozorovací dôkaz, že gravitácia vzniká z entropie, meranie tmavej energie ani hotovú teóriu kvantovej gravitácie.

Zdroje

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