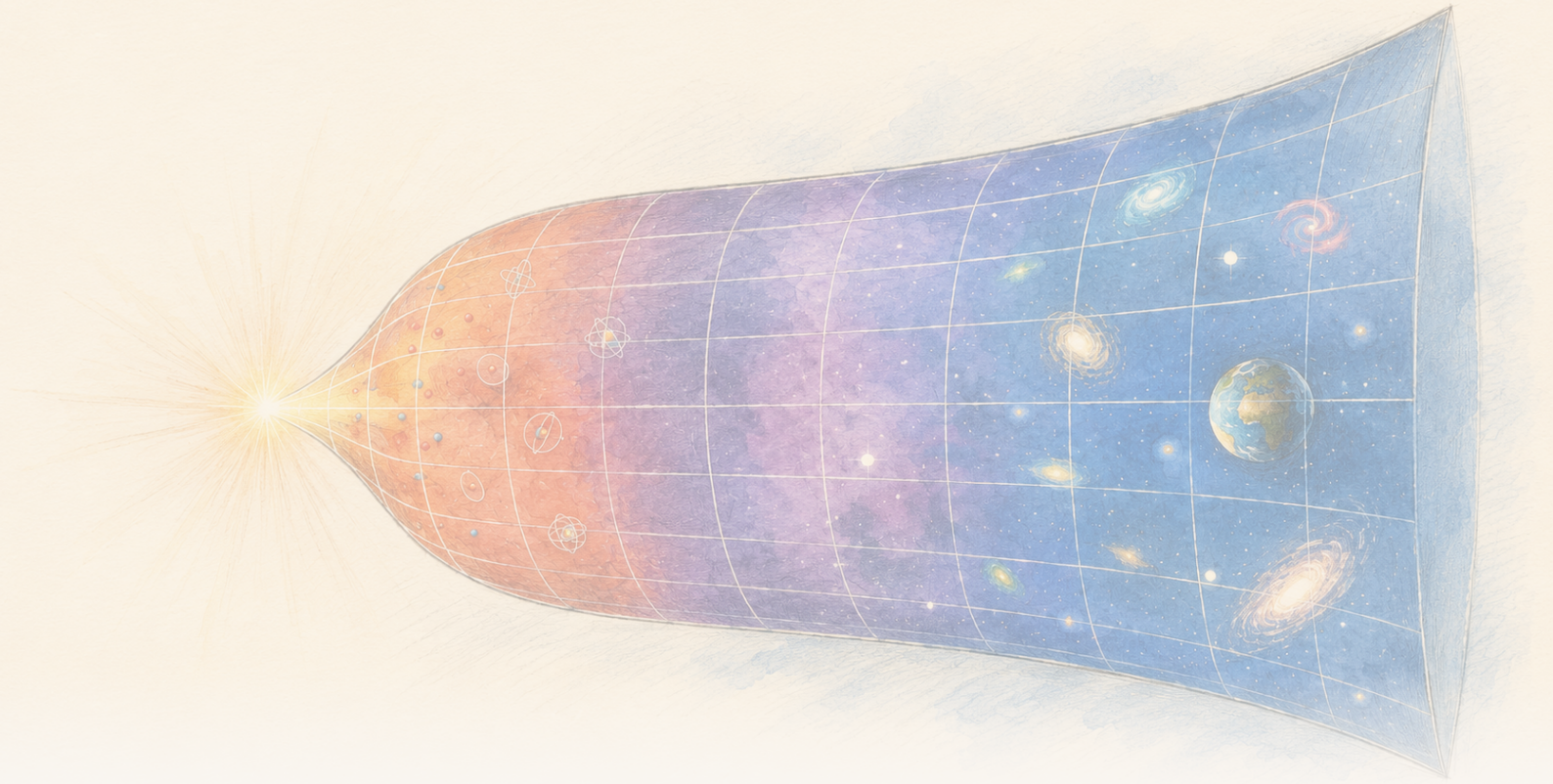

The Clean Paper

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

Entropijā balstītā gravitācijas modelī lokālais entropijas blīvums krītas, kamēr kopējā entropija aug

Physical Review D darbā tiek atvasinātas temperatūras, spiedieni un pirmais likums Gravity From Entropy — piedāvātā modificētās gravitācijas ietvara — iekšienē. Vēlīna laika, mazas liekuma pakāpes Frīdmaņa aproksimācijā modeļa lokālais entropijas un enerģijas blīvums samazinās, kamēr izplešanās liek kopējai entropijai pieaugt. Aprēķins ir iekšēji konkrēts, bet nosacīts: Frīdmaņa kosmoloģijas nav pilnās teorijas precīzi risinājumi, un tas nav novērojumu pierādījums, ka gravitācija rodas no entropijas, izmērītās tumšās enerģijas skaidrojums vai pabeigta kvantu gravitācijas teorija.

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

Augošs tilpums var samazināt blīvumu, vienlaikus palielinot kopējo daudzumu

Ja šī modeļa entropijas blīvums Visumam izplešoties samazinās, kā tā kopējā entropija tomēr var pieaugt?

Iedomājieties izplešamu Visumu, kas sadalīts sīkās šūnās. Kaut kā daudzums katrā šūnā var samazināties, pat ja kopējais daudzums visā augošajā reģionā palielinās. Blīvuma kritums un kopējā daudzuma pieaugums nav pretstati, ja mainās pats tilpums.

Šī elementārā uzskaites problēma atrodas daudz ambiciozāka teorētiska darba centrā. Žurnālā Physical Review D matemātiskā fiziķe Ginestra Bianconi izstrādā termodinamisku aprakstu modelim **Gravity From Entropy** (GfE), nesen piedāvātam ietvaram, kurā gravitācija tiek kodēta ar informācijas teorijas sakarību starp vielu un ģeometriju. Šeit „informācijas teorijas" nozīmē, ka modelis sākas ar matemātisku mēru, kas raksturo atšķirību starp diviem ģeometrijas aprakstiem: fiziskā ģeometrija un ģeometrija, ko inducē viela un liekums.

Darbs atvasina lokālus lielumus, ko sauc par k-entropijām, k-enerģijām, k-temperatūrām un k-spiedieniem. Prefikss k nošķir dažādus ģeometriskos sektorus modelī; tās nav dažādas vielas vai kosmiskie laikmeti. To pirmā likuma sakarībai ir tāda pati uzskaites forma kā termodinamikā: enerģijas izmaiņa saistās ar temperatūru reiz entropijas izmaiņa mīnus spiediens reiz tilpuma izmaiņa.

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

Pēc tam darbs šos lielumus aprēķina izplešamās Frīdmaņa kosmoloģijās: standarta idealizētos Visumos, kas lielos mērogos ir homogēni un izotropi. Zemas enerģijas un maza liekuma režīmā piemēros ar vielas un starojuma dominanci lokālais entropijas un enerģijas blīvums samazinās, bet izplešanās dod pietiekami lielu tilpumu, lai kopējā entropija pieaugtu. Kopējā enerģija vadošajā kārtā tuvojas konstantei — tas nozīmē, ka tiek paturēts dominējošais lielu laiku loceklis un atmesti locekļi, kas laika gaitā izdziest ātrāk.

Tas ir tīrs matemātisks rezultāts. Tikpat svarīga ir tā robeža: aprēķins tiek veikts **vienas piedāvātas teorijas iekšienē**, un konkrētajos piemēros izmantotās Frīdmaņa kosmoloģijas ir tikai **aptuveni**, nevis precīzi pilno GfE vienādojumu risinājumi. Šie kustības vienādojumi izriet no piedāvātās GfE darbības variēšanas un ietver dinamisko G-lauku un augstākas kārtas ģeometriskos sektorus, kuru parastajos Frīdmaņa vienādojumos nav. Darbs nenovēro, ka entropija rada gravitāciju, neidentificē tumšo enerģiju mūsu Visumā un nepabeidz kvantu gravitācijas teoriju.

Ko pieņem Gravity From Entropy

Vispārīgā relativitāte gravitāciju apraksta ar telplaika ģeometriju. Viela nosaka, kā telplaiks izliecas, un liekums nosaka, kā viela kustas. GfE sāk ar citu piedāvātu darbību: ar metriku saistītus objektus

tas traktē kā kvantu operatorus un savu Lagranža funkciju veido no **ģeometriskās kvantu relatīvās entropijas** (GQRE).

> **Trīs termini 120 sekundēs**
>
> **Kvantu operators** ir matemātisks likums, kas darbojas uz kvantu stāvokli un attēlo kādu lielumu vai transformāciju. GfE pieņem, ka ar metriku saistītos objektus var traktēt šādi; raksts neprasa lasītājam atkārtot šo konstrukciju.
> **Lagranža funkcija** ir kompakta matemātiska recepte teorijas dinamikai. Integrējot to pa telplaiku, iegūst darbību, un, variējot šo darbību, atvasina lauka vienādojumus.
> **GQRE** ir GfE izvēlētā modelim specifiskā Lagranža funkcija. Tā pielāgo kvantu relatīvās entropijas ideju, lai salīdzinātu fizisko metriku ar augstākas kārtas metriku, ko inducē viela un liekums. Tas, ka to sauc par entropiju, nepadara to par parastu siltuma entropiju.

Relatīvā entropija parasti mēra atšķiramību starp diviem varbūtību sadalījumiem vai kvantu stāvokļiem. GfE salīdzinājums ir starp fizisko metriku un augstākas kārtas metriku, ko inducē viela un liekums. „Augstākas kārtas" nenozīmē papildu telplaika dimensijas. Tas nozīmē, ka modelis vienā paplašinātā objektā apvieno skalārus, vektora tipa un bivektora tipa ģeometriskos sektorus. Dinamisks **G-lauks** sasaista šīs sastāvdaļas un „ietērpj" metriku, ko izmanto gan gravitācijas, gan vielas daļā. Ietvars ir konstruēts tā, lai zemas enerģijas un maza liekuma robežā tā darbība reducētos uz vispārīgās relativitātes Einšteina–Hilberta darbību plus vielas darbību.

Šo pēdējo teikumu ir viegli pārinterpretēt. Einšteina vienādojumu atgūšana kādā robežā ir priekšlikuma konsekvences mērķis. Tas neparāda, ka daba ārpus šīs robežas izmanto plašāko teoriju.

GfE lauka vienādojumos ir arī dinamisks loceklis, ko ietvars sauc par **emergentu efektīvu tumšās enerģijas locekli**. Šajā darbā Bianconi modeļa iekšējās enerģijas blīvumu identificē ar šo locekli. „Efektīva tumšā enerģija" apraksta tā lomu vienādojumos. Tā nav empīriska identificēšana ar tumšo enerģiju, ko secinām no kosmoloģiskajiem novērojumiem.

> **Trīs dažādi vārda „entropija" lietojumi**
>
> **Parastā termodinamiskā entropija** raksturo, cik daudzi mikroskopiski izkārtojumi var dot vienu makroskopisku stāvokli. **Kvantu relatīvā entropija** mēra, cik atšķirami ir divi kvantu stāvokļi. Šī darba **GQRE** ir modelim specifiska ģeometriska konstrukcija, ko iedvesmojusi relatīvā entropija un kas tiek izmantota kā gravitācijas Lagranža funkcija. Līdzīgi nosaukumi šos lielumus nepadara savstarpēji aizvietojamus; darbs atvasina izmantotās saites GfE iekšienē.

Precīzais termodinamiskais rezultāts modeļa iekšienē

Darbs vispirms strādā pašā GfE ietvarā. Katrai ģeometriskās brīvības pakāpes kārtai un tipam, ko indeksē ar k, tas definē:

- lokālu k-entropiju no GQRE;
- lokālu k-enerģiju no modeļa iekšējās enerģijas blīvuma;
- konjugētu k-temperatūru;
- un k-spiedienu.

Šie lielumi ievēro lokālu pirmo likumu. Darba apzīmējumos,

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

Indekss k nav dažādu vielu vai Visuma laikmetu saraksts. Homogēnajā un izotropajā aprēķinā tas apzīmē piecus ierakstus: vienu skalāru ierakstu; atsevišķus laiktipa un telptipa ierakstus no vektora tipa sektora; un atsevišķus laiks–telpa un telpa–telpa ierakstus no bivektora tipa sektora. Skalāram nav virziena indeksa, vektora tipa ieraksti nošķir laika un telpas virzienus, bet bivektors ir veidots no virzienu pāriem. Katram sektoram var būt sava temperatūra un spiediens. k-temperatūra atkarībā no attiecīgās G-lauka komponentes var būt arī pozitīva vai negatīva.

Tās nav temperatūras, ko izmērītu ar termometru pie kosmoloģiskā horizonta. Standarta de Sitera kvantu lauka temperatūra mērogojas ar H: **Gibonsa–Hokinga temperatūra** tiek piešķirta kosmoloģiskajam horizontam, bet **Banča–Deivisa vakuums** ir standarta de Sitera invariants kvantu stāvoklis, kura lauka korelācijas rada attiecīgo termisko atbildi. Darbs abas skaidri nošķir no savām ģeometriskajām k-temperatūrām, kas de Sitera piemērā mērogojas ar H^2. Šeit „temperatūra” ir termodinamisks konjugētais mainīgais, kas atvasināts no modeļa entropijas un enerģijas definīcijām.

Tātad pirmā likuma identitāte ir īsts atvasinājums, taču tas ir **iekšējs rezultāts**: pieņemiet GfE darbību un definīcijas, un šī termodinamiskā struktūra seko.

Kāpēc Frīdmaņa aprēķins ir aproksimācija

Lai formālismu pārvērstu kosmoloģiskā piemērā, darbs izmanto homogēnus un izotropus Frīdmaņa–Robertsona–Volkera (FRW) telplaikus. „Homogēns” nozīmē, ka lielos mērogos modelim ir vienādas vidējās īpašības katrā vietā; „izotrops” — ka tas izskatās vienādi visos virzienos. Viens mēroga faktors apraksta, kā attālumi ar laiku aug, viela tiek attēlota kā gluds ideāls šķidrums, bet Habla parametrs H apkopo izplešanās ātrumu. Tas ir idealizēts fons, nevis atsevišķu galaktiku karte.

Taču pastāv strukturāla neatbilstība. Frīdmaņa Visumi atrisina Einšteina vienādojumus. Tie vispārīgā gadījumā neatrisina pilnos augstākas kārtas GfE vienādojumus, kas seko arī skalārajam, vektora tipa un bivektora tipa sektoram un G-lauka atvasinājumiem. Einšteina vienādojumi atgriežas tikai priekšlikuma pirmās kārtas, zemas enerģijas un maza liekuma robežā.

Darbs to pasaka tieši un Frīdmaņa risinājumus traktē kā aproksimācijas, pieejā, ko salīdzina ar vidējā lauka risinājuma izmantošanu pilnīgākā teorijā, lai pārbaudītu, cik tālu šī aproksimācija vēl ir derīga. Režīmam vajadzīga zema enerģija un mazs liekums, ko apkopo nosacījums $l_P H \ll 1$, kur l_P ir Planka garums. Otrs nosacījums prasa, lai inducētās augstākas kārtas metrikas un fiziskās augstākas kārtas metrikas inversa reizinājums paliktu pozitīvi definitīvs.

Tāpēc rezultāts nav „GfE prognozē mūsu Visuma vēsturi”. Tas drīzāk ir: **ja GfE Visumu pietiekami labi var aproksimēt ar pazīstamu Frīdmaņa kosmoloģiju, tad pilnie GfE lielumi rada šādas termodinamiskās mērogošanās sakarības.**

Lokālā un kopējā rezultāta atšķirība

Šajā režīmā vadošajiem lokālajiem lielumiem ir vienkāršas mērogošanās sakarības:

- modeļa entropijas blīvums mērogojas kā H^2;
- modeļa enerģijas blīvums mērogojas kā H^4;
- vēlīnos laikos Frīdmaņa piemēros, kas nav de Sitera telpa, tie aptuveni kļūst par t^{-2} un t^{-4}.

Tātad abi blīvumi Visumam izplešoties samazinās. Taču blīvums nav kopējais daudzums.

Kad darbs integrē pa izplešamo telplaika reģionu, augošais tilpums maina atbildi. Fizikāli pazīstamajos vielas un starojuma dominētajos piemēros kopējā entropija ar laiku palielinās, pat ja entropija uz tilpuma vienību samazinās. Kopējā enerģija neturpina augt; vadošajā kārtā tā tuvojas konstantei.

Tas ir darba visnoderīgākais konceptuālais rezultāts. Lokāla sakārtotība vai atšķaidīšanās automātiski nekonfliktē ar globālu otro likumu. Reģions var kļūt lokāli mazāk entropisks uz tilpuma vienību, bet integrētā entropija var augt, jo telplaika tilpums aug ātrāk.

Aprēķins nepierāda, ka tas ir īstais mikroskopiskais termodinamiskās laika bultas skaidrojums reālajā Visumā. Tas parāda, ka piedāvātais ietvars savā Frīdmaņa aproksimācijā var pieļaut lokālo–globālo atšķirību bez pretrunas.

De Sitera salīdzinājums ar citu temperatūru

Darbs aplūko arī de Sitera telpu — idealizētu eksponenciāli izplešamu telplaiku ar konstantu H. Vienam novērotājam tas integrē tikai pa galīgu **kauzālo dimantu**: agrāka notikuma nākotnes gaismas konusa un vēlāka notikuma pagātnes gaismas konusa pārklājumu, kas ierobežo telplaika reģionu, kurš starp abiem notikumiem var piedalīties novērojumos. Šajā dimantā kopējā GfE entropija mērogojas kā H^{-2} — ar tādu pašu H mērogojumu kā pazīstamajai Gibonsa–Hokinga entropijai. Kopējā GfE enerģija modeļa vienībās ir kārtas viens lielums.

> **Viena kosmoloģisko fonu saime**
>
> FRW ir homogēnu un izotropu ģeometriju saime, nevis vēl viena vieta. Vielas dominēts un starojuma dominēts Visums ir FRW gadījumi, ko atšķir tas, kas piepilda modeli. Arī de Sitera telpu var uzrakstīt FRW formā, bet tā attēlo vakuuma dominētu gadījumu ar konstantu H un eksponenciālu izplešanos. Kauzālais dimants ir galīgs reģions šajā telplaikā, kas izvēlēts

> vienam novērotājam; tas nav cits Visuma veids.

Vienādas mērogošanās iegūšana nav tas pats, kas tā paša fiziskā objekta atvasināšana. Attiecīgā GfE k-temperatūra mērogojas kā H^2, atšķirībā no standarta de Sitera temperatūras, kas mērogojas kā H. Darbs šo atšķirību interpretē kā norādi, ka k-temperatūra pieder telplaika ģeometrijai, nevis kvantu laukiem, kas dzīvo uz šī fona.

Tālāk tiek ierosināts, ka šāda temperatūra *varētu* būt saistīta ar gravitonu starojumu, nevis parastu daļiņu emisiju. Tas ir nākotnes jautājums, nevis šī darba rezultāts. Teorija vispirms būtu jākvantizē, lai vispār noteiktu, vai tās temperatūras atbilst kādam starojumam.

Ko tas nepierāda

- Tas **novērojumu ceļā neparāda**, ka gravitācija rodas no entropijas.
- Tas **nepierāda**, ka modeļa efektīvais loceklis ir kosmoloģiskajos novērojumos izmērītā tumšā enerģija.
- Tas **neaizstāj** vispārīgo relativitāti ar pārbaudītu pārāku teoriju. Vispārīgā relativitāte šeit parādās kā priekšlikuma zemas enerģijas, maza liekuma robeža.
- Tas **nepadara** Frīdmaņa kosmoloģijas par precīziem GfE risinājumiem. Tās ir aproksimācija, ar kuru novērtē modeļa termodinamisko uzvedību.
- Tas **neatvasina** pilnīgu mikroskopisku telplaika brīvības pakāpju skaitu.
- Tas **nedod** pabeigtu kvantu gravitācijas teoriju un nedetektē gravitonus.
- Tas **neparāda**, ka negatīvas k-temperatūras būtu parasti negatīvi termometra rādījumi.

Cik spēcīgs ir rezultāts?

Tas ir recenzēts teorētisks darbs, tāpēc „pierādījumi” šeit nozīmē ko citu nekā eksperimentā. Atbilstošie jautājumi ir, vai definīcijas ir koherentas, vai atvasinājumi seko un vai aproksimācijas ir skaidri norādītas un kontrolētas.

Šajā līmenī darbs piedāvā konkrētu termodinamisku vārdnīcu GfE un atvasina pirmā likuma struktūru, nevis paļaujas tikai uz analoģiju. Tas arī neparasti skaidri parāda aproksimācijas robežu: Frīdmaņa risinājumi ir aizgūti no vispārīgās relativitātes, ievietoti GfE lielumos un ierobežoti līdz režīmam, kur inducētā metrika saglabājas labi uzvedīga.

Plašākie fiziskie apgalvojumi paliek atvērti. Ietvars ir jauns, šis darbs nesalīdzina tā kosmoloģiju ar datiem, un dažas interesantākās sekas — kvantizācija, kontakta ģeometriskā dinamika un iespējamais gravitonu starojums — tiek piedāvātas kā turpmāka darba virzieni. Iekšēja konsekvence jaunai gravitācijas teorijai ir nepieciešama. Ar to nepietiek, lai parādītu, ka teorija apraksta dabu.

Kāpēc tas ir svarīgi

Saikne starp gravitāciju un termodinamiku ir sena un dziļa — no melno caurumu entropijas līdz de Sitera telpas temperatūrai. Daudzi no šiem rezultātiem ir organizēti ap horizontiem. GfE tā vietā mēģina uzbūvēt lokālu, tilpuma informācijas mēru tieši no attiecības starp vielu un ģeometriju.

Vai šis priekšlikums izturēs pārbaudi, ir atvērts jautājums. Taču termodinamiskais vingrinājums izceļ noderīgu mērķi jebkurai šādai teorijai: tai jāspēj izskaidrot, kā lokāla struktūra un krītošs lokālais entropijas blīvums var sadzīvot ar augošu kopējo entropiju izplešamā Visumā.

Šis darbs parāda vienu matemātiski skaidru veidu, kā tas var notikt. Tā vērtība nav gravitācijas–entropijas problēmas noslēgšana. Tas pārvērš daļu problēmas vienādojumos, kuru pieņēmumus, robežas un nākamos testus var skaidri formulēt.

Īss kopsavilkums

Bianconi atvasina termodinamisku aprakstu Gravity From Entropy — piedāvātā modificētās gravitācijas ietvara, kas balstīts uz ģeometrisko kvantu relatīvo entropiju — iekšienē. Modeļa lokālie entropijas, enerģijas, temperatūras un spiediena mainīgie ievēro pirmo likumu. Kad pilnie GfE lielumi tiek izvērtēti zemas enerģijas, maza liekuma Frīdmaņa aproksimācijās, lokālais entropijas un enerģijas blīvums Visumam izplešoties krītas, bet kopējā entropija aug, jo palielinās telplaika tilpums; vielas un starojuma dominētajos piemēros kopējā enerģija vadošajā kārtā tuvojas konstantei. De Sitera kauzālajam dimantam entropija mērogojas kā H^{-2}, bet modeļa temperatūra atšķiras no standarta horizonta temperatūras. Tie ir nosacīti matemātiski rezultāti GfE iekšienē, nevis novērojumu pierādījums, ka gravitācija rodas no entropijas, tumšās enerģijas mērījums vai pabeigta kvantu gravitācijas teorija.

Avoti

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