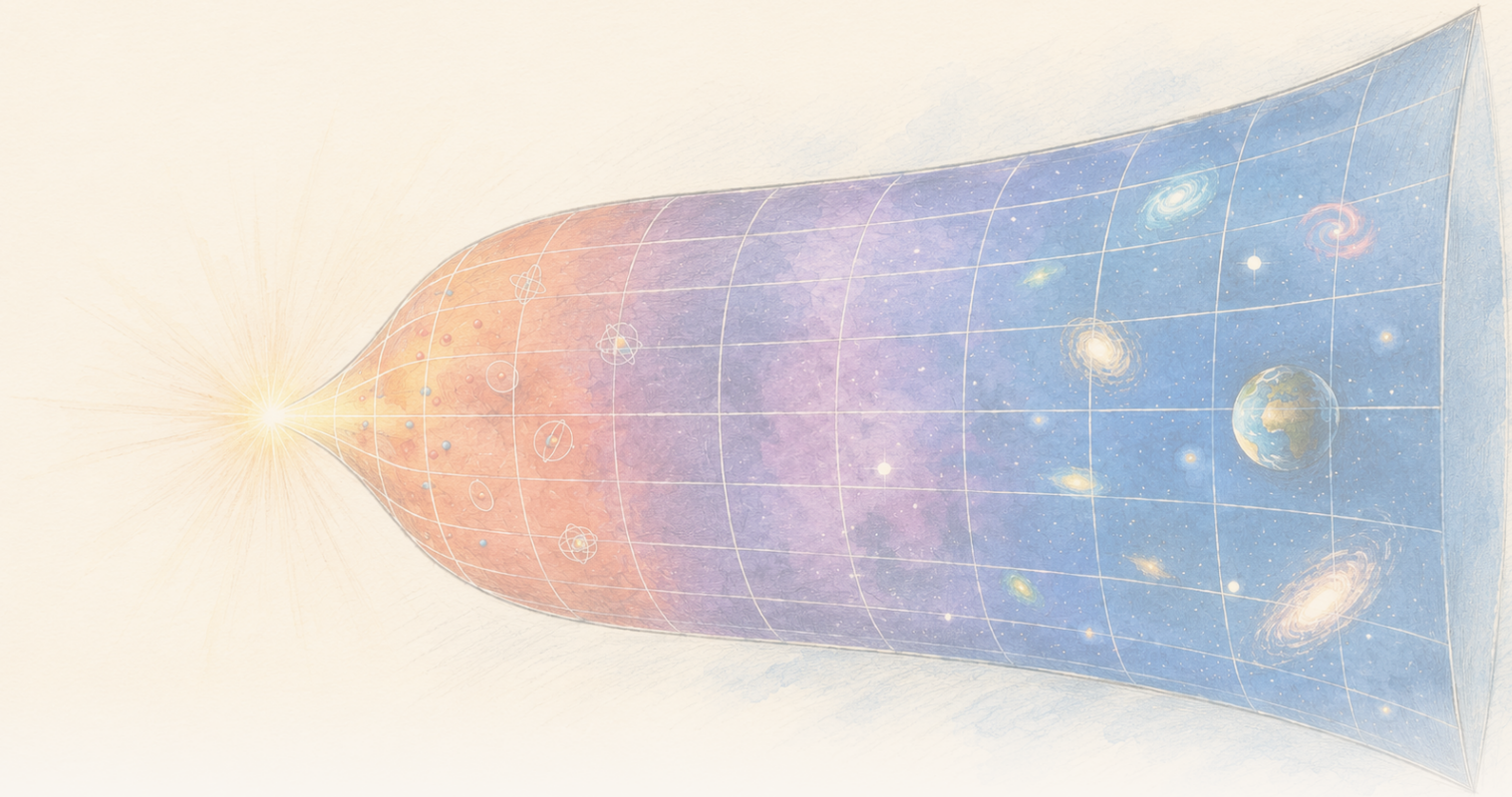

The Clean Paper

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

Entropija paremtame gravitacijos modelyje vietinis entropijos tankis mažėja, o bendras kiekis auga

Physical Review D straipsnyje išvedamos temperatūros, slėgiai ir pirmasis dėsnis Gravity From Entropy — pasiūlytoje modifikuotos gravitacijos sistemoje. Vėlyvojo laiko, mažo kreivumo Friedmanno aproksimacijoje modelio vietiniai entropijos ir energijos tankiai mažėja, o plėtimasis didina bendrą entropiją. Skaičiavimas modelio viduje konkretus, bet sąlyginis: Friedmanno kosmologijos nėra tikslūs visos teorijos sprendiniai, ir tai nėra stebėjimų įrodymas, kad gravitacija kyla iš entropijos, išmatuotos tamsiosios energijos paaiškinimas ar užbaigta kvantinės gravitacijos 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

Didėjantis tūris gali mažinti tankį, bet didinti bendrą kiekį

Jei šiame modelyje Visatai plečiantis entropijos tankis mažėja, kaip bendra entropija vis tiek gali didėti?

Įsivaizduokite besiplečiančią Visatą, padalytą į mažytes ląsteles. Kiekis kiekvienoje ląstelėje gali mažėti, nors bendras kiekis visame augančiame regione didėja. Tankio mažėjimas ir bendro kiekio augimas neprieštarauja vienas kitam, kai pats tūris taip pat kinta.

Ši elementari apskaitos problema yra daug ambicingesnio teorinio straipsnio centre. Physical Review D matematinės fizikos tyrėja Ginestra Bianconi išplėtoja termodinaminį **Gravity From Entropy** (GfE) aprašą — neseniai pasiūlytą modelį, kuriame gravitacija užkoduota informacijos teorijos ryšiu tarp materijos ir geometrijos. Čia „informacijos teorijos“ reiškia, kad modelis prasideda nuo matematinio mato, nusakančio, kaip skiriasi du geometrijos aprašai: fizinė geometrija ir materijos bei kreivumo sukelta geometrija.

Straipsnyje išvedami vietiniai dydžiai, vadinami k-entropijomis, k-energijomis, k-temperatūromis ir k-slėgiais. Priešdėlis k atskiria skirtingus modelio geometrinius sektorius; tai nėra skirtingos medžiagos ar kosminės epochos. Jų pirmojo dėsnio ryšys turi tokią pačią apskaitos formą kaip termodinamikoje: energijos pokytis siejamas su temperatūros ir entropijos pokyčio sandauga, atėmus slėgio ir tūrio pokyčio sandaugą.

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

Tada straipsnyje šie dydžiai apskaičiuojami besiplečiančioms Friedmanno kosmologijoms — standartiniams idealizuotiems modeliams, kuriuose Visata dideliu mastu yra homogeninė ir izotropinė. Mažos energijos ir mažo kreivumo režime materijos bei spinduliuotės dominuojamuose pavyzdžiuose vietiniai entropijos ir energijos tankiai mažėja, tačiau plėtimasis suteikia tiek papildomo tūrio, kad bendra entropija didėja. Bendroji energija pirmąja eile artėja prie konstantos, t. y. palikus dominuojantį didelių laikų narį ir atmetus narius, kurie laikui didėjant nyksta greičiau.

Tai aiškus matematinis rezultatas. Lygiai taip pat svarbi jo riba: skaičiavimas atliekamas **vienos pasiūlytos teorijos viduje**, o konkretiems pavyzdžiams naudojamos Friedmanno kosmologijos yra tik **apytiksliai**, o ne tikslūs visų GfE lygčių sprendiniai. Šios judėjimo lygtys gaunamos varijuojant pasiūlytą GfE veiksmą ir apima dinaminį G-lauką bei aukštesnės eilės geometrinius sektorius, kurių įprastose Friedmanno lygtyse nėra. Straipsnis nestebi, kaip entropija sukuria gravitaciją, nenustato, kas yra mūsų Visatos tamsioji energija, ir neužbaigia kvantinės gravitacijos teorijos.

Ką daro prielaida Gravity From Entropy

Bendroji reliatyvumo teorija gravitaciją aprašo per erdvėlaikio geometriją. Materija nurodo erdvėlaikiui, kaip kreivėti, o kreivumas materijai — kaip judėti. GfE prasideda nuo kitokio pasiūlyto veiksmų funkcionalo: su metrika susiję objektai traktuojami kaip kvantiniai operatoriai, o Lagrango funkcija

kuriama iš **geometrinės kvantinės reliatyviosios entropijos** (GQRE).

Trys terminai per 120 sekundžių

Kvantinis operatorius yra matematinė taisyklė, veikianti kvantinę būseną ir atstovaujanti dydžiui ar transformacijai. GfE daro prielaidą, kad su metrika susijusius objektus galima taip traktuoti; straipsnis nereikalauja, kad skaitytojas atkurtų visą šią konstrukciją.
Lagrango funkcija yra glaustas matematinis teorijos dinamikos receptas. Ją integravus per erdvėlaikį gaunamas veiksmas, o jį varijuojant — lauko lygtys.
GQRE yra konkrečiai šiam modeliui pasirinkta GfE Lagrango funkcija. Ji pritaiko kvantinės reliatyviosios entropijos idėją fizinei metrikai ir materijos bei kreivumo sukeltai aukštesnės eilės metrikai palyginti. Tai, kad šis dydis vadinamas entropija, nereiškia, jog jis yra įprasta šiluminė entropija.

Reliatyvioji entropija paprastai yra dviejų tikimybių skirstinių ar kvantinių būsenų atskiriamumo matas. GfE lygina fizinę metriką su aukštesnės eilės metrika, kurią sukelia materija ir kreivumas. „Aukštesnės eilės“ nereiškia papildomų erdvėlaikio matmenų. Tai reiškia, kad modelis sujungia skaliarinius, vektoriaus tipo ir bivektoriaus tipo geometrinius sektorius į vieną išplėstą objektą. Dinaminis **G-laukas** susieja šiuos komponentus ir „aprengia“ metriką, naudojamą tiek gravitacinėje, tiek materijos modelio dalyse. Sistema sukonstruota taip, kad mažos energijos ir mažo kreivumo riboje jos veiksmas redukuotųsi į bendrosios reliatyvumo teorijos Einstein-Hilberto veiksmą kartu su materijos veiksmu.

Šį paskutinį sakinį lengva pervertinti. Einsteino lygčių atgavimas tam tikroje riboje yra nuoseklumo tikslas pasiūlytai teorijai. Jis neparodo, kad gamta naudoja platesnę teoriją už šios ribos.

GfE lauko lygtyse taip pat yra dinaminis narys, kurį sistema vadina **atsirandančiu efektyviuoju tamsiosios energijos nariu**. Šiame straipsnyje Bianconi modelio vidinės energijos tankį sutapatina su šiuo nariu. „Efektyvioji tamsioji energija“ apibūdina jo vaidmenį lygtyse. Tai nėra empirinė tapatybė su tamsiąja energija, išvedama iš kosmologinių stebėjimų.

Trys skirtingos žodžio „entropija“ reikšmės

Įprasta termodinaminė entropija skaičiuoja, kiek mikroskopinių konfigūracijų gali atitikti makroskopinę būseną. **Kvantinė reliatyvioji entropija** matuoja, kaip gerai galima atskirti dvi kvantines būsenas. Šiame straipsnyje naudojama **GQRE** yra modeliui specifinė geometrinė konstrukcija, įkvėpta reliatyviosios entropijos ir naudojama kaip gravitacinė Lagrango funkcija. Panašūs pavadinimai nereiškia, kad šie dydžiai yra sukeistini; straipsnis pats išveda ryšius, kuriuos naudoja GfE viduje.

Tikslus termodinaminis rezultatas modelio viduje

Pirmiausia straipsnis dirba pačios GfE sistemos lygmeniu. Kiekvienai geometrinio laisvės laipsnio eilei ir tipui, pažymėtam k, apibrėžiama:

- vietinė k-entropija iš GQRE;
- vietinė k-energija iš modelio vidinės energijos tankio;
- su ja konjuguota k-temperatūra;
- ir k-slėgis.

Šie dydžiai tenkina vietinį pirmąjį dėsnį. Straipsnio žymėjimu,

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

Indeksas k nėra skirtingų medžiagų ar Visatos epochų sąrašas. Homogeniniame ir izotropiniame skaičiavime jis žymi penkis įrašus: vieną skaliarinį; atskirus laiko ir erdvės įrašus iš vektoriaus tipo sektoriaus; ir atskirus laikas–erdvė bei erdvė–erdvė įrašus iš bivektoriaus tipo sektoriaus. Skaliaras neturi kryptinio indekso, vektoriaus tipo įrašai atskiria laiko ir erdvės kryptis, o bivektorius sudaromas iš krypties porų. Kiekvienas sektorius gali turėti savo temperatūrą ir slėgį. k-temperatūra taip pat gali būti teigiama arba neigiama, priklausomai nuo atitinkamo G-lauko komponento.

Tai nėra temperatūros, kurias būtų galima išmatuoti pridėjus termometrą prie kosmologinio horizonto. Standartinė de Sitterio kvantinio lauko temperatūra skaluoja su H: **Gibbonso-Hawkingo temperatūra** priskiriama kosmologiniam horizontui, o **Buncho-Davieso vakuumas** yra standartinė de Sitterio invariantinė kvantinė būsena, kurios laukų koreliacijos suteikia atitinkamą šiluminį atsaką. Straipsnis aiškiai atskiria abi šias sąvokas nuo geometrinių k-temperatūrų, kurios de Sitterio pavyzdyje skaluoja su H^2. Čia „temperatūra“ reiškia termodinaminį konjuguotą kintamąjį, išvestą iš modelio entropijos ir energijos apibrėžimų.

Taigi pirmojo dėsnio tapatybė yra tikras išvedimas, bet tai yra **vidinis rezultatas**: priėmus GfE veiksmą ir apibrėžimus, ši termodinaminė struktūra iš jų seka.

Kodėl Friedmanno skaičiavimas yra apytikslis

Kad formalizmas taptų kosmologiniu pavyzdžiu, straipsnyje naudojami homogeniniai ir izotropiniai Friedmanno-Robertsono-Walkerio (FRW) erdvėlaikiai. „Homogeninis“ reiškia, kad didelio masto modelio vidutinės savybės visur vienodos; „izotropinis“ — kad visomis kryptimis jis atrodo vienodai. Vienas mastelio daugiklis aprašo, kaip atstumai didėja laikui bėgant, materija vaizduojama kaip tolygus idealusis skystis, o Hubble’o parametras H apibendrina plėtimosi spartą. Tai idealizuotas fonas, o ne atskirų galaktikų žemėlapis.

Tačiau čia yra struktūrinis neatitikimas. Friedmanno Visatos yra Einsteino lygčių sprendiniai. Jos apskritai nėra visų aukštesnės eilės GfE lygčių sprendiniai, nes šios papildomai seka skaliarinį, vektori-

aus tipo ir bivektoriaus tipo sektorius bei G-lauko išvestines. Einsteino lygtys pasiūlyme vėl atsiranda tik pirmosios eilės, mažos energijos ir mažo kreivumo riboje.

Straipsnis tai pasako tiesiai ir Friedmanno sprendinius traktuoja kaip aproksimacijas. Metodas lyginamas su vidutinio lauko sprendinio įterpimu į išsamesnę teoriją, kad būtų galima patikrinti, kuriame režime toks artinys išlieka patikimas. Tam reikia mažos energijos ir mažo kreivumo, kaip nusako sąlyga $l_P H \ll 1$, kur l_P yra Plancko ilgis. Antroji sąlyga reikalauja, kad indukuotos aukštesnės eilės metrikos ir atvirkštinės fizinės aukštesnės eilės metrikos sandauga išliktų teigiamai apibrėžta.

Todėl rezultatas nėra „GfE numato mūsų Visatos istoriją“. Jis artimesnis teiginiui: **jei GfE Visatą pakankamai gerai aproksimuoja pažįstama Friedmanno kosmologija, tokias termodinamines skales duoda visos GfE dydžių išraiškos.**

Vietinio ir bendro rezultato skirtumas

Šiame režime pagrindiniai vietiniai dydžiai turi paprastas skales:

- modelio entropijos tankis skaluoja kaip H^2;
- modelio energijos tankis skaluoja kaip H^4;
- ne de Sitterio Friedmanno pavyzdžiuose vėlyvais laikais tai tampa apytiksliai t^{-2} ir t^{-4}.

Abu tankiai Visatai plečiantis mažėja. Tačiau tankis nėra bendras kiekis.

Integruojant per besiplečiantį erdvėlaikio regioną, augantis tūris pakeičia atsakymą. Fiziškai pažįstamuose materijos ir spinduliuotės dominuojamuose pavyzdžiuose bendra entropija laikui bėgant didėja, nors entropija tūrio vienete mažėja. Bendra energija neauga be galo; pirmąja eile ji artėja prie konstantos.

Tai naudingiausias konceptualus straipsnio rezultatas. Vietinė tvarka ar skiedimasis savaime neprieštarauja globaliam antrajam dėsniui. Regionas gali turėti mažiau entropijos viename tūrio vienete, o integruota entropija vis tiek augti, nes erdvėlaikio tūris didėja dar sparčiau.

Skaičiavimas neįrodo, kad tai yra teisingas mikroskopinis termodinaminės laiko strėlės realioje Visatoje paaiškinimas. Jis parodo, kad pasiūlyta sistema savo Friedmanno aproksimacijoje gali be prieštaravimo sutalpinti vietinio ir globalaus elgesio skirtumą.

De Sitterio palyginimas — su kita temperatūra

Straipsnyje taip pat nagrinėjama de Sitterio erdvė — idealizuotas eksponentiškai besiplečiantis erdvėlaikis su pastoviu H. Vienam stebėtojui integruojama tik per baigtinį **priežastinį deimantą**: ankstesnio įvykio būsimojo šviesos kūgio ir vėlesnio įvykio praeities šviesos kūgio persidengimą, apibrėžiantį erdvėlaikio sritį, galinčią dalyvauti stebėjimuose tarp šių įvykių. Tokiame deimante bendra GfE entropija skaluoja kaip H^{-2}, t. y. taip pat pagal H kaip pažįstama Gibbonso-Hawkingo

entropija. Bendra GfE energija modelio vienetais yra pirmosios eilės dydžio.

> **Viena kosmologinių fonų šeima**
>
> FRW yra homogeninių ir izotropinių geometrijų šeima, o ne dar viena atskira vieta. Materijos ir spinduliuotės dominuojamos Visatos yra FRW atvejai, besiskiriantys tuo, kas užpildo modelį. De Sitterio erdvę taip pat galima užrašyti FRW forma, tačiau ji atitinka vakuumo dominuojamą atvejį su pastoviu H ir eksponentiniu plėtimusi. Priežastinis deimantas yra baigtinė sritis, parinkta tame erdvėlaikyje vienam stebėtojui; tai nėra kita Visatos rūšis.

Vienodai skaluojantys dydžiai nebūtinai yra tas pats fizinis objektas. Atitinkama GfE k-temperatūra skaluoja kaip H^2, kitaip nei standartinė de Sitterio temperatūra, kuri skaluoja kaip H. Straipsnyje šis skirtumas interpretuojamas kaip požymis, kad k-temperatūra priklauso pačiai erdvėlaikio geometrijai, o ne kvantiniams laukams, gyvenantiems tame fone.

Toliau siūloma, kad tokia temperatūra *galėtų* būti susijusi su gravitonų spinduliuote, o ne įprastu dalelių spinduliavimu. Tai būsimas klausimas, o ne šio straipsnio rezultatas. Pirmiausia teoriją reikėtų kvantuoti, kad būtų galima nustatyti, ar jos temperatūros apskritai atitinka kokią nors spinduliuotę.

Ko tai neįrodo

- Tai **neparodo** stebėjimais, kad gravitacija atsiranda iš entropijos.
- Tai **nenustato**, kad modelio efektyvusis narys yra kosmologijoje išmatuota tamsioji energija.
- Tai **nepakeičia** bendrosios reliatyvumo teorijos išbandyta ir geresne teorija. Bendroji reliatyvumo teorija čia pasirodo kaip pasiūlymo mažos energijos ir mažo kreivumo riba.
- Tai **nepadaro** Friedmanno kosmologijų tiksliais GfE sprendiniais. Jos yra aproksimacija, naudojama modelio termodinaminiam elgesiui įvertinti.
- Tai **neišveda** išsamaus mikroskopinio erdvėlaikio laisvės laipsnių skaičiavimo.
- Tai **nepateikia** užbaigtos kvantinės gravitacijos teorijos ir neaptinka gravitonų.
- Tai **nerodo**, kad neigiamos k-temperatūros yra įprasti neigiami termometro rodmenys.

Kiek tvirtas yra rezultatas?

Tai recenzuotas teorinis straipsnis, todėl „įrodymai“ čia reiškia ką kita nei eksperimente. Tinkami klausimai yra: ar apibrėžimai nuoseklūs, ar išvedimai logiškai seka ir ar aproksimacijos aiškiai nurodytos bei kontroliuojamos.

Šiuo lygmeniu straipsnis pateikia konkretų termodinaminį GfE žodyną ir išveda pirmojo dėsnio struktūrą, o ne vien remiasi analogija. Jis taip pat neįprastai aiškiai parodo aproksimacijos ribą: Friedmanno sprendiniai pasiskolinami iš bendrosios reliatyvumo teorijos, įstatomi į GfE dydžius ir apri-

bojami režimu, kuriame indukuota metrika išlieka gerai apibrėžta.

Didesni fizikiniai teiginiai lieka atviri. Sistema nauja, šiame straipsnyje jos kosmologija nelyginama su duomenimis, o kai kurios įdomiausios pasekmės — kvantavimas, kontaktinė geometrinė dinamika ir galima gravitonų spinduliuotė — pateikiamos kaip būsimo darbo kryptys. Vidinis nuoseklumas naujai gravitacijos teorijai yra būtinas. Tačiau jo nepakanka parodyti, kad teorija aprašo gamtą.

Kodėl tai svarbu

Gravitacijos ir termodinamikos ryšys senas ir gilus — nuo juodųjų skylių entropijos iki de Sitterio erdvės temperatūros. Daugelis šių rezultatų susiję su horizontais. GfE vietoj to bando sukurti vietinį, tūrinį informacijos matą tiesiogiai iš materijos ir geometrijos santykio.

Ar šis pasiūlymas išliks, tebėra atviras klausimas. Tačiau termodinaminis skaičiavimas išryškina naudingą tikslą bet kuriai tokiai teorijai: ji turėtų paaiškinti, kaip vietinė struktūra ir mažėjantis vietinis entropijos tankis gali egzistuoti kartu su didėjančia bendra entropija besiplečiančioje Visatoje.

Šis straipsnis parodo vieną matematiškai aiškų būdą, kaip tai gali nutikti. Jo vertė nėra ta, kad užbaigia gravitacijos ir entropijos problemą. Jis dalį šios problemos paverčia lygtimis, kurių prielaidas, ribas ir kitus bandymus galima aiškiai įvardyti.

Trumpa santrauka

Bianconi išveda termodinaminį aprašą Gravity From Entropy sistemoje — pasiūlytame modifikuotos gravitacijos modelyje, paremtame geometrine kvantine reliatyviąja entropija. Modelio vietiniai entropijos, energijos, temperatūros ir slėgio kintamieji tenkina pirmąjį dėsnį. Kai visi GfE dydžiai įvertinami mažos energijos ir mažo kreivumo Friedmanno aproksimacijose, Visatai plečiantis vietiniai entropijos ir energijos tankiai mažėja, o bendra entropija didėja dėl augančio erdvėlaikio tūrio; materijos ir spinduliuotės dominuojamuose pavyzdžiuose bendra energija pirmąja eile artėja prie konstantos. De Sitterio priežastiniame deimante entropija skaluoja kaip H^{-2}, tačiau modelio temperatūra skiriasi nuo standartinės horizonto temperatūros. Tai sąlyginiai matematiniai rezultatai GfE viduje, o ne stebėjimų įrodymas, kad gravitacija kyla iš entropijos, tamsiosios energijos matavimas ar užbaigta kvantinės gravitacijos teorija.

Šaltiniai

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