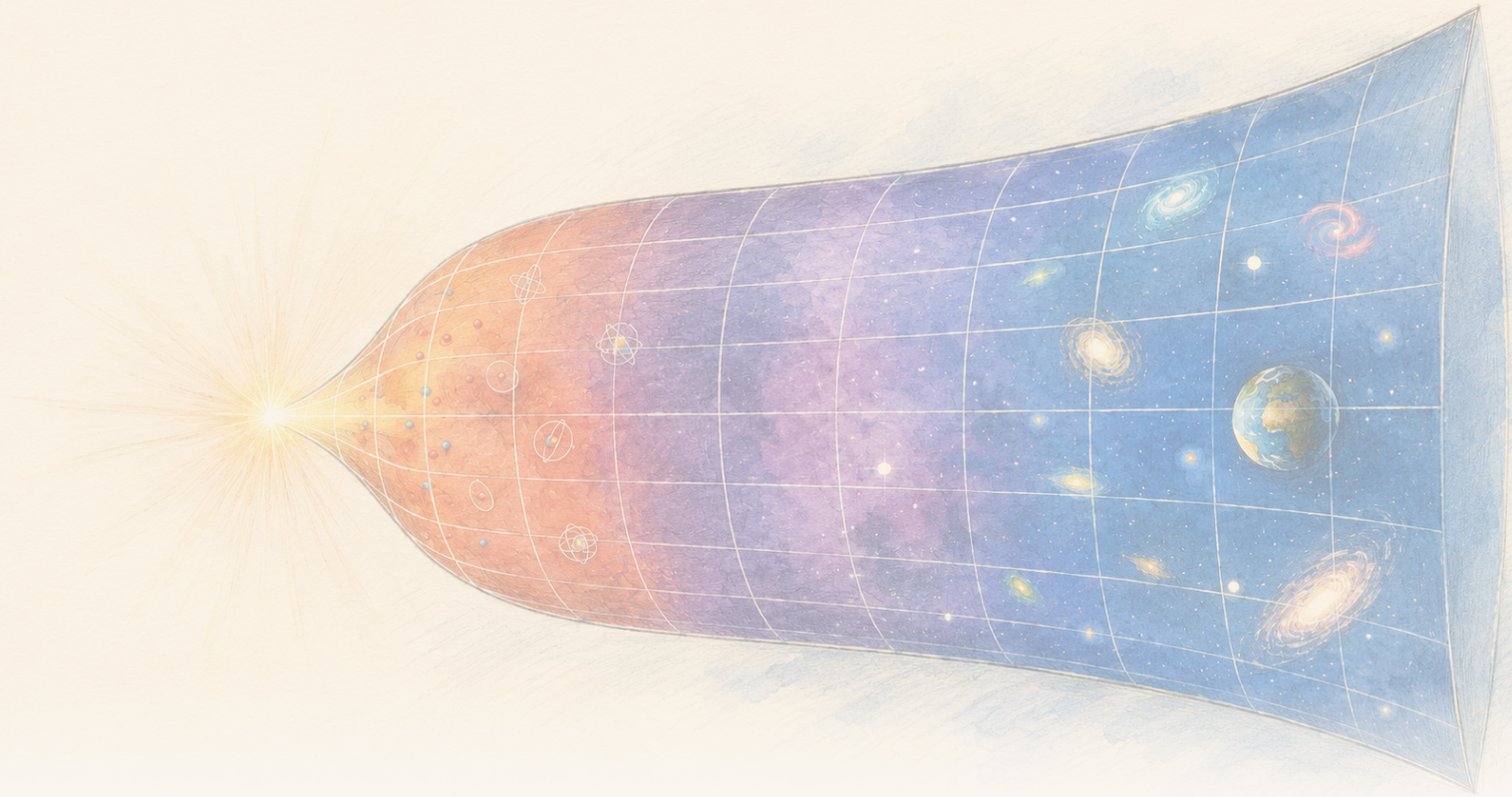

The Clean Paper

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

Entroopial põhineva gravitatsioonimudeli sees langeb lokaalne entroopiatihedus, samal ajal kui koguhulk kasvab

Physical Review D artikkel tuletab temperatuurid, rõhud ja esimese seaduse Gravity From Entropy raamistiku sees, mis on pakutud modifitseeritud gravitatsiooniteooria. Hilise aja ja väikese kõveruse Friedmanni lähenduses langevad mudeli lokaalne entroopia- ja energiatihedus, samal ajal kui paisumine kasvatab kogu entroopiat. Arvutus on sisemiselt konkreetne, kuid tingimuslik: Friedmanni kosmoloogiad ei ole täieliku teooria täpsed lahendid ning see pole vaatlustõend, et gravitatsioon tuleb entroopiast, mõõdetud tumeenergia seletus ega valmis kvantgravitatsiooniteooria.

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

Kasvav ruumala võib vähendada tihedust, samal ajal kui koguhulk suureneb

Kui selle mudeli entroopiatihedus universumi paisudes väheneb, kuidas saab selle kogu entroopia siiski suureneda?

Kujutage ette paisuvat universumit, mis on jagatud tillukesteks rakkudeks. Millegi hulk igas rakus võib väheneda isegi siis, kui koguhulk kogu kasvavas piirkonnas suureneb. Tiheduse langus ja koguhulga kasv ei ole vastandid, kui ruumala ise muutub.

See lihtne arvutuslik küsimus on palju ambitsioonikama teoreetilise artikli lähtekoht. Ajakirjas Physical Review D arendab matemaatiline füüsik Ginestra Bianconi termodünaamilise kirjelduse mudelile **Gravity From Entropy** (GfE), hiljuti pakutud raamistikule, milles gravitatsioon kodeeritakse informatsiooniteoreetilise seose kaudu aine ja geomeetria vahel. „Informatsiooniteoreetiline" tähendab siin, et mudel alustab matemaatilisest mõõdust, mis kirjeldab, kui erinevad on kaks geomeetria kirjeldust: füüsiline geomeetria ning aine ja kõveruse poolt indutseeritud geomeetria.

Artikkel tuletab lokaalsed suurused nimega k-entroopiad, k-energiad, k-temperatuurid ja k-rõhud. Eesliide k eristab mudeli eri geomeetrilisi sektoreid; need ei ole eri ained ega kosmilised ajastud. Nende esimese seaduse seos on sama matemaatilise kujuga nagu termodünaamikas: energia muutus on seotud temperatuuri ja entroopia muutuse korrutisega, millest lahutatakse rõhu ja ruumala muutuse korrutis.

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

Seejärel hindab artikkel neid suurusi paisuvates Friedmanni kosmoloogiates: standardsetes idealiseeritud universumites, mis on suures skaalas homogeensed ja isotroopsed. Madala energia ja väikese kõveruse režiimis on aine- ja kiirgusdomineeritud näidetes lokaalne entroopia- ja energiatihedus kahanev, kuid paisumine annab piisavalt ruumala, et kogu entroopia suureneks. Koguenergia läheneb juhtivas järgus konstandile — see tähendab, et alles hoitakse suure aja dominantne liige ja jäetakse kõrvale liikmed, mis aja kasvades kiiremini hääbuvad.

See on puhas matemaatiline tulemus. Sama oluline on selle piir: arvutus tehakse **ühe pakutud teoori sees** ning konkreetsete näidetena kasutatud Friedmanni kosmoloogiad on GfE täielike võrrandite ainult **ligikaudsed**, mitte täpsed lahendid. Need liikumisvõrrandid saadakse pakutud GfE mõju varieerimisel ning need sisaldavad dünaamilist G-välja ja kõrgema järgu geomeetrilisi sektoreid, mis tavalistes Friedmanni võrrandites puuduvad. Artikkel ei vaatle, kuidas entroopia tekitab gravitatsiooni, ei tuvasta meie universumi tumeenergiat ega lõpeta kvantgravitatsiooni teooriat.

Mida Gravity From Entropy eeldab

Üldrelatiivsusteooria kirjeldab gravitatsiooni aegruumi geomeetria kaudu. Aine ütleb aegruumile, kuidas kõverduda, ja kõverus ütleb ainele, kuidas liikuda. GfE alustab teistsugusest pakutud

mõjust: see käsitleb meetrikaga seotud objekte kvantoperaatoritena ja ehitab Lagrange'i funktsiooni **geomeetrilisest kvantsuhtelisest entroopiast** (Geometric Quantum Relative Entropy, GQRE).

Kolm mõistet 120 sekundiga

Kvantoperaator on matemaatiline reegel, mis toimib kvantolekule ja esindab mingit suurust või teisendust. GfE eeldab, et selle meetrikaga seotud objekte saab sel viisil käsitleda; artikkel ei eelda lugejalt selle konstruktsiooni taastamist.
Lagrange'i funktsioon on teooria dünaamika kompaktne matemaatiline retsept. Selle integreerimisel üle aegruumi saadakse mõju ning mõju varieerimisel väljavõrrandid.
GQRE on GfE mudelispetsiifiline Lagrange'i funktsioon. See kohandab kvantsuhtelise entroopia ideed, et võrrelda füüsilist meetrikat aine ja kõveruse indutseeritud kõrgema järgu meetrikaga. Selle nimetamine entroopiaks ei tee sellest tavalist soojusentroopiat.

Suhteline entroopia on tavaliselt kahe tõenäosusjaotuse või kvantoleku eristatavuse mõõt. GfE-s võrreldakse füüsilist meetrikat aine ja kõveruse indutseeritud kõrgema järgu meetrikaga. „Kõrgema järgu" ei tähenda täiendavaid aegruumimõõtmeid. See tähendab, et mudel ühendab skalaarsed, vektori tüüpi ja bivektori tüüpi geomeetrilised sektorid üheks laiendatud objektiks. Dünaamiline **G-väli** seob neid komponente ja „riietab" meetrika, mida kasutatakse nii gravitatsiooni- kui ka aineosas. Raamistik on konstrueeritud nii, et madala energia ja väikese kõveruse piiril taandub selle mõju üldrelatiivsusteooria Einstein–Hilberti mõjuks pluss aine mõjuks.

Viimast lauset on lihtne üle lugeda. Einsteini võrrandite taastamine mingis piiris on ettepaneku kooskõlalisuse siht. See ei näita, et loodus kasutab suuremat teooriat väljaspool seda piiri.

GfE väljavõrrandid sisaldavad ka dünaamilist liiget, mida raamistik nimetab **esilekerkivaks efektiivseks tumeenergia liikmeks**. Selles artiklis samastab Bianconi mudeli siseenergia tiheduse selle liikmega. „Efektiivne tumeenergia" kirjeldab selle rolli võrrandites. See ei ole empiiriline samastamine kosmoloogilistest vaatlustest tuletatud tumeenergiaga.

Sõna „entroopia" kolm erinevat kasutust

Tavaline termodünaamiline entroopia loendab, kui palju mikroskoopilisi konfiguratsioone võib anda sama makroskoopilise oleku. **Kvantsuhteline entroopia** mõõdab, kui eristatavad on kaks kvantolekut. Selle artikli **GQRE** on suhtelisest entroopiast inspireeritud mudelispetsiifiline geomeetriline konstruktsioon, mida kasutatakse gravitatsiooni Lagrange'i funktsioonina. Sarnased nimed ei tee neist suurustest sama asja; artikkel tuletab GfE sees seosed, mida ta kasutab.

Täpne termodünaamiline tulemus mudeli sees

Artikkel töötab kõigepealt GfE raamistiku enda tasandil. Iga geomeetrilise vabadusastme järgu ja tüübi jaoks, mida indekseerib k, defineerib see:

- lokaalse k-entroopia GQRE-st;
- lokaalse k-energia mudeli siseenergia tihedusest;
- konjugeeritud k-temperatuuri;
- ning k-rõhu.

Need suurused rahuldavad lokaalset esimest seadust. Artikli tähistuses

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

Indeks k ei loenda eri aineid ega universumi ajastuid. Homogeenses ja isotroopses arvutuses tähistab see viit komponenti: üht skalaarset komponenti; eraldi ajalist ja ruumilist komponenti vektori tüüpi sektoris; ning eraldi aeg–ruum ja ruum–ruum komponenti bivektori tüüpi sektoris. Skalaaril pole suunaindeksit, vektori tüüpi komponendid eristavad ajalist ja ruumilist suunda ning bivektor moodustatakse suunapaaridest. Igal sektoril võib olla oma temperatuur ja rõhk. k-temperatuur võib sõltuvalt vastavast G-välja komponendist olla ka positiivne või negatiivne.

Need ei ole temperatuurid, mida mõõdetaks termomeetriga kosmoloogilise horisondi lähedal. Standardne de Sitteri kvantvälja temperatuur skaleerub H-ga: **Gibbons–Hawkingi temperatuur** omistatakse kosmoloogilisele horisondile, samal ajal kui **Bunch–Daviesi vaakum** on standardne de Sitteri invariantne kvantolek, mille väljakorrelatsioonid annavad seotud termilise vastuse. Artikkel eristab mõlemat selgesõnaliselt oma geomeetrilistest k-temperatuuridest, mis de Sitteri näites skaleeruvad H^2-ga. Siin nimetab „temperatuur” mudeli entroopia- ja energiamääratlustest tuletatud termodünaamilist konjugeeritud muutujat.

Seega on esimese seaduse identiteet päriselt tuletatud, kuid tulemus kehtib **GfE enda eelduste piires**: kui võtta omaks mudeli mõju ja definitsioonid, järgneb neist termodünaamiline struktuur.

Miks Friedmanni arvutus on ligikaudne

Formalismi kosmoloogiliseks näiteks muutmiseks kasutab artikkel homogeenseid ja isotroopseid Friedmanni–Robertsoni–Walkeri (FRW) aegruume. „Homogeenne” tähendab, et suures skaalas on mudeli keskmised omadused igas asukohas samad; „isotroopne” tähendab, et see näeb igas suunas ühesugune välja. Üks mastaabitegur kirjeldab kauguste kasvamist ajas, ainet esindatakse sujuva ideaalse vedelikuna ning Hubble’i parameeter H võtab paisumiskiiruse kokku. See on idealiseeritud taust, mitte üksikute galaktikate kaart.

Kuid siin on struktuurne sobimatus. Friedmanni universumid lahendavad Einsteini võrrandeid. Üldiselt ei lahenda need täielikke kõrgema järgu GfE võrrandeid, mis jälgivad lisaks skalaarse, vektori tüüpi ja bivektori tüüpi sektori suurusi ning G-välja tuletisi. Einsteini võrrandid ilmuvad ettepanekus uuesti ainult esimese järgu, madala energia ja väikese kõveruse piiril.

Artikkel ütleb seda otse ja käsitleb Friedmanni lahendeid lähendustena, võrreldes lähenemist keskvälja lahendi sisestamisega täielikumasse teooriasse, et kontrollida, kus lähendus jääb usaldusväärseks. Režiim nõuab madalat energiat ja väikest kõverust, mida võtab kokku $l_P H \ll 1$, kus

l_P on Plancki pikkus. Teine tingimus nõuab, et indutseeritud kõrgema järgu meetrika ja füüsilise kõrgema järgu meetrika pöördmaatriksi korrutis jääks positiivselt määratuks.

Seega ei ole tulemus „GfE ennustab meie universumi ajalugu". See on pigem: **kui GfE universumit saab piisavalt hästi lähendada tuttava Friedmanni kosmoloogiaga, annavad täielikud GfE suurused järgmised termodünaamilised skaleerumised.**

Lokaalne versus kogutulemus

Selles režiimis on juhtivate lokaalsete suuruste skaleerumine lihtne:

- mudeli entroopiatihedus skaleerub kui H^2;
- mudeli energiatihedus skaleerub kui H^4;
- hilistel aegadel muutuvad need mitte-de-Sitteri Friedmanni näidetes ligikaudu t^{-2} ja t^{-4}.

Mõlemad tihedused vähenevad seega universumi paisudes. Kuid tihedus ei ole koguhulk.

Kui artikkel integreerib üle paisuva aegruumipiirkonna, muudab kasvav ruumala vastust. Füüsikaliselt tuttavates aine- ja kiirgusdomineeritud näidetes suureneb kogu entroopia ajas, isegi kui entroopia ruumalaühiku kohta väheneb. Koguenergia ei kasva lõputult; juhtivas järgus läheneb see konstandile.

See on artikli kõige kasulikum kontseptuaalne tulemus. Lokaalne korrastumine või lahjenemine ei pea globaalse teise seadusega automaatselt vastuollu minema. Piirkonna entroopia ruumalaühiku kohta võib lokaalselt väheneda, samal ajal kui integreeritud entroopia suureneb, sest aegruumi ruumala kasvab kiiremini.

Arvutus ei tõesta, et see on päris universumi termodünaamilise ajanoole õige mikroskoopiline seletus. See näitab, et pakutud raamistik saab Friedmanni lähenduses lokaalse ja globaalse erinevuse vastuoluta mahutada.

De Sitteri võrdlus, kuid teistsuguse temperatuuriga

Artikkel käsitleb ka de Sitteri ruumi, idealiseeritud eksponentsiaalselt paisuvat aegruumi konstantse H-ga. Ühe vaatleja jaoks integreerib see ainult üle lõpliku **põhjusliku teemandi**: varasema sündmuse tulevase valguskoonuse ja hilisema sündmuse mineviku valguskoonuse ühisosa, mis piirab aegruumipiirkonna, mis saab nende vahel vaatlustes osaleda. Selle teemandi üle skaleerub kogu GfE entroopia kui H^{-2}, sama H-sõltuvusega nagu tuttav Gibbons–Hawkingi entroopia. Kogu GfE energia on mudeli ühikutes suurusjärgus üks.

Üks kosmoloogiliste taustade perekond

FRW on homogeensete ja isotroopsete geomeetriate perekond, mitte üks eraldi koht. Aine- ja kiirgusdomineeritud universumid on FRW juhud, mida eristab see, mis mudelit täidab. Ka de Sitteri ruumi saab kirjutada FRW kujul, kuid see esindab vaakumdomineeritud juhtu konstantse H ja eksponentsiaalse paisumisega. Põhjuslik teemant on selle aegruumi sees ühe vaatleja jaoks valitud lõplik piirkond; see pole teist liiki universum.

Skaleerumise kokkulangevus ei ole sama mis sama füüsikalise objekti tuletamine. Seotud GfE k-temperatuur skaleerub kui H^2, erinevalt standardsest de Sitteri temperatuurist, mis skaleerub H-ga. Artikkel tõlgendab seda erinevust märgina, et k-temperatuur kuulub aegruumi geomeetriale, mitte sellel taustal elavatele kvantväljadele.

Seejärel pakub see, et selline temperatuur *võiks* olla seotud gravitonkiirguse, mitte tavalise osakeste emissiooniga. See on tulevane küsimus, mitte käesoleva artikli tulemus. Kõigepealt tuleks teooria kvantida, et üldse näidata, kas selle temperatuurid vastavad mingile kiirgusele.

Mida see ei tõesta

- See **ei näita vaatluslikult**, et gravitatsioon tekib entroopiast.
- See **ei tõesta**, et mudeli efektiivne liige on kosmoloogias mõõdetav tumeenergia.
- See **ei asenda** üldrelatiivsusteooriat testitud parema teooriaga. Üldrelatiivsusteooria ilmub siin ettepaneku madala energia ja väikese kõveruse piirina.
- See **ei muuda** Friedmanni kosmoloogiaid GfE täpseteks lahenditeks. Neid kasutatakse mudeli termodünaamilise käitumise hindamise lähendusena.
- See **ei tuleta** aegruumi vabadusastmete täielikku mikroskoopilist loendust.
- See **ei paku** valmis kvantgravitatsiooniteooriat ega tuvasta gravitone.
- See **ei näita**, et negatiivsed k-temperatuurid on tavalised negatiivsed termomeetrinäidud.

Kui tugev on tulemus?

See on eelretsenseeritud teoreetiline artikkel, seega tähendab „tõend” siin midagi muud kui eksperimendis. Õiged küsimused on, kas definitsioonid on kooskõlalised, kas tuletused järgnevad ning kas lähendused on selgelt välja öeldud ja kontrollitud.

Sellel tasandil annab artikkel GfE-le konkreetse termodünaamilise sõnastiku ja tuletab esimese seaduse struktuuri, mitte ei toetu ainult analoogiale. Samuti muudab see lähenduse piiri ebatavaliselt nähtavaks: Friedmanni lahendid laenatakse üldrelatiivsusteooriast, sisestatakse GfE suurustesse ning piiratakse režiimiga, kus indutseeritud meetrika jääb hästi käituvaks.

Suuremad füüsikalised väited jäävad avatuks. Raamistik on uus, selles artiklis ei võrrelda selle kos-

moloogiat andmetega ning mõned kõige huvitavamad tagajärjed — kvantimine, kontaktgeomeetriline dünaamika ja võimalik gravitonkiirgus — esitatakse tulevase töö suundadena. Sisemine kooskõla on uue gravitatsiooniteooria jaoks vajalik. Sellest ei piisa, et näidata, et teooria kirjeldab loodust.

Miks see oluline on

Gravitatsiooni ja termodünaamika seos on vana ja sügav, ulatudes mustade aukude entroopiast de Sitteri ruumi temperatuurini. Paljud neist tulemustest on organiseeritud horisontide ümber. GfE püüab selle asemel ehitada lokaalse, ruumilise informatsioonimõõdu otse aine ja geomeetria seosest.

Kas ettepanek vastu peab, on lahtine küsimus. Kuid termodünaamiline harjutus toob nähtavale kasuliku sihi igale sellisele teooriale: see peaks selgitama, kuidas lokaalne struktuur ja langev lokaalne entroopiatihedus saavad paisuvas universumis koos eksisteerida kasvava kogu entroopiaga.

See artikkel näitab üht matemaatiliselt selgesõnalist viisi, kuidas see saab juhtuda. Selle väärtus ei seisne gravitatsiooni-entroopia probleemi sulgemises. See muudab osa probleemist võrranditeks, mille eeldused, piirid ja järgmised testid saab selgelt sõnastada.

Lühidalt

Bianconi tuletab termodünaamilise kirjelduse Gravity From Entropy raamistiku sees — pakutud modifitseeritud gravitatsiooni mudelis, mis põhineb geomeetrilisel kvantsuhtelisel entroopial. Mudeli lokaalsed entroopia-, energia-, temperatuuri- ja rõhumuutujad rahuldavad esimest seadust. Kui täielikke GfE suurusi hinnatakse madala energia ja väikese kõveruse Friedmanni lähendustel, vähenevad lokaalsed entroopia- ja energiatihedused universumi paisudes, samal ajal kui kogu entroopia kasvab, sest aegruumi ruumala suureneb; aine- ja kiirgusdomineeritud näidetes läheneb koguenergia juhtivas järgus konstandile. De Sitteri põhjuslik teemant annab entroopia skaleerumise H^{-2}, kuid mudelitemperatuuri, mis erineb standardsest horisonditemperatuurist. Need on tingimuslikud matemaatilised tulemused GfE sees, mitte vaatlustõend, et gravitatsioon tuleb entroopiast, tumeenergia mõõtmine ega lõpetatud kvantgravitatsiooniteooria.

Allikad

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