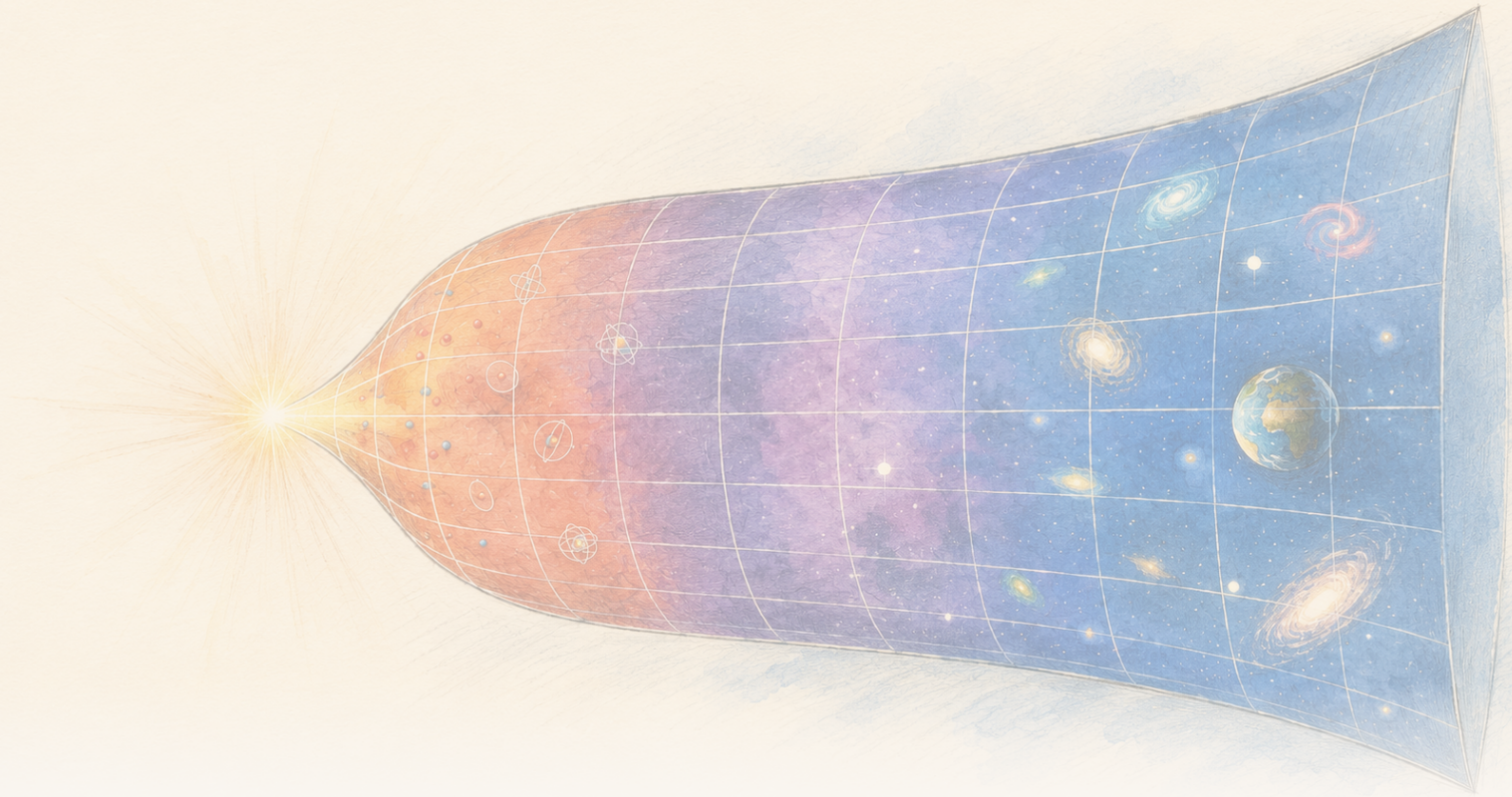

The Clean Paper

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

Entropiaan perustuvan gravitaatiomallin sisällä paikallinen entropiatiheys pienenee samalla kun kokonaisentropia kasvaa

Physical Review D -artikkeli johtaa Gravity From Entropy -mallin, ehdotetun muokatun gravitaation kehyksen, sisäiset lämpötilat, paineet ja ensimmäisen lain. Myöhäisen ajan, pienen kaarevuuden Friedmann-approksimaatiossa mallin paikalliset entropia- ja energiatiheydet pienenevät, mutta laajeneminen saa kokonaisentropian kasvamaan. Laskelma on sisäisesti konkreettinen mutta ehdollinen: Friedmann-kosmologiat eivät ole täydellisen teorian eksakteja ratkaisuja, eikä kyse ole havaintonäytöstä gravitaation syntymisestä entropiasta, mitatun pimeän energian selityksestä tai valmiista kvanttigravitaatioteoriasta.

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

Kasvava tilavuus voi pienentää tiheyttä samalla kun kokonaismäärä kasvaa

Jos tämän mallin entropiatiheys pienenee maailmankaikkeuden laajentuessa, miten kokonaisentropia voi silti kasvaa?

Kuvittele laajeneva maailmankaikkeus, joka on jaettu pieniin soluihin. Jonkin suureen määrä jokaisessa solussa voi pienentyä samalla kun sen kokonaismäärä koko kasvavalla alueella kasvaa. Tiheyden pieneneminen ja kokonaismäärän kasvu eivät ole vastakohtia, jos itse tilavuus muuttuu.

Tämä yksinkertainen laskennallinen kysymys on paljon kunnianhimoisemman teoreettisen artikkelin ytimessä. Physical Review D -lehdessä matemaattinen fyysikko Ginestra Bianconi kehittää termodynaamisen kuvauksen **Gravity From Entropy** -mallille (GfE), äskettäin ehdotetulle mallille, jossa gravitaatio koodataan aineen ja geometrian väliseen informaatioteoreettiseen suhteeseen. Tässä ”informaatioteoreettinen” tarkoittaa, että malli lähtee matemaattisesta mitasta sille, kuinka paljon kaksi geometrian kuvausta eroavat: fysikaalinen geometria ja aineen sekä kaarevuuden indusoima geometria.

Artikkeli johtaa paikallisia suureita nimeltä k-entropiat, k-energiat, k-lämpötilat ja k-paineet. Etuliite k erottaa mallin eri geometriset sektorit; ne eivät ole eri aineita tai kosmisia aikakausia. Niiden ensimmäisen lain suhde on kirjanpidoltaan samaa muotoa kuin termodynamiikassa: energian muutos liittyy lämpötilaan kertaa entropian muutos miinus paine kertaa tilavuuden muutos.

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

Artikkeli arvioi nämä suureet sitten laajenevissa Friedmann-kosmologioissa: standardoiduissa idealisoiduissa maailmankaikkeuksissa, jotka ovat suurilla mittakaavoilla homogeenisia ja isotrooppisia. Matalan energian ja pienen kaarevuuden alueella aine- ja säteilyvaltaisten esimerkkien paikalliset entropia- ja energiatiheydet pienenevät, mutta laajeneminen kasvattaa tilavuutta riittävästi, jotta kokonaisentropia kasvaa. Kokonaisenergia lähestyy johtavassa kertaluvussa vakiota, eli kun pidetään mukana pitkien aikojen hallitseva termi ja jätetään pois ajan myötä nopeammin häviävät termit.

Se on selkeä matemaattinen tulos. Sen raja on yhtä tärkeä: laskelma tehdään **yhden ehdotetun teorian sisällä**, ja konkreettisissa esimerkeissä käytetyt Friedmann-kosmologiat ovat vain **likimääräisiä**, eivät GfE:n täydellisten yhtälöiden eksakteja ratkaisuja. Nämä liikeyhtälöt saadaan varioimalla ehdotettua GfE-vaikutusta, ja niihin sisältyvät dynaaminen G-kenttä sekä korkeamman kertaluvun geometriset sektorit, joita tavallisissa Friedmann-yhtälöissä ei ole. Artikkeli ei havaitse entropian synnyttävän gravitaatiota, tunnista oman maailmankaikkeutemme pimeää energiaa eikä viimeistele kvanttigravitaation teoriaa.

Mitä Gravity From Entropy olettaa

Yleinen suhteellisuusteoria kuvaa gravitaatiota aika-avaruuden geometrian kautta. Aine kertoo aika-avaruudelle, miten kaartua, ja kaarevuus kertoo aineelle, miten liikkua. GfE lähtee toisenlaisesta ehdotetusta vaikutuksesta: metriikkaan liittyviä olioita käsitellään kvanttioperaattoreina, ja Lagrangen tiheys rakennetaan **geometrisesta kvanttisuhteellisesta entropiasta** (Geometric Quantum Relative Entropy, GQRE).

Kolme termiä 120 sekunnissa

Kvanttioperaattori on matemaattinen sääntö, joka vaikuttaa kvanttitilaan ja edustaa suuretta tai muunnosta. GfE olettaa, että metriikkaan liittyviä olioita voidaan käsitellä näin; artikkeli ei edellytä lukijalta tämän konstruktion toistamista.
Lagrangen tiheys on tiivis matemaattinen resepti teorian dynamiikalle. Kun se integroidaan aika-avaruuden yli, saadaan vaikutus, jonka variaatiosta johdetaan kenttäyhtälöt.
GQRE on GfE:n valitsema mallikohtainen Lagrangen tiheys. Se soveltaa kvanttisuhteellisen entropian ideaa vertaamaan fysikaalista metriikkaa aineen ja kaarevuuden indusoimaan korkeamman kertaluvun metriikkaan. Se, että sitä kutsutaan entropiaksi, ei tee siitä tavallista lämpöentropiaa.

Suhteellinen entropia on tavallisesti kahden todennäköisyysjakauman tai kvanttitilan erotettavuuden mitta. GfE:ssä vertailu tehdään fysikaalisen metriikan ja aineen sekä kaarevuuden indusoiman korkeamman kertaluvun metriikan välillä. ”Korkeamman kertaluvun” ei tarkoita ylimääräisiä aika-avaruuden ulottuvuuksia. Se tarkoittaa, että malli pakkaa skalaari-, vektorityyppiset ja bivektorityyppiset geometriset sektorit yhteen laajennettuun olioon. Dynaaminen **G-kenttä** yhdistää nämä komponentit ja ”pukee” sekä gravitaatio- että aineosan käyttämän metriikan. Kehys on rakennettu niin, että matalan energian ja pienen kaarevuuden rajassa sen vaikutus pelkistyy yleisen suhteellisuusteorian Einstein–Hilbert-vaikutukseksi plus aineen vaikutukseksi.

Viimeinen lause on helppo lukea liian pitkälle. Einsteinin yhtälöiden palauttaminen tietyssä rajassa on ehdotuksen johdonmukaisuustavoite. Se ei osoita, että luonto käyttää laajempaa teoriaa tämän rajan ulkopuolella.

GfE:n kenttäyhtälöissä on myös dynaaminen termi, jota kehys kutsuu **emergentiksi efektiiviseksi pimeän energian termiksi**. Tässä artikkelissa Bianconi samaistaa mallin sisäisen energiatiheyden tähän termiin. ”Efektiivinen pimeä energia” kuvaa sen roolia yhtälöissä. Se ei ole empiirinen samaistus kosmologisista havainnoista pääteltyyn pimeään energiaan.

Sanalle ”entropia” on tässä kolme eri käyttöä

Tavallinen termodynaaminen entropia mittaa, kuinka monta mikroskooppista järjestystä voi tuottaa saman makroskooppisen tilan. **Kvanttisuhteellinen entropia** mittaa kahden kvanttitilan erotettavuutta. Tämän artikkelin **GQRE** on suhteellisesta entropiasta inspiroitunut mallikohtainen geometrinen konstruktio, jota käytetään gravitaation Lagrangen tiheytenä.

> Samankaltaiset nimet eivät tee suureista keskenään vaihdettavia; artikkeli johtaa käyttämänsä yhteydet GfE:n sisällä.

Mallin sisäinen eksakti termodynaaminen tulos

Artikkeli työskentelee ensin itse GfE-kehyksen tasolla. Kullekin geometrisen vapausasteen kertaluvulle ja tyypille, indeksinä k, se määrittelee:

- paikallisen k-entropian GQRE:stä;
- paikallisen k-energian mallin sisäisen energiatiheyden avulla;
- siihen konjugoidun k-lämpötilan;
- sekä k-paineen.

Nämä suureet noudattavat paikallista ensimmäistä lakia. Artikkelin merkinnöillä,

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

Indeksi k ei ole luettelo erilaisista aineista tai maailmankaikkeuden aikakausista. Homogeenisessa ja isotrooppisessa laskelmassa se nimeää viisi komponenttia: yhden skalaarikomponentin; erilliset ajan- ja avaruudenkaltaiset komponentit vektorityyppisestä sektorista; sekä erilliset aika–avaruus- ja avaruus–avaruus-komponentit bivektorityyppisestä sektorista. Skalaarilla ei ole suuntaindeksiä, vektorityyppiset komponentit erottavat aika- ja avaruussuunnat, ja bivektori rakentuu suuntapareista. Jokaisella sektorilla voi olla oma lämpötila ja paine. k-lämpötila voi olla myös positiivinen tai negatiivinen vastaavan G-kentän komponentin mukaan.

Nämä eivät ole lämpötiloja, jotka mitattaisiin viemällä lämpömittari kosmologisen horisontin lähelle. Standardi de Sitterin kvanttikenttälämpötila skaalautuu H:n mukaan: **Gibbons–Hawking-lämpötila** liitetään kosmologiseen horisonttiin, kun taas **Bunch–Davies-vakuumi** on tavallinen de Sitter -invariantti kvanttitila, jonka kenttäkorrelaatiot tuottavat siihen liittyvän termisen vasteen. Artikkeli erottaa molemmat nimenomaisesti geometrisista k-lämpötiloistaan, jotka de Sitter -esimerkissä skaalautuvat H^2:n mukaan. Tässä ”lämpötila” on mallin entropia- ja energiamääritelmistä johdettu termodynaaminen konjugaattimuuttuja.

Ensimmäisen lain identiteetti on siis aidosti johdettu tulos, mutta se seuraa **mallin omista oletuksista**: kun GfE:n vaikutus ja määritelmät hyväksytään, termodynaaminen rakenne seuraa.

Miksi Friedmann-laskelma on approksimaatio

Formalismin muuttamiseksi kosmologiseksi esimerkiksi artikkeli käyttää homogeenisia ja isotrooppisia Friedmann–Robertson–Walker-aika-avaruuksia (FRW). ”Homogeeninen” tarkoittaa, että

suurten mittakaavojen mallissa keskimääräiset ominaisuudet ovat samat kaikkialla; ”isotrooppinen” tarkoittaa, että malli näyttää samalta kaikkiin suuntiin. Yksi skaalaustekijä kuvaa etäisyyksien kasvua ajan mukana, aine esitetään tasaisena ideaalifluidina ja Hubble-parametri H tiivistää laajenemisnopeuden. Tämä on idealisoitu tausta, ei yksittäisten galaksien kartta.

Rakenteellinen ristiriita kuitenkin jää. Friedmann-maailmankaikkeudet ratkaisevat Einsteinin yhtälöt. Ne eivät yleensä ratkaise täydellisiä korkeamman kertaluvun GfE-yhtälöitä, jotka seuraavat myös skalaari-, vektorityyppisiä ja bivektorityyppisiä sektoreita sekä G-kentän derivaattoja. Einsteinin yhtälöt palaavat vasta ehdotuksen ensimmäisen kertaluvun, matalan energian ja pienen kaarevuuden rajassa.

Artikkeli sanoo tämän suoraan ja käsittelee Friedmann-ratkaisuja approksimaatioina, verraten lähestymistapaa keskimääräiskenttäratkaisun sijoittamiseen täydempään teoriaan sen testaamiseksi, missä approksimaatio pysyy luotettavana. Alue edellyttää matalaa energiaa ja pientä kaarevuutta, tiivistettynä ehtoon $l_P H \ll 1$, missä l_P on Planckin pituus. Toinen ehto vaatii indusoidun korkeamman kertaluvun metriikan ja fysikaalisen korkeamman kertaluvun käänteismetriikan tulon pysyvän positiividefiniittisenä.

Tulos ei siis ole ”GfE ennustaa maailmankaikkeutemme historian”. Se on lähempänä väitettä: **jos GfE-maailmankaikkeutta voidaan riittävän hyvin approksimoida tutulla Friedmann-kosmologialla, täydet GfE-suureet tuottavat nämä termodynaamiset skaalaukset.**

Paikallisen ja kokonaismäärän välinen tulos

Tällä alueella johtavilla paikallisilla suureilla on yksinkertaiset skaalaukset:

- mallin entropiatiheys skaalautuu muodossa H^2;
- mallin energiatiheys skaalautuu muodossa H^4;
- ei-de-Sitterisissä Friedmann-esimerkeissä myöhäisinä aikoina nämä ovat likimäärin t^{-2} ja t^{-4}.

Molemmat tiheydet siis pienenevät maailmankaikkeuden laajentuessa. Tiheys ei kuitenkaan ole kokonaismäärä.

Kun artikkeli integroi kasvavan aika-avaruusalueen yli, tilavuuden kasvu muuttaa vastauksen. Fysikaalisesti tutuissa aine- ja säteilyvaltaisissa esimerkeissä kokonaisentropia kasvaa ajan myötä, vaikka entropia tilavuusyksikköä kohti pienenee. Kokonaisenergia ei jatka kasvuaan; johtavassa kertaluvussa se lähestyy vakiota.

Tämä on artikkelin hyödyllisin käsitteellinen tulos. Paikallinen järjestyminen tai laimeneminen ei automaattisesti ole ristiriidassa globaalin toisen pääsäännön kanssa. Alueen entropia tilavuusyksikköä kohti voi pienentyä samalla kun integroitu entropia kasvaa, jos aika-avaruuden tilavuus kasvaa nopeammin.

Laskelma ei todista, että tämä olisi oikea mikroskooppinen selitys todellisen maailmankaikkeuden termodynaamisen ajan nuolelle. Se osoittaa, että ehdotettu kehys voi Friedmann-approksimaatiossaan

sovittaa paikallisen ja globaalin käyttäytymisen yhteen ilman ristiriitaa.

De Sitter -vertailu eri lämpötilalla

Artikkeli käsittelee myös de Sitter -avaruutta, idealisoitua eksponentiaalisesti laajenevaa aika-avaruutta, jossa H on vakio. Yhdelle havaitsijalle se integroi vain äärellisen **kausaalisen timantin** yli: aikaisemman tapahtuman tulevaisuuden valokartion ja myöhemmän tapahtuman menneisyyden valokartion leikkaus, joka rajaa aika-avaruusalueen, joka voi osallistua havaintoihin niiden välillä. Tämän timantin yli GfE:n kokonaisentropia skaalautuu muodossa H^{-2}, samoin H-riippuvuuksin kuin tuttu Gibbons–Hawking-entropia. GfE:n kokonaisenergia on mallin yksiköissä suuruusluokkaa yksi.

> **Yksi kosmologisten taustojen perhe**
>
> FRW on homogeenisten ja isotrooppisten geometrioiden perhe, ei yksi ylimääräinen paikka. Ainevaltainen ja säteilyvaltainen maailmankaikkeus ovat FRW-tapauksia, jotka eroavat sillä, mitä mallin sisältö on. De Sitter -avaruus voidaan myös kirjoittaa FRW-muotoon, mutta se kuvaa vakuumivaltaista tapausta, jossa H on vakio ja laajeneminen eksponentiaalista. Kausaalinen timantti on yhden havaitsijan sisälle valittu äärellinen alue tässä aika-avaruudessa; se ei ole toisenlainen maailmankaikkeus.

Saman skaalauksen saaminen ei tarkoita saman fysikaalisen suureen johtamista. GfE:n vastaava k-lämpötila skaalautuu muodossa H^2, toisin kuin standardi de Sitter -lämpötila, joka skaalautuu H:n mukaan. Artikkeli tulkitsee eron näytöksi siitä, että k-lämpötila kuuluu aika-avaruuden geometrialle eikä taustalla eläville kvanttikentille.

Se ehdottaa sitten, että tällainen lämpötila *voisi* liittyä gravitonsäteilyyn tavallisen hiukkasemission sijasta. Tämä on tuleva tutkimuskysymys, ei tämän artikkelin tulos. Teoria pitäisi ensin kvantittaa, jotta voitaisiin osoittaa, vastaavatko sen lämpötilat mitään säteilyä.

Mitä tämä ei todista

- Se **ei** osoita havaintojen perusteella, että gravitaatio syntyy entropiasta.
- Se **ei** osoita, että mallin efektiivinen termi olisi kosmologiassa mitattu pimeä energia.
- Se **ei** korvaa yleistä suhteellisuusteoriaa testatulla paremmalla teorialla. Yleinen suhteellisuusteoria esiintyy tässä ehdotuksen matalan energian ja pienen kaarevuuden rajana.
- Se **ei** tee Friedmann-kosmologioista GfE:n eksakteja ratkaisuja. Niitä käytetään approksimaationa mallin termodynaamisen käyttäytymisen arviointiin.
- Se **ei** johda täydellistä mikroskooppista aika-avaruuden vapausasteiden laskua.
- Se **ei** tarjoa valmista kvanttigravitaatioteoriaa eikä havaitse gravitoneja.
- Se **ei** tarkoita, että negatiiviset k-lämpötilat olisivat tavallisia lämpömittarin negatiivisia lukemia.

Kuinka vahva tulos on?

Tämä on vertaisarvioitu teoreettinen artikkeli, joten ”näyttö” tarkoittaa tässä eri asiaa kuin kokeessa. Oikeat kysymykset ovat, ovatko määritelmät johdonmukaisia, seuraavatko johdannaiset ja onko approksimaatioiden rajat ilmoitettu ja hallittu.

Tällä tasolla artikkeli tarjoaa GfE:lle konkreettisen termodynaamisen sanakirjan ja johtaa ensimmäisen lain rakenteen pelkän analogian sijasta. Se tekee myös approksimaatiorajan poikkeuksellisen näkyväksi: Friedmann-ratkaisut lainataan yleisestä suhteellisuusteoriasta, sijoitetaan GfE-suureisiin ja rajoitetaan alueelle, jossa indusoitu metriikka pysyy hyvin käyttäytyvänä.

Suuremmat fysikaaliset väitteet ovat edelleen avoimia. Kehys on uusi, artikkeli ei vertaa sen kosmologiaa havaintodataan, ja osa kiinnostavimmista seurauksista — kvantittaminen, kontaktigeometrinen dynamiikka ja mahdollinen gravitonsäteily — esitetään tulevan työn suuntina. Sisäinen johdonmukaisuus on uuden gravitaatioteorian välttämätön ehto. Se ei riitä osoittamaan, että teoria kuvaa luontoa.

Miksi sillä on merkitystä

Gravitaation ja termodynamiikan suhde on vanha ja syvä, mustien aukkojen entropiasta de Sitter -avaruuden lämpötilaan. Monet näistä tuloksista rakentuvat horisonttien ympärille. GfE yrittää sen sijaan rakentaa paikallisen, tilavuudellisen informaatiomitan suoraan aineen ja geometrian suhteesta.

Se, selviytyykö ehdotus, on avoin kysymys. Termodynaaminen tarkastelu nostaa kuitenkin esiin hyödyllisen tavoitteen mille tahansa tällaiselle teorialle: sen pitäisi selittää, miten paikallinen rakenne ja pienenevä paikallinen entropiatiheys voivat esiintyä samanaikaisesti kasvavan kokonaisentropian kanssa laajenevassa maailmankaikkeudessa.

Tämä artikkeli näyttää yhden matemaattisesti eksplisiittisen tavan, jolla se voi tapahtua. Sen arvo ei ole gravitaatio–entropia-ongelman sulkeminen. Se muuttaa osan ongelmasta yhtälöiksi, joiden oletukset, rajat ja seuraavat testit voidaan sanoa selkeästi.

Tiivistelmä ilman turhaa koristelua

Bianconi johtaa termodynaamisen kuvauksen Gravity From Entropy -mallin sisällä. Se on ehdotettu muokatun gravitaation kehys, joka perustuu geometriseen kvanttisuhteelliseen entropiaan. Mallin paikalliset entropia-, energia-, lämpötila- ja painemuuttujat noudattavat ensimmäistä lakia. Kun täydet GfE-suureet arvioidaan matalan energian ja pienen kaarevuuden Friedmann-approksimaatioissa, paikalliset entropia- ja energiatiheydet pienenevät maailmankaikkeuden laajetessa, mutta kokonaisentropia kasvaa aika-avaruuden tilavuuden kasvun vuoksi; kokonaisenergia lähestyy aine- ja säteilyvaltaisissa esimerkeissä johtavassa kertaluvussa vakiota. De Sitterin kausaalisessa timantissa entropia skaalautuu H^{-2} mutta mallin lämpötila eroaa standardista horisonttilämpötilasta. Nämä

ovat ehdollisia matemaattisia tuloksia GfE:n sisällä, eivät havaintonäyttöä siitä, että gravitaatio syntyy entropiasta, pimeän energian mittaus tai valmis kvanttigravitaatioteoria.

Lähteet

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