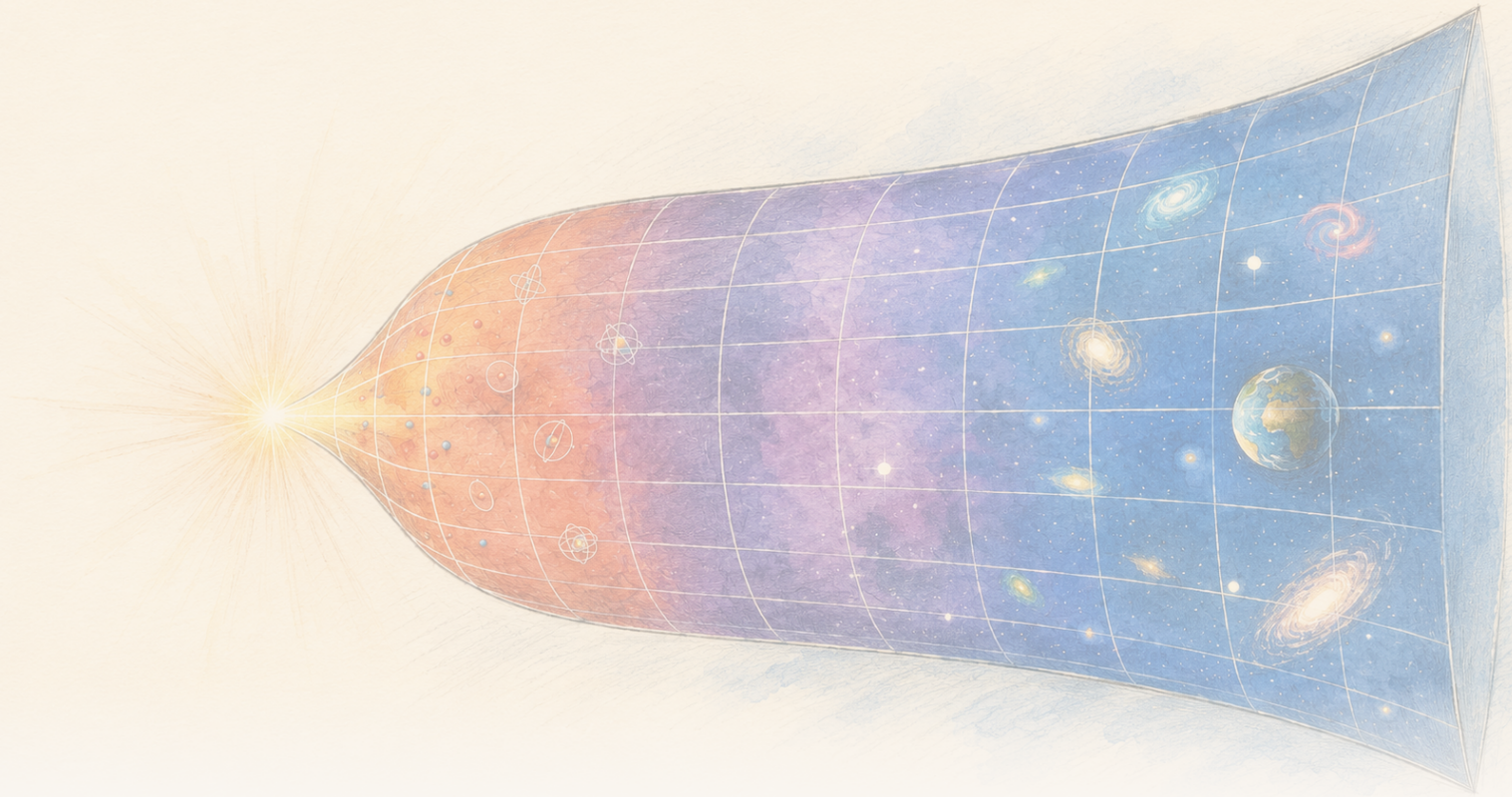

The Clean Paper

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

Binnen een entropiegebaseerd zwaartekrachtmodel daalt de lokale entropiedichtheid terwijl het totaal groeit

Een artikel in Physical Review D leidt temperaturen, drukken en een eerste wet af binnen Gravity From Entropy, een voorgesteld raamwerk voor gemodificeerde zwaartekracht. In een late-tijd-, lage-krommingsbenadering van Friedmann dalen de lokale entropie- en energiedichtheden van het model, terwijl de uitdijing de totale entropie laat stijgen. De berekening is intern concreet maar voorwaardelijk: Friedmannkosmologieën zijn geen exacte oplossingen van de volledige theorie, en dit is geen waarnemingsbewijs dat zwaartekracht uit entropie ontstaat, geen verklaring van gemeten donkere energie en geen voltooide theorie van kwantumzwaartekracht.

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

Een groeiend volume kan een dichtheid verlagen en tegelijk het totaal verhogen

Als in dit model de entropiedichtheid daalt terwijl een universum uitdijt, hoe kan de totale entropie dan toch toenemen?

Stel je een uitdijend universum voor dat is verdeeld in kleine cellen. De hoeveelheid van iets in elke cel kan dalen terwijl de totale hoeveelheid in het groeiende gebied stijgt. Een daling van de dichtheid en een stijging van het totaal zijn geen tegenstellingen wanneer het volume zelf verandert.

Die eenvoudige balansvraag vormt de kern van een veel ambitieuzer theoretisch artikel. In Physical Review D ontwikkelt mathematisch fysicus Ginestra Bianconi een thermodynamische beschrijving van **Gravity From Entropy** (GfE), een recent voorgesteld model waarin zwaartekracht wordt gecodeerd via een informatietheoretische relatie tussen materie en geometrie. „Informatietheoretisch" betekent hier dat het model vertrekt van een wiskundige maat voor het verschil tussen twee beschrijvingen van geometrie: de fysieke geometrie en een geometrie die door materie en kromming wordt geïnduceerd.

Het artikel leidt lokale grootheden af die k-entropieën, k-energieën, k-temperaturen en k-drukken heten. Het voorvoegsel k scheidt verschillende geometrische sectoren in het model; het zijn geen verschillende stoffen of kosmische tijdperken. Hun relatie van de eerste wet heeft dezelfde boekhoudvorm als in de thermodynamica: een verandering in energie hangt samen met een temperatuur maal een verandering in entropie, min een druk maal een verandering in volume.

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

Vervolgens evalueert het artikel die grootheden in uitdijende Friedmannkosmologieën: standaard geïdealiseerde universa die op grote schaal homogeen en isotroop zijn. In een regime van lage energie en geringe kromming hebben de voorbeelden met materie- en stralingsdominantie afnemende lokale entropie- en energiedichtheden, maar levert de uitdijing genoeg volume om de totale entropie te laten toenemen. De totale energie nadert op leidende orde een constante, dus wanneer de dominante term op late tijden wordt behouden en termen die sneller wegvallen worden weggelaten.

Dat is een helder wiskundig resultaat. De grens ervan is even belangrijk: de berekening gebeurt **binnen één voorgestelde theorie**, en de Friedmannkosmologieën die voor de concrete voorbeelden worden gebruikt zijn slechts **benaderde**, geen exacte, oplossingen van de volledige GfE-vergelijkingen. Die bewegingsvergelijkingen volgen uit variatie van de voorgestelde GfE-actie en bevatten het dynamische G-veld en hogere-orde geometrische sectoren die in de gewone Friedmannvergelijkingen ontbreken. Het artikel observeert niet dat entropie zwaartekracht voortbrengt, identificeert niet de donkere energie in ons universum en voltooit geen theorie van kwantumzwaartekracht.

Wat Gravity From Entropy aanneemt

De algemene relativiteit beschrijft zwaartekracht via de geometrie van de ruimtetijd. Materie vertelt de ruimtetijd hoe ze moet krommen, en die kromming vertelt materie hoe ze moet bewegen. GfE vertrekt van een andere voorgestelde actie: het behandelt metriekgerelateerde objecten als kwantumoperatoren en bouwt zijn Lagrangiaan uit een **Geometric Quantum Relative Entropy** (GQRE).

Drie termen in 120 seconden

Een **kwantumoperator** is een wiskundige regel die op een kwantumtoestand werkt en een grootheid of transformatie voorstelt. GfE neemt aan dat zijn metriekgerelateerde objecten zo kunnen worden behandeld; het artikel vraagt de lezer niet die constructie te reproduceren.
Een **Lagrangiaan** is een compact wiskundig recept voor de dynamica van een theorie. Integreer hem over de ruimtetijd om een actie te verkrijgen en varieer die actie vervolgens om de veldvergelijkingen af te leiden.
De **GQRE** is de modelspecifieke Lagrangiaan die GfE kiest. Ze past het idee van kwantumrelatieve entropie aan om de fysieke metriek te vergelijken met een hogere-orde metriek die door materie en kromming wordt geïnduceerd. Dat ze entropie heet, maakt haar niet tot gewone warmte-entropie.

Relatieve entropie is doorgaans een maat voor de onderscheidbaarheid van twee kansverdelingen of kwantumtoestanden. In GfE gaat de vergelijking tussen de fysieke metriek en een hogere-orde metriek die door materie en kromming wordt geïnduceerd. „Hogere orde” betekent niet dat er extra ruimtetijddimensies zijn. Het betekent dat het model scalaire, vectorachtige en bivectorachtige geometrische sectoren samenbrengt in één uitgebreid object. Een dynamisch **G-veld** verbindt deze componenten en „kleedt” de metriek aan die in zowel het zwaartekracht- als het materiedeel van het model wordt gebruikt. Het raamwerk is zo geconstrueerd dat zijn actie in een limiet van lage energie en geringe kromming reduceert tot de Einstein-Hilbertactie van de algemene relativiteit plus de materieactie.

Die laatste zin is gemakkelijk te ruim te lezen. Einsteins vergelijkingen in een limiet terugkrijgen is een consistentiedoel van het voorstel. Het laat niet zien dat de natuur buiten die limiet de uitgebreidere theorie gebruikt.

De GfE-veldvergelijkingen bevatten ook een dynamische term die het raamwerk een **emergente effectieve donkere-energieterm** noemt. In dit artikel identificeert Bianconi de interne-energiedichtheid van het model met die term. „Effectieve donkere energie” beschrijft haar rol in de vergelijkingen. Het is geen empirische identificatie met de donkere energie die uit kosmologische waarnemingen wordt afgeleid.

Drie verschillende betekenissen van het woord „entropie”

Gewone thermodynamische entropie telt hoeveel microscopische rangschikkingen een macroscopische toestand kunnen opleveren. **Kwantumrelatieve entropie** meet hoe onder-

> scheidbaar twee kwantumtoestanden zijn. De **GQRE** in dit artikel is een modelspecifieke geometrische constructie die door relatieve entropie is geïnspireerd en als zwaartekracht-Lagrangiaan wordt gebruikt. Gelijksoortige namen maken deze grootheden niet onderling verwisselbaar; het artikel leidt de gebruikte verbanden binnen GfE af.

Het exacte thermodynamische resultaat binnen het model

Het artikel werkt eerst op het niveau van het GfE-raamwerk zelf. Voor elke orde en elk type geometrische vrijheidsgraad, geïndexeerd door k, definieert het:

- een lokale k-entropie uit de GQRE;
- een lokale k-energie uit de interne-energiedichtheid van het model;
- een geconjugeerde k-temperatuur;
- en een k-druk.

Deze grootheden gehoorzamen een lokale eerste wet. In de notatie van het artikel:

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

De index k is geen lijst van verschillende stoffen of tijdperken van het universum. In de homogene en isotrope berekening labelt hij vijf bijdragen: één scalaire bijdrage; afzonderlijke tijdachtige en ruimteachtige bijdragen uit de vectorachtige sector; en afzonderlijke tijd-ruimte- en ruimte-ruimtebijdragen uit de bivectorachtige sector. Een scalair heeft geen richtingsindex, de vectorachtige bijdragen onderscheiden temporele van ruimtelijke richtingen, en een bivector is opgebouwd uit paren van richtingen. Elke sector kan zijn eigen temperatuur en druk dragen. De k-temperatuur kan ook positief of negatief zijn, afhankelijk van de overeenkomstige component van het G-veld.

Dit zijn geen temperaturen die je meet door een thermometer nabij een kosmologische horizon te plaatsen. De standaard de-Sittertemperatuur uit de kwantumveldentheorie schaalt met H: de **Gibbons-Hawkingtemperatuur** wordt aan de kosmologische horizon toegekend, terwijl het **Bunch-Daviesvacuüm** de standaard de-Sitterinvariante kwantumtoestand is waarvan de veldcorrelaties de bijbehorende thermische respons geven. Het artikel onderscheidt beide uitdrukkelijk van zijn geometrische k-temperaturen, die in het de-Sittervoorbeeld met H^2 schalen. „Temperatuur” is hier de naam van een thermodynamisch geconjugeerde variabele die uit de entropie- en energiedefinities van het model wordt afgeleid.

De identiteit van de eerste wet is dus een echte afleiding, maar een **intern resultaat**: accepteer de GfE-actie en definities, en deze thermodynamische structuur volgt.

Waarom de Friedmannberekening een benadering is

Om het formalisme om te zetten in een kosmologisch voorbeeld gebruikt het artikel homogene en isotrope Friedmann-Robertson-Walker-ruimtetijden (FRW). „Homogeen" betekent dat het model op grote schaal op elke plaats dezelfde gemiddelde eigenschappen heeft; „isotroop" betekent dat het er in elke richting hetzelfde uitziet. Eén schaalfactor beschrijft hoe afstanden met de tijd groeien, materie wordt als een gladde perfecte vloeistof voorgesteld en de Hubbleparameter H vat de uitdijingssnelheid samen. Dit is een geïdealiseerde achtergrond, geen kaart van afzonderlijke sterrenstelsels.

Maar er is een structurele mismatch. Friedmannuniversa lossen Einsteins vergelijkingen op. In het algemeen lossen ze niet de volledige hogere-orde GfE-vergelijkingen op, die ook de scalaire, vectorachtige en bivectorachtige sectoren en afgeleiden van het G-veld volgen. Einsteins vergelijkingen keren alleen terug in de eerste-orde-, lage-energie- en kleine-krommingslimiet van het voorstel.

Het artikel zegt dit rechtstreeks en behandelt de Friedmannoplossingen als benaderingen. De auteurs vergelijken hun aanpak met een gemiddeldeveldbenadering binnen een uitgebreidere theorie: zo kun je testen in welk regime de benadering betrouwbaar blijft. Het regime vereist lage energie en geringe kromming, samengevat door $l_P H \ll 1$, waarbij l_P de Plancklengte is. Een tweede voorwaarde vereist dat het product van de geïnduceerde hogere-orde metriek en de inverse fysieke hogere-orde metriek positief definiet blijft.

Het resultaat is dus niet: „GfE voorspelt de geschiedenis van ons universum." Het is eerder: **als een GfE-universum voldoende goed wordt benaderd door een vertrouwde Friedmannkosmologie, dan zijn dit de thermodynamische schalingen die de volledige GfE-grootheden opleveren.**

Het resultaat lokaal tegenover totaal

Binnen dat regime hebben de leidende lokale grootheden eenvoudige schalingen:

- de entropiedichtheid van het model schaalt als H^2;
- de energiedichtheid van het model schaalt als H^4;
- voor niet-de-Sitter-Friedmannvoorbeelden worden die op late tijden ongeveer t^{-2} en t^{-4}.

Beide dichtheden dalen dus terwijl het universum uitdijt. Maar dichtheid is niet het totaal.

Wanneer het artikel over het uitdijende ruimtetijdgebied integreert, verandert het groeiende volume het antwoord. In de fysisch vertrouwde voorbeelden met materie- en stralingsdominantie neemt de totale entropie met de tijd toe, ook al daalt de entropie per volume-eenheid. De totale energie blijft niet doorgroeien; op leidende orde nadert ze een constante.

Dit is het nuttigste conceptuele resultaat van het artikel. Lokale ordening of verdunning botst niet automatisch met een globale tweede wet. Een gebied kan lokaal minder entropie per volume-eenheid krijgen terwijl de geïntegreerde entropie groeit, omdat het ruimtetijdvolume sneller groeit.

De berekening bewijst niet dat dit de juiste microscopische verklaring is voor de thermodynamische

tijdspijl in het echte universum. Ze laat zien dat het voorgestelde raamwerk in zijn Friedmannbenadering de splitsing tussen lokaal en globaal zonder tegenspraak kan bevatten.

Een de-Sittervergelijking, met een andere temperatuur

Het artikel beschouwt ook de-Sitterruimte, een geïdealiseerde exponentieel uitdijende ruimtetijd met constante H. Voor één waarnemer integreert het alleen over een eindige **causale diamant**: de overlap van de toekomstige lichtkegel van een eerdere gebeurtenis met de verledenlichtkegel van een latere, die het ruimtetijdgebied begrenst dat tussen beide aan waarnemingen kan deelnemen. Over die diamant schaalt de totale GfE-entropie als H^{-2}, dezelfde H-schaal als de vertrouwde Gibbons-Hawkingentropie. De totale GfE-energie is van orde één in de eenheden van het model.

> **Eén familie van kosmologische achtergronden**
>
> FRW is een familie van homogene en isotrope geometrieën, geen extra plaats. Universa met materie- en stralingsdominantie zijn FRW-gevallen die verschillen door wat het model vult. Ook de-Sitterruimte kan in FRW-vorm worden geschreven, maar stelt een door vacuüm gedomineerd geval voor met constante H en exponentiële uitdijing. De causale diamant is een eindig gebied dat binnen die ruimtetijd voor één waarnemer wordt gekozen; het is geen ander soort universum.

Een overeenkomstige schaal is niet hetzelfde als het afleiden van hetzelfde fysieke object. De bijbehorende GfE-k-temperatuur schaalt als H^2, in tegenstelling tot de standaard de-Sittertemperatuur, die als H schaalt. Het artikel interpreteert dit verschil als aanwijzing dat de k-temperatuur tot de ruimtetijdgeometrie behoort en niet tot kwantumvelden die op die achtergrond leven.

Vervolgens suggereert het dat zo'n temperatuur *mogelijk* met gravitonstraling samenhangt in plaats van met gewone deeltjesemissie. Dat is een toekomstige vraag, geen resultaat van dit artikel. De theorie zou eerst moeten worden gekwantiseerd om vast te stellen of haar temperaturen überhaupt met straling overeenkomen.

Wat dit niet bewijst

- Het laat niet door waarneming zien dat zwaartekracht uit entropie ontstaat.
- Het stelt niet vast dat de effectieve term van het model de donkere energie is die in de kosmologie wordt gemeten.
- Het vervangt de algemene relativiteit niet door een geteste superieure theorie. Algemene relativiteit verschijnt hier als de lage-energie-, kleine-krommingslimiet van het voorstel.
- Het maakt Friedmannkosmologieën niet tot exacte oplossingen van GfE. Ze zijn de benadering die wordt gebruikt om het thermodynamische gedrag van het model te schatten.
- Het leidt geen volledige microscopische telling van de vrijheidsgraden van ruimtetijd af.

- Het levert geen voltooide theorie van kwantumzwaartekracht en detecteert geen gravitonen.
- Het laat niet zien dat negatieve k-temperaturen gewone negatieve thermometerwaarden zijn.

Hoe sterk is het resultaat?

Dit is een collegiaal beoordeeld theoretisch artikel, dus „bewijs" betekent hier iets anders dan in een experiment. De juiste vragen zijn of de definities coherent zijn, of de afleidingen volgen en of de benaderingen worden vermeld en beheerst.

Op dat niveau geeft het artikel een concreet thermodynamisch woordenboek voor GfE en leidt het een structuur van de eerste wet af in plaats van alleen op analogie te leunen. Het maakt ook de grens van de benadering opvallend zichtbaar: de Friedmannoplossingen worden uit de algemene relativiteit geleend, in de GfE-grootheden ingevoegd en beperkt tot een regime waarin de geïnduceerde metriek zich goed blijft gedragen.

De grotere fysieke claims blijven open. Het raamwerk is recent, dit artikel vergelijkt zijn kosmologie niet met gegevens, en enkele van zijn interessantste implicaties — kwantisering, contactgeometrische dynamica en mogelijke gravitonstraling — worden als richtingen voor toekomstig werk gepresenteerd. Interne consistentie is noodzakelijk voor een nieuwe zwaartekrachttheorie. Ze is niet voldoende om te laten zien dat de theorie de natuur beschrijft.

Waarom het ertoe doet

De relatie tussen zwaartekracht en thermodynamica is oud en diep, van zwart-gatentropie tot de temperatuur van de-Sitterruimte. Veel van die resultaten zijn rond horizonten georganiseerd. GfE probeert in plaats daarvan een lokale, volumetrische informatiemaat rechtstreeks op te bouwen uit de relatie tussen materie en geometrie.

Of dat voorstel standhoudt is een open vraag. Maar de thermodynamische oefening legt een nuttig doel bloot voor elke dergelijke theorie: ze moet verklaren hoe lokale structuur en een dalende lokale entropiedichtheid kunnen samengaan met toenemende totale entropie in een uitdijend universum.

Dit artikel toont één wiskundig expliciete manier waarop dat kan gebeuren. De waarde ervan is niet dat het het probleem zwaartekracht-entropie afsluit. Het zet een deel van dat probleem om in vergelijkingen waarvan aannamen, grenzen en volgende tests helder kunnen worden geformuleerd.

Heldere samenvatting

Bianconi leidt een thermodynamische beschrijving af binnen Gravity From Entropy, een voorgesteld raamwerk voor gemodificeerde zwaartekracht dat is gebaseerd op een geometrische kwantumre-

latieve entropie. De lokale entropie-, energie-, temperatuur- en drukvariabelen van het model gehoorzamen een eerste wet. Wanneer de volledige GfE-grootheden worden geëvalueerd op Friedmannbenaderingen met lage energie en geringe kromming, dalen lokale entropie- en energiedichtheden terwijl het universum uitdijt, maar stijgt de totale entropie doordat het ruimtetijdvolume groeit; de totale energie nadert op leidende orde een constante voor voorbeelden met materie- en stralingsdominantie. Een causale diamant in de-Sitterruimte geeft een entropieschaling als H^{-2}, maar een modeltemperatuur die verschilt van de standaard horizontemperatuur. Dit zijn voorwaardelijke wiskundige resultaten binnen GfE, geen waarnemingsbewijs dat zwaartekracht uit entropie ontstaat, geen meting van donkere energie en geen voltooide theorie van kwantumzwaartekracht.

Bronnen

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