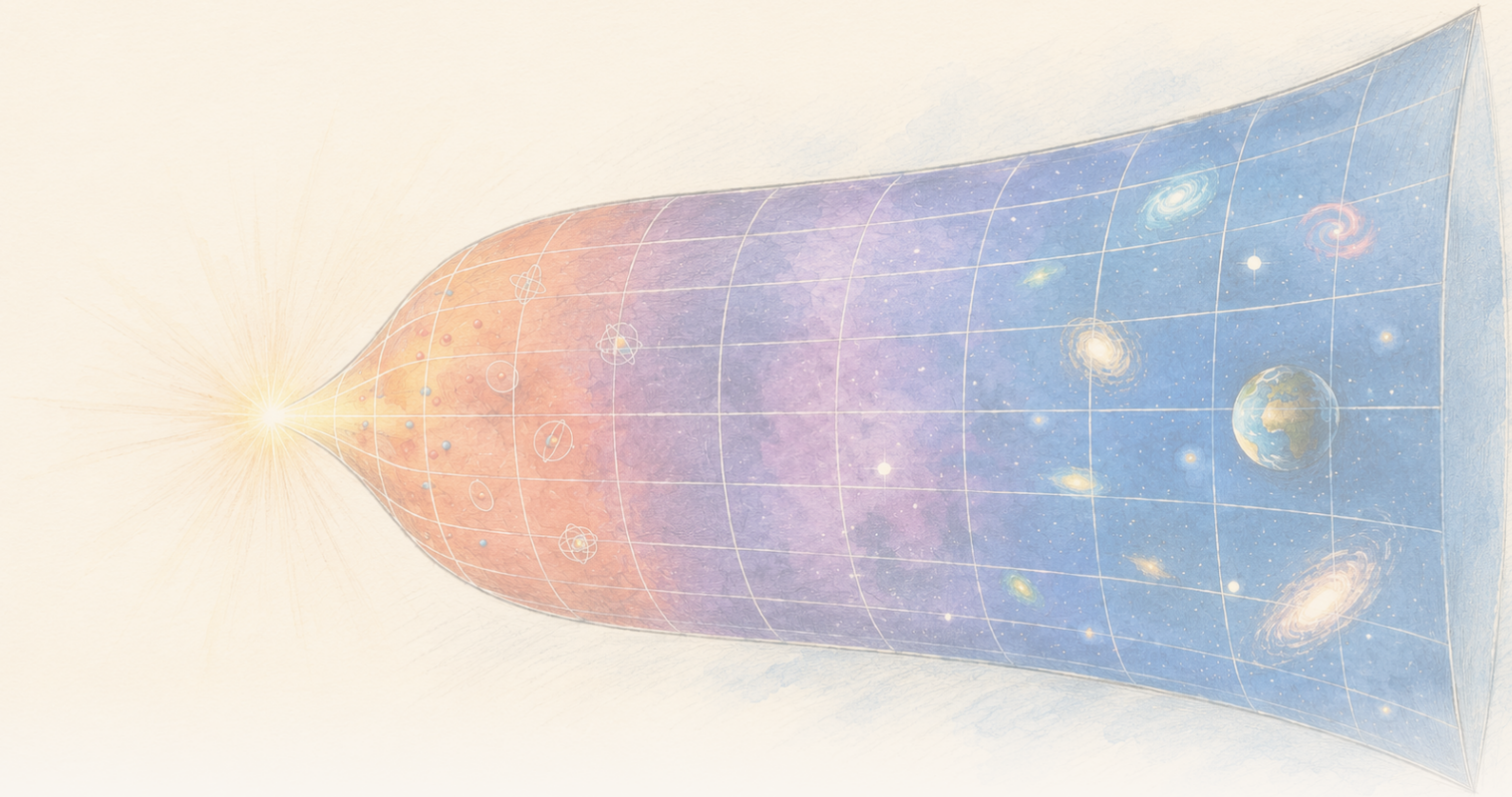

The Clean Paper

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

I en entropibasert gravitasjonsmodell faller den lokale entropitettheten mens totalen vokser

En artikkel i Physical Review D utleder temperaturer, trykk og en første lov innenfor Gravity From Entropy, et foreslått rammeverk for modifisert gravitasjon. I en Friedmann-tilnærming for sen tid og lav krumning faller modellens lokale entropi- og energitetthet, mens utvidelsen får den totale entropien til å øke. Beregningen er internt konkret, men betinget: Friedmann-kosmologier er ikke eksakte løsninger av hele teorien, og dette er ikke observasjonsbevis for at gravitasjon kommer fra entropi, en forklaring på målt mørk energi eller en fullført teori for kvantegravitasjon.

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

Et voksende volum kan senke en tetthet samtidig som totalen øker

Hvis entropitettheten i denne modellen faller når et univers utvider seg, hvordan kan den totale entropien likevel øke?

Forestill deg et ekspanderende univers delt inn i små celler. Mengden av noe i hver celle kan falle samtidig som den samlede mengden i det voksende området øker. Et fall i tetthet og en økning i totalen er ikke motsetninger når selve volumet endrer seg.

Dette elementære regnskapsproblemet ligger i sentrum av en langt mer ambisiøs teoretisk artikkel. I Physical Review D utvikler den matematiske fysikeren Ginestra Bianconi en termodynamisk beskrivelse av **Gravity From Entropy** (GfE), en nylig foreslått modell der gravitasjon kodes gjennom en informasjonsteoretisk relasjon mellom materie og geometri. Her betyr «informasjonsteoretisk» at modellen tar utgangspunkt i et matematisk mål på hvor forskjellige to beskrivelser av geometrien er: den fysiske geometrien og en geometri indusert av materie og krumning.

Artikkelen utleder lokale størrelser kalt k-entropier, k-energier, k-temperaturer og k-trykk. Prefikset k skiller mellom ulike geometriske sektorer i modellen; dette er ikke forskjellige stoffer eller kosmiske epoker. Deres første lov har samme form som i termodynamikken: En endring i energi er knyttet til temperatur ganger endring i entropi, minus trykk ganger endring i volum.

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

Deretter evaluerer artikkelen disse størrelsene i ekspanderende Friedmann-kosmologier: standard idealiserte universer som er homogene og isotrope i stor skala. I et lavenergi- og lavkrumningsregime har eksemplene dominert av materie og stråling avtakende lokal entropi- og energitetthet, men ekspansjonen gir nok volum til at total entropi øker. Total energi nærmer seg en konstant i ledende orden, det vil si når man beholder det dominerende leddet ved lange tider og utelater ledd som avtar raskere etter hvert som tiden går.

Dette er et rent matematisk resultat. Grensen er like viktig: Beregningen gjøres **inne i én foreslått teori**, og Friedmann-kosmologiene som brukes i de konkrete eksemplene, er bare **tilnærmede**, ikke eksakte, løsninger av de fullstendige GfE-ligningene. Disse bevegelsesligningene kommer fra variasjon av den foreslåtte GfE-virkningen og inneholder det dynamiske G-feltet og geometriske sektorer av høyere orden som mangler i de vanlige Friedmann-ligningene. Artikkelen observerer ikke at entropi skaper gravitasjon, identifiserer ikke mørk energi i vårt univers og fullfører ikke en teori for kvantegravitasjon.

Hva Gravity From Entropy antar

Generell relativitet beskriver gravitasjon gjennom romtidens geometri. Materie forteller romtiden hvordan den skal krumme seg, og krumningen forteller materien hvordan den skal bevege seg. GfE

tar utgangspunkt i en annen foreslått virkning: Den behandler metrikkrelaterte objekter som kvanteoperatorer og bygger Lagrange-tettheten av en **geometrisk kvante-relativ entropi** (GQRE).

Tre begreper på 120 sekunder

En **kvanteoperator** er en matematisk regel som virker på en kvantetilstand og representerer en størrelse eller transformasjon. GfE antar at de metrikkrelaterte objektene kan behandles på denne måten; artikkelen krever ikke at leseren gjenskaper konstruksjonen.
En **Lagrange-tetthet** er en kompakt matematisk oppskrift på dynamikken i en teori. Den integreres over romtiden for å gi en virkning, som deretter varieres for å utlede feltligningene.
GQRE er den modellspesifikke Lagrange-tettheten som GfE velger. Den tilpasser ideen om kvante-relativ entropi for å sammenligne den fysiske metrikken med en metrikk av høyere orden indusert av materie og krumning. At den kalles entropi, gjør den ikke til vanlig varmeentropi.

Relativ entropi er vanligvis et mål på hvor forskjellige to sannsynlighetsfordelinger eller kvantetilstander er. I GfE skjer sammenligningen mellom den fysiske metrikken og en metrikk av høyere orden indusert av materie og krumning. «Høyere orden» betyr ikke ekstra romtidsdimensjoner. Det betyr at modellen pakker skalar-, vektor- og bivektorlignende geometriske sektorer inn i ett utvidet objekt. Et dynamisk **G-felt** knytter disse komponentene sammen og «kler» metrikken som brukes i både gravitasjons- og materiedelen av modellen. Rammeverket er konstruert slik at virkningen i en lavenergi- og lavkrumningsgrense går over i Einstein–Hilbert-virkningen i generell relativitet pluss materievirkningen.

Den siste setningen er lett å overtolke. Å gjenvinne Einsteins ligninger i en grense er et konsistensmål for forslaget. Det viser ikke at naturen bruker den større teorien utenfor denne grensen.

Feltligningene i GfE inneholder også et dynamisk ledd som rammeverket kaller et **emergent effektivt mørkenergi-ledd**. I denne artikkelen identifiserer Bianconi modellens interne energitetthet med dette leddet. «Effektiv mørk energi» beskriver rollen i ligningene. Det er ikke en empirisk identifikasjon med den mørke energien som utledes fra kosmologiske observasjoner.

Tre ulike betydninger av ordet «entropi»

Vanlig termodynamisk entropi teller hvor mange mikroskopiske ordninger som kan gi en makroskopisk tilstand. **Kvante-relativ entropi** måler hvor skjelnbare to kvantetilstander er. **GQRE** i denne artikkelen er en modellspesifikk geometrisk konstruksjon inspirert av relativ entropi og brukt som gravitasjonens Lagrange-tetthet. Lignende navn gjør ikke størrelsene utbyttbare; artikkelen utleder forbindelsene den bruker inne i GfE.

Det eksakte termodynamiske resultatet inne i modellen

Artikkelen arbeider først på nivået til selve GfE-rammeverket. For hver orden og type geometrisk frihetsgrad, indeksert med k, definerer den:

- en lokal k-entropi fra GQRE;
- en lokal k-energi fra modellens interne energitetthet;
- en konjugert k-temperatur;
- og et k-trykk.

Disse størrelsene oppfyller en lokal første lov. I artikkelens notasjon:

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

Indeksen k er ikke en liste over ulike stoffer eller epoker i universet. I den homogene og isotrope beregningen merker den fem oppføringer: én skalaroppføring; separate tids- og romlige oppføringer fra den vektorlignende sektoren; og separate tid–rom- og rom–rom-oppføringer fra den bivektorlignende sektoren. En skalar har ingen retningsindeks, de vektorlignende oppføringene skiller tidsretningen fra romretningene, og en bivektor bygges av par av retninger. Hver sektor kan ha sin egen temperatur og sitt eget trykk. K-temperaturen kan også være positiv eller negativ, avhengig av den tilsvarende komponenten i G-feltet.

Dette er ikke temperaturer som måles ved å plassere et termometer nær en kosmologisk horisont. Standardtemperaturen fra kvantefeltteori i de Sitter-rom skalerer med H: **Gibbons–Hawking-temperaturen** tilordnes den kosmologiske horisonten, mens **Bunch–Davies-vakuumet** er den vanlige de Sitter-invariante kvantetilstanden hvis feltkorrelasjoner gir den tilhørende termiske responsen. Artikkelen skiller uttrykkelig begge fra de geometriske k-temperaturene, som skalerer med H^2 i de Sitter-eksemplet. Her betegner «temperatur» en termodynamisk konjugert variabel utledet fra modellens definisjoner av entropi og energi.

Identiteten i den første loven er altså en virkelig utledning, men et **internt resultat**: Godta GfE-virkningen og definisjonene, og denne termodynamiske strukturen følger.

Hvorfor Friedmann-beregningen er en tilnærming

For å gjøre formalismen til et kosmologisk eksempel bruker artikkelen homogene og isotrope Friedmann–Robertson–Walker-romtider (FRW). «Homogen» betyr at modellen i stor skala har de samme gjennomsnittlige egenskapene overalt; «isotrop» betyr at den ser lik ut i alle retninger. Én skalafaktor beskriver hvordan avstander vokser med tiden, materie fremstilles som en jevn perfekt væske, og Hubble-parameteren H oppsummerer ekspansjonshastigheten. Dette er en idealisert bakgrunn, ikke et kart over enkeltgalakser.

Men det finnes en strukturell uoverensstemmelse. Friedmann-universer løser Einsteins ligninger.

De løser generelt ikke de fullstendige GfE-ligningene av høyere orden, som også følger skalar-, vektor- og bivektorlignende sektorer og deriverte av G-feltet. Einsteins ligninger kommer bare tilbake i forslagets førsteordensgrense med lav energi og liten krumning.

Artikkelen sier dette direkte og behandler Friedmann-løsningene som tilnærminger, i en fremgangsmåte som sammenlignes med å sette en middelfeltløsning inn i en mer fullstendig teori for å teste hvor tilnærmingen fortsatt er pålitelig. Regimet krever lav energi og liten krumning, oppsummert som $l_P H \ll 1$, der l_P er Planck-lengden. En annen betingelse krever at produktet av den induserte metrikken av høyere orden og inversen til den fysiske metrikken av høyere orden forblir positivt definit.

Resultatet er derfor ikke «GfE forutsier historien til universet vårt». Det er nærmere: **Hvis et GfE-univers tilnærmes godt nok av en kjent Friedmann-kosmologi, er dette de termodynamiske skaleringene de fullstendige GfE-størrelsene gir.**

Resultatet for lokalt mot totalt

Innenfor dette regimet har de ledende lokale størrelsene enkle skaleringer:

- modellens entropitetthet skalerer som H^2;
- modellens energitetthet skalerer som H^4;
- for Friedmann-eksempler som ikke er de Sitter, blir disse ved sene tider omtrent t^{-2} og t^{-4}.

Begge tetthetene faller derfor når universet utvider seg. Men tetthet er ikke totalen.

Når artikkelen integrerer over det ekspanderende romtidsområdet, endrer det voksende volumet svaret. For de fysisk velkjente eksemplene dominert av materie og stråling øker total entropi med tiden selv om entropien per volumenhet faller. Total energi fortsetter ikke å vokse; i ledende orden nærmer den seg en konstant.

Dette er artikkelens mest nyttige konseptuelle resultat. Lokal ordning eller fortynning trenger ikke å stå i konflikt med en global andre lov. Et område kan bli lokalt mindre entropirikt per volumenhet samtidig som den integrerte entropien vokser fordi romtidsvolumet vokser raskere.

Beregningen beviser ikke at dette er den riktige mikroskopiske forklaringen på den termodynamiske tidspilen i det virkelige universet. Den viser at det foreslåtte rammeverket kan romme skillet mellom lokalt og globalt uten selvmotsigelse i Friedmann-tilnærmingen.

En de Sitter-sammenligning, med en annen temperatur

Artikkelen vurderer også de Sitter-rom, en idealisert eksponentielt ekspanderende romtid med konstant H. For én observatør integrerer den bare over en endelig **kausal diamant**: overlappet mellom den fremtidige lyskjeglen fra en tidligere hendelse og den fortidige lyskjeglen til en senere hendelse,

som avgrenser romtidsområdet som kan delta i observasjoner mellom dem. Over denne diamanten skalerer den totale GfE-entropien som H^{-2}, samme H-skalering som den kjente Gibbons–Hawking-entropien. Den totale GfE-energien er av størrelsesorden én i modellens enheter.

> **Én familie av kosmologiske bakgrunner**
>
> FRW er en familie av homogene og isotrope geometrier, ikke ett ekstra sted. Materie- og strålingsdominerte universer er FRW-tilfeller som skiller seg ved hva modellen inneholder. De Sitter-rom kan også skrives i FRW-form, men representerer et vakuumdominert tilfelle med konstant H og eksponentiell ekspansjon. Den kausale diamanten er et endelig område valgt inne i denne romtiden for én observatør; den er ikke en annen type univers.

Lik skalering er ikke det samme som å utlede det samme fysiske objektet. Den tilhørende GfE-k-temperaturen skalerer som H^2, i motsetning til standardtemperaturen i de Sitter-rom, som skalerer som H. Artikkelen tolker forskjellen som et tegn på at k-temperaturen tilhører romtidens geometri snarere enn kvantefelt som lever på bakgrunnen.

Deretter foreslår den at en slik temperatur *kan* være knyttet til graviton-stråling snarere enn vanlig partikkelutslipp. Dette er et fremtidig spørsmål, ikke et resultat av artikkelen. Teorien må først kvantiseres før man kan fastslå om temperaturene i det hele tatt tilsvarer stråling.

Hva dette ikke beviser

- Det viser **ikke** observasjonelt at gravitasjon oppstår fra entropi.
- Det fastslår **ikke** at modellens effektive ledd er den mørke energien som måles i kosmologien.
- Det erstatter **ikke** generell relativitet med en testet, bedre teori. Generell relativitet opptrer her som forslagets lavenergi- og lavkrumningsgrense.
- Det gjør **ikke** Friedmann-kosmologier til eksakte løsninger av GfE. De er tilnærmingen som brukes til å anslå modellens termodynamiske oppførsel.
- Det utleder **ikke** en fullstendig mikroskopisk telling av romtidens frihetsgrader.
- Det gir **ikke** en ferdig teori for kvantegravitasjon og oppdager ikke gravitoner.
- Det viser **ikke** at negative k-temperaturer er vanlige negative termometeravlesninger.

Hvor sterkt er resultatet?

Dette er en fagfellevurdert teoretisk artikkel, så «bevis» betyr noe annet her enn i et eksperiment. De riktige spørsmålene er om definisjonene er sammenhengende, om utledningene følger, og om tilnærmingene er tydelig oppgitt og kontrollert.

På dette nivået gir artikkelen en konkret termodynamisk ordbok for GfE og utleder en struktur for den første loven i stedet for bare å bygge på analogi. Den gjør også grensen for tilnærmingen uvanlig

synlig: Friedmann-løsningene lånes fra generell relativitet, settes inn i GfE-størrelsene og begrenses til et regime der den induserte metrikken forblir veloppført.

De større fysiske påstandene er fortsatt åpne. Rammeverket er nytt, artikkelen sammenligner ikke kosmologien med data, og noen av de mest interessante implikasjonene — kvantisering, kontaktgeometrisk dynamikk og mulig graviton-stråling — presenteres som retninger for fremtidig arbeid. Intern konsistens er nødvendig for en ny gravitasjonsteori. Det er ikke nok til å vise at teorien beskriver naturen.

Hvorfor det er viktig

Forbindelsen mellom gravitasjon og termodynamikk er gammel og dyp, fra entropien til sorte hull til temperaturen i de Sitter-rom. Mange av disse resultatene organiseres rundt horisonter. GfE forsøker i stedet å bygge et lokalt, volumetrisk informasjonsmål direkte fra forholdet mellom materie og geometri.

Om forslaget overlever, er et åpent spørsmål. Men den termodynamiske øvelsen synliggjør et nyttig mål for enhver slik teori: Den bør forklare hvordan lokal struktur og fallende lokal entropitetthet kan sameksistere med økende total entropi i et ekspanderende univers.

Denne artikkelen viser én matematisk eksplisitt måte dette kan skje på. Verdien er ikke at den lukker problemet om gravitasjon og entropi. Den gjør en del av problemet om til ligninger hvis antakelser, grenser og neste tester kan uttrykkes klart.

Kort oppsummert

Bianconi utleder en termodynamisk beskrivelse innenfor Gravity From Entropy, et foreslått rammeverk for modifisert gravitasjon basert på en geometrisk kvante-relativ entropi. Modellens lokale variabler for entropi, energi, temperatur og trykk oppfyller en første lov. Når de fullstendige GfE-størrelsene evalueres på Friedmann-tilnærminger med lav energi og liten krumning, faller lokale entropi- og energitettheter mens universet utvider seg, samtidig som total entropi øker fordi romtidsvolumet vokser; total energi nærmer seg en konstant i ledende orden i eksemplene dominert av materie og stråling. En kausal diamant i de Sitter-rom gir en entropi som skalerer som H^{-2}, men en modelltemperatur som skiller seg fra vanlig horisonttemperatur. Dette er betingede matematiske resultater inne i GfE, ikke observasjonsbevis for at gravitasjon kommer fra entropi, en måling av mørk energi eller en fullført teori for kvantegravitasjon.

Kilder

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