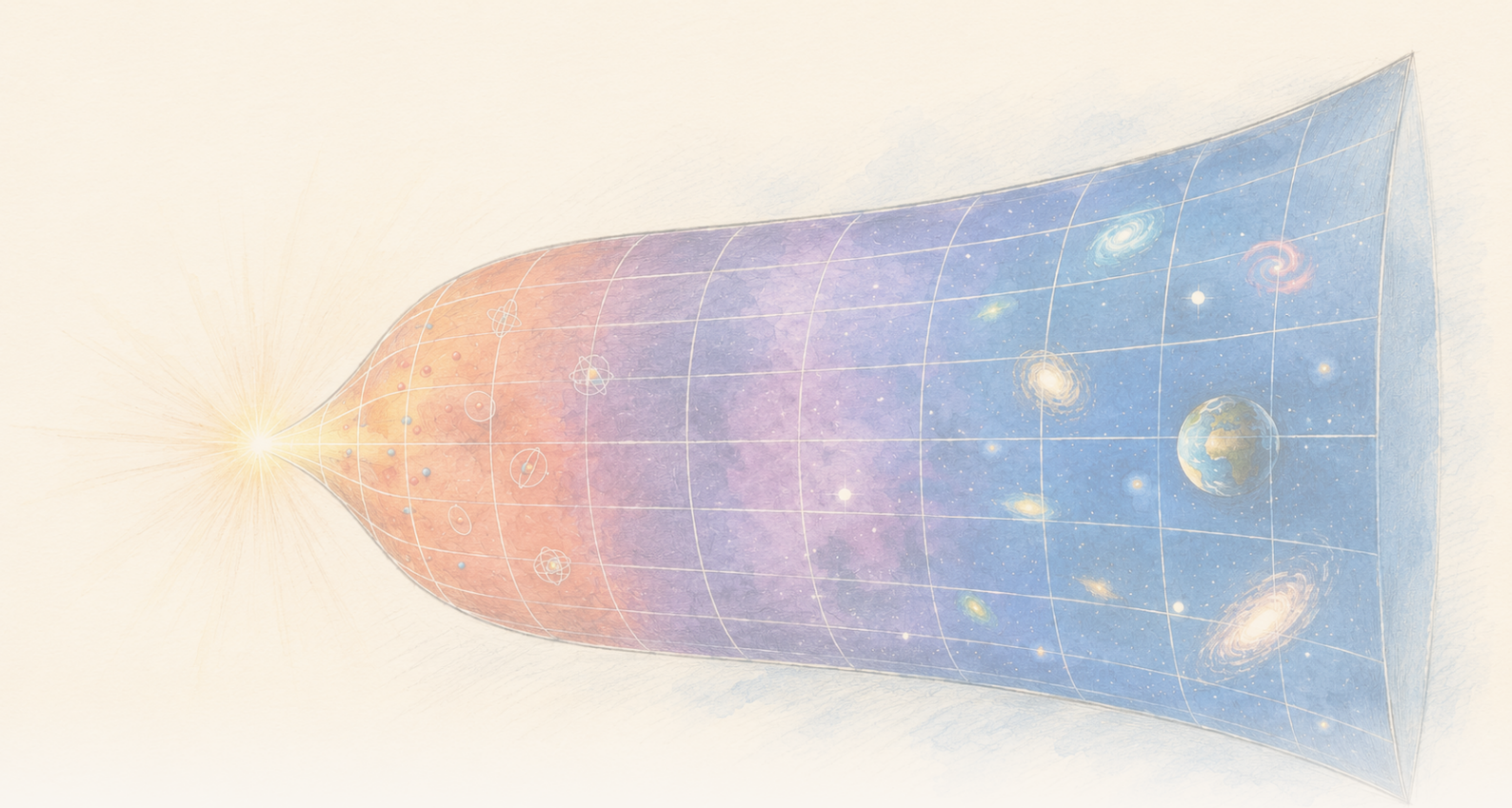

The Clean Paper

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

Inden for en entropibaseret gravitationsmodel falder den lokale entropitæthed, mens totalen stiger

En artikel i Physical Review D udleder temperaturer, tryk og en første lov inden for Gravity From Entropy, en foreslået ramme for modificeret gravitation. I en sen, lavkrumnings-Friedmann-tilnærmelse falder modellens lokale entropi- og energitætheder, mens ekspansionen får den samlede entropi til at stige. Beregningen er internt konkret, men betinget: Friedmann-kosmologier er ikke eksakte løsninger af den fulde teori, og dette er ikke observationsbevis for, at gravitation kommer fra entropi, en forklaring på målt mørk energi eller en færdig teori for kvantegravitation.

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 volumen kan sænke en tæthed, samtidig med at totalen stiger

Hvis entropitætheden i denne model falder, når et univers udvider sig, hvordan kan den samlede entropi så alligevel stige?

Forestil dig et ekspanderende univers opdelt i små celler. Mængden af noget i hver celle kan falde, samtidig med at den samlede mængde i det voksende område stiger. Et fald i tæthed og en stigning i totalen er ikke modsætninger, når selve volumenet ændrer sig.

Dette enkle regnestykke står i centrum for en langt mere ambitiøs teoretisk artikel. I Physical Review D udvikler den matematiske fysiker Ginestra Bianconi en termodynamisk beskrivelse af **Gravity From Entropy** (GfE), en nyligt foreslået model, hvor gravitation kodes gennem en informationsteoretisk relation mellem stof og geometri. Her betyder »informationsteoretisk«, at modellen tager udgangspunkt i et matematisk mål for, hvor forskellige to beskrivelser af geometrien er: den fysiske geometri og en geometri induceret af stof og krumning.

Artiklen udleder lokale størrelser kaldet k-entropier, k-energier, k-temperaturer og k-tryk. Præfikset k skelner mellem forskellige geometriske sektorer i modellen; det er ikke forskellige stoffer eller kosmiske epoker. Deres første lov har samme matematiske struktur som i termodynamikken: En ændring i energi er knyttet til temperatur gange ændringen i entropi minus tryk gange ændringen i volumen.

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

Derefter evaluerer artiklen disse størrelser i ekspanderende Friedmann-kosmologier: standardiserede idealuniverser, der er homogene og isotrope i stor skala. I et lavenergi- og lavkrumningsregime har eksemplerne domineret af stof og stråling faldende lokal entropi- og energitæthed, men ekspansionen giver nok volumen til, at den samlede entropi stiger. Den samlede energi nærmer sig en konstant i ledende orden, det vil sige, når man beholder det dominerende led ved sene tider og udelader led, som falder hurtigere, efterhånden som tiden går.

Dette er et rent matematisk resultat. Grænsen er lige så vigtig: Beregningen udføres **inden for én foreslået teori**, og de Friedmann-kosmologier, der bruges i de konkrete eksempler, er kun **tilnærmede**, ikke eksakte, løsninger af de fulde GfE-ligninger. Disse bevægelsesligninger kommer fra variation af den foreslåede GfE-virkning og indeholder det dynamiske G-felt og geometriske sektorer af højere orden, som mangler i de sædvanlige Friedmann-ligninger. Artiklen observerer ikke, at entropi skaber gravitation, identificerer ikke mørk energi i vores univers og fuldender ikke en teori for kvantegravitation.

Hvad Gravity From Entropy antager

Generel relativitet beskriver gravitation gennem rumtidens geometri. Stof fortæller rumtiden, hvordan den skal krumme, og krumningen fortæller stoffet, hvordan det skal bevæge sig. GfE tager udgangspunkt i en anden foreslået virkning: Den behandler metrikrelaterede objekter som kvanteoperatorer og bygger Lagrange-tætheden af en **geometrisk kvante-relativ entropi** (GQRE).

Tre begreber på 120 sekunder

En **kvanteoperator** er en matematisk regel, der virker på en kvantetilstand og repræsenterer en størrelse eller transformation. GfE antager, at de metrikrelaterede objekter kan behandles på denne måde; artiklen kræver ikke, at læseren rekonstruerer opbygningen.
En **Lagrange-tæthed** er en kompakt matematisk opskrift på dynamikken i en teori. Den integreres over rumtiden for at give en virkning, som derefter varieres for at udlede feltligningerne.
GQRE er den modelspecifikke Lagrange-tæthed, som GfE vælger. Den tilpasser idéen om kvante-relativ entropi til at sammenligne den fysiske metrik med en metrik af højere orden induceret af stof og krumning. At den kaldes entropi, gør den ikke til almindelig varmeentropi.

Relativ entropi er normalt et mål for, hvor forskellige to sandsynlighedsfordelinger eller kvantetilstande er. I GfE sker sammenligningen mellem den fysiske metrik og en metrik af højere orden induceret af stof og krumning. »Højere orden« betyder ikke ekstra rumtidsdimensioner. Det betyder, at modellen pakker skalar-, vektor- og bivektorlignende geometriske sektorer ind i ét udvidet objekt. Et dynamisk **G-felt** knytter disse komponenter sammen og »klæder« den metrik, der bruges i både gravitations- og stofdelen af modellen. Rammen er konstrueret, så virkningen i en lavenergi- og lavkrumningsgrænse går over i Einstein–Hilbert-virkningen i generel relativitet plus stofvirkningen.

Den sidste sætning er let at overfortolke. At genvinde Einsteins ligninger i en grænse er et konsistensmål for forslaget. Det viser ikke, at naturen bruger den større teori uden for denne grænse.

Feltligningerne i GfE indeholder også et dynamisk led, som rammen kalder et **emergent effektivt mørkenergi-led**. I denne artikel identificerer Bianconi modellens interne energitæthed med dette led. »Effektiv mørk energi« beskriver rollen i ligningerne. Det er ikke en empirisk identifikation med den mørke energi, der udledes af kosmologiske observationer.

Tre forskellige betydninger af ordet »entropi«

Almindelig termodynamisk entropi tæller, hvor mange mikroskopiske arrangementer der kan give en makroskopisk tilstand. **Kvante-relativ entropi** måler, hvor skelnelige to kvantetilstande er. **GQRE** i denne artikel er en modelspecifik geometrisk konstruktion inspireret af relativ entropi og brugt som gravitationens Lagrange-tæthed. Lignende navne gør ikke størrelserne ombyttelige; artiklen udleder de forbindelser, den bruger inden for GfE.

Det eksakte termodynamiske resultat inden for modellen

Artiklen arbejder først på niveauet for selve GfE-rammen. For hver orden og type geometrisk frihedsgrad, indekseret med k, definerer den:

- en lokal k-entropi fra GQRE;
- en lokal k-energi fra modellens interne energitæthed;
- en konjugeret k-temperatur;
- og et k-tryk.

Disse størrelser opfylder en lokal første lov. I artiklens notation:

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

Indekset k er ikke en liste over forskellige stoffer eller epoker i universet. I den homogene og isotrope beregning mærker det fem poster: én skalarpost; separate tids- og rumlige poster fra den vektorlignende sektor; og separate tid–rum- og rum–rum-poster fra den bivektorlignende sektor. En skalar har intet retningsindeks, de vektorlignende poster skelner tidsretningen fra rumretningerne, og en bivektor bygges af par af retninger. Hver sektor kan have sin egen temperatur og sit eget tryk. K-temperaturen kan også være positiv eller negativ afhængigt af den tilsvarende komponent i G-feltet.

Det er ikke temperaturer, der måles ved at placere et termometer nær en kosmologisk horisont. Standardtemperaturen fra kvantefeltteori i de Sitter-rum skalerer med H: **Gibbons–Hawking-temperaturen** tilordnes den kosmologiske horisont, mens **Bunch–Davies-vakuummet** er den sædvanlige de Sitter-invariante kvantetilstand, hvis feltkorrelationer giver den tilhørende termiske respons. Artiklen skelner udtrykkeligt begge fra de geometriske k-temperaturer, som skalerer med H^2 i de Sitter-eksemplet. Her betegner »temperatur« en termodynamisk konjugeret variabel udledt af modellens definitioner af entropi og energi.

Identiteten i den første lov er altså reelt udledt, men gælder **inden for selve modellen**: Hvis man accepterer GfE-virkningen og definitionerne, følger denne termodynamiske struktur.

Hvorfor Friedmann-beregningen er en tilnærmelse

For at gøre formalismen til et kosmologisk eksempel bruger artiklen homogene og isotrope Friedmann–Robertson–Walker-rumtider (FRW). »Homogen« betyder, at modellen i stor skala har de samme gennemsnitlige egenskaber overalt; »isotrop« betyder, at den ser ens ud i alle retninger. Én skalafaktor beskriver, hvordan afstande vokser med tiden, stof fremstilles som en jævn perfekt væske, og Hubble-parameteren H opsummerer ekspansionshastigheden. Dette er en idealiseret baggrund, ikke et kort over enkelte galakser.

Men der er en strukturel uoverensstemmelse. Friedmann-universer løser Einsteins ligninger. De løser generelt ikke de fulde GfE-ligninger af højere orden, som også følger skalar-, vektor- og bivek-

torlignende sektorer og afledte af G-feltet. Einsteins ligninger kommer kun tilbage i forslagets førsteordensgrænse med lav energi og lille krumning.

Artiklen siger dette direkte og behandler Friedmann-løsningerne som tilnærmelser i en fremgangsmåde, der sammenlignes med at sætte en middelfeltløsning ind i en mere fuldstændig teori for at teste, hvor tilnærmelsen stadig er pålidelig. Regimet kræver lav energi og lille krumning, opsummeret som $l_P H \ll 1$, hvor l_P er Planck-længden. En anden betingelse kræver, at produktet af den inducerede metrik af højere orden og inversen af den fysiske metrik af højere orden forbliver positivt definit.

Resultatet er derfor ikke »GfE forudsiger historien om vores univers«. Det er nærmere: **Hvis et GfE-univers tilnærmes godt nok af en kendt Friedmann-kosmologi, er dette de termodynamiske skaleringer, som de fulde GfE-størrelser giver.**

Resultatet for lokalt kontra totalt

Inden for dette regime har de ledende lokale størrelser enkle skaleringer:

- modellens entropitæthed skalerer som H^2;
- modellens energitæthed skalerer som H^4;
- for Friedmann-eksempler, der ikke er de Sitter, bliver disse ved sene tider omtrent t^{-2} og t^{-4}.

Begge tætheder falder derfor, når universet udvider sig. Men tæthed er ikke totalen.

Når artiklen integrerer over det ekspanderende rumtidsområde, ændrer det voksende volumen svaret. For de fysisk velkendte eksempler domineret af stof og stråling stiger den samlede entropi med tiden, selv om entropien pr. volumenenhed falder. Den samlede energi fortsætter ikke med at stige; i ledende orden nærmer den sig en konstant.

Det er artiklens mest nyttige begrebsmæssige resultat. Lokal orden eller fortynding behøver ikke at stå i konflikt med en global anden lov. Et område kan lokalt blive mindre entropirigt pr. volumenenhed, samtidig med at den integrerede entropi vokser, fordi rumtidsvolumenet vokser hurtigere.

Beregningen beviser ikke, at dette er den rigtige mikroskopiske forklaring på den termodynamiske tidspil i det virkelige univers. Den viser, at den foreslåede ramme kan rumme skellet mellem lokalt og globalt uden selvmodsigelse i Friedmann-tilnærmelsen.

En de Sitter-sammenligning med en anden temperatur

Artiklen vurderer også de Sitter-rum, en idealiseret eksponentielt ekspanderende rumtid med konstant H. For én observatør integrerer den kun over en endelig **kausal diamant**: overlapningen mellem den fremtidige lyskegle fra en tidligere hændelse og den fortidige lyskegle til en senere hændelse, som afgrænser det rumtidsområde, der kan deltage i observationer mellem dem. Over

denne diamant skalerer den samlede GfE-entropi som H^{-2}, samme H-skalering som den kendte Gibbons–Hawking-entropi. Den samlede GfE-energi er af størrelsesorden én i modellens enheder.

> **Én familie af kosmologiske baggrunde**
>
> FRW er en familie af homogene og isotrope geometrier, ikke et ekstra sted. Stof- og strålingsdominerede universer er FRW-tilfælde, der adskiller sig ved, hvad modellen indeholder. De Sitter-rum kan også skrives i FRW-form, men repræsenterer et vakuumdomineret tilfælde med konstant H og eksponentiel ekspansion. Den kausale diamant er et endeligt område valgt inden i denne rumtid for én observatør; den er ikke en anden type univers.

Ens skalering er ikke det samme som at udlede det samme fysiske objekt. Den tilhørende GfE-k-temperatur skalerer som H^2, i modsætning til standardtemperaturen i de Sitter-rum, som skalerer som H. Artiklen fortolker forskellen som et tegn på, at k-temperaturen tilhører rumtidens geometri snarere end kvantefelter, der lever på baggrunden.

Derefter foreslår den, at en sådan temperatur *kan* være knyttet til graviton-stråling snarere end almindelig partikeludsendelse. Det er et fremtidigt spørgsmål, ikke et resultat af artiklen. Teorien skal først kvantiseres, før man kan fastslå, om temperaturerne overhovedet svarer til stråling.

Hvad dette ikke beviser

- Det viser **ikke** observationsmæssigt, at gravitation opstår af entropi.
- Det fastslår **ikke**, at modellens effektive led er den mørke energi, der måles i kosmologien.
- Det erstatter **ikke** generel relativitet med en testet, bedre teori. Generel relativitet optræder her som forslagets lavenergi- og lavkrumningsgrænse.
- Det gør **ikke** Friedmann-kosmologier til eksakte løsninger af GfE. De er den tilnærmelse, der bruges til at anslå modellens termodynamiske adfærd.
- Det udleder **ikke** en fuldstændig mikroskopisk optælling af rumtidens frihedsgrader.
- Det giver **ikke** en færdig teori for kvantegravitation og opdager ikke gravitoner.
- Det viser **ikke**, at negative k-temperaturer er almindelige negative termometeraflæsninger.

Hvor stærkt er resultatet?

Dette er en peer-reviewet teoretisk artikel, så »evidens« betyder noget andet her end i et eksperiment. De rigtige spørgsmål er, om definitionerne hænger sammen, om udledningerne følger, og om tilnærmelserne er tydeligt angivet og kontrolleret.

På dette niveau giver artiklen en konkret termodynamisk ordbog for GfE og udleder en struktur for den første lov i stedet for blot at bygge på analogi. Den gør også grænsen for tilnærmelsen usædvanligt synlig: Friedmann-løsningerne lånes fra generel relativitet, indsættes i GfE-størrelserne og

begrænses til et regime, hvor den inducerede metrik forbliver velopført.

De større fysiske påstande er stadig åbne. Rammen er ny, artiklen sammenligner ikke kosmologien med data, og nogle af de mest interessante implikationer — kvantisering, kontaktgeometrisk dynamik og mulig graviton-stråling — præsenteres som retninger for fremtidigt arbejde. Intern konsistens er nødvendig for en ny gravitationsteori. Det er ikke nok til at vise, at teorien beskriver naturen.

Hvorfor det betyder noget

Forbindelsen mellem gravitation og termodynamik er gammel og dyb, fra sorte hullers entropi til temperaturen i de Sitter-rum. Mange af disse resultater organiseres omkring horisonter. GfE forsøger i stedet at bygge et lokalt, volumetrisk informationsmål direkte fra forholdet mellem stof og geometri.

Om forslaget overlever, er et åbent spørgsmål. Men den termodynamiske øvelse synliggør et nyttigt mål for enhver sådan teori: Den bør forklare, hvordan lokal struktur og faldende lokal entropitæthed kan sameksistere med stigende samlet entropi i et ekspanderende univers.

Denne artikel viser én matematisk eksplicit måde, det kan ske på. Værdien er ikke, at den lukker problemet om gravitation og entropi. Den gør en del af problemet til ligninger, hvis antagelser, grænser og næste test kan udtrykkes klart.

Kort fortalt

Bianconi udleder en termodynamisk beskrivelse inden for Gravity From Entropy, en foreslået ramme for modificeret gravitation baseret på en geometrisk kvante-relativ entropi. Modellens lokale variabler for entropi, energi, temperatur og tryk opfylder en første lov. Når de fulde GfE-størrelser evalueres på Friedmann-tilnærmelser med lav energi og lille krumning, falder lokale entropi- og energitætheder, mens universet udvider sig, samtidig med at den samlede entropi stiger, fordi rumtidsvolumenet vokser; den samlede energi nærmer sig en konstant i ledende orden i eksemplerne domineret af stof og stråling. En kausal diamant i de Sitter-rum giver en entropi, der skalerer som H^{-2}, men en modeltemperatur, der adskiller sig fra den sædvanlige horisonttemperatur. Det er betingede matematiske resultater inden for GfE, ikke observationsbevis for, at gravitation kommer fra entropi, en måling af mørk energi eller en fuldendt teori for kvantegravitation.

Kilder

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